



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PEDRO AUGUSTO ALVES PRADO

**USO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ZONEAMENTO DE ÁREAS
SUSCEPTÍVEIS À OCORRÊNCIA DE SUBSIDÊNCIA DO SOLO E
DESLIZAMENTO DE ENCOSTAS**

Recife

2023

PEDRO AUGUSTO ALVES PRADO

**USO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ZONEAMENTO DE ÁREAS
SUSCEPTÍVEIS À OCORRÊNCIA DE SUBSIDÊNCIA DO SOLO E
DESLIZAMENTO DE ENCOSTAS**

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

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Sylvana Melo dos Santos.

Coorientadora: Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira.

Recife

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

P896u Prado, Pedro Augusto Alves.
 Uso de sensoriamento remoto para zoneamento de áreas susceptíveis à ocorrência de subsidência do solo e deslizamento de encostas / Pedro Augusto Alves Prado. – 2023.
 107 f.: il., fig., tab., abrev. e siglas.

 Orientadora: Profa. Dra. Sylvana Melo dos Santos.
 Coorientadora: Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.
 Inclui referências e anexos.

 1. Engenharia civil. 2. Subsidência do solo. 3. Deslizamento de encostas. 4. Sensoriamento remoto. 5. Mapa de mancha. I. Santos, Sylvana Melo dos (Orientadora). II. Oliveira, Leidjane Maria Maciel de (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2023-103

PEDRO AUGUSTO ALVES PRADO

**USO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ZONEAMENTO DE ÁREAS
SUSCEPTÍVEIS À OCORRÊNCIA DE SUBSIDÊNCIA DO SOLO E
DESLIZAMENTO DE ENCOSTAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 30/01/2023.

Orientadora:

Profa. Dra. Sylvana Melo dos Santos – Universidade Federal de Pernambuco

Coorientadora:

Profa Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira – Universidade Federal de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência

Dr. Diego César dos Santos Araújo (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

À minha noiva, Maiana, e ao meu avô, Manuel.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela proteção e graça de sempre colocar as melhores pessoas na minha vida e por sempre me dar forças para continuar em todos os meus objetivos.

A minha família, em especial à Zilda, à Isa e à Carmem, que sempre me instruíram nas direções que deveriam ser tomadas ao longo do rumo da vida e por todo amor que me deram. Vocês são a base de tudo. Ao meu irmão, que sempre me apoiou e cuidou de mim. Sem vocês isso não seria possível

À Mai, minha companheira de profissão e da vida. Obrigado por cuidar de mim, me apoiar, acreditar tanto em mim e estar sempre comigo. À Suely, Mila e Sérgio, que me acolheram em suas famílias com tanto carinho.

À minha orientadora, Sylvana Santos, por toda a dedicação na orientação e pelo conhecimento passado. À Leidjane Oliveira, por todas as instruções, toda calma e palavras de conforto em cada passo.

Aos meus amigos do trabalho, que me apoiaram na elaboração da dissertação. À Haylla Rebeqa, por todas as dúvidas tiradas e apoio nas horas que precisei. À Camila Oliveira, pelo companheirismo e palavras de apoio.

Ao PPGEC da UFPE, que me permitiu a realização do mestrado acadêmico.

E aos demais que me auxiliaram na realização desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O aumento da população e a urbanização de forma desordenada resultam em diversos problemas no cenário urbano e no meio ambiente, dentre eles pode-se destacar a ocorrência de fenômenos como a subsidência do solo e os deslizamentos de encostas. A utilização de ferramentas eficazes para determinar as áreas mais susceptíveis à ocorrência de tais fenômenos facilita ao poder público a destinação de recursos financeiros e a concentração de esforços de maneira mais assertiva. A metodologia empregada nesta pesquisa busca, com o uso de bancos de dados de livre acesso, ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto (SR), a elaboração simplificada e rápida de mapas que apontem as áreas mais susceptíveis aos fenômenos citados. A pesquisa foi realizada considerando a área da cidade do Recife – PE. Nas áreas de planície foi analisada a susceptibilidade à ocorrência do fenômeno de subsidência considerando o uso e ocupação do solo, a concentração de poços em cada bairro e o comportamento dos níveis dos aquíferos. Nas áreas de morro a susceptibilidade ao deslizamento de encostas foi analisada considerando o uso e ocupação do solo, a declividade do terreno e a quantidade de domicílios que fazem o descarte de águas residuais sem utilizar canalizações em cada um dos bairros. Para obtenção de tais dados foram utilizados a Base de Dados do Estado de Pernambuco - BDE, os Estudos Sobre a Disponibilidade e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região Metropolitana do Recife HIDROREC III, e imagens (do satélite Sentinel-2A e do projeto Topodata). Foram gerados mapas determinando a susceptibilidade das áreas para cada um dos critérios e posteriormente foi utilizado o método da álgebra de mapas. Como resultados foram obtidos dois mapas de mancha, um que determina as áreas mais susceptíveis ao fenômeno de subsidência do solo e outro para o deslizamento de encostas. Para validação dos referidos mapas foram utilizadas publicações científicas e informações registradas nos meios de comunicação local. Observou-se que, diante do baixo custo na elaboração, na rapidez de realização deste processo e na facilidade em se obter os dados, o uso de técnicas de SR e do Sistema de Informação Geográfica (SIG), alinhadas com o uso de bases de dados de livre acesso se mostraram uma tecnologia adequada para investigação da susceptibilidade.

Palavras-chave: subsidência do solo; deslizamento de encostas; sensoriamento remoto; mapa de mancha.

ABSTRACT

The increase in population and urbanization in a disorderly way result in several problems in the urban scenario and in the environment, among them the occurrence of phenomena such as land subsidence and landslides can be highlighted. The use of effective tools to determine the areas most susceptible to the occurrence of such phenomena makes it easier for the government to allocate financial resources and focus efforts more assertively. The methodology used in this research seeks, with the use of open access databases, geoprocessing and remote sensing (RS) tools, the simplified and quick elaboration of maps that point out the areas most susceptible to the mentioned phenomena. The research was carried out considering the area of the city of Recife - PE. In the plain areas, the susceptibility to the occurrence of the subsidence phenomenon was analyzed considering the use and occupation of the soil, the concentration of wells in each neighborhood and the behavior of the aquifer levels. In the hill areas, the susceptibility to landslides was analyzed considering the use and occupation of the land, the slope of the land and the number of households that dispose of wastewater without using pipes in each of the neighborhoods. To obtain such data, the Base de Dados do Estado de Pernambuco - BDE, the Estudos Sobre a Disponibilidade e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região Metropolitana do Recife HIDROREC III, and images (from the Sentinel-2A satellite and the Topodata project) were used. Maps were generated determining the susceptibility of the areas for each of the criteria and later the map algebra method was used. As a result, two patch maps were obtained, one that determines the areas most susceptible to the phenomenon of land subsidence and the other for landslides. To validate these maps, scientific publications and information recorded in the local media were used. It was observed that, given the low cost of elaboration, the speed of carrying out this process and the ease of obtaining data, the use of SR techniques and the Geographic Information System (GIS), aligned with the use of databases open access data proved to be an adequate technology for investigating susceptibility.

Keywords: land subsidence; landslides; remote sensing; spot map.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Distribuição de pressões em um aquífero não confinado submetido à superexploração.....	23
Figura 2 –	Distribuição de pressões em um aquífero confinado submetido à superexploração.....	23
Figura 3 –	Esquema ilustrativo de um escorregamento rotacional.....	26
Figura 4 –	Escorregamento rotacional com indicação do movimento rotativo vertical.....	26
Figura 5 –	Esquema ilustrativo de um escorregamento translacional.....	27
Figura 6 –	Escorregamento translacional - bairro da Linha do Tiro, Recife..	27
Figura 7 –	Esquema ilustrativo de um escorregamento em cunha.....	27
Figura 8 –	Localização da área de estudo.....	39
Figura 9 –	Precipitação acumulada mensal média de 2000 a 2021 na cidade de Recife.....	40
Figura 10 –	Regiões político-administrativas do município do Recife.....	41
Figura 11 –	Esboço litoestrutural do município de Recife.....	42
Figura 12 –	Mapa hidrogeológico do Recife e proximidades, e o Lineamento Pernambuco.....	44
Figura 13 –	Mapa hidrogeológico simplificado com distinção dos domínios dos aquíferos.....	46
Figura 14 –	Fluxograma da modelagem espacial.....	47
Figura 15 –	Zoneamento proposto pelo HIDROREC III.....	50
Figura 16 –	Representação gráfica da evolução dos níveis estáticos dos poços do Recife no período 2002/2014.....	52
Figura 17 –	Fluxograma das etapas para elaboração dos mapas de mancha.....	55
Figura 18 –	Modelo Digital de Elevação do Município do Recife.....	61
Figura 19 –	Histograma das cotas no município do Recife.....	61
Figura 20 –	Zoneamento das áreas de morro e planície do município do Recife.....	62
Figura 21 –	Índice NDVI para o município do Recife.....	63
Figura 22 –	Histograma dos índices NDVI no município do Recife.....	64

Figura 23 – Índice NDBI para o município do Recife.....	65
Figura 24 – Mapa de distribuição dos pesos no Critério 4, uso e ocupação do solo.....	66
Figura 25 – Percentual de domicílios abastecidos por poços nos bairros do Recife.....	68
Figura 26 – Distribuição espacial dos poços cadastrados no SIAGAS.....	69
Figura 27 – Mapa de distribuição dos pesos no Critério 2, percentual de número de poços.....	70
Figura 28 – Mapa de distribuição dos peso sobre a situação de recuperação dos aquíferos, Critério 3.....	72
Figura 29 – Mapa de manchas das áreas susceptíveis à subsidência do solo para a planície do Recife.....	73
Figura 30 – Percentual de domicílios que não utilizam canalizações para o descarte de águas servidas nos bairros do município do Recife.....	76
Figura 31 – Distribuição dos pesos no Critério 2, percentual de esgotamento sanitário.....	77
Figura 32 – Declividade do relevo do município do Recife.....	78
Figura 33 – Mapa de distribuição dos pesos sobre a situação da declividade do relevo, Critério 3.....	79
Figura 34 – Mapa de manchas das áreas susceptíveis ao deslizamento de encostas.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Escalas relacionadas a diferentes mecanismos de subsidência.....	22
Tabela 2 –	Classificação dos movimentos de massa.....	25
Tabela 3 –	Classificação dos movimentos de encosta.....	25
Tabela 4 –	Bairros das regiões político-administrativas do município do Recife.....	41
Tabela 5 –	Informações sobre as bandas do satélite Sentinel-2.....	48
Tabela 6 –	Lista das zonas explotáveis propostas pelo HIDROREC III.....	51
Tabela 7 –	Valor do peso para o percentual de domicílios abastecidos por poços.....	56
Tabela 8 –	Valor do peso para o uso e ocupação do solo.....	57
Tabela 9 –	Valor do peso para os percentuais de esgotamento sanitário.....	58
Tabela 10 –	Valor do peso de acordo com a declividade do relevo.....	58
Tabela 11 –	Casos de deslizamentos de encostas relatados em matérias jornalísticas entre 2017 e 2022.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
BDE	Sistema Base de Dados do Estado
Cemaden	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
Compesa	Companhia Pernambucana de Saneamento
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CRH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESA	Agência Espacial Europeia
HIDROREC	Estudos Sobre a Disponibilidade e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região Metropolitana do Recife
IAEG	<i>Association of Engineering Geology</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LPE	Lineamento Pernambucano
MDE	Modelo de Elevação Digital
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDBI	<i>Normalized Density Building Index</i>
NDVI	<i>Normalized Density Vegetation Index</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PALSAR	<i>Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar</i>
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PTE	Princípio das Tensões Efetivas
RMR	Região Metropolitana do Recife
RPA	Região Político-Administrativa
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SR	Sensoriamento Remoto
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

UTM

Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

cm/ano	Centímetros por ano
km	Quilômetros
km ²	Quilômetros quadrados
m	Metros
mm	Milímetros
m/ano	Metros por ano
m/h	Metros por hora
m/km	Metros por quilômetro
m/s	Metros por segundo
m ² /s	Metros quadrados por segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	OBJETIVO GERAL.....	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
3.1	SUBSIDÊNCIA DO SOLO.....	20
3.1.1	Tipos de subsidência.....	20
3.1.2	Escala espaço-temporal.....	21
3.1.3	Subsidência em aquíferos sedimentares.....	22
3.2	DESLIZAMENTOS DE ENCOSTAS.....	23
3.2.1	Tipos de movimentos de massa.....	24
3.2.2	Gestão de riscos de deslizamentos.....	27
3.3	CICLO HIDROLÓGICO EM ÁREAS URBANAS.....	28
3.3.1	Aquíferos e exploração por poços.....	28
3.3.2	Precipitação e chuvas intensas.....	29
3.4	SUSCEPTIBILIDADES EM ÁREAS URBANAS.....	30
3.4.1	Susceptibilidade em áreas de planície.....	30
3.4.2	Susceptibilidade em áreas de morro.....	32
3.5	SENSORIAMENTO REMOTO.....	33
3.5.1	Aplicações do SR.....	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1	ÁREA DE ESTUDO.....	39
4.1.1	Geologia e estratigrafia da área de estudo.....	42
4.1.1.1	Embasamento Cristalino.....	43
4.1.1.2	Bacias Sedimentares Cretáceas.....	43
4.1.2	Hidrogeologia.....	45
4.2	MODELAGEM ESPACIAL COM DADOS ORBITAIS.....	47
4.2.1	Pré-processamento.....	47
4.2.2	Processamento Sentinel-NDVI/NDBI e Topodata-MDE.....	48
4.3	SUSCEPTIBILIDADE EM ÁREAS DE PLANÍCIE.....	49
4.4	SUSCEPTIBILIDADE EM ÁREAS DE MORRO.....	53

4.5	ELABORAÇÃO DO MAPA DE MANCHAS.....	54
4.5.1	Critérios analisados para as áreas de planície.....	56
4.5.2	Critérios analisados para as áreas de morro.....	57
4.5.3	Validação dos mapas de mancha.....	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
5.1	MODELAGEM ESPACIAL COM DADOS ORBITAIS.....	60
5.2	SUSCEPTIBILIDADE EM ÁREAS DE PLANÍCIE.....	66
5.2.1	Critérios indicadores de susceptibilidade a subsidência do solo em áreas de planície.....	67
5.2.2	Mapa de manchas das regiões susceptíveis à ocorrência de subsidência do solo.....	72
5.2.3	Histórico de casos de subsidência do solo na área de estudo.....	73
5.3	SUSCEPTIBILIDADE EM ÁREAS DE MORRO.....	74
5.3.1	Critérios indicadores de susceptibilidade ao deslizamento de encostas em áreas de morro.....	75
5.3.2	Mapa de manchas das regiões susceptíveis à ocorrência de deslizamento de encostas.....	79
5.3.3	Histórico de casos de deslizamento de encostas na área de estudo.....	80
6	CONCLUSÕES.....	82
7	TRABALHOS FUTUROS.....	84
	REFERÊNCIAS.....	85
	ANEXO A – FORMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E TIPOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NAS RESIDÊNCIAS DAS RPAs DO MUNICÍPIO DE RECIFE.....	96
	ANEXO B – GRÁFICOS DO NÍVEL ESTÁTICO NAS ZONAS DO HIDROREC III.....	102

1 INTRODUÇÃO

Segundo Tucci (2002), o crescimento da população urbana tem ocorrido de maneira acelerada nas últimas décadas no Brasil, causando o surgimento de grandes metrópoles nas capitais dos estados brasileiros. Alencar (2016) aponta que o processo de ocupação do espaço urbano ocorre comumente de maneira acelerada e sem planejamento, e afeta diretamente o meio ambiente. O relatório *World Urbanization Prospects* da Organização das Nações Unidas (ONU) indica que, em 2018, 55% da população mundial residia em áreas urbanas e projeta que esse valor alcance a marca dos 68% para o ano de 2050 (NAÇÕES UNIDAS, 2019). Essa grande concentração populacional nos grandes centros urbanos, quando não acompanhada de programas governamentais eficientes, resultam no uso descontrolado dos recursos naturais e ocupação de áreas naturalmente inadequadas, ou susceptíveis a riscos naturais, resultando em diversos fenômenos naturais, como a subsidência do solo e o deslizamento de encostas.

De acordo com Santos (2005), a subsidência do solo é um fenômeno de rebaixamento do solo, que pode acontecer de forma gradual ou repentina, devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas. Segundo Wang (2017), 80% dos casos de subsidência registrados estão relacionados com a acentuada exploração de aquíferos por ação antrópica. Segundo Luna (2017), a subsidência do solo tornou-se uma grande preocupação e um fenômeno a ser cuidadosamente investigado na cidade do Recife, devido ao expressivo rebaixamento do lençol freático, gerado pelo grande volume de água subterrânea explorada. Costa *et al.* (1998) explicaram que o aumento na exploração das águas subterrâneas começou na década de 1970 e se intensificou entre os anos de 1993 e 1998, devido a um longo período de racionamento de água na Região Metropolitana do Recife (RMR). De acordo com os autores, a perfuração e exploração desses novos poços acarretou o rebaixamento da superfície potenciométrica em valores superiores a 100 metros em alguns pontos.

Associado à superexploração da água subterrânea, o processo de urbanização da cidade do Recife resultou na diminuição da taxa de recarga natural dos aquíferos, com a impermeabilização do solo pela implantação de pavimentos, edifícios e calçadas. Souza (2022) pontua que o elevado número de poços não cadastrados e a superexploração dificultam o gerenciamento dos recursos hídricos

subterrâneos, o que resulta em uma série de problemas, como a diminuição do nível potenciométrico, a salinização, a contaminação de lençóis subterrâneos e a subsidência do solo.

Em relação às áreas urbanas de morros, além de constituírem locais de elevadas declividades, a ocupação inadequada resulta em cenários de severas modificações na cobertura vegetal, ausência de metodologias adequadas tecnicamente para construção de moradias e carência de sistemas de saneamento. Tais características favorecem a susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos. Segundo Pfaltzgraff (2007), a RMR, da qual o município do Recife faz parte, convive com deslizamentos nos morros há muitos anos, e contabiliza centenas de mortos e feridos ao longo das últimas décadas. Conforme afirma Alheiros *et al.* (2006), entre os anos de 1984 e 2006, houve um total de 192 mortes causadas por deslizamentos, sendo 126 delas no município do Recife. De acordo com o site jornalísticos de notícias, G1 Pernambuco (G1 PE, 2022b), o número de vítimas em consequência de deslizamentos chegou a 128 apenas no ano de 2022.

Visando mapear as áreas mais susceptíveis aos fenômenos de subsidência do solo e deslizamento de encostas, considerando as respectivas especificidades, optou-se pelo uso de ferramentas de Sensoriamento Remoto (SR) e Sistemas de Informações Geográficas (SIG), associado com a utilização de bancos de dados de livre acesso. Oliveira *et al.* (2013) destacam a utilização de imagens de satélite para análise sintética ou detalhada do objeto de estudo de maneira rápida, prática e com baixo custo no processamento de dados. Na atual pesquisa, utilizou-se dados do projeto Topodata (INPE, 2022), do satélite Sentinel-2, dos Estudos Sobre a Disponibilidade e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região Metropolitana do Recife - HIDROREC III (LEITÃO, 2015), do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS (CPRM, 2022) e do Sistema Base de Dados do Estado – BDE (BDE, 2022) para a construção de mapas indicando as áreas mais susceptíveis a cada um dos critérios analisados. A partir desses mapas, utilizando a técnica de álgebra de mapas, foram criados os mapas de mancha indicando as áreas mais susceptíveis à subsidência do solo e ao deslizamento de encostas.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo são abordados os objetivos geral e específicos dessa pesquisa.

2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar áreas susceptíveis aos fenômenos de subsidência do solo e deslizamento de encostas, no município do Recife – PE, com o emprego de técnicas de Sensoriamento Remoto e banco de dados de livre acesso.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir características indicativas de susceptibilidade à ocorrência de subsidência do solo e deslizamento de encosta.
- Identificar áreas susceptíveis à ocorrência de subsidência do solo e deslizamento de encosta na cidade do Recife – PE, com o emprego de álgebra de mapas.
- Validar as áreas identificadas susceptíveis à ocorrência de subsidência do solo e deslizamento de encosta na cidade do Recife – PE, a partir de registros encontrados em publicações científicas e/ou matérias jornalísticas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Abordou-se o referencial teórico em cinco principais assuntos: subsidência do solo, deslizamento de encostas, ciclo hidrológico em áreas urbanas, susceptibilidades em áreas urbanas e sensoriamento remoto.

3.1 SUBSIDÊNCIA DO SOLO

Segundo Santos (2005), a subsidência do solo é um fenômeno de rebaixamento do solo, que pode acontecer de forma gradual ou repentina, devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas. De forma geral, conforme o autor, os solos são formados por partículas sólidas com água, ou outro líquido, e ar nos espaços vazios, e seu comportamento pode ser entendido pelas forças que são aplicadas nas suas partículas, podendo tais forças causarem deformações de maior ou menor proporção, de acordo com a intensidade da força e a composição do solo. Santos (2005) descreve que as causas mais comuns de ocorrência desse fenômeno estão relacionadas às intervenções humanas e uso indiscriminado dos recursos naturais.

3.1.1 Tipos de subsidência

Mingorance (2000) lista cinco mecanismos causadores de subsidência do solo, são eles: hidrocompactação, dissolução de rochas e sais, extração de água subterrânea, extração de petróleo ou gás e atividade mineira. Cada um desses tipos apresenta características próprias, que estão diretamente conectadas com a origem do seu processo, como à extensão do fenômeno, condições geológicas favoráveis à sua ocorrência e máximas magnitudes atingidas. A seguir é apresentada uma descrição sucinta das características de cada um dos grupos propostos por Mingorance (2000) e sintetizados por Santos (2005).

- Subsidência devido à hidrocompactação: é um fenômeno de saturação rápida em depósitos finos não saturados e mal compactados, assim dizendo, com estrutura instável. O solo nesse tipo de fenômeno perde sua capacidade de suporte devido a uma reorganização das suas partículas causada pela adição de água. Essa adição resulta em uma consolidação - adensamento e diminuição de volume -

devido a seu peso próprio, que pode causar rebaixamentos na ordem de algumas dezenas de metros de profundidade. Esse tipo de subsidência é mais comum em ambientes desérticos e em regiões semiáridas.

- Subsidência devido à dissolução de rochas e sais: causada pelo fenômeno de carstificação, um processo de dissolução de rochas pelas águas subterrâneas e superficiais, que resulta na formação de cavernas subterrâneas. Esse fenômeno é o mais comum de dissolução de rochas calcárias ou carbonáticas.
- Subsidência devido à extração de água subterrânea: ocorre devido à superexploração da água subterrânea, que causa o rebaixamento do nível de água subterrânea, com consequente redução na pressão dos poros que ajudam a suportar as camadas subjacentes de solo.
- Subsidência devido à extração de petróleo ou gás: acontece de forma similar à retirada d'água subterrânea, devido à extração de fluidos, reduzindo a pressão dos poros e capacidade suporte do solo.
- Subsidência devido à atividade mineira: ocorre devido ao colapso de materiais rochosos consolidados e/ou não consolidados dentro das galerias subterrâneas.

No que se refere a subsidência causada pela atividade mineira, segundo o relatório do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (CPRM, 2019), essa modalidade de subsidência do solo afetou mais de 57 mil pessoas no município de Maceió, Alagoas, entre os anos de 2010 e 2019.

3.1.2 Escala espaço-temporal

No que se refere à magnitude da subsidência, essa pode ocorrer em dimensões diversas, de pequenas áreas (poucos metros), até enormes extensões (quilômetros). Esse fenômeno também pode ocorrer em escalas de tempo variadas. Sobre as escalas de dimensão e de tempo, Scott (1979 *apud* CABRAL; SANTOS; PONTES FILHO, 2006) catalogou tais escalas como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Escalas relacionadas a diferentes mecanismos de subsidência.

Dimensão (km)	Tempo (anos)	Mecanismo
$10^2 - 10^3$	10^4	Ajustes isostáticos da crosta
	$10 - 10^2$	Placas tectônicas
	$10 - 10^2$	Exploração de água em grande escala
$10 - 10^2$	$10^{-7} - 10^{-6}$	Terremoto
	$10 - 10^2$	Exploração de petróleo e gás
	$10 - 10$	Extração de sólidos
$10^{-1} - 10^0$	$10 - 10^2$	Carregamento da superfície, consolidação, hidrocompactação
$10^{-1} - 10^0$	$10^{-7} - 10^{-6}$	Densificação por vibração
$10^{-2} - 10^{-1}$	10^{-1}	Compactação

Fonte: Scott (1979 *apud* CABRAL; SANTOS; PONTES FILHO, 2006).

3.1.3 Subsidência em aquíferos sedimentares

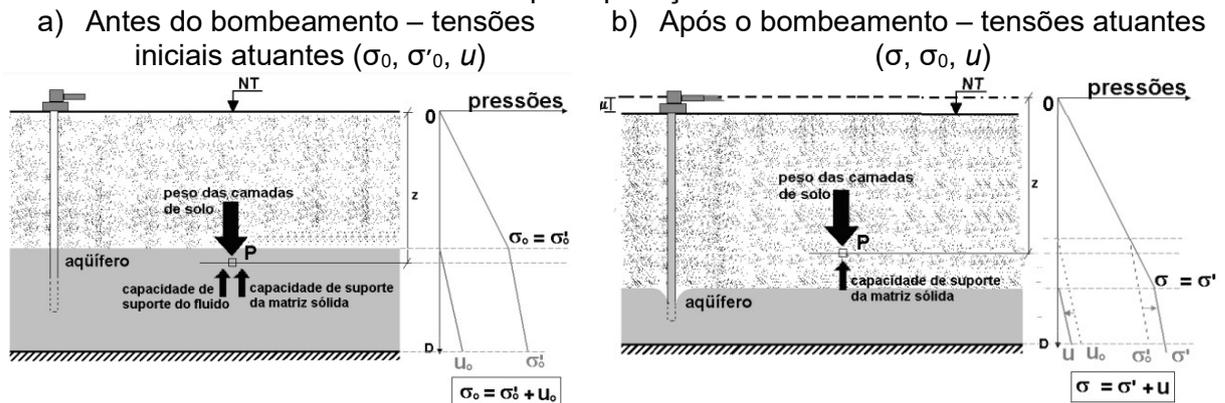
Segundo Santos (2005), o mecanismo associado a subsidência causada pela extração de águas subterrâneas em aquíferos sedimentares pode ser descrito de acordo com a distribuição de pressões e do Princípio das Tensões Efetivas (PTE) proposto por Terzaghi (1925 *apud* SANTOS, 2005), sendo esse princípio o elo entre a exploração de águas subterrâneas e o fenômeno de subsidência. A autora considera que, dentro de um aquífero, a pressão neutra u (pressão do poro preenchido com água) é igual à carga hidráulica, e quando a água é explotada do aquífero, a carga piezométrica e a pressão neutra diminuem, já a tensão efetiva no aquífero aumenta, uma vez que a pressão total permanece constante.

O mecanismo desse fenômeno, que pode acontecer tanto em aquíferos não confinados (Figura 1) como em confinados (Figura 2), considera que um determinado ponto P dentro do aquífero possui tensões iniciais (σ_0 , σ'_0 , u), tal que a carga das camadas de solo é suportada pela matriz sólida e pelo fluido simultaneamente. Com o rebaixamento do nível da água, causada pela retirada dos recursos subterrâneos, no mesmo ponto P a carga passa a ser suportada apenas pela matriz sólida. Essa elevação na tensão efetiva ocasiona na compressão do solo e conseqüente subsidência.

Segundo Scott (1979 *apud* SANTOS, 2005), a superfície de subsidência que ocorre como resultado da redução na pressão do fluido em uma camada subjacente pode raramente ser revertida, uma vez que a contração volumétrica de materiais granulares é quase irrecuperável. Já para os solos de granulação mais fina, o autor apresenta que esses têm registrado “na memória” as tensões máximas experimentadas, que são conhecidas como tensões de pré-consolidação. Quando a tensão efetiva reduz e a pressão neutra aumenta, o solo expande elasticamente. Já

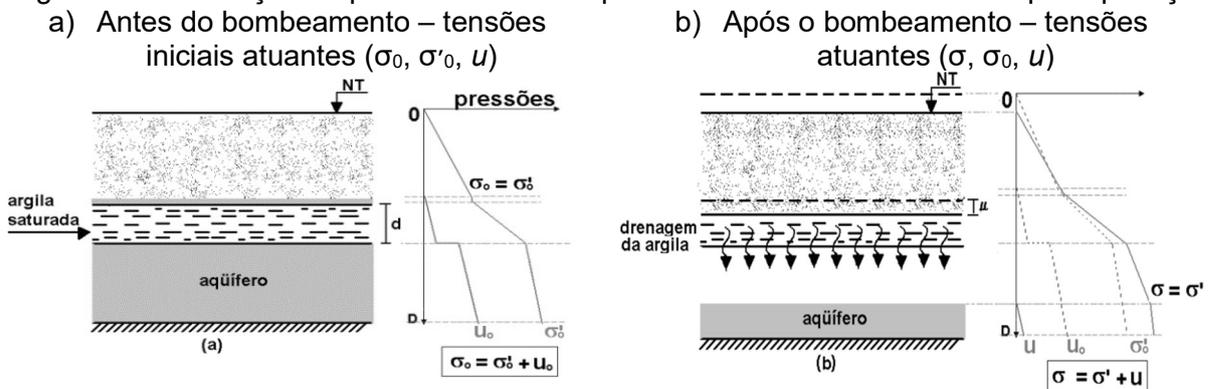
quando a tensão efetiva aumenta e a pressão neutra diminui, duas situações podem acontecer: se a tensão efetiva for menor que a tensão de pré-consolidação, o aquífero experimenta um deslocamento vertical recuperável ou, se a tensão efetiva for superior à tensão de pré-consolidação, o aquífero experimenta um deslocamento vertical irrecuperável.

