



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

WENDSON DE OLIVEIRA SOUZA

**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**

Recife

2022

WENDSON DE OLIVEIRA SOUZA

**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 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Ph.D. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Miguel Ruiz Armenteros

Recife

2022

Catálogo na fonte:  
Bibliotecário Josias Machado, CRB-4 / 1690

S729i Souza, Wendson de Oliveira  
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 / Wendson de Oliveira Souza. – 2022.  
295 f.: il., figs., tabs., abrev. e sigl.

Orientador: Prof. Ph.D. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.  
Coorientador: Prof. Dr. Antonio Miguel Ruiz Armenteros  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.  
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Interferometria SAR. 3. Subsidência do solo. 4. Água subterrânea. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira (orientador). II. Armenteros, Antônio Miguel Ruiz. III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-302

WENDSON DE OLIVEIRA SOUZA

**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 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovado em: 13/07/2022.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Miguel Ruiz Armenteros  
Universidade de Jaén – UJA

**BANCA EXAMINADORA**

Profª. Dra. Sylvana Melo dos Santos (Examinadora Interna)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Admilson da Penha Pacheco (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Joaquim João Moreira de Sousa (Examinador Externo)  
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro – UTAD

Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão (Examinador Externo)  
Universidade de Pernambuco – UPE

À memória de meu pai – Evandro Montenegro.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela dádiva da vida, pela oportunidade de estudar em uma universidade pública de excelência e por conduzir meus pensamentos no desenvolvimento deste trabalho. “Toda honra e toda glória pertencem a Ti, Senhor”.

À minha esposa Anne Caroliny pelo suporte incondicional. O seu amor me deu forças para superar obstáculos e desafios ao longo desta jornada. Obrigado por acreditar em mim. E nunca desistir de nós. Amar-te é o maior conhecimento que a vida me deu.

Aos meus familiares: pais Evandro Montenegro (*in memoriam*) e Gilvaneide por me apoiarem em todas as etapas da vida – eles são os grandes responsáveis pela pessoa que me tornei –; irmãos Wendel e Maria de Nazaré pelo carinho, cumplicidade e, acima de tudo, união; sogros Rivaldo e Tereza Amélia pelo apoio amoroso, afeto e cuidado; cunhados Eduardo e Emanuella pelo constante incentivo, ternura e consideração; e sobrinhos-afilhados Matheus e Myller pelos momentos de alegria e descontração.

Aos mestres: orientador Prof. Ph.D. Jaime Cabral pela sapiência de sempre, empatia e ensinamentos – homem de muita fé que inspira confiança na certeza que tudo vai ficar bem –; coorientador Prof. Dr. Antonio Miguel por ser luz na construção de conhecimentos de forma generosa – pessoa de alma evoluída, a humanidade carece de gente assim –; Prof. Dr. Admilson Pacheco por abrir as portas do fascinante mundo da interferometria de Radar por satélite – a descoberta é uma viagem sem volta –; e Prof. Dr. Silvio Jacks pelo início de tudo, por guiar meus primeiros passos no caminho da pesquisa – o cuidado com o próximo deve ser um dos maiores legados de um pesquisador.

Aos pesquisadores: Dr. Luis Gustavo pelo companheirismo, dedicação, motivação e troca de experiência; Prof. Dr. Alfredo Ribeiro pela parceria, interesse, envolvimento e aprendizagem; Dr. Daniele Perissin pela licença do SARProz, atenção e contribuições no campo InSAR; e Prof. Dr. Anderson Paiva pelo apoio, empenho e informações relacionadas à pesquisa.

Aos docentes: Profa. Dra. Sylvana Santos, Prof. Dr. Joaquim Sousa e Prof. Dr. Alexandre Gusmão, pela disponibilidade, consideração e observações cuidadosas.

Às agências internacionais: Agência Espacial Europeia (ESA) pela disponibilização de imagens do satélite Sentinel-1; Agência Espacial Espanhola (INTA) pelo fornecimento de imagens do satélite PAZ, proposta (AO-001-039); e Agência Espacial Italiana (ASI) pelo fornecimento de imagens do satélite COSMO-SkyMed, proposta (00020/8/783/1520).

Às instituições brasileiras: Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pelo fornecimento de dados, em especial ao servidor Adson Monteiro; Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco (CONDEPE) pelo fornecimento de materiais, em especial aos servidores Orlando Valois e Paulo Carvalho; Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC) pelo fornecimento de materiais, em especial aos servidores Alexandro Almeida e Maria Crystianne; e Prefeitura da Cidade do Recife (PCR) pelo fornecimento de produtos, em especial aos servidores Aurélio Lúcio e José Ricardo.

À Universidade Federal do Piauí (UFPI) pelo afastamento integral das atividades docentes durante a realização deste trabalho, em especial ao Centro de Tecnologia (CT) e ao Departamento de Transportes (DT) com destaque aos estimados docentes: Alessandro Rhadamek, Emanuel Silva, Giovana Espíndola, Ewerton Torres, Antonio Aderson, Dinameres Antunes, Nícia Leite.

Aos irmãos-amigos: Liviano Ramos, Henrique Andrade, Hugo Gonçalves, Vitor Hugo, Jaelson Souza, Rafael Correia, Edmilson Marques, Gilmar Esteves, Wilson Junior e Benilton Lopes, pelo incentivo, carinho, confiança, alegria. Amizade para todas as horas.

Às amigas ao longo do curso: Yuri Tomaz, Thaís Amorim, Edmun Matias, Guilherme Girão, Lívia Fragoso, Mayara Maria, Larissa Batista pelo clima amistoso, convivência e momentos de descontração. Mantereí eternas lembranças de vocês.

À secretaria da Pós-Civil: Andrea Montenegro, Juliana Henriques e Jecicleide Marques pelo carinho, dedicação, compromisso e qualidade no atendimento.

Enfim, muito obrigado a todos por acreditar, incentivar e participar de forma direta ou indireta desta caminhada.

Boa leitura!

“Quanto maior o diâmetro do nosso conhecimento,  
maior a área de contato com o desconhecido.”

[Blaise Pascal]

## RESUMO

A escassez de água potável é um problema recorrente em várias cidades no mundo, como por exemplo, no Recife, localizado no Nordeste do Brasil. Na capital pernambucana, utilizam-se mananciais subterrâneos como fonte alternativa para suprir a crescente demanda. Todavia, ao longo de décadas grande parte das captações opera de maneira desmedida. Isso tem proporcionado intensa redução dos níveis de aquíferos confinados com risco de subsidência do solo. O fenômeno geológico provoca rebaixamento da superfície e causa maior preocupação em áreas urbanas. A deformação do terreno pode gerar significativos impactos às infraestruturas e ao meio ambiente, acarretar prejuízos econômicos e sociais, e comprometer a qualidade de vida dos habitantes. O objetivo da pesquisa é avaliar a subsidência do solo da planície costeira do Recife ocasionada pela exploração dos recursos hídricos subterrâneos por meio de interferometria de Radar de abertura sintética, InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*). A tecnologia permite detecção precisa em deslocamento superficial-estrutural com elevada densidade de pontos de observação e alta resolução temporal. O procedimento emprega espalhadores persistentes interferométricos, PSI (*Persistent Scatterer Interferometric*), na análise de dados SAR formado por: 100 imagens COSMO-SkyMed (órbita ascendente, polarização HH, banda X) para o período de 2011 a 2019, 135 imagens Sentinel-1 (órbita descendente, polarização VV, banda C) para o período de 2016 a 2021 e 41 imagens PAZ (19 ascendente e 22 descendente, polarização HH, banda X) para o período de 2019 a 2021. Os resultados revelam diversos locais de rebaixamento em Recife. Há correlação entre subsidência do solo e redução das águas subterrâneas na zona Sul decorrente da dessaturação do solo no bairro de Boa Viagem, com velocidade de poucos milímetros (mm) por ano a 3,8 mm/ano. De forma secundária, observa-se correlação entre subsidência do solo e urbanização das regiões, Oeste e Norte, desinentes da compactação do solo de construções recentes. Na zona Oeste, há grandes áreas de rebaixamento ao longo dos bairros do Prado, Afogados, Torrões, Cordeiro, Bongü, San Martin, Curado, Várzea e Caxangá, com valor em torno de 15 mm/ano. Casos semelhantes, mas de área menor, ocorrem entre os bairros do Ibura e Ipsep com taxa de até 25 mm/ano – responsável pelo maior afundamento da cidade. Na região Norte, há também áreas menores de rebaixamento entre os bairros do Arruda e Campo Grande com velocidade por volta de 20 mm/ano. Além da movimentação vertical, verifica-se deslocamento horizontal da planície recifense para o período de 2019 a 2021. O movimento ocorre na região Oeste com velocidade de -10 mm/ano em sentido Oeste e na zona Norte-Sul com taxa de 7 mm/ano em sentido Leste, e podem ter relação com o

rebaixamento da superfície. O estudo destaca que Recife é uma cidade bastante vulnerável à subsidência do solo. A análise dos efeitos evidencia impactos nas estruturas geodésicas e interferência na drenagem urbana. Contudo, o fenômeno tem potencial para tornar sua ação mais preocupante nos próximos anos. A utilização InSAR é uma estratégia assertiva no enfrentamento dos desafios do Recife com utilidades à sustentabilidade hídrica subterrânea e ao bem-estar da população.

**Palavras-chave:** interferometria SAR; Recife; subsidência do solo; água subterrânea.

## ABSTRACT

The scarcity of drinking water is a recurring problem in several cities around the world, such as Recife, located in the Northeast of Brazil. In the capital of Pernambuco, underground springs are used as an alternative source to meet the growing demand. However, for decades most of the collections operate in an excessive way. This has provided an intense reduction in the levels of confined aquifers with risk of land subsidence. The geological phenomenon causes surface lowering and causes greater concern in urban areas. The deformation of the land can generate significant impacts on infrastructure and the environment, cause economic and social losses, and compromise the quality of life of the inhabitants. The objective of the research is to evaluate the land subsidence of the coastal plain of Recife caused by the exploitation of groundwater resources by means of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). The technology allows accurate detection in surface-structural displacement with a high density of observation points and high temporal resolution. The procedure employs Persistent Scatterer Interferometric (PSI) in the analysis of SAR data, consisting of: 100 COSMO-SkyMed images (ascending orbit, HH polarization, X band) for the period from 2011 to 2019, 135 Sentinel-1 images (descending orbit, VV polarization, C band) for the period 2016 to 2021 and 41 PAZ images (19 ascending and 22 descending, HH polarization, X band) for the period 2019 to 2021. The results reveal several places of drawdown in Recife. There is a correlation between land subsidence and groundwater reduction in the South zone due to soil desaturation in the neighborhood of Boa Viagem, with a velocity of a few millimeters (mm) per year at 3.8 mm/year. Secondly, there is a correlation between land subsidence and urbanization in the West and North regions, resulting from soil compaction from recent constructions. In the West zone, there are large areas of lowering along the Prado, Afogados, Torrões, Cordeiro, Bongü, San Martín, Curado, Várzea and Caxangá neighborhoods, with a value of around 15 mm/year. Similar cases, but with a smaller area, occur between the neighborhoods of Ibura and Ipsep with a rate of up to 25 mm/year – responsible for the largest sinking in the city. In the North region, there are also smaller areas of lowering between the neighborhoods of Arruda and Campo Grande with a velocity of around 20 mm/year. In addition to the vertical movement, there is a horizontal displacement of the Recife plain for the period from 2019 to 2021. The movement occurs in the West region with a velocity of -10 mm/year towards the West and in the North-South zone with a rate of 7 mm/year towards the East, and may be related to the land subsidence. The study highlights that Recife is a very vulnerable city to land subsidence. The analysis of the effects

shows impacts on geodetics structures and interference in urban drainage. However, the phenomenon has the potential to make its action more worrying in the coming years. The use of InSAR is an assertive strategy to face the challenges of Recife with benefits to groundwater sustainability and the well-being of the population.

**Keywords:** SAR interferometry; Recife; land subsidence; groundwater.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de subsidência do solo no mundo, ocorrências: Aquífero (Aq), Gás Natural (GN), Petróleo (P), Dissolução Cárstica (DC) e Oxidação de Tubulação (OT).....	34
Figura 2 – Mapa de zoneamento explotável das águas subterrâneas.....	41
Figura 3 – Representação simplificada de ações que influenciam a dinâmica terrestre.....	43
Figura 4 – Processo metodológico.....	50
Figura 5 – Distribuição da água no planeta Terra.....	53
Figura 6 – Desenvolvimento da subsidência do solo: (a) situação estável, (b) início da compactação e (c) movimentação das camadas internas da Terra.....	56
Figura 7 – Subsidência do solo em aquífero cárstico: (a) início da exploração, (b) rebaixamento excessivo do nível da água subterrânea provoca o carreamento de material carstificado e o surgimento de cavidade e (c) desmoronamento das camadas de solos sobrejacentes.....	59
Figura 8 – Mapa de distribuição das rochas carbonáticas no mundo, as áreas em azul escuro correspondem a regiões carbonáticas relativamente contínuas.....	60
Figura 9 – Subsidência do solo em aquífero sedimentar: (a) antes de bombeamento intenso e (b) após bombeamento intenso.....	61
Figura 10 – Mapa de subsidência do solo da Europa.....	62
Figura 11 – Mapa de subsidência do solo da Ásia.....	63
Figura 12 – Mapa de subsidência do solo da Oceania.....	65
Figura 13 – Mapa de subsidência do solo da África.....	66
Figura 14 – Mapa de subsidência do solo da América do Norte.....	67
Figura 15 – Mapa de subsidência do solo da América do Sul.....	69
Figura 16 – Linha do tempo do Recife.....	72
Figura 17 – Atrativos do Recife: (a) Pontes, (b) Carnaval, (c) Rua do Bom Jesus, (d) Praia de Boa Viagem, (e) Praça do Marco Zero e (f) Rua da Aurora.....	73
Figura 18 – Crescimento populacional do Recife.....	74
Figura 19 – Mapa de regiões de influência do Recife.....	76
Figura 20 – Mapa de espacialidade do Recife.....	77
Figura 21 – Mapa de altimetria da cidade do Recife.....	78
Figura 22 – Mapa de uso e ocupação do terreno do Recife.....	79

