



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

EDWILSON MEDEIROS DOS SANTOS

**APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NA PREVISÃO DE  
ESCORREGAMENTOS NO MUNICÍPIO DE CAMARAGIBE, REGIÃO  
METROPOLITANA DO RECIFE**

Recife  
2020

EDWILSON MEDEIROS DOS SANTOS

**APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NA PREVISÃO DE  
ESCORREGAMENTOS NO MUNICÍPIO DE CAMARAGIBE, REGIÃO  
METROPOLITANA DO RECIFE**

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

**Área de concentração:** Regionalização e Análise Regional.

**Linha de Pesquisa:** Dinâmica superficial e climática das paisagens naturais tropicaisúmidas e semiáridas

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

Recife  
2020

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

S237a Santos, Edwilson Medeiros dos.  
Aplicação do modelo SHALSTAB na previsão de escorregamentos no município de Camaragibe, Região Metropolitana do Recife / Edwilson Medeiros dos Santos. – 2020.  
98 f. : il. ; 30 cm.

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

1. Geografia. 2. Escorregamentos. 3. Previsão. 4. Modelos matemáticos.  
5. Camaragibe (PE). I. Listo, Fabrizio de Luiz Rosito (Orientador). II.  
Título.

910 CDD (22. ed.)

(BCFCH2020-098)

EDWILSON MEDEIROS DOS SANTOS

**APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NA PREVISÃO DE  
ESCORREGAMENTOS NO MUNICÍPIO DE CAMARAGIBE, REGIÃO  
METROPOLITANA DO RECIFE**

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

Aprovada em: 20/02/2020.

**BANCA EXAMINADORA**

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

Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes (Examinador Externo)  
Universidade de Brasília

Profa. Dra. Janaína Barbosa da Silva (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Campina Grande

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, em especial aos meus pais, Marly e Edmilson, e à minha esposa, Katarini, que sempre esteve ao meu lado me dando o apoio necessário nos momentos mais complicados.

Ao Prof. Fabrizio Listo que apostou no meu projeto e compartilhou um pouco do seu conhecimento para que eu alcançasse o título de mestre.

À Defesa Civil do município de Camaragibe, em especial a Eng. Cintia Silva que nos ajudou durante os trabalhos de campo e no fornecimento dos dados necessários para a elaboração deste trabalho.

À CONDEPE/FIDEM pelo fornecimento de dados essenciais para a elaboração deste trabalho.

Aos professores Roberto, Janaína, Talitha e Danielle, que aceitaram formar minha banca, e ao meu amigo e Prof. Lucas, que infelizmente não pode participar como avaliador, mas que me ensinou muita coisa sobre paisagem.

Aos meus colegas do mestrado Joaquim, John, Tawana, Emanuelle, Keila, Linaldo, Edilson e tantos outros que proporcionaram momentos de alegria durante esses últimos dois anos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro recebido durante o período de vigência da bolsa, importante para o desenvolvimento desta dissertação.

## RESUMO

A ocupação de áreas de risco (ex. encostas) é uma das características do processo de urbanização da Região Metropolitana do Recife (RMR). Em função disso, é cada vez mais frequente, sobretudo nos períodos mais chuvosos, a ocorrência de escorregamentos com muitas perdas econômicas e sociais, destacando-se o município de Camaragibe. Devido a ocorrência acelerada de processos de movimento de massa, a utilização de modelos de previsão consolida-se como uma ferramenta importante na avaliação de áreas suscetíveis a ocorrência destes processos. Destes, o SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Model*) é um modelo matemático determinístico, que incorpora propriedades físicas do solo e parâmetros topográficos na previsão espacial dos escorregamentos. Assim, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos no município de Camaragibe-PE por meio da aplicação deste modelo. Especificamente, objetivou-se: mapear as cicatrizes de escorregamentos ocorridos no município; analisar a influência de parâmetros topográficos e antrópicos para a ocorrência dos escorregamentos; elaborar cenários de suscetibilidade e, posteriormente, validá-los. Os procedimentos utilizados foram: (1) a elaboração de um mapa de inventário de escorregamentos; (2) a correlação dos parâmetros topográficos (declividade, curvatura, aspecto e área de contribuição) e dos parâmetros antrópicos (uso da terra); (3) o cálculo dos índices Frequência de Distribuição (FD) e Concentração de Cicatrizes (CC); (4) a geração de cenários de suscetibilidade e (5) a validação destes cenários. Foram mapeadas 151 cicatrizes de escorregamentos. Destas, 93% localizaram-se em áreas urbanas; cerca de 87% em encostas de alta declividade; 50% em formas côncavas; 31% em encostas orientadas para sudeste e 90% nas células com os menores valores de área de contribuição. Quanto aos cenários de suscetibilidade, o de melhor acurácia foi o cenário IV. Esse cenário apresentou FD = 87% de áreas estáveis e CC = 50% nas áreas instáveis. Embora o SHASLTAB não utilize parâmetros antropogênicos, muitos escorregamentos foram deflagrados por influência antrópica, sobretudo em áreas desprovidas de infraestrutura. Acredita-se que essa pesquisa possa servir como base para a adoção de ações estruturais e não-estruturais em Camaragibe.

Palavras-chave: Escorregamentos. Modelos Matemáticos. Suscetibilidade. SHALSTAB. Camaragibe.

## ABSTRACT

The occupation of risk areas (for example, hillsides) is one of the characteristics of the urbanization process in the Metropolitan Region of Recife (RMR). As a result, landslides with many economic and social losses are occurring, especially in the rainiest periods, especially in the municipality of Camaragibe. Due to the accelerated occurrence of mass movement processes, the use of forecasting models is consolidated as an important tool in the evaluation of areas susceptible to the occurrence of these processes. Of these, the SHALSTAB (Shallow Landslide Stability Model) is a deterministic mathematical model, which incorporates physical properties of the soil and topographic parameters in the spatial forecast of landslides. Thus, the general objective of this work was to evaluate the susceptibility to shallow translational landslides in the municipality of Camaragibe-PE through the application of this model. Specifically, it aimed to: map the scars from landslides that occurred in the municipality; analyze the influence of topographic and anthropogenic parameters for the occurrence of landslides; elaborate susceptibility scenarios and, subsequently, validate them. The procedures used were: (1) the elaboration of a landslide inventory map; (2) the correlation of topographic parameters (slope, curvature, aspect and area of contribution) and anthropogenic parameters (land use); (3) the calculation of the Distribution Frequency (FD) and Scar Concentration (CC) indices; (4) the generation of susceptibility scenarios and (5) the validation of these scenarios. 151 scars from landslides have been mapped. Of these, 93% were located in urban areas; about 87% on high slopes; 50% in concave shapes; 31% on slopes oriented to the southeast and 90% on cells with the lowest values of the contribution area. As for the susceptibility scenarios, scenario IV was the most accurate. This scenario showed FD = 87% of stable areas and CC = 50% in unstable areas. Although SHASLTAB does not use anthropogenic parameters, many landslides were triggered by anthropic influence, especially in areas without infrastructure. It is believed that this research can serve as a basis for the adoption of structural and non-structural actions in Camaragibe.

Keywords: Landslides. Mathematical models. Susceptibility. SHALSTAB. Camaragibe.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Registro de escorregamento com 7 vítimas fatais ocorrido em Camaragibe – Junho/2019.....	11
Figura 2 - Total anual de óbitos causados por escorregamentos em Camaragibe entre os anos de 1994 e 2019.....	12
Figura 3 - Registros de escorregamentos ocorridos em Camaragibe/PE (A) e Teresópolis/RJ (B) nos anos de 2019 e 2011, respectivamente. ....	15
Figura 4 – Tipos de escorregamentos: (A) Rotacional; (B) em Cunha; (C) Translacional. ....	16
Figura 5 - Representação do modelo hidrológico.....	22
Figura 6 - Componentes da força peso relacionadas com as tensões que agem em um escorregamento segundo a teoria do talude infinito.....	26
Figura 7 - Mapa de localização da área de estudo (Município de Camaragibe).....	31
Figura 8 – Mapa geológico do município de Camaragibe. ....	33
Figura 9 - Mapa Hipsométrico do município de Camaragibe.....	34
Figura 10 - Mapa geomorfológico do município de Camaragibe .....	36
Figura 11 – A - Ocupações em áreas colinosas; B – Destaque para obras de cortes na encosta sem acompanhamento técnico; C – Escorregamento ocorrido em área colinosa .....	37
Figura 12 - Mapa pedológico do município de Camaragibe.....	39
Figura 13 - Média pluviométrica anual (1995-2017).....	40
Figura 14 - Média pluviométrica mensal (1995-2017).....	40
Figura 15 - Mapa político-administrativo do município de Camaragibe.....	42
Figura 16 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos (materiais e métodos) da pesquisa.....	44
Figura 17 - Exemplo da representação das cicatrizes de escorregamentos na forma de polígonos (vetorização) .....	45
Figura 18 - Modelo Digital do Terreno de Camaragibe utilizado na pesquisa. ....	47
Figura 19 - Método D-Infinity proposto por Tarboton (2005). ....	48
Figura 20 – Localização das áreas de Formação Barreiras e de Embasamento Cristalino para aplicação dos valores físicos do solo de forma heterogênea/distribuída nos cenários de suscetibilidade propostos (SHASLTAB). ....	51
Figura 21 – Exemplo de uma representação da curva ROC.....	54
Figura 22 – Mapa de inventário de escorregamentos do município de Camaragibe. Devido a escala municipal, no mapa as cicatrizes estão representadas na forma de pontos e no detalhe ao lado (fotografia) na forma de cicatrizes (polígonos). ....	56
Figura 23 – Representação tridimensional de cicatrizes de escorregamentos em encostas ocupadas no bairro da Tabatinga (Exagero vertical = 0,75). ..	57
Figura 24 – Encosta coberta por lona plástica no bairro Novo do Carmelo. ....	57
Figura 25 – Mapa de Declividade do município de Camaragibe, índices FD (Frequência de Distribuição) e CC (Concentração de Cicatrizes) do parâmetro declividade e ocorrências de escorregamentos. ....	59

Figura 26 – Encostas com declividade alta (vermelho) antropicamente ocupadas (Bairro dos Estados).....	60
Figura 27 – Mapa de Aspecto do município de Camaragibe, índices FD (Frequência de Distribuição) e CC (Concentração de Cicatrizes) do parâmetro aspecto e ocorrências de escorregamentos.....	62
Figura 28 – Carta solar do município de Camaragibe com destaque para a menor incidência solar no período chuvoso nas encostas orientadas para SE e SO. ....	63
Figura 29 – Mapa de Curvatura do município de Camaragibe, índices FD (Frequência de Distribuição) e CC (Concentração de Cicatrizes) do parâmetro curvatura e ocorrências de escorregamentos. ....	65
Figura 30 – Encosta convexa apresentando corte de parte do terreno para construção de imóvel (comunidade do Córrego do Desastre – bairro do Areeiro).....	66
Figura 31 – Mapa de Área de Contribuição do município de Camaragibe, índices FD (Frequência de Distribuição) e CC (Concentração de Cicatrizes) do parâmetro área de contribuição e ocorrências de escorregamentos.....	67
Figura 32 – Mapa de Uso da terra do município de Camaragibe, índices FD (Frequência de Distribuição) e CC (Concentração de Cicatrizes) do parâmetro uso da terra e ocorrências de escorregamentos. ....	69
Figura 33 – Fatores antrópicos que influenciaram na deflagração de escorregamentos: A – ocupação de encostas íngremes; B – Lançamento de águas servidas; C – Corte de parte da encostas sem acompanhamento técnico; D – Corte de parte da encosta e presença de bananeiras.....	70
Figura 34 – Mapa de suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário I).....	72
Figura 35 – Mapa de suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário II).....	73
Figura 36 – Mapa de suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário III).....	75
Figura 37 – Mapa de suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário IV). ....	77
Figura 38 – Mapa de Suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário V).....	78
Figura 39 – Mapa de suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário VI). ....	80
Figura 40 – Gráfico com as curvas ROC para cada cenário de suscetibilidade.....	81
Figura 41 – Cenário de suscetibilidade melhor avaliado (cenário IV). Destaques para ocupação antrópica em encostas da Formação Barreiras (A); Vista da região mais aplainada do município de Camaragibe, onde se localizam as áreas mais estáveis, segundo o modelo SHALSTAB (B); Região de encosta da Formação Barreiras classificada como instável, de acordo com o modelo, destaque para as diversas ocupações ao longo da encosta (C) e local apontado com estável que sofreu processo de escorregamento, provavelmente, influenciado pelo uso antrópico (D)...	83
Figura 42 – Predomínio de áreas instáveis em encostas côncavas (bairro Areeiro). 84	
Figura 43 – Áreas indicadas como estáveis onde foram deflagrados escorregamentos por conta da interferência antrópica. ....	86

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C'$	<i>Coesão efetiva (kPa);</i>
$\mu$	<i>poro-pressão;</i>
$a$	<i>área de contribuição (m<sup>2</sup>);</i>
$b$	<i>comprimento de contorno unitário (m);</i>
$e$	<i>espessura perpendicular do solo (m);</i>
$g$	<i>aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);</i>
$h$	<i>altura da coluna da água (m);</i>
$i$	<i>gradiente hidráulico (m/min)</i>
$K$	<i>coeficiente de permeabilidade (m/dia)</i>
$L$	<i>comprimento do bloco (m);</i>
$P$	<i>peso do bloco (kg);</i>
$q$	<i>intensidade da chuva (mm);</i>
$Q$	<i>precipitação (mm);</i>
$Q_e$	<i>quantidade de água total que entra na camada de solo (m<sup>3</sup>/dia)</i>
$Q_s$	<i>quantidade de água que sai da camada de solo saturado (m<sup>3</sup>/dia)</i>
$T$	<i>transmissividade do solo (m<sup>2</sup>/dia);</i>
$w$	<i>umidade</i>
$z$	<i>espessura do solo (m);</i>
$\theta$	<i>ângulo da encosta (grau).</i>
$\sigma$	<i>tensão normal (kPa);</i>
$\Phi$	<i>ângulo de atrito interno do solo (grau).</i>
$\rho_s$	<i>massa específica do solo (kg/m<sup>3</sup>);</i>
$\rho_w$	<i>massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>);</i>
$\sigma$	<i>tensão Normal (kPa).</i>
$\tau$	<i>tensão tangencial (kPa).</i>
$\phi$	<i>ângulo de atrito interno do solo (grau).</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	11
1.1	OBJETIVOS .....	13
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	14
2.1	MOVIMENTOS DE MASSA.....	14
2.2	O CONCEITO DE SUSCETIBILIDADE E SUAS TÉCNICAS DE MAPEAMENTO .....	18
2.3	MODELAGEM MATEMÁTICA, O MODELO SHALSTAB E TRABALHOS DESENVOLVIDOS .....	21
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO: MUNICÍPIO DE CAMARAGIBE - PE</b> .....	30
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS (MATERIAIS E MÉTODOS)</b> .....	44
4.1	ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS.....	44
4.2	PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS E PARÂMETROS ANTRÓPICOS (USO DA TERRA) .....	45
4.3	PARÂMETROS UTILIZADOS PELO MODELO SHALSTAB E CENÁRIOS PROPOSTOS .....	49
4.4	ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICOS E ANTRÓPICOS E VALIDAÇÃO DOS CENÁRIOS DE SUSCETIBILIDADE .....	52
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	55
5.1	INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS.....	55
5.2	ANÁLISE DOS PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS .....	58
<b>5.2.1</b>	<b>Declividade</b> .....	58
<b>5.2.2</b>	<b>Aspecto</b> .....	61
<b>5.2.3</b>	<b>Curvatura</b> .....	64
<b>5.2.4</b>	<b>Área de contribuição</b> .....	66
5.3	ANÁLISE DOS PARÂMETROS ANTRÓPICOS (USO DA TERRA).....	68
5.4	CENÁRIOS DE SUSCETIBILIDADE (SHALSTAB) E VALIDAÇÕES.....	71
5.5	ANÁLISE DO MELHOR CENÁRIO DE SUSCETIBILIDADE .....	81
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	88
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	91

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Países em desenvolvimento, como o Brasil, geralmente apresentam como características marcantes do processo de urbanização a ocupação de áreas consideradas de risco. Estas áreas são, fundamentalmente, encostas íngremes, planícies de inundação e fundos de vale que, geralmente, passam a ser ocupadas pelas populações de menor poder aquisitivo.

Nos períodos de chuva intensa são comuns os episódios de movimentos de massa em áreas de risco densamente ocupadas, principalmente nas regiões metropolitanas. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2018), o total da população brasileira ocupando áreas consideradas de risco é de 8.270.127 habitantes. Destes, 632.873 estão localizados na Região Metropolitana do Recife (RMR).

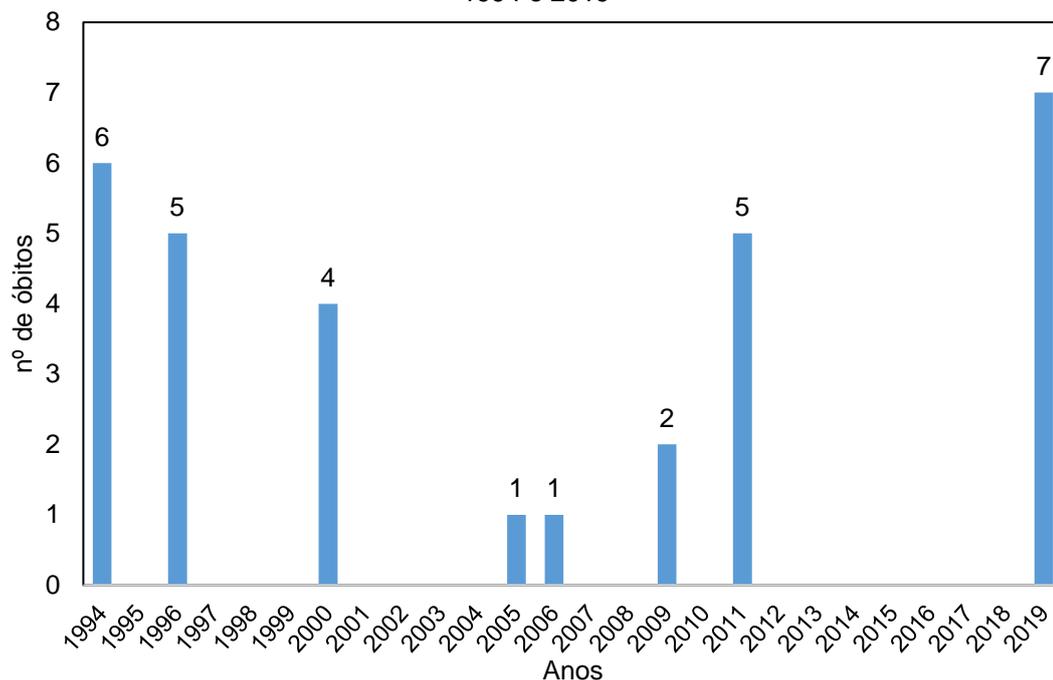
Dentro do contexto da RMR, destaca-se o município de Camaragibe. Este município registrou diversas ocorrências de escorregamentos (Figura 1) que resultaram em 31 óbitos no período entre os anos de 1994 e 2019 (Figura 2).

Figura 1 – Registro de escorregamento com 7 vítimas fatais ocorrido em Camaragibe – junho/2019.



Fonte: G1 PE (2019)

Figura 2 - Total anual de óbitos causados por escorregamentos em Camaragibe entre os anos de 1994 e 2019



Fonte: Camaragibe (2018) e portal G1 - PE.

Como uma forma de evitar ou mitigar os danos causados por desastres, entre eles os causados por escorregamentos, o Governo Federal instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, por meio da Lei Federal nº 12.608/2012 (BRASIL, 2012). Um dos objetivos dessa lei é a identificação de áreas suscetíveis aos escorregamentos, como uma forma de se evitar ou diminuir sua ocorrência, além de produzir subsídios para projetos e políticas setoriais.

A utilização das geotecnologias é fundamental para identificação as áreas mais suscetíveis a ocorrência de escorregamentos. Entre as principais ferramentas disponíveis destacam-se os modelos matemáticos, as imagens de satélites de alta resolução e os Modelos Digitais do Terreno (MDT) (GUZZETTI *et al.*, 2012).

Apesar dos constantes registros de escorregamentos existe uma carência de estudos diretamente ligados à aplicação de modelos matemáticos de previsão determinísticos, especialmente, no nordeste brasileiro. Dessa forma, a justificativa da presente pesquisa está, também, relacionada a esta lacuna.

Inclui-se a essa escassez de estudos em áreas do nordeste brasileiro, uma carência de dados que tratem dos fatores condicionantes em escala municipal, assim como estudos que promovam a identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos

translacionais rasos no município de Camaragibe, úteis ao planejamento urbano e no melhor gerenciamento de áreas suscetíveis e de risco.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é **avaliar a suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos no município de Camaragibe - PE por meio da aplicação do modelo SHALSTAB.**

Para alcançar o objetivo principal, foram estabelecidos os seguintes **objetivos específicos**:

- I. Criar um inventário de cicatrizes de escorregamentos no município de Camaragibe/PE;
- II. Analisar conjuntamente a influência dos parâmetros topográficos e dos fatores antrópicos na ocorrência dos escorregamentos;
- III. Elaborar cenários de suscetibilidade a escorregamentos para o município e;
- IV. Mapear a suscetibilidade a escorregamentos no município de Camaragibe/PE.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico deste estudo partiu do princípio de que é importante compreender os fundamentos teórico-metodológicos que servirão de subsídios para a análise dos resultados gerados ao final desta pesquisa. Dessa forma, nas seções a seguir serão descritos e analisados os conceitos, as tipologias e os fatores condicionantes dos movimentos de massa; a suscetibilidade e suas técnicas de mapeamento; o uso da modelagem matemática para estudos de suscetibilidade e o modelo SHALSTAB (conceitos, aplicações, limitações e trabalhos desenvolvidos).

### 2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são definidos como o deslocamento de material, solo e rocha vertente abaixo sob a influência direta da gravidade, sendo desencadeados pela interferência de outros meios ou agentes independentes como água, gelo ou ar (SELBY, 1993; BIGARELLA *et al.*, 2007). São recorrentemente estudados em função de sua atuação como agentes na evolução das formas de relevo e, ao mesmo tempo, pelas perdas sociais e econômicas causam à sociedade.

A deflagração dos movimentos de massa em encostas é influenciada por uma série de fatores condicionantes naturais, muitas vezes com caráter cíclico, que possuem origem na formação da própria rocha e na sua história geológica e geomorfológica (movimentos tectônicos, intemperismo, erosão, forma da encosta, entre outros), e condicionantes antrópicos (FERNANDES; AMARAL, 1998; AUGUSTO FILHO; VIRGÍLI, 1998; CUNHA; GUERRA, 2008; LISTO, 2011; GUZZETTI *et al.*, 2012; ARISTIZÁBAL; GARCÍA; MARTÍNEZ, 2015).

Michel (2013) acrescenta a vegetação como um dos fatores que exercem influência sobre a estabilidade das encostas. Segundo esse autor, essa influência se dá por meio de alterações na transferência da água entre a atmosfera e o solo; lençol freático; e sistemas de drenagem superficial. A vegetação pode modificar a saturação do solo e, por consequência, sua resistência final.

De acordo com Augusto filho (1992), os movimentos de massa podem ser classificados de acordo com suas principais características, como o tipo de movimento; ao tipo de material; a velocidade. Ainda de acordo com essa classificação,

os movimentos de massa dividem-se em quatro tipos de processo: Rastejos (creep); Escorregamentos (slides); Quedas (falls); e Corridas (flows).

Os escorregamentos, processos foco deste trabalho, são enquadrados como fenômenos naturais contínuos da dinâmica externa terrestre, responsáveis por modelar a paisagem superficial, sendo, portanto, um dos processos mais marcantes na evolução natural das encostas, seja pela frequência com que ocorrem, seja pelo potencial de causar danos ao homem (FERNANDES; AMARAL, 1998; LOPES; ARRUDA JÚNIOR, 2015).

Particularmente, os escorregamentos são processos bastante comuns nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste do Brasil, principalmente, nos períodos chuvosos (Figura 3). Esses processos são definidos como movimentos rápidos e com curta duração, com plano de ruptura bem definidos, deslocando-se sob ação da gravidade, para baixo e para fora do talude ou da encosta (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; SELBY, 1993; FERNANDES; AMARAL, 1998; LISTO, 2011). Segundo Guerra (2016), estes eventos podem ocorrer em diferentes paisagens, desde que haja um relevo local suscetível para a geração de uma força gravitacional capaz de transportar o material escorregado.

Figura 3 - Registros de escorregamentos ocorridos em Camaragibe/PE (A) e Teresópolis/RJ (B) nos anos de 2019 e 2011, respectivamente.



Fonte: Diário de Pernambuco (2019) e Net Diário (2019)

Augusto Filho (1992) divide os escorregamentos em Rotacionais, Translacionais e em Cunha, de acordo com a forma dos seus respectivos planos de ruptura (Figura 4).

Figura 4 – Tipos de escorregamentos: (A) Rotacional; (B) em Cunha; (C) Translacional.



Fonte: Reis (2001); Veja (2012); Oliveira (2014)

Os escorregamentos Rotacionais possuem superfície de ruptura curva, côncava para cima, ao longo da qual se dá um movimento rotacional da massa de solo. Dentre as condições que mais favorecem esse tipo de movimento destaca-se a existência de solos espessos e homogêneos, sendo comuns em encostas compostas por material de alteração originado de rochas argilosas, tais como como argilitos e folhelhos (SELBY, 1993; FERNANDES; AMARAL, 1998).

Os escorregamentos Translacionais são considerados os movimentos de massa mais frequentes no Brasil (SELBY, 1993; FERNANDES; AMARAL, 1998). Esses possuem uma superfície de ruptura com forma planar a qual acompanha, de modo geral, descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas existentes no interior do material, resultantes da atividade de processos geológicos, geomorfológicos ou pedológicos.

Esse tipo de escorregamento possui plano de ruptura com profundidades que variam entre 50 cm e 5 m. A dinâmica hidrológica nestes movimentos possui um caráter mais superficial e as rupturas tendem a ocorrer rapidamente, devido ao aumento da poro-pressão positiva durante eventos pluviométricos de alta intensidade ou duração (SELBY, 1993; FERNANDES; AMARAL, 1998).

De acordo como Michel (2013) e Highland e Bobrowky (2008), fatores geológicos como a constituição da rocha e estruturais (falhas, acamadamentos, descontinuidades, orientação e inclinação das camadas) também podem exercer influência direta na formação de planos de ruptura. Características pedológicas determinam na resistência ao cisalhamento da encosta e o grau de saturação do solo.

Os fatores geomorfológicos como declividade, forma e orientação da encosta são importantes na análise dos escorregamentos em função da influência que os

mesmos exercem sobre as taxas de evapotranspiração e seus efeitos nos processos de intemperismo. Por exemplo, as faces das encostas voltadas para os polos da terra mantêm maiores taxas de saturação, conseqüentemente, essas áreas apresentam maiores taxas de intemperismo e conseqüentemente há formação de solos mais profundos que requerem maiores precipitações para que um escorregamento seja iniciado (MICHEL, 2013).

Os fatores hidrológicos que se destacam para a ocorrência de escorregamentos são a precipitação, a recarga do lençol freático, a interceptação e a evapotranspiração (SELBY, 1993; MICHEL, 2013). De acordo com Michel (2013), a água pode gerar diversos efeitos como hidratação da argila, erosão na base das encostas ou intemperismo, entretanto, o efeito mais relevante da presença de água é o aumento da pressão dos poros.

De acordo com diversos autores (ex. SELBY, 1993; AUGUSTO FILHO; VIRGÍLI, 1998; FERNANDES; AMARAL, 1998; GUIMARÃES *et al.*, 2003; GIRÃO; CORRÊA, 2004), os processos que envolvem os escorregamentos são acelerados em função da quebra da estabilidade dinâmicas das encostas. Essa quebra é provocada por meio do modo pelo qual o homem remodela a paisagem, sobretudo pela ocupação de locais naturalmente mais suscetíveis a escorregamentos.

A remoção da cobertura vegetal, o lançamento de águas servidas e/ou resíduos sólidos nas encostas, a realização de cortes ou aterros sem o devido acompanhamento técnicos, entre outros exemplos, podem ser considerados como os principais agentes deflagradores ligados as ações antrópicas (FERNANDES; AMARAL, 1998; ALHEIROS, 1998; LISTO, 2011).

Destaca-se também o papel desempenhado pela vegetação na estabilidade de encostas. Segundo apontou Michel (2013), a influência da vegetação sobre as encostas pode ser agrupada em duas categorias: mecânica e hidrológica.

A influência mecânica se dá por meio do aumento da coesão do solo provocado pelas raízes; pela ancoragem realizadas pelas raízes profundas; pela sobrecarga do peso das árvores nas encostas; e da tensão cisalhante transmitida ao solo por causa do vento sobre as árvores.

Em termos hidrológicos, a vegetação pode auxiliar na estabilidade das encostas por conta do processo de evapotranspiração, no entanto, em casos de chuvas mais intensas, pode favorecer a instabilidade devido ao aumento da

condutividade hidráulica do solo pela presença dos sistemas radiculares e da grande quantidade de água armazenada no regolito.

## 2.2 O CONCEITO DE SUSCETIBILIDADE E SUAS TÉCNICAS DE MAPEAMENTO

De acordo com Alheiros *et al.* (2003), suscetibilidade é uma característica inerente ao meio e representa a fragilidade do ambiente frente aos processos de dinâmica superficial (ex. escorregamentos ou erosão). Dessa forma, a suscetibilidade é avaliada com base nas propriedades geológicas e pedológicas, nas características geomorfológicas (declividade, altitude, extensão e perfil das encostas, morfometria e distribuição espacial da drenagem nas microbacias), além de fatores climáticos e biológicos (ALHEIROS *et al.*, 2003; PFALTZGRAFF, 2007).

A representação espacial da suscetibilidade é feita por meio de cartas ou de mapas de suscetibilidade, dos quais são apresentados os fatores naturais que influenciam na ocorrência de movimentos de massa (ou outros processos) a partir da classificação de unidades da paisagem em diferentes graus de suscetibilidade/estabilidade (CARVALHO; MACEDO; OGURA, 2007).

De acordo com Fernandes e Amaral (1998), os mapas de suscetibilidade a escorregamentos são importantes instrumentos técnico-científicos para a redução dos danos causados por esse tipo de processo. Em função do aperfeiçoamento dos SIG, existem diversos métodos e técnicas para analisar a suscetibilidade a escorregamentos, cabendo ao pesquisador escolher a forma mais adequada ou, quando possível, realizar combinações (LISTO, 2011; GUZZETTI *et al.*, 2012).

Como principais métodos para o mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos destacam-se os **mapas de inventários**, baseados em modelagem probabilística; os **métodos heurísticos** (ex. mapas geomorfológicos e combinação de mapas base qualitativos); o uso de **ferramentas estatísticas** e os **modelos determinísticos** (PARISE, 2001; KOZCIAK, 2005; TOMINAGA, 2007; LISTO, 2011; NERY, 2011).

Os **mapas de inventários** permitem a localização espacial dos escorregamentos, como também a sua identificação e caracterização. Esse tipo de mapeamento tem como base a interpretação de fotografias aéreas ou imagens de satélites, levantamento de campo e levantamento de dados históricos (PARISE, 2001;

NERY, 2011; GUZZETTI *et al.*, 2012). Os mapas de inventários são a base para outras técnicas de zoneamento, pois funcionam como parâmetros de entrada, revelando áreas passíveis de instabilizações, frequências e tipologias (VAN WESTEN, 1993; PARISE, 2001; NERY, 2011). Dependendo da escala utilizada no mapeamento, a representação dos escorregamentos pode ser por meio de pontos ou polígonos (PARISE, 2001).

Dentre os tipos de mapas de inventário destacam-se duas análises: distribuição dos processos e análise de densidade. A análise de distribuição é a análise mais simplificada dos movimentos de massa, na qual são mapeadas a localização e a delimitação dos processos. Quando associados a outros tipos de dados, podem fornecer uma relação e uma frequência dos processos dentro de diferentes unidades do terreno mapeado. De acordo com Nery (2011), a identificação dos processos varia de acordo com a escala atribuída a essa abordagem, ou seja, quanto maior for a escala, maior será o nível de detalhamento ou de reconhecimento dos movimentos de massa.

A análise de densidade de escorregamentos, parte da suposição de que os processos, dentro de uma unidade do terreno, podem ser expressos em valores de densidade. A análise da concentração de escorregamentos nessa unidade do terreno em uma determinada unidade define o grau de risco nessa unidade. A vantagem deste método é permitir uma avaliação rápida do fenômeno e a sua principal desvantagem é a não investigação da relação entre o fenômeno e os fatores causais (NERY, 2011).