Figura 1 - Distribuição de pressões em um aquífero não confinado submetido à superexploração.



No ponto P: $\sigma_0 = \sigma \rightarrow \sigma'_0 + u_0 = \sigma' + u$, como $u = 0 \rightarrow \sigma'_0 + u_0 = \sigma' \rightarrow \sigma' > \sigma'_0$
 Fonte: Santos (2005).

Figura 2 - Distribuição de pressões em um aquífero confinado submetido à superexploração.



Fonte: Santos (2005).

3.2 DESLIZAMENTOS DE ENCOSTAS

O termo “deslizamento” é comumente utilizado na linguagem popular para descrever uma vasta gama de processos de movimentos de massa que ocorrem em encostas, mesmo quando o movimento em questão não envolve necessariamente o deslizamento sobre uma superfície. Segundo Tominaga, Santoro e Amaral (2015), um movimento de massa, ou movimento gravitacional de massa, pode ser definido como qualquer deslocamento de solo, rochas e/ou vegetação ao longo de uma

vertente sob ação da gravidade. Conforme Tominaga (2007), esses processos ocorrem de maneira natural e são importantes na evolução geomorfológica das vertentes em regiões serranas e montanhosas, mas podem ocorrer em função da ocupação e ação antrópica desordenada nas encostas, sem que sejam tomadas as devidas medidas de estabilização, causando danos e perdas às populações locais.

Segundo Wieczorek (1996), um movimento gravitacional de massa pode ser resultado de interação entre vários fatores, podendo ser eles de origem geológica, morfológica, física ou humana, e é geralmente desencadeado por um “gatilho” ou agente deflagrador. O autor adiciona que esse gatilho pode ser um estímulo externo, como um longo período de chuvas intensas ou um terremoto, que causa rápido aumento do *stress* em uma encosta, ou diminui a resistência dos materiais que a compõem, desencadeando o falhamento. Os deslocamentos de solo também podem ocorrer através de estímulos não aparentes, pois alguns processos podem gradualmente diminuir a estabilidade de uma encosta até o ponto de ruptura, como é o caso de movimentações de massa causadas por intemperismos químico e físico.

3.2.1 Tipos de movimentos de massa

Segundo Silva (2016), os movimentos de massa podem ocorrer de várias formas, dependendo do tipo de material envolvido, mecanismo de ruptura, volume, trajetória, velocidade e formato do percurso da massa movimentada. Dentre as classificações de movimentos gravitacionais de massa, a mais utilizada mundialmente e adotada como oficial pela *Association of Engineering Geology* (IAEG) é a proposta por Varnes (1978), apresentada na Tabela 2. Augusto Filho (1992) apresenta um complemento da classificação dos movimentos de massa proposta por Varnes (1978), incluindo: características do movimento, material e geometria mobilizadas, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 2 - Classificação dos movimentos de massa.

Tipo de Movimento		Tipo de material		
		Rocha	Solo (engenharia)	
			de detritos	fino
Quedas Tombamentos		de rocha	de detritos	de terra
Escorregamentos	Rotacional	abatimento de rocha de blocos rochosos	abatimento de detritos de blocos de detritos	abatimento de terra de blocos de terra
	Translacional	de rocha	de detritos	de terra
Expansões laterais		de rocha	de detritos	de terra
Corridas / escorregamentos		de rocha de rocha (rastejo profundo)	de detritos rastejo de solo	de terra
Complexos: Combinação de 2 ou mais dos principais tipos de movimentos				

Fonte: Varnes (1978).

Tabela 3 - Classificação dos movimentos de encosta.

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo (<i>Creep</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Vários planos de deslocamento (internos) • Velocidade muito baixa (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • Solo, depósito, rocha alterada/fratura • Geometria indefinida
Escorregamentos (<i>Slides</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos planos de deslocamento (externos) • Velocidade média (m/h) e altas (m/s) • Pequenos a grandes volumes de material • Geometria e material variáveis • Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza • Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas • Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas (<i>Falls</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Sem planos de deslocamentos • Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado • Velocidades muito altas (vários m/s) • Material rochoso • Pequenos e médios volumes • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. • Rolamento de matacão • Tombamento
Corridas (<i>Flows</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Muitas superfícies de deslocamentos (internas e externas à massa em movimentação) • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso • Desenvolvimento ao longo das drenagens • Velocidades médias e altas • Mobilização de solo, rocha, detritos e água • Grandes volumes de material • Extenso raio de alcance mesmo em áreas planas

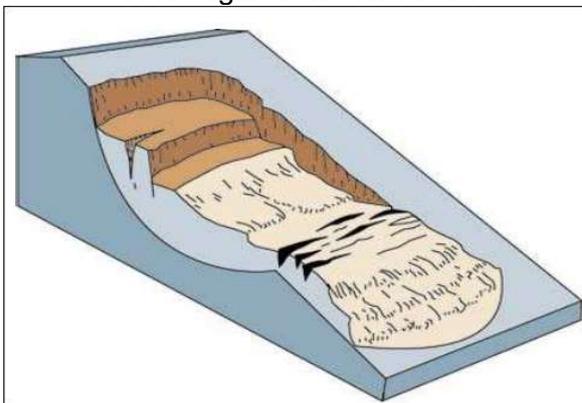
Fonte: Augusto Filho (1992).

De acordo com Sausen e Lacruz (2015), os escorregamentos são um dos tipos de movimentos de massa que ocorrem com maior frequência no Brasil. Os autores apontam que esse tipo de movimento ocorre devido à diminuição da

resistência ao cisalhamento dos solos superficiais, em médias e altas encostas, por estarem sujeitos a chuvas intensas. O detalhamento dos tipos de escorregamentos gravitacionais de massa, com suas peculiaridades, é apresentado por Highland e Bobrowski (2008) conforme os tópicos seguintes:

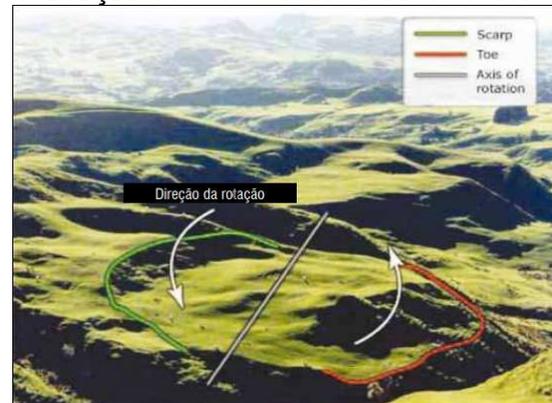
- Escorregamentos rotacionais – caracterizam-se por uma superfície de ruptura curva, ao longo da qual se dá um movimento rotacional do maciço de solo (Figuras 3 e 4).
- Escorregamentos translacionais – ocorrem quando se formam superfícies de rupturas planas associadas às heterogeneidades dos solos e rochas que representam descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas, derivadas de processos geológicos, geomorfológicos ou pedológicos (Figuras 5 e 6).
- Escorregamentos em cunha – são associados aos maciços rochosos pouco ou muito alterados, nos quais a existência de duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, condiciona o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos (Figura 7).

Figura 3 - Esquema ilustrativo de um escorregamento rotacional.



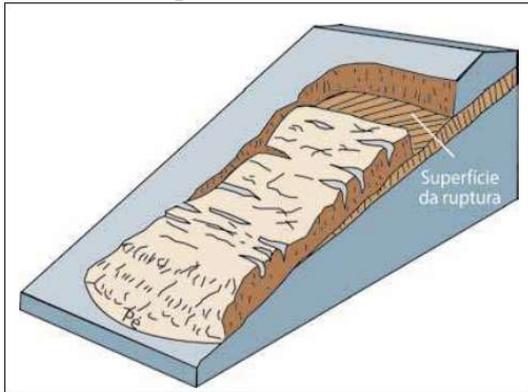
Fonte: Highland e Bobrowski (2008).

Figura 4 - Escorregamento rotacional com indicação do movimento rotativo vertical.



Fonte: Highland e Bobrowski (2008).

Figura 5 - Esquema ilustrativo de um escorregamento translacional.



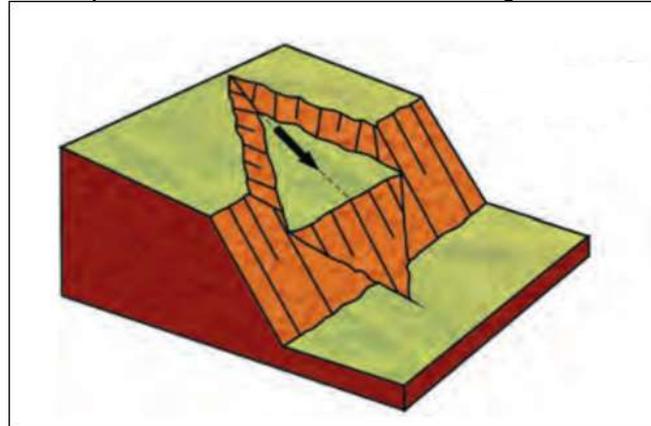
Fonte: Highland e Bobrowski (2008).

Figura 6 - Escorregamento translacional - bairro da Linha do Tiro, Recife.



Fonte: G1 PE (2022a).

Figura 7 - Esquema ilustrativo de um escorregamento em cunha.



Fonte: Tominaga, Santoro e Amaral (2015).

3.2.2 Gestão de riscos de deslizamentos

A gestão de riscos de deslizamentos de encostas em esfera federal é realizada pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), que tem como objetivo principal desenvolver atividades de pesquisa científica, tecnológica e de inovação na área de meteorologia, recursos hídricos, geologia e desastres naturais para prever, preparar, prevenir e mitigar o impacto de eventos extremos em bacias hidrográficas urbanas e rurais. Tais ações buscam reduzir as perdas em termos de vidas humanas, bens materiais e meio ambiente, como consequência desses eventos. O Cemaden monitora 959 municípios em todas as regiões brasileiras, sendo 66 desses no Estado de Pernambuco, incluindo o município do Recife, localidade dessa pesquisa (CEMADEN, 2023). Em âmbito municipal, a Prefeitura do Recife, através da Coordenadoria de Defesa Civil do

Recife, elaborou o “Plano municipal de redução de riscos em assentamentos precários do município do Recife – PE”, que é um modelo de gestão de risco contendo mapeamentos de risco e soluções estruturais e não estruturais para essas áreas. Dentre as ações desse plano constam: determinar quais os tipos de riscos considerados em cada área, o nível de perigo, o grau de probabilidade que o evento aconteça e avaliar as potenciais consequências (GOMES *et al.*, 2017).

3.3 CICLO HIDROLÓGICO EM ÁREAS URBANAS

Segundo Tucci (2002), as cidades são a forma mais agressiva de alteração do ambiente natural e, conseqüentemente, estes locais tornam-se cenários de diferentes impactos ambientais, sendo um deles a alteração no ciclo hidrológico. Dentre os impactos destacam-se aqueles observados na ocorrência de chuvas intensas e em consequência da exploração dos aquíferos por poços, que são particularmente importantes em casos de subsidência do solo e de deslizamento de encostas, respectivamente.

3.3.1 Aquíferos e exploração por poços

Segundo Cabral, Santos e Pontes Filho (2006), são causas do aumento no uso das águas subterrâneas, no Brasil: o aumento populacional, a alta qualidade das águas subterrâneas, a poluição de diversos mananciais de superfície, o melhor conhecimento dos aquíferos e o aprimoramento das técnicas de perfuração de poços. Conforme os autores, a subsidência devido à extração de água subterrânea em aquíferos sedimentares porosos é o tipo mais frequente registrado na literatura científica.

De maneira geral, o mecanismo por trás do rebaixamento dos aquíferos sedimentares gira em torno da diminuição da carga piezométrica e da pressão neutra, como também do aumento da tensão efetiva no aquífero. Cabral, Santos e Pontes Filho (2006) explicam esse fenômeno da seguinte forma: em um ponto P dentro do aquífero, antes do bombeamento, o solo está sujeito às tensões iniciais, tal que o peso das camadas de solo é sustentado pela matriz sólida e pelo fluido simultaneamente. Com a retirada contínua dos recursos hídricos subterrâneos e o rebaixamento do nível d'água, nota-se que no mesmo ponto P a carga sustentada

pela matriz sólida e pelo fluido começa a ser suportada apenas pela matriz sólida e esse aumento da tensão efetiva acarreta na compressão do solo e, conseqüentemente, na subsidência.

3.3.2 Precipitação e chuvas intensas

De maneira geral, os processos de infiltração da água no solo podem alterar as condições geológicas dos taludes, reduzindo a pressão negativa e/ou aumentando a intensidade das pressões positivas. Tais mudanças reduzem a tensão efetiva, o que acarreta na diminuição da resistência ao cisalhamento do solo, tendendo a causar a instabilidade das encostas. De acordo com Pfaltzgraff (2007), a mecânica dos deslizamentos induzidos pelas chuvas é caracterizada por uma ação progressiva e outra instantânea. A ação progressiva é representada pela gradativa saturação do solo pelas chuvas contínuas e pouco intensas que, ao se infiltrarem no solo, aumentam seu peso específico, diminuindo a coesão e a resistência à compressão e ao cisalhamento. No que se refere à ação instantânea, o mesmo autor descreve que chuvas intensas e com curta duração podem causar a elevação brusca do nível d'água (NA), como também, a erosão e a subpressão em descontinuidades, além da ação mecânica causada pela pressão das gotas de chuva e do vento atuando sobre a encosta.

Bandeira (2010) afirma que a chuva é um dos principais fatores que contribuem para a ocorrência de movimentos de massa. O autor expõe que na RMR os principais tipos de processos de instabilização de encostas correlacionados à ocorrência das chuvas são a erosão hídrica pluvial, na forma de ravinas e voçorocas, e os escorregamentos planares. As ravinas são sulcos de maiores dimensões formados pela escavação produzidas pelo escoamento superficial, já as voçorocas são as ravinas que apresentam profundidade suficiente para atingir o lençol freático, abrindo buracos no solo.

Segundo Coutinho e Bandeira (2012), as águas, sendo elas provenientes de chuvas ou servidas, representam de um modo geral um agente efetivo preparatório ou imediato de maior influência nos movimentos de massa na RMR. Carvalho *et al.* (2001) descrevem que antes da precipitação e do fluxo superficial, o solo encontrase geralmente no estado não saturado, submetido a forças capilares e/ou de sucção.

De acordo com os autores, o contato da chuva com o solo altera a sua saturação, podendo causar o desprendimento e a desagregação das suas partículas.

De acordo com Heathcote (1985), os eventos climáticos extremos são aqueles com altos fluxos de energia e valores acima da média histórica. Para Dias (2000), tais eventos podem atuar de forma direta ou indireta na ocorrência de desastres, como é o caso das chuvas intensas que podem atuar indiretamente na deflagração de enchentes e movimentos de massa.

3.4 SUSCEPTIBILIDADES EM ÁREAS URBANAS

Palavras como “vulnerabilidade”, “risco” e “susceptibilidade” são frequentemente utilizadas em trabalhos que envolvem desastres naturais para representar diferentes condições que uma área ou uma população apresentam em relação a esses fenômenos. Entretanto, nem todas as vezes esses termos são utilizados da maneira correta. Segundo Bitar (2014), o termo “risco” corresponde a uma medida da ameaça e das consequências que essa poderá causar em um dado intervalo de tempo, expressando os possíveis efeitos adversos causados por um fenômeno ou processo sobre os elementos expostos. O autor define “susceptibilidade” como a predisposição de um terreno à ocorrência de um determinado fenômeno. Já a vulnerabilidade em áreas urbanas pode ser definida como a característica do meio urbano a ser frágil, delicado ou fraco a determinadas situações e cenários.

Esses termos são frequentes em pesquisas que estudam fenômenos de subsidência do solo e movimentos de massa em encostas, com a intenção de definir critérios que correlacionem as características do meio com a possibilidade de ocorrência desses eventos. Para a análise da susceptibilidade dos terrenos quanto a esses fenômenos, são estudados principalmente as áreas de planícies, mais susceptíveis aos eventos de subsidência, e as áreas de morro, mais propensas aos deslizamentos de terra.

3.4.1 Susceptibilidade em áreas de planície

Tratando-se da subsidência do solo, Santos (2005) lista três fatores que interferem na susceptibilidade para ocorrência do fenômeno, sendo eles: a utilização do solo, a geologia e a hidrogeologia. Para o autor, a presença de carregamento

constante do solo devido à grande concentração de edificações nos centros urbanos e a superexploração de recursos subterrâneos contribuem para o rebaixamento do solo. Conforme apresentado por Conway (2015), Paixão *et al.* (2019), Sneed e Galloway (2000), Larson, Başağaoğlu e Marino (2001), Sneed *et al.* (2003) e Amin e Bankher (1997), as localidades com altos níveis de exploração de água subterrânea, como as áreas agrícolas, possuem características favoráveis para a ocorrência do fenômeno. Segundo Bagheri-Gavkosh *et al.* (2021), a superexploração de águas subterrâneas é responsável por 59,75% dos casos de subsidência no mundo, coincidindo principalmente com áreas de regiões agrícolas produtivas e cidades superpovoadas, de forma a atender a demanda agrícola e doméstica de água. Devido a essa relação de causa e consequência, diversos autores (XU; LIU; XU 2018; LUNA, 2017; CABRAL *et al.*, 2001; AMIN; BANKHER, 1997) apontam a superexploração de águas subterrâneas como um indicativo de risco ao fenômeno de subsidência.

Nos centros urbanos, estudos realizados por Wang *et al.* (2019), Thu e Fredlund (2000), Giao, Phien-Wej e Honjo (1999), Phien-wej, Giao e Nutalaya (1998), Bitelli, Bonsignore e Unguendoli (2000) e Carminati e Martinelli (2002) mostram que a extração demasiada de água subterrânea para abastecimento urbano também possibilita a ocorrência de subsidência do solo. Segundo Santos (2005), o conhecimento geológico é um subsídio fundamental para a análise da possibilidade do risco de subsidência e a presença de material argiloso entre as camadas de solo e/ou a presença de carste coberto são indicativos importantes. O material argiloso no perfil de solo, dependendo da espessura das camadas e distribuição espacial, pode contribuir para o aumento ou redução dos indícios sobre a possibilidade de ocorrência de rebaixamento do solo. Já a presença de carste coberto, para o autor, podem indicar a existência de drenagens secas, sumidouros, ressurgências, entre outros, que associados à movimentação descendente da superfície de solo, são indicativos de subsidência do solo. Segundo Wang *et al.* (2019), configurações de aquíferos com multicamadas, incluindo aquíferos confinados profundos e camadas espessas de argila compressível, facilitam o desenvolvimento da subsidência.

Ainda de acordo com Santos (2005), o conhecimento das particularidades hidrogeológicas dos solos tem uma grande importância quando se verifica a possibilidade de rebaixamento do solo. O conhecimento das características de

armazenamento e circulação de água no solo, juntamente com o estudo detalhado das características do aquífero presente na área de investigação e com o levantamento dos poços existentes e das vazões bombeadas é de grande importância para avaliar o comportamento dos níveis potenciométricos da região. A partir dessas informações, é possível identificar as localidades que possuem grandes rebaixamentos de nível potenciométrico, e que, conseqüentemente, apresentam susceptibilidade à ocorrência de rebaixamento do solo.

3.4.2 Susceptibilidade em áreas de morro

Em relação aos deslizamentos de encostas, Guidicini e Nieble (1984) relatam que determinadas áreas são naturalmente mais susceptíveis à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, devido à presença de dois tipos de agentes que influenciam na instabilidade de uma encosta, os agentes predisponentes e os agentes efetivos. O primeiro grupo diz respeito a características intrínsecas do terreno, podendo ser de origem geológica, geomorfológica, climato-hidrológica ou conforme a gravidade, calor solar e topo de vegetação original da área. O segundo grupo, por outro lado, corresponde aos gatilhos, que são fatores responsáveis pelo desencadeamento do movimento de massa. Wieczorek (1996) classifica esses gatilhos em dois grupos, os preparatórios (pluviosidade, erosão, variação térmica, ação antrópica, entre outros) e os imediatos (chuvas intensas e/ou prolongadas, terremotos, entre outros). Entre tais agentes, os principais, com suas formas de interferência na ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, são:

- Condicionantes geomorfológicos: segundo Tominaga (2007), os aspectos geomorfológicos, comumente considerados como agentes predisponentes de movimento de massa, são declividade, orientação, forma, amplitude e altitude da vertente e espessura do solo. Cooke e Doorkamp (1990) enfatizam que as características geomorfológicas de vertentes propensas ao desenvolvimento de escorregamentos possuem certas características, muitas vezes combinadas, como vertentes íngremes e altas, com grande concentração de água no solo, cobertura de solo profundamente intemperizada e presença de material de baixa coesão posicionado abaixo de material mais resistente.
- Ação antrópica: Cooke e Doorkamp (1990), Tominaga (2007) e Melo (2021), apontam em suas pesquisas que a ação do homem é um importante agente

modificador da dinâmica natural do relevo e, conseqüentemente, da estabilidade das vertentes. A remoção da cobertura vegetal, o lançamento e concentração de águas servidas, a presença de fossas e a modificação das condições naturais do terreno, como na criação de cortes e/ou aterros para construção de casas, contribuem para o aumento da fragilidade dos terrenos das encostas.

- Cobertura vegetal: segundo Tominaga (2007), a remoção da cobertura vegetal interfere no aumento da susceptibilidade de um terreno à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa. As copas das árvores atuam protegendo o solo por meio da interceptação, retenção e evapotranspiração e o sistema radicular promove o aumento da resistência do solo ao cisalhamento. Além disso, segundo Vivacqua e Barbosa (2018), o tipo de vegetação presente no terreno interfere em sua sustentabilidade, como é o caso das bananeiras, que facilitam a infiltração de água no solo, tornando-o mais instável.
- Pluviosidade: de acordo com Tominaga (2007), a pluviosidade é um importante fator a ser considerado para a susceptibilidade das encostas a movimentos de massa, podendo agir tanto como agente predisponente quanto como gatilho para esse fenômeno. O autor aponta que os eventos pluviométricos extremos, com elevados volumes em curtos intervalos de tempo, são os principais gatilhos para a deflagração de deslizamentos. Pinto, Passos e Caneparo (2013) afirmam que os índices pluviométricos elevados resultam na saturação do solo ou rocha, reduzindo a resistência à desagregação e gerando a perda da estabilidade das encostas.

3.5 SENSORIAMENTO REMOTO

Segundo Lillesand e Keifer (1994), o Sensoriamento Remoto (SR) é definido como uma tecnologia que adquire informações sobre objetos sem manter contato físico com os mesmos. Para Novo (2010), o SR compreende a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, entre outros, com o intuito de estudar o ambiente terrestre através do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as diversas coberturas que compõem a superfície terrestre. Segundo a autora, inicialmente o SR era baseado na utilização de fotografias aéreas, entretanto, a utilização de múltiplos sistemas de sensores presos em satélites tornou-se a principal fonte de dados. A intensidade da radiação

eletromagnética que atinge um sensor é o parâmetro empregado para a obtenção dos dados dos alvos da superfície terrestre, que posteriormente são transformados em uma medida passível de interpretação.

Cada sensor e satélite apresenta um grupo de características próprias, como a localização da cena de cobertura da área, sua qualidade quanto à porcentagem de nuvens, datas disponíveis, resolução espacial, resolução espectral, resolução radiométrica e resolução temporal. Segundo Souza *et al.* (2007), a resolução espacial é a menor área do terreno que um sensor é capaz de individualizar e é frequentemente expressa pelo tamanho do *pixel*. Já a resolução espectral é definida como a capacidade de discriminação dos materiais na superfície da terra. Por sua vez, a resolução radiométrica corresponde à radiação eletromagnética refletida e/ou emitida pelos alvos da superfície terrestre, parâmetro necessário para diferir um alvo do outro, uma vez que os pontos na superfície possuem valores de intensidade diferentes. Por fim, a resolução temporal expressa a frequência com que o sensor imageia uma determinada área, ou seja, seu tempo de revisita na superfície terrestre.

Conforme estudos de Oliveira *et al.* (2013), o SR alcança cada vez mais altos índices de utilização. Os autores destacam essa tecnologia como ferramenta capaz de possibilitar a análise sintética ou detalhada do objeto de estudo de maneira rápida, prática e com baixo custo no processamento de dados. De acordo com Figueiredo (2005), a aplicação do SR permite análises em diversas áreas, como na agricultura, geologia, recursos hídricos, estudos de solos, florestas e outras feições naturais na superfície terrestre. Dentre as informações providas do SR que podem ser utilizadas para geoespacializar a configuração da superfície terrestre, destaca-se a utilização dos índices espectrais.

Inúmeros índices de vegetação, relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa e índice de área foliar, têm sido propostos de forma a explorar as propriedades espectrais da vegetação, especialmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo (PONZONI e SHIMABUKURO, 2015). Uma vez que não é possível unificar todas as propriedades espectrais em um único índice de vegetação, cada um deles apresenta uma abordagem própria, como por exemplo o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Diferença Normalizada de Áreas Construídas (NDBI).

O índice NDVI, proposto por Rouse *et al.* (1973) e calculado a partir da Equação 1, é baseado na diferença de absorção dos tecidos fotossinteticamente ativos nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, o que permite a análise dos diferentes tipos de cobertura vegetal (JULIEN; SOBRINO; JIMÉNEZ-MUÑOZ, 2011). Conforme é apresentado por Ponzoni e Shimabukuro (2015), esse parâmetro é amplamente utilizado para monitorar o comportamento das vegetações ao longo das estações e intervalos de tempo. O NDVI possibilita avaliar a atividade fotossintética da vegetação por meio do comprimento de onda da região do infravermelho próximo, e do vermelho. Seus valores variam de -1 a 1, em que os valores próximos a zero representam uma superfície com baixa quantidade de vegetação ou não vegetada, os próximos a 1 indicam um maior vigor vegetativo, enquanto os valores negativos indicam áreas com presença de água (LOTUFO *et al.*, 2020).

$$NDVI = \frac{(NIR - V)}{(NIR + V)} \quad (1)$$

Em que: NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, NIR = reflectância na banda infravermelho próximo, e V = reflectância na banda vermelha.

O índice NDBI, desenvolvido por Zha, Gao e Ni (2003), permite identificar áreas urbanas e construídas, com base nas respostas espectrais das áreas construídas entre bandas do infravermelho próximo e infravermelho médio, podendo ser aplicado para o mapeamento rápido de áreas urbanas com acurácia satisfatória (PINHEIRO; LARANJEIRA, 2013). Seu cálculo, proposto por Zha, Gao e Ni (2003), é realizado a partir da Equação 2, obtendo-se valores que variam entre -1 e 1, sendo os negativos correspondentes a áreas com solo exposto ou corpos hídricos, e os superiores a zero equivalentes a *pixels* relacionados a edificações.

$$NDBI = \frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)} \quad (2)$$

Em que: NDBI = Índice de Diferença Normalizada de Áreas Construídas, SWIR = reflectância na banda infravermelho médio, e NIR = reflectância no infravermelho próximo.

É importante observar que na elaboração do NDVI e NDBI são utilizadas as reflectâncias das bandas propostas para o cálculo de cada um dos índices. A reflectância é uma propriedade do alvo, que não é possível de se medir com equipamentos comuns, e dessa forma, utiliza-se um artifício matemático para caracterizar a propriedade do alvo, dado pela Equação 3, conforme recomendado pela ESA (2022).

$$\rho\lambda = \frac{ND}{\text{Quantification_Value}} \quad (3)$$

Em que: $\rho\lambda$ corresponde à reflectância no topo da atmosfera corrigida, ND são os números digitais correspondentes a cada banda, e *Quantification_Value* é o coeficiente presente no arquivo metadatos.