Figura 23 – Temperaturas e insolação no Recife (estação curado).....	80
Figura 24 – Precipitação, umidade, evaporação e balanço hídrico no Recife (estação curado).....	81
Figura 25 – Mapa de geodiversidade do Recife.....	82
Figura 26 – Mapa de rede hidrográfica do Recife.....	84
Figura 27 – Mapa hidrogeológico simplificado do Recife.....	86
Figura 28 – Mapa de poços outorgados em Recife.....	90
Figura 29 – Mapas de volumes anuais explorados dos aquíferos: Boa Viagem, Beberibe e Cabo.....	91
Figura 30 – Redução dos níveis de água do aquífero Cabo, em Boa Viagem.....	93
Figura 31 – Mapas potenciométricos dos aquíferos: Beberibe <sup>(1)</sup> (à esquerda) e Cabo <sup>(2)</sup> (à direita) para o período de 2003 a 2013.....	93
Figura 32 – Seção litológica de direção Oeste a Leste em Boa Viagem.....	95
Figura 33 – Espectro eletromagnético, com destaque para ondas de rádio e microondas.....	99
Figura 34 – Princípio da detecção de objeto pelo Radar. Elementos: distância ( $d$ ), velocidade da luz ( $c$ ), tempo de transmissão ( $t_1$ ) e tempo de retorno ( $t_2$ ).....	100
Figura 35 – Polarização de ondas eletromagnéticas.....	101
Figura 36 – Alcance das bandas em diferentes características da superfície.....	102
Figura 37 – Geometria do sistema SAR.....	104
Figura 38 – Órbitas SAR ascendente e descendente.....	105
Figura 39 – Missões espaciais do sistema SAR.....	106
Figura 40 – Coordenadas polares no plano complexo.....	107
Figura 41 – Amplitude (esquerda) e fase (direita) de uma imagem SAR.....	108
Figura 42 – Amostras de imagens SAR polarizadas do aeroporto Presidente Médici, Acre. Energias transmitidas e recebidas: paralelas (HH e VV) e cruzadas (HV e VH).....	108
Figura 43 – Exemplos de imagens SAR em função da órbita. Ilha do Fogo, Cabo Verde.....	109
Figura 44 – Distorções geométricas em imagem SAR. Fenômenos: (a) <i>layover</i> , (b) <i>foreshortening</i> e (c) <i>shadowing</i> .....	110
Figura 45 – Relação da fase e comprimento de onda com a distância inclinada.....	110
Figura 46 – Geometria interferométrica SAR: (a) passagem única e (b) passagem repetitiva.....	111
Figura 47 – Representação de duas imagens corrigidas: master e slave.....	113

Figura 48 – Geração de interferograma.....	113
Figura 49 – Representação da técnica InSAR na detecção da deformação superficial.....	116
Figura 50 – Representação da refletividade de espalhadores persistentes da superfície com variabilidade da fase interferométrica. (a) sem PS e (b) com PS.....	119
Figura 51 – Exemplo da configuração do método PSInSAR.....	120
Figura 52 – Fluxo genérico de processamento PSInSAR. Etapas: (a) seleção de <i>pixels</i> PS, (b) desenrolamento de fase interferométrica e (c) mitigação do sinal atmosférico.....	121
Figura 53 – Exemplo da configuração do método SBAS. ....	122
Figura 54 – Fluxo genérico de processamento SBAS. Etapas: (a) filtragem, (b) seleção de <i>pixels</i> DS, (c) desenrolamento de fase interferométrica, (d) estimativa equivalente da fase em referência à imagem master e (e) mitigação do sinal atmosférico.....	124
Figura 55 – Esquema das características de <i>pixels</i> PS e DS.....	125
Figura 56 – Fluxo genérico de processamento SqueeSAR. Etapas: (a) filtragem, (b) estimativa equivalente da fase em referência à imagem master, (c) seleção de <i>pixels</i> DS, (d) seleção de <i>pixels</i> PS (e) desenrolamento de fase interferométrica e (f) mitigação do sinal atmosférico.....	126
Figura 57 – Mapa de localização da área de estudo.....	131
Figura 58 – Dados de recobrimento do Sentinel-1.....	134
Figura 59 – Dados de recobrimento do COSMO-SkyMed.....	135
Figura 60 – Dados de recobrimento do ERS-1/2.....	138
Figura 61 – Dados de recobrimento do Envisat.....	139
Figura 62 – Mapa de abrangência do MDT da área de estudo.....	140
Figura 63 – SARProz: (a) interface inicial, (b) importação de dados e (c) processamento InSAR.....	142
Figura 64 – Aspectos: (a) medição de deslocamento a partir de alvos PS, (b) conjunto de dados interferométrico, (c) relação espaço $x$ tempo da deformação, e (d) informação da movimentação.....	143
Figura 65 – Combinação de dados orbitais (ascendente e descendente) na determinação das componentes horizontal e vertical.....	145
Figura 66 – Fluxograma de processamento InSAR no SARProz.....	147
Figura 67 – Mapa de localização das estações meteorológicas.....	152

Figura 68 – Mapa de localização de poços monitorados.....	153
Figura 69 – Abrangência temporal de produtos SAR.....	157
Figura 70 – Mapa de área de cobertura de imagens SAR.....	158
Figura 71 – Mapa de imagem SAR do Sentinel-1 da área de estudo.....	159
Figura 72 – Aspectos: (a) gráfico da linha de base, (b) histograma da linha de base, (c) intervalo de aquisição e (d) temperatura no momento de obtenção de imagens SAR.....	160
Figura 73 – Informações: (a) pontos candidatos a PS, (b) histograma coerente da conexão e (c) gráfico da conexão coerente.....	162
Figura 74 – Elementos: (a) indicação do ponto de referência em vermelho, (b) velocidade integrada e (c) altura residual integrada.....	162
Figura 75 – Aspectos: (a) interferograma com APS (12/11/2016), (b) estimativa do efeito atmosférica (12/11/2016), (c) gráfico da conexão coerente, (d) interferograma sem APS (12/11/2016), (e) coerência temporal e (f) coerência de cada imagem slave em relação à cena master.....	163
Figura 76 – Análise de dados PS: (a) pontos de medição, (b) coerência temporal e (c) histograma da coerência temporal.....	164
Figura 77 – Análise estatística de pontos de medição PS: (a) velocidade, (b) deslocamento acumulado, (c) altura e (d) altura residual.....	164
Figura 78 – Mapa de imagem SAR do COSMO-SkyMed da área de estudo.....	166
Figura 79 – Aspectos: (a) gráfico da linha de base, (b) histograma da linha de base, (c) intervalo de aquisição e (d) temperatura no momento de obtenção de imagens SAR.....	166
Figura 80 – Informações: (a) pontos candidatos a PS, (b) histograma coerente da conexão e (c) gráfico da conexão coerente.....	168
Figura 81 – Elementos: (a) indicação do ponto de referência em vermelho, (b) velocidade integrada e (c) altura residual integrada.....	169
Figura 82 – Aspectos: (a) interferograma com APS (19/03/2018), (b) estimativa do efeito atmosférica (19/03/2018), (c) gráfico da conexão coerente, (d) interferograma sem APS (19/03/2018), (e) coerência temporal e (f) coerência de cada imagem slave em relação à cena master.....	169
Figura 83 – Análise de dados PS: (a) pontos de medição, (b) coerência temporal e (c) histograma da coerência temporal.....	170

Figura 84 – Análise estatística de pontos de medição PS: (a) velocidade, (b) deslocamento acumulado, (c) altura e (d) altura residual.....	171
Figura 85 – Mapa de imagem SAR do PAZ ascendente da área de estudo.....	172
Figura 86 – Aspectos: (a) gráfico da linha de base, (b) histograma da linha de base, (c) intervalo de aquisição e (d) temperatura no momento de obtenção de imagens SAR.....	173
Figura 87 – Informações: (a) pontos candidatos a PS, (b) histograma coerente da conexão e (c) gráfico da conexão coerente. ....	174
Figura 88 – Elementos: (a) indicação do ponto de referência em vermelho, (b) velocidade integrada e (c) altura residual integrada.....	174
Figura 89 – Aspectos: (a) interferograma com APS (18/09/2020), (b) estimativa do efeito atmosférica (18/09/2020), (c) gráfico da conexão coerente, (d) interferograma sem APS (18/09/2020), (e) coerência temporal e (f) coerência de cada imagem <i>slave</i> em relação à cena <i>master</i> .....	175
Figura 90 – Análise de dados PS: (a) pontos de medição, (b) coerência temporal e (c) histograma da coerência temporal. ....	176
Figura 91 – Análise estatística de pontos de medição PS: (a) velocidade, (b) deslocamento acumulado, (c) altura e (d) altura residual.....	176
Figura 92 – Mapa de imagem SAR do PAZ descendente da área de estudo.....	178
Figura 93 – Aspectos: (a) gráfico da linha de base, (b) histograma da linha de base, (c) intervalo de aquisição e (d) temperatura no momento de obtenção de imagens SAR.....	178
Figura 94 – Informações: (a) pontos candidatos a PS, (b) histograma coerente da conexão e (c) gráfico da conexão coerente.....	180
Figura 95 – Elementos: (a) indicação do ponto de referência em vermelho, (b) velocidade integrada e (c) altura residual integrada. ....	180
Figura 96 – Aspectos: (a) interferograma com APS (13/08/2020), (b) estimativa do efeito atmosférica (13/08/2020), (c) gráfico da conexão coerente, (d) interferograma sem APS (13/08/2020), (e) coerência temporal e (f) coerência de cada imagem <i>slave</i> em relação à cena <i>master</i> .....	181
Figura 97 – Análise de dados PS: (a) pontos de medição, (b) coerência temporal e (c) histograma da coerência temporal.....	182
Figura 98 – Análise estatística de pontos de medição PS: (a) velocidade, (b) deslocamento	

acumulado, (c) altura e (d) altura residual. ....	182
Figura 99 – Pontos de medição PS mais coerência temporal das imagens: (a) Sentinel-1, (b) COSMO-SkyMed, (c) PAZ ascendente e (d) PAZ descendente.....	184
Figura 100 – Mapa de localização da referência InSAR.....	185
Figura 101 – Mapas de velocidade na direção LOS dos satélites: COSMO-SkyMed (2011- 2019), Sentinel-1 (2016-2021) e PAZ (2019-2021).....	186
Figura 102 – Mapa de velocidade na direção vertical via satélite PAZ (2019-2021).....	187
Figura 103 – Séries temporais de deslocamento da zona Oeste: COSMO-SkyMed (CSK) à esquerda, Sentinel-1 (S1) no meio e PAZ (asc e desc) à direita.....	188
Figura 104 – Séries temporais de deformação da zona Norte, Centro e Sul: COSMO- SkyMed (CSK) à esquerda, Sentinel-1 (S1) no meio e PAZ à direita (asc e desc).....	190
Figura 105 – Mapas de rebaixamento acumulado na direção LOS dos satélites: COSMO- SkyMed (2011-2019), Sentinel (2016-2021) e PAZ (2019-2021).....	191
Figura 106 – Mapa de rebaixamento acumulado na direção vertical via satélite PAZ (2019-2021).....	192
Figura 107 – Mapa de velocidade na direção horizontal via satélite PAZ (2019-2021).....	193
Figura 108 – Mapa de deslocamento horizontal acumulado via satélite PAZ (2019-2021)..	194
Figura 109 – Informações de temperatura média anual e média de cinco anos.....	195
Figura 110 – Informações de precipitação acumulada anual e de três anos.....	196
Figura 111 – Informações de precipitação acumulada de 1 ano e de três meses.....	196
Figura 112 – Evolução de poços no Recife. ....	197
Figura 113 – Mapas piezométricos do aquífero Cabo. ....	198
Figura 114 – Mapas piezométricos do aquífero Beberibe.....	199
Figura 115 – Mapa de áreas de dessaturação dos aquíferos Cabo e Beberibe, de 2013 a 2015.....	200
Figura 116 – Mapa de unidades estratigráficas do Recife.....	201
Figura 117 – Perfil litológico de poços do SIAGAS.....	202
Figura 118 – Mapa de densidade de poços na zona Sul.....	203
Figura 119 – Velocidade de deslocamento na zona Sul, poço 1389-P/99.....	204
Figura 120 – Velocidade de deslocamento na zona Sul, poço 1024-P/99.....	205
Figura 121 – Velocidade de deslocamento na zona Sul, poço 1034-P/99.....	206
Figura 122 – Mapa de densidade de poços na zona Norte-Centro.....	207

Figura 123 – Velocidade de deslocamento na zona Norte, poço 3187-P/04.....	208
Figura 124 – Velocidade de deslocamento na zona Centro, poço 296-P/98.....	209
Figura 125 – Velocidade de deslocamento na zona Centro, poço 1953-P/01.....	210
Figura 126 – Mapa de deslocamento acumulado nas zonas Sul e Norte-Centro.....	213
Figura 127 – Crescimento urbano do Recife do século XVII ao XIX.....	214
Figura 128 – Crescimento urbano do Recife do século XX ao XXI.....	215
Figura 129 – Mapas de expansão de lotes na planície recifense.....	216
Figura 130 – Progresso de lotes na planície recifense.....	217
Figura 131 – Mapas de situação dos logadrouros na planície recifense.....	217
Figura 132 – Mapas de velocidade de deslocamento nas zonas Oeste e Norte.....	219
Figura 133 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 1.....	220
Figura 134 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 1.....	221
Figura 135 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 2.....	222
Figura 136 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 2.....	223
Figura 137 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 3.....	224
Figura 138 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 3.....	225
Figura 139 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 4.....	226
Figura 140 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 4.....	227
Figura 141 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 5.....	228
Figura 142 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 5.....	229
Figura 143 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 6.....	230
Figura 144 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 6.....	231
Figura 145 – Velocidade de deslocamento na zona Norte, Área 7.....	232
Figura 146 – Mapas de avanço da urbanização na zona Norte, Área 7.....	233
Figura 147 – Mapas de deslocamento acumulado em áreas de investigação nas zonas Oeste e Norte.....	235
Figura 148 – Mapas de velocidade de deslocamento no entorno do marco RN 9319G.....	237
Figura 149 – Mapas de deslocamento acumulado na área de estudo de Luna <i>et al.</i> (2017)...	238
Figura 150 – Mapas de velocidade de deslocamento da análise PSInSAR.....	239
Figura 151 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, e na área de San Martin.....	240
Figura 152 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste entre os bairros do Ibura e Ipsep.	242
Figura 153 – Monitoramento posicional das estações RECF e PERC.....	243
Figura 154 – Mapas de velocidade de deslocamento das estações RECF e PERC.....	244