O **Método Heurístico** é baseado no conhecimento dos fatores que causam instabilidade nas encostas, sendo esses fatores categorizados e, posteriormente, adotados pesos para cada um deles (FERNANDES *et al.*, 2001; COTARELO, 2015). Esse método se baseia na combinação de mapas qualitativos de fatores que provocam instabilidade, resultando em um mapa de suscetibilidade. O peso de cada fator é atribuído de modo subjetivo, tendo como principal parâmetro a experiência do profissional/pesquisador envolvido com a investigação (TOMINAGA, 2007; COTARELO, 2015).

A principal crítica ao método heurístico está na subjetividade na atribuição dos pesos, fato que dificulta comparações e análises detalhadas dos resultados obtidos, com ênfase na definição da importância relativa de cada parâmetro estudado (VAN WESTEN, 1993; FERNANDES *et al.*, 2001; NUNES *et al.*, 2016).

O **Método Estatístico** se baseia na análise de processos pretéritos como reposta para ocorrências futuras, isto é, áreas onde já ocorreram escorregamentos são propensas à ocorrência de novos escorregamentos, e as áreas com fatores de predisposição (ex. topografia, geologia, geomorfologia) semelhantes as áreas onde ocorreram escorregamentos no passado serão mais propensas à ocorrência de movimentos no futuro, desde que mantidas as mesmas condições ambientais (LAJAS, 2016).

Sendo assim, a partir das ferramentas estatísticas (ex. análises bivariadas, multivariadas e regressões múltiplas) é possível, de forma mais objetiva, identificar a influência dos fatores responsáveis pela instabilidade de encostas na distribuição dos movimentos de massa (LISTO, 2011).

O **Método Determinístico** tem como base os modelos de estabilidade, que levam em consideração os processos e as leis físicas naturais, quantificando os graus de suscetibilidade em valores absolutos por meio do cálculo do Fator de Segurança (*FS*). Os modelos determinísticos são amplamente aplicados nas áreas de Geografia e Engenharia, principalmente para avaliar o perigo a movimentos de massa.

Segundo Listo (2011), os modelos matemáticos determinísticos são fundamentados em noções matemáticas clássicas de relações exatamente previsíveis entre variáveis independentes e dependentes (causa e efeito), consistindo num conjunto de afirmações matemáticas exatamente especificadas.

Como dados de entrada para realizar os cálculos do *FS*, esses modelos necessitam de dados contendo informações sobre alguns parâmetros físicos do solo, tais como, a espessura da camada do solo, coesão, ângulo de atrito interno, ângulo da encosta, entre outros (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; LISTO, 2011; NERY, 2011). A grande dificuldade na utilização dos modelos determinísticos está no conhecimento incompleto de muitos processos envolvidos e na dificuldade de obtenção dos dados requeridos pelo modelo, em especial quando aplicados a grandes áreas (FARIA, 2013).

De acordo com Listo (2011), Nery (2011), Vieira e Ramos (2015), os principais modelos utilizados na previsão de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais rasos são: SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability*) (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998); SINMAP (*Stability Index Mapping*) (PACK; TARBOTON; GOODWIN, 1998);

TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional*) (BAUM; SAVAGE; GODT, 2002), entre outros.

### 2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA, O MODELO SHALSTAB E TRABALHOS DESENVOLVIDOS

Segundo Christofolletti (1999), a modelagem constitui um procedimento teórico envolvendo um conjunto de técnicas com a finalidade de compor um quadro simplificado perante a complexidade do mundo que envolve o homem, sendo considerada como um instrumento dentre os procedimentos metodológicos da pesquisa científica.

A utilização de modelos em estudos de geociências ganharam repercussão a partir da década de 1960, por meio dos trabalhos de Krumbein e Graybill (1965) e Chorley e Haggett (1967). Ganharam ainda mais destaque com os avanços tecnológicos e a popularização da informática nas décadas de 1970 e 1980, culminando no atual cenário de importante linha de pesquisa para estudos nas mais diversas áreas, inclusive a geomorfologia (CHRISTOFOLLETTI, 1999; LISTO, 2011). Nesse contexto, Michel (2013) aponta que a modelagem aplicada aos estudos de estabilidade de encostas é uma ferramenta que vem sendo cada vez mais utilizada para representação do perigo oriundo de fenômenos naturais.

Dentre os atuais modelos utilizados para analisar a estabilidade de encostas, destaca-se o modelo SHALSTAB (*Shallow Slope Stability Model*). O SHALSTAB foi desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994) e posteriormente foi automatizado para utilização em SIG por Dietrich e Montgomery (1998), exclusivamente para previsão de escorregamentos translacionais rasos.

O modelo SHALSTAB é um modelo matemático determinístico, *steady-state* (de equilíbrio ou não-transiente) que permite ao usuário incorporar as propriedades físicas do solo (coesão, ângulo de atrito, espessura, massa específica, entre outras), e os parâmetros topográficos (declividade e área de contribuição) (LISTO, 2011; FARIA, 2013; MICHEL, 2013; SBROGLIA *et al.*, 2017).

Essa automatização permitiu que o modelo calculasse o grau de suscetibilidade a ocorrência de escorregamentos para cada *pixel* de um *grid* (GUIMARÃES *et al.*, 2003; SBROGLIA *et al.*, 2017). Recentemente, em função do desenvolvimento de

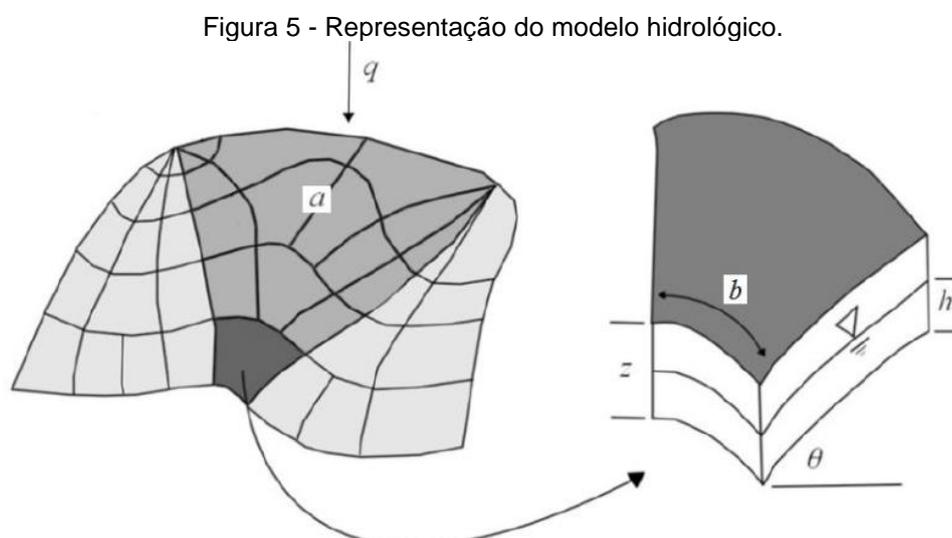
novas ferramentas de computação e algoritmos, foi desenvolvida por Sbroglia *et al.* (2017) uma ferramenta incorporada diretamente ao *software ArcGIS*, denominada *Automatic SHALSTAB Analysis (ASA)*.

A referida ferramenta consiste em uma rotina automatizada do modelo SHALSTAB que utiliza dados matriciais (MDT, Área de contribuição, profundidade da camada de solo) e vetoriais (mapa geotécnico) como base para o mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos. O modelo considera que os solos na presença de água possuem uma baixa coesão e ângulo de atrito e quando associado às características topográficas da área de estudo, calcula o equilíbrio de forças do sistema (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; LISTO, 2011, SBROGLIA *et al.*, 2017).

O modelo SHALSTAB é baseado na combinação de dois modelos: um hidrológico e um de estabilidade de encosta.

O modelo hidrológico utilizado baseia-se no estado uniforme de recarga descrito por Beven e Kirkby (1979) e O'loughlin (1986). Esse modelo hidrológico simula a variação da altura de coluna de água no solo em períodos chuvosos e define um padrão de equilíbrio de saturação do solo baseado na análise da área de contribuição a montante, na transmissividade do solo e na declividade. Esse modelo, considera que o fluxo infiltra até um plano de mais baixa condutividade, em geral o contato solo-rocha, seguindo então, um caminho determinado pela topografia.

A Figura 5, representa de forma resumida o modelo hidrológico, onde “*a*”, representa a área de contribuição a montante ( $m^2$ ), e “*b*” representa o comprimento do contorno unitário (m), “*q*” precipitação (m/dia).



Fonte: Faria, 2013

A quantidade de água total que entra na camada de solo ( $Q_e$ ) é produto entre precipitação e área de contribuição (Equação 1).

$$Q_e = q * a \quad (\text{Equação 1})$$

**Onde:**  $Q_e$  –  $m^3/\text{dia}$ ;  $a$  = área de contribuição a montante ( $m^2$ );  $q$  = precipitação ( $m/\text{dia}$ ).

Já a quantidade de água que sai da camada de solo saturado ( $Q_s$ ) pelo escoamento subsuperficial é dada pelo produto da velocidade do fluxo (descrita pela Lei de Darcy) pela área de saída. Na Lei de Darcy, o parâmetro “ $K$ ”, em  $m/\text{dia}$ , é considerado constante para toda a camada de solo, e o gradiente hidráulico “ $i$ ”, em  $m/\text{min}$ , é dado pelo quociente entre a carga hidráulica e o comprimento do meio poroso a ser percorrido. A carga hidráulica é dada pela simples diferença entre as cotas de entrada e saída da água, enquanto que o comprimento do meio poroso é o comprimento da encosta. Assim, o gradiente hidráulico pode ser representado por “ $\sin\theta$ ”.

$$Q_s = K * i * h * \cos\theta * b \quad (\text{Equação 2})$$

Ou

$$Q_s = K * \sin\theta * h * \cos\theta * b \quad (\text{Equação 3})$$

**Onde:**  $Q_s$  = quantidade de água que sai da camada de solo saturado ( $m^3/\text{dia}$ );  $K$  = coeficiente de permeabilidade ( $m/\text{dia}$ );  $i$  = gradiente hidráulico ( $m/\text{min}$ );  $h$  = altura da coluna da água ( $m$ );  $\theta$  = declividade ( $\text{grau}$ );  $b$  = comprimento do contorno unitário ( $m$ ).

Em condição uniforme, a quantidade de água que entra e sai do sistema são iguais, sendo assim, pode-se igualar as equações conforme equação 4.

$$q * a = K * \sin\theta * h * \cos\theta * b \quad (\text{Equação 4})$$

**Onde:**  $a$  = área de contribuição a montante ( $m^2$ );  $q$  = precipitação ( $m/\text{dia}$ );  $K$  = coeficiente de permeabilidade ( $m/\text{dia}$ );  $h$  = altura da coluna da água ( $m$ );  $\theta$  = declividade ( $\text{grau}$ );  $b$  = comprimento do contorno unitário ( $m$ ).

No caso de saturação do solo, a quantidade de água que sai do solo se torna máxima, desta forma a equação 3 modifica-se para:

$$Q_{smax} = K * \sin\theta * z * \cos\theta * b \quad (\text{Equação 5})$$

Portanto:

$$T = K * z \cos\theta \quad (\text{Equação 6})$$

**Onde:**  $T$  = transmissividade do solo ( $m^2/dia$ );  $K$  = coeficiente de permeabilidade ( $m/dia$ );  $h$  = altura da coluna da água ( $m$ );  $\theta$  = declividade ( $grau$ );  $b$  = comprimento do contorno unitário ( $m$ );  $z$  = espessura vertical do solo ( $m$ ).

Segundo O'Loughlin (1986), a umidade ( $w$ ) é a parcela saturada do solo em um dado estado uniforme de recarga. Sendo assim, o nível de saturação do solo pode ser obtido por meio relação entre a água que entra no sistema sob forma de recarga uniforme e a água que sai dele através da camada saturada do solo.

$$w = \frac{Qe}{Q_{smax}} \quad (\text{Equação 7})$$

Assim:

$$w = \frac{q*a}{b*T*\sin\theta} \quad (\text{Equação 8})$$

Com isso, ao substituir as equações 4 e 5 na Equação 8, tem-se:

$$w = \frac{K * \sin\theta * h * \cos\theta * b}{b * K * z * \cos\theta * \sin\theta} = \frac{h}{z} \quad (\text{Equação 9})$$

O modelo de estabilidade de encosta tem como base a teoria do Fator de Segurança ( $FS$ ) e a Equação do Talude Infinito baseada na lei de Mohr-Coulomb. O  $FS$  (Equação 10) consiste na relação entre as forças motoras e as forças resistentes na estabilidade da encosta, possuindo um valor unitário com relação à estabilidade conforme apontado no Quadro 1 (SELBY, 1993; NERY, 2011).

$$FS = \frac{\text{Forças resistentes (tensão cisalhante)}}{\text{Forças motoras (tensão normal)}} \quad (\text{Equação 10})$$

Quadro 1 – Relação entre o Fator de Segurança e as condições de estabilidade da encosta

FATOR DE SEGURANÇA (FS)	CONDIÇÃO DE ESTABILIDADE
FS < 1	Encosta/Talude instável
FS = 1	Condição limite de estabilidade. Ameaça de ruptura iminente.
FS > 1	Condição de estabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A teoria baseada no talude infinito define que a tensão resistente é expressada de acordo com a Equação 11 (GUIMARÃES *et al.*, 2003):

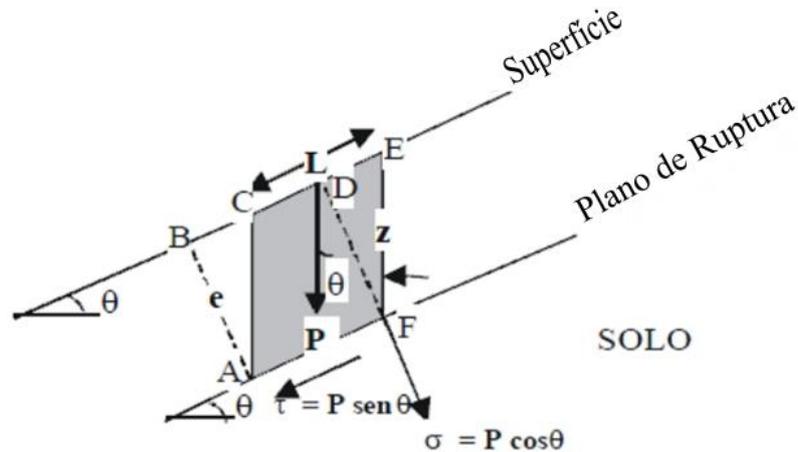
$$\tau = C' + (\sigma - \mu) \tan \Phi \quad (\text{Equação 11})$$

**Onde:**  $\tau$  = tensão cisalhante (kPa);  $\sigma$  = tensão normal (kPa);  $C'$  = Coesão do solo (kPa);  $\mu$  = poro-pressão;  $\Phi$  = ângulo de atrito interno do solo (grau).

Nesse tipo de análise, os efeitos gerados por atritos laterais e extremidades são desprezados, visto que as encostas têm suas dimensões principais muito maiores do que a altura de rompimento, e é por esse motivo que o SHALSTAB é utilizado para previsão de escorregamentos translacionais rasos (GUIMARÃES *et al.*, 2003).

Na análise de talude infinito (Figura 6), o bloco representativo fica inserido no meio do material homogêneo, sendo assim o peso (P) do bloco não pode ser obtido de forma direta, sendo necessário o auxílio da espessura perpendicular à superfície (e). Assim, o peso é definido em função da espessura vertical (z) em que sua área (ACEF) tem a forma de um paralelogramo, tomando cuidado para manter a mesma área do formato original do bloco (ABDF, em que sua altura fica perpendicular à superfície).

Figura 6- Componentes da força peso relacionadas com as tensões que agem em um escorregamento segundo a teoria do talude infinito.



Fonte: Adaptado de Guimarães *et al.*, (2013)

$$e = z \cos \theta \quad (\text{Equação 12})$$

**Onde:**  $P$  = peso do bloco (kg);  $z$  = espessura vertical do solo (m);  $e$  = espessura perpendicular do solo (m);  $L$  = comprimento do bloco (m);  $\theta$  = declividade (grau);  $\mu$  = poro-pressão;  $\sigma$  = tensão Normal (kPa).

Com base no esquema apresentado na Figura 6, é possível extrair e relacionar as principais forças intrínsecas em um bloco de solo, obtendo assim a relação entre as tensões cisalhantes (Equação 13) e a tensão normal (Equação 14). Por meio da associação entre as duas tensões com a poro-pressão (Equação 15) e a equação de Mohr-Coulomb (Equação 11) obtém-se a Equação 16:

$$\tau = \rho_s g z \cos \theta \sin \theta \quad (\text{Equação 13})$$

**Onde:**  $z$  = espessura vertical do solo (m);  $\rho_s$  = massa específica do solo ( $\text{kg/m}^3$ );  $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  $\theta$  = declividade (grau);  $\tau$  = tensão cisalhante (kPa).

$$\sigma = \rho_s g z \cos^2 \theta \quad (\text{Equação 14})$$

**Onde:**  $z$  = espessura vertical do solo (m);  $\rho_s$  = massa específica do solo ( $\text{kg/m}^3$ );  $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  $\theta$  = declividade (grau);  $\sigma$  = tensão Normal (kPa).

$$\mu = \rho_w g h \cos^2 \theta \quad (\text{Equação 15})$$

**Onde:**  $\rho_w$  = massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ );  $h$  = altura da coluna da água (m);  $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  $\theta$  = declividade (grau);  $u$  = poro-pressão.

$$\rho_s g z \cos \theta \sin \theta = C' + (\rho_s g z \cos^2 \theta - \rho_w g h \cos^2 \theta) \tan \phi \quad (\text{Equação 16})$$

**Onde:**  $z$  = espessura vertical do solo (m);  $\rho_s$  = massa específica do solo ( $\text{kg/m}^3$ );  $\rho_w$  = massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ );  $h$  = altura da coluna da água (m);  $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  $\theta$  = declividade (grau);  $C'$  = Coesão efetiva (kPa);  $\phi$  = ângulo de atrito interno do solo (grau).

A equação 16 pode ainda ser desenvolvida em função de  $h/z$ . Neste momento, o parâmetro coesão do solo poderá ou não ser considerado como mostrado nas Equação 17 e Equação 18, respectivamente.

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} * \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) + \frac{C'}{\rho_w g h \cos^2 \theta \tan \phi} \quad (\text{Equação 17})$$

**Onde:**  $z$  = espessura vertical do solo (m);  $\rho_s$  = massa específica do solo ( $\text{kg/m}^3$ );  $\rho_w$  = massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ );  $h$  = altura da coluna da água (m);  $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  $\theta$  = declividade (grau);  $C'$  = Coesão efetiva (kPa);  $\phi$  = ângulo de atrito interno do solo (grau).

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \quad (\text{Equação 18})$$

**Onde:**  $z$  = espessura vertical do solo (m);  $\rho_s$  = massa específica do solo ( $\text{kg/m}^3$ );  $\rho_w$  = massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ );  $h$  = altura da coluna da água (m);  $\theta$  = declividade (grau);  $\phi$  = ângulo de atrito interno do solo (grau).

Montgomery e Dietrich (1994) combinaram os modelos de estabilidade de encosta e hidrológico resultando na equação do modelo SHALSTAB, podendo essa equação ocorrer considerando ou não o fator de coesão do solo (GUIMARÃES *et al.*, 2003; FARIA, 2013; SBROGLIA *et al.*, 2017), conforme apresentado, respectivamente, na Equação 19 e Equação 20.

Modelo de estabilidade

$$\frac{h}{z} = \left( \frac{C'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} \right) + \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right)$$

Modelo Hidrológico

$$\frac{h}{z} = \left( \frac{Q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin \theta} \right)$$

Modelo SHALSTAB

$$\frac{Q}{T} = \frac{\sin \theta}{a \cdot b} \left( \left( \frac{C'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} \right) + \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right) \quad (\text{Equação 19})$$

**Onde:**  $a$  = área de contribuição ou área drenada a montante ( $m^2$ );  $b$  = comprimento de contorno unitário ( $m$ );  $C'$  = coesão do solo ( $kPa$ );  $g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  $\theta$  = ângulo da encosta ( $grau$ );  $\rho_s$  = densidade (massa específica) do solo saturado ( $Kg/m^3$ );  $\rho_w$  = densidade da água ( $kg/m^3$ );  $Q$  = chuva em estado crítico necessária para a ruptura ( $m/dia$ );  $T$  = transmissividade do solo saturado ( $m^2/dia$ );  $z$  = espessura do solo ( $m$ );  $\Phi$  = ângulo de atrito interno do solo ( $grau$ ).

Modelo de estabilidade

$$\frac{h}{z} = \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right)$$

Modelo Hidrológico

$$\frac{h}{z} = \left( \frac{Q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin \theta} \right)$$

Modelo SHALSTAB

$$\frac{Q}{T} = \frac{\sin \theta}{a \cdot b} \left( \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right) \quad (\text{Equação 20})$$

**Onde:**  $a$  = área de contribuição ou área drenada a montante ( $m^2$ );  $b$  = comprimento de contorno unitário ( $m$ );  $\theta$  = ângulo da encosta ( $grau$ );  $\rho_s$  = densidade (massa específica) do solo saturado ( $Kg/m^3$ );  $\rho_w$  = densidade da água ( $kg/m^3$ );  $Q$  = chuva em estado crítico necessária para a ruptura ( $m/dia$ );  $T$  = transmissividade do solo saturado ( $m^2/dia$ );  $\Phi$  = ângulo de atrito interno do solo ( $grau$ ).

Por meio do cálculo da equação final do modelo, é gerado para cada célula (*pixel*) da grade (*grid*), dentro de um ambiente SIG, um valor de susceptibilidade a escorregamentos translacionais rasos, resultando assim no mapa de susceptibilidade a escorregamentos para a área estudada. As classes de susceptibilidade partem da mais instável (*Incondicionalmente instável e saturado*) até a mais estável (*Incondicionalmente estável e saturado*), conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Classes de estabilidade do modelo SHALSTAB.

Classes originais do modelo (log q/T)	Classificação	q/mm (dia)	Significado
Incondicionalmente instável	Incondicionalmente instável e saturado	Incondicionalmente Instável	Áreas mais instáveis
< -3,1	Incondicionalmente instável e não saturado	0 a 50	
-3,1 - -2,8	Instável e saturado	50 a 100	Áreas de média estabilidade
-2,8 - -2,5	Instável e não saturado	100 a 200	
-2,5 - -2,2	Estável e não saturado	200 a 400	
> -2,2	Incondicionalmente estável e não saturado	>400	Áreas mais estáveis
Incondicionalmente Estável	Incondicionalmente estável e saturado	Incondicionalmente estável	

Fonte: Listo (2011) e Mendonça (2017), baseados em Montgomery e Dietrich (1994).

A utilização do SHALSTAB em pesquisas que envolvem a suscetibilidade de escorregamentos translacionais rasos no Brasil vem apresentado resultados significativos desde o início dos anos 2000 por meio dos trabalhos de Fernandes *et al.* (2001) nas bacias dos rios Papagaio e Quitite (RJ), Guimarães *et al.* (2003) ao descreverem os fundamentos que envolvem a utilização do modelo SHALSTAB, Ramos *et al.* (2003) ao aplicarem o modelo na área do subúrbio ferroviário de Salvador (BA), Silva (2006) no município de Petrópolis (RJ), Listo (2011) na bacia do Alto Aricanduva (SP), Faria (2013) no Córrego do Yung, situado no município de Juiz de Fora/MG, e Sbroglia (2015) na microbacia do Ribeirão Baú (SC), entre outros estudos com significativa relevância.

Internacionalmente, podem ser citados os trabalhos de Dietrich e Montgomery (1998) no norte da Califórnia (EUA); Gorsevski *et al.*, (2006) na bacia hidrográfica de Pete King, localizada na Floresta Nacional de Clearwater, Idaho (EUA); Aronica *et al.*, (2012) na Sicília (Itália); Teixeira *et al.*, (2014) na bacia de Tibo (Portugal); Kim *et al.*, (2016) na cidade de Kangwon (Coreia do Sul); e Sarkar, Roy e Raha (2016) em um trecho do Himalaia indiano.

As principais limitações ao uso do modelo SHALSTAB estão relacionadas à aplicação em áreas de solo espesso, áreas com baixa declividade, afloramentos de rochas e áreas muito escarpadas. Por conta disso, sua aplicação é restrita à avaliação da suscetibilidade a escorregamentos somente do tipo translacionais rasos onde esteja bem definido um plano de transição, como a transição solo/rocha (GUIMARÃES, 2008; LISTO, 2011; FARIA, 2013).

### 3 ÁREA DE ESTUDO: MUNICÍPIO DE CAMARAGIBE - PE

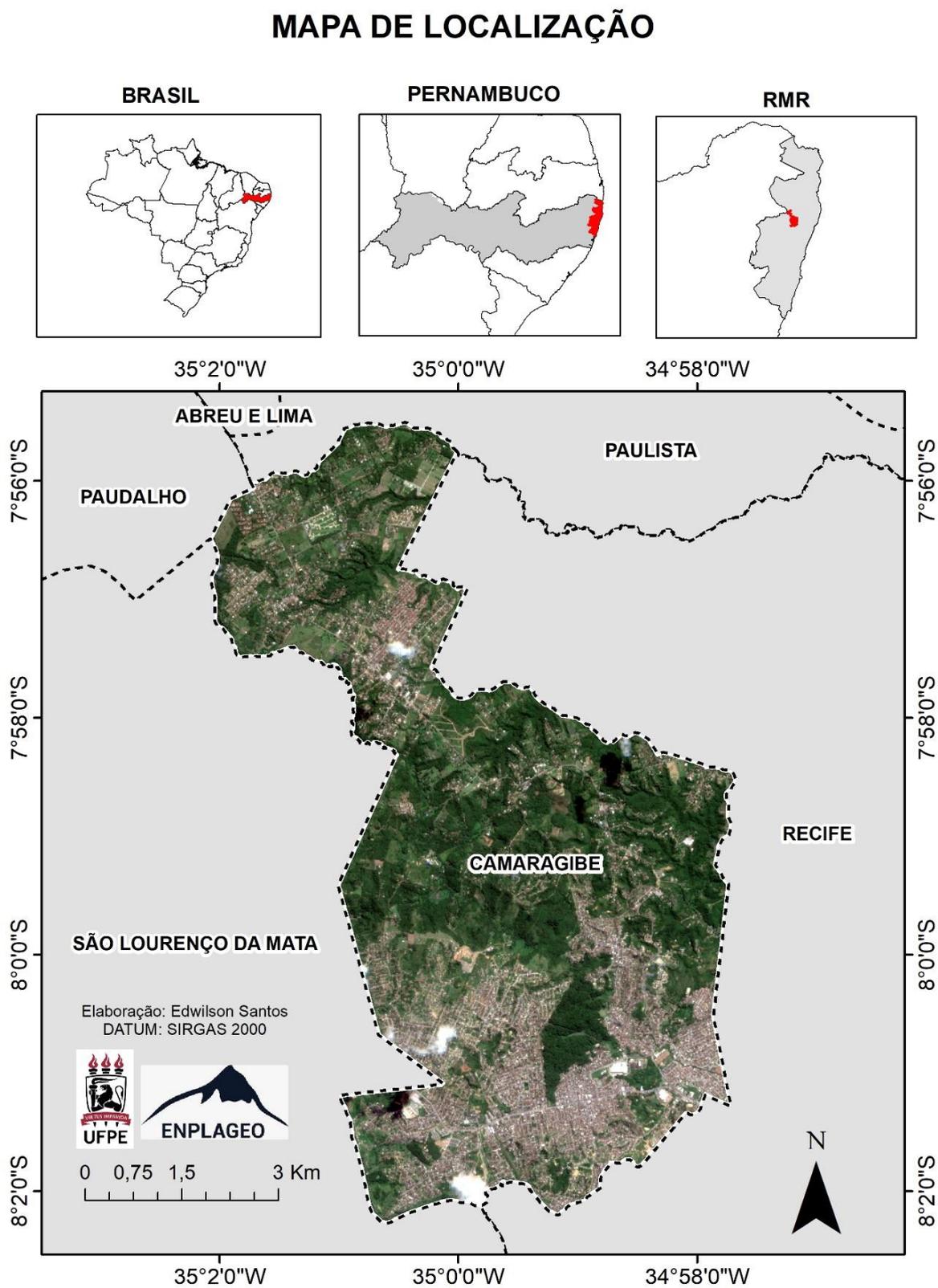
A Região Metropolitana do Recife (RMR) concentra a maior quantidade de registros de escorregamentos registrados no Estado de Pernambuco, principalmente no período chuvoso, que corresponde ao período entre os meses de março e agosto (PFALTZGRAFF, 2007; UFSC, 2013). As principais consequências deste cenário são uma série de perdas econômicas, sociais e humanas recorrentemente.

As áreas com maior ocorrência de escorregamentos da RMR se localizam, especialmente, sobre as áreas constituídas por sedimentos da Formação Barreiras, dentre a qual, se insere o município de Camaragibe, área de estudo deste trabalho (Figura 7).

O município de Camaragibe localiza-se na região oeste da RMR. Faz limite com os municípios de Paulista, Paudalho, São Lourenço da Mata e Recife. A ação antrópica (alteração da paisagem) sempre foi muito presente no território de Camaragibe. Essa alteração ocorre desde o século XVI por meio de grandes desmatamentos da mata nativa para implantação de engenhos açucareiros, passando pelo crescimento da indústria têxtil no século XIX, chegando ao atual cenário de expansão urbana causado pelo “inchaço” dos municípios vizinhos (OLIVEIRA; CARVALHO; SANTANA, 2006).

Assim como ocorreu em outros municípios da RMR, em Camaragibe a forma de ocupação dos tabuleiros e das colinas, se caracterizou pela falta de preocupação com as características físico-naturais, executando-se cortes; obstrução das redes de drenagem com lixo; e saturação do solo com águas servidas (ALHEIROS *et al.*, 2003).

Figura 7 - Mapa de localização da área de estudo (Município de Camaragibe)



Fonte: ZAPE (2001) e Satélite Sentinel – 2 (2018). Elaborado pelo autor

Quanto as características físicas, em termos geológicos a área de estudo é constituída por rochas do embasamento cristalino, pelos sedimentos da Formação Barreiras e pelos depósitos aluvionares (BANDEIRA, 2003; FONSECA; SILVA; CORRÊA, 2008) (Figura 8).

Segundo Alheiros (1998), as rochas do embasamento cristalino são intrusivas, de idade arqueana (3,8 – 2,5 bilhões de anos), pertencentes ao Maciço Pernambuco - Alagoas. São resultantes da decomposição dos granitos, migmatitos, gnaisses e micaxistos pertencentes aos Complexos Granítico-Gnáissico e Granítico-Migmático.

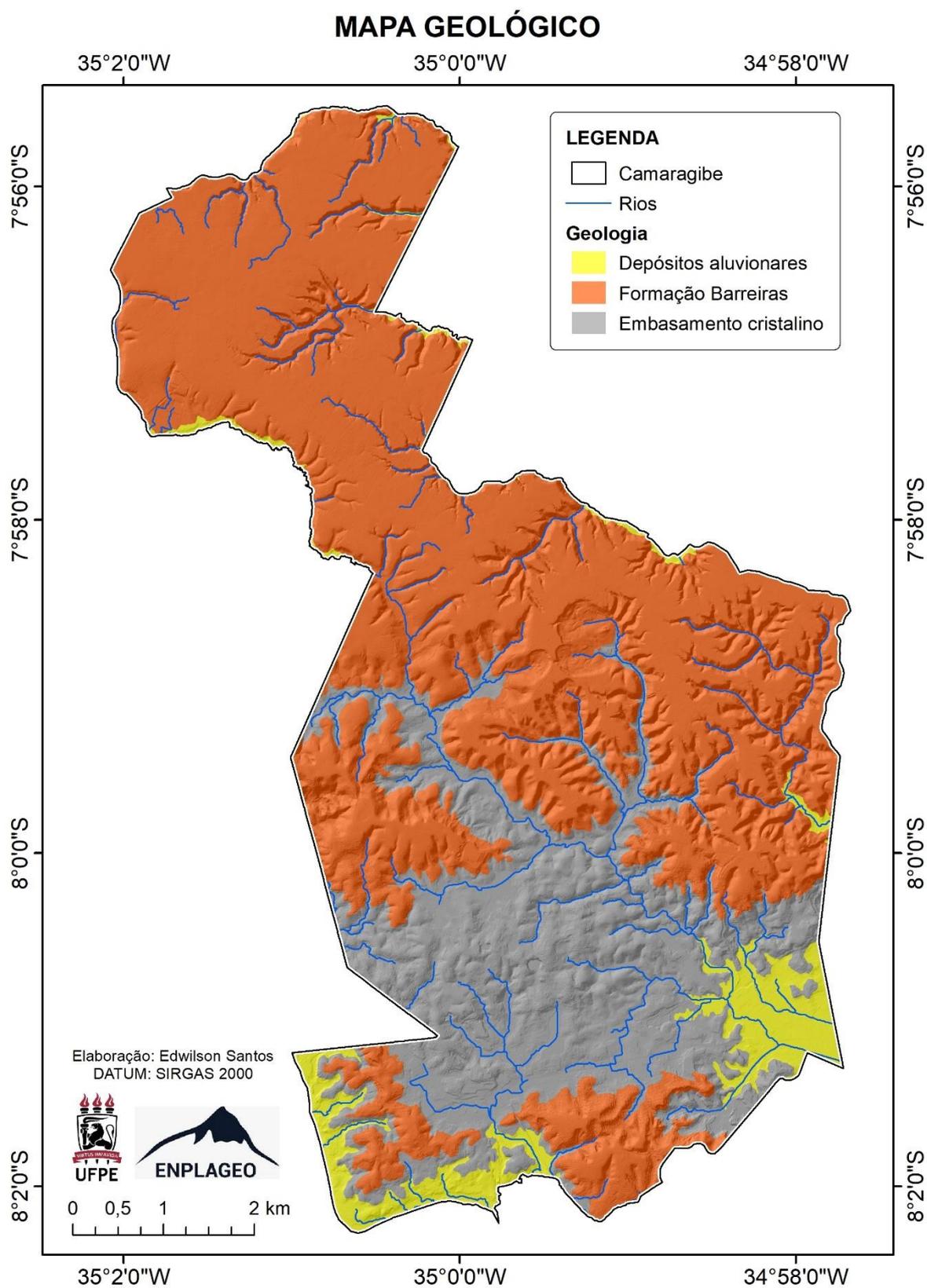
A Formação Barreiras teve sua deposição ligada a eventos ocorridos na era Cenozoica. Durante o final do Neógeno (Plioceno), eventos climáticos e/ou tectônicos provocaram um extenso recobrimento das superfícies expostas do embasamento, aterrando o relevo bastante movimentado (ALHEIROS, 1998).