Para a geração dos índices NDVI e NDBI, destaca-se o uso das imagens do satélite Sentinel-2, que vem sendo utilizado em larga escala em âmbito nacional e internacional (AO; YING; XIN, 2020; SEVILLA; ERAZO, 2019; BOORI; CHOUDHARY; KUPRIYANOV, 2020; KUC; CHORMAŃSKI, 2019; DELIRY; AVDAN; AVDAN, 2021; DUAN *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2020; XU; LIU; XU, 2018; SAADI; WIJAYANTO, 2021; PIRAGNOLO; LUSIANI; PIROTTI, 2018; RIBEIRO *et al.*, 2017; PAULETTO *et al.*, 2019). O estudo realizado por Ribeiro *et al.* (2017), na região Centro-Oeste de Minas Gerais, avaliou a variabilidade espaço-temporal das condições da vegetação em uma área irrigada por pivô central como subsídio ao manejo da agricultura irrigada, a partir de imagens do Sentinel 2A e do cálculo de índices, como o NDVI. A utilização do SR permitiu o acompanhamento da variabilidade da condição de vegetação, com os índices de vegetação se mostrando sensíveis às variações do seu vigor. O índice NDVI foi capaz de diferenciar as distintas épocas de cultivo do milho, sendo os maiores valores obtidos nas datas de máximo desenvolvimento vegetativo e os menores valores nos estádios iniciais e no período de senescência da cultura. A pesquisa realizada por Deliry, Avdan e Avdan (2021) comparou a eficiência da resolução espacial e espectral dos dados dos satélites Sentinel-2A e Landsat-8 na extração de superfícies impermeáveis urbanas.

O estudo, que analisou diversos índices, incluindo o NDBI, mostrou que a imagem do Sentinel-2 produziu melhores resultados do que a imagem do Landsat-8 na extração de detalhes e na precisão da classificação das áreas estudadas.

Outra aplicação que alguns sensores podem fornecer é o processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE), que é a maneira de representar as altitudes da superfície topográfica agregada aos elementos geográficos existentes sobre ela (IBGE, 2022a). Em âmbito nacional, há um destaque para o projeto Topodata (INPE, 2022), que oferece o MDE e suas derivações locais básicas em cobertura nacional, a partir de dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS) na rede mundial de computadores. A *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) foram as instituições responsáveis pela missão SRTM, que se propôs a realizar o imageamento da superfície terrestre com resolução de 30 m para o território americano e 90 m para o restante do mundo. Os sensores utilizados nessa missão foram os remotos, que são aqueles que utilizam a faixa do espectro eletromagnético correspondente às microondas, que sofrem uma influência quase nula das condições atmosféricas e nenhuma influência das condições de iluminação. Outro exemplo de satélite que fornece o MDE é o ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) da *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), que através do sensor PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) é capaz de prover modelos digitais de elevação com resolução de 12,5 m (EMBRAPA, 2022).

3.5.1 Aplicações do SR

Os fenômenos de movimentos de massa e subsidência envolvem uma grande quantidade de fatores que interferem na sua ocorrência, como é o caso das características topográficas do local, estratigrafia, geologia, hidrogeologia, uso e ocupação do solo, cobertura vegetal e pluviometria, podendo esses atuarem em conjunto ou separadamente. Essa vasta quantidade de informações em sua grande maioria é de difícil obtenção, diante disso diversos autores apontam a utilização das ferramentas de SR e SIG como facilitadoras. A pesquisa realizada por Vanacôr (2006) é um exemplo de trabalho científico que combina informações através de dados de SR e SIG para determinar potenciais áreas de deslizamentos. O autor

caracteriza áreas susceptíveis a movimentos de massa na região Nordeste do Rio Grande do Sul através da análise de mapas de altimetria, de declividade, de orientação, mapas geológicos, de uso e ocupação do solo e de cobertura vegetal.

Pfaltzgraff (2007) também utilizou ferramentas de SIG e SR para elaborar um mapa de susceptibilidade a deslizamentos na RMR. O autor aponta que os benefícios por trás da utilização dessas ferramentas são o aumento da capacidade de síntese e tratamento de grandes volumes de informações, como também a possibilidade do estudo ser feito em uma escala multitemporal de amplas áreas a um custo baixo e de maneira mais célere. Pranjali *et al.* (2021) determinaram locais sujeitos a regime de superexploração de águas subterrâneas no Noroeste da Índia através da utilização de ferramentas de SR e SIG para fins de análise de subsidência. Aljammaz *et al.* (2021) apresentam que através da análise de informações multitemporais, realizadas entre os anos de 2016 e 2018, com a utilização de SIG e SR, foi possível detectar que a cidade de Riad, capital da Arábia Saudita, apresentou localidades com taxas de subsidência de até 20 mm/ano no período da pesquisa.

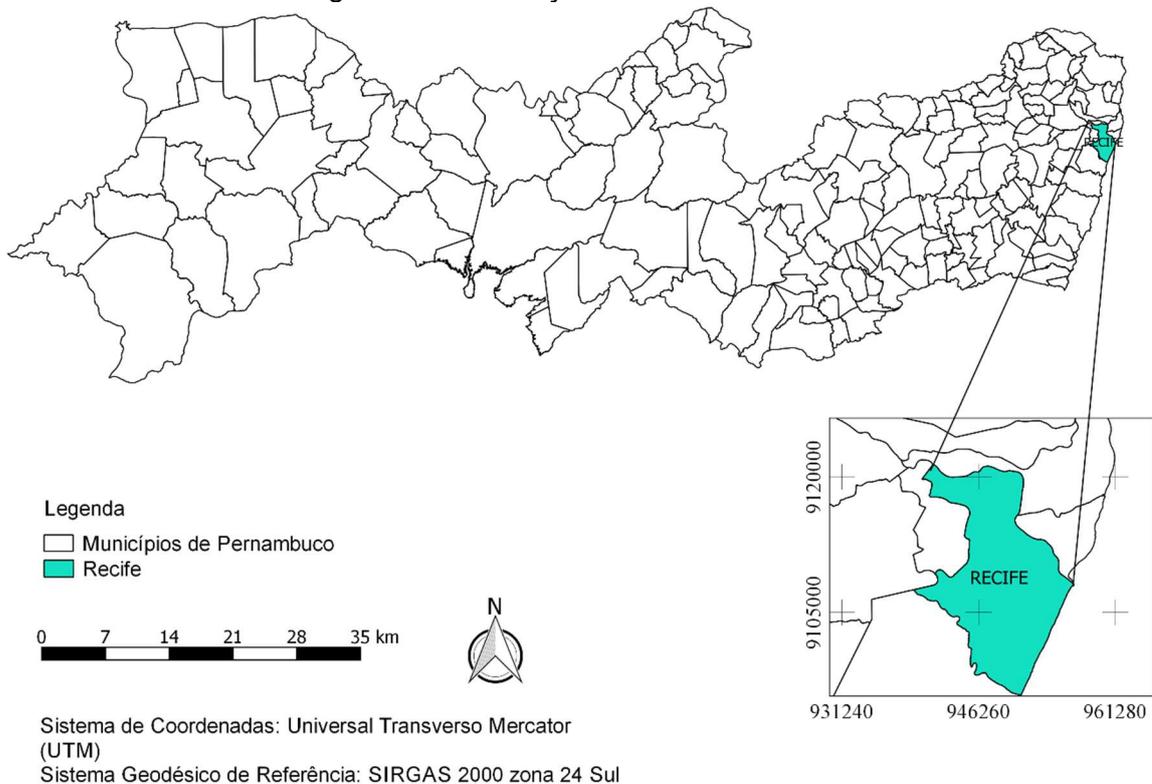
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados os materiais e métodos que explicam as metodologias utilizadas para obtenção dos resultados esperados com esse estudo.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

Recife é a capital do estado de Pernambuco, localizada na Região Nordeste do Brasil (Figura 8). Segundo o IBGE (2022b), é a maior área urbana do Estado com 218 km², banhada a leste pelo Oceano Atlântico e limitada pelos municípios de Olinda, Paulista, Camaragibe, Cabo de Santo Agostinho, Jaboatão dos Guararapes e São Lourenço da Mata. Ainda segundo o IBGE (2022b), a cidade possui uma população de 1.537.704 habitantes, com significativa parcela que reside em áreas marginais e susceptíveis à fenômenos naturais, susceptíveis à ocorrência de subsidência do solo e de deslizamento de encostas.

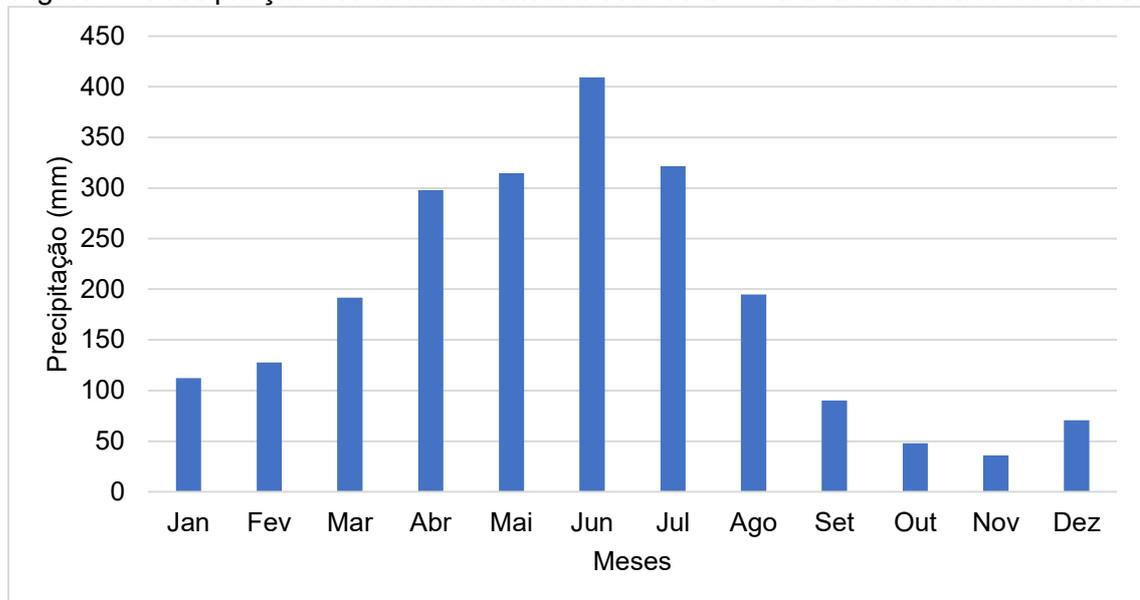
Figura 8 - Localização da área de estudo.



A cidade do Recife possui clima litorâneo quente e úmido, especificado como As' de acordo com a classificação climática de Köppen, definido como clima tropical

com estação chuvosa no inverno (ALVARES *et al.*, 2013). Esse clima é caracterizado por um período chuvoso concentrado entre abril e julho, e intenso período de seca na primavera, entre os meses de setembro e dezembro. Na Figura 9 pode-se observar as precipitações acumuladas mensais médias obtidas a partir da série histórica mensal entre os anos de 2000 e 2021, da estação pluviométrica do Recife – Várzea (código 30), disponibilizada na plataforma da Apac – Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC, 2022). O município possui temperatura do ar e umidade relativa do ar médias de 25,5°C e 79,8%, respectivamente, de acordo com estação meteorológica (código 82900) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022).

Figura 9 - Precipitação acumulada mensal média de 2000 a 2021 na cidade do Recife.



Fonte dos dados: Estação pluviométrica de código 30 (APAC, 2022b).

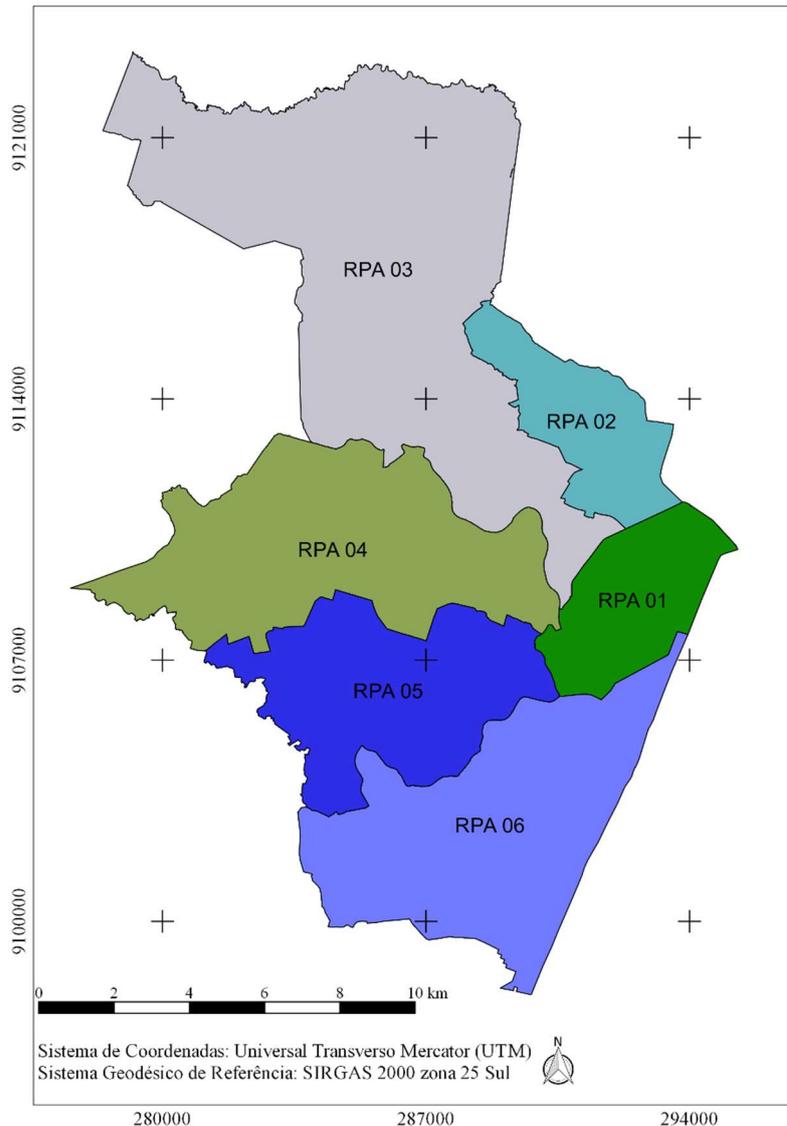
Com o intuito de facilitar a caracterização dos bairros da área de estudo, a região pode ser visualizada a partir da divisão do município proposta pela Lei Municipal n° 16.293 (RECIFE, 1997), que divide o Recife em seis regiões político-administrativas (RPAs). A lista dos bairros pertencentes a cada uma das RPAs e a localização destas são apresentadas na Tabela 4 e Figura 10, respectivamente. Essa divisão permite uma melhor visualização e determinação da forma como a distribuição dos serviços básicos (abastecimento de água, coleta de lixo, fornecimento de energia elétrica) é realizada espacialmente no município.

Tabela 4 - Bairros das regiões político-administrativas do município do Recife.

RPA	Bairros
1	Recife; Santo Amaro; Boa Vista; Cabanga; Ilha do Leite; Paissandu; Santo Antônio; São José; Coelhos; Soledade; Ilha Joana Bezerra.
2	Arruda; Campina do Barreto; Campo Grande; Encruzilhada; Hipódromo; Peixinhos; Ponto de Parada; Rosarinho; Torreão; Água Fria; Alto Santa Terezinha; Bomba do Hemetério; Cajueiro; Fundão; Porto da Madeira; Beberibe; Dois Unidos; Linha do Tiro.
3	Aflitos; Alto do Mandu; Alto José Bonifácio; Alto José do Pinho; Apipucos; Brejo da Guabiraba; Brejo de Beberibe; Casa Amarela; Casa Forte; Córrego do Jenipapo; Derby; Dois Irmãos; Espinheiro; Graças; Guabiraba; Jaqueira; Macaxeira; Monteiro; Nova Descoberta; Parnamirim; Passarinho; Pau-Ferro; Poço da Panela, Santana; Sítio dos Pintos; Tamarineira; Mangabeira; Morro da Conceição; Vasco da Gama.
4	Cordeiro; Ilha do Retiro; Iputinga; Madalena; Prado; Torre; Zumbi; Engenho do Meio; Torrões; Caxangá; Cidade Universitária; Várzea.
5	Afogados; Areias; Barro; Bongü; Caçote; Coqueiral; Curado; Estância; Jardim São Paulo; Jiquiá; Mangueria; Mustardinha; San Martin; Sancho; Tejipió; Totó.
6	Boa Viagem; Brasília Teimosa; Imbiribeira; Ipsep; Pina; Iburá; Jordão; Cohab.

Fonte: O Autor (2023)

Figura 10 - Regiões político-administrativas do município do Recife.



Fonte: O Autor (2023)

4.1.1 Geologia e estratigrafia da área de estudo

Segundo Monteiro (2000), o município do Recife está inserido geotectonicamente na bacia Pernambuco/Paraíba. Batista (1984) indica que no interior da planície do Recife pode-se encontrar duas situações morfológicas diferentes, sendo a primeira representada pelos tabuleiros do grupo Barreiras, que constituem regiões de topografia mais alta, plana no topo e com pequenas inclinações para leste. Essas feições são encontradas em todo o Nordeste do Brasil e são formadas por sedimentos silto argilosos e arenosos que podem condicionar cotas que variam de 10 a 150 m, crescendo do litoral para o interior. A segunda situação morfológica é representada pela planície do Recife, constituída por sedimentos recentes que, em sua maioria, são depositados pelo rio Capibaribe, com pequenas ondulações oriundas de antigos depósitos eólicos, que possui cotas variando de zero a 10m e inclinação suave para leste, com cota média de 3 a 4 m.

Correia (2006) expõe, em sua pesquisa, as unidades geológicas presentes no município do Recife, entre elas, o Embasamento Cristalino e as Bacias Sedimentares Cretáceas. O autor apresenta dois cortes, um no sentido Sul-Norte (Figura 11a) e outro na orientação Oeste-Leste (Figura 11b).

Figura 11 - Esboço litoestrutural do município de Recife.

a) Corte Sul – Norte.



b) Corte Oeste – Leste.



Fonte: Adaptado de Correia (2006).

4.1.1.1 Embasamento Cristalino

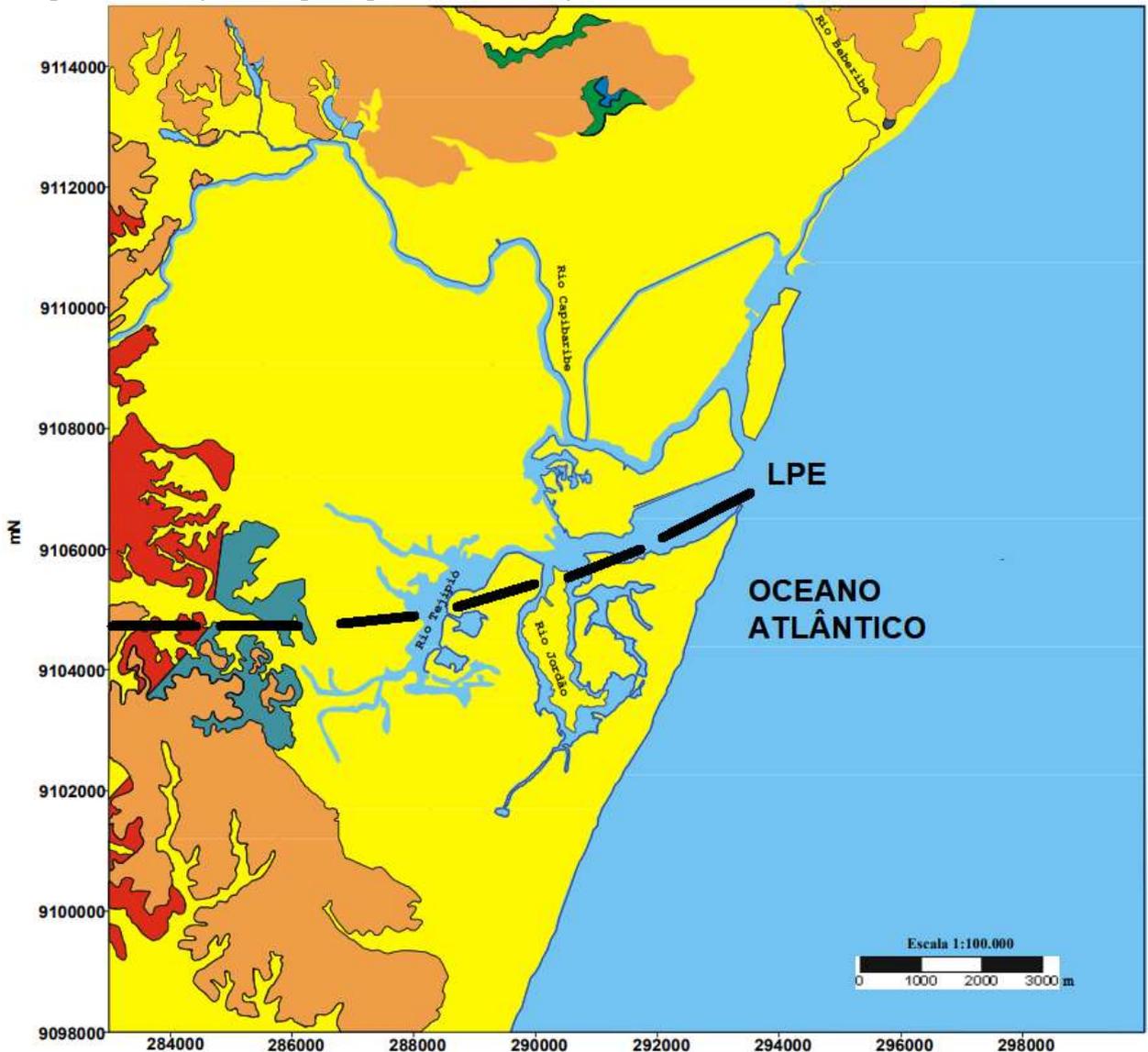
Segundo Batista (1984), as rochas que compõem o embasamento cristalino afloram na porção oeste da RMR, ao longo de toda a borda das duas bacias sedimentares, apresentando um suave mergulho para o leste, com inclinação da ordem de 28 m/km. Conforme Santos (2005), o embasamento cristalino é da idade pré-cambriana e é constituído geologicamente por rochas graníticas, gnáissicas e migmatíticas, que estão fraturadas ou fissuradas por esforços tectônicos regionais. Nesses espaços fendilhados e/ou fraturados da rocha, há a presença de água armazenada que não está em circulação.

4.1.1.2 Bacias Sedimentares Cretáceas

De acordo com Santos (2005), as Bacias Sedimentares Cretáceas instalaram-se sobre blocos de embasamento cristalino, rebaixados por falhas geológicas que ocorreram durante a separação das placas tectônicas. A Figura 12 apresenta o mapa hidrogeológico do Recife com a localização do Lineamento Pernambuco (LPE), uma falha geológica importante da região. O retângulo em destaque indica a área onde há grande número de poços.

Santos (2005) descreve que na área sul do LPE, onde foram depositados conglomerados, arenitos feldspáticos e argilitos, formou-se a Bacia Cabo. Essa bacia sedimentar está posicionada no litoral sul e sua extensão de aproximadamente 100 km vai desde a cidade de São José da Coroa Grande até a cidade do Recife, sendo limitada pelo alto de Maragogi e pelo LPE. Correia (2006) apresenta que ao norte do LPE formou-se a Bacia Pernambuco-Paraíba, que pode ser subdividida em: Formação Beberibe, Formação Gramame, Formação Marinha Farinha e Formação Barreiras. A Formação Beberibe repousa sobre o embasamento cristalino e apresenta espessura média da ordem de 180 m, podendo ser dividida em Beberibe superior, com arenitos calcíferos, e em Beberibe inferior, arenoso com intercalações de silte e argila, sendo este último o principal aquífero explorado da RMR.

Figura 12 - Mapa hidrogeológico do Recife e proximidades, e o Lineamento Pernambuco.



Convenções

 Aquífero Boa Viagem	 Aquífero Beberibe
 Aquífero Barreiras	 Aquífero Cabo
 Aquífero Carstico Gramame	 Aquífero Fissural

Fonte: Adaptado de Monteiro (2000).

Segundo Santos (2005), o pacote sedimentar da Formação Gramame pode chegar a atingir 55 m e é constituído de aproximadamente 2/3 de calcários argilosos em finas camadas com intercalações de margas e argilas mais puras. Essa formação não apresenta potencial hidrogeológico, caracterizando-se pelos valores elevados de carbonatos e bicarbonatos. A Formação Maria Farinha tem espessura de até 35 m, sendo constituída por calcários com intercalações de argila sobrepostos aos calcários da Formação Gramame. Essa formação, assim como a

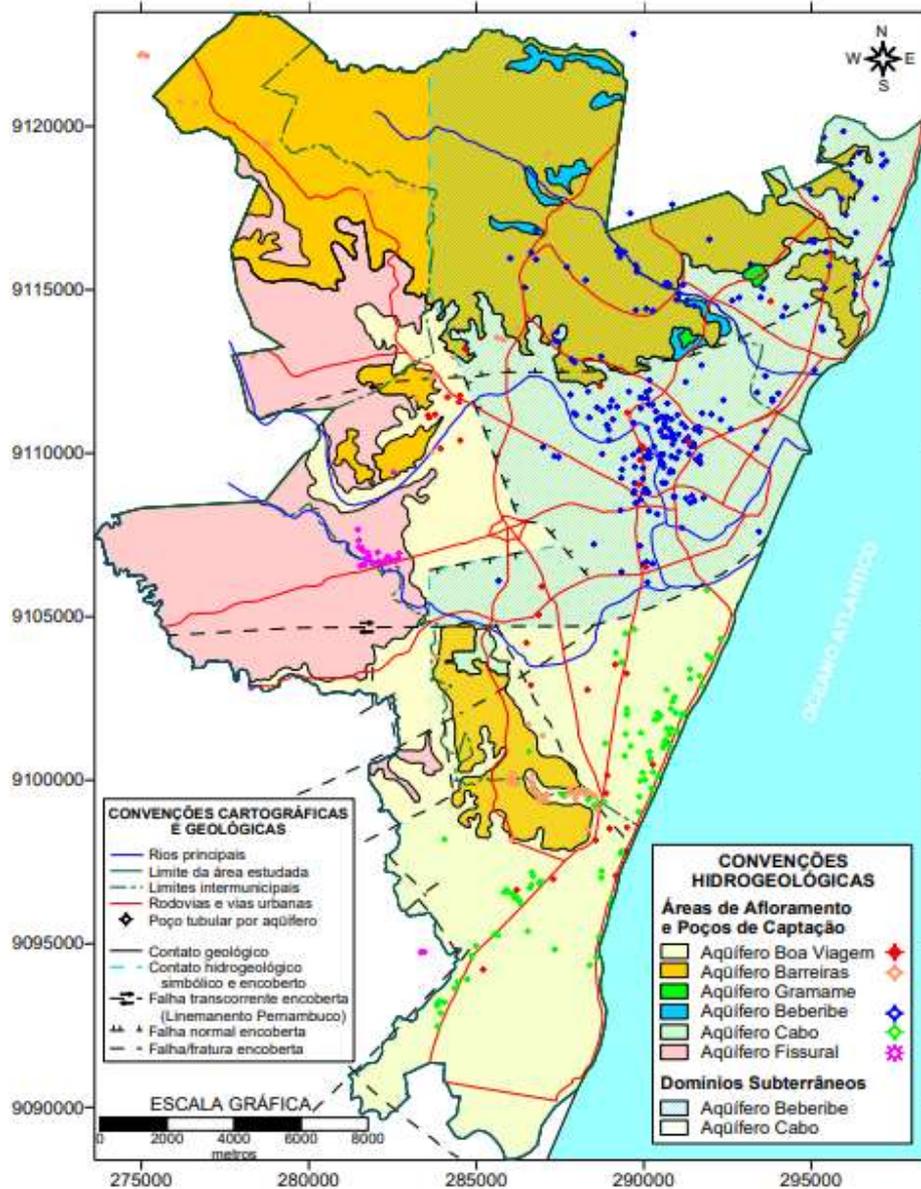
anterior, não apresenta importância como reservatório de água. Por fim, Correia (2006) apresenta que os sedimentos terciários da Formação Barreiras ocupam mais de 50% da área da RMR na sua porção Norte, recobrando o embasamento cristalino e as unidades das bacias sedimentares cretáceas. Essa formação, com espessuras em torno de 40 m, corresponde à zona de tabuleiros dissecados por vales estreitos e profundos e não se verifica exposições significativas dessa formação no litoral Sul.

4.1.2 Hidrogeologia

Segundo Costa e Costa Filho (2004), os aquíferos presentes no entorno do município do Recife (Figura 13) podem ser classificados conforme sua importância enquanto mananciais de águas subterrâneas, na seguinte sequência de maior para menor potencialidade: Aquífero Beberibe (Bacia Sedimentar PE-PB), Aquífero Cabo (Bacia Sedimentar do Cabo), Aquífero Boa Viagem (Planície do Recife), Aquífero Barreiras e Aquífero Fissural.