Figura 155 – Mapas de estações geodésicas em áreas de movimentação superficial.....	246
Figura 156 – Referências geodésicas em áreas de deslocamento.....	248
Figura 157 – Mapas de deslocamento no entorno do marco RN 3641M do IBGE.....	249
Figura 158 – Mapas de pontos de alagamento em áreas de rebaixamento.....	250
Figura 159 – Situação de pontos de alagamento em áreas de rebaixamento.....	251

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos impactos da subsidência do solo.....	35
Tabela 2 – Aplicação da tecnologia InSAR.....	48
Tabela 3 – Principais processos e produtos da ação geológica da água subterrânea.....	55
Tabela 4 – A subsidência do solo conforme área, intervalo e causa. ....	56
Tabela 5 – Classificação da subsidência do solo em grupos de fatores. ....	57
Tabela 6 – Casos de subsidência do solo da Europa. ....	62
Tabela 7 – Casos de subsidência do solo da Ásia.....	64
Tabela 8 – Casos de subsidência do solo da Oceania.....	65
Tabela 9 – Caso de subsidência do solo da África. ....	66
Tabela 10 – Casos de subsidência do solo da América do Norte .....	67
Tabela 11 – Caso de subsidência do solo em terreno sedimentar do Recife no Brasil. ....	70
Tabela 12 – Detalhes geológico-ambientais do Recife. ....	82
Tabela 13 – Aspectos dos principais aquíferos da planície do Recife. ....	88
Tabela 14 – Balanço hídrico dos aquíferos da planície do Recife.....	92
Tabela 15 – Principais bandas utilizadas no Radar. ....	103
Tabela 16 – Principais características das abordagens de espalhadores persistentes.....	120
Tabela 17 – Principais características das abordagens de espalhadores distribuídos.....	123
Tabela 18 – Principais características das abordagens integradas entre espalhadores persistentes e espalhadores distribuídos. ....	125
Tabela 19 – Data de aquisição de imagens do satélite Sentinel-1.....	134
Tabela 20 – Data de aquisição de imagens do satélite COSMO-SkyMed.....	136
Tabela 21 – Data de aquisição de imagens do satélite PAZ.....	137
Tabela 22 – Disponibilidade de imagens dos satélites ERS-1/2. ....	138
Tabela 23 – Disponibilidade de imagens do satélite Envisat. ....	139
Tabela 24 – Quadrículas utilizadas do PE3D.....	141
Tabela 25 – Estações meteorológicas com dados de Precipitação (P) e Temperatura (T).....	152
Tabela 26 – Monitoramento hidrológico (APAC) e dados litológicos (SIAGAS).....	154
Tabela 27 – Materiais cartográficos na identificação da expansão urbana. ....	154
Tabela 28 – Características das bandas utilizadas do Sentinel-2.....	155
Tabela 29 – Delimitação de imagens SAR.....	158
Tabela 30 – Informações de imagens <i>slaves</i> referente à cena <i>master</i> . ....	160
Tabela 31 – Informações de imagens <i>slaves</i> referente à cena <i>master</i> . ....	167

Tabela 32 – Informações de imagens <i>slaves</i> referente à cena <i>master</i> . .....	173
Tabela 33 – Informações de imagens <i>slaves</i> referente à cena <i>master</i> . .....	179
Tabela 34 – Informações envolvidas na série temporal. ....	183
Tabela 35 – Classificação da subsidência do solo do Recife. ....	190
Tabela 36 – Série temporal de informações piezométricas de poços selecionados da APAC. .....	211
Tabela 37 – Processo do meio físico relacionado à subsidência do solo do Recife. ....	218
Tabela 38 – Resultado GNSS e PSInSAR do monitoramento das estações RECF e PERC. .	245
Tabela 39 – Deslocamento em estações geodésicas RN e cadastral. ....	247
Tabela 40 – Deslocamento acumulado em áreas com pontos de alagamento. ....	251
Tabela 41 – Possibilidade de impactos da subsidência do solo em Recife. ....	253

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
ASI	<i>Agenzia spaziale italiana</i>
Chesf	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CINDACTA III	Terceiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle do Tráfego Aéreo
CMNE	Comando Militar do Nordeste
CNES	<i>French Space Agency</i>
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONDEPE	Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CRH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
DInSAR	<i>Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar</i>
DLR	<i>German Aerospace Center</i>
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DS	<i>Distributed Scatterer</i>
DSI	<i>Distributed Scatterer Interferometric</i>
Envisat	<i>Environmental Satellite</i>
ERS	<i>European Remote Sensing Satellite</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IHP	<i>International Hydrological Programme</i>
II COMAR	Segundo Comando Aéreo Regional
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
InSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
INTA	Instituto Nacional de Técnicas Aeroespaciales
iQPS	<i>institute for Q-shu Pioneers of Space</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>

JERS	<i>Japanese Earth Resource Satellite</i>
LaSII	<i>Land Subsidence International Initiative</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
MT-InSAR	<i>Multi Temporal Interferometry Synthetic Aperture Radar</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NAVSTAR-GPS	<i>NAVigation Satellite with Time And Ranging-Global Positioning System</i>
PE3D	Pernambuco Tridimensional
POLIMI	<i>Polytechnic University of Milan</i>
PRFN-5ªR	Procuradoria-Regional da Fazenda Nacional na 5ª região
PS	<i>Persistent Scatterers</i>
PSI	<i>Persistent Scatterers Interferometric</i>
PSInSAR	<i>Persistent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
Radar	<i>Radio Detection And Ranging</i>
Radarsat	<i>Radar Satellite</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RKA	<i>Russian Federal Space Agency</i>
RMR	Região Metropolitana do Recife
RN	Referência de Nível
SAOCOM	Satélite Argentino de Observación COn Microondas
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SBAS	<i>Small BAseline Subset</i>
Seasat	<i>Sea Satellite</i>
SFT	Superfície Física da Terra
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIR	<i>Shuttle Imaging Radar</i>
SIRGAS2000	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (época 2000,4)
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SqueeSAR	<i>Squee Synthetic Aperture Radar</i>
SR/Infraero	Superintendência Regional da Infraestrutura Aeroportuária
SR/INSS	Superintendência Regional do Instituto Nacional do Seguro Social
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
StaMPS	<i>Stanford Method for Persistent Scatterers</i>

SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TRF-5	Tribuna Regional Federal da 5ª Região
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WGLS	<i>Working Group on Land Subsidence</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma'$	Pressão efetiva em um ponto no solo
$\sigma$	Pressão total
$u$	Pressão no poro em solo saturado
$d$	Distância média
$c$	Velocidade da luz
$\Delta t$	Variação do tempo de ida e volta do sinal eletromagnético
$\theta$	Ângulo de observação
$\beta$	Ângulo de depressão
$i$	Ângulo de incidência
$\tau$	Comprimento do pulso eletromagnético
$\varphi$	Fase da onda eletromagnética
$A$	Amplitude da onda eletromagnética
$\lambda$	Comprimento de onda eletromagnética
$R$	Distância inclinada
$\Delta R$	Variação da distância inclinada
$B$	Linha de base interferométrica
$B_p$	Base paralela
$B_{\perp}$	Base perpendicular
$h$	Altura elipsoidal
$\alpha$	Ângulo em relação à horizontal
$\theta_o$	Ângulo formado entre $h$ e a distância $R$ inclinada
$\Delta\varphi_{\text{Int}}$	Diferença de fase interferométrica
$v$	Velocidade de deformação linear
$T$	Tempo
$X$	Eixo da direção Leste-Oeste
$Y$	Eixo da direção Norte-Sul
$Z$	Eixo da direção vertical
$\gamma$	Coerência interferométrica
$p$	Posição de cada <i>pixel</i> na imagem
$n$	Dimensão da janela avaliada <i>pixel</i> a <i>pixel</i>
$M$	Imagem <i>master</i>

$S$	Imagem <i>slave</i>
$d_o$	Vetor deslocamento
$d_H$	Vetor deslocamento horizontal
$d_V$	Vetor deslocamento vertical
$(u_x, u_y, u_z)$	Vetores unitários
$(dx, dy, dz)$	Direções vetoriais
$\varphi_{Des}$	Deformação superficial
$\varphi_{Top}$	Componente do erro topográfico residual
$\varphi_{Rui}$	Componente devido ao ruído
$\varphi_{Atm}$	Componente da fase atmosférica
$\varphi_{Orb}$	Componente da fase devido aos erros orbitais
$k$	Ambiguidade de fase
$d_{asc}$	Vetor de deslocamento na direção ascendente
$d_{des}$	Vetor de deslocamento na direção descendente
$i_{asc}$	Ângulo de incidência ascendente
$i_{des}$	Ângulo de incidência descendente
$D_A$	Dispersão da amplitude
$\sigma_A$	Desvio padrão da amplitude no tempo
$m_A$	Desvio médio da amplitude no tempo
$ASI$	Índice de estabilidade de amplitude

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação.....</b>	<b>32</b>
<b>1.2</b>	<b>Relevância do Tema.....</b>	<b>33</b>
<b>1.3</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>37</b>
<b>1.4</b>	<b>Formulação do Problema.....</b>	<b>39</b>
<b>1.5</b>	<b>Hipótese.....</b>	<b>42</b>
<b>1.6</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>42</b>
1.6.1	Objetivo Geral.....	42
1.6.2	Objetivos Específicos.....	42
<b>1.7</b>	<b>Estado da Arte.....</b>	<b>42</b>
<b>1.8</b>	<b>Materiais e Métodos.....</b>	<b>50</b>
<b>1.9</b>	<b>Resultados e Contribuições.....</b>	<b>51</b>
<b>1.10</b>	<b>Organização do Trabalho.....</b>	<b>52</b>
<b>2</b>	<b>SUBSIDÊNCIA DO SOLO.....</b>	<b>53</b>
<b>2.1</b>	<b>Águas Subterrâneas.....</b>	<b>53</b>
<b>2.2</b>	<b>Ação Geológica das Águas Subterrâneas.....</b>	<b>54</b>
<b>2.3</b>	<b>Características da Subsidência do Solo.....</b>	<b>55</b>
<b>2.4</b>	<b>Fatores da Subsidência do Solo.....</b>	<b>57</b>
<b>2.5</b>	<b>Subsidência do Solo em Sistema Aquífero.....</b>	<b>58</b>
2.5.1	Aquíferos Cársticos.....	58
2.5.2	Aquíferos Sedimentares.....	60
<b>2.6</b>	<b>Casos Conhecidos de Subsidência do Solo no Mundo.....</b>	<b>61</b>
2.6.1	Europa.....	62
2.6.2	Ásia.....	63
2.6.3	Oceanía.....	64
2.6.4	África.....	65
2.6.5	América do Norte.....	66
2.6.6	América do Sul.....	68
<b>2.7</b>	<b>Considerações Finais.....</b>	<b>70</b>
<b>3</b>	<b>CONTEXTOS DO RECIFE.....</b>	<b>72</b>
<b>3.1</b>	<b>Dos Fatos Históricos aos Dias Atuais.....</b>	<b>72</b>
<b>3.2</b>	<b>Indicadores Socioeconômicos.....</b>	<b>74</b>

<b>3.3</b>	<b>Características Territoriais e Fisiográficas .....</b>	<b>77</b>
3.3.1	Uso e Ocupação do Solo .....	78
3.3.2	Dados Climáticos .....	80
3.3.3	Unidades Geológico-Ambientais .....	81
3.3.4	Especificidades Hidrográficas .....	83
<b>3.4</b>	<b>Análise Hidrogeológica .....</b>	<b>86</b>
3.4.1	Exploração de Águas Subterrâneas .....	89
3.4.2	Situação dos Aquíferos .....	91
3.4.3	Desenvolvimento da Subsidência do Solo .....	94
<b>3.5</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>96</b>
<b>4</b>	<b>INTERFEROMETRIA DE RADAR POR SATÉLITE .....</b>	<b>99</b>
<b>4.1</b>	<b>Considerações sobre Radar .....</b>	<b>99</b>
<b>4.2</b>	<b>Radar de Abertura Sintética (SAR) .....</b>	<b>103</b>
4.2.1	Características das Imagens SAR .....	106
4.2.2	Distorções Ocasionadas pelo Terreno .....	109
<b>4.3</b>	<b>Princípio da Interferometria SAR (InSAR) .....</b>	<b>110</b>
4.3.1	Geometria InSAR.....	111
4.3.2	Corregistro .....	112
4.3.3	Interferograma.....	113
4.3.4	Fontes de Erro .....	114
<b>4.4</b>	<b>Técnicas InSAR à Instabilidade Superficial.....</b>	<b>115</b>
4.4.1	Interferometria Diferencial SAR (DInSAR) .....	116
4.4.2	Interferometria por Espalhadores Persistentes SAR (PSInSAR).....	118
4.4.3	Interferometria por Linhas de Base Curtas (SBAS) .....	122
4.4.4	Métodos híbridos .....	125
<b>4.5</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>127</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>130</b>
<b>5.1</b>	<b>Caracterização da Área de Estudo.....</b>	<b>130</b>
<b>5.2</b>	<b>Materiais Utilizados .....</b>	<b>131</b>
5.2.1	Recursos Computacionais .....	131
5.2.2	SARProz .....	132
5.2.3	Sentinel-1 .....	133
5.2.4	COSMO-SkyMed .....	134
5.2.5	PAZ.....	136

5.2.6	ERS-1/2 e Envisat .....	138
5.2.7	MDT de Alta Resolução Espacial .....	140
5.2.8	Efemérides Orbitais .....	141
<b>5.3</b>	<b>Método de Processamento InSAR .....</b>	<b>142</b>
5.3.1	Preparação de Dados .....	148
5.3.2	Pré-Processamento .....	148
5.3.3	Análise da APS .....	149
5.3.4	Processamento PS .....	150
5.3.5	Análise do Deslocamento .....	151
<b>5.4</b>	<b>Validação dos Resultados .....</b>	<b>151</b>
5.4.1	Informações Meteorológicas .....	151
5.4.2	Monitoramento Hidrológico e Dados Litológicos .....	153
5.4.3	Registro da Evolução Urbana .....	154
5.4.4	Levantamento Geodésico .....	155
<b>5.5</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>155</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>157</b>
<b>6.1</b>	<b>Dados Satelitais SAR da Área de Estudo.....</b>	<b>157</b>
<b>6.2</b>	<b>PSInSAR com Imagens Sentinel-1 .....</b>	<b>159</b>
6.2.1	Candidatos a PS na Estimativa do Efeito Atmosférico.....	162
6.2.2	Seleção de PS na Análise de Série Temporal .....	164
<b>6.3</b>	<b>PSInSAR com Imagens COSMO-SkyMed.....</b>	<b>165</b>
6.3.1	Candidatos a PS na Estimativa do Efeito Atmosférico.....	168
6.3.2	Seleção de PS na Análise de Série Temporal .....	170
<b>6.4</b>	<b>PSInSAR com Imagens PAZ Ascendente .....</b>	<b>172</b>
6.4.1	Candidatos a PS na Estimativa do Efeito Atmosférico.....	173
6.4.2	Seleção de PS na Análise de Série Temporal .....	176
<b>6.5</b>	<b>PSInSAR com Imagens PAZ Descendente .....</b>	<b>177</b>
6.5.1	Candidatos a PS na Estimativa do Efeito Atmosférico.....	179
6.5.2	Seleção de PS na Análise de Série Temporal .....	181
<b>6.6</b>	<b>Representação do Monitoramento .....</b>	<b>183</b>
<b>6.7</b>	<b>Validação dos Resultados PSInSAR.....</b>	<b>195</b>
6.7.1	Análise Meteorológica .....	195
6.7.2	Análise do Monitoramento Hidrológico e de Dados Litológicos .....	197
6.7.2.1	<i>Correlação entre Subsidência do Solo e Redução das Águas Subterrâneas.....</i>	<i>202</i>