Sua constituição é formada por sedimentos areno-argilosos e ocupa uma extensa cobertura sedimentar (20 km somente na RMR). A presença de material areno-argiloso contribui para processos de escorregamentos. Os níveis arenosos favorecem a infiltração de água, enquanto que as camadas argilosas oferecem resistência à infiltração, deste modo, a ocorrência de uma camada arenosa acima de uma argilosa pode causar saturação do material arenoso e deflagrar escorregamentos. A Formação Barreiras é dominada por processos fluviais, expressos por três sistemas deposicionais (fácies), são eles: fácies de leque aluvial proximal; leque aluvial ou planície aluvial; e fácies de canal fluvial entrelaçado (ALHEIROS, 1998; BANDEIRA, 2010).

As áreas de depósito aluviais são compostas de areias, cascalhos e argilas, de origem continental, transportados pelos rios e depositados ao longo do canal fluvial. Segundo Alheiros (1998), as areias grossas e cascalhos depositam-se, principalmente, nos canais, enquanto que as areias finas e argilas, nas planícies de inundação. Devido ao seu relevo plano e rebaixado as áreas de depósito aluvial não interferem nos processos de escorregamentos.

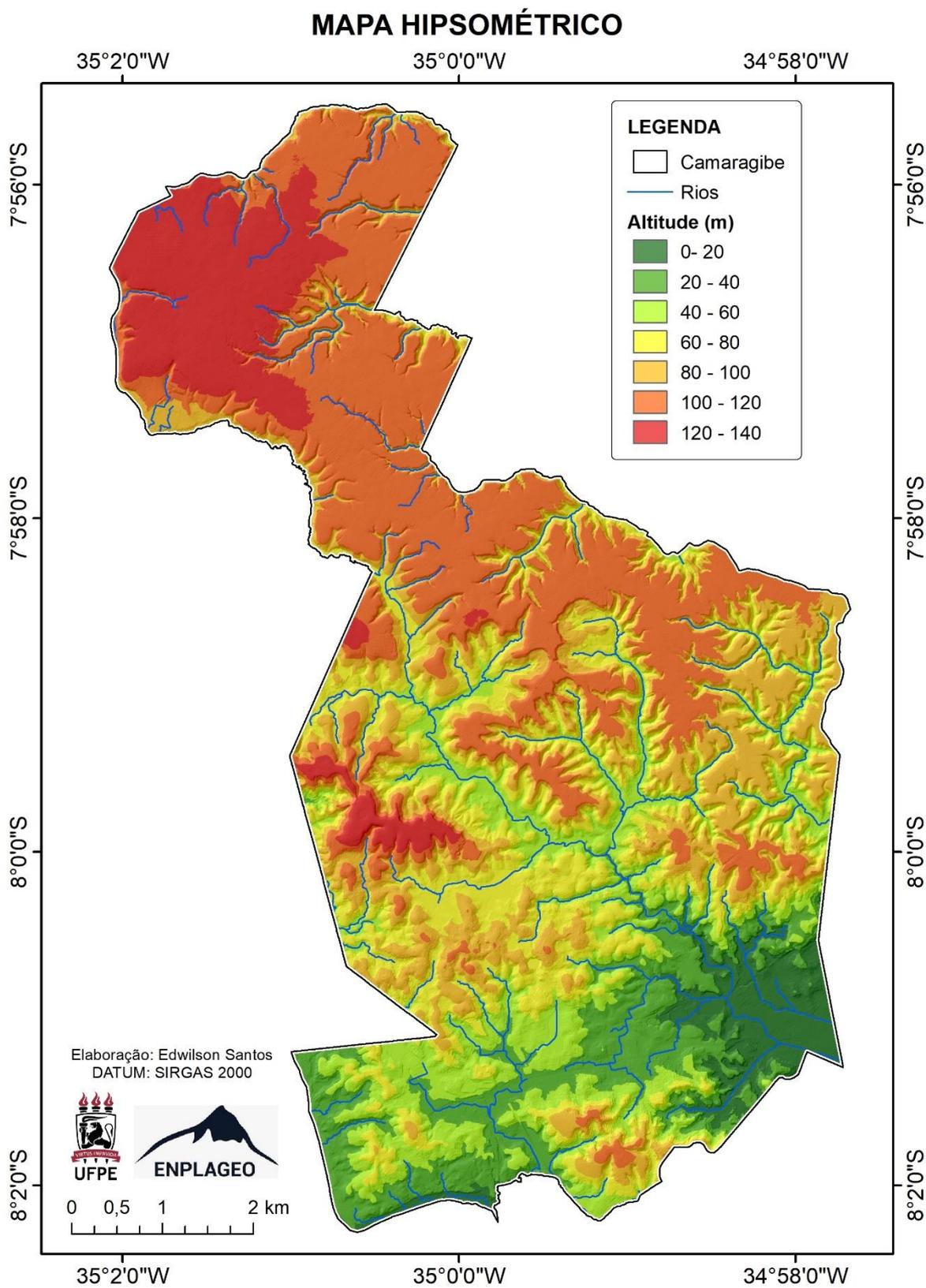
Com relação aos aspectos do relevo (Figura 9), a área de estudo apresenta altitudes que não ultrapassam os 140 m (PERNAMBUCO, 2018) e cerca de 80% do seu território é formado por regiões colinosas e tabuleiros. Essas características, em conjunto, influenciam diretamente a ocupação de áreas de risco de escorregamentos (BANDEIRA, 2003).

Figura 8 – Mapa geológico do município de Camaragibe.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Bandeira (2003).

Figura 9 - Mapa Hipsométrico do município de Camaragibe.



Fonte: elaborado pelo autor com base em PERNAMBUCO (2018).

Quanto a caracterização geomorfológica, a RMR reflete uma sequência de eventos tectônicos e denudacionais iniciados no final do mesozoico que operando em conserto produziram o mosaico de paisagens regionais que compõem a paisagem atual (FONSECA; CORRÊA; SILVA, 2016).

Ainda segundo esses autores, a organização das formas de relevo da RMR teve seu início após a abertura final do oceano Atlântico no Cretáceo superior, à medida que o rifteamento da margem do continente era submetido a sucessivas fases de soerguimento. Esta reativação, do relevo herdado do supercontinente *Gondwana*, se deu prioritariamente ao longo de estruturas rúpteis do pré-cambriano, gerando uma série de blocos falhados, limitados por escarpas que se erguem em direção ao interior como degraus (FONSECA; CORREA; SILVA, 2016).

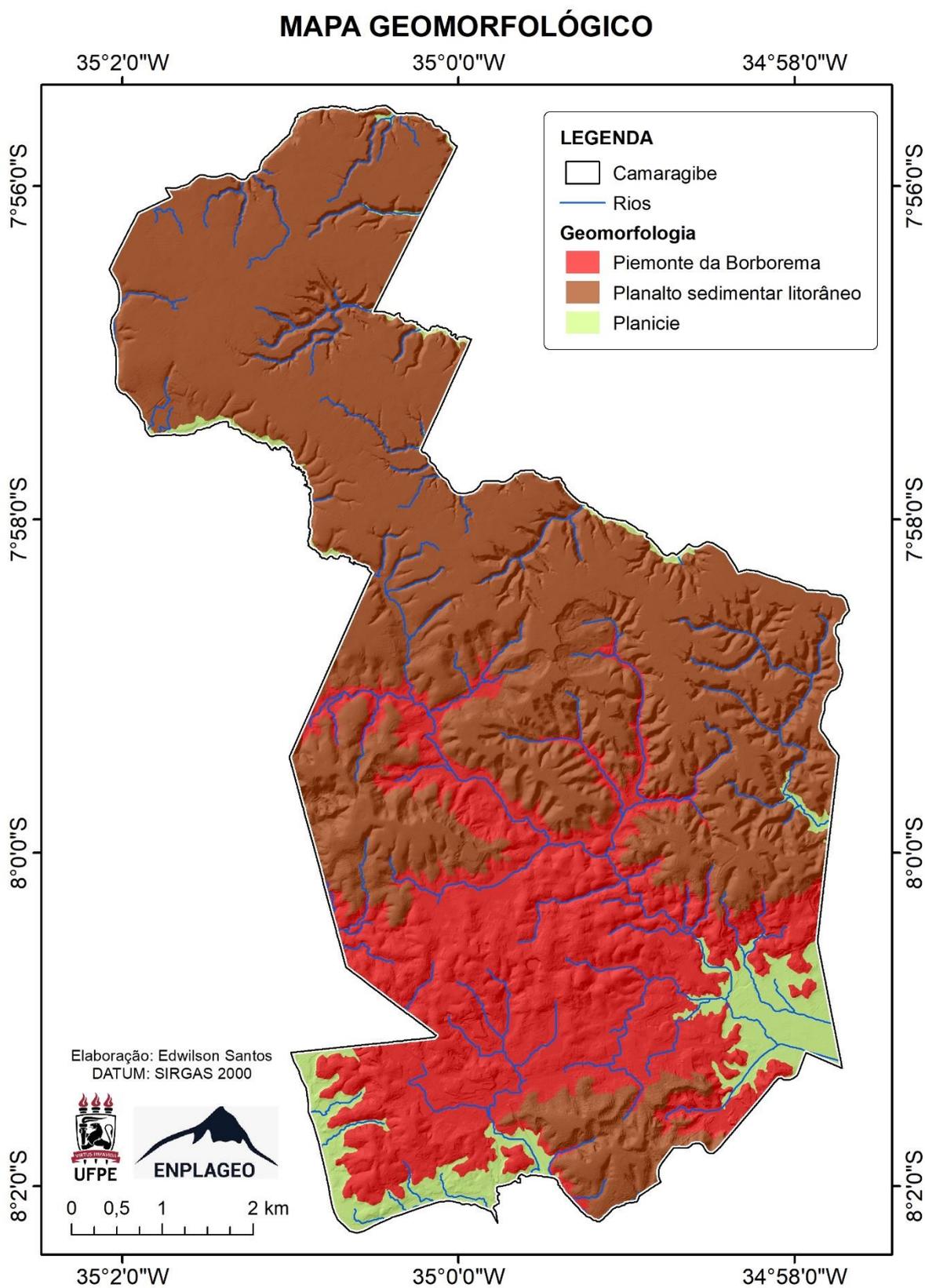
Camaragibe está inserido em três domínios morfoestruturais. São eles: Planícies, Planalto sedimentar litorâneo e Piemonte da Borborema (Figura 10).

As planícies foram formadas pela deposição quaternária e resultou em modelados planos de acumulação. Ocorrem de forma longitudinal e descontínua junto as margens de importantes rios que cortam a RMR. O relevo é plano com suas ondulações e apresenta níveis de terraços, canais fluviais retilíneos e meandantes. Nessas áreas, os maiores perigos estão relacionados às inundações (FONSECA; CORRÊA; SILVA, 2016).

O planalto sedimentar litorâneo está localizado, principalmente, ao norte e de forma mais fragmentada na porção sul. Recobre litologias da bacia Paraíba e sobretudo, do capeamento Cenozoico desta mesma bacia, relacionado aos sedimentos da Formação Barreiras. Seu relevo se desenvolveu a partir da erosão regressiva das cabeceiras que entalham ativamente os sedimentos inconsolidados que compõem seu substrato.

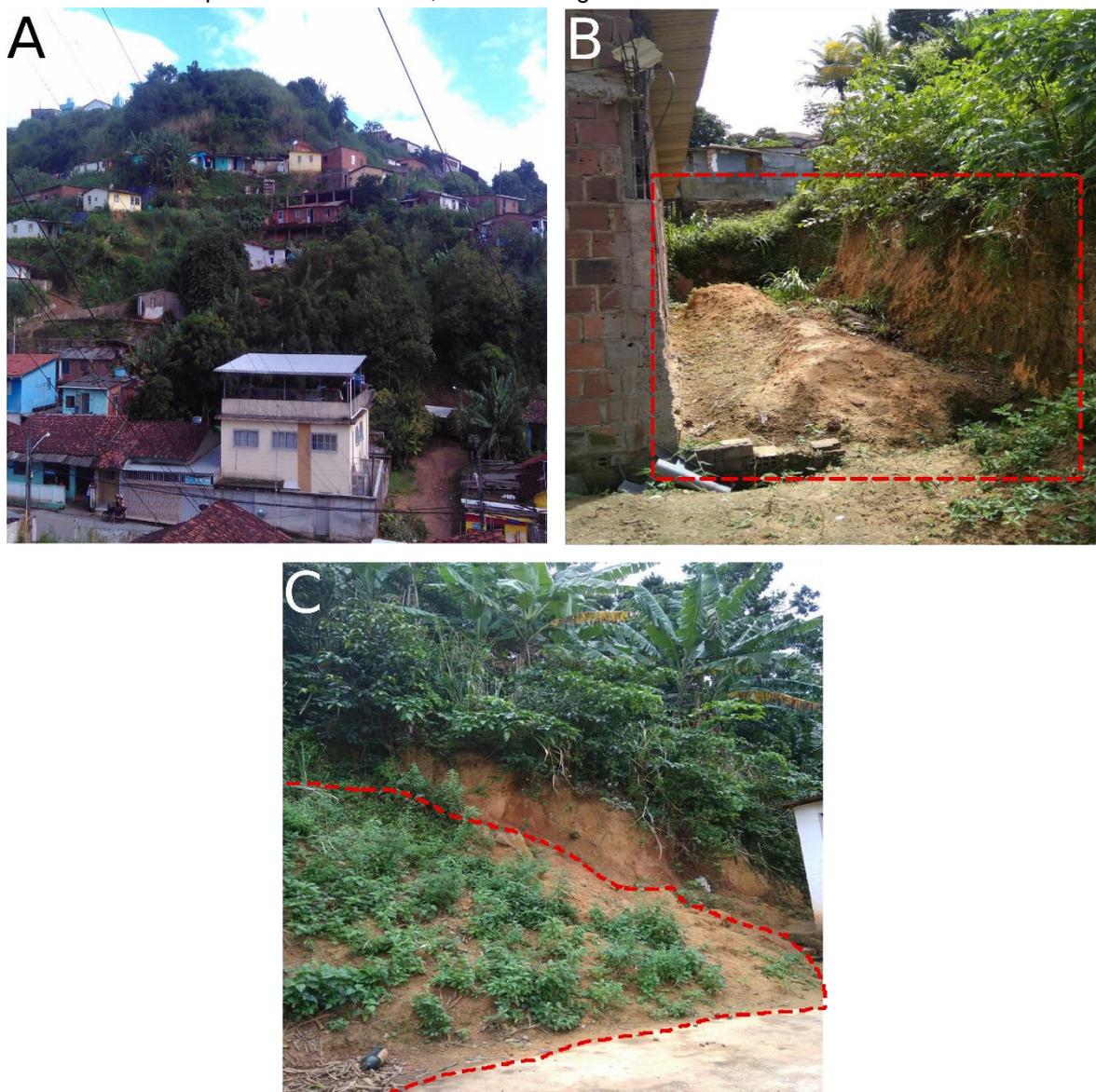
Constata-se que seu grau de dissecação aumenta em direção à costa, provocando o isolamento de tabuleiros que são gradualmente rebaixados e reduzidos a feições de morfologia convexa (colinas). Os sedimentos da Formação Barreiras são encontrados em relevos de tabuleiros, com topos planos e bordas entrecortadas por vales estreitos e profundos, cujas vertentes apresentam elevadas declividades (BANDEIRA, 2010). Escorregamentos são constantes neste domínio, sendo esses processos, muitas das vezes, influenciados pelo modo de ocupação antrópica na área (Figura 11).

Figura 10 - Mapa geomorfológico do município de Camaragibe



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Fonseca, Corrêa e Silva (2016).

Figura 11 – A - Ocupações em áreas colinosas; B – Destaque para obras de cortes na encosta sem acompanhamento técnico; C – Escorregamento ocorrido em área colinosa



Fonte: registrado pelo autor (abril de 2018)

O domínio do Planalto sedimentar litorâneo é dividido em três unidades morfológicas de acordo com estado de conservação dos seus níveis de cimeira e sua relação com as encostas adjacentes, são eles: Modelado tabular conservado, Modelado tabular dissecado e Modelado convexo. Camaragibe insere-se parcialmente nas unidades dos modelados tabular conservado e o tabular dissecado.

O modelado tabular conservado apresenta relações topo-encosta predominantemente côncavo-convexas, do tipo *hollow* e *nose*, e divisores com largura superior a 500m e altitudes máximas de 200m. Quanto aos domínios fluviais dessa unidade, apresenta planície aluvial, terraços fluviais e canais confinados. O Modelado

tabular dissecado possui como principais características os divisores mais estreitos e rebaixados, em geral com uma distância interfluvial de menos de 500 metros e altitudes entre 50 m e 100 m.

O Piemonte da Borborema é morfologicamente definido como um domínio de formas convexas, com altitudes, geralmente, abaixo dos 200m. É um domínio seccionado por uma densa rede de drenagem com variações na sua morfologia. Nessa unidade predominam rochas metamórficas (gnaisse) e magmáticas intrusivas (granito). Os vales em geral apresentam morfologia transversal em “V”, com fundos intensamente colmatados pela sedimentação quaternária e mesmo antropogênica (BANDEIRA, 2003; FONSECA; CORREA; SILVA, 2016).

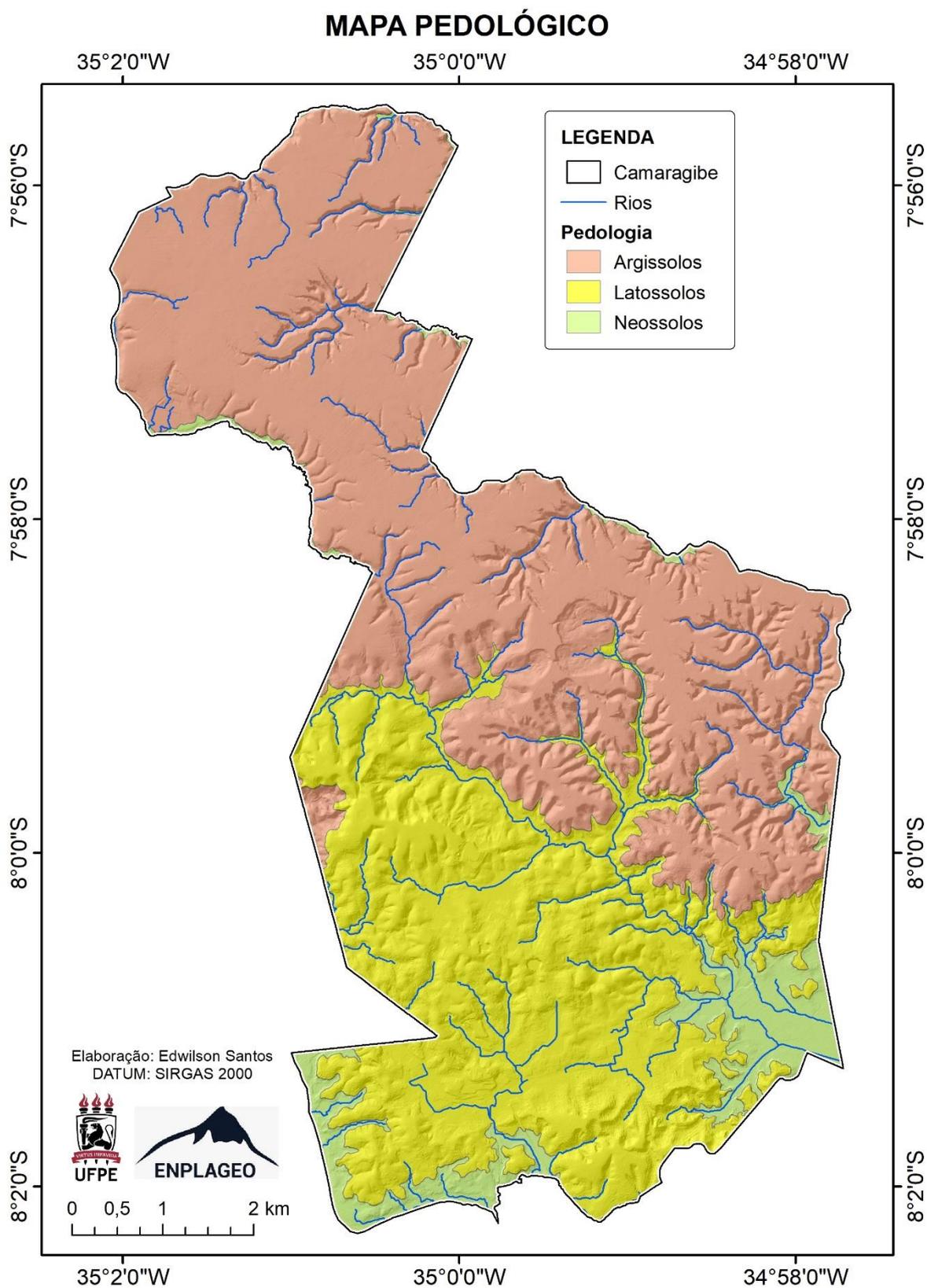
Esse domínio morfoestrutural apresenta uma unidade morfológica de Modelados convexas amplos (FONSECA; CORREA; SILVA, 2016), caracterizada por um conjunto de colinas convexas de topo largo (>500m), com amplitude altimétrica de até 50 metros, sendo recortada por planícies aluviais com terraços fluviais. Os principais perigos nesse domínio estão relacionados a ocorrência de processos erosivos e a inundações.

A caracterização pedológica em Camaragibe é feita por meio da predominância das classes latossolo e argissolo (Figura 12). Nas áreas mais planas há a ocorrência de neossolos flúvicos (EMBRAPA SOLOS, 2000).

Os latossolos são solos minerais não hidromórficos de sequência de horizontes A, Bw e C. Apresentam como característica principal o horizonte B latossólico, constituído essencialmente por minerais altamente intemperizados e, conseqüentemente, a fração argila é de baixa atividade. São solos bem desenvolvidos, normalmente, apresentam contrastes apenas entre os horizontes A e B, sendo muito difusa a transição entre os sub-horizontes B. Apresentam alto percentual de areia, baixo percentual de silte e uma fração de argila, características que os tornam permeáveis e mais estáveis (BANDEIRA, 2003).

Os argissolos são solos profundos que apresentam horizontes bem desenvolvidos, com horizonte B textural, imediatamente abaixo do horizonte A ou E, com argila de baixa atividade. São solos originados a partir de diferentes tipos de materiais, inclusive de sedimentos da Formação Barreiras (SILVA; OLIVEIRA NETO, 2011).

Figura 12 - Mapa pedológico do município de Camaragibe.

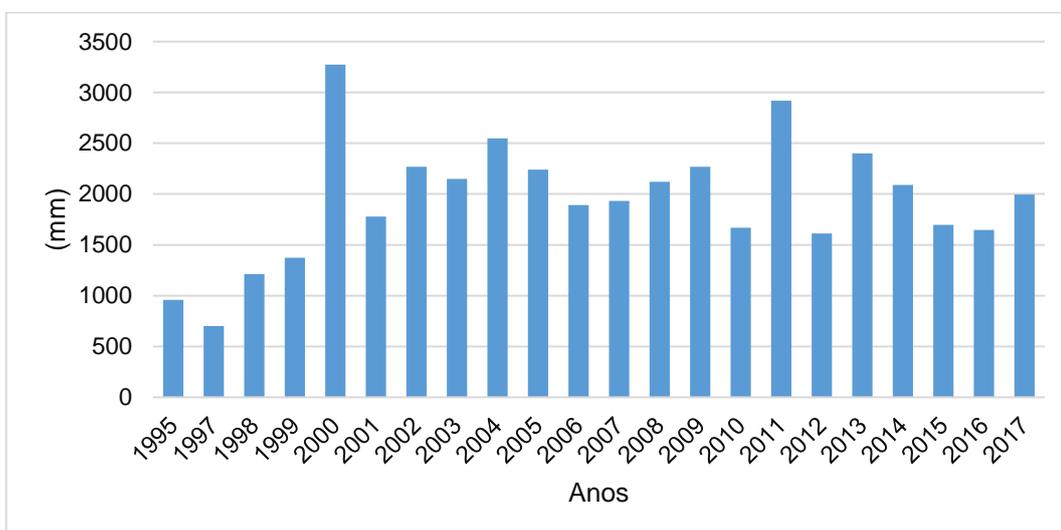


Fonte: Embrapa Solos (2000) e Embrapa (2018). Elaborado pelo autor

O clima na área de estudo é caracterizado como tropical quente e úmido com temperaturas médias anuais de 25°C. O principal tipo de chuva é a convectiva, provocada pelo resfriamento das massas de ar em altitudes elevadas (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

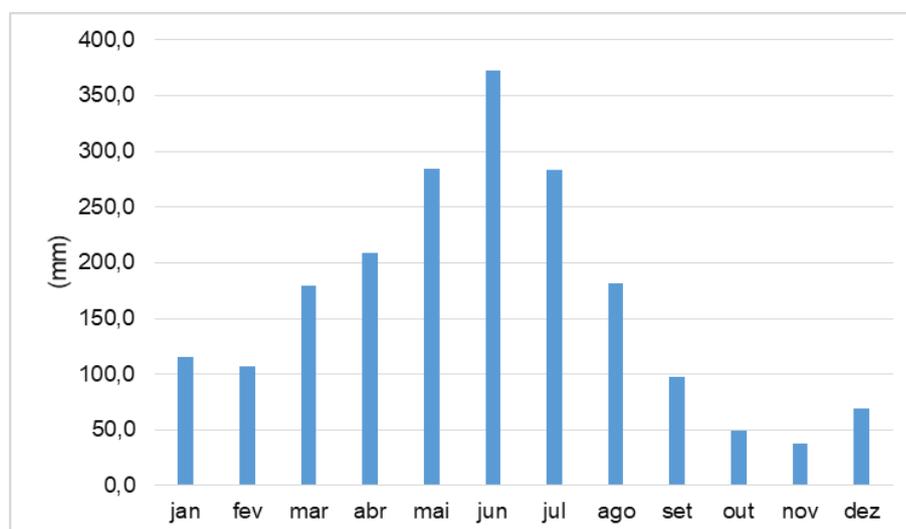
Considerando o período histórico entre os anos de 1995 e 2017 (Figura 13), a média da precipitação anual foi de 1.985mm (APAC, 2019). O período entre os meses de março e agosto, no qual ocorrem a maioria dos processos de escorregamentos, concentrou cerca de 78% da precipitação (Figura 14).

Figura 13 - Média pluviométrica anual (1995-2017).



Fonte: Posto 201 - APAC, 2018

Figura 14 - Média pluviométrica mensal (1995-2017).



Fonte: Posto 201 - APAC, 2018

A ocorrência de eventos extremos de precipitação em Camaragibe e municípios limítrofes é diretamente influenciada pelos seguintes sistemas atmosféricos: ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), VCANs (Vórtices Ciclones de Altos Níveis), DOLs (Distúrbios Ondulatórios de Leste) e *La Niña* (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Quanto aos aspectos antrópicos, o município de Camaragibe surgiu a partir do desmembramento de São Lourenço da Mata no ano de 1982. Atualmente, o município é dividido em cinco divisões político-administrativas, formando um total de 29 bairros (Figura 15 e Tabela 1). De acordo com a Lei de parcelamento, uso e ocupação do solo (Lei Municipal 032/97), em Camaragibe não há áreas consideradas rurais.

Segundo dados do IBGE (2018b), o município possui uma área total de 51,3 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 156.736 habitantes. De acordo com Bandeira (2003), a área de estudo apresenta formas de ocupação distintas: a RPA 1 é formada por loteamentos de baixa renda e ocupações espontâneas; a RPA 2 conta com loteamentos de baixa renda e ocupações espontâneas; a RPA 3 apresenta conjuntos habitacionais e ocupações espontâneas; a RPA 4 é formada por loteamentos de baixa renda e ocupações espontâneas nas cabeceiras de drenagem; por fim, a RPA 5 apresenta assentamentos de média e de alta renda, constituídos por granjas e clubes de campo, com algumas ocupações espontâneas próximas aos córregos.

De acordo com Silva (2007), a maioria da população de menor classe social ocupa as encostas dos tabuleiros cuja morfodinâmica do relevo ainda é constante, resultando em processos de escorregamentos. Os maiores danos relacionados aos escorregamentos registrados em Camaragibe ocorrem no período de maior intensidade pluviométrica.

Grande parte desses danos é causada pela falta de planejamento na ocupação do território aliado a inexistência ou carência de obras de infraestrutura. Esses fatores podem repercutir em dinâmicas urbanas distintas durante o período chuvoso, ou seja, uma certa quantidade de chuva pode repercutir de maneira insignificante em um local com um sistema eficiente de macrodrenagem, enquanto em locais sem o mesmo tipo de infraestrutura, essa mesma chuva pode causar consequências catastróficas (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Figura 15 - Mapa político-administrativo do município de Camaragibe  
(Relação dos bairros indicados na Tabela 3.1).

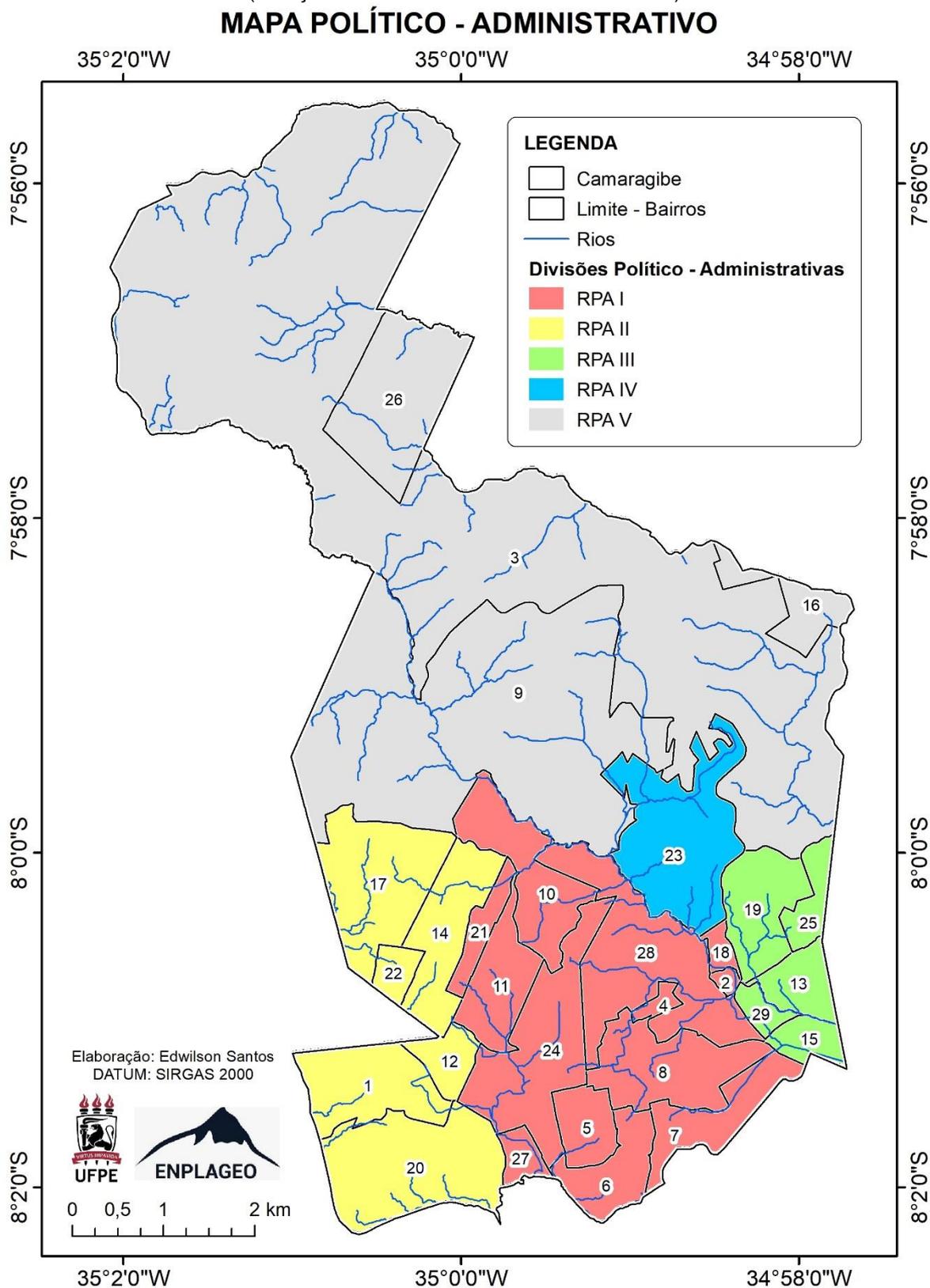


Tabela 1 – Relação de bairros - Município de Camaragibe.