De acordo com Batista (1984), o Aquífero Beberibe é o principal fornecedor de água subterrânea de toda a RMR, sendo utilizado para o abastecimento público e doméstico, além de ser explorado para fins comerciais por empresas que comercializam água mineral. Esse aquífero é composto pelas camadas geológicas superior e inferior, essa última apresentando as melhores condições para o acúmulo de água, mas sem uma nítida separação geológica e hidráulica entre elas. Na maior parte do aquífero ocorre semiconfinamento, com forte anisotropia e permeabilidade vertical menor em relação à horizontal.

Figura 13 - Mapa hidrogeológico simplificado com distinção dos domínios dos aquíferos.



Fonte: Borba, Costa Filho e Mascarenhas (2010).

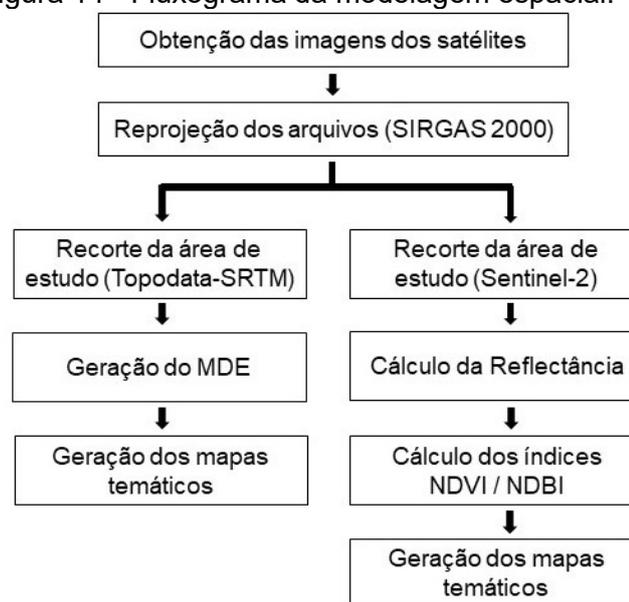
Segundo Santos (2005), os sedimentos recentes que sobrepõem a Formação Cabo são denominados de Aquífero Boa Viagem e constituem a terceira formação aquífera mais explorada da RMR. O autor informa que esse aquífero é composto por areias variadas, argilas, limos e vasas, de origem continental ou marinha, ocorrendo nos vales dos rios, ao longo das praias e em zonas de mangues, atingindo a espessura de 80 m na região de Boa Viagem (COSTA *et al.*, 1998). De acordo com Costa *et al.* (2002), o Aquífero Boa Viagem é o responsável por alimentar os aquíferos Cabo e Beberibe através da água drenada ao longo de sua superfície não urbanizada.

Conforme Santos (2005), o Aquífero Barreiras é caracterizado por uma sequência aquífera freática, com níveis confinados em profundidade, mas sua exploração é pouco desenvolvida, uma vez que a fração granulométrica predominante é siltico-argilosa, o que reduz a capacidade de armazenamento d'água. Já no Aquífero Fissural, a água subterrânea encontra-se limitada aos espaços fendilhados no Embasamento Cristalino, fazendo com que toda a circulação da água subterrânea seja efetuada entre as fraturas.

4.2 MODELAGEM ESPACIAL COM DADOS ORBITAIS

Para caracterização do relevo da cidade do Recife, a partir do processamento das imagens de satélite, obteve-se o mapa de elevação, o modelo digital de elevações (MDE), os valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Diferença Normalizada de Áreas Construídas (NDBI) para toda a cobertura da área estudada. A Figura 14 apresenta um fluxograma simplificado das etapas realizadas.

Figura 14 - Fluxograma da modelagem espacial.



Fonte: O Autor (2023)

4.2.1 Pré-processamento

Nesta etapa, selecionou-se as cenas utilizadas para processamento do MDE, NDVI e NDBI, utilizando como critérios de seleção um valor de cobertura de nuvens

na área inferior a 10% e a busca pela imagem mais recente possível. Para o MDE foram utilizadas duas imagens do projeto Topodata, de novembro de 2011, identificadas como 07s36 e 08s36, uma vez que a área do município do Recife se encontra entre as duas quadrículas, e obtidas gratuitamente através do *site* do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE,2022). Para o NDVI e NDBI foram utilizadas uma mesma imagem, do dia 21/06/2020, com a identificação “L1C_T25MBM_A017195_20200621T124320”, adquirida gratuitamente através do *site* do *United States Geological Survey* (USGS, 2022), que disponibiliza imagens do satélite Sentinel-2. A Tabela 5 apresenta as informações sobre as bandas do Sentinel-2.

Tabela 5 - Informações sobre as bandas do satélite Sentinel-2.

Bandas	Sentinel-2		Resolução espacial (m/pixel)
	Comprimento de onda central (nm)	Largura de banda (nm)	
1 – Coastal aerosol	442,7	21	60
2 – Blue	492,4	66	10
3 – Green	559,8	36	10
4 – Red	664,6	31	10
5 – Vegetation red edge	704,1	15	20
6 – Vegetation red edge	740,5	15	20
7 – Vegetation red edge	782,8	20	20
8 – NIR	832,8	106	10
8A – Narrow NIR	864,7	21	20
9 – Water vapour	945,1	20	60
10 – SWIR – Cirrus	1373,5	31	60
11 – SWIR	1613,7	91	20
12 – SWIR	2202,4	175	20

Fonte: Adaptado de ESA (2022).

4.2.2 Processamento Sentinel-NDVI/NDBI e Topodata-MDE

Para o processamento do NDVI, NDBI e MDE utilizou-se o *software* de livre acesso QGIS, na versão 2.18.22. Após a aquisição das imagens, a primeira etapa consistiu em reprojeta-las para o Sistema Geodésico de Referências SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), UTM fuso 25 Sul. Em seguida, em cada uma das duas imagens, a área de estudo de interesse foi recortada da cena. Na imagem utilizada para processar o NDVI e NDBI, do Sentinel-2, utilizou-se a ferramenta “Calculadora *Raster*”, do *software* QGIS, para calcular a reflectância a partir da Equação 3, citada anteriormente.

O NDVI, obtido a partir das bandas do vermelho e infravermelho próximo resultantes da reflectância corrigida, foi obtido a partir da Equação 1, proposta por Rouse *et al.* (1973), como citado anteriormente. Esse índice apresenta uma variação de valores entre -1 e +1 que, em superfícies com vegetação verde, apresentam-se entre 0 e 1, sendo os valores mais próximos de 1 correspondentes as regiões com a maior presença de vegetação. As regiões com presença de água ou nuvens são expressas por valores negativos desse índice. Para o cálculo do índice NDBI foi utilizada a Equação 2, proposta por Zha *et al.* (2003), como mostrado anteriormente, obtendo-se valores que variam entre -1 e 1, sendo os negativos correspondentes a áreas com solo exposto ou corpos hídricos, e os superiores a zero equivalentes a *pixels* relacionados a edificações.

O MDE foi obtido a partir do projeto Topodata, que utiliza dados da missão SRTM, disponibilizados pelo USGS na rede mundial de computadores (INPE, 2022), com resolução de 90 m para o território brasileiro. Existem outros satélites que fornecem os dados necessários para elaborar o MDE com maior precisão, como o satélite ALOS da JAXA. O sensor PALSAR acoplado a esse satélite é capaz de fornecer MDE com 12,5 m de precisão (EMBRAPA, 2022). Apesar da melhor característica quando comparado aos sensores remotos da missão SRTM, as imagens do satélite ALOS disponíveis para o município do Recife apresentaram-se constantemente coberta por nuvens, o que justifica a sua não utilização e a opção pelos dados do projeto Topodata.

4.3 SUSCEPTIBILIDADE EM ÁREAS DE PLANÍCIE

Diante do exposto acerca dos condicionantes que levam à ocorrência dos fenômenos de subsidência do solo e deslizamento de morro, para elaboração de um mapa de manchas que expresse de maneira gradual as respectivas áreas do município do Recife mais susceptíveis à subsidência de solo, estabeleceu-se alguns critérios para análise. No caso da subsidência do solo, analisou-se os seguintes critérios:

Critério 1 (obrigatório): existência de áreas de planície;

Critério 2: registro de áreas com elevado número de poços;

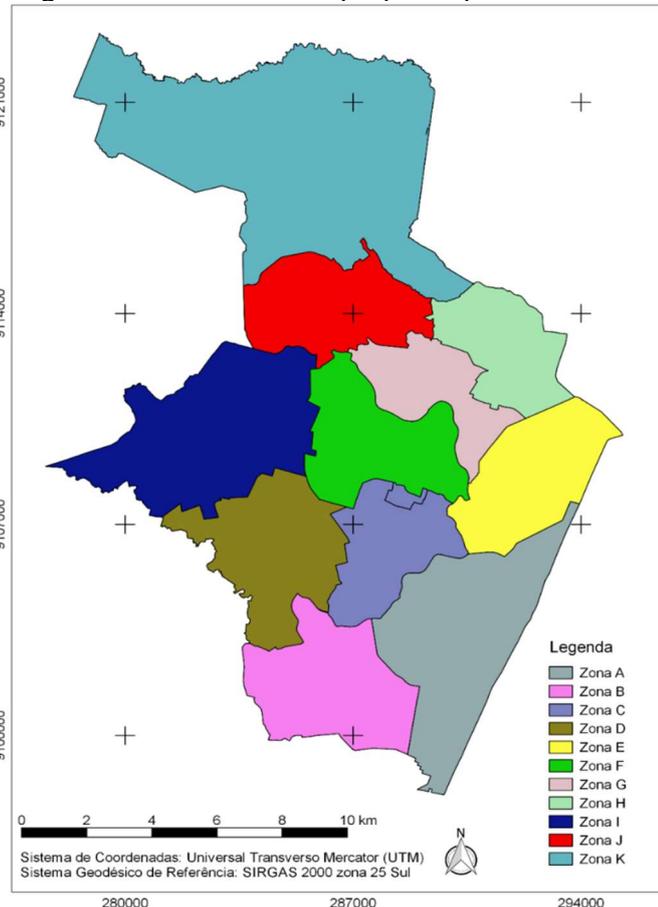
Critério 3: registro de aquíferos com rebaixamento do nível d'água; e

Critério 4: características de forte urbanização (uso e ocupação do solo).

Com base nesses dados, as áreas foram caracterizadas de acordo com o grau de susceptibilidade, determinado a partir da presença simultânea de dois ou mais desses critérios, permitindo assim verificar um maior ou menor grau de susceptibilidade da região. As classificações e faixas de limites de cada um desses critérios serão apresentadas em um tópico subsequente.

As áreas de planície foram identificadas com o uso de SR e SIG que possibilitaram a elaboração do MDE. Na análise do comportamento hidrogeológico dos aquíferos na área de estudo, os Estudos Sobre a Disponibilidade e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região Metropolitana do Recife - HIDROREC III proposto por LEITÃO *et al.* (2015) apresentaram, através da análise de dados de manutenção de 250 poços, a variação dos níveis piezométricos ao longo do município de Recife entre os anos de 2002 e 2014. Para facilitar a análise, os bairros do município foram agrupados em 11 zonas, nomeadas de A e K (Figura 15). Vale salientar que tal zoneamento não coincide com aquele apresentado na divisão das 6 RPAs que integram o município do Recife.

Figura 15 - Zoneamento proposto por HIDROREC III



Fonte: Adaptado de Leitão (2015).

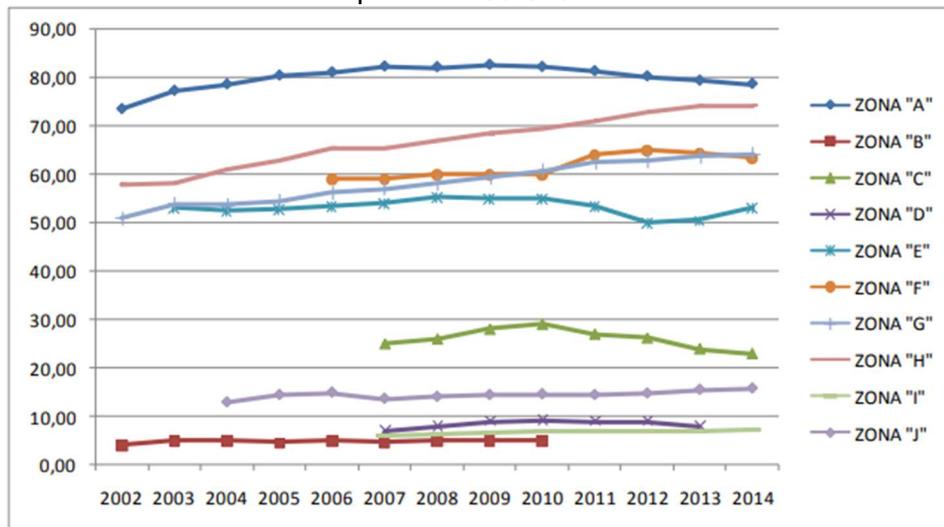
Na Tabela 6 é apresentada a lista dos bairros presentes em cada uma das 11 zonas, os aquíferos que alimentam cada zona e a quantidade de poços analisados. A Figura 16 apresenta uma sintetização das médias das medições dos níveis estáticos, representados no eixo vertical, em cada uma das zonas ao longo dos anos de estudo, representados no eixo horizontal.

Tabela 6 - Lista das zonas explotáveis propostas pelo HIDROREC III.

Zona	Bairros	Aquífero explotado	Nº de poços
A	Boa Viagem, Pina, Brasília Teimosa, Imbiribeira e Ipsep	Aquífero Cabo recoberto pelo Boa Viagem	54
B	Ibura, Cohab e Jordão	Aquífero Barreiras, com ligeira cobertura do Aquífero Boa Viagem	2
C	Afogados, Areias, Bongí, San Martín, Mangueira, Mustardinha, Estância, Caçote e Jiquiá	Aquífero Beberibe recoberto pelo aquífero Boa Viagem	1
D	Barro, Curado, Tejipió, Sancho, Coqueiral, Totó e Jardim São Paulo.	Aquífero Boa Viagem, variando sobre o Beberibe e o Fissural.	1
E	Recife, Santo Antônio, Santo Amaro, São José, Boa Vista, Ilha do Leite, Cabanga, Ilha Joana Bezerra, Coelhos, Soledade e Paissandu	Aquífero Beberibe recoberto pelo aquífero Boa Viagem	17
F	Cordeiro, Ilha do Retiro, Torre, Madalena, Iputinga, Prado, Zumbi, Torrões e Engenho do Meio	Aquífero Beberibe recoberto pelo aquífero Boa Viagem	2
G	Derby, Espinheiro, Aflitos, Graças, Tamarineira, Casa Forte, Monteiro, Casa Amarela, Santana, Jaqueira, Parnamirim, Mangabeira, Alto José do Pinho, Morro da Conceição, Alto do Mandú e Poço da Panela	Aquífero Beberibe recoberto pelo aquífero Boa Viagem	153
H	Arruda, Campo Grande, Encruzilhada, Rosarinho, Torreão, Água Fria, Cajueiro, Fundão, Ponto de Parada, Hipódromo, Peixinhos, Campina do Barreto, Bomba do Hemetério, Porto da Madeira, Linha do Tiro, Alto Santa Terezinha e Beberibe	Aquífero Beberibe recoberto pelo aquífero Boa Viagem	15
I	Várzea, Caxangá e Cidade Universitária	Aquífero Boa Viagem sobre o aquífero fissural	1
J	Dois Irmãos, Apipucos, Sítio dos Pintos, Macaxeira, Nova Descoberta, Alto José Bonifácio, Brejo de Beberibe, Córrego do Jenipapo e Vasco da Gama	Aquífero Boa Viagem, variando sobre o Beberibe e o Fissural.	4
K	Guabiraba, Brejo da Guabiraba, Pau Ferro, Passarinho e Dois Unidos	Aquífero Barreiras, variando sobre o Beberibe e o Fissural.	0

Fonte: Adaptado de Leitão *et al.* (2015).

Figura 16 - Representação gráfica da evolução dos níveis estáticos dos poços do Recife no período 2002/2014.



Fonte: Leitão (2015).

Através do banco de dados do SIAGAS (CPRM, 2022), foi possível mapear a localização dos poços profundos cadastrados na área de estudo. Por fim, utilizou-se dados do Sistema Base de Dados do Estado - BDE (BDE, 2022), que são alimentados através de informações dos censos do IBGE, da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD e de dados da Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA, para identificar a maneira como é realizado o abastecimento d'água de cada um dos bairros do município do Recife. Esses dados fornecem a quantidade de domicílios particulares permanentes analisados em cada bairro e a forma de abastecimento de cada um deles, podendo ser realizada pela rede geral de abastecimento, por poços ou por outra forma de abastecimento.

Assim como foram utilizadas para determinar as áreas de planície, através do MDE, as técnicas de SR e SIG serviram para caracterizar o uso e ocupação da área de estudo através dos índices NDVI e NDBI. O primeiro foi utilizado para identificar os tipos de cobertura da área de estudo com base na diferença de absorção dos tecidos fotossinteticamente ativos nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (JULIEN; SOBRINO; JIMÉNEZ-MUÑOZ, 2011). Já o segundo foi utilizado para identificar as áreas urbanas e construídas, com base nas respostas espectrais das áreas construídas (ZHA; GAO; NI, 2003).

4.4 SUSCEPTIBILIDADE EM ÁREAS DE MORRO

Assim como foi feito para o fenômeno de subsidência do solo, também para investigação de áreas susceptíveis ao deslizamento de morros foram estabelecidos alguns critérios para análise. Assim sendo, neste caso foram analisados os seguintes critérios:

Critério 1: (obrigatório): existência de áreas de morro;

Critério 2: registro de áreas sem sistemas de coleta de águas servidas apropriados;

Critério 3: elevada declividade do relevo; e

Critério 4: características de forte urbanização (uso e ocupação do solo).

Com base nesses dados, assim como foi feito na análise da subsidência nas áreas de planície, as áreas de morro foram caracterizadas de acordo com o grau de susceptibilidade, associado à presença simultânea de dois ou mais desses critérios, determinando assim um maior ou menor grau de susceptibilidade da região.

Para identificação das áreas de morro do município do Recife utilizou-se o mesmo MDE obtido para determinação das áreas de planície. Segundo Batista (1984), as regiões de morro da área de estudo possuem cotas variadas que podem chegar a 150 m, crescendo do litoral para o interior, sendo essas áreas formadas por sedimentos silto argiloso e arenosos. Os mapas temáticos dos índices NDVI e NDBI, utilizados para caracterizar o uso e ocupação do solo nas áreas de planície, também foram usados para as áreas de morro para os mesmos fins.

Para avaliar como é realizada a coleta das águas servidas de cada um dos bairros do município do Recife, utilizou-se o BDE (BDE, 2022), que é alimentado a partir de dados dos censos do IBGE, da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD e de dados da Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA. Esses dados fornecem a quantidade de domicílios particulares permanentes examinados em cada bairro e o tipo de esgotamento sanitário de cada um deles, podendo ser realizado por canalizações da rede geral de esgoto ou pluvial, por fossa séptica ou por outro meio de descarte não regular.

A construção do mapa de declividades foi realizada com base no arquivo digital do MDE, com dados do Topodata, através do *software* QGIS. Nesse programa os resultados podem sair no formato de intervalos de declividade (em porcentagem) ou inclinação da encosta (em graus). Na construção do mapa foram utilizadas as seis classes de declividade propostas pela Embrapa (1979), que são:

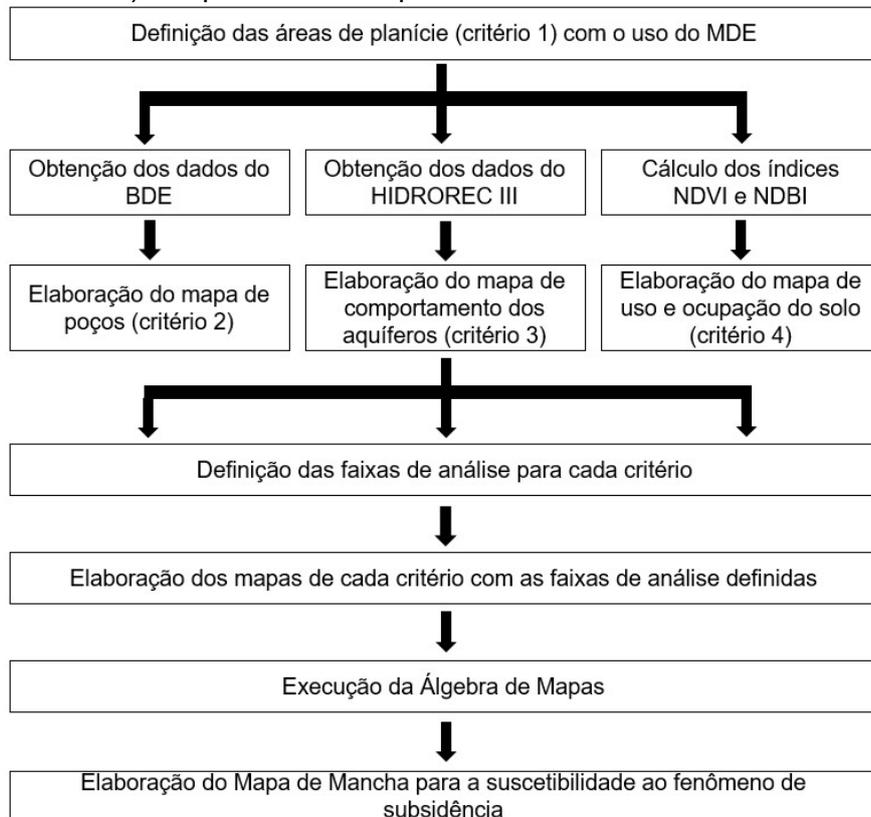
plano 0-3%; suave ondulado 3-8%; ondulado 8-20%; forte ondulado 20-45%; montanhoso 45-75%; e forte montanhoso >75%.

4.5 ELABORAÇÃO DOS MAPAS DE MANCHAS

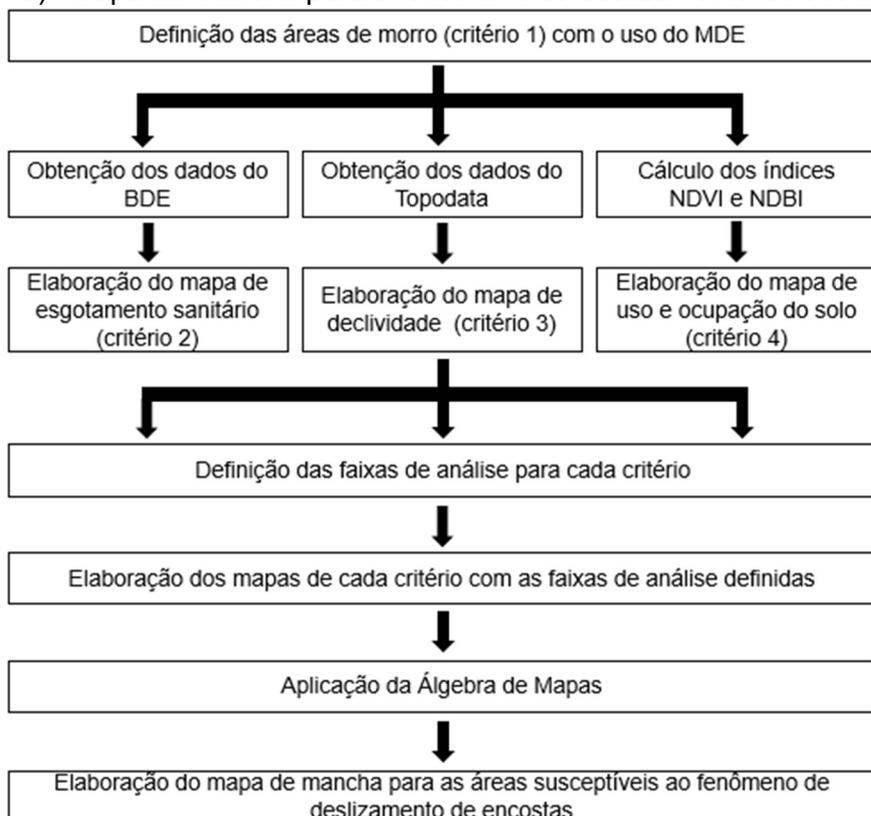
Para elaborar os mapas de manchas nas áreas de planície e de morro optou-se por utilizar o método denominado de Álgebra de Mapas, com processamento no *software* QGIS, que consiste em atribuir graus de importância para cada um dos diversos fatores utilizados na geração dos mapas e depois combiná-los. Como não existe na literatura trabalho que determine quais indicativos de susceptibilidade são mais importantes em relação aos outros, adotou-se um mesmo grau de importância para cada fator, com variações para cada uma de suas características. Na ausência de argumentos que justifiquem uma detalhada classificação dos graus de susceptibilidade, optou-se, por simplificação, em variar os intervalos apresentados nos mapas de mancha em três faixas: baixa, média e alta, possuindo cada uma dessas faixas um peso associado para elaboração do mapa de manchas. Como produto dos mapas de mancha, as áreas foram classificadas em pesos que variam entre os valores de 0 e 6, sendo os maiores valores associados a áreas com maior grau de susceptibilidade aos fenômenos. Para cada localidade no mapa, o peso resultante é a soma dos critérios analisados para cada um dos fenômenos. Na análise da subsidência do solo, o critério de verificação de existência de área de planície não foi considerado na soma dos pesos, pois é um fator obrigatório para a análise do fenômeno, logo estaria presente em toda a área analisada. Da mesma forma, para o fenômeno de deslizamento de encostas, o fator obrigatório de existência de área de morro também foi desconsiderado na soma dos pesos, uma vez que se faz presente em toda a área de análise do fenômeno.

As etapas para a elaboração dos mapas de mancha para ambos os fenômenos estão descritas nos fluxogramas da Figura 17.

Figura 17 - Fluxograma das etapas para elaboração dos mapas de mancha.
a) Mapa de mancha para o fenômeno de subsidência



b) Mapa de mancha para o fenômeno de deslizamento de encostas



Fonte: O Autor (2023)

4.5.1 Critérios analisados para as áreas de planície

Uma vez atendido ao Critério 1 (existência de área de planície), as áreas foram analisadas com vistas a atender os outros três critérios, que estão explicitados a seguir. Conforme mencionado anteriormente, não existe na literatura nenhuma produção científica que determine as faixas para classificação de cada um dos critérios nos graus de susceptibilidade. Como forma de transpor essa dificuldade, exceto pelo Critério 3, que possui análise subjetiva descrita a seguir, foram adotadas premissas com relação a esses valores, considerando que menores concentrações de cada um dos critérios estariam relacionadas à condição de menor grau de susceptibilidade e maiores concentrações associadas à condição de maior grau de susceptibilidade.

- Critério 2: **registro de áreas com elevado número de poços:**

No caso da concentração de poços, os bairros foram classificados com relação ao percentual de domicílios abastecidos por poços em três categorias de susceptibilidade, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Valor do peso para o percentual de domicílios abastecidos por poços.

Percentual de domicílios abastecidos por poços	Grau de susceptibilidade	Peso
0-10%	Baixo	0
10-30%	Médio	1
>30%	Alto	2

Fonte: O Autor (2023)

- Critério 3: **registro de aquíferos com rebaixamento do nível d'água:**

Para as Zonas propostas por Leitão *et al.* (2015) no HIDROREC III, foram atribuídas duas categorias: maior grau de susceptibilidade, atribuído às áreas consideradas no estudo como de tendência ao rebaixamento dos aquíferos (Peso = 2), e menor grau de susceptibilidade, atribuído às áreas consideradas no estudo como de tendência de recuperação do nível do aquífero (Peso = 0). Em áreas com poucos poços analisados, em que não é possível determinar um comportamento de recuperação ou rebaixamento, foi desconsiderado o grau de susceptibilidade e atribuído o peso zero, de forma a não agregar valor a esse parâmetro e não interferir no cálculo da susceptibilidade. Na análise dos níveis de água dos aquíferos

realizada por Leitão *et al.* (2015), devido à existência de apenas duas situações de comportamento (tendência de recuperação e de rebaixamento), não foi definida nenhuma categoria para o Peso = 1.

- Critério 4: **características de forte urbanização (uso e ocupação do solo)**:

Para a determinação do grau de susceptibilidade com relação ao uso e ocupação do solo, foram considerados os índices do NDVI e NDBI (Tabela 8). Conforme apresentado por Demarchi, Piroli e Zimback (2011), valores de NDVI superiores a 0,4 indicam áreas com forte concentração de vegetação, e segundo Santos *et al.* (2021) e Leite *et al.* (2019), valores de NDBI menores que zero indicam áreas com baixa concentração de edificações. Essas duas condições associadas caracterizam um baixo uso e ocupação do solo, indicando um baixo grau de susceptibilidade. Já valores de NDVI inferiores a 0,4, indicam a presença de vegetação mais rala ou inexistente, e valores de NDBI superiores a zero indicam a presença de edificações. A presença simultânea dessas duas condições caracterizam um ambiente com alto grau de uso e ocupação do solo, e consequente elevado grau de susceptibilidade. Em situações em que os índices apresentam condições contrárias de uso e ocupação do solo, ou seja NDVI > 0,4 e NDBI >0 ou NDVI < 0,4 e NDBI < 0, foi considerado o Peso = 1.