6.7.3	Análise da Evolução Urbana.....	214
6.7.3.1	<i>Correlação entre Subsidência do Solo e Urbanização.....</i>	218
6.7.4	Análise de Levantamento Geodésico.....	237
<b>6.8</b>	<b>Efeitos da Subsidência do Solo em Recife.....</b>	<b>246</b>
6.8.1	Estruturas Geodésicas .....	246
6.8.2	Áreas de Alagamento .....	250
<b>6.9</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>253</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>255</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>257</b>
	<b>APÊNDICE A – IMAGENS SAR DO SATÉLITE SENTINEL-1.....</b>	<b>286</b>
	<b>APÊNDICE B – IMAGENS SAR DO SATÉLITE COSMO-SKYMED.....</b>	<b>290</b>
	<b>APÊNDICE C – IMAGENS SAR DO SATÉLITE PAZ.....</b>	<b>294</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A escassez de água superficial na cidade do Recife-PE impulsiona diversas pessoas a recorrer ao subsolo para obter recursos hídricos adicionais às suas necessidades de consumo. Essa realidade se mantém invariável à medida que rios, riachos, lagoas, reservatórios, são insuficientes para atender a crescente procura por fontes potáveis. Estima-se que 25% da população local dependem de águas subterrâneas para cumprir suas demandas (HIRATA; MONTENEGRO, 2018), presentes em: domicílios (instalações sanitárias, higiene, banho, ingestão, recreação); instituições e fundações (escolas, universidades, bancos, hospitais); estabelecimentos comerciais (shoppings, restaurantes, lojas, bares, mercados).

Nas últimas décadas, o aumento populacional do Recife aliado a períodos de crise hídrica com racionamento de água tem elevado à utilização de mananciais subterrâneos de forma expressiva. Em contrapartida, no entanto, essa captação hídrica ocorre, por vezes, de maneira indiscriminada em grande parte da cidade. Áreas nobres e densamente ocupadas na região Sul, a exemplo dos bairros de Boa viagem e Pina, e na região central, a exemplo dos bairros do Espinheiro, Graças e Aflitos, concentram a maioria de poços particulares – mas, sem o devido controle para garantir a sustentabilidade hídrica subterrânea.

Em geral, a gestão das águas subterrâneas em Recife se revela ainda muito limitada. A maior limitação se evidencia na identificação de poços, os quais são estimados em 13 mil (ALISSON, 2013). Entretanto, grande parte não é cadastrada e de existência desconhecida de órgãos administradores. A fragilidade no gerenciamento hídrico subterrâneo, ao longo de décadas, colabora para a exploração<sup>1</sup> demasiada de aquíferos. Como consequências, efeitos da retirada excessiva de água do subsolo, elevam as chances de originar uma série de problemas ambientais. Tais como: redução do nível potenciométrico, salinização, contaminação de lençóis subterrâneos e, em especial, rebaixamento da superfície – subsidência do solo.

A subsidência do solo é um processo preocupante que consiste no rebaixamento da superfície de forma irreversível. Várias cidades no mundo convivem com essa situação. Além de causas naturais, as principais ocorrências desse fenômeno são por ação humana. Entre elas, a exploração acentuada de aquíferos corresponde por cerca de 80% dos casos registrados (WANG, 2017). Quando a remoção acentuada de água compromete a possibilidade de recarga

---

<sup>1</sup> A palavra exploração difere de exploração. A primeira se caracteriza na retirada de recursos naturais conhecidos de modo antecipado, diferente da segunda que visa à descoberta antes da extração – utilizada no sentido de pesquisa e análise.

do aquífero tem, como consequência, o afundamento do solo devido à compactação do subsolo da Terra. Além disso, esse tipo de deformação do terreno pode indicar, também, redução permanente na capacidade de armazenamento de sistemas hídricos subterrâneos.

Em áreas urbanas, o risco da subsidência do solo se reveste de enorme preocupação. O adensamento do terreno pode causar impactos significativos às infraestruturas e ao meio ambiente, acarretar prejuízos econômicos e sociais, e comprometer a qualidade de vida das pessoas afetadas. Nesses aspectos, a zona Sul do Recife, por ser a localidade mais impactada pela exploração de água subterrânea, há tempos é motivo de atenção por parte da comunidade técnica-científica, órgãos gestores e habitantes. Isso porque, estudos nessa região revelam diminuição considerável do nível do sistema aquífero Cabo – o que acarreta em um cenário propício para o desenvolvimento da subsidência do solo.

Identifica-se nesse contexto que Recife vive a tragédia dos bens comuns. A soma dos interesses individuais das pessoas (perfuração de poços) leva ao esgotamento dos recursos hídricos subterrâneos comuns (exploração de aquíferos) e, além do mais, ocasiona problemas para todos (subsidência do solo). Assim, esta pesquisa faz uso de procedimentos geodésicos de precisão por meio de interferometria de Radar por satélite na análise da movimentação superficial. A utilização dessa tecnologia é vista como inovação às práticas atuais recorrentes, isto é, baseadas em técnicas terrestres de medição.

A ampla disponibilidade de dados interferométricos de Radar de missões por satélites, associados com métodos avançados de processamento, proporciona relevantes oportunidades para o entendimento de vários processos que causam deslocamentos da superfície – a exemplo da subsidência do solo. A evolução da técnica espacial de medição oportuniza testar hipóteses e investigar situações antes improváveis pela falta de informações adequadas. O desenvolvimento dessa tecnologia abre caminho para novas perspectivas no estudo da compactação de sedimentos compressíveis da planície costeira do Recife, em decorrência do declínio dos níveis de água subterrânea. Desta forma, monitorar e interpretar respostas às mudanças no uso de mananciais subterrâneos são partes integrantes e importantes no gerenciamento dos recursos hídricos – relevantes ao bem-estar da população.

## **1.1 Motivação**

Técnicas terrestres e aéreas de mensuração são limitadas para monitorar alterações superficiais. A maioria apresenta número reduzido de pontos de medição e baixa frequência temporal. Apesar do elevado custo financeiro, da participação de equipes de campo e do tempo despendido, informações obtidas por elas, em geral, são pontuais e restritas a pequenas

áreas. Em vista disso, modificações do relevo devido à intensa exploração de água subterrânea impõem novos desafios tecnológicos à avaliação da subsidência do solo.

A partir dessa constatação, nota-se nas últimas décadas ampliação de investigações científicas fundamentadas em procedimentos geodésicos de precisão por meio de teledetecção remota. Isso porque, de acordo com Torge e Müller (2012), a Geodésia se baseia na medição e no conhecimento de três propriedades essenciais da Terra: o campo gravitacional, a forma geométrica e a orientação no espaço. Nesse sentido, métodos geodésicos de observação por satélite têm uso recorrente em diversas regiões no mundo relativo às alterações do terreno de grandes áreas e de locais de difícil acesso.

Na época atual, no entanto, verifica-se na literatura científica ausência de trabalhos sobre a realização de mapeamento da subsidência do solo relacionado à exploração de água subterrânea em Recife mediante técnica geodésica por interferometria Radar de forma efetiva (BEDINI, 2020). Esta lacuna representa, portanto, motivação para empreender a pesquisa de forma pioneira por meio desse uso no estudo da deformação superficial. É útil na detecção de vulnerabilidades do solo uma vez que a tecnologia, ao longo do tempo, permite diagnósticos assertivos voltados às mudanças do terreno. Em especial, relacionadas às intervenções antrópicas nos recursos hídricos com impactos à superfície.

Além da análise do deslocamento superficial, a técnica InSAR possibilita de forma ampla o monitoramento das infraestruturas referentes à instabilidade, à segurança e ao controle – nas quais os procedimentos convencionais de observações geodésicas e geotécnicas têm atuação reduzida. Em vista disso, a tecnologia espacial é capaz de complementar os métodos tradicionais de medição vinculados ao monitoramento superficial-estrutural – e sem participação *in loco*. Permite, também, medir um número maior de observações através do registro de imagens orbitais com possibilidade de utilizar cenas de acervo. Isso oportuniza aumentar a densidade de pontos de medição e o intervalo temporal.

Na época atual, a InSAR se revela uma ferramenta quase indispensável para detectar mudanças da superfície em âmbito local e/ou global devido, sobretudo, às interferências humanas nos recursos hídricos. Desta forma, representa resposta eficaz à demanda por novidades tecnológicas quanto à avaliação da subsidência do solo.

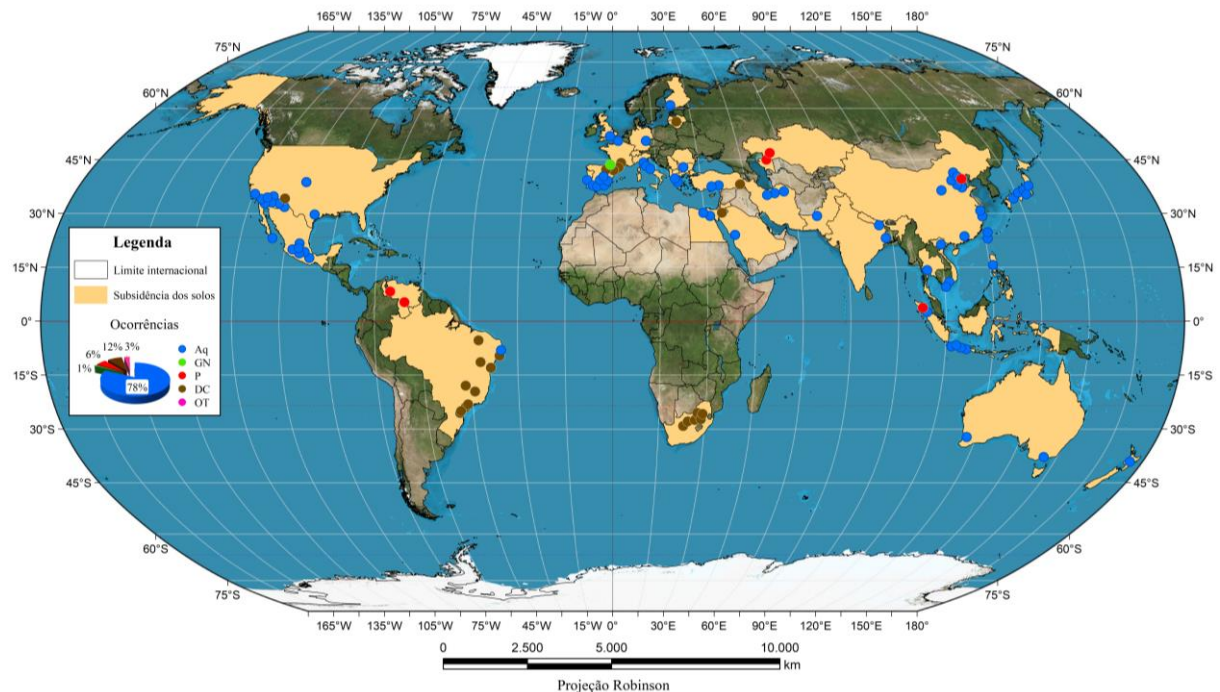
## **1.2 Relevância do Tema**

A subsidência do solo tem como característica fundamental o rebaixamento da superfície (nativa e/ou construída). O deslocamento vertical é lento e gradativo. Porém, ao longo dos anos seus efeitos podem se acumular e atingir valores significativos, isto é,

ocasionar danos à população e ao meio ambiente de forma irreversível. Segundo Prokopovich (1979), esse fenômeno está relacionado a fatores naturais e humanos.

A redução do nível do terreno ocorre em várias localidades ao redor do mundo em virtude, sobretudo, da influência antrópica relativa à extração de fluidos do subsolo: água, minérios, petróleo e gás natural. Entre esses, no entanto, a exploração demasiada de água subterrânea representa a principal causa da subsidência do solo no cenário mundial. Ou seja, alterações superficiais motivadas por retirada de água de aquíferos correspondem por quase 80% das ocorrências no planeta (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de subsidência do solo no mundo, ocorrências: Aquífero (Aq), Gás Natural (GN), Petróleo (P), Dissolução Cárstica (DC) e Oxidação de Tubulação (OT).



Fonte: adaptado de Wang (2017).

A Figura 1 aborda fatores naturais e antrópicos que favorecem o desenvolvimento da subsidência do solo relacionado à captação de água, à dissolução subterrânea e à oxidação de tubulação. Esse estudo reúne 178 registros ao todo de 34 países. No Brasil, entre os fatores antrópicos, não há relatos relevantes de tal fenômeno associado à produção de petróleo e gás natural. Mas, existem diversos casos por mineração e, em especial, por remoção excessiva de água subterrânea. Exemplos (COSTA *et al.*, 2005; SANTOS, 2008; SILVA *et al.*, 2016; ALVES, 2018; ROCHA, 2018; CPRM, 2019): subsidência cárstica (Mairinque-SP, Cajamar-SP, Sete Lagoas-MG, Almirante Tamandaré-PR, Teresina-PI, Bocaiuva do Sul-PR, Lapão-BA, Vera Cruz-BA, Vazantes-MG, Maceió-AL) e subsidência sedimentar (Recife-PE).