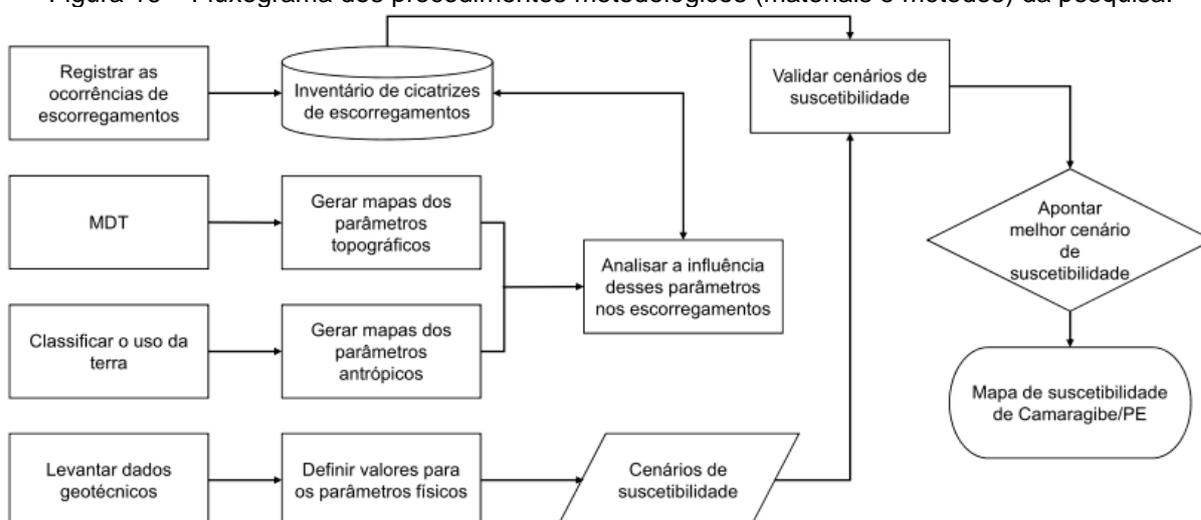
Nº	Bairro
1	Alberto Maia
2	Aldeia de Baixo
3	Aldeia dos Camarás
4	Alto da Boa Vista
5	Alto Santo Antônio
6	Areiro
7	Bairro dos Estados
8	Bairro Novo do Carmelo
9	Borrinho
10	Céu Azul
11	Celeiro das Alegrias Futuras
12	Estação Nova
13	Jardim Primavera
14	João Paulo II
15	Nazaré
16	Oitenta
17	São João e São Paulo
18	São Paulo
19	São Pedro
20	Santa Mônica
21	Santa Tereza
22	Santana
23	Tabatinga
24	Timbi
25	Vale das Pedreiras
26	Vera Cruz
27	Viana
28	Vila da Fábrica
29	Vila da Inabi

Fonte: IBGE (2016)

## 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS (MATERIAIS E MÉTODOS)

Essa seção refere-se aos procedimentos metodológicos utilizados para o mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no município de Camaragibe, tais como: **(4.1)** elaboração do inventário de escorregamentos; **(4.2)** geração dos parâmetros topográficos e dos parâmetros antrópicos (uso da terra); **(4.3)** definição dos parâmetros utilizados pelo Modelo SHALSTAB e cenários propostos e **(4.4)** validação dos cenários.

Figura 16 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos (materiais e métodos) da pesquisa.



Fonte: elaborado pelo autor.

### 4.1 ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS

O inventário de escorregamentos teve como referência uma série de registros de escorregamentos ocorridos entre os anos de 2013 e 2017 adquiridos, gratuitamente, junto à Defesa Civil municipal.

Em um primeiro momento, esses registros foram organizados em formato de planilha eletrônica, na qual foram referenciados os bairros, o mês e o ano de cada um dos eventos. Posteriormente, os registros foram geoespacializados e vetorizados na forma de polígonos que representaram as cicatrizes (Figura 17). Essa etapa teve como base as imagens históricas do *software Google Earth PRO*.

Conforme Nery (2011), a feição em cicatrizes (polígonos) é aquela que melhor representa o registro dos processos de escorregamentos. A vetorização das cicatrizes de escorregamento foi realizada por meio de uma análise visual (fotointerpretação)

das características deixadas na paisagem pelos escorregamentos, adotando-se os seguintes critérios: a geometria do fenômeno (aspecto alongado); a ausência de vegetação; sua posição na encosta; diferenças de cores e de textura e as curvas de nível. A validação dessas cicatrizes ocorreu em trabalhos de campo nos meses de abril, junho e julho de 2018.

Figura 17 - Exemplo da representação das cicatrizes de escorregamentos na forma de polígonos (vetorização)



Fonte: Google Earth PRO.

Utilizando-se como referência esse inventário de cicatrizes de escorregamentos, foi realizada uma análise da relação entre os escorregamentos pretéritos e o papel dos parâmetros topográficos e o parâmetro antrópico (uso da terra). Os dados obtidos por meio dessa análise permitiram uma relação distributiva/quantitativa entre o número de células de cada classe afetada ou não pelos escorregamentos, conforme descrito a seguir.

#### 4.2 PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS E PARÂMETROS ANTRÓPICOS (USO DA TERRA)

As análises dos parâmetros topográficos foram realizadas por meio dos mapas temáticos de **declividade**, de **curvatura**, de **aspecto** e de **área de contribuição**. Os mapas foram elaborados a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT) com

resolução de 2 m (Figura 18), extraído do projeto PERNAMBUCO Tridimensional (PERNAMBUCO, 2018), cedido pela Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco (CONDEPE/FIDEM) por meio de convênio com o Grupo de Pesquisa em Geotecnologias aplicadas a Geomorfologia de Encostas e Planícies (ENPLAGEO). O processamento dos referidos mapas topográficos foi realizado no *software ArcGIS 10*, devidamente licenciado.

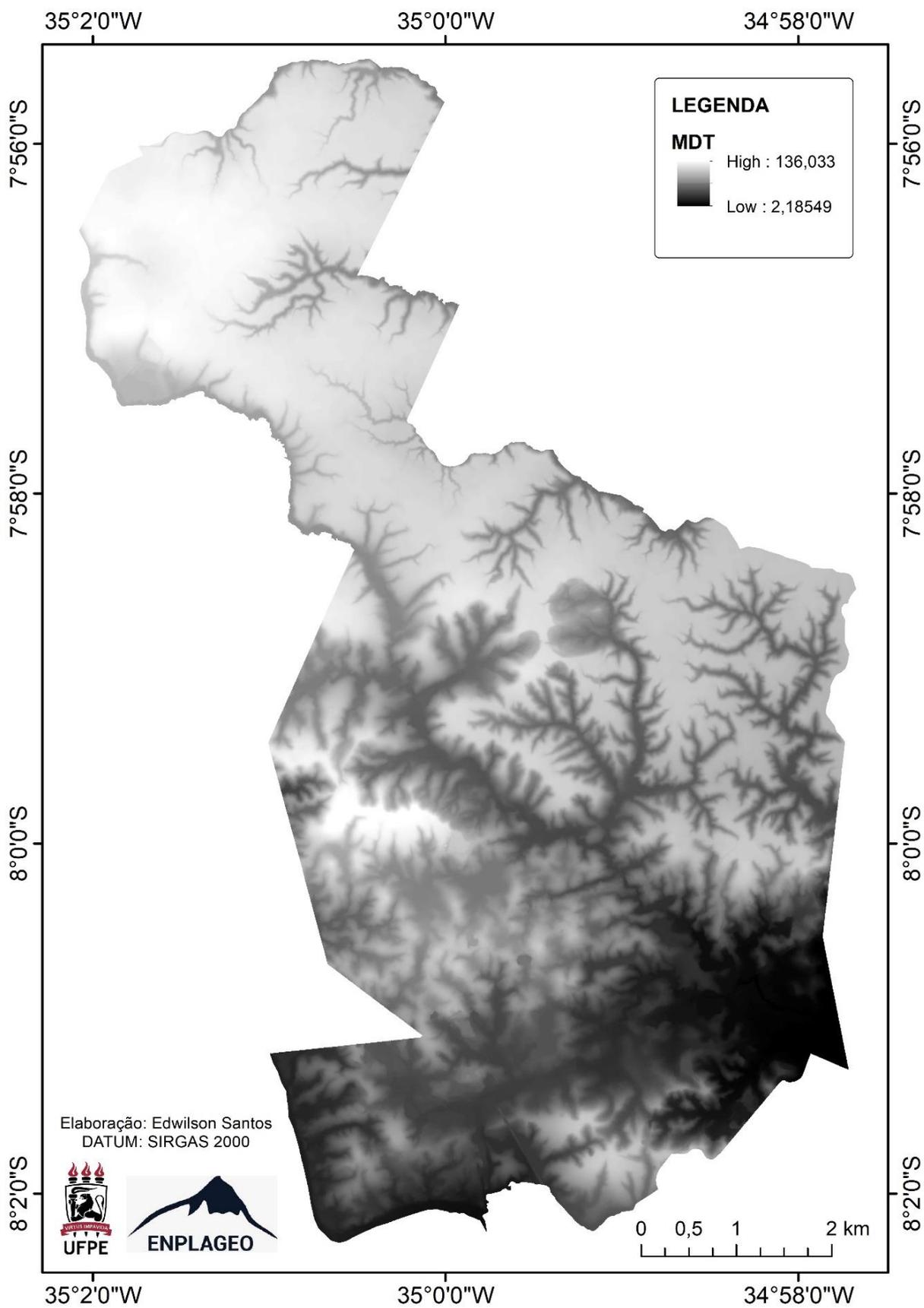
O mapa de declividade foi gerado a partir da opção *Slope*, disponível na ferramenta *3D Analyst Tools/Surface* e, posteriormente, classificado em três intervalos de declividade (baixa, média e alta). Essa classificação teve como base a Lei Federal nº 6.766/79, também conhecida como Lei Lehmann (BRASIL, 1979). De acordo com essa lei, a ocupação urbana é permitida nos intervalos de 0°- 9,6° (declividade baixa) e 9,7° a 16,7° (declividade média), porém em terrenos com declividade maior que 16,8° (declividade alta), a ocupação é permitida somente após análises e laudos técnicos.

O mapa de curvatura das encostas foi gerado a partir da opção *Curvature*, ferramenta *3D Analyst Tools/Surface*, o qual classifica a curvatura das encostas em côncavas, retilíneas ou convexas. Assim, o mapa foi calibrado de acordo com classificação proposta por Valeriano (2003), desta forma a forma retilínea corresponde ao intervalo entre -0,08 e 0,08, valores abaixo desse intervalo representam a forma côncava e acima desse intervalo correspondem a forma convexa.

As encostas côncavas caracterizam-se como zonas de convergência de sedimentos e de fluxos d'água, sendo então consideradas favoráveis/suscetíveis a ocorrência de escorregamentos (FERNANDES; AMARAL, 1996; GUERRA, 1998). As encostas retilíneas potencializam processos erosivos de grande velocidade, apresentando um alto grau de suscetibilidade com declividades constantes ao longo do seu perfil (SELBY, 1993), enquanto que nas convexas, os fluxos são distribuídos para diversas direções na encosta, apresentando um grau menor de instabilidade.

Ainda utilizando-se a ferramenta *3D Analyst Tools/Surface*, opção *Aspect*, gerou-se o mapa de orientação das encostas (aspecto), indicando as direções da rosa dos ventos (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) para as quais as encostas estão voltadas. Segundo Gao (1993), conforme a orientação da encosta, esta pode receber mais ou menos radiação, fator que influencia diretamente na quantidade de água necessária para causar a saturação do solo e conseqüentemente resultar em escorregamento.

Figura 18 - Modelo Digital do Terreno de Camaragibe utilizado na pesquisa.

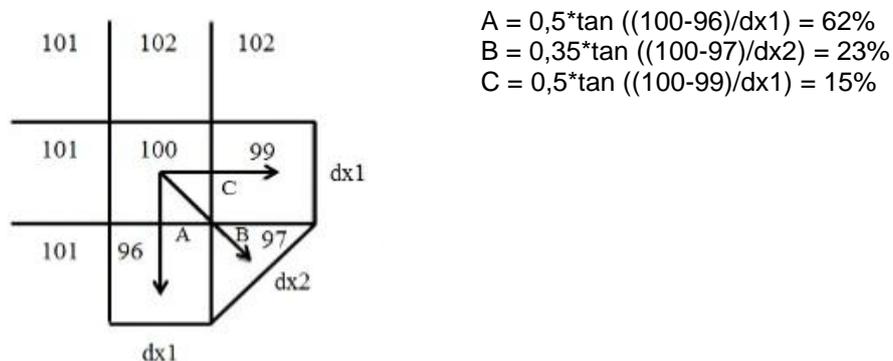


Fonte: Pernambuco, 2018

O parâmetro da área de contribuição é definido como a localização dos segmentos convergentes na paisagem que estão diretamente relacionados com a concentração de fluxos superficiais e subsuperficiais, estabelecendo uma relação direta entre a forma da encosta e os processos hidrológicos. Dessa forma, contribuem para a saturação do solo, resultando em locais mais suscetíveis aos escorregamentos (FERNANDES *et al.*, 2004; BEVEN; KIRKBY, 1979; O'LOUGHLIN, 1986; LISTO, 2011; FARIA, 2013).

O mapa de área de contribuição foi elaborado a partir do algoritmo *D-infinity Contributing Area*, contido na extensão *TAUDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models)*, desenvolvido por Tarboton (2005). Esse algoritmo obtém infinitas possibilidades de direção de fluxo, por meio do cálculo das diversas possibilidades de direções de fluxo da água a partir de facetas triangulares em uma janela *3x3 pixels* (Figura 19). Com base nisso, foram propostas as seguintes classes: até 4 m<sup>2</sup>; 4 – 25 m<sup>2</sup>; 25 - 100 m<sup>2</sup>; 100 – 2.500 m<sup>2</sup>; 2.500 – 10.000 m<sup>2</sup>; > 10.000 m<sup>2</sup>.

Figura 19 - Método *D-Infinity* proposto por Tarboton (2005).



Fonte: Tarboton, 2005.

A análise do parâmetro antrópico partiu da elaboração de um mapa de uso da terra. Este teve como base a composição RGB de uma imagem *Sentinel – 2*, com resolução de 10 m, datada de 22 de junho de 2018. A essa imagem do *Sentinel – 2* foi aplicado o método de classificação supervisionada por meio da ferramenta *Spatial Analyst*, opção *Image Classification*. Os posteriores ajustes com o resultado dessa classificação foram realizados com o auxílio de imagens históricas do *software Google Earth PRO*. As classes de uso da terra (Tabela 2) tiveram como base o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013).

Tabela 2 - Descrição das classes de uso da terra.

Classe	Descrição
Uso urbano consolidado	Locais utilizados para usos não-agrícolas, tais como: residencial, comercial e de serviços. Caracterizam-se por ser densamente ocupados, e pela disponibilidade de infraestrutura básica e de equipamentos, atividades de comércio e de serviços, etc.
Uso urbano inconsolidado	São as áreas com densidade de ocupação de baixa à alta, mas que ainda apresentam vazios urbanos e infraestrutura/equipamentos restritos, como os grandes loteamentos.
Vegetação arborea	Locais onde predominam espécies vegetais com altura superior a 5 m, sendo locais, geralmente, do ponto de vista ambiental bem conservados.
Vegetação em regeneração	Locais onde, no passado, ocorreu algum tipo de exploração antrópica que provocou a retirada de grande parte da vegetação natural. Atualmente esses locais encontram-se sem uso, fato que possibilitou a regeneração da vegetação. Nesses locais predominam espécies vegetais de porte arbustivo e gramíneas.

Fonte: Adaptado de IBGE, 2013.

#### 4.3 PARÂMETROS UTILIZADOS PELO MODELO SHALSTAB E CENÁRIOS PROPOSTOS

O modelo SHALSTAB utiliza parâmetros físicos do solo e topográficos para determinar as áreas suscetíveis a escorregamentos. Os parâmetros físicos do solo considerados na equação do modelo são:  $c_s$  - coesão do solo ( $N/m^2$ );  $c_r$  - coesão das raízes ( $N/m^2$ );  $r_s$  - peso específico do solo ( $kg/m^3$ );  $f$  - ângulo de atrito (graus);  $w$  - peso da vegetação ( $N/m^2$ ) e  $z$  - profundidade de análise (m). Os parâmetros topográficos considerados são: declividade (grau) e área de contribuição ( $m^2$ ).

Os parâmetros físicos do solo podem ser obtidos, primariamente, por meio de trabalhos de campo e ensaios geotécnicos de laboratório (ex. cisalhamento direto) ou de forma secundária (dados da literatura), enquanto os parâmetros topográficos são obtidos por meio de um MDT. Este trabalho utilizou parâmetros físicos disponíveis na literatura acerca do próprio município e parâmetros topográficos obtidos por meio de MDT de alta resolução.

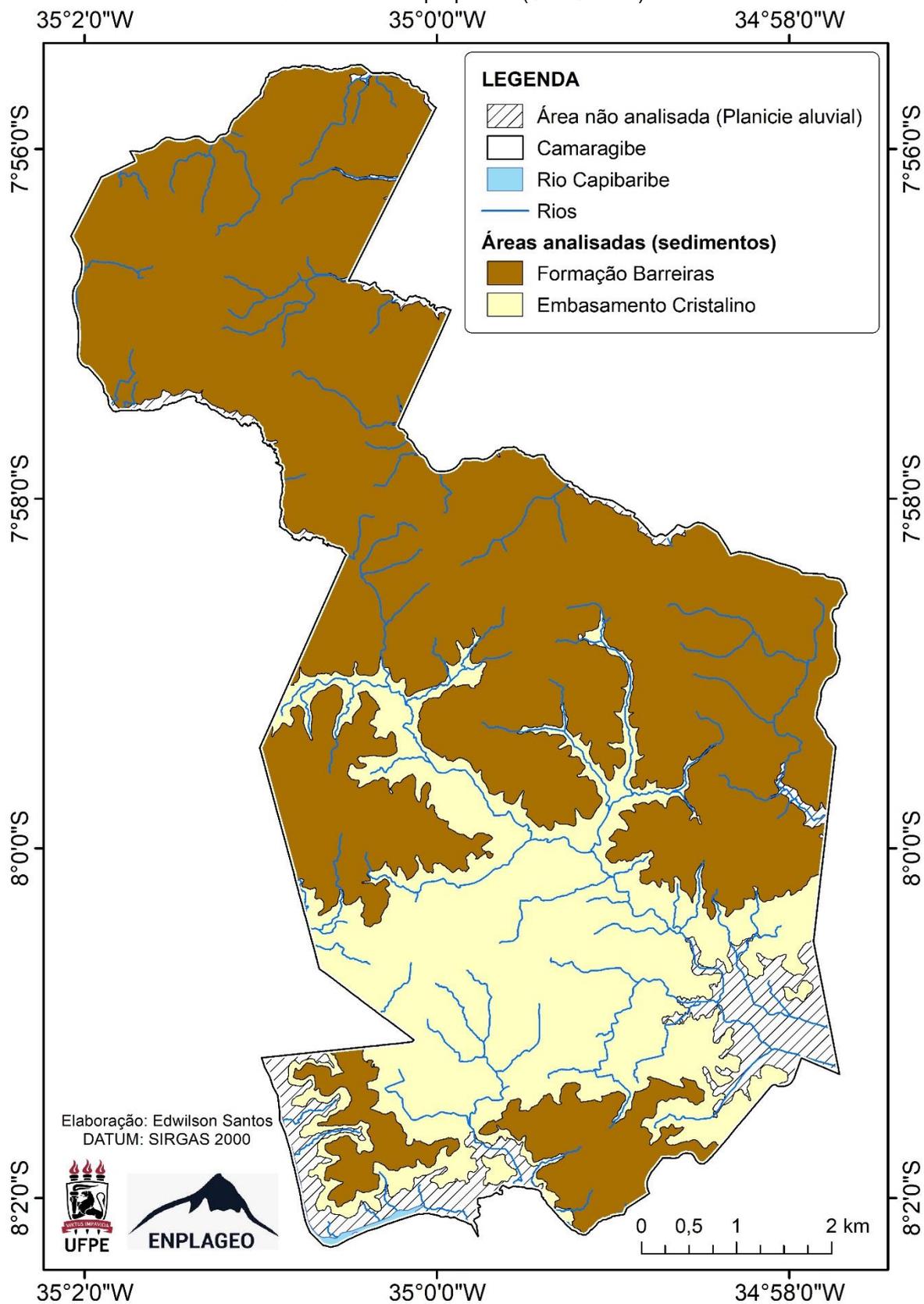
Para os processos que envolveram os cálculos do modelo SHALSTAB, utilizou-se a extensão ASA (*Automatic Shalstab Analysis*) de Sbroglia *et al.* (2017). Essa extensão utiliza camadas vetoriais e matriciais como dados de entrada para gerar o mapa de suscetibilidade a escorregamentos. A camada vetorial refere-se aos parâmetros físicos do solo e as camadas matriciais representam os parâmetros topográficos do modelo.

Os valores adotados para os parâmetros físicos do solo foram extraídos de estudos realizados no próprio município de Camaragibe por Bandeira (2003) e Silva (2007). Esses estudos trataram da investigação de estabilidade de encostas, nas quais foram realizados ensaios geotécnicos de laboratório (cisalhamento direto). As amostras utilizadas por estes autores foram coletadas em áreas com sedimentos da Formação Barreiras e do embasamento cristalino. Os corpos de prova foram moldados em campo e, posteriormente, foram ensaiados na condição saturada, por apresentar a pior condição para a deflagração dos escorregamentos nas encostas, que podem ocorrer em invernos rigorosos e chuvosos (BANDEIRA, 2003; SILVA, 2007).

Baseado nos valores obtidos por meio dos ensaios em laboratório, optou-se pela utilização de valores heterogêneos no município para os parâmetros físicos em um mesmo cenário, ou seja, houve uma diferenciação de valores dos parâmetros físicos do solo nas áreas com sedimentos da Formação Barreiras e do embasamento cristalino (Figura 20). Essa escolha, também, se baseia em função da grande extensão da área de estudo e na possibilidade do uso da geoestatística por meio da extensão ASA. Destaca-se que esta pesquisa não analisou as áreas de depósito aluvial devido a sua topografia plana, fato que impossibilita a ocorrência de escorregamentos.

As profundidades utilizadas foram 2 m e 5 m, conforme verificações de campo e com base também nos dados de Bandeira (2003) e Silva (2007). Desta forma, foram gerados um total de 06 (seis) cenários, conforme apresentados no Quadro 3.

Figura 20 – Localização das áreas de Formação Barreiras e de Embasamento Cristalino para aplicação dos valores físicos do solo de forma heterogênea/distribuída nos cenários de suscetibilidade propostos (SHASLTAB).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 3 - Cenários de suscetibilidade propostos (modelo SHALSTAB) para o referido estudo.

Cenário	Área de estudo	cs (Coesão do solo) N/m <sup>2</sup>	cr (Coesão das raízes) N/m <sup>2</sup>	rs (Peso específico do solo) kg/m <sup>3</sup>	f (Ângulo de atrito) Grau	w (Peso da vegetação) N/m <sup>2</sup>	z (Profundidade de análise) m
I	Formação Barreiras	3700	0	1898	31,2	0	2
	Embasamento Cristalino	3800	0	1994	29,4	0	2
II	Formação Barreiras	12500	0	1780	29,8	0	2
	Embasamento Cristalino	9400	0	2005	36,8	0	2
III	Formação Barreiras	0	0	2017	34,6	0	2
	Embasamento Cristalino	3800	0	1994	29,4	0	2
IV	Formação Barreiras	3700	0	1898	31,2	0	5
	Embasamento Cristalino	3800	0	1994	29,4	0	5
V	Formação Barreiras	12500	0	1780	29,8	0	5
	Embasamento Cristalino	9400	0	2005	36,8	0	5
VI	Formação Barreiras	0	0	2017	34,6	0	5
	Embasamento Cristalino	3800	0	1994	29,4	0	5

Fonte: Bandeira (2003); Silva (2007). Elaborado pelo autor.

#### 4.4 ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICOS E ANTRÓPICOS E VALIDAÇÃO DOS CENÁRIOS DE SUSCETIBILIDADE

A partir da correlação entre os mapas dos parâmetros topográficos e antrópico com o inventário de cicatrizes de escorregamentos obtiveram-se dois índices. Conforme Gao (1993), o primeiro índice, denominado Frequência de Distribuição (FD), refere-se à distribuição quantitativa das classes dos parâmetros topográficos e antrópico, podendo ser obtido por meio da Equação 14. O segundo índice, Concentração de Cicatrizes (CC), refere-se à distribuição quantitativa de cada classe afetada pelos escorregamentos, isto é, a razão entre o número de células de cada classe afetadas pelas cicatrizes e o total de células correspondentes aos escorregamentos (Equação 15).

$$FD = \frac{n^{\circ} \text{ de células de cada classe}}{\text{total de células}} * 100 \quad (\text{Equação 14})$$

$$CC = \frac{n^{\circ} \text{ de células de cada classe}}{\text{áreas afetadas por escorregamentos}} * 100 \quad (\text{Equação 15})$$

O cálculo desses índices foi realizado por meio da opção *Raster Calculator* da ferramenta *Spatial Analyst* do *software ArcGIS*. Posteriormente, os resultados obtidos foram organizados por meio de gráficos de colunas (histogramas).

A validação dos mapas de suscetibilidade é um procedimento fundamental para determinar a qualidade da previsão. A escolha do cenário que melhor representa a suscetibilidade a escorregamentos no município de Camaragibe partiu da comparação entre os mapas de cada cenário de suscetibilidade e o mapa de inventário de cicatrizes de escorregamentos, utilizando para isso a construção da curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) (FAWCETT, 2006). Essa etapa utilizou o módulo *GIS Analysis* do *software Idrisi*, utilizando como dados de entrada os mapas de suscetibilidade e o inventário de cicatrizes de escorregamento.

Essa comparação teve como objetivo verificar a consistência entre as áreas instáveis, de acordo com o modelo SHALSTAB, e os locais onde efetivamente ocorreram escorregamentos, de acordo com o inventário de cicatrizes de escorregamento.

A partir dessa comparação são possíveis quatro resultados: 1 – células classificadas como instáveis que coincidiram com células representando cicatrizes de escorregamento (verdadeiro positivo - VP); 2 – células classificadas como instáveis que não coincidiram com células de cicatrizes de escorregamentos (falso positivo - FP); 3 - células classificadas como estáveis que coincidiram com células de cicatrizes de escorregamento (falso negativo - FN) e 4 – células classificadas como estáveis que não coincidiram com células de cicatrizes de escorregamento (verdadeiro negativo - VN). Assim, com base nesses resultados foram trabalhados os conceitos de sensibilidade e de especificidade.

A sensibilidade é a capacidade do modelo testado de prever corretamente os eventos estudados (escorregamentos) (Equação 16), enquanto que a especificidade são as previsões errôneas do modelo na qual é detectada a ocorrência do evento em locais onde não ocorreram esses eventos (Equação 17) (SEEFELDER, 2017; SOBRAL, 2018).

$$\text{Sensibilidade} = \frac{VP}{VP+FP} \quad (\text{Equação 16})$$

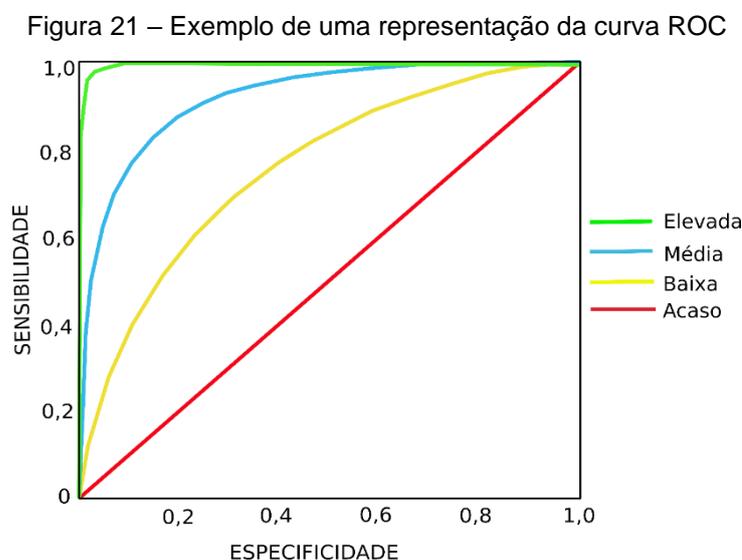
$$\text{Especificidade} = \frac{FP}{FP+VN} \quad (\text{Equação 17})$$

A partir dessa operação foi possível calcular a Área Abaixo da Curva - AAC (Equação 18). A AAC foi o parâmetro utilizado para quantificar o desempenho geral do modelo, de modo que quanto maior a AAC, melhor o desempenho do modelo. Nesta medição, os valores entre 0 e 0,699 são considerados ineficazes, portanto, valores entre 0,7 e 1 são considerados eficazes, ou seja, quanto maior a AAC, melhor será o desempenho do mapeamento (GUZZETTI, 2006; BRITO, 2014; PRADHAM; KIM, 2016; SEEFELDEER, 2017).

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[ (L_{si} - L_i) \cdot \frac{a_i + b_i}{2} \right] \quad (\text{Equação 18})$$

**Onde:**  $L_{si} - L_i$  = amplitude de cada classe;  $a_i$  = valor da ordenada correspondente a  $L_i$ ;  $b_i$  = valor da ordenada correspondente a  $L_{si}$ .

A construção da curva ROC é bastante útil na validação de modelos de previsão determinísticos e probabilísticos, pois utiliza uma representação bidimensional da performance do modelo utilizado (BRITO, 2014; PRADHAM e KIM, 2016). O modelo cuja curva ROC se encontra mais próxima do canto superior esquerdo apresentará os resultados mais confiáveis, conforme o exemplo apresentado na Figura 21.



Fonte: Adaptado de Sobral (2018)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos por meio da análise das relações entre os escorregamentos ocorridos em Camaragibe e os parâmetros físicos e antrópicos; além dos cenários de suscetibilidade fornecidos pelo modelo SHALSTAB e sua respectiva validação.