Tabela 8 - Valor do peso para o uso e ocupação do solo.

Uso e ocupação do solo	Grau de susceptibilidade	Peso
NDVI > 0,4 e NDBI < 0	Baixo	0
NDVI > 0,4 e NDBI >0 ou NDVI < 0,4 e NDBI < 0	Médio	1
NDVI < 0,4 e NDBI > 0	Alto	2

Fonte: O Autor (2023)

4.5.2 Critérios analisados para as áreas de morro

Uma vez atendido ao Critério 1 (existência de área de morro), as áreas foram analisadas com vistas a atender os outros três critérios, que estão explicitados a seguir. Assim como foi posto para as áreas de planície, para as áreas de morro também não existe na literatura nenhuma produção científica que determine as faixas para classificação de cada um dos critérios nos graus de susceptibilidade. Portanto, também foram adotadas premissas com relação a esses valores,

considerando que menores concentrações de cada um dos critérios estariam relacionadas à condição de menor grau de susceptibilidade e maiores concentrações associadas à condição de maior grau de susceptibilidade.

- Critério 2: **registro de áreas sem sistemas de coleta de águas servidas apropriados:**

Na análise do esgotamento sanitário foram atribuídas três categorias de relevância de susceptibilidade, conforme proposto na Tabela 9.

Tabela 9 - Valor do peso para os percentuais de esgotamento sanitário.

Percentual de esgotamento não realizado por canalizações	Grau de susceptibilidade	Peso
0-50%	Baixo	0
50-70%	Médio	1
>70%	Alto	2

Fonte: O Autor (2023)

- Critério 3: **elevada declividade do relevo:**

Na análise da declividade do terreno optou-se por adotar três intervalos de classificação, conforme proposto na Tabela 10. Esses intervalos foram escolhidos para atender os tipos de relevo apresentados na área de estudo, com o intuito de aumentar o grau de susceptibilidade à medida que esse valor se aproxima do limite de 30% de declividade, que é o máximo estabelecido para a ocupação do solo na legislação vigente, a Lei Federal nº 6766 de 1979.

Tabela 10 - Valor do peso de acordo com a declividade do relevo.

Declividade do relevo	Grau de susceptibilidade	Peso
0-8%	Baixo	0
8-20%	Médio	1
>20%	Alto	2

Fonte: O Autor (2023)

- Critério 4: **características de forte urbanização (uso e ocupação do solo):**

A análise do uso e ocupação do solo para as áreas de morro foi realizada respeitando os mesmos intervalos propostos para as áreas de planície, conforme a Tabela 8.

4.5.3 Validação dos mapas de mancha

Para validação dos mapas de mancha, foram confrontadas as áreas com alto grau de susceptibilidade e as áreas com registros de casos de ocorrência dos respectivos fenômenos (subsistência do solo ou deslizamento de encosta). Para isso, foram levantadas informações acerca do fenômeno de interesse em artigos de periódicos ou de eventos, dissertações ou teses, como também em matérias de jornais locais. No caso da subsistência do solo, foram utilizados tanto matérias jornalísticas quanto produções científicas, sem período determinado. Em relação aos casos de deslizamento de encostas, foram considerados relatos entre 2017 e 2022 para as matérias jornalísticas e sem período definido para as produções científicas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pelas análises feitas nesse estudo.

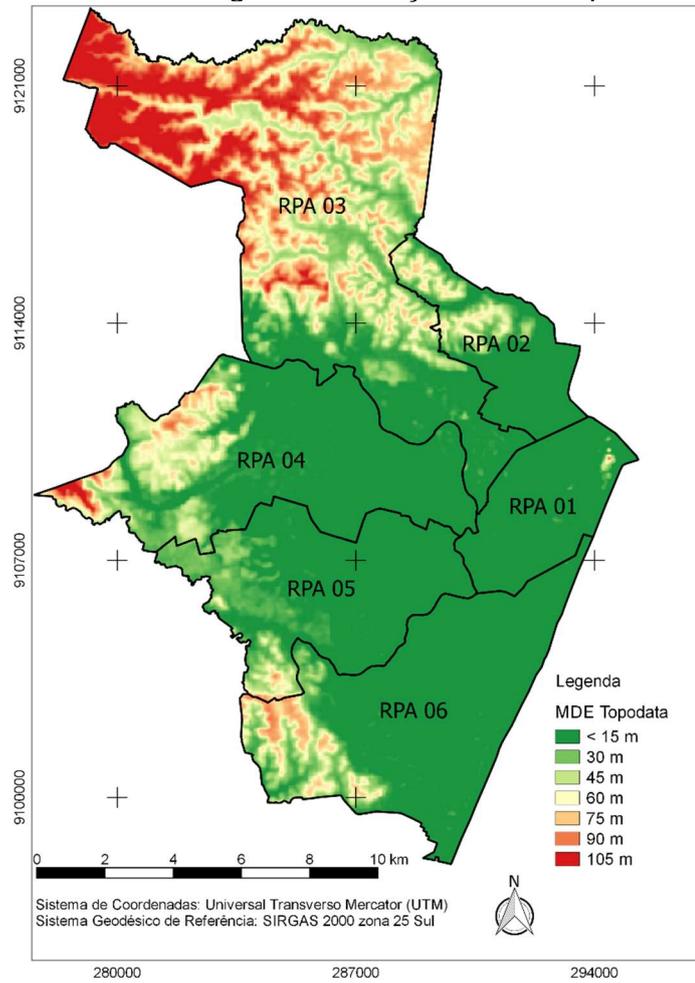
5.1 MODELAGEM ESPACIAL COM DADOS ORBITAIS

Conforme apresentado na metodologia, a aplicação do Sensoriamento Remoto possibilitou a caracterização da área de estudo para determinação das áreas planas e das áreas de morro através do MDE, a caracterização da cobertura vegetal a partir do processamento do NDVI e a determinação das áreas construídas, através do NDBI. Assim sendo, a partir dos dados da missão SRTM, com o uso do *software* QGIS, foi obtido o MDE para a área do município do Recife com resolução de 90 m, como mostra a Figura 18, com utilização das cenas 07s36 e 08s36 de novembro de 2011 do projeto Topodata.

Diante da Figura 18, pode-se fazer uma comparação com os apontamentos feitos por Batista (1984), que indicou que a área do município do Recife está inserida entre duas situações morfológicas diferentes, os tabuleiros do grupo Barreiras e a planície do Recife. O grupo Barreiras constitui regiões com topografia mais elevada, caracterizadas na Figura 18 pela faixa de cores entre o verde claro até o vermelho. Já a planície do Recife apresenta cotas menores, representada na mesma imagem pela tonalidade mais escura da cor verde.

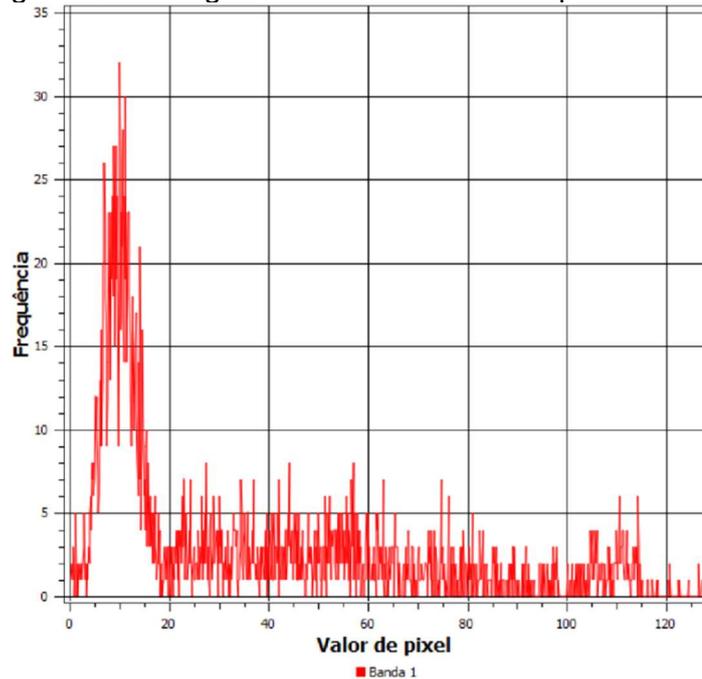
Através do *software* QGIS também foi possível gerar um histograma que facilita a visualização das altitudes mais comuns ao longo da superfície do município (Figura 19). Pode-se observar que a maior frequência dos valores está entre as cotas 5 m e 15 m, indicando que a maior parte do Recife é composto por áreas de planície. Já nas áreas de morro não se pode observar uma predominância de uma única cota.

Figura 18 - Modelo Digital de Elevação do Município do Recife.



Fonte: O Autor (2023)

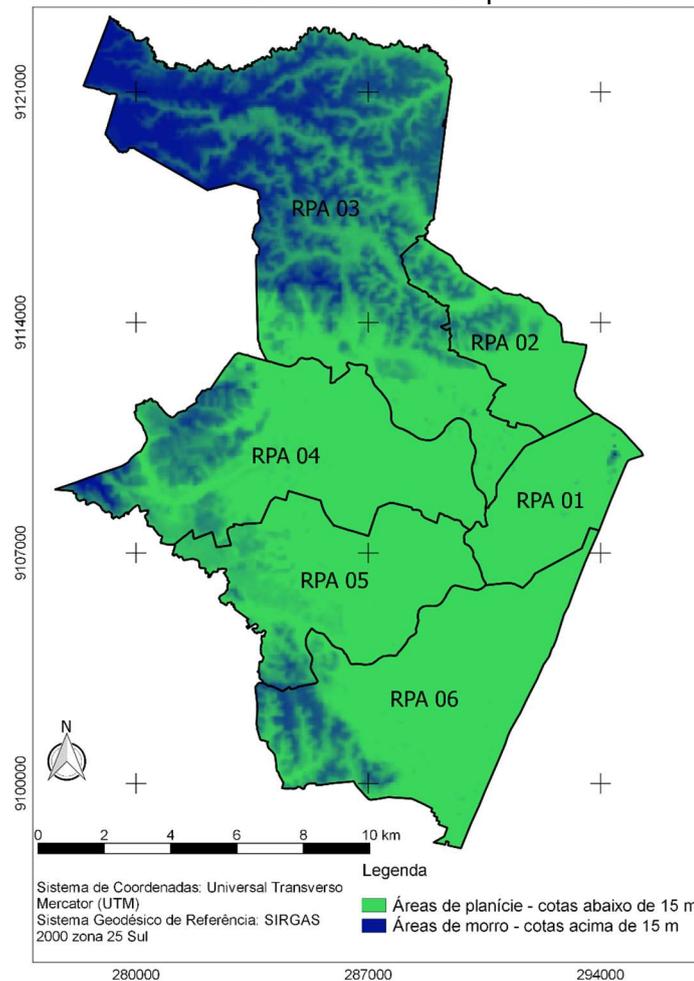
Figura 19 - Histograma das cotas no município do Recife.



Fonte: O Autor (2023)

Para construção dos mapas de manchas, as áreas de morro e planície foram divididas como proposto na Figura 20. As localidades marcadas de verde apresentam cotas mais baixas, nas quais foram investigadas as susceptibilidades ao fenômeno de subsidência do solo, e aquelas marcadas de azul correspondem às áreas de cotas mais altas, em que serão avaliadas as susceptibilidades ao fenômeno de deslizamento de encostas.

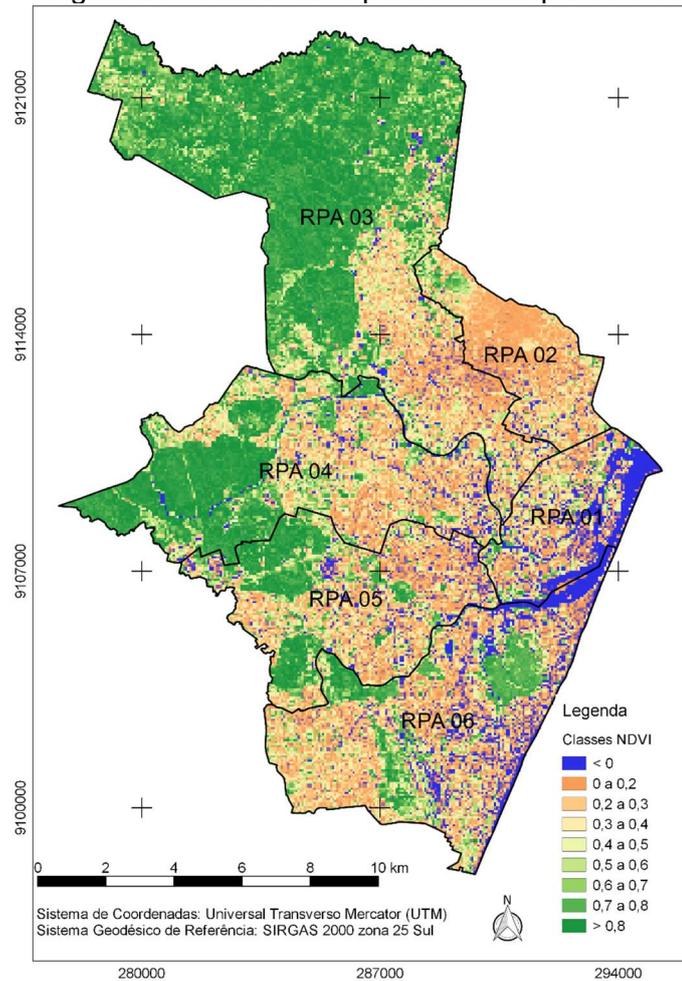
Figura 20 - Zoneamento das áreas de morro e planície do município do Recife.



Fonte: O Autor (2023)

A partir do processamento da imagem identificada como "L1C_T25MBM_A017195_20200621T124320", do dia 21/06/2020, seguindo o passo-a-passo indicado no fluxograma da Figura 14 e a metodologia proposta por Rouse *et al.* (1973) e Zha, Gao e Ni (2003), obteve-se, respectivamente, o NDVI e NDBI apresentados na Figura 21 e 23.

Figura 21 - Índice NDVI para o município do Recife.



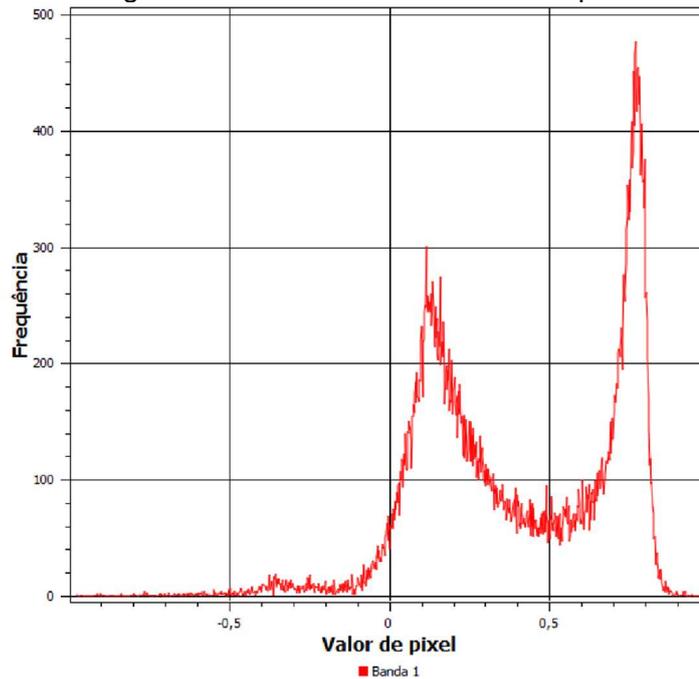
Fonte: O Autor (2023)

Através do histograma produzido pelo *software* QGIS, presente na Figura 22, e seguindo as classificações propostas por Chouhan e Rao (2011) e Ponzoni e Shimabukuro (2015), pode-se observar que as maiores frequências dos valores do índice NDVI estão entre os intervalos de 0,1 e 0,2 e 0,7 e 0,8. O primeiro intervalo caracteriza áreas com ausência de vegetação ou a presença de vegetação com baixa densidade, já o segundo representa áreas com florestas ou vegetações mais densas.

Observando as áreas de morro, nota-se que há a predominância de florestas e vegetações mais densas nas áreas localizadas nas porções Norte e Oeste do município, que correspondem a valores do índice entre 0,6 e 0,8. Observa-se também que nas regiões de morro das RPAs 02 e 06, e ainda na porção da RPA 03 próxima ao limite da RPA 02, há a predominância de valores do índice NDVI entre 0,1 e 0,3, que correspondem à ausência de vegetação ou à presença de vegetação com baixa densidade.

Na área da planície do Recife, os valores do NDVI predominantes ficam entre 0,1 e 0,3, que correspondem à ausência de vegetação ou à presença de vegetação com baixa densidade. Também pode-se observar, na Figura 21, a localização das áreas com presença de água e os pontos com vegetação densa inseridos dentro da planície do Recife, representados pelas áreas com índice inferiores a zero e valores entre 0,6 e 0,8, respectivamente.

Figura 22 - Histograma dos índices NDVI no município do Recife.



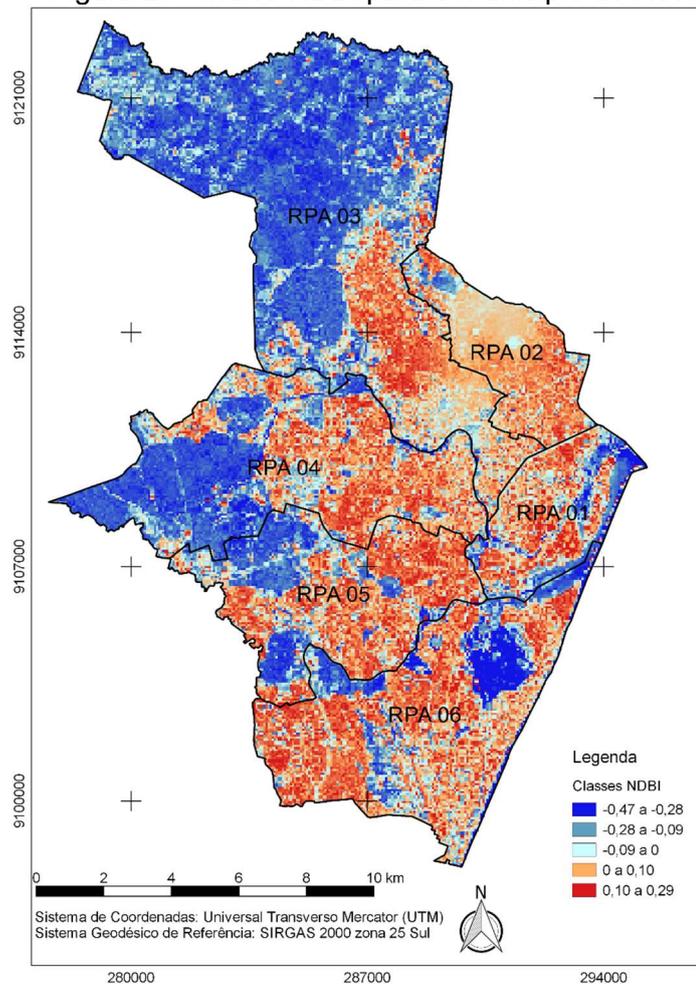
Fonte: O Autor (2023)

Através da análise do NDBI (Figura 23), pode-se notar que as áreas de morro apresentam regiões edificadas e não edificadas. Ainda é possível observar que as áreas de morro com valores do NDBI superiores a zero, que indicam áreas construídas, coincidem com aquelas com baixos valores do índice NDVI (Figura 21), sendo possível associar a baixa presença de vegetação com a presença de áreas construídas. Na planície do Recife, por sua vez, é possível observar a predominância de áreas edificadas, representadas por valores positivos do índice NDBI. Nessa mesma área existem pontos com valores negativos do índice NDBI, que coincidem com as áreas de planície com valores positivos do índice NDVI, podendo assim ser relacionado à alta presença de vegetação com a ausência de áreas construídas. Na análise desse índice não foi utilizada a ferramenta de histograma do *software* QGIS, já que a frequência com que determinados valores negativos e positivos se repetem

não carrega uma informação muito valiosa para a análise do NDBI, uma vez que a caracterização das áreas edificadas e não edificadas se faz apenas com a determinação de valores positivos e negativos.

Tais apontamentos referentes às áreas edificadas e não edificadas do município do Recife coincidem com o estudo apresentados por Santos *et al.* (2021), no município de Arapiraca (AL), no qual os valores negativos do índice correspondem a áreas com solo exposto ou corpos hídricos, e áreas com valores positivos indicam *pixels* relacionados a edificações. Os mesmos índices são apresentados por Leite *et al.* (2019) no município de Teresina (PI). Ambas as pesquisas foram realizadas no Nordeste do Brasil, mesma região do presente trabalho.

Figura 23 - Índice NDBI para o município do Recife.

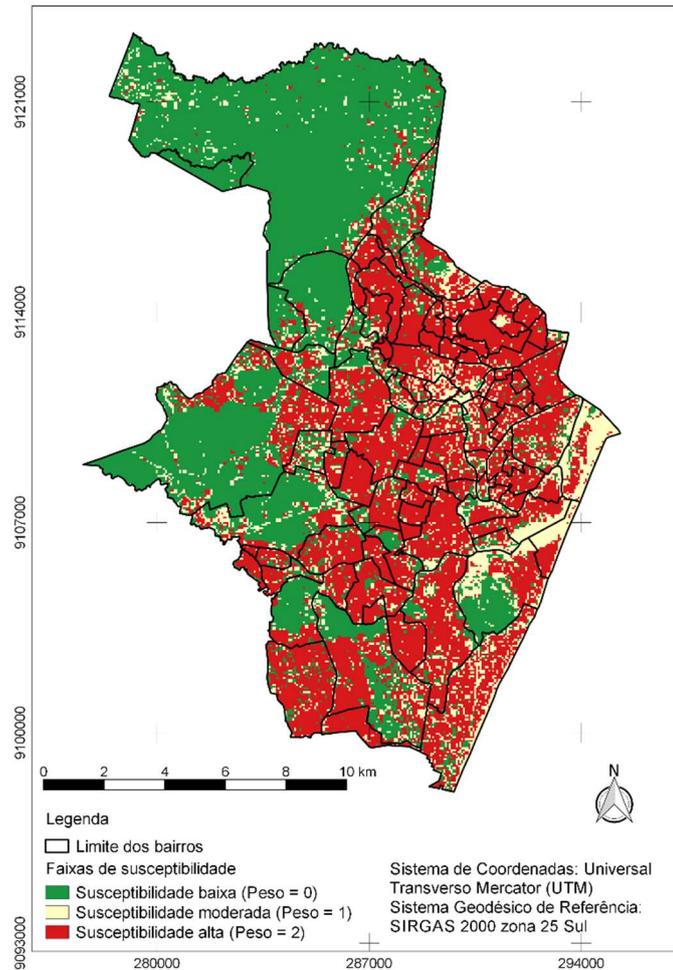


Fonte: O Autor (2023)

De posse dos mapas de NDVI (Figura 21) e NDBI (Figura 23), aplicou-se as condições propostas na Tabela 8 para criar o mapa de uso e ocupação do solo

(Figura 24) classificando as áreas em susceptibilidade baixa, moderada e alta, representadas pelos pesos 0,1 e 2, respectivamente. Tal mapa constitui o Critério 4, utilizado para avaliar a susceptibilidade à subsidência e ao deslizamento de encostas.

Figura 24 - Mapa de distribuição dos pesos no Critério 4, uso e ocupação do solo.



Fonte: O Autor (2023)

5.2 SUSCEPTIBILIDADE EM ÁREAS DE PLANÍCIE

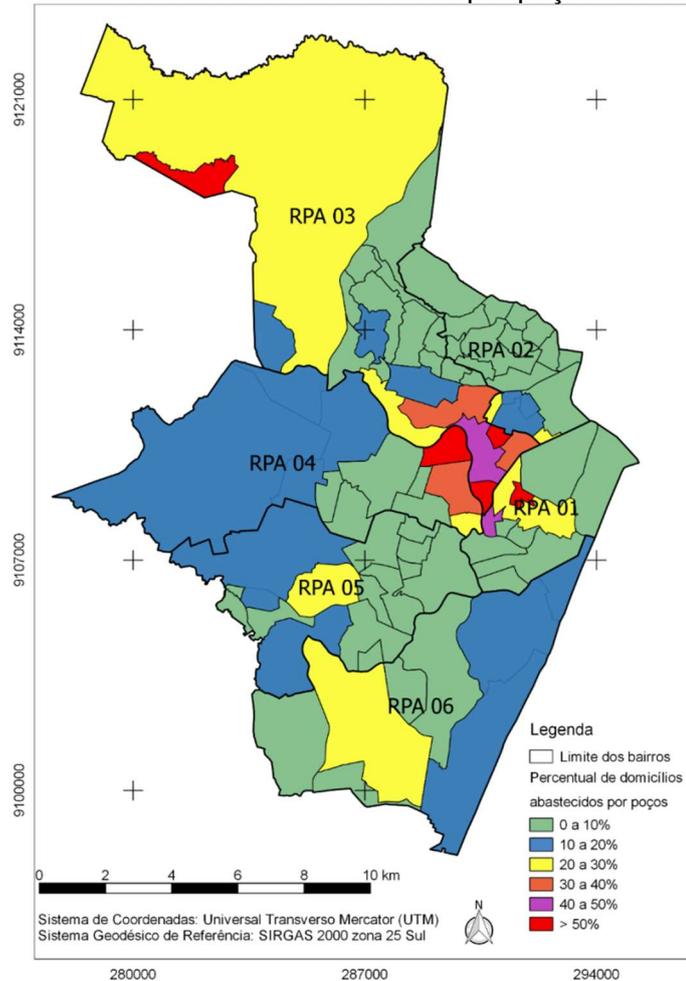
Nos tópicos a seguir são apresentados os critérios indicadores de susceptibilidade a subsidência do solo em áreas de planície, o mapa de áreas susceptíveis à ocorrência de subsidência do solo e o histórico de casos de subsidência do solo na área de estudo.

5.2.1 Critérios indicadores de susceptibilidade a subsidência do solo em áreas de planície

Para verificar as zonas com maior quantidade de exploração de água subterrânea na região de estudo e o comportamento dos aquíferos nessas áreas, foram analisadas três fontes de dados: o BDE (BDE, 2022), o SIAGAS (CPRM, 2022) e o HIDROREC III (Leitão *et al.*, 2015). A análise da forma de abastecimento de água em domicílios permanentes em cada bairro do município do Recife foi realizada com base nos dados do BDE, que contém informações das bases de dados do IBGE, PNAD e COMPESA para o ano de referência de 2010 (BDE, 2022). A lista completa de cada um dos bairros da área de estudo e suas informações pode ser encontrada no Anexo A, nas Tabelas A1 a A6. Na Figura 25 pode-se observar espacialmente o percentual de domicílios abastecidos por poços em cada um dos bairros da área de estudo.

Analisando a Figura 25 e os dados do Anexo A, verifica-se que dos 94 bairros da área de estudo, a maioria, 53 bairros, se enquadra na faixa de 0 a 10% do seu abastecimento feito por poços. Aqueles que estão dentro da faixa de 10 a 20% são 16 bairros, de 20 a 30% são 12, de 30 a 40% são 5, de 40 a 50% são apenas 3 e aqueles que superam 50% são 5.

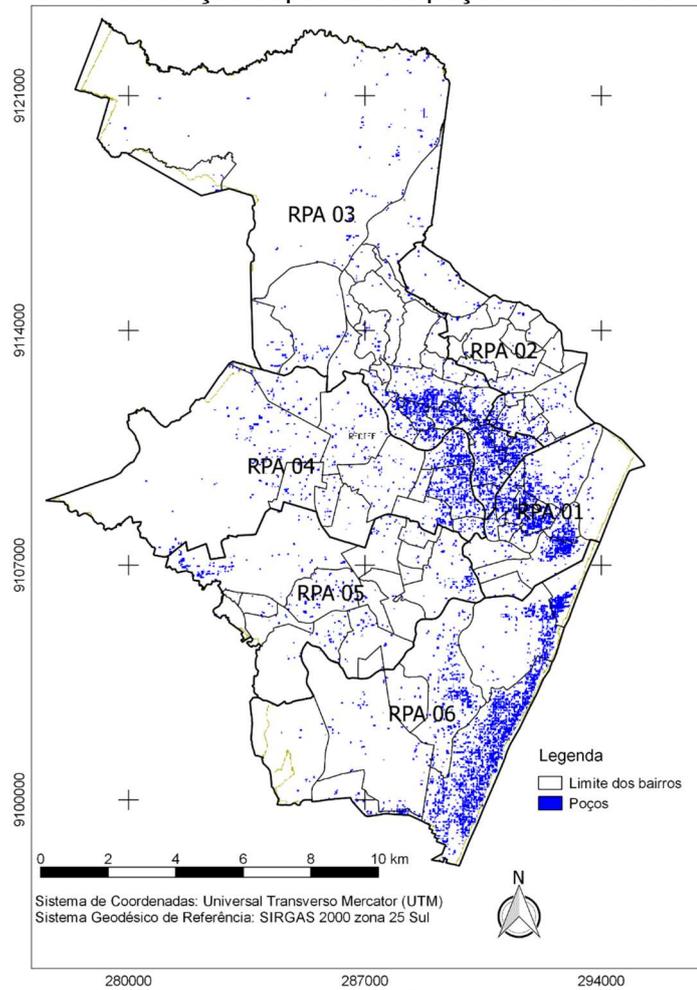
Figura 25 - Percentual de domicílios abastecidos por poços nos bairros do Recife.