Em território brasileiro, observam-se poucos registros de subsidência sedimentar devido à extração de fluidos. Segundo Cabral, Santos e Pontes Filho (2006), essa ausência de documentos, no entanto, não se deve traduzir em inexistência do fenômeno. Pelo contrário, em algumas regiões do país a situação de exploração de aquíferos tem resultado em acentuado rebaixamento do nível de água. Exemplos (HEINE *et al.*, 2005; PERRONI; WENDLAND, 2008; LOURENCETTI; PRATES; DE OLIVEIRA, 2012): aquífero Guarani em São Carlos-SP e em Ivoti-RS, aquífero Bauru em São José do Rio Preto-SP. Logo, é provável que novas áreas impactadas por deslocamentos verticais do solo podem vir a acontecer.

A movimentação descendente do solo ocorre por vezes em proporção pequena. Atinge valores reduzidos da ordem de milímetros (considerados desprezíveis) até vários centímetros por ano. Essa movimentação pode desencadear grandes rebaixamentos em questão de segundos ou provocar a consolidação do terreno ao longo de vários períodos de tempo – de milhares a centenas de milhares de anos.

O abatimento do solo não implica risco imediato à vida. Porém, diversos estudos evidenciam que em locais de contínua extração de fluidos do subsolo pode gerar enormes prejuízos devido à ocorrência da subsidência do solo em zonas povoadas, atingidas por esse fenômeno. Em geral, os impactos relativos ao adensamento do terreno em áreas urbanas podem ser categorizados em (Tabela 1): infraestrutura, ambiental, econômico e social.

Tabela 1 – Características dos impactos da subsidência do solo.

<b>Categoria</b>	<b>Representação do impacto</b>	<b>Nível de impacto</b>
Infraestrutura	Danificação de construções e estradas	Direto
	Inclinação de casas e edifícios	
	Ruptura de tubulações subterrâneas e utilidades	
	Rebaixamento de casas e edifícios	
	Mau funcionamento do sistema de esgotos e drenagem	
	Deterioração de edifícios e infraestruturas	
Ambiental	Mudanças nos sistemas de fluxo de drenagem e canal de rio	Indireto
	Inundações costeiras frequentes	
	Expansão ampla de áreas de inundação	
	Áreas inundadas e infraestruturas	
	Aumento da intrusão da água do mar	
	Deterioração na qualidade da condição ambiental	
Econômico	Impossibilidade de recarga, extinção de aquíferos	Indireto
	Aumento no custo de manutenção de infraestrutura	
	Diminuição de valores da Terra e da propriedade	
	Abandono de edifícios e instalações	
Social	Perturbação de atividades econômicas	Indireto
	Comprometimento de abastecimento de água	
	Deterioração da qualidade ambiental e de vida	
	Suspensão de atividades diárias das pessoas	

Fonte: Abidin *et al.* (2015a, 2015b).

De maneira global, as áreas mais afetadas pela subsidência do solo se localizam nos Estados Unidos, México e Japão. Nesses países há registros de rebaixamento de (VÁZQUEZ; DE JUSTO, 2002): 880 cm no Vale de San Joaquin e 400 cm no Vale de Santa Clara, ambos na Califórnia; 850 cm na Cidade do México e 800 cm em Cuenca Chalco, ambos na Cuenca de México; e 457 cm nas terras baixas aluviais de Tóquio. Em todas elas a causa do fenômeno é devido à retirada de água subterrânea, na qual a Cidade do México possui uma das maiores taxas de afundamento no mundo com valor perto de 40 cm/ano (CIGNA; TAPETE, 2021).

Em relação à velocidade de rebaixamento, no momento atual, chama a atenção para Jacarta – capital da Indonésia. Ela é uma das principais cidades que sofre com impactos da subsidência do solo em função da intensa extração de água do subsolo. A movimentação descendente da superfície também é uma das mais rápidas no mundo, com valor em torno de 25 cm/ano. Além disso, a cidade convive com o fenômeno da elevação do nível do mar em cerca de 5 cm/ano. Estudos destacam que a junção desses dois processos aponta para uma expectativa de 95% de afundamento da parte Norte de Jacarta até o ano de 2050 (ABIDIN *et al.*, 2009, 2001, 2011, 2015a, 2015b, 2016; MEI; HIDAYAT, 2018).

Ademais, há grande probabilidade que muitas outras áreas de subsidência do solo venham a se desenvolver nas próximas décadas. Resultado, em especial, da acelerada exploração dos recursos hídricos para atender às crescentes demandas da população, do setor industrial e da agricultura de países desenvolvidos no mundo. Assim como, em países em desenvolvimento. Isso porque, a crescente procura por fontes alternativas de água potável é uma tendência para os próximos anos no contexto global.

Em razão da importância da subsidência do solo no âmbito mundial decorrentes de ações naturais e humanas vinculadas a processos hidrológicos, a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) desenvolve pesquisas sobre rebaixamento superficial a partir da criação de grupo de trabalho *ad hoc* sobre subsidência do solo (WGLS: *Working Group on Land Subsidence*), incluído no programa da década hidrológica internacional 1965-1974. No presente, o WGLS possui ampla projeção mundial e forte apoio dentro do Programa Hidrológico Internacional (IHP: *International Hydrological Programme*) da UNESCO (UNESCO, 2019).

O grupo de trabalho, WGLS, tem como objetivos: aprimorar o conhecimento técnico-científico necessário para identificar e caracterizar riscos relacionados à subsidência antrópica e natural; e, bem como, promover e facilitar o intercâmbio internacional de informações. Ou seja, para apoiar o desenvolvimento sustentável de recursos hídricos em áreas propensas à redução vertical da superfície quanto à elaboração, à implementação e à avaliação de risco e

de medidas de mitigação. Isso assegura o WGLS como um importante líder global na promoção da conscientização da subsidência do solo por meio de pesquisa científica e de sua aplicação ao monitoramento, à análise e ao gerenciamento desse fenômeno (GALLOWAY *et al.*, 2015).

A partir dessa conjuntura se observa que o controle sistemático e contínuo da subsidência do solo, de maior incidência em áreas urbanas motivada por retirada de água subterrânea, é necessário e essencial para o bem-estar da população mundial em áreas atingidas. O fenômeno eleva custos de manutenção e de reabilitação do ambiente e da infraestrutura. Como consequência, pode influenciar gravemente as condições do meio ambiente, gerar perdas econômicas significativas e comprometer a qualidade de vida das pessoas afetadas.

O estudo da subsidência do solo, nesse sentido, configura-se em um instrumento vital de gestão territorial-hídrica. Isso possibilita direcionar esforços para que os impactos (estrutural, ambiental, econômico e social) sejam identificados, atenuados e monitorados, com capacidade de orientar o poder público na adoção de medidas preventivas. Visto que, custos de medidas preventivas, de certa forma, são menores que aqueles para reparar danos quando não são tomadas as devidas precauções.

### 1.3 Justificativa

A utilização de interferometria de Radar por satélite para efetuar medições à deformação superficial apresenta inúmeras vantagens em relação às técnicas terrestre e aérea de observação (nivelamento geométrico, poligonação, posicionamento pelo GNSS<sup>2</sup>, gravimetria, aerolevanteamento LiDAR<sup>3</sup>, extensômetro, inclinômetro ou outros métodos instrumentais) – as quais apresentam limitações à avaliação da subsidência do solo. Isto é, relativo ao monitoramento de grandes extensões territoriais, ao quantitativo de pontos, às despesas operacionais e à periodicidade de mensuração.

Em relação aos benefícios InSAR, alguns correspondem às imagens SAR. Elas abrangem grandes áreas de recobrimento terrestre, com resolução espacial  $\leq 30$  m para a maioria dos satélites Radar. O registro envolve quadros únicos de tamanho 100 km x 100 km

---

<sup>2</sup> GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é o termo usual para se referir aos atuais sistemas de navegação por satélite: o norte-americano, NAVSTAR-GPS (*NAVigation Satellite with Time And Ranging-Global Positioning System*); o russo, GLONASS; o europeu, Galileo; o chinês, BeiDou/Compass; e o indiano, IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*).

<sup>3</sup> LiDAR (*Light Detection and Ranging*) possui grande capacidade de obtenção de dados (nuvem de pontos 3D) de forma precisa. Porém, altos custos operacionais inviabilizam sua atuação de forma prática. Tais como: sensor *laser*, especialistas, *software* de pós-processamento, repetição de aquisição regular, uso de aeronave tripulada ou Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) – conhecido por Drone ou por Aeronave Remotamente Pilotada (ARP).

via ERS (*European Remote Sensing Satellite*) ou Envisat (*Environmental Satellite*), ou de 250 km x 250 km por meio do Sentinel-1. Essas características permitem estudar fenômenos que causam mudanças do relevo a partir de uma perspectiva global, de forma sistemática para regiões imageadas do planeta.

Outra útil possibilidade ocorre quanto às observações interferométricas SAR, as quais apresentam: elevada densidade de pontos de medição e alta sensibilidade para detectar sutis deformações com precisão equiparáveis aos métodos instrumentais. Inclusive com capacidade para medir infraestruturas isoladas (edifícios, pontes, barragens, viadutos) e fenômenos relacionados à variação de pequenas áreas. Ademais, vale ressaltar a importância do sistema sensor Radar se situar fora da superfície. Ou seja, sem atuação *in loco*. Logo, o modo de aquisição de medição é isento de fenômenos relativos à deformação.

Mais um atrativo da tecnologia interferométrica SAR consiste na relação custo x benefício. A atividade operacional é menor e mais ágil – sem a necessidade de efetuar campanhas de campo. Conta, ainda, com a possibilidade de obtenção de imagens SAR e programas de processamento de dados, ambos, de forma gratuita para fins acadêmicos. Por consequência, operações logísticas ficam simplificadas com redução de custos operacionais (pessoal, equipamento, administração, manutenção) e, bem como, de tempo.

Adiciona-se, também, a extraordinária capacidade InSAR de medir deformação de fenômenos do passado, por meio de dados históricos de imagens SAR. Esse aspecto único possibilita estudos das variações superficiais longínquas e para as quais outras fontes de pesquisa podem estar indisponíveis. A disponibilidade de imagens varia muito de uma missão para outra e em diferentes partes da Terra. No entanto, há arquivos históricos SAR desde o ano de 1992 pelo satélite ERS com recobrimento de vastas áreas do planeta.

Além das utilidades, destaca-se que o uso InSAR pode ser combinado com técnicas aérea e terrestre de medição voltadas ao deslocamento superficial. Assim, variações de coordenadas no terreno ganham completude espacial-temporal. Isso permite expandir a potencialidade de monitoramento às mudanças planialtimétricas. Ou seja, ao longo dos referenciais horizontal e vertical em período específico do tempo. Essa combinação oportuniza obter um conjunto de observáveis com características importantes referentes à acurácia, à repetibilidade e à análise estatística de dados.

Nesse contexto, a aplicação InSAR se justifica por se tratar de uma ferramenta bastante vantajosa para mapeamento detalhado da deformação terrestre relativo à subsidência do solo. Possibilita uso exclusivo ou complementar aos métodos geodésicos e geotécnicos de observações clássicas e atuais.

#### 1.4 Formulação do Problema

Diversas regiões no mundo enfrentam situação de escassez de água superficial potável. Em alternativa, a água subterrânea assume papel de protagonismo como fonte de abastecimento. Para cenários de crise hídrica, a utilização de poços tubulares, ou artesanais, constitui-se em uma solução importante, de preferência, quando é empregada de maneira adequada e legal. O descumprimento de aspectos técnicos<sup>4</sup> e de instrumentos jurídicos<sup>5</sup>, que permitem a eficácia e o controle racional da exploração de aquíferos, é capaz de colocar em risco a disponibilidade hídrica do subsolo e, desse modo, gerar sérios problemas. Tais como: exaustão e contaminação de aquíferos, e desenvolvimento da subsidência do solo.

Em território nacional, constatam-se nas últimas décadas aumento do consumo de recursos hídricos subterrâneos em virtude das mudanças climáticas globais prolongadas e do crescimento populacional, ambos, responsáveis por elevar esse tipo de uso em: agricultura, abastecimento, indústrias, comércios, hospitais, escolas, repartições públicas, atividades recreativas. Ressalta-se, no entanto, que o atendimento à crescente demanda por água subterrânea advém, na maioria das vezes, de forma indiscriminada – com efeito negativo para aquíferos e, por consequência, para as necessidades dos habitantes via esse recurso.

Exemplo de obtenção inapropriada de água do subsolo ocorre na Região Metropolitana do Recife (RMR). Estimam-se mais de 14 mil poços, entre públicos e privados, equivalentes a 28% do consumo (ARANTES, 2016). Em relação aos municípios dessa região, Recife, capital de Pernambuco, concentra uma das maiores densidade de poços do país com estimativa de 13 mil captações – a maior parte não é cadastrada e de existência desconhecida de órgãos administradores (ALISSON, 2013). O sistema aquífero da planície sedimentar do Recife é composto por dois aquíferos profundos cada um de espessura média de 100 m, Cabo (ao Sul) e Beberibe (ao Norte), ambos de características semiconfinados e recobertos pelo aquífero freático de Boa Viagem de espessura média de 40 m (MONTENEGRO *et al.*, 2009). Todos eles são densamente explorados por poços ao longo de várias décadas.

---

<sup>4</sup> Por meio da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) constam as Normas Brasileiras: NBR 12212/2017 - Projeto de poço tubular para captação de água subterrânea; e NBR 12244/2006 - Poço tubular – construção de poço tubular para captação de água subterrânea.

<sup>5</sup> No Brasil, a administração das águas subterrâneas é de domínio dos estados de acordo com a Lei Federal nº 9.433 de 1997 - Lei das Águas (BRASIL, 1997). Exige-se conhecimento técnico e gestão. Antes, é preciso obter licença para perfuração de poço – concedida por órgãos estaduais competentes. No estado de Pernambuco a gestão das águas subterrâneas é exercida com base na Lei estadual nº 11.427 de 1997, nas Leis complementares nº 14.249 de 2010 e nº 17.672 de 2022, no Decreto nº 20.423 de 1998, em conjunto com: Agência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco (CPRH), Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco (SRH) e Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). As entidades são responsáveis pela concessão das licenças de instalação e operação de poços.

De forma histórica, tem-se registro de poços construídos em Recife no ano de 1930 no bairro de Boa Viagem (COSTA *et al.*, 2005). Para fins de abastecimento há registro de poços perfurado pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) e pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), entre outros, na década de 1970 (MONTENEGRO *et al.*, 2009). Nos anos seguintes se intensifica a construção de poços devido à oferta insuficiente de sistemas de abastecimento por águas superficiais, à falta de controle na perfuração e exploração, o aumento populacional e a fatores climáticos – com graves períodos de estiagens e regime de racionamento. Exemplo (MONTEIRO, 2000; CASTRO; HELLER; MORAIS, 2015): significativa diminuição das precipitações pluviométricas, em função do fenômeno *El Niño*<sup>6</sup>, para os períodos de 1979 a 1983, de 1992 a 1993 e de 1997 a 1999.