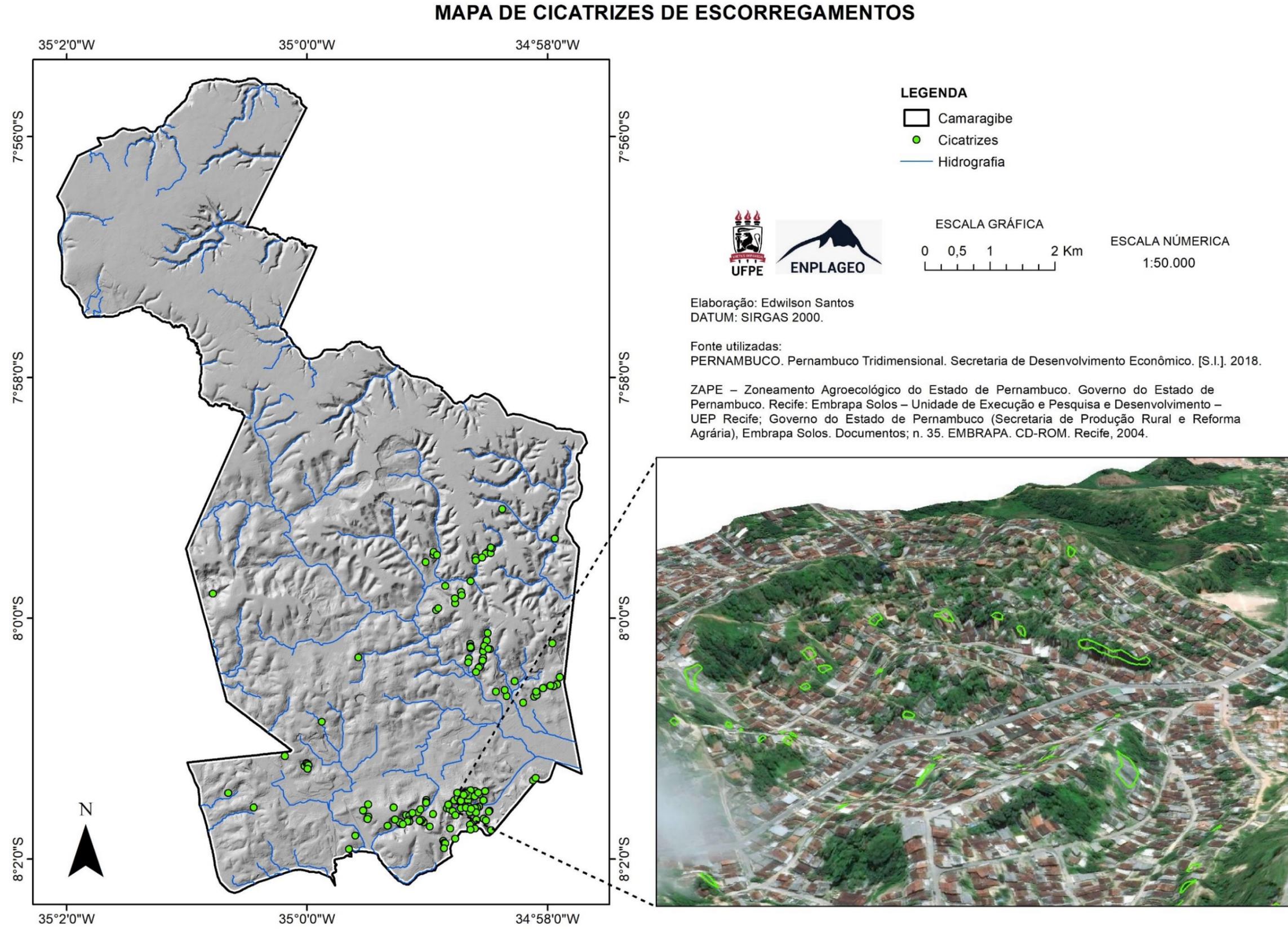
### 5.1 INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

Foram mapeadas 151 cicatrizes de escorregamentos (Figura 22). Essas cicatrizes encontraram-se, predominantemente, em encostas densamente ocupadas (Figura 23), com destaque para a concentração de cicatrizes nas áreas mais a leste e ao sul do município, correspondendo aos bairros de Tabatinga e dos Estados, respectivamente. A principal característica dessas áreas está relacionada ao processo de urbanização espontânea sobre as áreas de encosta da Formação Barreiras.

A área total das cicatrizes mapeadas equivaleu a 12.781 m<sup>2</sup>, correspondendo a 0,02% da área total do município de Camaragibe. Apesar desse valor parecer baixo em relação à área total do município, quando calculado o volume total de sedimentos gerados por esses escorregamentos, obtêm-se um total de 25.563 m<sup>3</sup> (considerando-se uma profundidade de ruptura de 2 m) ou 63.907 m<sup>3</sup> (considerando-se uma profundidade de ruptura de 5 m). Uma parcela considerável desses sedimentos acaba sendo carregada por fluxos hídricos até rios, canais e sistemas coletores de água pluvial provocando o assoreamento dos mesmos, favorecendo processos de alagamentos ou de inundações.

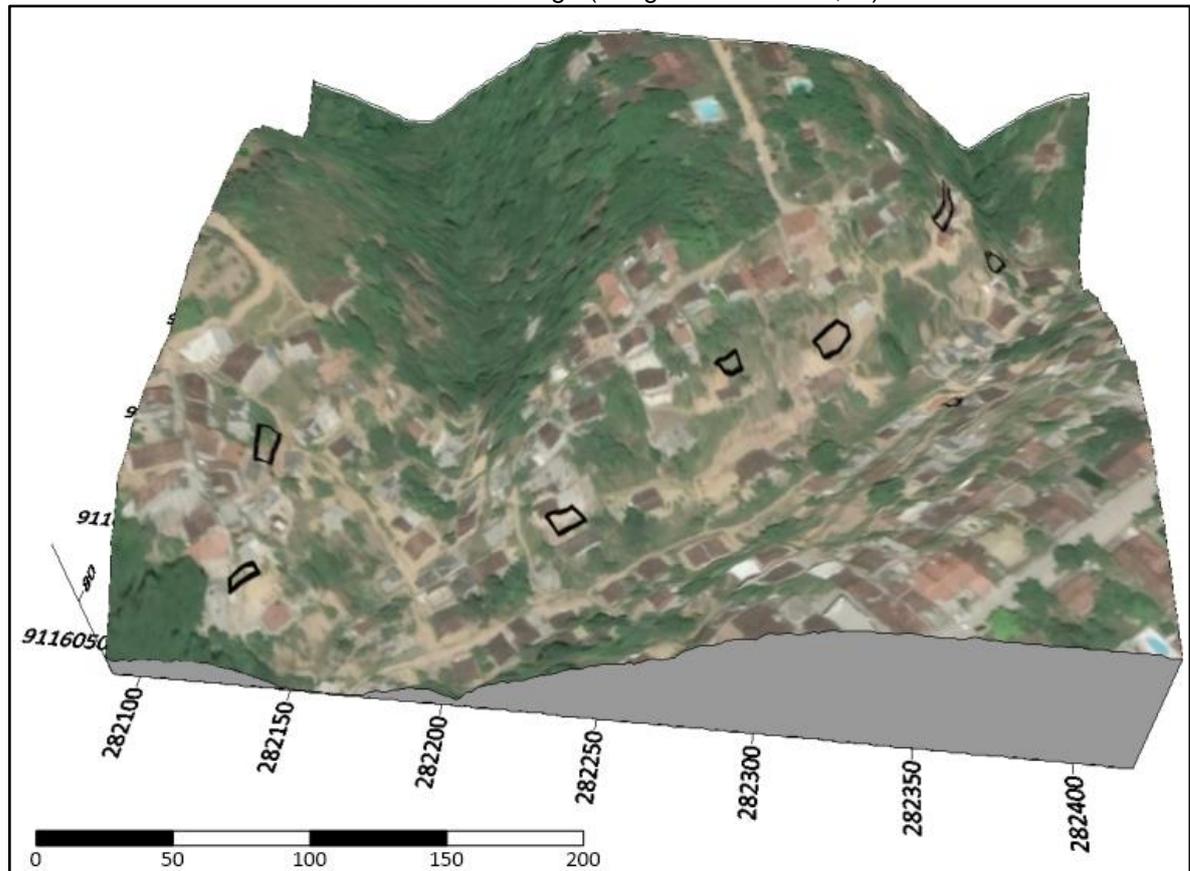
Durante os trabalhos de campo, verificou-se que muitas dessas cicatrizes encontram-se cobertas por lonas plásticas colocadas pela defesa civil do município como uma forma de proteger o solo contra infiltração da água da chuva (Figura 24). Porém, em muitos casos tal medida preventiva tornou-se a única resposta por parte do poder público municipal durante longo período. Observou-se também a presença de espécies vegetais de raízes curtas, como a bananeira (*Musa sapientum L.*), que retêm água e saturam o solo; além da carência de uma melhor infraestrutura de drenagem, de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, muitas vezes lançados diretamente nas encostas.

Figura 22 – Mapa de inventário de escorregamentos do município de Camaragibe. Devido a escala municipal, no mapa as cicatrizes estão representadas na forma de pontos e no detalhe ao lado (fotografia) na forma de cicatrizes (polígonos).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 – Representação tridimensional de cicatrizes de escorregamentos em encostas ocupadas no bairro da Tabatinga (Exagero vertical = 0,75).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – Encosta coberta por lona plástica no bairro Novo do Carmelo.



Fonte: Registrado por Tawana Melo.

## 5.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS

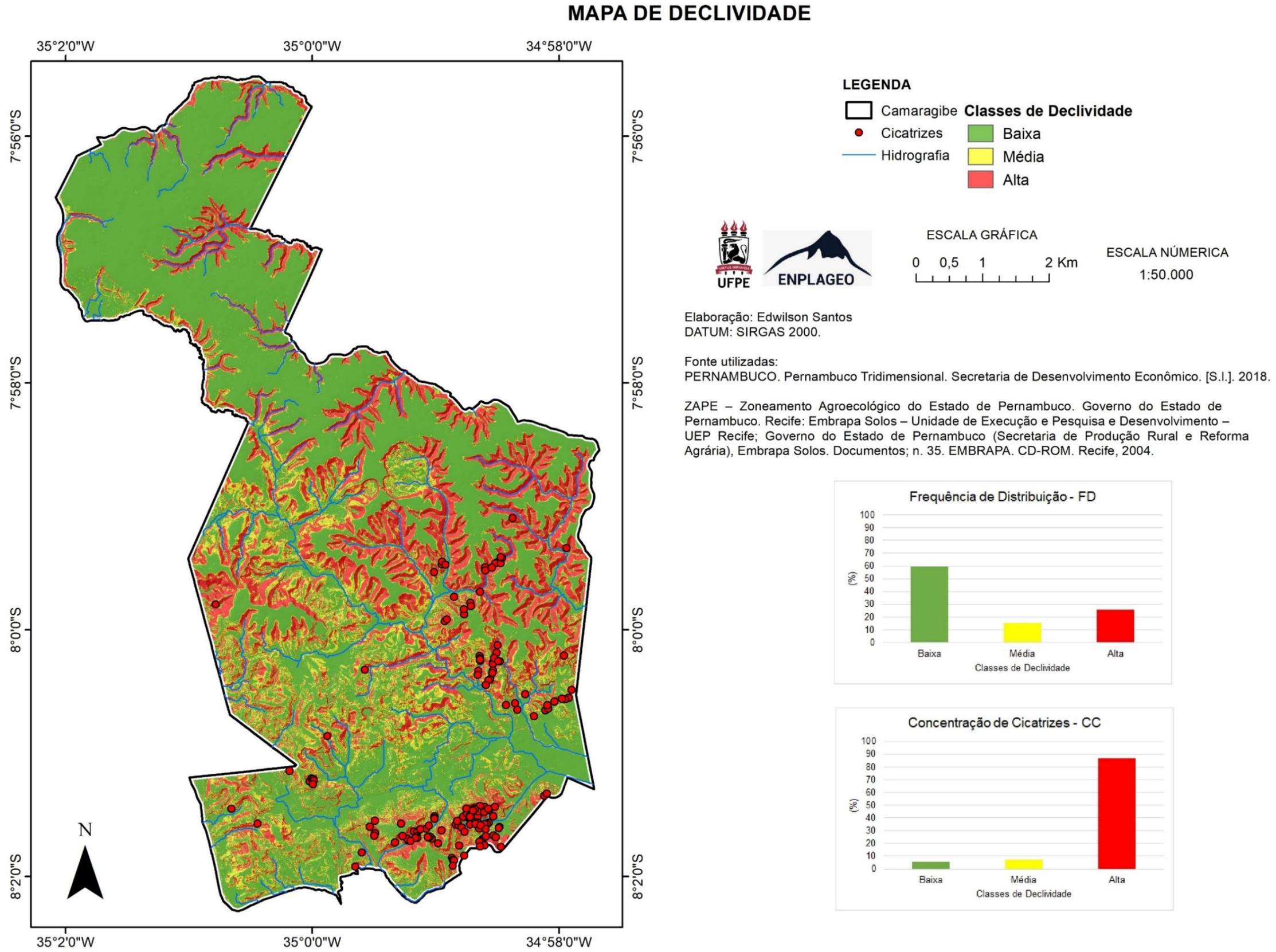
Este item trata da análise da relação entre os parâmetros topográficos (declividade, aspecto, curvatura, área de contribuição) e os escorregamentos identificados ao longo da pesquisa, tendo como base o inventário de cicatrizes apresentado no item anterior.

### 5.2.1 Declividade

A análise da FD (Frequência de Distribuição) das classes de declividade no município de Camaragibe (Figura 25) apontou uma predominância de áreas planas. A classe de declividade baixa abrangeu 59,4% da área total. Essas áreas localizam-se, majoritariamente, nas áreas ao norte do município, onde se encontra o topo dos tabuleiros, mais especificamente, na região do bairro de Aldeia, e ao sul, na planície fluvial próximo à divisa com a cidade do Recife.

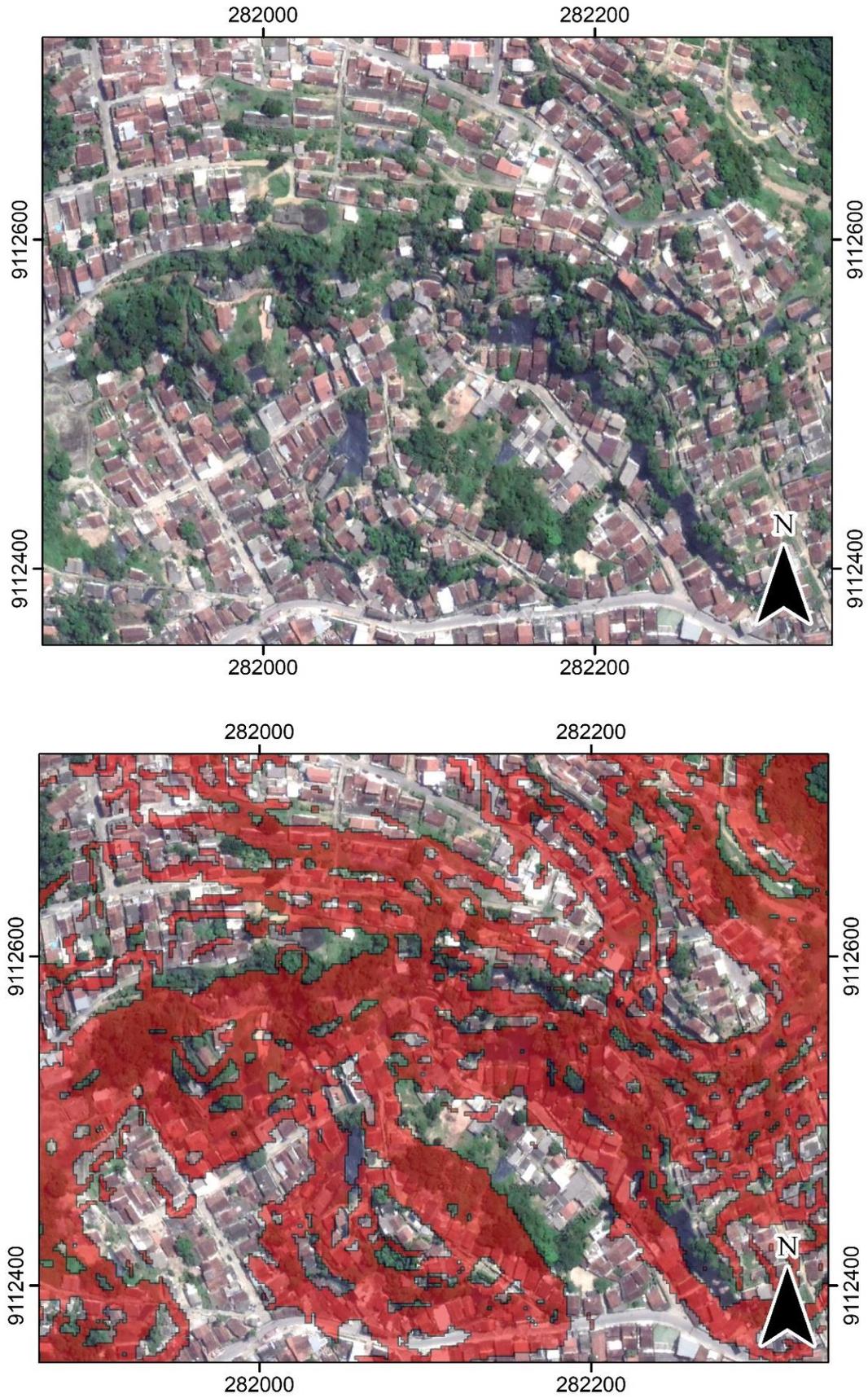
A classe de declividade alta teve uma FD de 25,5%, sendo encontradas a leste e a oeste do município. Essas áreas são, geralmente, formadas pelas encostas do tabuleiro e algumas caracterizam-se como cabeceiras de drenagem. Verificou-se que muitas destas encostas (apesar do grau de inclinação não ser recomendável a ocupação) são ocupadas, geralmente pela população menos favorecida e, normalmente, em situações de risco (Figura 26).

Figura 25 – Mapa de Declividade do município de Camaragibe, índices FD (Frequência de Distribuição) e CC (Concentração de Cicatrizes) do parâmetro declividade e ocorrências de escorregamentos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Encostas com declividade alta (vermelho) antropicamente ocupadas (Bairro dos Estados)



Fonte: Elaborado pelo autor

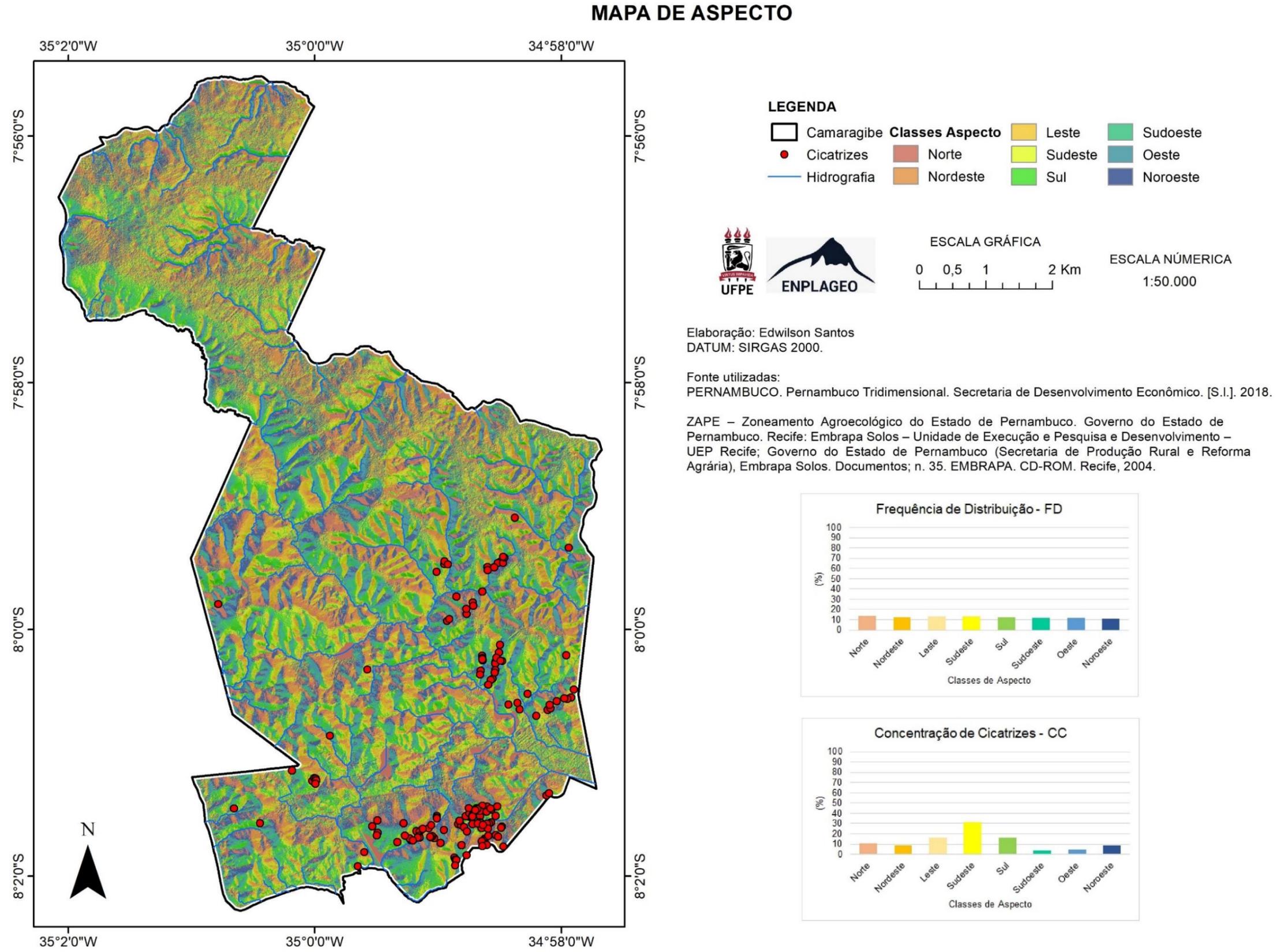
A classe de média declividade representou uma FD de 15,2%. Encostas que se enquadram nessa classe são locais onde a ocupação é permitida, desde que acompanhada de laudos técnicos. Na área de estudo, esses locais se localizam, principalmente, em regiões do Embasamento Cristalino.

Quanto a Concentração de Cicatrizes (CC), a classe considerada de alta declividade apresentou o maior percentual, com 87% (Figura 25). Esses locais caracterizam-se pela dissecação do relevo e, conseqüentemente, tendem a uma maior infiltração da água, culminando em uma maior saturação do solo. Associado a isso, verificou-se uma intensa ocupação antrópica cujo grau de perturbação (pressões antropogênicas), representada, por exemplo, por obras de cortes parciais das encostas e lançamento de águas servidas podem reduzir a estabilidade dessas encostas. As classes média e baixa apresentaram uma CC de 7,5% e de 5,5%, respectivamente (Figura 25).

### **5.2.2 Aspecto**

Conforme apresentado na Figura 27, as encostas da área de estudo apresentaram uma FD relativamente uniforme. As encostas orientadas para o norte totalizaram 14%; para sudeste, 13,2%; para leste, 13%; para sul 12,7%; para nordeste, 12,5%; para sudeste, oeste e noroeste apresentaram uma FD de 11,9%, 11,4% e 11,2%, respectivamente.

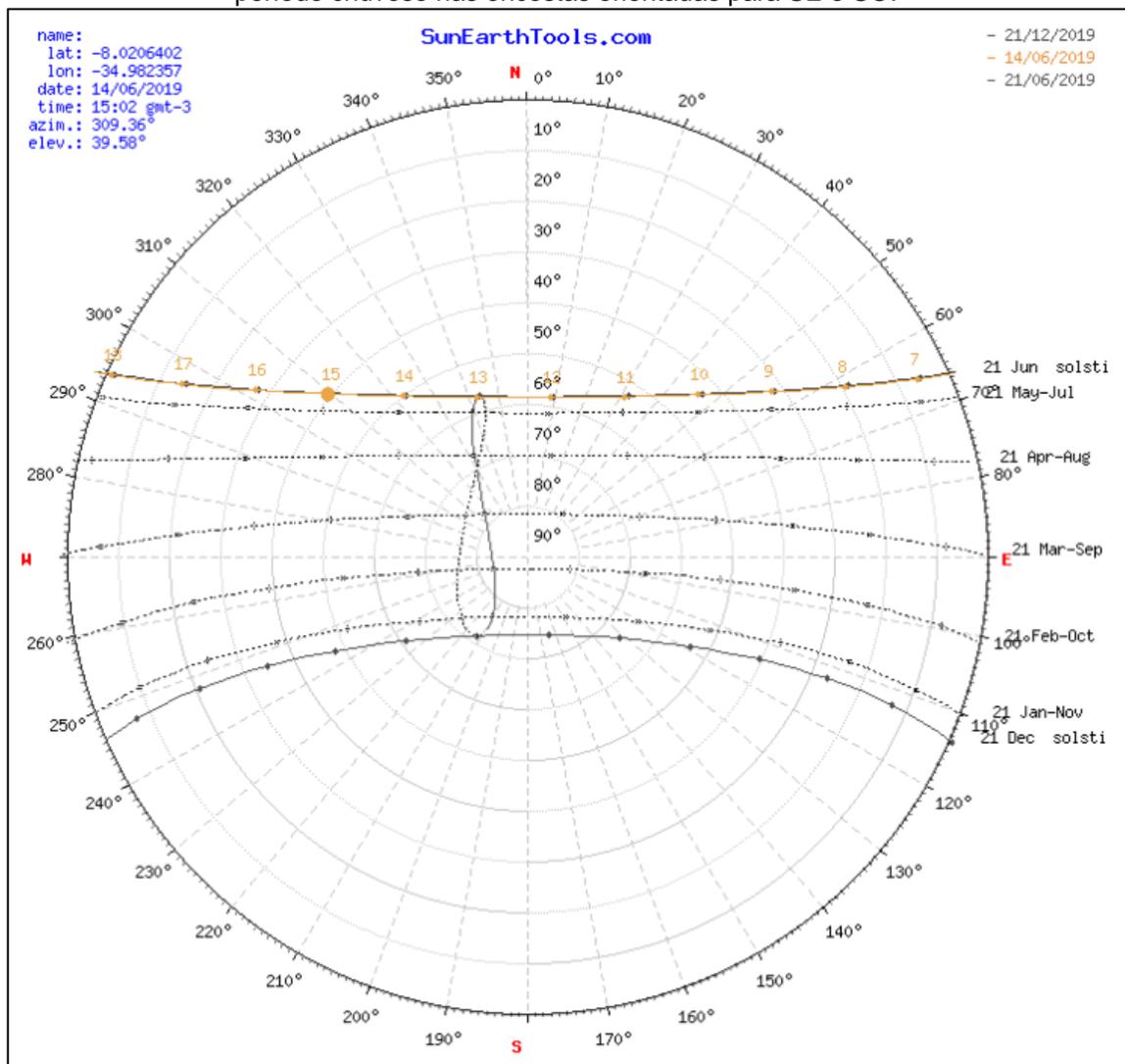
Figura 27 – Mapa de Aspecto do município de Camaragibe, índices FD (Frequência de Distribuição) e CC (Concentração de Cicatrizes) do parâmetro aspecto e ocorrências de escorregamentos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto a CC, verificou-se uma maior ocorrência nas encostas orientadas para direção sudeste, com 31,1% (Figura 27). Ao se analisar a incidência solar sobre as encostas da área de estudo, percebeu-se que no período de maior índice pluviométrico, as encostas orientadas para a direção sudeste são menos expostas a incidência solar que as encostas dos quadrantes NO e NE, por exemplo, conforme apresentado na Figura 28. Uma menor incidência solar, conforme apontou GAO (1993), tem a capacidade de influenciar diretamente na umidade dessas encostas e conseqüentemente na sua estabilidade. Contudo, é necessário observar outros fatores, como exemplo, a presença de cobertura vegetal, visando-se uma análise completa.

Figura 28 – Carta solar do município de Camaragibe com destaque para a menor incidência solar no período chuvoso nas encostas orientadas para SE e SO.



Fonte: Sun Earth tools, 2019

### 5.2.3 Curvatura

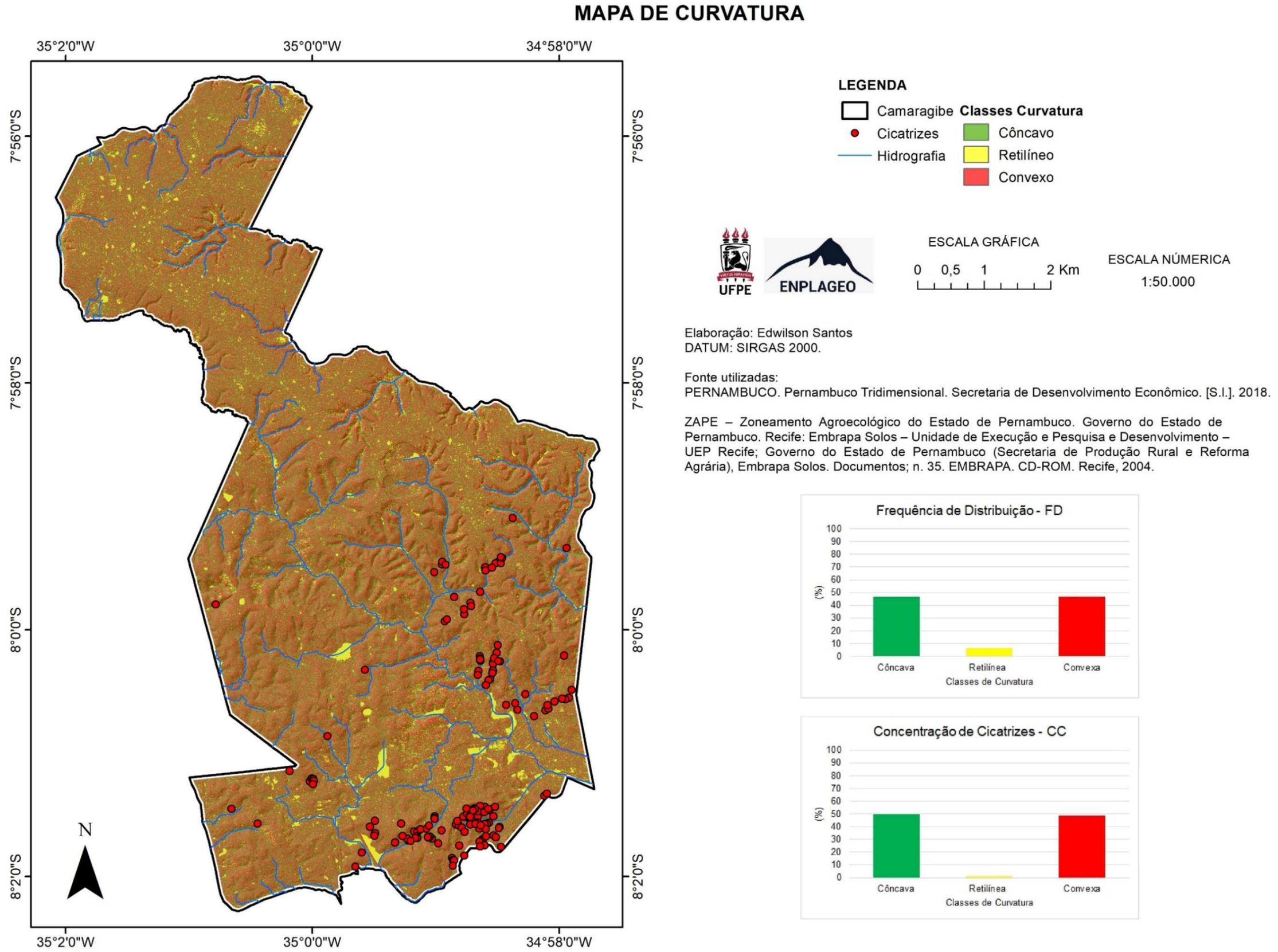
O território que abrange o município de Camaragibe é, em linhas gerais, formado por encostas de morfologia côncava e convexa. Ambas as formas apresentaram, juntas, um total de 93,4%, quanto à FD (Figura 29).

Foi apontado novamente um equilíbrio entre as formas côncavas e convexas quanto à CC e um percentual inexpressivo da classe retilínea (Figura 29). As classes côncavas e convexas concentraram 98,6% dos escorregamentos (côncava com 50% e convexa com 48,6%). O número inexpressivo de CC na classe retilínea pode ser explicado pela ocorrência dessa forma, mais comumente, em áreas mais planas ou de relevo mais suave, como fundos de vales; áreas de baixa suscetibilidade para os escorregamentos.

As encostas que possuem formas côncavas são mais suscetíveis a concentração de água no solo, que por sua vez contribui para o aumento das cargas de pressão durante a chuva (GAO, 1993; DIETRICH; MONTGOMERY, 1998). Por conta dessa maior concentração, não é necessário um grande volume pluviométrico para ocorrer a ruptura. Já as encostas convexas por serem divergentes, caracterizam-se como locais que controlam a distribuição da água sobre o terreno, necessitando de índices pluviométricos maiores para que ocorra a saturação do solo e, por consequência, a instabilização da área (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

Uma quantidade considerável de escorregamentos em encostas que são naturalmente menos suscetíveis a ocorrência de escorregamentos pode ter relação direta com a forma de ocupação antrópica nessas encostas. Este é o caso da área de estudo, visto que em muitos locais foi possível identificar interferências antrópicas, sendo a mais comum os cortes e aterros (Figura 30). Essas interferências promovem alterações nas formas das encostas, que por sua vez resultam na criação de *knickpoints* artificiais, alterações nas propriedades físicas do solo por meio da maior infiltração da água, na concentração de umidade, no aumento da poro-pressão, entre outras mudanças que promovem instabilidade na área.

Figura 29 – Mapa de Curvatura do município de Camaragibe, índices FD (Frequência de Distribuição) e CC (Concentração de Cicatrizes) do parâmetro curvatura e ocorrências de escorregamentos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 – Encosta convexa apresentando corte de parte do terreno para construção de imóvel (comunidade do Córrego do Desastre – bairro do Areeiro).