Fonte: O Autor (2023)

Outra forma de observar a distribuição dos poços nos bairros do Recife, além dos dados do BDE (2022), é através do mapa de poços do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (CPRM, 2022) (Figura 26), que contém a localização e informações dos poços cadastrados em âmbito nacional. É possível observar a similaridade nas áreas com a maior concentração de poços, apresentados pela Figura 26, e os locais com maior percentual de áreas abastecidas por poços (Figura 25). Nas RPAs 01, 06 e nas áreas da RPA 03 próximas à RPA 01 essa semelhança fica mais evidente. Uma observação que pode ser feita é para a incompatibilidade entre algumas áreas apresentadas com altos valores percentuais de abastecimento realizado por poços e com a presença de poucos poços no mapa do SIAGAS. Um dos principais motivos que levam à falta de similaridade entre esses dois dados é a ausência de cadastro de diversos poços no município, problema recorrente encontrado na área de estudo (LINS *et al.*, 2020).

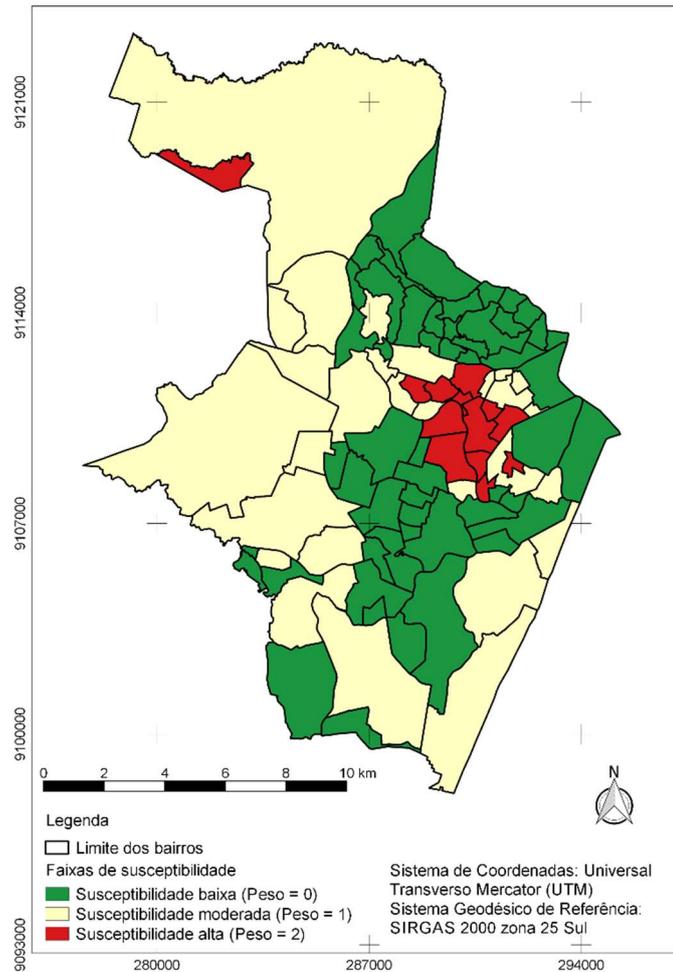
Figura 26 - Distribuição espacial dos poços cadastrados no SIAGAS.



Fonte: Adaptado de CPRM (2022).

Na Figura 27 é possível observar o enquadramento dos dados da Figura 25 nos critérios de peso propostos pela Tabela 7, classificando as áreas em susceptibilidade baixa, moderada e alta, representadas pelos pesos 0,1 e 2, respectivamente.

Figura 27 – Mapa de distribuição dos pesos no Critério 2, percentual de número de poços.



Fonte: O Autor (2023)

Observando a Tabela 6, é possível verificar que as Zonas A, E, G e H são as que possuem a maior quantidade de poços analisados pelo HIDROREC III (LEITÃO *et al.*, 2015). Pode-se correlacionar, através da distribuição espacial dos poços cadastrados no SIAGAS (CPRM, 2022), presente na Figura 26, a alta concentração de poços cadastrados nos bairros da Zona A, E e G com o elevado número de poços averiguados pelo estudo do HIDROREC III (LEITÃO *et al.*, 2015). Além disso, pode-se analisar na Figura 25 que os bairros da Zona G possuem o maior agrupamento de localidades com elevados percentuais de domicílios abastecidos por poços.

Segundo Leitão *et al.* (2015), a partir da análise da Figura 16, a Zona A apresentou diminuição dos níveis piezométricos entre os anos de 2002 e 2009 e recuperação dos níveis entre os anos de 2009 e 2014. A taxa de rebaixamento do nível d'água no primeiro período foi de aproximadamente 1,3 m/ano e a taxa de recuperação no segundo período foi de aproximadamente 0,98 m/ano (Figura B1,

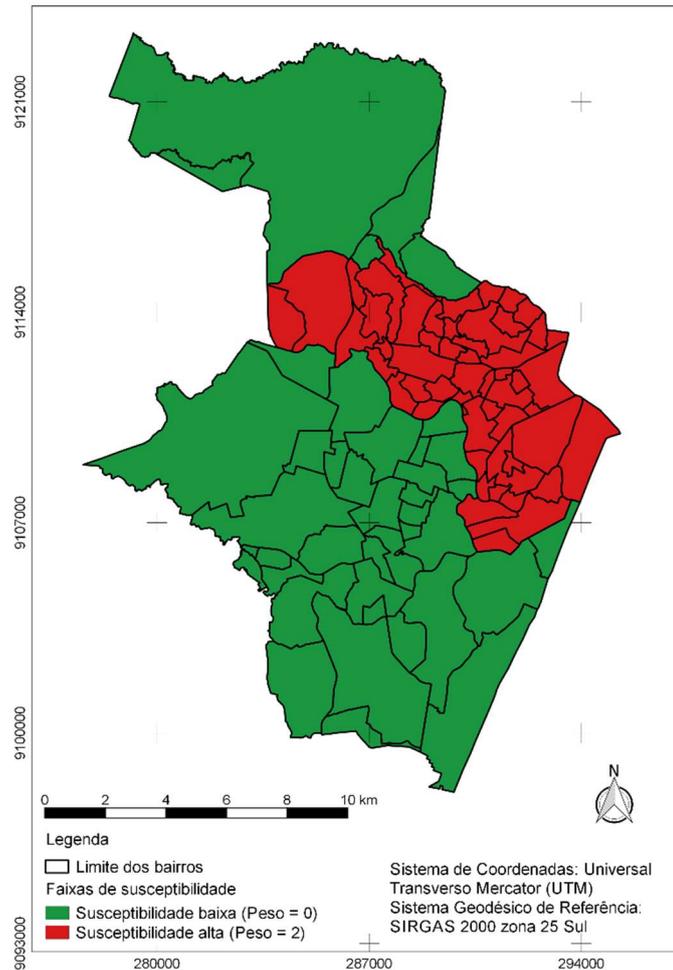
Anexo B). O estudo correlaciona a recuperação dessa zona e das demais que apresentam elevação no nível piezométrico a três motivos: a proibição de perfuração de novos poços em zonas com superexploração, através da Resolução CRH n.º 4, de 20 de novembro de 2003 (PERNAMBUCO, 2003); a redução ocorrida na outorga de poços existentes; e a nova rede de abastecimento aduzida da Barragem de Pirapama.

Para a Zona E (Figura B5, Anexo B) foram analisados o comportamento de 17 poços, que apresentaram tendência de rebaixamento contínuo desde 2003 até 2010, com média de 0,84 m/ano, seguidos por uma ligeira recuperação com estabilização entre os anos de 2011 e 2014. Apesar dessa recuperação, o estudo caracterizou a Zona com tendência ao rebaixamento no nível do aquífero. A Zona G (Figura B7, Anexo B) foi a que apresentou o maior número de poços analisados, o que permitiu uma boa caracterização do comportamento do aquífero Beberibe naquela localidade. Nessa Zona observou-se a tendência de rebaixamento contínuo a uma taxa média de 1,03 m/ano. Na Zona H (Figura B8, Anexo B) observou-se um comportamento dos níveis estáticos semelhantes aos apresentados na Zona G, com uma tendência de rebaixamento contínuo, a uma taxa de 1,35 m/ano. A Zona J (Figura B10, Anexo B) apresentou, de um modo geral, uma tendência a rebaixamentos contínuos, com a presença de breves períodos de recuperação.

Nas Zonas B, C, D, F, I e K a baixa quantidade de poços analisados não permitiu a determinação de um comportamento generalizado dos aquíferos para toda a área de estudo. No Anexo B, Figuras B1 a B10, é possível verificar o comportamento ano a ano dos aquíferos de cada uma das Zonas, em que os eixos verticais indicam as médias das medições dos níveis estáticos e os eixos horizontais os anos das medições. Na análise das Zonas B e F, apesar de apenas dois poços analisados em cada uma, é possível notar divergências entre seus comportamentos, o que pode ser visualizado nas Figuras B2 e B6.

A Figura 28 apresenta o enquadramento do comportamento dos aquíferos nos pesos determinados através da metodologia proposta para o Critério 3.

Figura 28 – Mapa de distribuição dos peso sobre a situação de recuperação dos aquíferos, Critério 3.



Fonte: O Autor (2023)

Observação: para o Critério 3, não existe categoria de Peso =1.

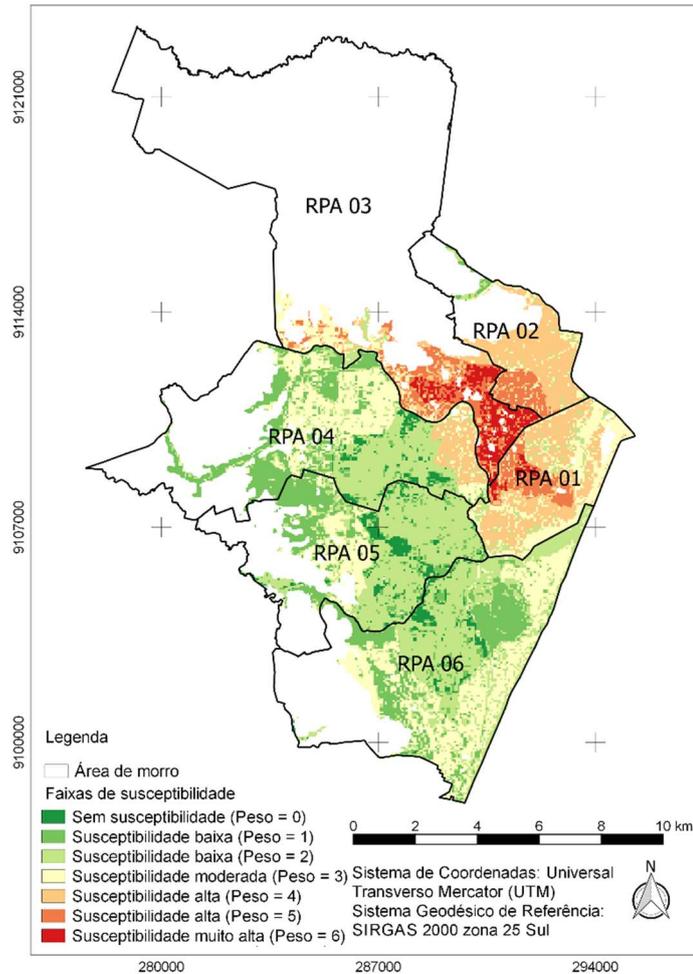
5.2.2 Mapa de áreas susceptíveis à ocorrência de subsidência do solo

Utilizando a Álgebra de Mapas nos três critérios propostos, Figuras 24, 27 e 28, para analisar o grau de susceptibilidade de uma área ao fenômeno de subsidência do solo em áreas planas, pode-se classificar o município do Recife em sete classes de peso, que progridem das áreas com menor grau de susceptibilidade, em tons de verdes, para as áreas com maior grau de susceptibilidade, em tons alaranjados e vermelho.

Os bairros com maior grau de susceptibilidade, que são aqueles com maior parte da sua área coberta por localidades com peso 6, foram: Casa Forte, Parnamirim, Tamarineira, Aflitos, Graças, Espinheiro, Derby, Paissandu e Soledade. Os bairros da Jaqueira, Casa Amarela, Ponto de Parada, Rosarinho, Encruzilhada,

Hipódromo, Torreão, Boa Vista e Santo Antônio apresentaram grande parte da sua área composta por localidades com peso 5, que retrata um elevado grau de susceptibilidade. Na Figura 29 pode-se verificar espacialmente as áreas com maior grau de susceptibilidade.

Figura 29 - Mapa de manchas das áreas RPA susceptíveis à subsidência do solo para a planície do Recife.



Fonte: O Autor (2023)

5.2.3 Histórico de casos de subsidência do solo na área de estudo

Nas pesquisas de jornais locais não foi encontrado nenhum relato de subsidência do solo devido à exploração de águas subterrâneas no município do Recife. No meio acadêmico, Vilarim *et al.* (2020) destacam a baixa quantidade de produções científicas relacionadas com o tema subsidência do solo em âmbito nacional. Para o município do Recife, assim como para o cenário nacional, há

poucas abordagens que quantificam tal fenômeno, se destacando os trabalhos feitos por Santos (2005), Luna (2017) e Souza (2022).

Luna (2017) utilizou nivelamento geométrico de alta precisão para monitorar a subsidência do solo nos bairros de Boa Viagem e Pina, através da análise comparativa das altitudes para os anos de 1958 e 2012. Essa análise determinou rebaixamentos na ordem de 0,68 mm/ano, o que foi relacionado à superexploração causada pela elevada quantidade de poços na área. Segundo Leitão *et al.* (2015), os bairros de Boa Viagem e Pina fazem parte da Zona A do HIDROREC III que, conforme apresentado anteriormente, passou por mudanças que reduzem o total de novos poços instalados. Tais alterações interferiram diretamente na recuperação do aquífero dessa área, fazendo com que o grau de susceptibilidade desses bairros fosse classificado como 3 na Figura 29 e não em índices maiores, caso as mudanças não tivessem ocorrido. Souza (2022) analisou a subsidência do solo no município do Recife causada por exploração de recursos hídricos subterrâneos através da verificação temporal entre os anos de 2011 e 2021, utilizando imagens dos satélites COSMO-SkyMed, Sentinel-1 e PAZ. Os bairros do Arruda e Campo Grande, identificados com grau de susceptibilidade 4 na Figura 29, apresentaram taxas de rebaixamento na ordem de 20 mm/ano, confirmando a presença do fenômeno. Nessa pesquisa também foi identificado que os bairros da zona Oeste apresentavam taxas de rebaixamento em torno de 15 mm/ano, o que foi associado à urbanização e à compactação do solo devido a construções recentes. Na atual pesquisa tais localidades não apresentaram alto grau de susceptibilidade, o que pode ser associado à utilização de dados do indicativo de concentração de poços para o ano de 2010, cenário esse que foi alterado ao longo do tempo com o aumento da urbanização.

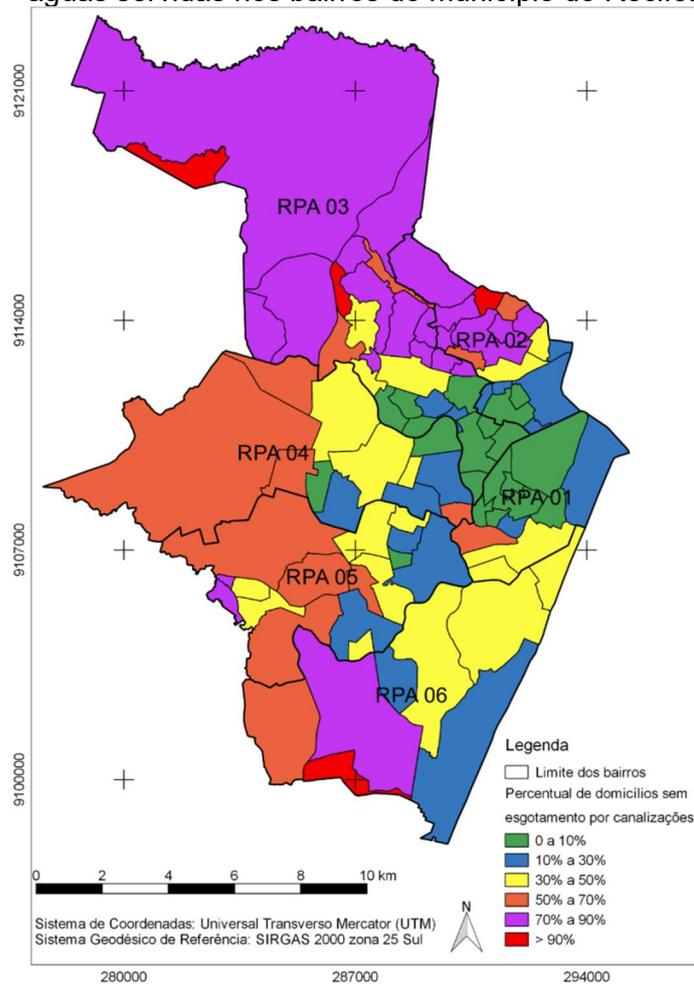
5.3 SUSCEPTIBILIDADE EM ÁREAS DE MORRO

Nos tópicos a seguir são apresentados os critérios indicadores de susceptibilidade ao deslizamento de encostas em áreas de morro, o mapa de áreas susceptíveis à ocorrência de deslizamento de encostas e o histórico de casos de deslizamentos de encostas na área de estudo.

5.3.1 Critérios indicadores de susceptibilidade ao deslizamento de encostas em áreas de morro

Para verificar as áreas com maior quantidade de águas servidas descartadas de maneira inapropriada foram utilizados dados do BDE (2022). A lista completa contendo cada um dos bairros e suas informações consta no Anexo A, nas Tabelas A7 a A12. Na Figura 30 é possível verificar espacialmente o percentual de domicílios que utilizam a fossa séptica ou qualquer outra forma de descarte que não seja nas canalizações de águas servidas e/ou pluviais em cada um dos bairros da área de estudo. Analisando a Figura 20 e os dados das Tabelas A7 a A12 no Anexo A, é possível verificar que dos 94 bairros da área de estudo, os que estão na faixa de 0-10% (19 bairros) e de 10-30% (17 bairros) estão todos localizados em áreas de planície. Os que se enquadram entre 30-50% (19 bairros) também estão em larga maioria em áreas de planície. Para a faixa entre 50-70% (14 bairros) é possível localizar tais bairros em áreas de morro e em áreas de planície. Por fim, aqueles que se enquadram entre 70-90% (21 bairros) e >90% (4 bairros) estão em sua maioria localizados em áreas de morro.

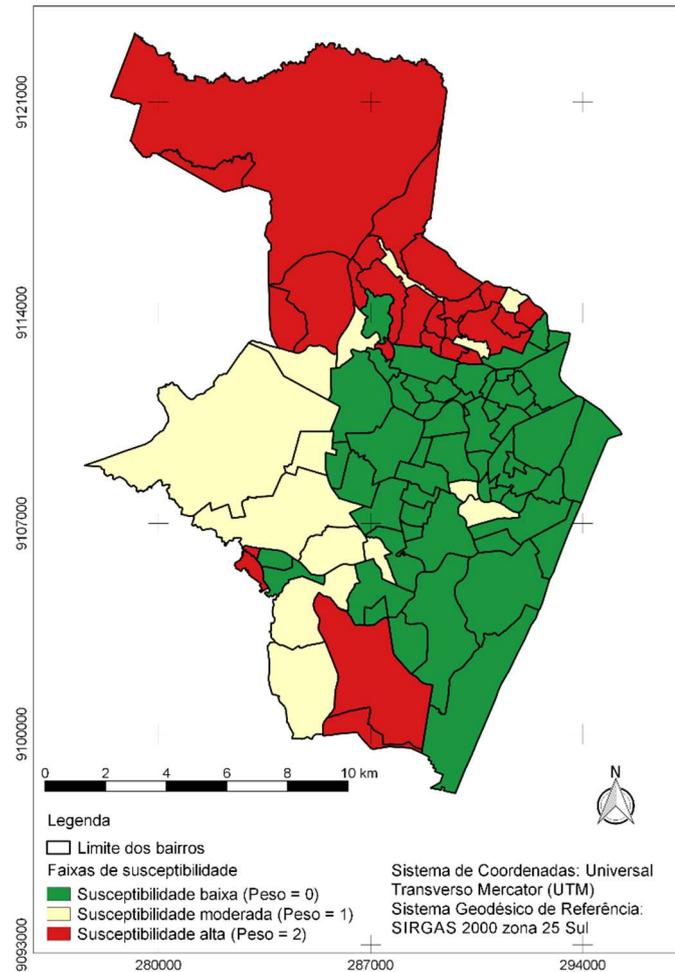
Figura 30 - Percentual de domicílios que não utilizam canalizações para o descarte de águas servidas nos bairros do município do Recife.



Fonte: O Autor (2023)

A Figura 31 apresenta o enquadramento dos dados da Figura 30 nos pesos propostos pela Tabela 9.

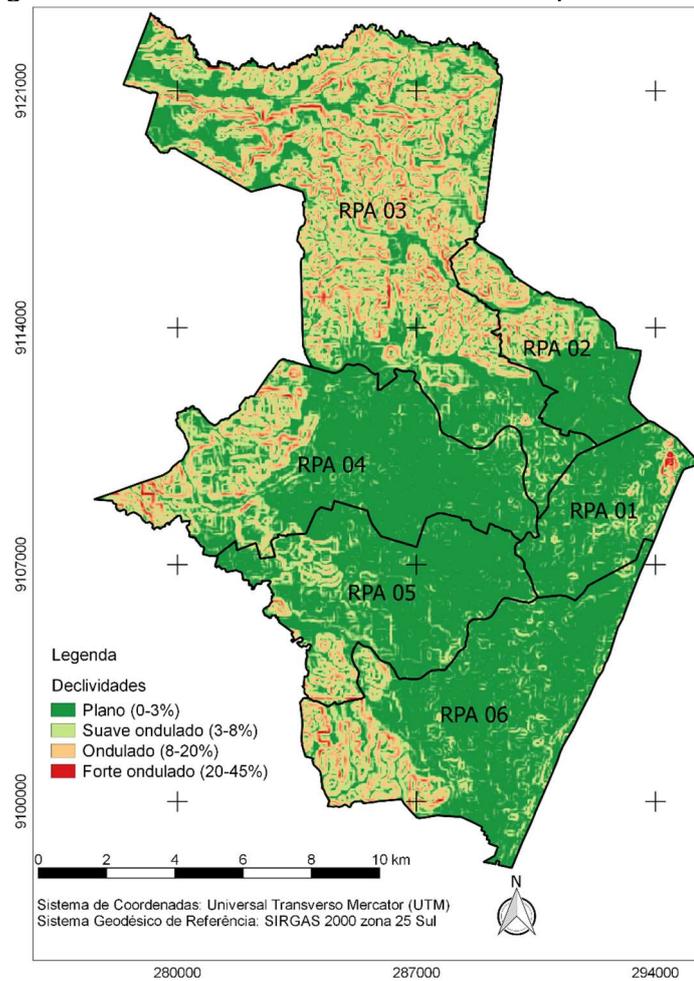
Figura 31- Distribuição dos pesos no Critério 2, percentual de esgotamento sanitário.



Fonte: O Autor (2023)

Para analisar o relevo do município do Recife, o MDE foi processado com o software QGIS, conforme Figura 18. Das seis classificações de relevo propostas pela Embrapa (1979), pode-se encontrar apenas quatro na área de estudo. Na Figura 32 é possível constatar as localidades com presença de morro, que são as áreas com incidência das cores amarelo e vermelho.

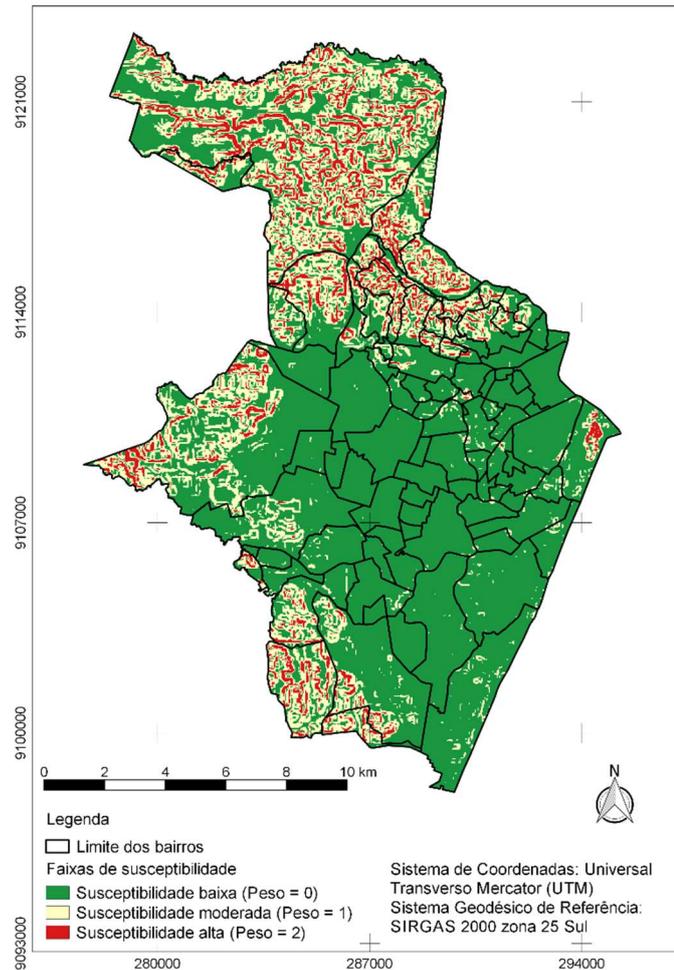
Figura 32 – Declividade do relevo do município do Recife.



Fonte: O Autor (2023)

Assim como foi feito para os demais critérios, enquadraram-se os dados apresentados na Figura 32 nas classes de pesos propostos na Tabela 10, conforme pode ser visualizado na Figura 33.

Figura 33 - Mapa de distribuição dos pesos sobre a situação da declividade do relevo, Critério 3.



Fonte: O Autor (2023)

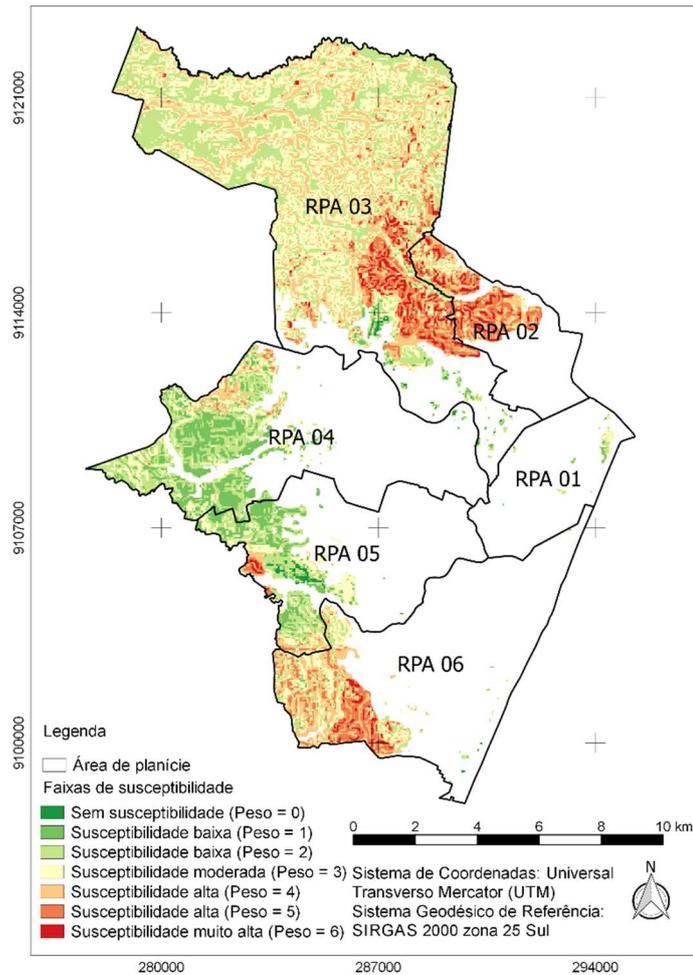
5.3.2 Mapa de áreas susceptíveis à ocorrência de deslizamento de encostas

Utilizando a Álgebra de Mapas nos três critérios propostos (Figuras 24, 31 e 33), para analisar a susceptibilidade das áreas do município do Recife aos fenômenos de deslizamento de encostas, foram determinadas sete classes de pesos, que variam de acordo com os três indicativos analisados. Teve-se como resultado o mapa de manchas apresentado na Figura 34. As áreas em tons mais avermelhados representam localidades com maior grau de susceptibilidade a esse fenômeno, já as áreas em tons de verde condizem com as regiões de baixa susceptibilidade.