O expressivo crescimento da perfuração de poços na cidade do Recife, devido à procura por meios confiáveis de abastecimento, decorre da possibilidade regular de vazão e do *custo x benefício* de operacionalização, entre outras vantagens. Porém, nota-se que o ritmo descontrolado de bombeamento ocasiona diminuição dos níveis dos aquíferos – motivo de atenção para os bairros de Boa Viagem e Pina, ambos, localizados sobre o sistema aquífero Cabo. De acordo com Costa e Costa Filho (2004), de 1975 a 1985 o declínio médio do nível do aquífero Cabo é de 17 m, ou seja, 1,7 m por ano; de 1985 a 1995 é de 33 m, isto é, 3,3 m por ano; e de 1995 a 2000 é de 43 m, ou seja, 8,6 m por ano.

Na zona Sul do Recife, onde estão situados os bairros de Boa Viagem e Pina, reside a população de alta renda e a maior concentração do número de poços da cidade. A fim de conter a perfuração indiscriminada de poços e o uso excessivo de água subterrânea, a SRH adota desde o ano de 2000 o mapa de zoneamento explorável das águas subterrâneas – aprovado pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CRH) através da Resolução: CRH nº 04/2000 de 12 de setembro de 2000. Por ela, a cidade do Recife é dividida em zonas (A, B, C, D, E, F) com limites máximos de vazão que podem ser explorados, exceto na zona A (Figura 2) a qual está proibida a perfuração de poços devido ao processo de exaustão que o aquífero Cabo é submetido (COSTA *et al.*, 1998a; MONTEIRO; COSTA; FRANÇA, 2001).

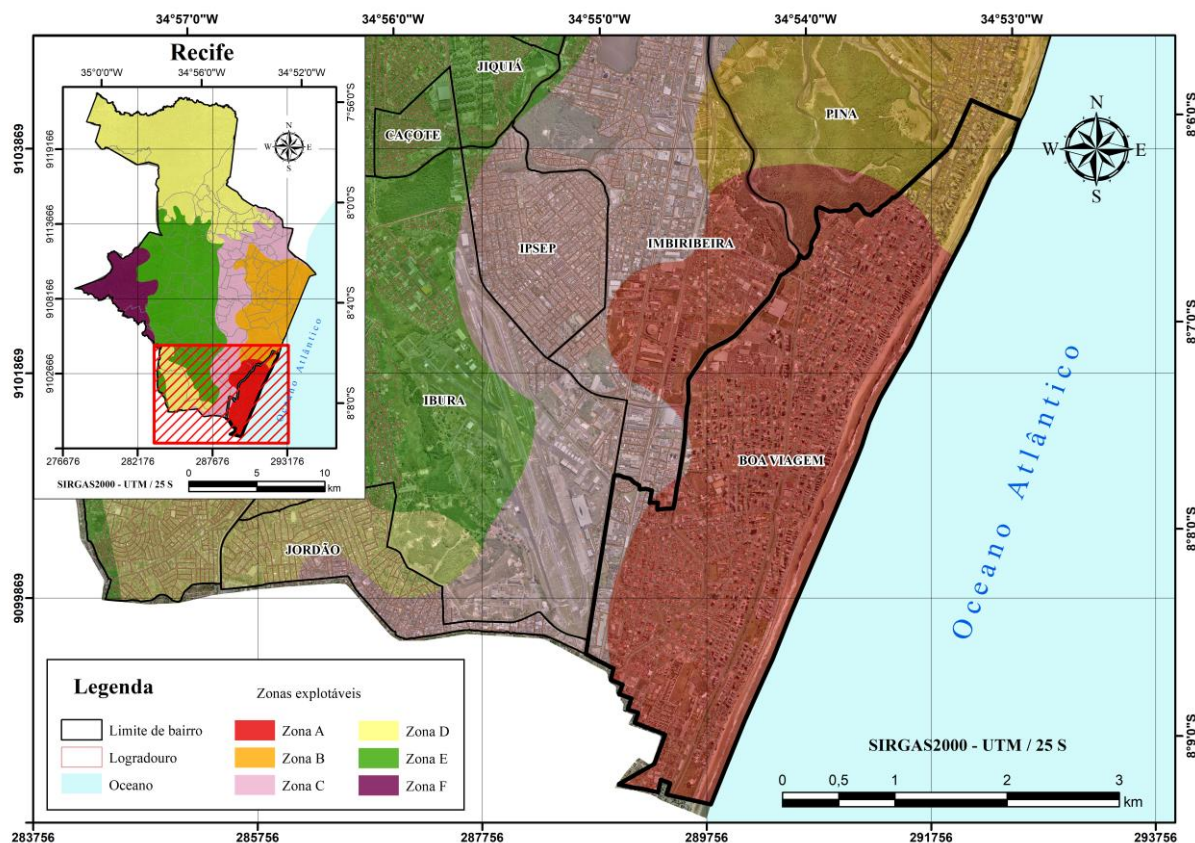
Na Figura 2, a redução acentuada dos níveis do aquífero Cabo devido à retirada de água em quantidade superior a sua capacidade de recarga causa preocupação quanto à ocorrência da subsidência do solo na extensão da zona A (COSTA *et al.*, 2005). Como resultado, pode implicar na diminuição da oferta de água e no comprometimento da segurança

---

<sup>6</sup> O *El Niño* é um fenômeno natural categorizado como uma “anomalia climática”. Ele ocorre em intervalos irregulares que costumam variar entre dois e setes anos, e tem origem no aquecimento anormal das águas do Oceano Pacífico. No Brasil, esse evento provoca secas em algumas áreas e o aumento das chuvas em outras. Também ocasiona profundas alterações meteorológicas – com períodos de seca na região Nordeste.

hídrica. O risco de rebaixamento da superfície do Recife referente à compactação de camadas subjacentes porosas relativos à exploração de água de reservatórios subterrâneos é motivo de diversos estudos por técnicas geodésicas de medição terrestre (ROMÃO *et al.*, 2003; SANTOS, 2005; SANTOS *et al.*, 2010; SANTOS; CABRAL; PONTES FILHO, 2012; LUNA *et al.*, 2014, 2015, 2017, 2018, 2021).

Figura 2 – Mapa de zoneamento explotável das águas subterrâneas.



Fonte: Resolução nº 04 (CRH, 2000); dados geoespaciais (PCR, 2013a, 2016; IBGE, 2018a, 2018b).

Até o momento o estudo da subsidência do solo na capital pernambucana ocasionada pela captação hídrica se concentra em métodos instrumentais do tipo: GNSS e nivelamento geométrico de precisão. Tais procedimentos, entretanto, são responsáveis por investigar de forma pontual e restrita o rebaixamento do solo. Quanto a isso, estudos recentes têm identificado afundamento de 3,86 cm em valor de altitude para um dos níveis analisados entre os anos de 1958 e 2015. Logo, estima-se que a velocidade de deslocamento vertical do solo é cerca de -0,68 mm/ano para área da zona A (LUNA *et al.*, 2017, 2018).

Diante desse cenário é importante utilizar uma técnica geodésica de observação para detectar na totalidade da cidade do Recife áreas susceptíveis ao rebaixamento do terreno em maior quantidade de pontos de medição e alta regularidade temporal. Isso porque, mesmo

após a implantação do mapa de zoneamento explorável das águas subterrâneas, segundo Montenegro *et al.* (2009), a oferta insuficiente de água a partir dos sistemas em operação e a consequente pressão da população impedem que um controle mais rigoroso referente à perfuração e à exploração de poços seja efetivado.

Assim, nessa perspectiva investigativa emerge a seguinte questão: qual procedimento fundamentado em Geodésia de precisão pode ser utilizado na avaliação espacial-temporal da subsidência do solo da cidade do Recife?

## 1.5 Hipótese

Face ao questionamento anterior, tem-se a subseqüente hipótese:

- A técnica geodésica de medição por teledetecção remota orbital InSAR se revela adequada para o estudo do monitoramento da subsidência do solo, capaz de mensurar variações milimétricas da superfície da Terra.

## 1.6 Objetivos

A pesquisa tem como objetivos:

### 1.6.1 Objetivo Geral

Avaliar a subsidência do solo da planície costeira do Recife por meio da tecnologia InSAR. O estudo envolve a utilização de dados interferométricos de Radar por satélite de missões científicas, o que implica propriedades comuns e distintas de produtos SAR referentes: ao período, ao sensor, à geométrica, ao comprimento de onda e à resolução espacial. Pretende-se, desta forma, efetuar análises de processamentos e aplicar a mais adequada em relação à quantidade de pontos de observação e à incerteza associada.

### 1.6.2 Objetivos Específicos

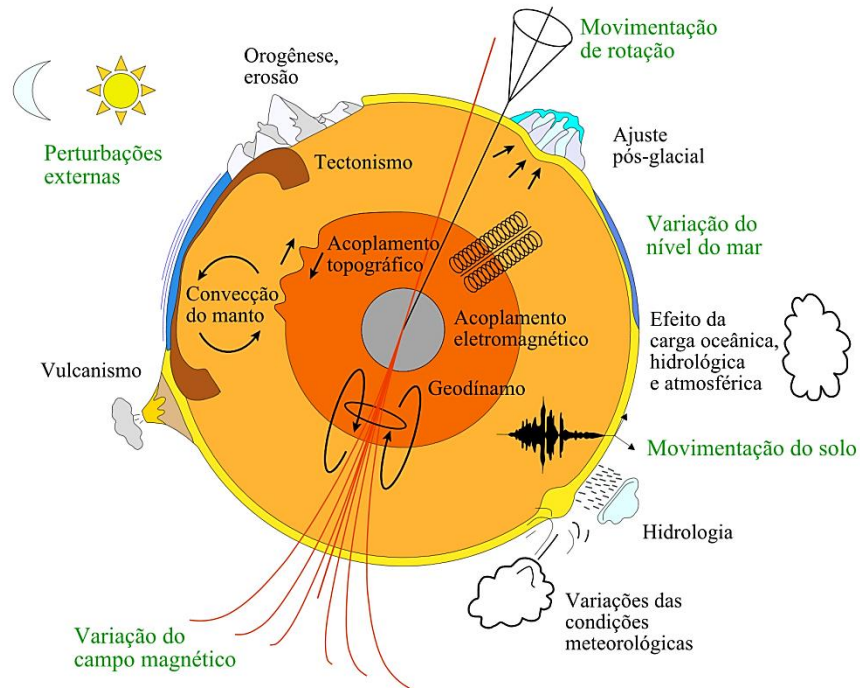
- Analisar a densidade-frequência de observáveis interferométricas SAR;
- Identificar áreas potenciais de risco relativo à movimentação superficial; e
- Validar resultados de deslocamento por meio de técnicas terrestres de medição.

## 1.7 Estado da Arte

Desde a formação da Terra, a parte externa da crosta terrestre (oceânica e continental) é modelada por ações naturais (hidrológicas, vulcanismos, tectonismos, sismicidades) e perturbações externas (efeitos solar e lunar), ambas, de milhões de anos; e por ações

antrópicas (extração mineral, exploração de aquíferos, exploração de petróleo e de gás natural) de centena a milhares de anos. Tais efeitos interferem na forma, na gravidade e na estrutura terrestre (TARBUCK; LUTGENS, 2005; TEIXEIRA *et al.*, 2000, 2009; TURCOTTE; SCHUBERT, 2014); bem como, afetam a rigidez do planeta e ocasionam instabilidade à superfície física de forma dinâmica (Figura 3).

Figura 3 – Representação simplificada de ações que influenciam a dinâmica terrestre.



Fonte: Van Camp e De Viron (2005).

Alterações do terreno motivadas por fatores naturais e intervenções humanas colocam em risco a vida e geram problemas sociais, econômicos e ambientais. Exemplos: deslizamento de terra; processos erosivos; derretimento de calotas polares; enchentes e inundações; terremotos; erupções vulcânicas; tsunamis, soerguimento de terrenos; subsidência do solo. A correta compreensão desses fenômenos exige estudos interdisciplinares na investigação de causas e na obtenção de soluções quanto à deformação da superfície. Nesse propósito, a efetividade no estudo da dinamicidade da Terra advém do desenvolvimento integrado de ciências, técnicas e ferramentas – a fim de identificar e monitorar elementos (internos e externos) modificadores do relevo.

No que diz respeito ao progresso de estudos reservados à detecção de deslocamento do solo, verificam-se interessantes possibilidades investigativas da Terra em âmbito global a partir da utilização de interferometria de Radar por satélite de abertura sintética. A tecnologia

potencializa avanços científicos às avaliações precisas da modificação da superfície com elevada densidade de pontos de medição e alta frequência temporal.

Os sistemas de imageamento por Radar operam na faixa restrita do espectro eletromagnético, denominado microondas. Eles são capazes de imagear o terreno independente da iluminação solar devido à capacidade em utilizar a própria fonte de energia – caracterizado como sensor ativo. De acordo com Moreira (2011), esses sistemas transmitem pulsos de microondas na direção perpendicular à trajetória da plataforma. A direção de transmissão do pulso é conhecida como *range* ou alcance. O sensor é capaz de determinar as distâncias relativas de objetos na superfície ao longo dessa direção a partir da análise do tempo que o pulso emitido leva para viajar até o alvo e retornar ao sensor.

De modo histórico, a utilização de Radar por satélite tem origem com o lançamento do Seasat (*Sea Satellite*) em 1978 – primeiro satélite projetado para atuar sobre os oceanos (ELACHI *et al.*, 1982). Logo depois a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) inicia o programa SIR (*Shuttle Imaging Radar*), que se passa em uma série de voos de curta duração das aeronaves: SIR-A em 1981, SIR-B em 1984 e SIR-C em 1994. Missões mais longas surgem com: Almaz-1 em 1981, Almaz-2 em 1991, ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite-1*) em 1991, JERS-1 (*Japanese Earth Resource Satellite-1*) em 1992, ERS-2 em 1995 e Radarsat (*Radar Satellite*) em 1995. Na época atual, informações obtidas por essas missões se mantêm presente em aplicações de estudos temporais.