Fonte: registrado pelo autor

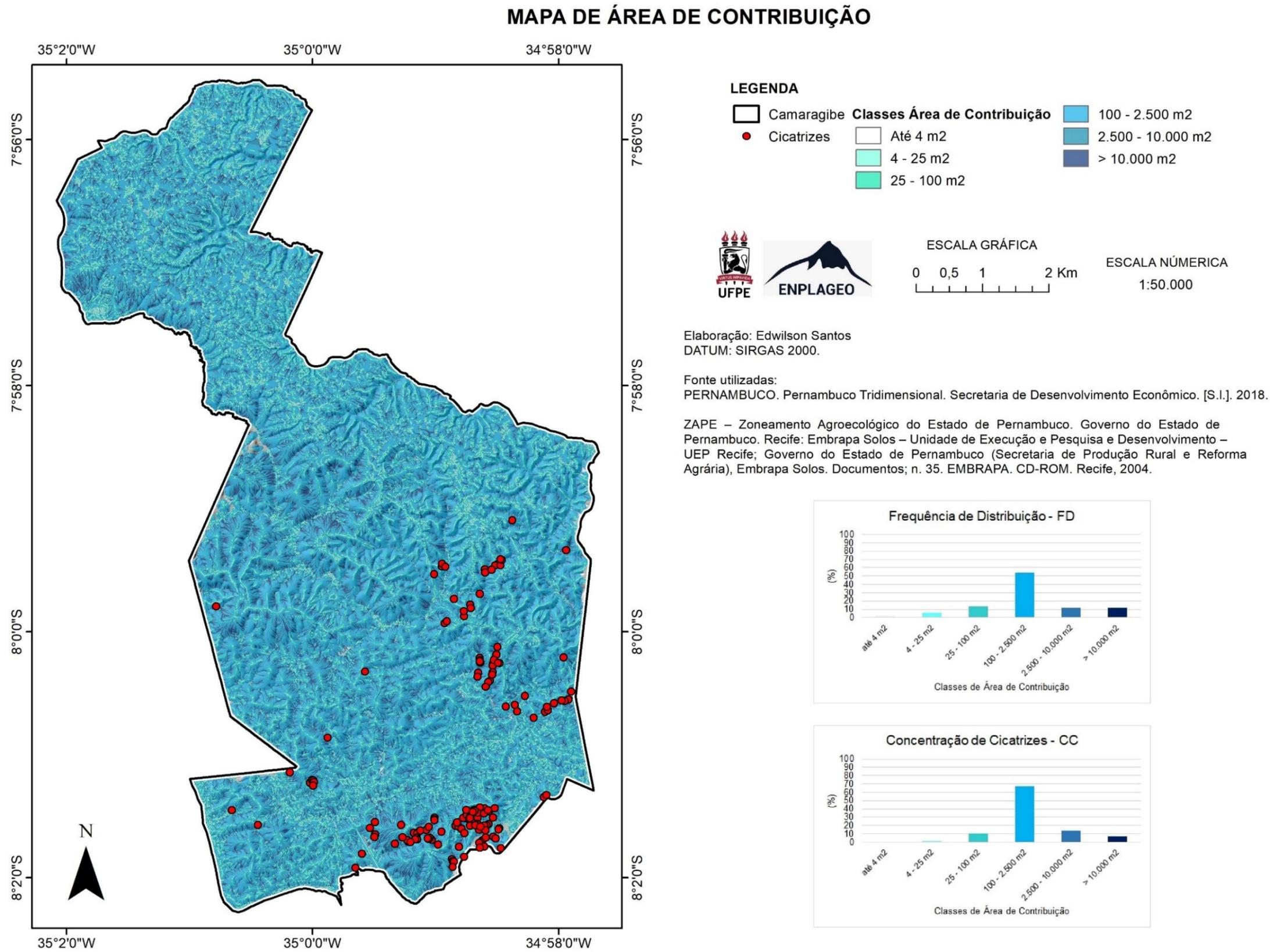
#### 5.2.4 Área de contribuição

A classe com maior FD foi a classe entre 100 - 2.500 m<sup>2</sup> (54,4%), seguido pelas classes 25 – 100 m<sup>2</sup> e 2.500 – 10.000 m<sup>2</sup> com 13,7% e 12,1%, respectivamente. As demais classes (4 m<sup>2</sup>, 5 – 25 m<sup>2</sup> e > 10.000 m<sup>2</sup>) totalizaram 19,7% (Figura 31).

Com relação as CC, a classe 100 - 2.500 m<sup>2</sup> foi aquela que mais registrou ocorrência de cicatrizes, com um total de 67,1% (Figura 31). A classe 2.500 – 10.000 m<sup>2</sup> registrou um índice de CC de 14%. As classes restantes registraram, juntas, 19% (Figura 31).

A classe >10.000 m<sup>2</sup> representa os principais canais da área de estudo e, geralmente, se localizam em terrenos mais planos. As classes inferiores, geralmente, formam as cabeceiras de drenagem da área de estudo.

Figura 31 – Mapa de Área de Contribuição do município de Camaragibe, índices FD (Frequência de Distribuição) e CC (Concentração de Cicatrizes) do parâmetro área de contribuição e ocorrências de escorregamentos.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS ANTRÓPICOS (USO DA TERRA)

Apesar do grande interesse do setor imobiliário em ocupar os diversos terrenos ainda existentes no município, Camaragibe mantém grandes áreas remanescentes de Mata Atlântica, principalmente, nas regiões central e a norte do município. Nessas regiões, predominam o uso mais voltado a atividades de lazer, com diversos clube e chácaras, ficando o uso residencial em segundo plano. Destaca-se que nessa mesma região há um maior controle por parte da administração pública com relação ao ordenamento urbano.

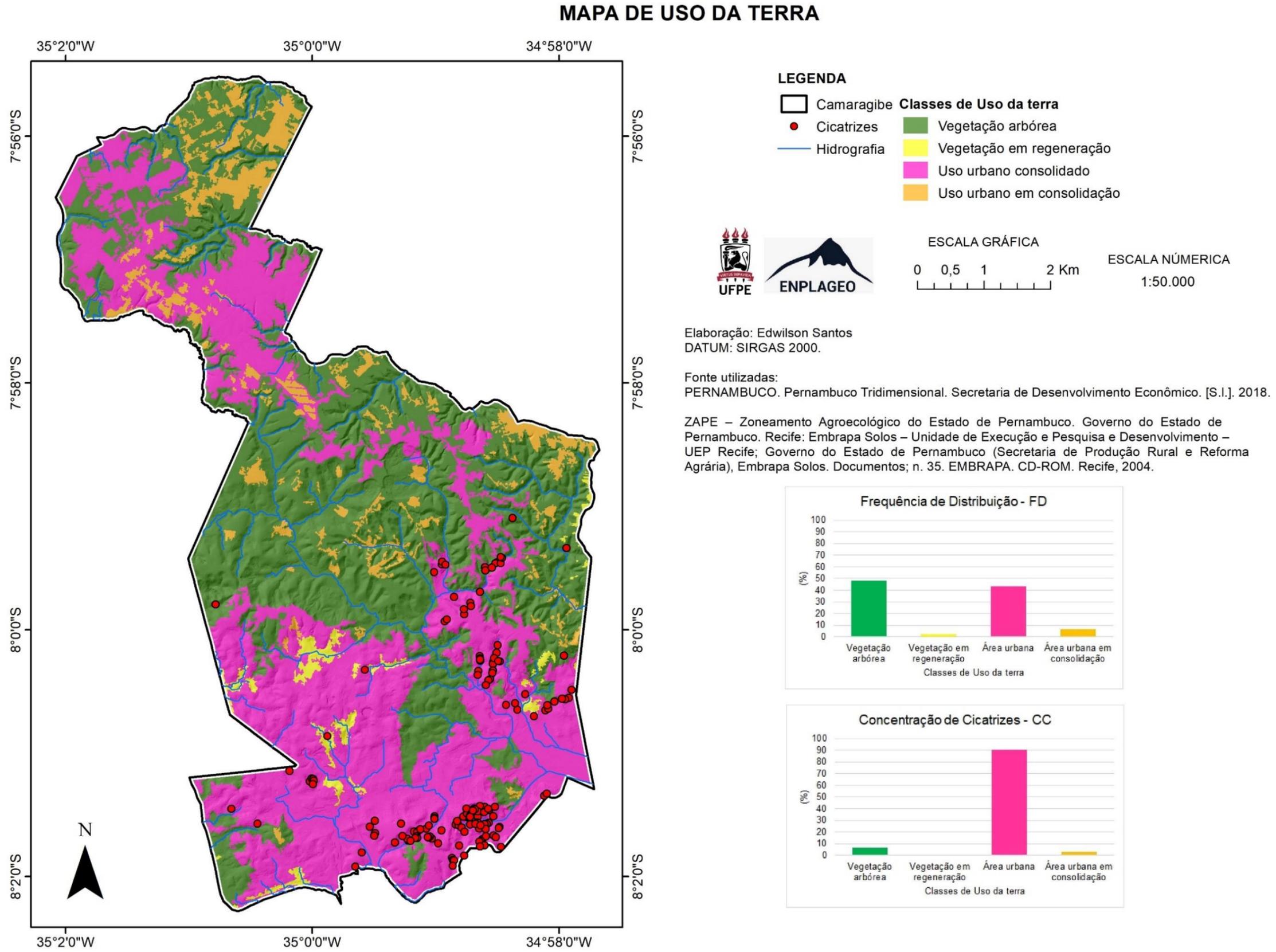
Nesse sentido, Camaragibe é, em linhas gerais, formado por áreas urbanas ou em processo de urbanização e áreas de mata, conforme apresentado na Figura 32.

A classe vegetação arbórea apresentou a maior FD, com 48,1% (Figura 32). É possível que a manutenção das áreas formadas por vegetação arbórea ocorra em função da sua ocorrência estar associada a encostas com alto grau de declividade, ou seja, terrenos com maior dificuldade construtiva e com necessidade de maiores investimentos para sua ocupação.

Em algumas áreas observou-se que a vegetação se encontra em estado de regeneração, sendo essas áreas caracterizadas pela presença de espécies de pequeno ou médio porte, situadas em terrenos planos ou com baixa declividade. A FD que representa essa classe (vegetação em regeneração) foi de 2% (Figura 32).

As áreas urbanas consolidadas apresentaram uma FD de 43,2% e as áreas urbanas em consolidação de 6,7% (Figura 32). As áreas urbanas consolidadas localizam-se, predominantemente, a sul do município. Essas áreas, quando localizadas em terrenos com declividade favorável a ocupação, apresentam uma maior infraestrutura de serviços de drenagem, de pavimentação e de saneamento quando comparadas as áreas ocupadas de encostas. As áreas urbanas em consolidação encontram-se espaçadas pelo município. Essas áreas, encontram-se principalmente, na região onde localiza-se o bairro de Aldeia.

Figura 32 – Mapa de Uso da terra do município de Camaragibe, índices FD (Frequência de Distribuição) e CC (Concentração de Cicatrizes) do parâmetro uso da terra e ocorrências de escorregamentos.



Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado da CC para o parâmetro antrópico (Figura 33) foi o que apresentou a maior disparidade em comparação aos outros parâmetros anteriormente mostrados. Isso porque, 93% dos escorregamentos se concentraram nas áreas urbanas (90,2% nas áreas urbanas consolidadas e 2,8% nas áreas urbanas em consolidação).

A CC em áreas com vegetação arbórea foi de 6,3%. Acredita-se que a boa conservação ambiental dessas áreas contribuiu significativamente para a baixa ocorrência de escorregamentos nessa classe. Os poucos escorregamentos que ali ocorreram, provavelmente, tiveram relação com algum dos parâmetros topográficos.

Os números apresentados nesse item apontam que os escorregamentos em Camaragibe ocorreram, principalmente, em locais onde a ocupação antrópica avançou de forma inadequada sobre encostas declivosas, aliado a isso tem-se outras ações antrópicas que contribuem diretamente para o aumento da instabilidade das encostas ocupadas (Figura 33).

Figura 33 – Fatores antrópicos que influenciaram na deflagração de escorregamentos: A – ocupação de encostas íngremes; B – Lançamento de águas servidas; C – Corte de parte da encostas sem acompanhamento técnico; D – Corte de parte da encosta e presença de bananeiras.



Fonte: Registrado pelo autor

#### 5.4 CENÁRIOS DE SUSCETIBILIDADE (SHALSTAB) E VALIDAÇÕES

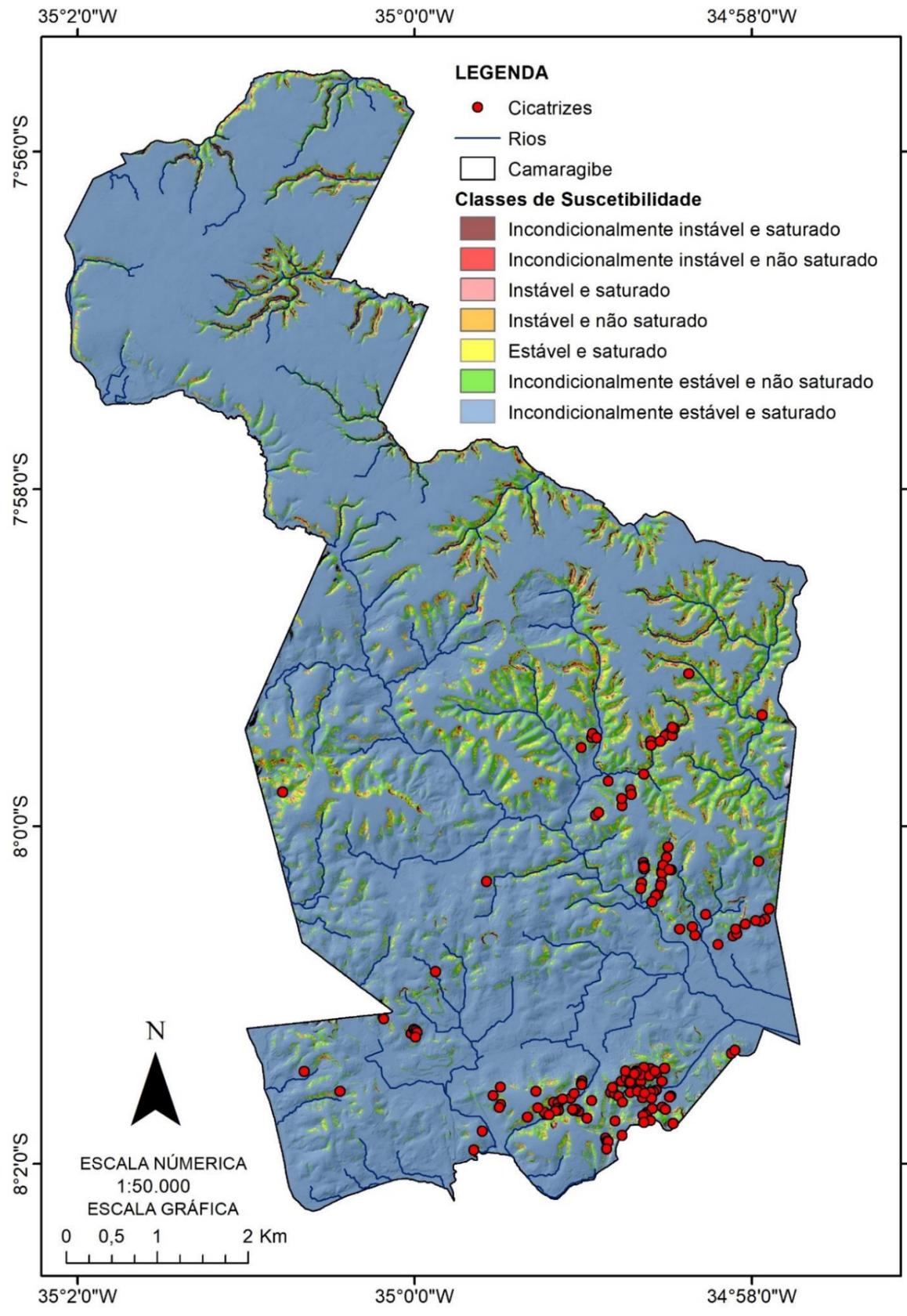
O mapa de suscetibilidade referente ao **cenário I** (Figura 34) apresentou uma predominância das classes consideradas estáveis pelo SHALSTAB em comparação as classes instáveis. Nesse cenário, a classe mais instável (Incondicionalmente instável e saturado) apresentou uma FD de 0,9%, enquanto a classe Instável e não saturado apresentou um valor de 0,5% de FD. As classes de média estabilidade (Estável e não saturado, Instável e não saturado e Instável e saturado) equivaleram a 3,6%, 1,6% e 0,7%, respectivamente. Já as classes consideradas estáveis apresentaram os seguintes valores de FD: Incondicionalmente estável e saturado com 82,8% e Incondicionalmente estável e não saturado com 9,9%.

Quanto a CC do cenário I, as classes instáveis concentraram 24,2% das cicatrizes de escorregamentos mapeadas. A classe mais instável (Incondicionalmente instável e saturado) apresentou uma CC de 21,7%, enquanto a classe Incondicionalmente instável e não saturado apresentou um valor de 2,6%. As classes estáveis somaram, juntas, 46% de CC (Incondicionalmente estável e não saturado com 31,3% e Incondicionalmente estável e saturado com 14,6%). As classes de média estabilidade representaram 29,8% de CC (Estável e não saturado com 16,7%, Instável e não saturado com 9,3% e Instável e saturado com 3,8%) (Figura 34).

O **cenário II** (Figura 35) mostrou-se completamente estável. A FD das classes estáveis nesse cenário foi de 99,9% para a classe Incondicionalmente estável e saturado e 0,1% para a classe Incondicionalmente estável e não saturado. Essa situação de completa estabilidade tem relação direta com os valores adotados para os parâmetros físicos de coesão do solo ( $12.500 \text{ N/m}^2$  e  $9.400 \text{ N/m}^2$ ) e ângulo de atrito ( $29,8^\circ$  e  $36,8^\circ$ ), uma vez que valores elevados destes parâmetros oferecem maior estabilidade às encostas.

Assim, quanto a CC do cenário II, não foi registrada nenhuma ocorrência em classes consideradas instáveis ou de média estabilidade. Com isso é possível apontar que este cenário não condiz com as reais características naturais para ocorrência de escorregamentos no município de Camaragibe.

Figura 34 – Mapa de suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário I).

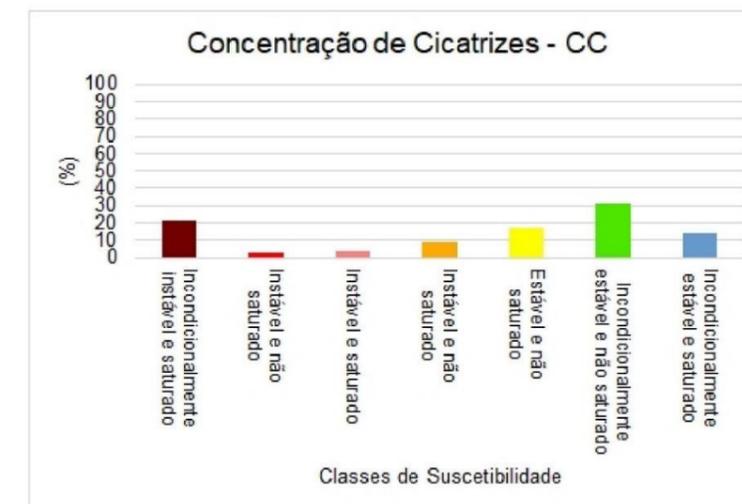
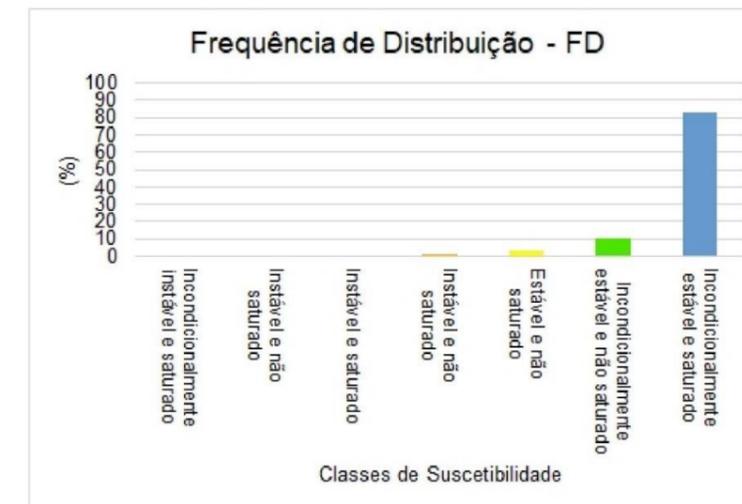


### MAPA DE SUSCETIBILIDADE (CENÁRIO I)

Parâmetros utilizados:  
 Formação Barreiras:  $cs = 3700 \text{ N/m}^2$ ;  $cr = 0$ ;  $rs = 1898 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 31,2^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 2 \text{ m}$ .  
 Embasamento Cristalino:  $cs = 3800 \text{ N/m}^2$ ;  $cr = 0$ ;  $rs = 1994 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 29,4^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 2 \text{ m}$ .

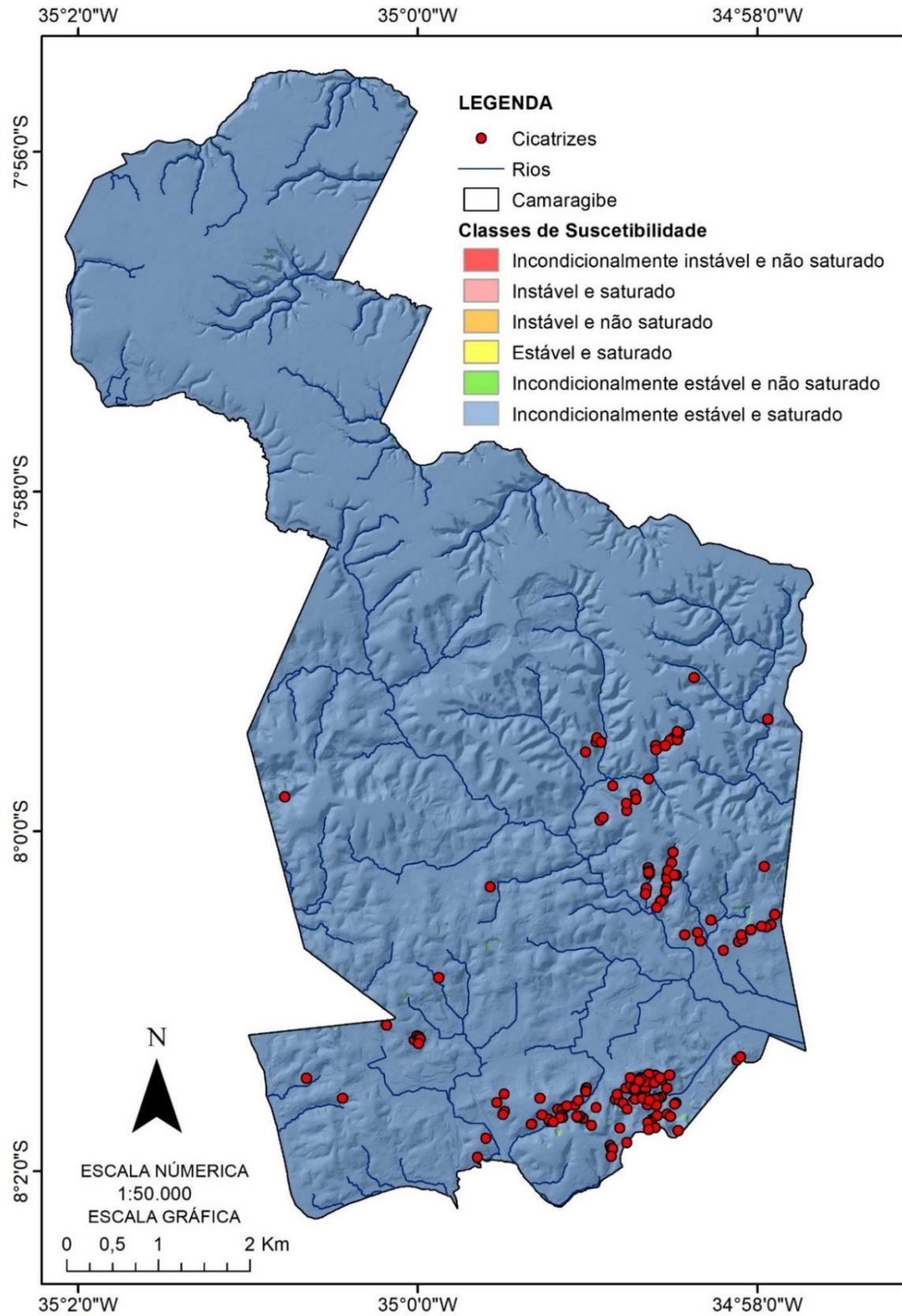
Fonte utilizadas:  
 BANDEIRA, A. P. N. Mapeamento de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe - PE. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 209. 2003.

PERNAMBUCO. Pernambuco Tridimensional. Secretaria de Desenvolvimento Econômico. [S.l.]. 2018.



Elaboração: Edwilson Santos  
 DATUM: SIRGAS 2000.

Figura 35 – Mapa de suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário II).



### MAPA DE SUSCETIBILIDADE (CENÁRIO II)

Parâmetros utilizados:

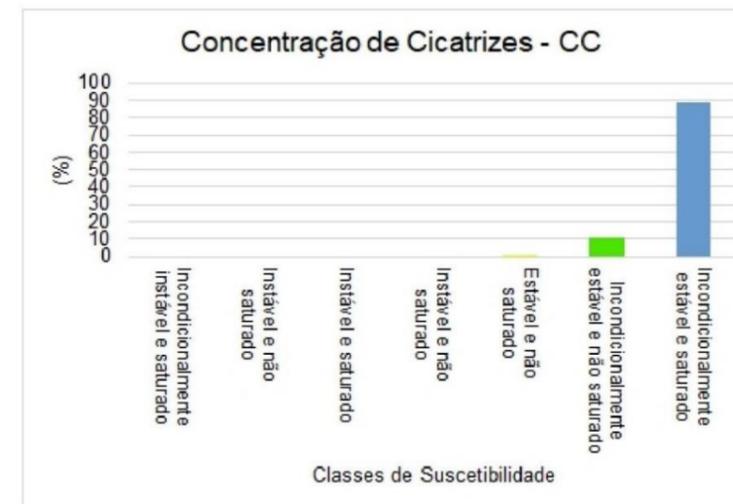
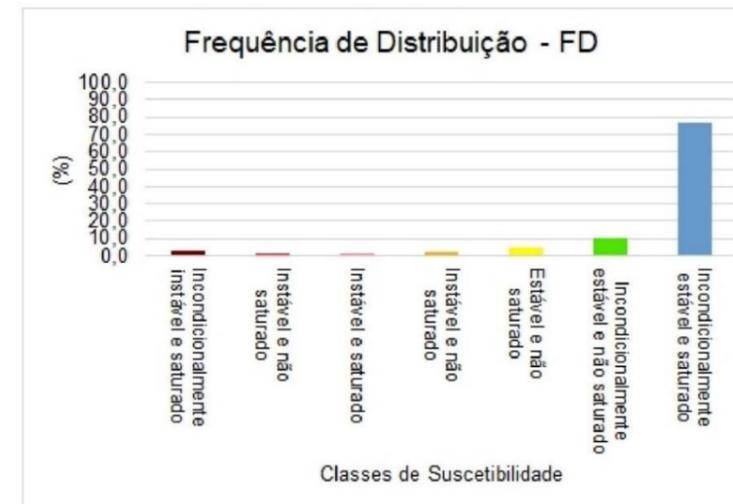
Formação Barreiras:  $c_s = 12500 \text{ N/m}^2$ ;  $c_r = 0$ ;  $r_s = 1780 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 29,8^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 2 \text{ m}$ .

Embasamento Cristalino:  $c_s = 9400 \text{ N/m}^2$ ;  $c_r = 0$ ;  $r_s = 2005 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 36,8^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 2 \text{ m}$ .

Fonte utilizadas:

BANDEIRA, A. P. N. Mapeamento de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe - PE. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 209. 2003.

PERNAMBUCO. Pernambuco Tridimensional. Secretaria de Desenvolvimento Econômico. [S.l.]. 2018.

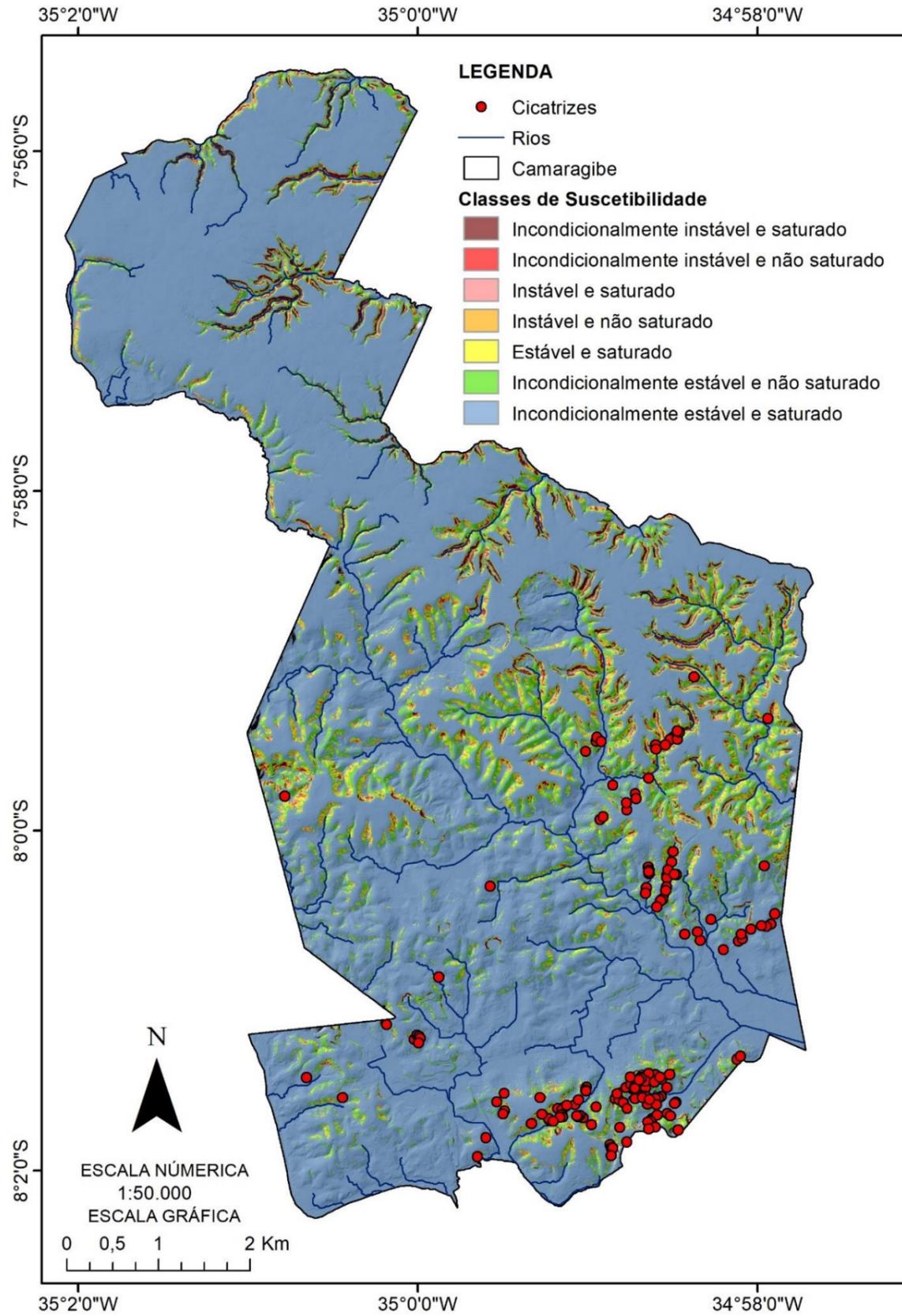


Elaboração: Edwilson Santos  
 DATUM: SIRGAS 2000.

A FD das classes do **cenário III** (Figura 36) foi de 2,9% para as classes instáveis (Incondicionalmente instável e saturado – 2,1%; Incondicionalmente instável e não saturado – 0,8%); 7,3% para as classes de média estabilidade (Estável e não saturado – 4,2%; Instável e não saturado – 2,1%; Instável e saturado – 0,9%); e as classes estáveis com 89,8% (Incondicionalmente estável e saturado – 9,9%; e Incondicionalmente estável e não saturado – 79,9%). O leve aumento percentual da FD das classes instáveis, quando comparanda ao cenário I, pode ser explicada pelos valores adotados nos locais de Formação Barreiras: coesão do solo nula (mais instável), maior ângulo de atrito ( $34,6^\circ$ ) e maior peso específico do solo ( $2017 \text{ kg/m}^3$ ).