Os bairros verificados com maior grau de susceptibilidade, peso 6 em maior parte da sua cobertura, foram: Brejo da Guabiraba, Córrego do Jenipapo, Nova Descoberta, Vasco da Gama, Alto José Bonifácio, Morro da Conceição, Alto José do

Pinho, Alto Santa Terezinha, Linha do Tiro, Beberibe e Jordão. Já os bairros do Coqueiral, Totó, Ibura, Passarinho, Dois Unidos, Alto do Mandu, Água Fria, Fundão e Cajueiro apresentaram partes relevantes da sua área composta por localidades com peso 5, o que retrata um elevado grau de susceptibilidade.

Figura 34 - Mapa de manchas das áreas susceptíveis ao deslizamento de encostas.



Fonte: O Autor (2023)

5.3.3 Histórico de casos de deslizamento de encostas na área de estudo

Diante do levantamento realizado para o intervalo de anos entre 2017 e 2022, todos os bairros avaliados como de maior grau de susceptibilidade, com peso 6 no mapa de mancha, possuíram registros (matérias) em jornais locais, com exceção do bairro do Morro da Conceição. Como pode ser identificado na Tabela 11, a vasta maioria dos casos, 12 dos 17, aconteceram entre os meses de abril e julho, que são os meses com maior média de precipitação entre os anos de 2000 e 2021 para a área de estudo, conforme apresentado na Figura 9. O motivo para tal pode ser

relacionado com o impacto que as chuvas têm em desencadear os eventos de deslizamento de encostas, conforme explicado anteriormente.

Tabela 11 - Casos de deslizamentos de encostas relatados em matérias jornalísticas entre 2017 e 2022.

Bairro	Data	Fonte
Brejo da Guabiraba	10/08/21	Folha de Pernambuco (2021)
Córrego do Jenipapo	04/06/2022	G1 PE (2022b)
	28/01/2019	Diário de Pernambuco (2019a)
	23/04/2018	Jornal do Commercio (2018)
Nova Descoberta	04/06/2022	G1 PE (2022b)
	10/04/2021	G1 PE (2021)
	27/04/2020	CBN Recife (2020)
	27/05/2019	Rodrigues (2019)
Vasco da Gama	02/08/2022	Moraes (2022)
Alto José Bonifácio	08/04/2018	Medeiros (2018)
Alto José do Pinho	15/06/2017	Diário de Pernambuco (2020)
Alto Santa Terezinha	07/06/2022	Moraes (2022)
Linha do Tiro	07/06/2022	Oliveira (2022)
	21/09/2019	Diário de Pernambuco (2019b)
	01/06/2017	Jornal do Commercio (2017)
Beberibe	25/05/2022	G1 PE (2022c)
Jordão	06/03/2018	Rádio Jornal (2018)

Fonte: O Autor (2023)

Em relação às pesquisas científicas, as localidades apontadas como mais susceptíveis ao fenômeno de deslizamento de encostas por essa pesquisa coincidem com as apresentadas por Pfaltzgraff (2007), que elaborou o mapa de susceptibilidade a deslizamentos da RMR utilizando técnicas de SR e SIG, através da análise de critérios como declividade, relevo, uso do solo, sistema de drenagem e vegetação.

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa evidenciou como o uso de ferramentas de Sensoriamento Remoto (SR) e Sistema de Informações Geográficas (SIG) podem auxiliar na elaboração de mapas de mancha indicando as áreas mais vulneráveis aos fenômenos de subsidência do solo e deslizamento de encostas. A área de estudo adotada foi o município do Recife, que nas suas regiões de planície apresenta bairros com indicativos de susceptibilidade ao fenômeno de subsidência do solo, e nas áreas de morro apresenta históricos anuais de ocorrência de deslizamento de morros.

A partir do levantamento bibliográfico, foram identificadas e definidas as características inerentes aos processos de subsidência do solo para as áreas de planície e deslizamento de encostas para as áreas de morro. Diante da disponibilidade de documentos e mapas, para a área de estudo, as características consideradas nesse trabalho foram: (I) uso e ocupação do solo, com os índices Índice de Diferença Normalizada de Áreas Construídas (NDBI) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), a forma de abastecimento de água das áreas, com dados do Sistema Base de Dados do Estado (BDE) (BDE, 2022) e dos Estudos Sobre a Disponibilidade e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região Metropolitana do Recife (HIDROREC III) (LEITÃO *et al.*, 2015); e (II) uso e ocupação do solo, com o NDBI e NDVI, a declividade do terreno, com dados do projeto Topodata e a maneira de descarte de resíduos domésticos, com dados do BDE (2022).

Utilizando as ferramentas de SR e SIG, com o auxílio do *software* QGIS, foi utilizada a técnica de Álgebra de Mapas para elaborar os mapas de mancha para cada um dos fenômenos.

De acordo com o mapa de mancha de subsidência do solo, pode-se analisar que os bairros de Casa Forte, Parnamirim, Tamarineira, Aflitos, Graças, Espinheiro, Derby, Paissandu e Soledade foram os que apresentaram maior concentração de indicativos de susceptibilidade para o fenômeno, apresentando peso 6 na classificação do mapa. Para validar tal mapa optou-se por comparar os resultados com produções científicas existentes e históricos de matérias jornalísticas. Os bairros de Boa Viagem e Pina, que possuem histórico do fenômeno entre os anos de 1958 e 2012, foram classificados como peso 3 e o motivo para não constarem na

lista de bairros com maior peso de susceptibilidade está relacionado com medidas adotadas pelo poder público que limitam o total de poços. Os bairros do Arruda e Campo Grande, identificados com grau de susceptibilidade 4 no mapa de mancha, possuem histórico de subsidência para o ano de 2022. Uma das limitações encontradas para validar tal mapa foi a baixa quantidade de relatos que mensurem o fenômeno para a área de estudo.

No mapa de mancha de deslizamento de encostas pode-se observar que os bairros verificados com maior grau de susceptibilidade, peso 6 em maior parte da sua cobertura, foram: Brejo da Guabiraba, Córrego do Jenipapo, Nova Descoberta, Vasco da Gama, Alto José Bonifácio, Morro da Conceição, Alto José do Pinho, Alto Santa Terezinha, Linha do Tiro, Beberibe e Jordão. A validação desse mapa também foi feita através de comparação com produções científicas e históricos jornalísticos. Todos os bairros identificados com peso 6 no mapa de mancha possuem histórico em jornais locais de deslizamento entre o período de 2022 e 2017. Se tratando das publicações científicas, foi possível identificar grande similaridade quando comparados com o mapa proposto por Pfaltzgraff (2007), que é a produção científica mais recente a analisar espacialmente o fenômeno na área de estudo.

Diante dos resultados apresentados pode-se concluir que a utilização de imagens de satélite e bancos de dados de livre acesso, associados com técnicas de SR e SIG compõem uma ferramenta que possibilita a determinação das áreas susceptíveis aos fenômenos de subsidência do solo e deslizamento de encostas, e servem como uma solução de baixo custo no processamento de dados capaz de determinar de maneira detalhada e rápida a presença de tais fenômenos no meio urbano.

7 TRABALHOS FUTUROS

Para a realização de estudos em continuidade com essa linha de pesquisa, faz-se as seguintes sugestões:

- Ponderar informações de concentração de poços e localidades sem sistema adequado de descarte de águas servidas com a densidade de domicílio em cada um dos bairros.
- Utilizar base de dados que considere os contornos dos aquíferos nas análises dos níveis potenciométricos, uma vez que a fonte de dados desse parâmetro na atual pesquisa considera os limites físicos dos bairros como contornos.
- Desenvolver metodologias para implementar fatores multiplicativos nos critérios analisados.
- Adicionar mais critérios de análise para cada um dos fenômenos.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, A. K. B.. **Urbanismo sensível às águas: O paradigma da sustentabilidade na concepção de projetos para recuperação de rios urbanos.** Tese - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 295 p., 2016.
- ALHEIROS, M. M.. Plano Municipal de Redução de Risco. In: CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T.. **Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais.** Brasília: Ministério das Cidades, Cities Alliance, p. 58-75, 2006.
- ALJAMMAZ, A.; SULTAN, M.; IZADI, M.; ABOTALIB, A. Z.; ELHEBIRY, M. S.; EMIL, M. K.; ABDELMOHSEN, K.; SALEH, M.; BECKER, R.. Land subsidence induced by rapid urbanization in arid environments: A remote sensing-based investigation. **Remote Sensing**, 13 (6): 1109, 2021.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G.. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22 (6): 711-728, 2013.
- AMIN, A.; BANKHER, K.. Causes of land subsidence in the Kingdom of Saudi Arabia. **Natural Hazards**, 16 (1): 57-63, 1997.
- AO, Z.; SUN, Y.; XIN, Q.. Constructing 10-m NDVI time series from Landsat 8 and Sentinel 2 images using convolutional neural networks. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 18 (8): 1461-1465, 2020.
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Monitoramento Pluviométrico.** Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>. Acesso em 05/05/2022.
- AUGUSTO FILHO, O.. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. I Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, Rio de Janeiro – RJ, **Anais..**, p. 721-733, 1992.
- BAGHERI-GAVKOSH, M.; HOSSEINI, S. M.; ATAIE-ASHTIANI, B.; SOHANI, Y.; EBRAHIMIAN, H.; MOROVAT, F.; ASHRAFI, S.. Land subsidence: A global challenge. **Science of The Total Environment**, 778: 146193, 2021.
- BANDEIRA, A. P. N.. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de riscos de escorregamentos de encostas na região metropolitana do Recife.** Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 369 p., 2010.
- BATISTA, R. P.. **Estudo Hidrogeológico da Planície do Recife.** Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 91 p., 1984.

BDE – Base de Dados do Estado de Pernambuco. **O que é a BDE?**. Disponível em: <http://www.bde.pe.gov.br/EstruturaGeral/Institucional.aspx?CodInformacao=1>. Acesso em: 15/04/2022.

BITAR, O. Y.. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações** : 1:25.000 (livro eletrônico): nota técnica explicativa. São Paulo: IPT. Brasília: CPRM, 2014. Disponível em: http://dspace.cprm.gov.br/bitstream/doc/16588/1/NT-Carta_Suscetibilidade.pdf. Acesso em: 16/06/2022.

BITELLI, G.; BONSIGNORE, F.; UNGUENDOLI, M.. Levelling and GPS networks to monitor ground subsidence in the Southern Po Valley. **Journal of Geodynamics**, 30 (3): 355-369, 2000.

BOORI, M. S.; CHOUDHARY, K.; KUPRIYANOV, A.. Land cover map of Southeast Asia at 30 m spatial resolution with changes since 2010. **Optical Memory and Neural Networks**, 29 (3): 257-262, 2020.

BORBA, A. L. S.; COSTA FILHO, W. D.; MASCARENHAS, J. C.. Configuração geométrica dos aquíferos da região metropolitana do Recife. XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, São Luís – MA, **Anais...**, 14 p., 2010.

BRASIL. **Lei Federal nº 6.799** de dezembro de 1979. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. Presidência da República, 1979.

CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M.; DEMÉTRIO, J. G. A.; PONTES FILHO, I. D. S.. Considerações sobre a possibilidade de ocorrência de subsidência devido a superexploração de água subterrânea. XII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, Olinda – PE, **Anais...**, 6 p., 2001.

CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M.; PONTES FILHO, I. D. S.. Bombeamento intensivo de água subterrânea e riscos de subsidência do solo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 11 (3): 147-157, 2006.

CARMINATI, E.; MARTINELLI, G.. Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation. **Engineering Geology**, 66 (3-4): 241-255, 2002.

CARVALHO, J. C.; LIMA, M. C.; MORTARI, D.. Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia (GO), Goiânia – GO, **Anais...**, v. 3, 2001.

CBN RECIFE. Mulher fica ferida na cabeça, muros caem e barreira desliza após chuvas no Grande Recife. **CBN Recife**, 27 abril 2020. Disponível em: <https://www.cbnrecife.com/artigo/mulher-fica-ferida-na-cabeca-muros-caem-e-barreira-desliza-apos-chuvas-no-grande-recife>. Acesso em: 20/11/2022.

CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. (2017) **Cemaden**. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/missao-do-cemaden/>. Acesso em: 10/02/2023.

CHEN, J.; CHEN, S.; YANG, C.; HE, L.; HOU, M.; SHI, T.. A comparative study of impervious surface extraction using Sentinel-2 imagery. **European Journal of Remote Sensing**, 53 (1): 274-292, 2020.

CHOUHAN, R.; RAO, N.. Vegetation detection in multispectral remote sensing images: Protective role-analysis of vegetation in 2004 Indian Ocean tsunamis. **Geo-Information for disaster management**, Turkey. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/2011/GI4DM/PDF/OP37.pdf>. Acesso em: 05/05/2022.

CONWAY, B. D.. Land subsidence and earth fissures in south-central and southern Arizona, USA. **Hydrogeology journal**, 24 (3): 649-655, 2016.

COOKE, R. U.; DOORNKAMP, J. C.. **Geomorphology in environmental management: a new introduction**. 2th ed. New York: Claredon Press, 1990.

CORREIA, E. R. C.. **Caracterização da vulnerabilidade natural do aquífero Boa Viagem no município do Recife** - Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 180 p., 2006.

COSTA, W. D; COSTA FILHO, W. D.. A gestão dos aquíferos costeiros de Pernambuco. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá – MT, **Anais..**, 13 p., 2004.

COSTA, W. D.; MANOEL FILHO, J.; SANTOS, A. C.; COSTA FILHO, W. D.; MONTEIRO, A. B.; SOUZA, F. J. A.. Zoneamento de exploração das águas subterrâneas na cidade do Recife, PE. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Paulo – SP, **Anais..**, 11 p., 1998.

COUTINHO, R. Q.; BANDEIRA, A. P. N.. Processos de instabilização de encostas e avaliação do grau de risco: estudo de caso nas cidades de Recife e Camaragibe. In: LACERDA, W. A.; PALMEIRA, E. M.; NETTO, A. L. C.; EHRLICH, M.. **Desastres naturais: suscetibilidade e risco, mitigação e prevenção gestão e ações emergenciais**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 211 p., 2012.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Estudo sobre a instabilidade do terreno nos bairros do Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL)**. Brasília: Ministério de Minas e Energia. Relatório Síntese dos Resultados, v(1), 2019.

DELIRY, S. I.; AVDAN, Z. Y.; AVDAN, U.. Extracting urban impervious surfaces from Sentinel-2 and Landsat-8 satellite data for urban planning and environmental management. **Environmental Science and Pollution Research**, 28 (6): 6572-6586, 2021.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. Chuvas: Recife registra total de 70 mm em três horas. **Diário de Pernambuco**, 28 jan. 2019a. Disponível em:

<https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/vidaurbana/2019/01/recife-registra-70-mm-em-tres-horas.html>. Acesso em: 20/11/2022.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. Defesa Civil do Recife começa 25 obras em áreas de morro da Zona Norte **Diário de Pernambuco**, 04 mar. 2020. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/vidaurbana/2020/03/defesa-civil-do-recife-comeca-25-obras-em-areas-do-morro-da-zona-norte.html>. Acesso em: 20/11/2022.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. Deslizamento de terra causa acidente no Recife. **Diário de Pernambuco**, 21 set. 2019b. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/vidaurbana/2019/09/deslizamento-de-terra-causa-acidente-no-recife.html>. Acesso em: 20/11/2022.

DIAS, F. P.. **Análise da Susceptibilidade a Deslizamentos no Bairro Grande, Florianópolis, SC**. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 111 p., 2000.

DUAN, U.; TAN, M.; GUO, Y.; WANG, X.; XIN, L.. Understanding the spatial distribution of urban forests in China using Sentinel-2 images with Google Earth Engine. **Forests**, 10 (9): 729, 2019.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **SRTM - SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/srtm>. Acesso em: 26/04/2022.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/212100/1/SNLCS-Miscelania-1-1979.pdf>. Acesso em: 06/05/2022.

ESA – The European Space Agency. **RADIOMETRIC RESOLUTIONS**. Disponível em: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric>. Acesso em: 26/04/2022.

FIGUEIREDO, D.. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. 2005. Disponível em: https://www.clickgeo.com.br/wp-content/uploads/2013/04/conceitos_sm.pdf. Acesso em: 06/06/2022.

FOLHA DE PERNAMBUCO. Deslizamento de barreira atinge seis casas no Brejo da Guabiraba, Zona Norte do Recife. **Folha de Pernambuco**, 10 ago. 2021. Disponível em: <https://www.folhape.com.br/noticias/deslizamento-de-barreira-atinge-seis-casas-no-brejo-da-guabiraba-zona/193225/>. Acesso em: 20/11/2022.

G1 PE. Chuva causa alagamentos e transtornos no Grande Recife e na Zona da Mata. **G1**, 07 jun. 2022a. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2022/06/07/chuva-causa-alagamentos-e-transtornos-no-grande-recife-e-na-zona-da-mata.ghtml>. Acesso em: 08/06/2022.

G1 PE. Chuvas provocam alagamentos, deslizamento de barreira e queda de pontilhão no Grande Recife; veja previsão do tempo. **G1**, 04 jun. 2022b. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2022/06/04/chuvas-provocam-alagamentos-deslizamento-de-barreira-e-queda-de-pontilhao-no-grande-recife.ghtml>. Acesso em: 20/11/2022.

G1 PE. Fortes chuvas no final de semana causam alagamentos e transtornos no Grande Recife. **G1**, 11 abril 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2021/04/11/fortes-chuvas-no-final-de-semana-causam-alagamentos-e-transtornos-no-grande-recife.ghtml>. Acesso em: 20/11/2022.

G1 PE. Fortes chuvas no Grande Recife: moradores ficam ilhados e ruas são tomadas pela água. **G1**, 25 maio 2022c. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2022/05/25/fortes-chuvas-grande-recife.ghtml>. Acesso em: 20/11/2022.

GIAO, P. H.; PHIENT-WEJ, N.; HONJO, Y.. FEM quasi-3D modelling of responses to artificial recharge in the Bangkok multiaquifer system. **Environmental modelling & software**, 14 (2-3): 141-151, 1999.

GOMES, J. H. O. S.; BARRETO, G. A. S. L.; NÓBREGA, N. C. F. Geomantas Impermeabilizantes na Cidade do Recife: Implementação, Aplicações e Desafios. IX Congresso Latino-Americano De Ciência Política, Montevideu, **Anais..**, 22 p, 2017

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M.. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2 ed. Editora Blucher São Paulo: Edgard Blücher, 216 p., 1984.

HEATHCOTE, R. L.. Extreme Events Analysis. **Climate impact assessment**, 369-401, 1985.

HIGHLAND, L M.; BOBROWSKY, P. O Manual de Deslizamento – Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos. **Reston, Virginia, US Geological Survey Circular**, 1325, 177 p., 2008.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **MDE - MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/10856-mde-modelo-digital-de-elevacao.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 26/04/2022a.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **POPULAÇÃO**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panoram>. Acesso em: 28/04/2022b.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **DADOS HISTÓRICOS ANUAIS**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em 12/08/2022.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **BANCO DE DADOS GEOMORFOMÉTRICOS DO BRASIL**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>. Acesso em: 26/04/2022.

JORNAL DO COMMERCIO. Parte de muro de arrimo cede e assusta moradores no Córrego do Jenipapo. **Jornal do Commercio**, 23 de abril 2018. Disponível em: <https://jc.ne10.uol.com.br/canal/cidades/geral/noticia/2018/04/23/parte-de-muro-de-arrimo-cede-e-assusta-moradores-no-corrego-do-jenipapo-336460.php>. Acesso em: 20/11/2022.

JORNAL DO COMMERCIO. VÍTIMAS de deslizamento de barreira são enterradas no Recife. Vítimas de deslizamento de barreira são enterradas no Recife. **Jornal do Commercio**, 01 jun. 2017. Disponível em: <https://jc.ne10.uol.com.br/canal/cidades/geral/noticia/2017/06/01/vitimas-de-deslizamento-de-barreira-sao-enterradas-no-recife-287338.php>. Acesso em: 20/11/2022.

JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.. Land use classification from multitemporal Landsat imagery using the Yearly Land Cover Dynamics (YLCD) method. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 13 (5): 711-720, 2011.

KUC, G.; CHORMAŃSKI, J. Sentinel-2 imagery for mapping and monitoring imperviousness in urban areas. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 42: 43-47, 2019.

LARSON, K. J.; BAŞAĞAOĞLU, H.; MARINO, M. A.. Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model. **Journal of hydrology**, 242 (1-2): 79-102, 2001.

LEITÃO. T. E.; OLIVEIRA M. M.; NOVO M. E.; MARTINS T. N.; HENRIQUES M. J.; CHARNECA N. P.; FERREIRA J. P. L.; COSTA, W. D.; SANTOS M. A. V.; CABRAL, J. J.; FREITAS A.. **Estudo Sobre a Disponibilidade e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região Metropolitana do Recife. Relatório das Atividades 2 e 3.** Agência Pernambucana de Águas e Clima, Pernambuco, Brasil, 2015.

LEITE, A. C. S.; OLIVEIRA, L. M. M.; SILVA, B. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; BEZERRA, U. A.. Mudança espaço temporal do uso e cobertura do solo e estimativa da temperatura da Superfície no município de Teresina-PiauÍ, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, 42 (3): 42-51, 2019.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J.. **Remote sensing and image interpretation**. 7th ed. Wiley, 736 p., 2015.

LINS, E. A. M.; SILVA, A. K. A.; BARROS, A. C. B.; MOTA, A. M. V.. Impactos ambientais causados por perfurações de poços clandestinos – estudo de caso. XI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Vitória – ES, **Anais..**, 7 p., 2020.

LOTUFO, J. B. S.; MACHADO, N. G.; TAQUES, L. M.; SOUZA, D. M.; MÜTZENBERG, N. L. N.; BIUDES, M. S.. Índices espectrais e temperatura de superfície em áreas queimadas no Parque Estadual do Araguaia em Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 13 (2): 648-663, 2020.

LUNA, R. M. R. **Investigação da ocorrência de subsidência do solo em região de exploração de aquíferos na planície costeira da cidade do Recife em Pernambuco**. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 237 p., 2017.

MEDEIROS, D. Chuva causa deslizamento de barreiras e fecha Botânico. **Folha de Pernambuco**, 08 abril 2018. Disponível em: <https://www.folhape.com.br/noticias/2190-chuva-provocou-deslizamentos-barreiras-zona-norte-recife/64576/>. Acesso em: 20/11/2022.

MELO, C. R. **Utilização de informações espaciais de alta resolução para análise de suscetibilidade de deslizamento sob situação de precipitações intensas**. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 160 p., 2021.

MINGORANCE, F. Manifestaciones de subsidencia superficial en el Pastal, Norte de Mendoza, Argentina. **Revista de la Facultad de Ingeniería**, 41: 5-16, 2000.

MONTEIRO, A. B.. **Modelagem do fluxo subterrâneo nos aquíferos da planície e seus encaixes**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 180 p., 2000.

MORAES, K. Chuvas no Recife: barreira desliza e atinge casa na Zona Norte da cidade. **Jornal do Commercio**, 02 ago. 2022. Disponível em: <https://jc.ne10.uol.com.br/pernambuco/2022/08/15055761-chuvas-no-recife-barreira-desliza-e-atinge-casa-na-zona-norte-do-recife.html>. Acesso em: 20/11/2022.

NAÇÕES UNIDAS. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**, 126 p., 2019.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. Editora Blucher, 388 p., 2010.

OLIVEIRA, L. 'Não há necessidade de alguém morar pendurado em barreira', diz avô de adolescente morto em deslizamento no Recife. **G1**, 07 jun. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2022/06/07/nao-ha-necessidade-de-alguem-morar-pendurado-em-barreira-diz-avo-de-adolescente-vitima-de-deslizamento-no-recife.ghtml>. Acesso em: 20/11/2022.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; MOURA, A. E. S. S.; VILLAR, A. C.; GUSMÃO, L.; SALGUEIRO, J. H. P. B.. Índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Rio Tapacurá – PE. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves – RS, **Anais..**, 8 p., 2013.

PAIXÃO, M. M. O. M.; CARVALHO, J. L. G.; PRATES, P. GALVÃO, P.. A Condição de Exploração de Água Subterrânea em Minas Gerais à Luz dos Critérios da Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH 05/2017. **Águas Subterrâneas**, 33(4): 378-391, 2019.

PAULETTO, H.; HOFF, R.; HEMAN, L. C.; NHOATTO, M. P.; ALBERTI, R..
Investigação do ciclo de pomares de macieira pelo NDVI de imagens sentinel-2 na região dos Campos de Cima da Serra, Rio Grande do Sul, Brasil. XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos – SP, **Anais..**, 17: 2188-2191, 2019.

PERNAMBUCO. **Resolução CRH n.º 4** de 20 de novembro de 2003. Dispõe sobre a conservação e proteção das águas subterrâneas no Estado; de acordo com a proposta aprovada em Plenário na II Reunião Extraordinária do CRH, realizada em 20 de novembro de 2003. Recife – PE. Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2003.

PFALTZGRAFF, P. A. S.. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife**. Tese – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 153 p., 2007.

PHIEN-WEJ, N.; GIAO, P. H.; NUTALAYA, P.. Field experiment of artificial recharge through a well with reference to land subsidence control. **Engineering Geology**, 50 (1-2): 187-201, 1998.

PINHEIRO, C.; LARANJEIRA, M.. Análise do ambiente térmico e das condições de ventilação para a definição das funções climáticas na área urbana de Guimarães. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, 1 (4): 249-272, 2013.

PINTO, R. C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. C.. Considerações a Respeito dos Condicionantes Utilizados em Pesquisas Envolvendo Movimentos de Massa. **Geoinfó: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PGE/UEM)**, 5 (1): 102-124, 2013.

PIRAGNOLO, M.; LUSIANI, G.; PIROTTI, F.. Comparison of vegetation indices from RPAs and Sentinel-2 imagery for detecting permanent pastures. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, 42 (3): 1381-1387, 2018.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M.. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 160 p., 2015.

PRANJAL, P.; KADIYAN, N.; CHATTERJEE, R. S.; KUMAR, D.; SATI, M. S.. Interpreting land subsidence impacts due to groundwater depletion using remote sensing-based GRACE gravity anomaly and DInSAR technique: a study on north-western parts of India. **Environmental Earth Sciences**, 80 (17): 1-12, 2021.

RÁDIO JORNAL. MURO de arrimo cai após deslizamento de barreira em Jardim Jordão. **Rádio Jornal**, 06 mar. 2018. Disponível em: <https://radiojornal.ne10.uol.com.br/noticia/2018/03/06/muro-de-arrimo-cai-apos-deslizamento-de-barreira-em-jardim-jordao-57598/index.html>. Acesso em: 20/11/2022.

RECIFE. **Lei Municipal nº 16.293** de 03 de fevereiro de 1997. Dispõe sobre as Regiões Político-Administrativas do município do Recife e dá outras providências. Recife – PE. Prefeitura Municipal do Recife, 1997.

RIBEIRO, R. B.; FILGUEIRAS, R.; RAMOS, M. C. A.; ALMEIDA, L. T.; GENEROSO, T. N.; MONTEIRO, L. I. B.. Variabilidade espaço-temporal da condição da vegetação na agricultura irrigada por meio de imagens SENTINEL-2a. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, 11: 1884-1893, 2017.

RODRIGUES, J.. Deslizamento de terra atinge casas em Nova Descoberta. **Folha de Pernambuco**, 27 maio 2019. Disponível em: <https://www.folhape.com.br/noticias/deslizamento-de-terra-atinge-casas-em-nova-descoberta/106112/>. Acesso em: 20/11/2022.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. **NASA special publication**, 1: 309-317, 1973.

SAADI, T. D. T.; WIJAYANTO, A. W.. Machine Learning Applied to Sentinel-2 and Landsat-8 Multispectral and Medium-Resolution Satellite Imagery for the Detection of Rice Production Areas in Nganjuk, East Java, Indonesia. **International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences**, 18 (1): 19-32, 2021.

SANTOS, L. S.; MOURA, R. F. A.; FARIAS, A. A. M.; OLIVEIRA, L. M. M.; LIMA, J. F.. **Utilização de imagens orbitais no estudo da expansão urbana do município de Arapiraca, Alagoas**. In: Fabrizio de Luiz Rosito Listo; Danielle Gomes da Silva Listo; Raul Gomes da Silva. (Org.). *Planejando Cidades, Mitigando Riscos - E-Book - Vol I - Capítulo 43*. 1 ed. Recife - PE: Editora MapGeo, 2021, v. 1, p. 348-355.