Apenas em 1987 ocorre pela primeira vez de maneira exitosa o uso InSAR com dados espaciais em diferentes instantes do tempo por Li e Goldstein; isto é, em modo de repetição de aquisição de observações (*repeat-pass*). O satélite revisita a mesma área após certo período a partir de imagens históricas do Seasat (LI; GOLDSTEIN, 1987, 1990; PRATI *et al.*, 1990). Em seguida, Gabriel e Goldstein (1988) e Goldstein, Zebker e Werner (1988) executam procedimentos semelhantes com dados do ônibus espacial SIR-B. Essas primeiras aplicações se direcionam principalmente na estimativa da elevação da topografia, com precisões comparáveis aos métodos ópticos existentes. Acentua-se, no entanto, que os experimentos com passagem repetida são responsáveis por abrir caminho para inovações extraordinárias quanto ao monitoramento de deformações (HANSSEN, 2001).

De forma revolucionária, a capacidade InSAR para observar mudanças superficiais vem à tona em 1989 por Gabriel, Goldstein e Zebker a partir da aplicação da interferometria diferencial SAR, acrônimo DInSAR (*Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar*). Tal ferramenta é usada para detectar pequenos movimentos da elevação superficial ( $\leq 1$  cm) via imagens do Seasat, faixa de 50 km (GABRIEL; GOLDSTEIN; ZEBKER, 1989). A

originalidade desse trabalho simboliza ponto de partida na promoção de estudos subsequentes de fenômenos relacionados ao deslocamento do relevo (MASSONNET *et al.*, 1993, 1994; ZEBKER *et al.*, 1994).

A técnica DInSAR permite que o sinal topográfico obtido de interferograma topográfico (modelo de elevação) seja escalonado para as condições do interferograma de deformação e, na sequência, subtraído deste para gerar o interferograma diferencial (GABRIEL; GOLDSTEIN; ZEBKER, 1989) com precisão centimétrica, ou melhor, para Radars de banda L, banda C e banda X. O interferograma corresponde à diferença de fase entre duas imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*) coerentes da mesma área. O resultado é uma imagem com informação sobre a topografia e às vezes sobre as variações temporais (MASSONNET; FEIGL, 1998), em que consta a informação de deformação do solo.

Em geral, o processo DInSAR recorre à interação dos sinais eletromagnéticos refletidos do terreno por meio de duas aquisições espaciais de imagens para medir distâncias precisas entre a posição do sensor e a superfície para, por exemplo, derivar topografia e detectar mudanças sutis do terreno (LU; KWOUN; RYKHUS, 2007). O pioneirismo da aplicação interferométrica diferencial SAR à subsidência do solo devido à exploração de aquífero, surge da publicação de Galloway *et al.* (1998) em Antelope Valley, Califórnia, Estados Unidos. Os autores fazem uso da tecnologia para estimar e quantificar alteração do solo sobre sistema aquífero, no qual a redução dos níveis de água resulta na compactação de sedimentos compressíveis do terreno. Momento depois, estudos similares ocorrem com sucesso por: Amelung *et al.* (1999); Hoffmann *et al.* (2001); Bawden *et al.* (2001); Watson, Bock e Sandwell (2002); Hoffmann (2003); Schmidt e Bürgmann (2003).

A maior limitação do método DInSAR para estudos de fenômenos que causam deformação à superfície reside em fatores que comprometem a qualidade do interferograma. São eles: decorrelação (temporal e geométrica) e efeitos atmosféricos; uma vez que levam a perda de coerência e diminuição da precisão na medição da diferença de fase interferométrica (ZEBKER; VILLASENOR, 1992; MASSONNET; FEIGL, 1998; HANSSSEN, 2001; BENEVIDES, 2009). Isso ocorre com maior incidência em áreas de vegetação de interferogramas. Para contornar essas deficiências, comunidades científicas desenvolvem pesquisas em termos de melhorias de DInSAR com base na elaboração de algoritmos de processamento de imagem.

Como consequência da evolução DInSAR, surgem técnicas multitemporais InSAR (MT-InSAR: *Multi Temporal Interferometry Synthetic Aperture Radar*). A primeira é o método avançado PSInSAR (*Persistent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture Radar*),

desenvolvido e patentado em 1999 por um grupo de Engenheiros Eletrônicos da Universidade Politécnica de Milão (POLIMI), Itália. A ferramenta é referência para o monitoramento de deformação devido à escolha, à precisão e à confiabilidade de alvos (pontos ou *pixels*). O método consiste na identificação de *pixels* com fase estável nas imagens de série temporal de interferogramas, que possibilita gerar uma espécie de “rede natural” do tipo GPS para monitorar a deformação em cada ponto (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 1999). Porém, isolada das componentes restantes do sinal Radar que são ligadas à topografia, à atmosfera e o ruído (COLESANTI *et al.*, 2003a). Pontos ou *pixels* com essas características são denominados de espalhadores persistentes (PS: *Persistent Scatterers*), referentes à técnica espalhadores persistentes interferométricos (PSI: *Persistent Scatterers Interferometric*).

A particularidade da tecnologia PSInSAR está em analisar a evolução temporal de fase do PS coerente dentro de uma célula de resolução, cuja as amplitudes e fases se mantêm estáveis ao longo de um extenso conjunto de imagens – organizadas como pilhas de dados (*stacks*) – para gerar interferogramas diferenciais em relação a uma imagem de referência comum a todas. Alvos que se comportam como PS são refletores de Radar estáveis, isto é, estruturas construídas pelo homem (postes de rua, torres de transmissão, edifícios, pontes, taludes, dutos expostos, estruturas de telhado) e elementos ambientais (afloramentos rochosos, superfícies do solo não vegetados, rochedos, encostas) (GAMA *et al.*, 2013). O critério de seleção de PS em áreas (urbanas e/ou rochosas) possibilita extrair informação útil de fase e medir deformação com precisão milimétrica (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 2001) e às vezes melhor que 0,1 mm/ano em benefício do longo período de tempo de PS estável (COLESANTI *et al.*, 2003a, 2003b).

O modo PSInSAR representa a primeira técnica a selecionar PS com correção a descorrelação temporal e a geométrica para estimar deformação. A principal restrição assenta em PS que exibem alta coerência, mesmo em linhas de base grande, o que normalmente leva a baixa densidade de pontos de medição em áreas não urbanas. Nesse sentido, a técnica PSI em questão simboliza paradigma inspirador para desenvolvedores (acadêmicos e particulares) em conduzir experimentos e testes voltados à evolução do método – em razão de suas vantagens no estudo de deslocamento. Na atualidade, encontram-se na literatura cerca de vinte modelos de melhorias de PSI (CROSETTO *et al.*, 2016) fruto da interação de várias equipes de pesquisas em estudar e promover maior desenvolvimento interferométrico SAR.

Em ordem cronológica de importância, a primeira evolução do PSInSAR surge em 2002 denominada de SBAS (*Small BAseline Subset*). Proposto por Berardino *et al.* (2002), a técnica reúne vários subgrupos de pequenas linhas de base. Tem como objetivos: diminuir a

descorrelação geométrica provocada pela separação orbital entre as aquisições, reduzir o ruído do sinal e, por consequência, melhorar a coerência de interferogramas. O resultado é uma amostragem espacial e temporal aumentada em relação à abordagem PSInSAR. Mas, a princípio, esse método é inadequado para detectar deformações em imagens de série temporal em grande área. Este aspecto é resolvido por Lanari *et al.* (2004a) que expõem uma versão SBAS estendida para trabalhar com interferogramas de resolução espacial de 100 m.

Outra contribuição significativa ao PSI é apresentada por Hooper *et al.* (2004). Eles propõem a seleção de PS com base nas características de fase, útil para determinar alvos estruturais (construídos por ação humana) de baixa amplitude. Como vantagens, evita-se adoção de modelos de tendência de deformação e possibilita observação de deslocamentos não lineares. Tempo depois, Hooper (2008) realiza evolução desses métodos multitemporais InSAR ao realizar uso combinado – PSInSAR e SBAS – para extrair sinal de deformação de pontos com fase estável. Sem isso, a identificação plena de deformação apenas por uma das técnicas é inviável. O desenvolvimento origina o pacote de *software* conhecido por StaMPS (*Stanford Method for Persistent Scatterers*) de uso extensivo para fins acadêmicos.

Em 2011, ocorre mais uma evolução do PSI: Ferretti *et al.* (2011) apresentam o algoritmo denominado de SqueeSAR com o objetivo de superar os limites de PSInSAR em quantidade de pontos amostrais no terreno. Essa técnica híbrida realiza processamento combinado e análise estatística em relação aos espalhadores persistentes (PS) e espalhadores distribuídos (DS: *Distributed Scatterer*). O resultado é a melhora da densidade e da qualidade de pontos quanto à movimentação superficial, com aplicação relevante para áreas não urbanas. No momento, o algoritmo SqueeSAR está sob a patente da empresa *Tele-Rivelamento Europa* (TRE) Altamira ([www.site.tre-altamira.com](http://www.site.tre-altamira.com)) que realiza serviços de monitoramento de deformação. Porém, outras abordagens seguem procedimentos semelhantes por: Goel e Adam (2014); Lv *et al.* (2014); Mullissa *et al.* (2018).

Em situações em que a coerência interferométrica é demasiada fraca para se conseguir obter pontos de medição por meio de técnicas interferométricas, existe a possibilidade de utilização de refletores artificiais posicionados em locais estratégicos. Isso se apresenta como uma solução complementar para a detecção de movimentos do solo (BENEVIDES, 2009). O uso permite reduzir efeitos provocados pela descorrelação geométrica e temporal na área de posicionamento do refletor artificial (XIA; KAUFMANN; GUO, 2002; COLESANTI *et al.*, 2003a, 2003b). Ademais, a observação em conjunto com GPS proporciona monitorar deformações com precisão elevada tanto em deslocamento vertical, quanto horizontal (FERRETTI *et al.*, 2007a; MARINKOVIC *et al.* 2007; QUIN; LOREAUX, 2013).

No contexto geral, as melhorias obtidas em termos de PSI se referem a cinco pontos principais de acordo com Crosetto *et al.* (2016). Primeiro: avanço na seleção de *pixels* para aumentar a densidade e a qualidade de medições através de PS e DS, e alvos parcialmente coerentes. Segundo: aperfeiçoamento de algoritmos de desenrolamento de fase 2D e 3D. Terceiro: uso de modelos de deformação mais flexíveis e precisos. Quarto: evolução de algoritmos para estimar a componente da fase atmosférica. Por último: capacidade de gerar produtos de deformação em grande escala.

Observa-se, também, que a maioria da teoria e operacionalização dos sistemas Radar está presente na Engenharia Elétrica devido às fases de: projeto; fabricação e construção de sensores; antenas e equipamentos de geração; e processamento de sinal (LAUKNES, 2004; PERISSIN *et al.*, 2004). Porém, a aplicação e interpretação em problemas reais dependem de especialistas de outras áreas e ramos de conhecimentos. Exemplos: Engenharia Civil (Hidrologia, Geotécnica, Estruturas, Hidráulica, Construção Civil, Infraestrutura de Transportes); Geociências (Geologia, Geodésia, Geofísica, Sensoriamento Remoto, Fotogrametria, Hidrogeologia); Engenharia Sanitária (Recursos Hídricos, Águas Subterrâneas e Poços, Controle de Enchentes e de Barragens); Oceanografia; Engenharia de Minas.

Na linha investigativa se evidencia o caráter interdisciplinar de produtos SAR em diversas aplicações às deformações superficial e estrutural (Tabela 2). Isso revela a versatilidade, a confiabilidade e o amadurecimento da tecnologia InSAR em diferentes finalidades ao redor do mundo de forma usual. Aliás, em consequência da percepção que o planeta se encontra em constantes mudanças, satélites interferométricos SAR asseguram visão privilegiada às alterações do terreno com capacidade de observação plena da Terra.

Tabela 2 – Aplicação da tecnologia InSAR.

(continua)

<b>Área principal</b>	<b>Subárea</b>	<b>Referência</b>
Engenharia	Área urbana	Lanari <i>et al.</i> (2004b); Vallone <i>et al.</i> (2008); Herrera <i>et al.</i> (2009a); Gernhardt <i>et al.</i> (2010)
	Infraestruturas	Ferretti <i>et al.</i> (2000a); Lan <i>et al.</i> (2012); Sousa e Bastos (2013); Crosetto <i>et al.</i> (2015)
	Edifício	Gernhardt e Bamler (2012); Karila <i>et al.</i> (2013); Gernhardt, Auer e Eder (2015)
	Barragem	Wang <i>et al.</i> (2011); Tomás <i>et al.</i> (2013); Di Martire <i>et al.</i> (2014); Sousa (2016)
	Construção	Strozzi, Teatini e Tosi (2009); Zhao <i>et al.</i> (2009); Liu, Sowter e Niemeier (2014)
Geofísica	Tectonismo	Bürgmann <i>et al.</i> (2006); Lanari <i>et al.</i> (2007); Motagh <i>et al.</i> (2007); Reale <i>et al.</i> (2011)
	Vulcanismo	Massonnet, Briole e Arnaud (1995); Lu <i>et al.</i> (1997); Hooper <i>et al.</i> (2004); Bignami <i>et al.</i> (2013)

Tabela 2 – Aplicação da tecnologia InSAR.

(conclusão)

Área principal	Subárea	Referência
Soerguimento de terrenos/Subsidência do solo	Mineração	Colesanti <i>et al.</i> (2005); Herrera <i>et al.</i> (2007); Ketelaar (2009); Wegmüller <i>et al.</i> (2010)
	Reservatório	Vasco, Ferretti e Novali (2008); Vasco <i>et al.</i> (2010); Teatini <i>et al.</i> (2011)
	Eventos de inundação	Dixon <i>et al.</i> (2006); Boni <i>et al.</i> (2007); Teatini <i>et al.</i> (2012); Abidin <i>et al.</i> (2015b); Dumitru <i>et al.</i> (2015)
	Exploração de aquífero	Galloway <i>et al.</i> (1998); Amelung <i>et al.</i> (1999); Ferretti, Prati e Rocca (2001); Hoffmann (2003)
Deslizamento de terra	Inventário	Cascini, Fornaro e Peduto (2010); Notti <i>et al.</i> (2010); Righini, Pancioli e Casagli (2012)
	Monitoramento	Farina <i>et al.</i> (2006); Herrera <i>et al.</i> (2009b); Tofani <i>et al.</i> (2013); Mura <i>et al.</i> (2014)
	Análise e modelagem	Herrera <i>et al.</i> (2011); Bovenga <i>et al.</i> (2012); Rosi <i>et al.</i> (2013); Cigna, Bianchini e Casagli (2013)

Fonte: Hanssen (2001); Crosetto *et al.* (2016).