Quanto a CC do cenário III (Figura 36), ratifica-se que a utilização de valor nulo para a coesão do solo influenciou no aumento das áreas instáveis e esse aumento promoveu uma maior CC nas áreas instáveis. A classe Incondicionalmente instável e saturado concentrou o maior percentual de cicatrizes (27,9% de CC), enquanto a classe Incondicionalmente instável e não saturado, apresentou uma CC de 4,5%. As classes Estável e não saturado, Instável e não saturado e Instável e saturado, consideradas de média estabilidade, apresentaram valores de 15,1%, 9,2% e 4,2% de CC, respectivamente. As classes Incondicionalmente estável e saturado e Incondicionalmente estável e não saturado apresentaram percentuais de CC de 13% e de 26,1%, respectivamente.

Figura 36 – Mapa de suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário III).



### MAPA DE SUSCETIBILIDADE (CENÁRIO III)

Parâmetros utilizados:

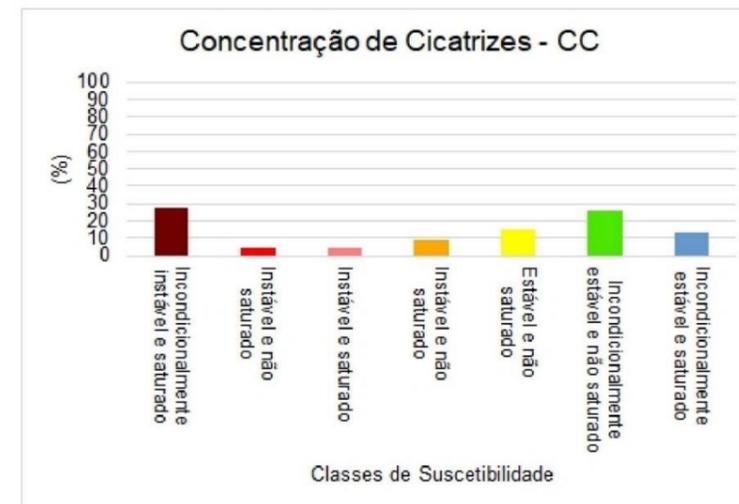
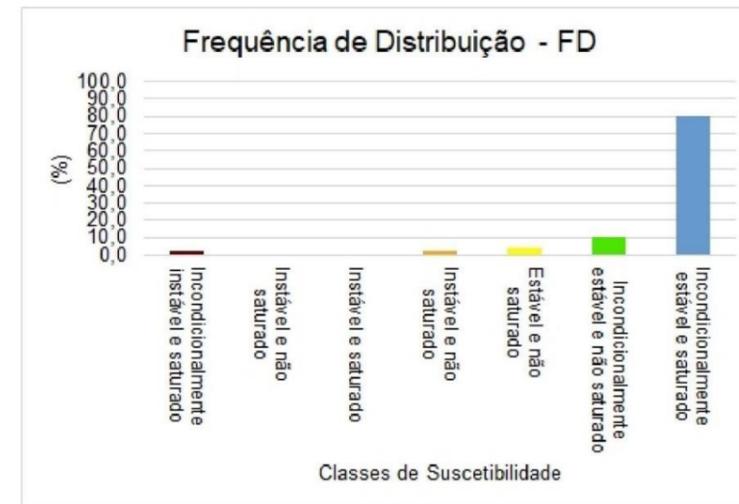
Formação Barreiras:  $cs = 0 \text{ N/m}^2$ ;  $cr = 0$ ;  $rs = 2017 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 36,4^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 2 \text{ m}$ .

Embasamento Cristalino:  $cs = 3800 \text{ N/m}^2$ ;  $cr = 0$ ;  $rs = 1994 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 29,4^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 2 \text{ m}$ .

Fonte utilizadas:

BANDEIRA, A. P. N. Mapeamento de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe - PE. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 209. 2003.

PERNAMBUCO. Pernambuco Tridimensional. Secretaria de Desenvolvimento Econômico. [S.l.]. 2018.



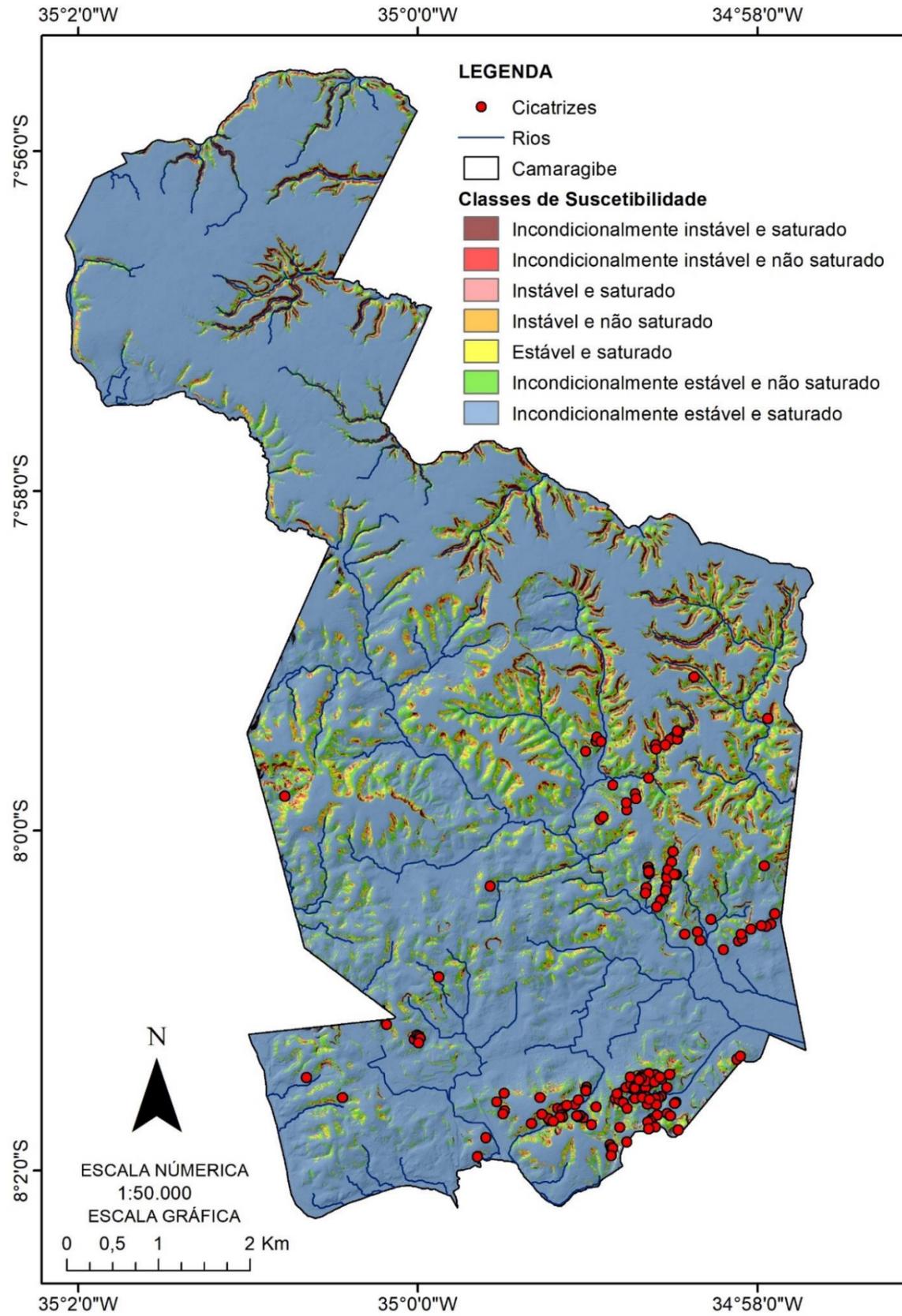
Elaboração: Edwilson Santos  
DATUM: SIRGAS 2000.

O **cenário IV** apresentou uma FD de 4,4% para as classes instáveis e 87,1% para as classes consideradas estáveis (Figura 37). As classes Incondicionalmente instável e saturado e classes Incondicionalmente instável e não saturado apresentaram FD de 3,3% e 1,1%, respectivamente. As classes de média estabilidade somaram, juntas, 8,5% (Estável e não saturado – 4,8%; Instável e não saturado – 2,6%; Instável e saturado – 1,2%). A classe Incondicionalmente estável e saturado apresentou uma FD de 76,8%, enquanto a classe Incondicionalmente estável e não saturado apresentou uma FD de 10,2%.

Quanto a CC do cenário IV (Figura 37), verificou-se uma ampla concentração de cicatrizes nas classes instáveis, totalizando 49,7%. A classe Incondicionalmente instável e saturado, considerada como a mais instável, apresentou uma CC de 44,7% e a classe Incondicionalmente instável e não saturado apresentou uma CC de 5%. As classes estáveis apresentaram valores de 10,1% e de 17% de CC para as classes Incondicionalmente estável e saturado e Incondicionalmente estável e não saturado, respectivamente. As classes de média estabilidade somaram, juntas, um percentual de CC de 23,2% (Estável e não saturado – 10,5%; Instável e não saturado – 8,1%; Instável e saturado – 4,6%).

O **cenário V**, assim como o cenário II, mostrou um predomínio na FD das classes estáveis (94,9%), seguido, em menor proporção, pelas classes de média estabilidade (4,6%) e instáveis (0,6%) (Figura 38). As classes Incondicionalmente instável e saturado e Incondicionalmente instável e não saturado representaram 0,3% de FD, cada uma. As classes Estável e não saturado, Instável e não saturado, Instável e saturado apresentaram valores de FD iguais a 3%, 1,2% e 0,4%, respectivamente. Com relação as classes estáveis, obtiveram-se valores de FD de 85,4% para a classe Incondicionalmente estável e saturado; e 9,4% para a classe Incondicionalmente estável e não saturado.

Figura 37 – Mapa de suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário IV).



### MAPA DE SUSCETIBILIDADE (CENÁRIO IV)

Parâmetros utilizados:

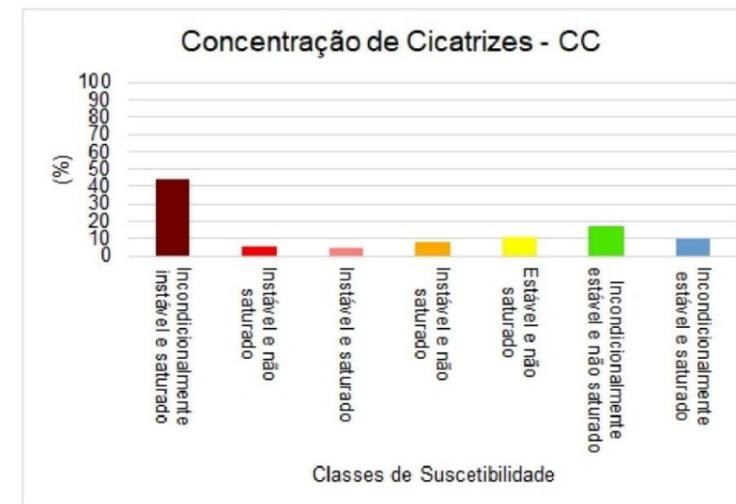
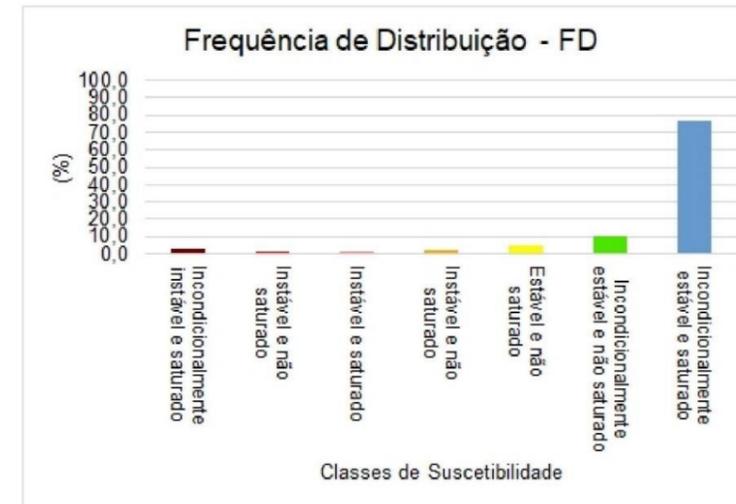
Formação Barreiras:  $cs = 3700 \text{ N/m}^2$ ;  $cr = 0$ ;  $rs = 1898 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 31,2^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 5 \text{ m}$ .

Embasamento Cristalino:  $cs = 3800 \text{ N/m}^2$ ;  $cr = 0$ ;  $rs = 1994 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 29,4^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 5 \text{ m}$ .

Fonte utilizadas:

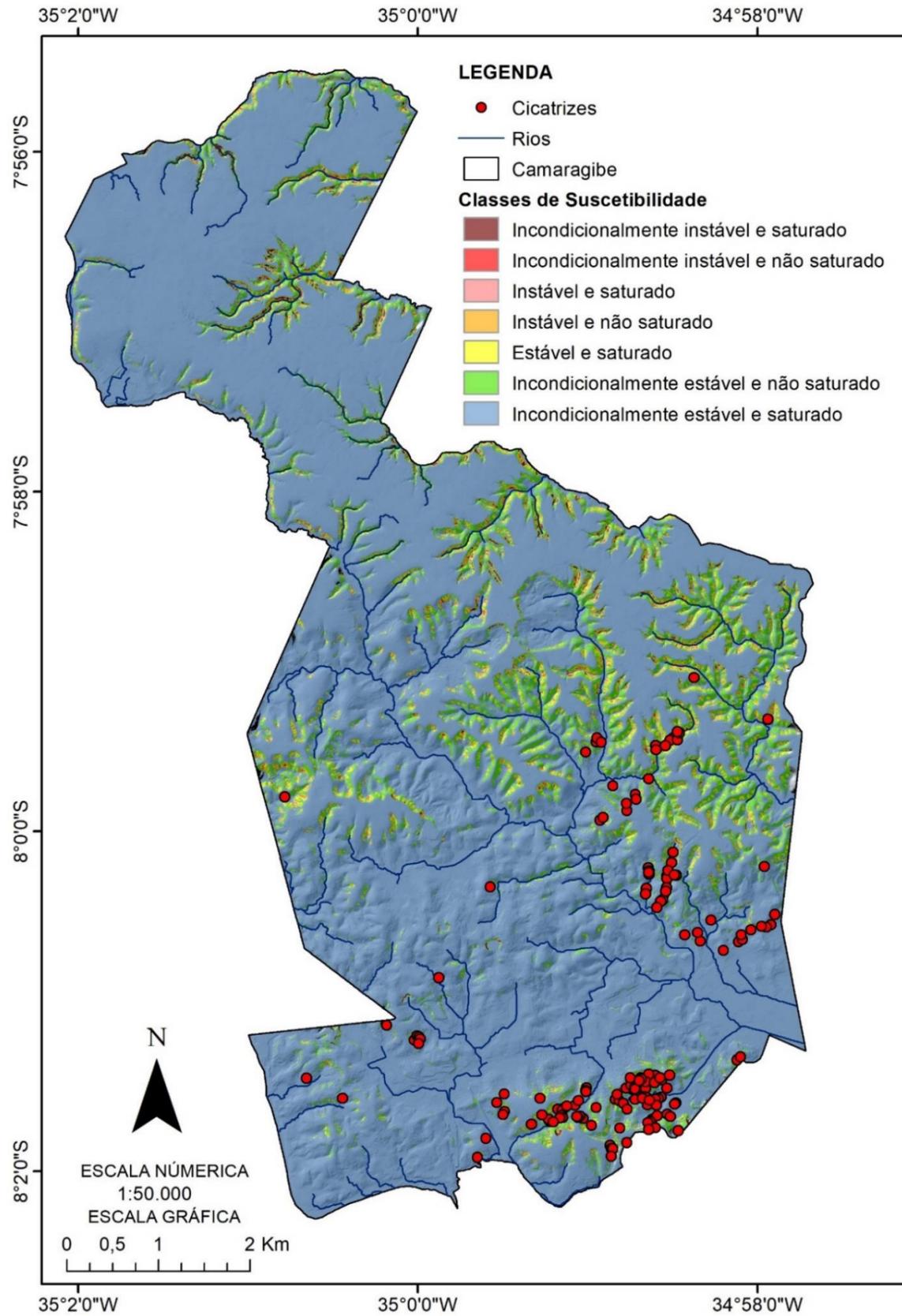
BANDEIRA, A. P. N. Mapeamento de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe - PE. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 209. 2003.

PERNAMBUCO. Pernambuco Tridimensional. Secretaria de Desenvolvimento Econômico. [S.l.]. 2018.



Elaboração: Edwilson Santos  
DATUM: SIRGAS 2000.

Figura 38 – Mapa de Suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário V).

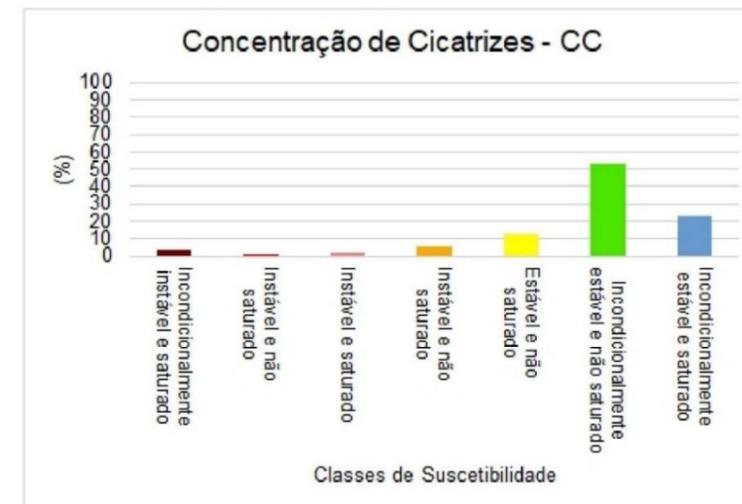
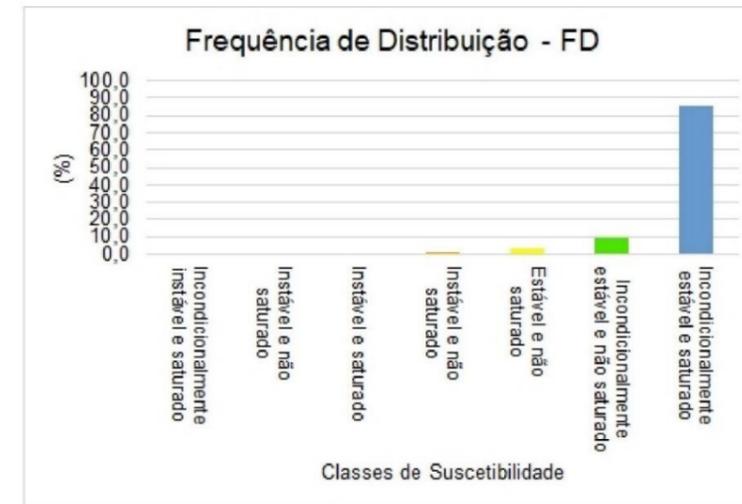


### MAPA DE SUSCETIBILIDADE (CENÁRIO V)

Parâmetros utilizados:  
 Formação Barreiras:  $cs = 12500 \text{ N/m}^2$ ;  $cr = 0$ ;  $rs = 1780 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 29,8^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 5 \text{ m}$ .  
 Embasamento Cristalino:  $cs = 9400 \text{ N/m}^2$ ;  $cr = 0$ ;  $rs = 2005 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 36,8^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 5 \text{ m}$ .

Fonte utilizadas:  
 BANDEIRA, A. P. N. Mapeamento de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe - PE. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 209. 2003.

PERNAMBUCO. Pernambuco Tridimensional. Secretaria de Desenvolvimento Econômico. [S.l.]. 2018.



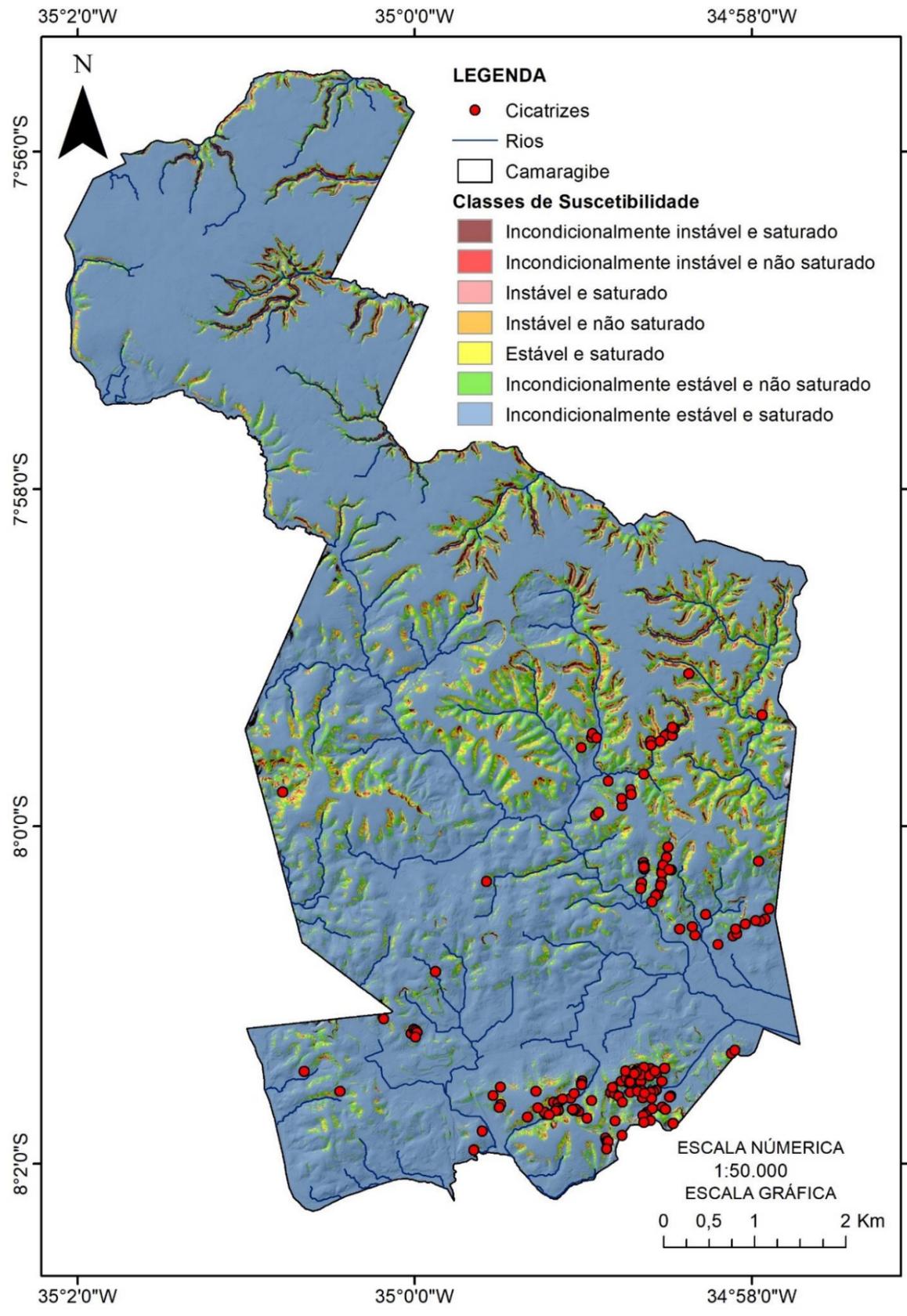
Elaboração: Edwilson Santos  
 DATUM: SIRGAS 2000.

Quanto a CC do cenário V (Figura 38), este apresentou uma baixa concordância entre as cicatrizes mapeadas e as áreas instáveis previstas pelo modelo SHALSTAB. A classe Incondicionalmente instável e saturado apresentou um valor de CC de 3,5% e a classe Incondicionalmente instável e não saturado equivaleu a 0,6%. As classes Estável e não saturado, Instável e não saturado, Instável e saturado apresentaram valores de CC iguais a 12,9%, 5,2% e 1,4%, respectivamente. A classe Incondicionalmente estável e saturado concentrou 22,9% das cicatrizes, enquanto a classe Incondicionalmente instável e não saturado obteve uma CC de 53,5%. Assim como ocorrido no cenário II, os valores utilizados para os parâmetros físicos possuem relação direta para o elevado índice de cicatrizes em células estáveis, segundo o SHALSTAB.

O **cenário VI** (Figura 39) apresentou uma FD nas classes estáveis de 88,6%, com predominância da classe Incondicionalmente estável e saturado, com 77,9%, enquanto a classe Incondicionalmente estável e saturado obteve uma FD de 10,7%. Quanto as classes de média estabilidade, verificou-se para a classe Estável e não saturado 4,8% de FD; Instável e não saturado, 2,4% e Instável e saturado, 1% de FD. As classes consideradas instáveis pelo modelo somaram 3,2%, predominando a classe Incondicionalmente instável e saturado, com 2,3%. A classe Incondicionalmente instável e não saturado registrou uma FD de 0,9%.

Em relação à CC do cenário VI, as classes instáveis apresentaram o maior percentual de CC. As classes instáveis totalizaram valores de CC de 46,9%; seguidas pelas classes estáveis, com 29,7% e pelas classes de média estabilidade, totalizando uma CC de 23,4% nas classes de média estabilidade. A classe Incondicionalmente instável e saturado apresentou um valor de CC igual a 42,5%, já a classe Incondicionalmente instável e não saturado representou 4,5%. As classes de média estabilidade: Estável e não saturado, Instável e não saturado, Instável e saturado apresentaram valores de CC de 11%, 7,9% e 4,5%, respectivamente. As classes Incondicionalmente estável e não saturado e Incondicionalmente instável e saturado, classificadas como estáveis, concentraram 19,1% e 10,5%, respectivamente.

Figura 39 – Mapa de suscetibilidade e índices FD e CC (Cenário VI).

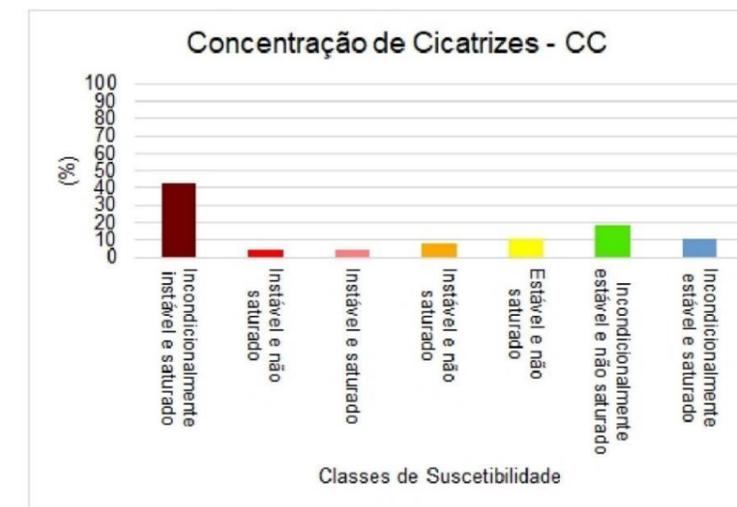
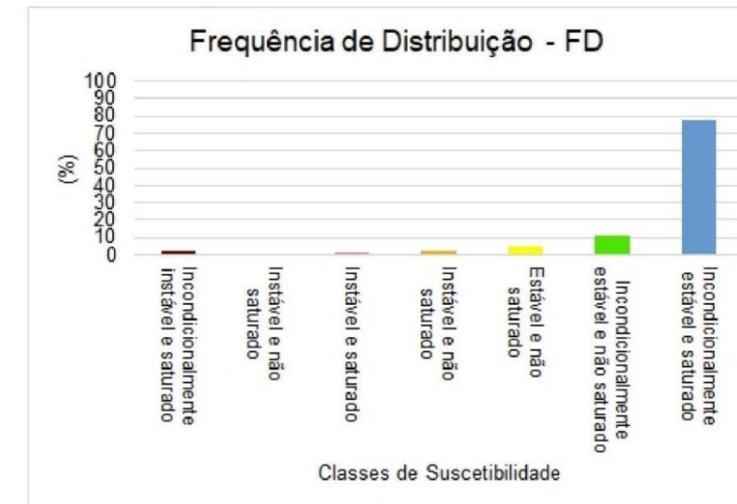


### MAPA DE SUSCETIBILIDADE (CENÁRIO VI)

Parâmetros utilizados:  
 Formação Barreiras:  $cs = 0 \text{ N/m}^2$ ;  $cr = 0$ ;  $rs = 2017 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 34,6^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 5 \text{ m}$ .  
 Embasamento Cristalino:  $cs = 3800 \text{ N/m}^2$ ;  $cr = 0$ ;  $rs = 1994 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 29,4^\circ$ ;  $w = 0$ ;  $z = 5 \text{ m}$ .

Fonte utilizadas:  
 BANDEIRA, A. P. N. Mapeamento de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe - PE. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 209. 2003.

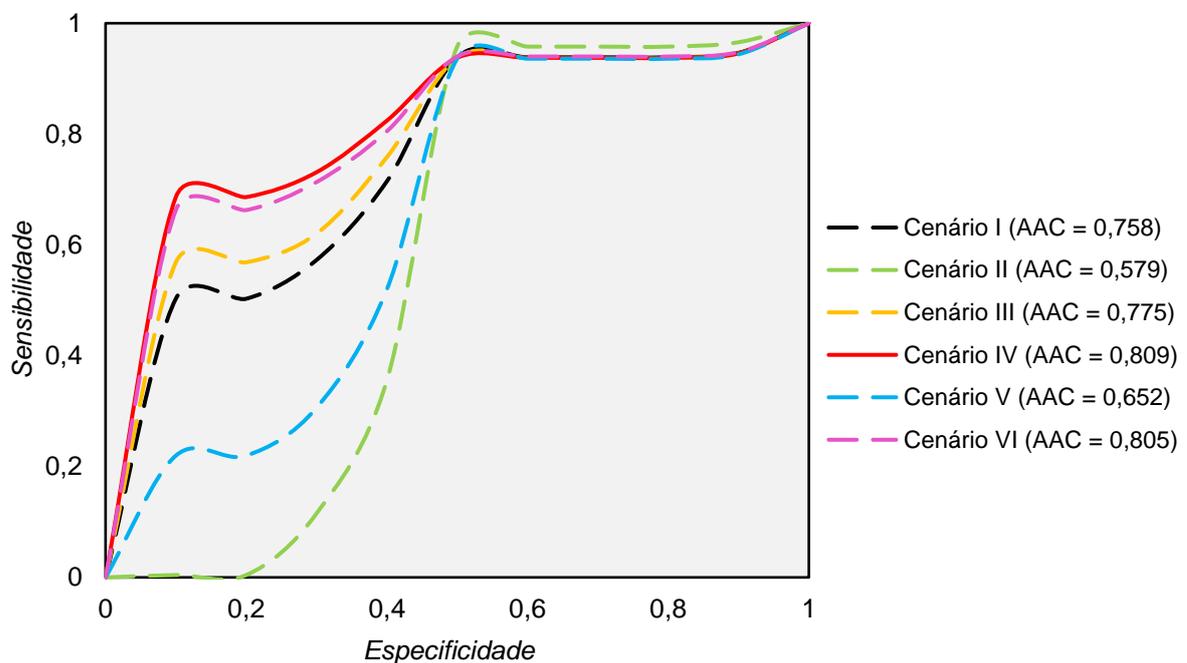
PERNAMBUCO. Pernambuco Tridimensional. Secretaria de Desenvolvimento Econômico. [S.l.]. 2018.



Elaboração: Edwilson Santos  
 DATUM: SIRGAS 2000.

Com base nos dados apresentados anteriormente, verificou-se que o cenário IV é o que melhor representa a suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos para o município de Camaragibe. Apesar da baixa FD de classes classificadas como instáveis, esse cenário apresentou a melhor taxa de concordância entre o inventário de cicatrizes e as áreas instáveis previstas pelo modelo SHALSTAB. Essa concordância pode ser comprovada por meio da validação com método da curva ROC (Figura 40).

Figura 40 – Gráfico com as curvas ROC para cada cenário de suscetibilidade



Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.5 ANÁLISE DO MELHOR CENÁRIO DE SUSCETIBILIDADE

Conforme supracitado, o cenário IV foi considerado como o que melhor representa a suscetibilidade a escorregamentos no município de Camaragibe. Nesse cenário, observou-se que as classes instáveis estão dispostas, principalmente, nas encostas dos tabuleiros (Formação Barreiras). As propriedades físicas dessas encostas, inerentemente, demonstram que os terrenos são naturalmente favoráveis a ocorrência de escorregamentos. Essa situação é agravada pela ocupação antrópica dessas áreas, conforme registrado em destaque na Figura 41.

As classes estáveis recobrem a maior parcela do território municipal. Encontram-se, geralmente, nas regiões mais planas, como os fundos de vale, a planície aluvial e o topo dos tabuleiros (Figura 41).