SANTOS, S. M.. **Investigações metodológicas sobre o monitoramento da subsidência do solo devido à extração de água subterrânea - caso da Região Metropolitana de Recife**. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 259 p., 2005.

SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P.. **Sensoriamento remoto para desastres**. 1. ed. Oficina de Textos, 288 p., 2015.

SEVILLA, H. C; ERAZO, A.. Estudio multiespectral del cultivo de tuna para determinar los índices NDVI, CWSI y SAVI, a partir de imágenes SENTINEL 2A, en el cantón Guano, provincia de Chimborazo, Ecuador. **Enfoque UTE**, 10 (3): 55-66, 2019.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **SIAGAS: VISUALIZAR MAPA**. Disponível em: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/visualizar_mapa.php. Acesso em: 14/06/2022.

SILVA, M. T. M. G.. **Avaliação quantitativa da vulnerabilidade física associada a processos de deslizamentos de encostas**. Tese - Geotecnia - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 106 p., 2016.

SNEED, M.; GALLOWAY, D. L.. **Aquifer-system compaction and land subsidence: measurements, analyses, and simulations: the Holly site, Edwards Air Force Base, Antelope Valley, California**. 1th ed. US Department of the Interior, US Geological Survey, 2000. 80 p.

SNEED, M.; IKEHARA, M. E.; STORK, S. V.; AMELUNG, F.; GALLOWAY, D. L.. Detection and measurement of land subsidence using interferometric synthetic aperture radar and global positioning system, San Bernardino County, Mojave Desert, California. **Water-Resources Investigations Report**, 3: 4015, 2003.

SOUZA, C. C.; MOREIRA, A. A.; SCHIMITH, R. S.; BRANDÃO, P. C.; SILVA, E.. Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil-Uma revisão bibliográfica. **Ciência Florestal**, 17: 409-417, 2007.

SOUZA, W. O.. **InSAR para avaliação de subsidência do solo devido a ações antrópicas sobre os recursos hídricos subterrâneos e sobre o solo na planície do Recife, Brasil**. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 296 p., 2022.

THU, T. M.; FREDLUND, D. G.. Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam. **Canadian Geotechnical Journal**, 37 (3): 621-637, 2000.

TOMINAGA, L. K.. **Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Escorregamentos: Aplicação de um Ensaio em Ubatuba, SP**. Tese - Geografia Física) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 220 p., 2007.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. D.. **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir**. 3ª ed. São Paulo: Instituto Geológico, 196 p., 2015.

TUCCI, C. E. M.. Gerenciamento da drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 7 (1): 5-27, 2002.

USGS - United States Geological Survey. **EarthExplorer**. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 20/04/2022.

VANACÔR, R. N.. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 132 p., 2006.

VARNES D. J.. Slope movement type and processes. **Transportation Research Board Special Report**, 176: 11-33, 1978.

VILARIM, M. B.; PRADO, P. A. A.; MENDONÇA, A. R. B. F.; CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M.. IX-020 – Casos de subsidência devido à exploração de água subterrânea. XIX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Recife – PE, **Anais..**, 10 p., 2020.

VIVACQUA, N. L.; BARBOSA, E. C. A.. Estudo Descritivo De Áreas Propensas À Movimentação de Massa em João Pessoa-Pb: Comunidades Santa Clara e São Rafael. VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, João Pessoa – PB, **Anais..**, 10 p., 2018.

WANG, N.. **Estudio de subsidencia por extracción de fluido**. Dissertação - Engenharia Geológica, Escuela Técnica Superior, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 33 p., 2017.

WANG, Y. Q.; WANG, Z. F.; CHENG, W. C.. A review on land subsidence caused by groundwater withdrawal in Xi'an, China. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 78(4,): 2851-2863, 2019.

WIECZOREK, G. F.. Landslides: investigation and mitigation. Chapter 4-Landslide triggering mechanisms. **Transportation Research Board Special Report**, 247: 76-90, 1996.

XU, R.; LIU, J.; XU, J.. Extraction of high-precision urban impervious surfaces from sentinel-2 multispectral imagery via modified linear spectral mixture analysis. **Sensors**, 18 (9): 2873, 2018.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S.. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International journal of remote sensing**, 24 (3): 583-594, 2003.

ANEXO A – FORMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E TIPOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NAS RESIDÊNCIAS DAS RPAs DO MUNICÍPIO DE RECIFE

Tabela A1 – Número de domicílios particulares permanentes, por forma de abastecimento de água, para bairros da RPA 01.

Bairro	Total	Rede geral	Poço ou nascente	Outra
Boa Vista	5.999	4.243	1.672	84
Cabanga	506	492	5	9
Coelhos	2.322	1.998	60	264
Ilha do Leite	361	351	7	3
Ilha Joana Bezerra	3.606	3.054	14	538
Paissandu	180	105	75	-
Recife	198	130	4	64
Santo Amaro	8.474	8.012	430	32
Santo Antônio	142	111	28	3
São José	2.704	2.427	176	101
Soledade	1.013	485	527	1

Fonte dos dados: BDE (2022).

Tabela A2 - Número de domicílios particulares permanentes, por forma de abastecimento de água, para bairros da RPA 02.

Bairro	Total	Rede geral	Poço ou nascente	Outra
Água Fria	12.294	12.039	192	63
Alto Santa Teresinha	2.157	2.118	8	31
Arruda	4.467	4.378	54	35
Beberibe	2.586	2.533	41	12
Bomba do Hemetério	2.350	2.217	111	22
Cajueiro	1.902	1.781	76	45
Campina do Barreto	2.833	2.801	16	16
Campo Grande	9.554	9.279	177	98
Dois Unidos	9.374	8.999	201	174
Encruzilhada	4.008	3.253	749	6
Fundão	2.495	2.462	16	17
Hipódromo	808	691	112	5
Linha do Tiro	4.201	4.131	49	21
Peixinhos	1.383	1.079	10	294
Ponto de Parada	500	434	63	3
Porto da Madeira	2.334	2.234	47	53
Rosarinho	1.329	978	326	25
Torreão	368	264	86	18

Fonte dos dados: BDE (2022).

Tabela A3 - Número de domicílios particulares permanentes, por forma de abastecimento de água, para bairros da RPA 03.

Bairro	Total	Rede geral	Poço ou nascente	Outra
Aflitos	1.937	848	1.079	10
Alto do Mandu	1.351	1.292	52	7
Alto José Bonifácio	3.570	3.491	33	46
Alto José do Pinho	3.510	3.451	31	28
Apipucos	991	920	67	4
Brejo da Guabiraba	3.426	3.309	49	68
Brejo de Beberibe	2.459	2.359	77	23
Casa Amarela	9.296	7.626	1.595	75
Casa Forte	2.192	1.514	670	8
Córrego do Jenipapo	2.732	2.665	46	21
Derby	656	315	341	-
Dois Irmãos	737	228	145	364
Espinheiro	3.602	2.425	1.144	33
Graças	7.015	3.727	3.188	100
Guabiraba	1.779	1.101	444	234
Jaqueira	529	297	229	3
Macaxeira	5.807	5.012	687	108
Mangabeira	2.116	2.084	14	18
Monteiro	1.742	1.250	470	22
Morro da Conceição	2.955	2.934	9	12
Nova Descoberta	9.958	9.745	92	121
Parnamirim	2.458	1.506	836	116
Passarinho	5.792	5.247	160	385
Pau-Ferro	16	2	10	4
Poço	1.463	1.123	338	2
Santana	978	640	286	52
Sítio dos Pintos	2.132	1.593	317	222
Tamarineira	4.537	3.135	1.396	6
Vasco da Gama	9.113	9.018	44	51

Fonte dos dados: BDE (2022).

Tabela A4 - Número de domicílios particulares permanentes, por forma de abastecimento de água, para bairros da RPA 04.

Bairro	Total	Rede geral	Poço ou nascente	Outra
Caxangá	2.863	2.533	301	29
Cidade Universitária	222	181	33	8
Cordeiro	12.797	11.873	789	135
Engenho do Meio	3.053	2.999	49	5
Ilha do Retiro	1.124	724	248	152
Iputinga	16.294	13.772	2.167	355
Madalena	7.604	5.159	2.338	107
Prado	3.696	3.502	150	44
Torre	5.941	2.962	2.954	25
Torrões	9.320	9.150	34	136
Várzea	21.695	18.464	2.588	643
Zumbi	1.957	1.846	106	5

Fonte dos dados: BDE (2022).

Tabela A5 - Número de domicílios particulares permanentes, por forma de abastecimento de água, para bairros da RPA 05.

Bairro	Total	Rede geral	Poço ou nascente	Outra
Afogados	11.072	10.774	96	202
Areias	9.129	8.544	485	100
Barro	9.397	7.398	942	1.057
Bongi	2.345	2.248	83	14
Caçote	3.067	2.997	30	40
Coqueiral	3.281	3.234	29	18
Curado	4.900	4.176	604	120
Estância	2.822	2.721	65	36
Jardim São Paulo	9.615	6.963	2.363	289
Jíquiá	3.070	3.016	40	14
Mangueira	2.582	2.570	8	4
Mustardinha	3.669	3.641	18	10
San Martin	7.656	7.491	135	30
Sancho	2.374	1.948	410	16
Tejipió	2.682	2.415	249	18
Totó	746	673	56	17

Fonte dos dados: BDE (2022).

Tabela A6 - Número de domicílios particulares permanentes, por forma de abastecimento de água, para bairros da RPA 06.

Bairro	Total	Rede geral	Poço ou nascente	Outra
Boa Viagem	42.272	35.303	5.888	1.081
Brasília Teimosa	5.464	4.516	756	192
Cohab	19.534	17.446	1.745	343
Ibura	15.078	10.604	3.292	1.182
Imbiribeira	14.969	13.644	746	579
Ipsep	7.692	7.434	226	32
Jordão	6.018	5.628	288	102
Pina	9.457	7.844	1.143	470

Fonte dos dados: BDE (2022).

Tabela A7 – Número de domicílios particulares permanentes por tipo de esgotamento sanitário, para os bairros da RPA 01.

Bairro	Total	Rede geral de esgoto ou pluvial	Fossa séptica	Outro
Boa Vista	5.999	5.897	55	47
Cabanga	503	352	3	148
Coelhos	2.282	1.626	90	566
Ilha do Leite	361	355	4	2
Ilha Joana Bezerra	3.560	1.545	932	1.083
Paissandu	180	179	-	1
Recife	197	142	7	48
Santo Amaro	8.435	8.021	171	243
Santo Antônio	142	142	-	-
São José	2.667	1.683	59	925
Soledade	1.013	1.005	8	-

Fonte dos dados: BDE (2022).

Tabela A8 - Número de domicílios particulares permanentes por tipo de esgotamento sanitário, para os bairros da RPA 02.

Bairro	Total	Rede geral de esgoto ou pluvial	Fossa séptica	Outro
Água Fria	12.183	3.543	2.937	5.703
Alto Santa Teresinha	2.149	449	586	1.114
Arruda	4.457	2.827	714	916
Beberibe	2.576	176	597	1.803
Bomba do Hemetério	2.337	886	97	1.354
Cajueiro	1.857	558	743	556
Campina do Barreto	2.796	1.570	106	1.120
Campo Grande	9.506	6.897	1.389	1.220
Dois Unidos	9.313	1.428	4.067	3.818
Encruzilhada	4.006	3.775	149	82
Fundão	2.493	706	604	1.183
Hipódromo	808	764	22	22
Linha do Tiro	4.178	694	1.158	2.326
Peixinhos	1.325	978	32	315
Ponto de Parada	500	387	43	70
Porto da Madeira	2.327	892	942	493
Rosarinho	1.324	1.018	28	278
Torreão	333	265	45	23

Fonte dos dados: BDE (2022).

Tabela A9 - Número de domicílios particulares permanentes por tipo de esgotamento sanitário, para os bairros da RPA 03.

Bairro	Total	Rede geral de esgoto ou pluvial	Fossa séptica	Outro
Aflitos	1.937	1.906	19	12
Alto do Mandu	1.351	377	312	662
Alto José Bonifácio	3.563	698	688	2.177
Alto José do Pinho	3.503	481	1.172	1.850
Apipucos	982	445	103	434
Brejo da Guabiraba	3.378	445	550	2.383
Brejo de Beberibe	2.385	971	55	1.359
Casa Amarela	9.283	6.134	1.907	1.242
Casa Forte	2.192	2.131	49	12
Córrego do Jenipapo	2.718	201	126	2.391
Derby	656	598	40	18
Dois Irmãos	734	100	190	444
Espinheiro	3.600	3.378	42	180
Graças	7.014	6.706	91	217
Guabiraba	1.763	282	163	1.318
Jaqueira	528	475	3	50
Macaxeira	5.782	3.482	884	1.416
Mangabeira	2.100	570	40	1.490
Monteiro	1.739	1.042	352	345
Morro da Conceição	2.929	446	1.816	667
Nova Descoberta	9.898	1.356	2.198	6.344
Parnamirim	2.445	2.182	5	258
Passarinho	5.654	1.399	1.182	3.073
Pau-Ferro	16	1	13	2
Poço	1.462	1.388	28	46
Santana	977	942	25	10
Sítio dos Pintos	2.114	436	462	1.216
Tamarineira	4.533	4.155	211	167
Vasco da Gama	9.035	1.060	686	7.289

Fonte dos dados: BDE (2022).

Tabela A10 - Número de domicílios particulares permanentes por tipo de esgotamento sanitário, para os bairros da RPA 04.

Bairro	Total	Rede geral de esgoto ou pluvial	Fossa séptica	Outro
Caxangá	2.861	1.102	628	1.131
Cidade Universitária	222	98	115	9
Cordeiro	12.770	7.120	3.748	1.902
Engenho do Meio	3.051	2.845	123	83
Ilha do Retiro	1.120	476	222	422
Iputinga	16.211	10.054	3.237	2.920
Madalena	7.593	6.583	685	325
Prado	3.688	3.071	370	247
Torre	5.936	5.629	195	112
Torrões	9.294	7.065	1.246	983
Várzea	21.584	8.342	5.076	8.166
Zumbi	1.955	1.318	301	336

Fonte dos dados: BDE (2022).

Tabela A11 - Número de domicílios particulares permanentes por tipo de esgotamento sanitário, para os bairros da RPA 05.

Bairro	Total	Rede geral de esgoto ou pluvial	Fossa séptica	Outro
Afogados	11.021	8.381	728	1.912
Areias	9.102	6.484	653	1.965
Barro	9.335	3.330	1.107	4.898
Bongi	2.340	1.519	402	419
Caçote	3.024	1.552	173	1.299
Coqueiral	3.265	842	831	1.592
Curado	4.834	1.596	851	2.387
Estância	2.806	990	463	1.353
Jardim São Paulo	9.604	4.032	2.103	3.469
Jíquiá	3.060	2.029	438	593
Mangueira	2.576	2.434	52	90
Mustardinha	3.665	2.734	534	397
San Martin	7.631	5.145	1.413	1.073
Sancho	2.370	1.211	211	948
Tejipió	2.681	1.418	205	1.058
Totó	745	199	213	333

Fonte dos dados: BDE (2022).

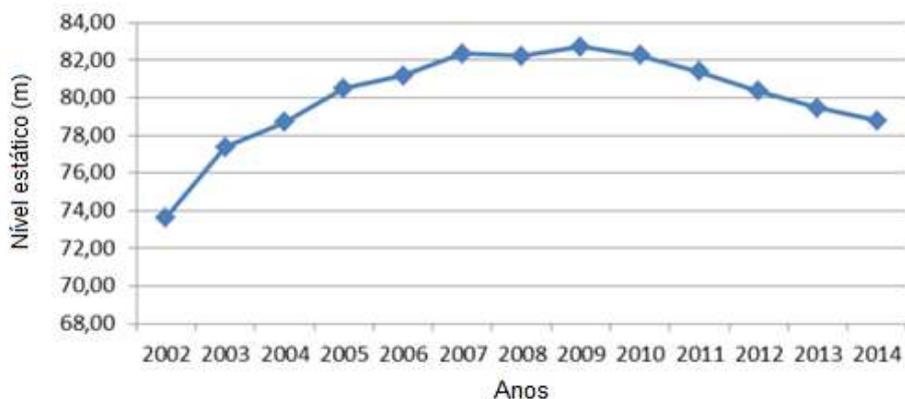
Tabela A12 - Número de domicílios particulares permanentes por tipo de esgotamento sanitário, para os bairros da RPA 06.

Bairro	Total	Rede geral de esgoto ou pluvial	Fossa séptica	Outro
Boa Viagem	42.211	33.756	5.390	3.065
Brasília Teimosa	5.446	3.477	1.057	912
Cohab	19.488	8.701	3.352	7.435
Ibura	14.888	3.098	2.357	9.433
Imbiribeira	14.818	7.972	2.647	4.199
Ipsep	7.683	5.868	470	1.345
Jordão	5.996	291	1.300	4.405
Pina	9.351	5.558	1.499	2.294

Fonte dos dados: BDE (2022).

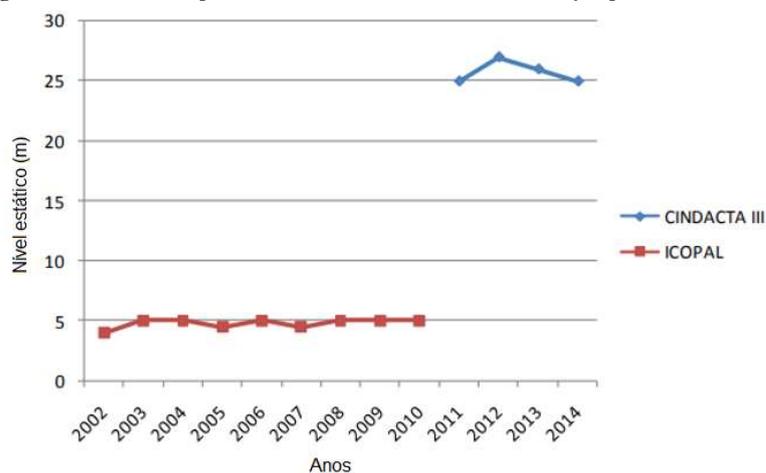
ANEXO B – GRÁFICOS DO NÍVEL ESTÁTICO NAS ZONAS DO HIDROREC III

Figura B1 - Variação dos níveis estáticos dos poços na Zona A.



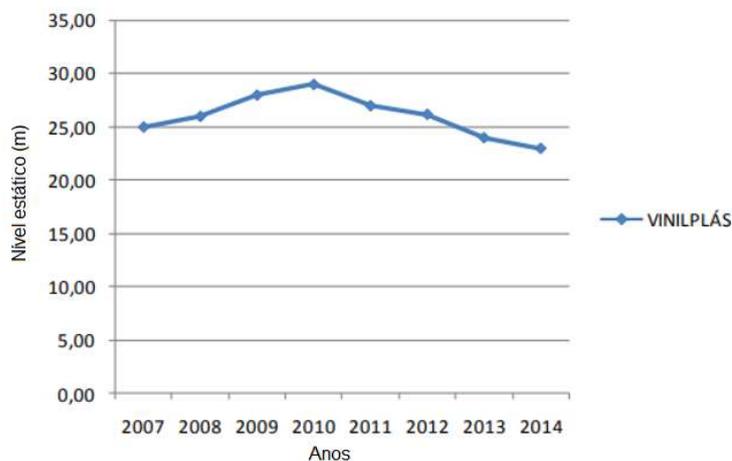
Fonte: Adaptado de Leitão *et al.* (2015).

Figura B2 - Variação dos níveis estáticos dos poços na Zona B.



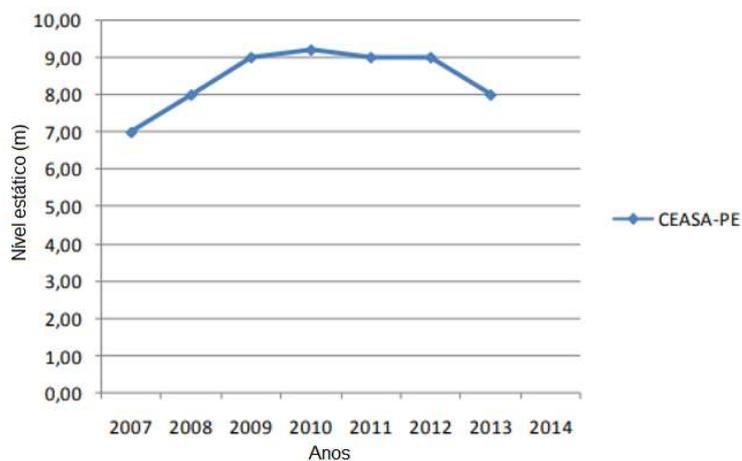
Fonte: Adaptado de Leitão *et al.* (2015).

Figura B3 - Variação dos níveis estáticos dos poços na Zona C.



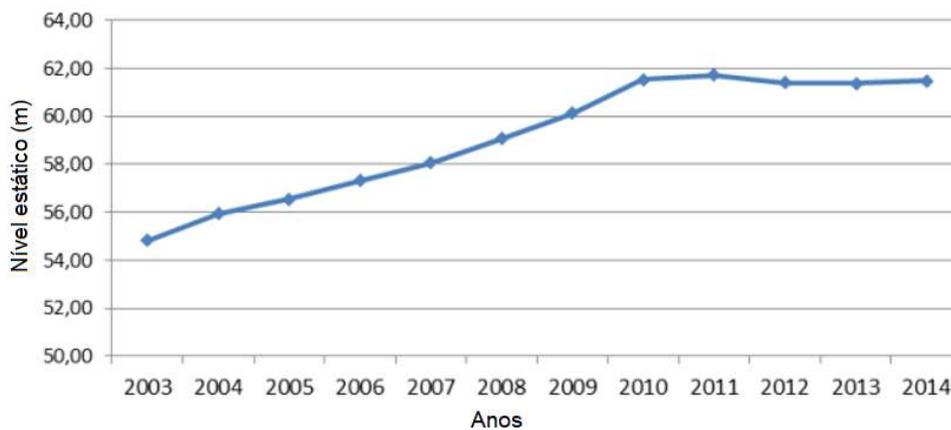
Fonte: Adaptado de Leitão *et al.* (2015).

Figura B4 - Variação dos níveis estáticos dos poços na Zona D.



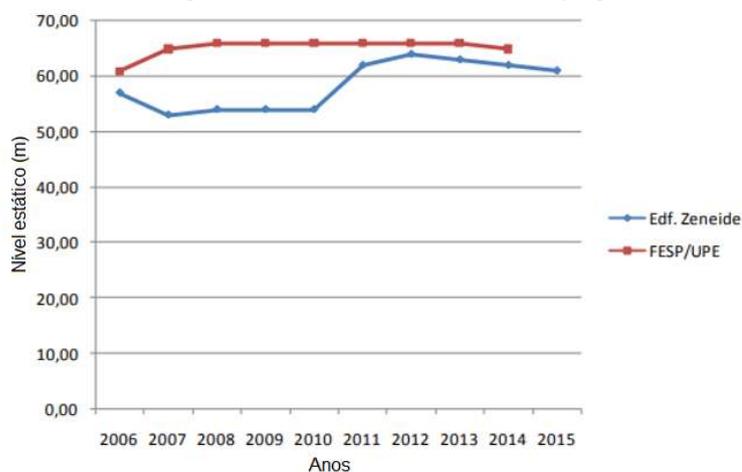
Fonte: Adaptado de Leitão *et al.* (2015).

Figura B5 - Variação dos níveis estáticos dos poços na Zona E.



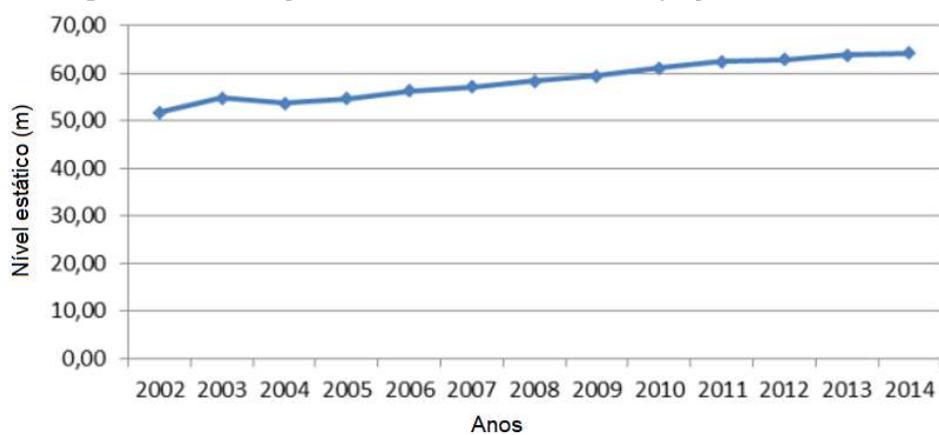
Fonte: Adaptado de Leitão *et al.* (2015).

Figura B6 - Variação dos níveis estáticos dos poços na Zona F.



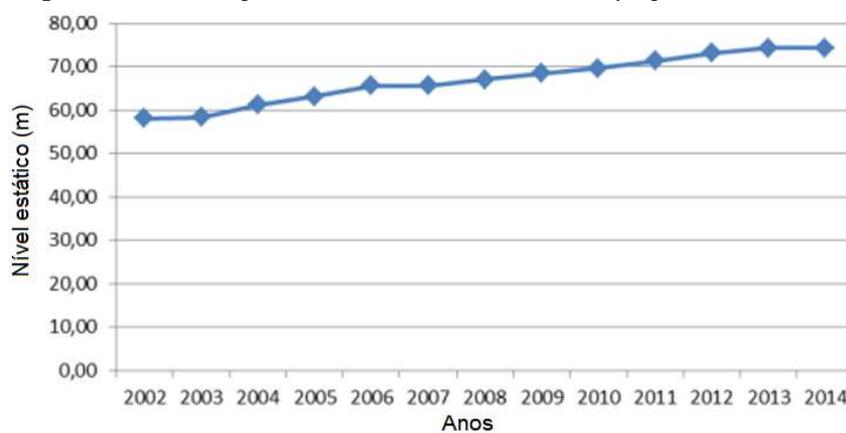
Fonte: Adaptado de Leitão *et al.* (2015).

Figura B7 - Variação dos níveis estáticos dos poços na Zona G.



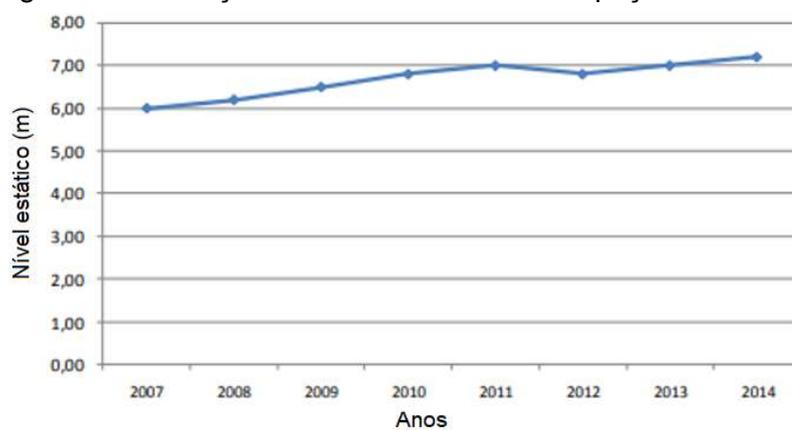
Fonte: Adaptado de Leitão *et al.* (2015).

Figura B8 - Variação dos níveis estáticos dos poços na Zona H.



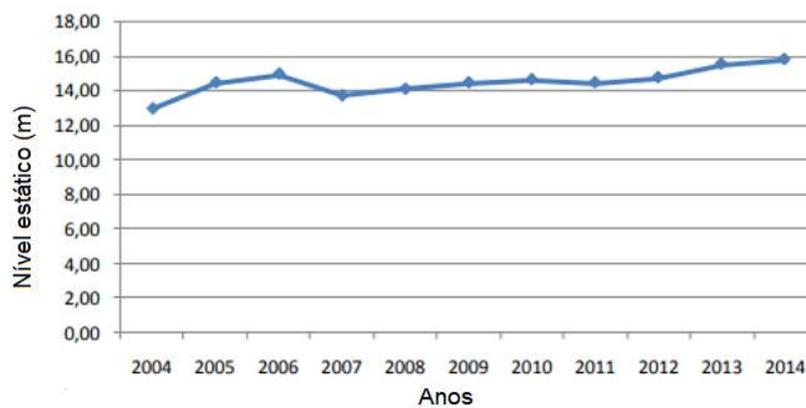
Fonte: Adaptado de Leitão *et al.* (2015).

Figura B9 - Variação dos níveis estáticos dos poços na Zona I.



Fonte: Adaptado de Leitão *et al.* (2015).

Figura B10 - Variação dos níveis estáticos dos poços na Zona J.



Fonte: Adaptado de Leitão *et al.* (2015).