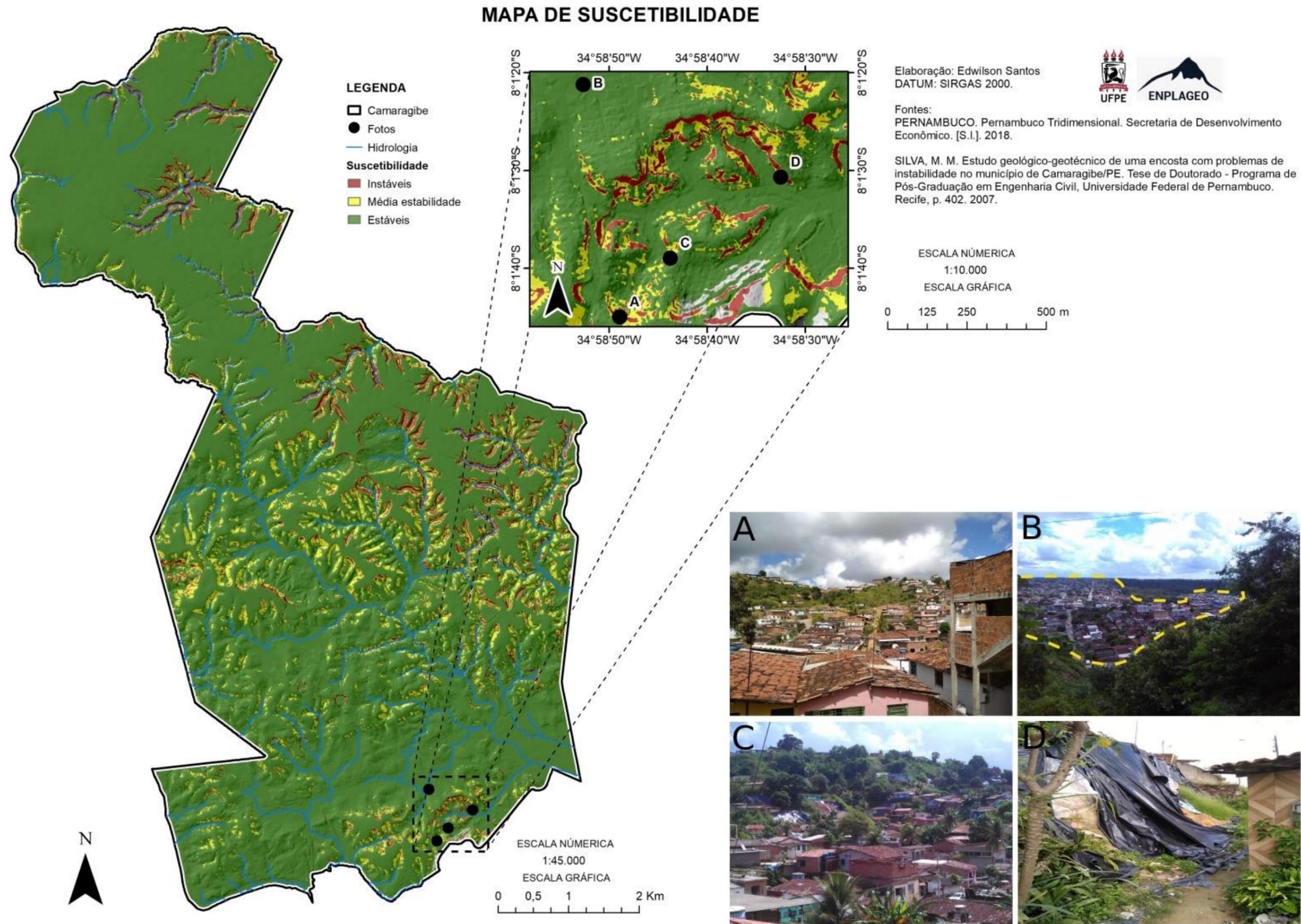
Por meio da relação entre as classes de sustentabilidade e a declividade ficou evidente que os terrenos classificados como mais instáveis, segundo o modelo SHALSTAB, localizaram-se inteiramente sobre as encostas mais declivosas do município, principalmente nas encostas da Formação Barreiras. As classes consideradas estáveis encontraram-se nas áreas mais planas como o topo do tabuleiro e as planícies aluviais.

A relação entre a suscetibilidade e a curvatura apontou equilíbrio na distribuição das classes de estabilidade nas encostas com curvatura côncava e convexa. Aproximadamente 47% das células instáveis e 50% das células de média estabilidade situaram-se sobre encostas côncavas. Apesar desses valores não representarem uma maioria absoluta, o maior percentual dessas classes de estabilidade em encostas côncavas tem relação direta com o fato desse tipo de curvatura tornar o terreno naturalmente mais suscetível a ocorrência de escorregamentos.

Destaca-se a constante presença áreas ocupadas nesse tipo de encosta (Figura 42). A presença antrópica nesses locais contribui ainda mais para instabilidade desses terrenos por meio da retirada da vegetação que resulta em uma maior exposição do solo. Essa situação facilita uma maior infiltração da água da chuva, ou até águas servidas, no solo, acarretando na saturação mais rápida do mesmo.

Apesar de possuírem percentuais menores, quando comparado as encostas côncavas, as encostas convexas concentraram parcelas consideráveis de células que corresponderam as classes instáveis (46%) e de média estabilidade (44%). Considerando o atual uso e ocupação em diversas encostas de Camaragibe é possível apontar que essa situação pode ser explicada por ações antrópicas que incluem diversos cortes e aterros para a construção ou ampliação de imóveis. Essas modificações no terreno, entre outras consequências, promovem uma série de mudanças na forma dessas encostas levando a alterações no direcionamento da drenagem.

Figura 41 – Cenário de suscetibilidade melhor avaliado (cenário IV). Destaques para ocupação antrópica em encostas da Formação Barreiras (A); Vista da região mais aplanada do município de Camaragibe, onde se localizam as áreas mais estáveis, segundo o modelo SHALSTAB (B); Região de encosta da Formação Barreiras classificada como instável, de acordo com o modelo, destaque para as diversas ocupações ao longo da encosta (C) e local apontado com estável que sofreu processo de escorregamento, provavelmente, influenciado pelo uso antrópico (D).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 42 – Predomínio de áreas instáveis em encostas côncavas (bairro Areeiro).



Fonte: Google Earth Pro. Elaborado pelo autor.

A relação entre as classes de suscetibilidade e a área de contribuição demonstrou que as classes mais instáveis se concentram, majoritariamente, na classe 100 a 2.500m<sup>2</sup>, ou seja, áreas que representam cabeceiras de drenagem, localizadas, principalmente, em encostas da Formação Barreiras.

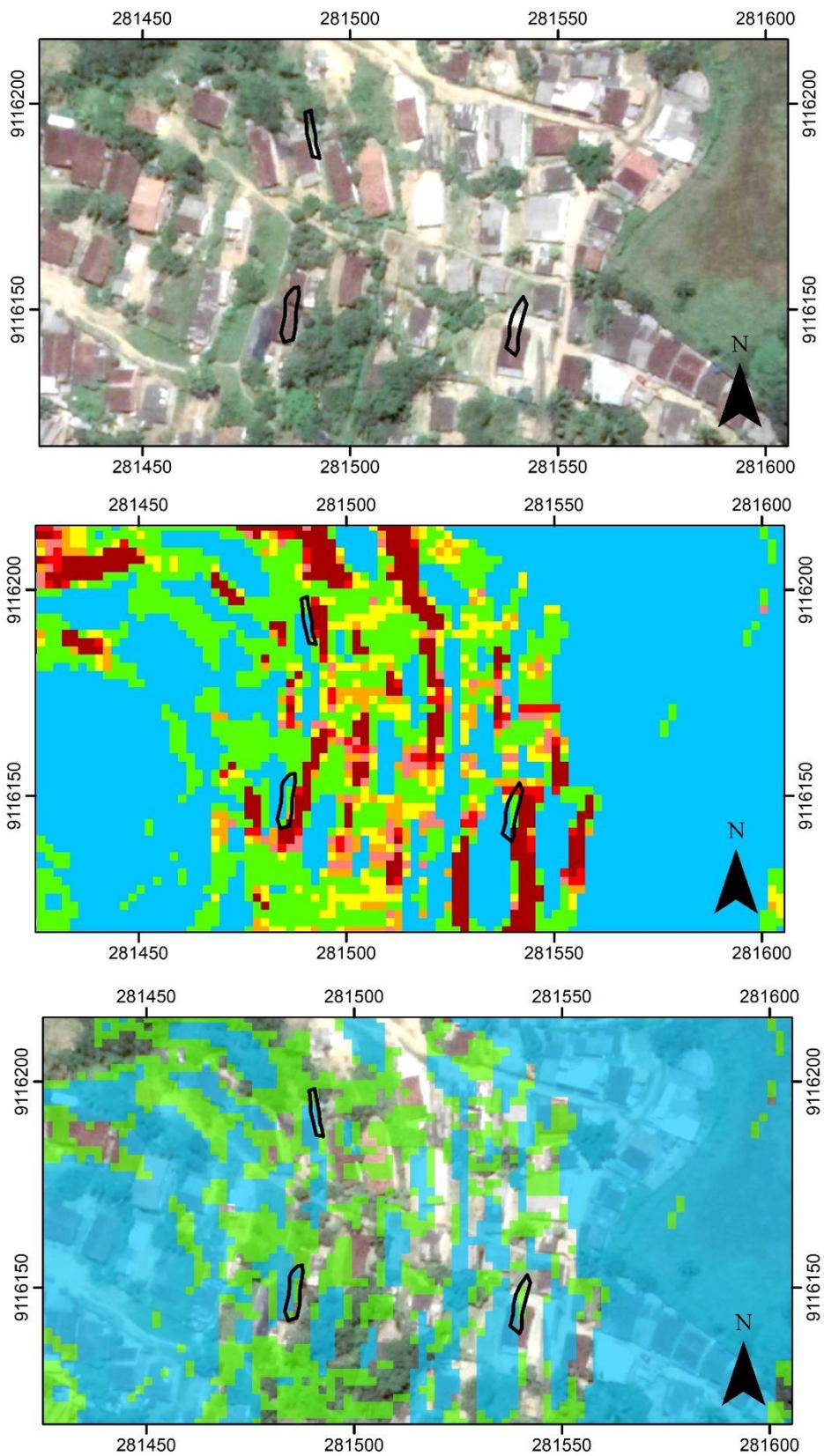
Destaca-se que a combinação entre topografia e propriedades físicas do solo podem resultar em cenários favoráveis para a deflagração de escorregamentos. Em Camaragibe predominam solos formados por material areno argiloso (SILVA, 2007), ou seja, solos com boas taxas de infiltração e de permeabilidade. A ocorrência de encostas declivosas constituídas por argissolos, como é o caso da área de estudo, favorece os fluxos subsuperficiais no contato entre areia e argila, causando assim, escorregamentos rasos.

Ao longo deste estudo foi observado que a simples análise de um parâmetro isolado não é suficiente para indicar o grau de suscetibilidade aos escorregamentos na área. Como exemplo pode-se apontar algumas áreas classificadas como estáveis, de acordo com o modelo SHALSTAB, em encostas com declividade maior que 16,8°. Deste modo, ratifica-se o que foi exposto por Listo (2011) e por Teixeira *et al.* (2014) quando relataram que os parâmetros físicos devem ser analisados em conjunto. No caso de Camaragibe, também é necessário observar as interferências que o modo de uso e ocupação na área acarreta para a estabilidade das encostas.

Cabe destacar que esses parâmetros podem ser considerados isoladamente para fins de planejamento urbano, como no caso da declividade que pode ser observada como um parâmetro restritivo para ocupação de determinados terrenos, sendo um importante item a ser observado na elaboração ou na atualização de planos diretores.

Como exemplo da importância de se analisar simultaneamente os fatores que envolvem os escorregamentos, o modelo classificou como estáveis algumas áreas onde foram registrados escorregamentos (Figura 43). Uma das causas para discordância está ligada ao processo de ocupação antrópica nessas áreas, visto que o modelo não considera o fator humano. Dessa forma, a interferência antrópica tem poder suficiente para alterar propriedades físicas terreno, de forma direta ou indireta, deixando-os mais instáveis mesmo que sua topografia ou propriedades físicas favoreçam a estabilidade do mesmo.

Figura 43 – Áreas indicadas como estáveis onde foram deflagrados escorregamentos por conta da interferência antrópica.



Fonte: elaborado pelo autor

Uma parcela considerável de áreas classificadas como instáveis e média estabilidade localizaram-se em locais ocupados por vegetação de porte arbóreo. Conforme apresentado no item que trata da relação entre o inventário de cicatrizes de escorregamento e uso e ocupação da terra, áreas com vegetação arbórea apresentaram baixa concentração de cicatrizes em comparação com os locais onde a ocupação antrópica encontrava-se consolidada ou em consolidação. Esse resultado demonstra a importância que há na conservação ambiental de encostas, tendo em vista que as mesmas se mantiveram estabilizadas, apesar da atuação de outros fatores condicionantes, como a declividade, que pudessem contribuir para sua instabilização.

Verificou-se que 14% das áreas urbanas do município encontravam-se sobre terrenos classificados como instáveis e 21% em terrenos de média estabilidade, segundo o modelo SHALSTAB. Apesar de representarem as menores parcelas dos terrenos instáveis, é nessas áreas onde ocorrem a maioria dos escorregamentos em Camaragibe. Nesse sentido, embora haja uma instabilidade potencial para Camaragibe, a maior parte do território é estável, contudo, os processos causados por pressões antropogênicas e demais características intrínsecas (geológicas, geomorfológicas, climáticas, entre outros) provocam diversos escorregamentos na área durante os períodos de chuva.

A ocupação antrópica em áreas naturalmente suscetíveis a escorregamentos traz consigo a necessidade de ações estruturais e não-estruturais (ex.: melhorias na drenagem para o escoamento das águas pluviais, impedimento de cortes e aterros sem laudo técnico, entre outras ações) com objetivo de evitar ou minimizar o surgimento de condições propícias a ocorrência de escorregamentos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim como muitos municípios brasileiros, Camaragibe abriga diversas áreas com risco de escorregamentos. Esse cenário é agravado por conta da ocupação antrópica de terrenos naturalmente suscetíveis a esses processos de movimento de massa. Nessas áreas predominam imóveis de baixo padrão construtivo e ausência de infraestrutura local. Quando associadas a períodos chuvosos, tais áreas são frequentemente sujeitas a acidentes, acarretando em perdas de vidas humanas e danos materiais, como o ocorrido no bairro dos Estados em julho de 2019.

O município de Camaragibe vem despertando um grande interesse por parte do mercado imobiliário, por conta disso e da suscetibilidade a escorregamentos, pesquisas que envolvam a investigação ou previsão de áreas suscetíveis a escorregamentos configura-se como uma medida relevante para a redução de desastres. Desse modo, o mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos se torna fundamental para a formulação ou atualização dos instrumentos de ordenação territorial, entre eles, o Plano Diretor.

Os objetivos gerais e específicos desta pesquisa foram cumpridos por meio do mapeamento de um total de 151 cicatrizes de escorregamentos; da relação entre os escorregamentos e os parâmetros topográficos e antrópicos; finalizando com a apresentação do mapa de suscetibilidade a escorregamentos para a área de estudo.

A utilização de modelos mostra-se cada vez mais comum para este tipo de mapeamento. Dentre os modelos disponíveis, o SHALSTAB é reconhecidamente um dos mais eficazes. Apesar de sua eficácia, sua utilização em áreas antropizadas, assim como na Região Nordeste do Brasil, ainda é bastante escassa e precisa ser ampliada, sobretudo para escalas municipais com aplicação de métodos de geoestatística.

A aplicação de métodos de previsão, que empreguem modelos determinísticos, mostrou-se útil como ferramenta de apoio para ações de planejamento territorial. Visto que na área de estudo existem diversas áreas desocupadas, acredita-se que o modelo SHALSTAB pode ser utilizado pelo poder público para identificar áreas suscetíveis a esse tipo de processo de movimento de massa e no planejamento do monitoramento dessas áreas.

O inventário de cicatrizes produzido neste estudo revelou que a influência antrópica contribuiu significativamente para a ocorrência de escorregamentos em Camaragibe. A concentração de cicatrizes nas comunidades de Tabatinga e do bairro dos Estados reflete essa questão, visto que nesses locais há uma carência infraestrutural, como obras de drenagem, coleta de resíduos domésticos, abastecimento de água e saneamento. Há ainda a maciça ocupação de encostas com topografia e propriedades físicas propícias a ocorrência de escorregamentos.

Alguns resultados desta pesquisa demonstraram que analisar um fator isoladamente não é suficiente para apontar aquele preponderante para a deflagração de escorregamentos, principalmente, em locais densamente ocupados, cuja presença humana continua a transformar rapidamente a morfologia do local.

Dessa forma, é possível apontar que em Camaragibe as encostas com declividade alta e com ocupação antrópica são os locais que apresentam maiores riscos de escorregamentos. Essas encostas se caracterizam pela retirada da cobertura vegetal e pela existência de diversos pontos de corte e aterro que resultaram em *Knickpoints* artificiais.

A análise da suscetibilidade apontou que apesar da maior parte do território da área de estudo ser classificada como estável, as alterações antrópicas ocorridas na área promoveram alterações diretas na morfologia local e indiretamente alteraram propriedades físicas da área. Sendo assim, destaca-se como a preservação da qualidade ambiental mostrou-se importante para a estabilidade de algumas encostas, visto que foi mapeado um número menor de cicatrizes em locais que conservaram vegetação de porte arbóreo, inclusive locais classificados como instáveis.

Sabe-se que os escorregamentos são processos geomorfológicos com elevada importância na modelagem dinâmica do relevo e que podem causar consequências catastróficas. Assim, estudos que envolvam modelos matemáticos para a previsão de áreas potencialmente sujeitas a esse tipo de processo são de grande relevância tanto científica quanto social, pois possibilitam a produção de uma base de dados voltados para a segurança humana e a minimização de perdas econômicas e materiais.

Dentre as principais dificuldades encontradas durante essa pesquisa, destaca-se a ausência de mapas ou de informações georreferenciadas sobre escorregamentos pretéritos na área de estudo. Dessa forma, destaca-se a necessidade de um banco de dados relacionado a esses processos, pois, acredita-se que o mesmo contribuiria

para atividades realizadas pela Defesa Civil municipal, como o monitoramento e a verificação do grau de risco.

Como trabalhos futuros, sugere-se uma maior investigação dos parâmetros físicos do solo por meio de novos pontos de sondagem e ensaios de laboratório, tendo em vista uma maior precisão dos resultados gerados pelo modelo SHALSTAB. Sugere-se também aplicar uma metodologia heurística, incluindo o fator antrópico, para a identificação de áreas de risco. Por fim, acredita-se que este trabalho possa servir como suporte para adoção de ações estruturais e não-estruturais por parte da gestão pública ao município de Camaragibe.

## REFERÊNCIAS

- ALHEIROS, M. M. **Riscos de escorregamentos na Região Metropolitana do Recife**. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental. UFBA. [S.l.], p. 135. 1998.
- ALHEIROS, M. M.; SOUZA, M. A. A.; BITOUN, J.; MEDEIROS, S. M. G. M.; AMORIM JÚNIOR, W. M. **Manual de ocupação dos morros da região metropolitana do Recife**. Recife: Ensol, 2003.
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Monitoramento Pluviométrico**, 2019. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/>. Acesso em: 18 fevereiro 2019.
- ARISTIZÁBAL, E.; GARCÍA, E.; MARTÍNEZ, C. Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. **Natural Hazards**, v. 78, p. 621–634, 2015.
- ARONICA, G. T.; BIONDI, G.; BRIGANDI, G.; CASCONI, E.; LANZA, S.; RANDAZZO, G. Assessment and mapping of debris-flow risk in a small catchment in eastern Sicily through integrated numerical simulations and GIS. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 49, p. 52-63, 2012.
- AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. 1a Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: [s.n.]. 1992. p. 721-733.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGÍLI, J. C. Estabilidade de taludes. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE-CNPq- FAPESP, 1998. p. 243-269.
- BANDEIRA, A. P. N. **Mapeamento de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe - PE**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 209. 2003.
- BANDEIRA, A. P. N. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de risco de escorregamentos de encostas na Região Metropolitana do Recife**. Tese de Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 340. 2010.
- BAUM, L. R.; SAVAGE, Z. W.; GODT, W. J. **TRIGRS-A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis**. U.S. Geological. [S.l.]. 2002.
- BEVEN, K. J.; KIRBY, A. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hidrological Sciences Bulletin**, 1979. 43-69.
- BIGARELLA, J. J.; PASSOS, E.; HERRMANN, M. L. P.; SANTOS, G. F.; MENDONÇA, M.; SALAMUNI, E.; SUGUIO, K. **Estruturas e Origem das paisagens**

**tropicais e subtropicais:** processos erosivos, vertentes, movimentos de massa, atividade endógena, superfícies de erosão, compartimentação do relevo, depósitos correlativos e ambientes fluviais. Florianópolis: UFSC, v. III, 2007.

BRASIL. Lei nº 12608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC. **Política Nacional de Proteção e Defesa Civil.** Brasília.

BRASIL. **Lei Nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979.** Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L6766.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6766.htm). Acesso em: 15 abril de 2019.

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

CAMARAGIBE. Defesa Civil de Camaragibe. **Registro de escorregamentos (2003 – 2018).** Camaragibe, 2018. CD-ROM.

CAMARAGIBE. **Lei Nº 032, de 31 de dezembro de 1997.** Define a organização do espaço territorial do Município de Camaragibe. Disponível em: [camaragibe.pe.gov.br/mdocs-posts/lei-032-97-uso-solo/](http://camaragibe.pe.gov.br/mdocs-posts/lei-032-97-uso-solo/). Acesso em: 10 mar. 2019.

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios.** Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Brasília, p. 176. 2007.

CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. **Models in Geography.** London: Methuen, 1967.  
CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais.** São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

COTARELO, A. L. **Avaliação de Ameaça por Escorregamentos de Encostas na Região Leste de Cuba.** Brasília: Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, 2015.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. **A questão ambiental: Diferentes abordagens.** 4a. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. Camaragibe registra 37 deslizamentos de barreiras, sem ocorrências graves. **Diário de Pernambuco**, 2019. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/vidaurbana/2019/07/camaragibe-registra-37-deslizamentos-de-barreiras-sem-ocorrencias-gra.html>. Acesso em: 28 jul. 2019.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **A digital terrain model for mapping shallow landslide potential.** Geological Sciences. University of Washington. Seattle, 1998.

EMBRAPA SOLOS. **Boletim de Pesquisa nº 11 - Levantamento de Reconhecimento de Baixa e Média Intensidade dos Solos do Estado de Pernambuco**. EMBRAPA. [S.I.]. 2000.

EMBRAPA. **Sistema brasileiros de classificação de solos**. Embrapa. Brasília. 2018.

FARIA, R. L. **Zoneamento da susceptibilidade à ocorrência de escorregamentos na bacia hidrográfica do Córrego do Yung**. Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, p. 77. 2013.

FAWCETT, T. **An introduction to ROC analysis**. Pattern Recognition Letters. V. 27, p. 861–874, 2006.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: Uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. 2a. ed. São Paulo: Bertrand, 1998. p. 123-194.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

FONSECA, D. N. ; SILVA, I. C.; CORRÊA, A. C. B. **Evolução morfodinâmica das encostas do Bairro dos Estados: Camaragibe - PE**. Anais do VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia. Belo Horizonte: [s.n.]. 2008.

FONSÊCA, D. N.; CORRÊA, A. C. B.; SILVA, A. C. Compartimentação geomorfológica da Região Metropolitana do Recife (RMR) a partir da análise morfoestrutural. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, v. 29, p. 201-209, 2016.

G1 PE. Chuva causa mortes, deslizamento de barreiras e alagamentos no Grande Recife. **Pernambuco**, 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2019/07/24/chuva-causa-deslizamento-de-barreiras-e-alagamento-no-grande-recife.ghtml>. Acesso em: 27 Julho 2019.

GAO, J. Identification of Topographic Settings Conducive to Landsliding from Nelson County, Virginia, U.S.A. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 18, p. 579-591, 1993.

GIRÃO, O.; CORRÊA, A. C. B. A contribuição da geomorfologia para o planejamento da ocupação de novas áreas. **Revista de Geografia**, Recife, v. 21, n. 2, p. 36-58, jul/dez 2004.

GORSEVSKI, P. V.; GESSLER, P. E.; BOLL, J.; ELLIOT, W. J.; FOLTZ, R. B. Spatially and temporally distributed modeling of landslide susceptibility. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 80, p. 178-198, 2006.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos**. 3a. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 149-209.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2a. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1984.

GUIMARÃES, R. F. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 320.

GUIMARÃES, R. F.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JUNIOR, O. A. Fundamentação teórica do modelo matemático para previsão de escorregamentos rasos Shallow Stability. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 6, n. 2, p. 133-150, 2003.

GUZZETTI, F. **Landslide hazard and risk assessment**. Dissertation. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Rheinischen Friedrich Wilhelms. Universität Bonn. Bonn, p. 373. 2006.

GUZZETTI, F.; MONDINI, A. C.; CARDINALI, M.; FIORUCCI, F.; SANTANGELO, M.; CHANG, K. T. Landslide inventory maps: new tools for an old problem. **Earth-Science Reviews**, v. 112, 2012.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2008.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Uso da Terra**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. 2013.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Malhas de setores censitários - divisões intramunicipais (censo2010). **IBGE Mapas**, 2016. Disponível em:

[ftp://geofp.ibge.gov.br/organizacao\\_do\\_territorio/malhas\\_territoriais/malhas\\_de\\_setores\\_censitarios\\_\\_divisoes\\_intramunicipais/censo\\_2010/](ftp://geofp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios__divisoes_intramunicipais/censo_2010/). Acesso em: 01 abril 2018.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. População em áreas de risco no Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades, 2018b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/camaragibe/panorama>. Acesso em: 15 Abr. 2019.

KIM, M. S.; ONDA, Y.; UCHIDA, T.; KIM, J. K. Effects of soil depth and subsurface flow along the subsurface topography on shallow landslide predictions at the site of a small granitic hillslope. **Geomorphology**, v. 271, p. 40-54, 2016.

KOZCIAK, S. **Análise determinística da estabilidade de vertentes na bacia do rio Marumbi - Serra do Mar - Paraná**. Tese de Doutorado - Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

KRUMBEIN, W. C.; GRAYBILL, F. A. **An introduction to Statistical Models in Geology**. New York: McGraw Hill, 1965.

LAJAS, M. A. **Integração de métodos estatístico e determinístico para a avaliação da suscetibilidade a deslizamentos superficiais**. Lisboa. 2016.

LISTO, F. L. R. **Análise da suscetibilidade e do grau de risco a escorregamentos rasos na Bacia do Alto Aricanduva, RMSP (SP)**. Dissertação de mestrado. Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 151. 2011.

LOPES, E. S. S.; ARRUDA JUNIOR, E. R. Sensoriamento Remoto para deslizamentos. In: SAUSEN, T. M.; LACRUZ, S. P. **Sensoriamento Remoto para desastres**. São Paulo: Oficina de textos, 2015. Cap. 8, p. 213-248.

MENDONÇA, P. C. **Aplicação do Modelo SHALSTAB para Delimitação de Áreas Susceptíveis a Escorregamento no Município de Niterói – RJ**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade de Brasília. Brasília, p. 70. 2017.

MICHEL, G. P. **Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 152. 2013.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, p. 1153-1171, 1994.

NERY, T. D. **Avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos na Bacia da Ultrafértil, Serra do Mar - SP**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 156. 2011.

NET DIÁRIO. Alagamentos, deslizamentos, centenas de mortes e. Esquecimento! **Net Diário**, 2019. Disponível em: <<https://www.netdiario.com.br/noticias/alagamentos-deslizamentos-centenas-de-mortes-e-esquecimento>>. Acesso em: 28 maio 2019.

NUNES, D. M.; COELHO, C. D.; SOUSA, A. B.; CALIJURI, M. L.; SANTOS, A. P.. Uso integrado do modelo SHALSTAB e análise multicritério para mapeamento de áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa - MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68/9, 2016.

OLIVEIRA, G. C. S.; JUNIOR, J. P. S.; NÓBREGA, R. S.; GIRÃO, O. Uma abordagem da Geografia do Clima sobre os eventos extremos de precipitação em Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 02, p. 238-251, 2011.

OLIVEIRA, N. M. G. A.; CARVALHO, J. A. R.; SANTANA, P. H. Caracterização geomorfológica e avaliação ambiental da fragilidade das vertentes no bairro da

Tabatinga, município de Camaragibe - PE. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 19, p. 92-103, 2006.

OLIVEIRA, N. S. **Relação entre chuva e deslizamentos em Nova Friburgo/RJ**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.  
PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. **SINMAP – A stability index approach to terrain stability hazard mapping**. Terratech Consulting Ltd. Salmon Arm. 1998.

PARISE, M. Landslide Mapping Techniques and Their Use in the Assessment of the Landslide Hazard. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 26, n. 9, p. 697-703, 2001.

PERNAMBUCO. **Pernambuco Tridimensional**. Secretaria de Desenvolvimento Econômico. [S.l.]. 2018.

PFALTZGRAFF, P. A. S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos da Região Metropolitana do Recife**. Recife. 2007.

PRADHAM, A. M. S.; KIM, Y. T. Evaluation of a combined spatial multi-criteria evaluation model and deterministic model for landslide susceptibility mapping. **Catena**, v. 140, p. 125-139, 2016.

RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L.; CARVALHO JUNIOR, O. A. Mapeamento das áreas suscetíveis a escorregamentos rasos no subúrbio ferroviário de Salvador (BA), utilizando os parâmetros físicos diferenciados para cada classe de solo. **X Simpósio brasileiro de geografia física aplicada**, Juiz de Fora, 2003.

REIS, F. A. G. V. Geodinâmica externa. **Curso de Geologia Ambiental via internet**, 2001. Disponível em:  
<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09.html#3>. Acesso em: 28 junho 2019.

SARKAR, S.; ROY, A. K.; RAHA, P. Deterministic approach for susceptibility assessment of shallow debris slide in the Darjeeling Himalayas, India. **Catena**, CREMLINGEN, v. 142, p. 36-46, 2016.

SBROGLIA, R. M. **Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 187. 2015.

SBROGLIA, R. M.; PORATH, P.; HENRI M.; HIGASHI, R. A. R.; OLIVEIRA, F. H. **Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Uso**

**da Ferramenta ASA - Automatic Shalstab Analysis.** Anais da XII Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Florianópolis: [s.n.]. 2017.

SEEFELDER, C. L. N. **Estuda da influência dos parâmetros hidrogeológicos na análise da susceptibilidade a escorregamentos rasos por meio de modelo de estabilidade de encostas.** Tese de doutorado em tecnologia ambiental e recursos hídricos da Universidade de Brasília. Brasília, p. 214. 2017.

SELBY, M. J. **Hillslope Materials and Processes.** 2a. ed. New York: Oxford University Press, 1993.

SILVA, D. C. O. **Aplicação do Modelo Shalstab na Previsão de Deslizamentos em Petrópolis.** Dissertação de Mestrado - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Rio de Janeiro, p. 132. 2006.

SILVA, M. M. **Estudo geológico-geotécnico de uma encosta com problemas de instabilidade no município de Camaragibe/PE.** Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 402. 2007.

SILVA, M. S. L.; OLIVEIRA NETO, M. B. Argissolo Amarelo. **Embrapa**, 2011. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio\\_mata\\_sul\\_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7j02wx7ha087apz2e8slrpq.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7j02wx7ha087apz2e8slrpq.html). Acesso em: 12 Agosto 2019.

SOBRAL, M. S. **Suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos nas vertentes do limite Norte do Concelho de Almada utilizando métodos de base física.** Mestrado em Geologia Aplicada do Departamento de Geologia da Universidade de Lisboa. Lisboa, p. 68. 2018.

SUN EARTH TOOLS. **Sun position.** Disponível em: [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=pt](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=pt). Acesso em 10 dez. 2019.

TARBOTON, D. G. Terrain analysis using digital elevation models (TauDEM). **David Tarboton Hydrology Research Group, Utah State University**, 2005. Disponível em: <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/>. Acesso em: 10 agosto 2019.

TEIXEIRA, M.; BATEIRA, C.; MARQUES, F.; VIEIRA, B. Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal. **Landslides**, Berlin, v. 12, p. 455-468, 2014.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: Aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP.** Tese de Pós-Graduação. Programa de Pós-Graduação em Geografia Física do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 220. 2007.

UFSC. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012**. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis, p. 130. 2013.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 539-546, 2003.

VAN WESTEN, C. J. **Application of Geographic Information System to Landslide Hazard Zonation**. ITC Publication. Enscheda, p. 245. 1993. (The Netherlands).

VEJA. Chuvas: por que o Brasil não consegue evitar essa tragédia. **Politica**, 2012. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/politica/chuvas-por-que-o-brasil-nao-consegue-evitar-essa-tragedia/>. Acesso em: 10 ago. 2019.

VIEIRA, B. C.; RAMOS, H. Aplicação do Modelo SHALSTAB para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia – USP**, São Paulo, v. 29, p. 161-174, 2015.