A disseminação InSAR em âmbito global, conforme Tabela 2, atesta a relevância da tecnologia em distintas causas à deformação, principalmente em grandes áreas com elevada cobertura de pontos de medição e alta periodicidade temporal. Na data atual, passados mais de vinte anos da primeira publicação de Galloway *et al.* (1998), é possível encontrar em obras científicas (livros, periódicos, anais) centenas de trabalhos com utilização de dados interferométricos SAR em estudos da subsidência do solo decorrente da exploração de recursos hídricos subterrâneos em múltiplas regiões do planeta.

Para o futuro, as expectativas InSAR se projetam otimistas. A indústria espacial planeja novas missões a partir da construção de satélites SAR. Exemplos: NISAR<sup>7</sup> (NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar); ICEYE<sup>8</sup>; Capella Space<sup>9</sup>; COSMO-SkyMed 2ª Geração<sup>10</sup> (COSMO: *CO*nstellation of *S*mall *S*atellites for the *M*editerranean basin *O*bservation); XpressSAR<sup>11</sup>; iQPS<sup>12</sup> (*institute for Q-shu Pioneers of Space*); PredaSAR Corporation<sup>13</sup>. A maior disponibilidade de dados aliada ao aprimoramento de técnicas de medição interferométrica orbital deve intensificar a aplicabilidade InSAR à totalidade de fenômenos que causam deformação superficial. Estimam-se, portanto, oportunidades sem iguais quanto à detecção e ao monitoramento da subsidência do solo de forma quase imediata para qualquer lugar do planeta Terra.

<sup>7</sup> Em construção, o satélite NISAR deve operar nas bandas S e L. A previsão de lançamento é para 2022.

<sup>8</sup> A empresa ICEYE projeta uma rede de 18 satélites nos próximos anos, com revisita a cada 24 horas.

<sup>9</sup> A empresa Capella planeja uma constelação de 36 satélites, com resolução de 50 cm e revisita de uma hora.

<sup>10</sup> Aguarda-se o lançamento de mais três satélites da 2ª geração (CSG 2, 3 4) para os próximos anos.

<sup>11</sup> A XpressSAR pretende lançar em 2022 quatro satélites de banda X com revisita de um a quatro horas.

<sup>12</sup> Em 2025, pretende operar 36 satélites para observar quase qualquer ponto do mundo em cerca de 10 minutos.

<sup>13</sup> Planeja implantar uma constelação inicial de 48 satélites para obter imagens da Terra em poucos minutos.

## 1.8 Materiais e Métodos

A prática investigativa da pesquisa utiliza um conjunto de dados orbitais SAR com nível de processamento SLC (*Single-Look Complex*) formado por: 100 imagens COSMO-SkyMed da Agência Espacial Italiana (ASI), 135 imagens Sentinel-1 da Agência Espacial Europeia (ESA) e 41 imagens PAZ (19 ascendente e 22 descendente) da Agência Espacial Espanhola (INTA) – produtos obtidos sem custo de aquisição. Empregam-se tais cenas no estudo da subsidência do solo do Recife ao longo de mais de 10 anos de monitoramento, de 6 de julho de 2011 a 21 de novembro de 2021.

As informações satelitais são operadas no programa científico SARProz (*SAR PROcessing tool by perIZ*) de processamento InSAR. O aplicativo usa o método PSInSAR na avaliação estatística coerente de pontos de medição PS para analisar série temporal de interferogramas, adquiridas de pares interferométricos relativo à cena principal *master* com as secundárias *slaves*. Em geral, a sequência metodológica de processamento abrange as etapas (Figura 1.4): dados de entrada, execução de rotinas e exportação de resultados.

Figura 4 – Processo metodológico.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

## 1.9 Resultados e Contribuições

A utilização de interferometria SAR consiste na primeira investigação efetiva da técnica PSInSAR à subsidência do solo da cidade do Recife ocasionada pela exploração dos recursos hídricos subterrâneos. Por meio desse método se observam fortes indícios da movimentação superficial em áreas de dessaturação do solo, onde ao longo de décadas se constata expressivo aumento na captação de mananciais do subsolo através de poços.

A principal contribuição da pesquisa ocorre no estudo da aplicabilidade InSAR à áreas instáveis recifenses em virtude da redução do nível das águas subterrâneas. O procedimento PSInSAR é capaz de monitorar remotamente mudanças sutis da superfície com precisão milimétrica. Nesse sentido, verificam-se afundamentos com velocidade perto de 4 mm/ano na zona Sul da planície recifense oriunda da depleção hídrica subterrânea.

Além dessa investigação, emprega-se de maneira secundária o método PSInSAR nas zonas Oeste e Norte. Nas últimas décadas as regiões são afetadas por intensa urbanização e há gerado o assentamento de espaços recém-construídos. Como resultado, a zona Oeste possui as maiores área e velocidade de rebaixamento em torno de 15 mm/ano e casos menores de 25 mm/ano. Locais menores também ocorrem na zona Norte com taxa por volta de 20 mm/ano.

De forma específica, o trabalho tem como contribuição científico-tecnológica:

- Investigação detalhada da subsidência do solo da planície costeira do Recife ao longo de mais dez anos de análise de série temporal, de 6 de julho de 2011 a 21 de novembro de 2021, na caracterização de mapas precisos de deformação;
- Construção de atividade de pesquisa InSAR no estudo da subsidência do solo no programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPE (área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), com atuação integrada de métodos geodésicos clássicos (nivelamento, GNSS) nesse fenômeno;
- Inovação metodológica no monitoramento da subsidência do solo do Recife, com benefícios da aplicação InSAR para outras áreas de concentração: Geotecnia, Estrutura, com opção de monitoramento de pontes, viadutos, barragens, encostas;
- Modernização de ferramentas de gerenciamento em situações de impactos (estrutural, econômico, ambiental e social) para detectar e antecipar desastres em áreas específicas em tomadas de decisão relacionadas à instabilidade superficial; e
- Orientação na atualização do mapa de zoneamento explorável das águas subterrâneas do Recife devido à subsidência do solo, com ocorrência em diversas localidades da cidade oriunda de fatores hidrogeológico e geotécnico.

## 1.10 Organização do Trabalho

A tese se divide nas seguintes partes:

- **Capítulo I – Introdução:** apresenta considerações gerais da inserção da pesquisa no ambiente investigativo, de modo a promover maior compreensão do presente estudo quanto aos efeitos do uso desmedido da água subterrânea;
- **Capítulo II – Subsidência do solo:** aborda conceitos importantes envolvidos em sistemas aquíferos. Em especial, na acentuada exploração hídrica subterrânea com implicações à estabilidade superficial em âmbito global;
- **Capítulo III – Contextos do Recife:** destaca aspectos recifenses importantes referentes aos elementos históricos, culturais, territoriais. E análise hidrogeológica da exploração hídrica subterrânea no desenvolvimento da subsidência do solo;
- **Capítulo IV – Interferometria de Radar por Satélite:** evidencia aspectos vitais da técnica geodésica de medição InSAR relativos às propriedades e ao emprego de métodos precisos na detecção da movimentação do terreno;
- **Capítulo V – Metodologia:** descreve detalhes operacionais da interferometria Radar por satélite com imagens de missões SAR, adotado para a área de estudo do Recife. Nesse aspecto, há maior ênfase no processamento InSAR com utilização do programa SARProz por meio do método PSInSAR;
- **Capítulo VI – Resultados e Discussões:** revela informações oriundas da aplicação da interferometria SAR na planície costeira do Recife, com destaque na avaliação de produtos referente à variação do relevo. Exemplos: mapas de velocidade e deformação acumulada por meio de série temporal;
- **Capítulo VII – Conclusões e Recomendações:** enfatiza saberes adquiridos ao longo do estudo e indica os próximos passos da pesquisa, de modo a potencializar acertos e minimizar erros em uma nova investigação;
- **Referências:** reúnem obras técnicas significativas à construção do pensamento crítico-investigativo, presentes na comunidade acadêmico-científica. Como: livros, artigos (periódicos, anais, simpósios, congressos) e endereços eletrônicos; e
- **Apêndices:** exibem informações de imagens SAR dos satélites Sentinel-1, COSMO-SkyMed e PAZ (ascendente e descendente) usados no desenvolvimento do estudo InSAR à subsidência do solo.

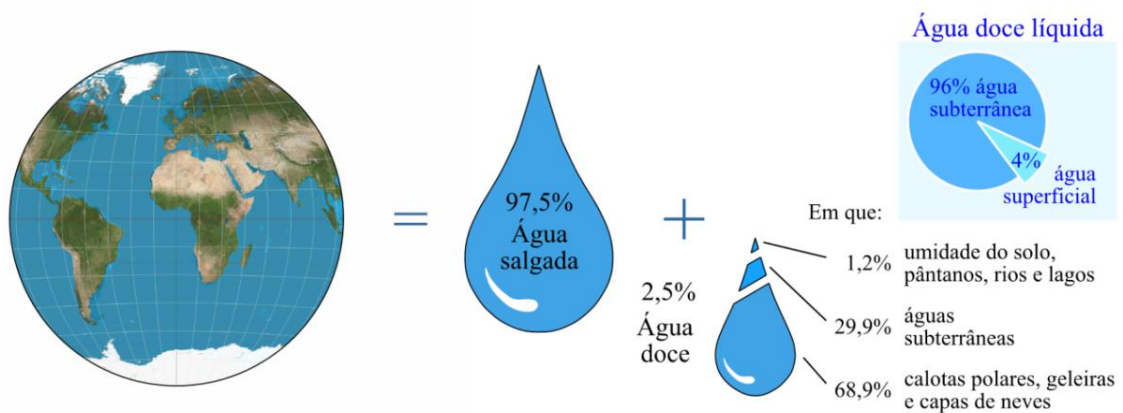
## 2 SUBSIDÊNCIA DO SOLO

O capítulo evidencia aspectos dos recursos hídricos subterrâneos relativos ao desenvolvimento da subsidência do solo. Essa ação está presente em diversas regiões no mundo, e ao longo da história se observa expansão de áreas afetadas. Em especial, relacionadas às atividades humanas de captação de reservas naturais, por vezes, desmedidas. A subsidência do solo decorrente da interferência antrópica no meio ambiente representa um sério impacto ambiental imposto aos ecossistemas e as regiões urbanas. O aumento da população, da urbanização, da industrialização, da exploração, ocasionam significativas consequências ao planeta Terra. Isso faz do referido fenômeno um risco geológico preocupante, razão pela qual é analisado.

### 2.1 Águas Subterrâneas

A água é um recurso natural de valor inestimável. É responsável pela manutenção dos ciclos biológicos, geológicos e químicos que mantêm em equilíbrio os ecossistemas. É um dos elementos mais importantes com atuação fundamental na transformação do terreno e na sobrevivência dos seres vivos. Participa dos processos modeladores do relevo por meio da dissolução de materiais e do transporte de partículas. Assegura a vida na Terra como fonte de suprimento vital para animais, vegetais e humanos. É o bem mais precioso e também o mais abundante na superfície terrestre, coberta em mais de 70% por água (Figura 5).

Figura 5 – Distribuição da água no planeta Terra.



Fonte: adaptado de Ferreira *et al.* (2007).

Entendem-se como águas subterrâneas aquelas que se encontram abaixo do nível de saturação ou nível freático, presentes: nas formações geológicas aflorantes e parcialmente saturadas, e nas formações geológicas profundas totalmente saturadas. Elas são submetidas às forças de adesão e de gravidade, preenchem os espaços vazios (poros ou cavidades) existentes entre os grãos dos solos, das rochas e das fissuras. De acordo com Feitosa *et al.* (2008), além de tratar do fluxo nas formações saturadas, o estudo das águas subterrâneas inclui o movimento da água nos meios não saturados – nos quais desempenham papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos, brejos. Nesses aspectos, as águas subterrâneas cumprem uma etapa importante do ciclo hidrológico em razão de constituir uma parcela da água precipitada.

A disponibilidade das águas subterrâneas ocorre em aquíferos – unidades rochosas ou de sedimentos, porosas e permeáveis que armazenam e transmitem significativos volumes de água subterrânea passível de ser explorada (TEIXEIRA *et al.*, 2009). Isso condiz com a parcela de água que se infiltra no solo e atinge a zona saturada das rochas, entra na circulação subterrânea e contribui para a reserva de água. Segundo Ferreira *et al.* (2007), as rochas saturadas que permitem a circulação, o armazenamento e a retirada de águas subterrâneas são chamadas de aquíferos. Os aquíferos, portanto, são formações geológicas com capacidade de armazenar e transmitir grande quantidade de água (CABRAL *et al.*, 2001; CABRAL, 2008).

## **2.2 Ação Geológica das Águas Subterrâneas**

Conceitua-se a ação geológica como a capacidade de um conjunto de processos que causam modificações nos materiais da Terra, com implicação nas formas superficiais da natureza. O esculpimento do relevo terrestre é um tipo de ação geológica, denominada pela dinâmica externa do planeta, como ação geomórfica (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

A ação geológica da água ocorre com o desgaste, o transporte e a deposição de sedimentos. Provoca alteração de formas de relevo existentes e contribui para a formação de novas estruturas. Exemplos: bacias sedimentares, formação de falésias, restingas, cânions. Os principais agentes geomórficos da superfície da Terra advém do movimento da água subterrânea somada ao da água superficial.

A participação das águas subterrâneas na modificação da Terra abrange um conjunto de processos geológicos que envolvem: transformação de minerais, rochas, feições terrestres e paisagens. Nas áreas de ocorrência das águas subterrâneas se inicia a maioria das formas de relevo, no qual o principal meio das reações do intemperismo químico ocorre por elas. A ação

geomórfica da água subterrânea se traduz por vários processos de modificação da superfície terrestre e seus respectivos produtos (TEIXEIRA *et al.*, 2009; Tabela 3).

Tabela 3 – Principais processos e produtos da ação geológica da água subterrânea.

<b>Processo</b>	<b>Produto</b>
Carstificação (dissolução)	Relevo cárstico, cavernas, aquífero de conduto
Pedogênese (intemperismo químico)	Cobertura pedológica (solos)
Erosão interna, solapamento	Boçorocas.
Solifluxão	Escorregamentos de encostas
Subsidência do solo	Abatimento do terreno

Fonte: Teixeira *et al.* (2009).

Nos processos geológicos as águas subterrâneas exercem relevantes influências. Tais como: na estabilidade de taludes; na geração de terremotos; na migração e acumulação de reservas naturais; entre outras ações importantes. Em especial, na subsidência do solo – objeto de estudo desta pesquisa.

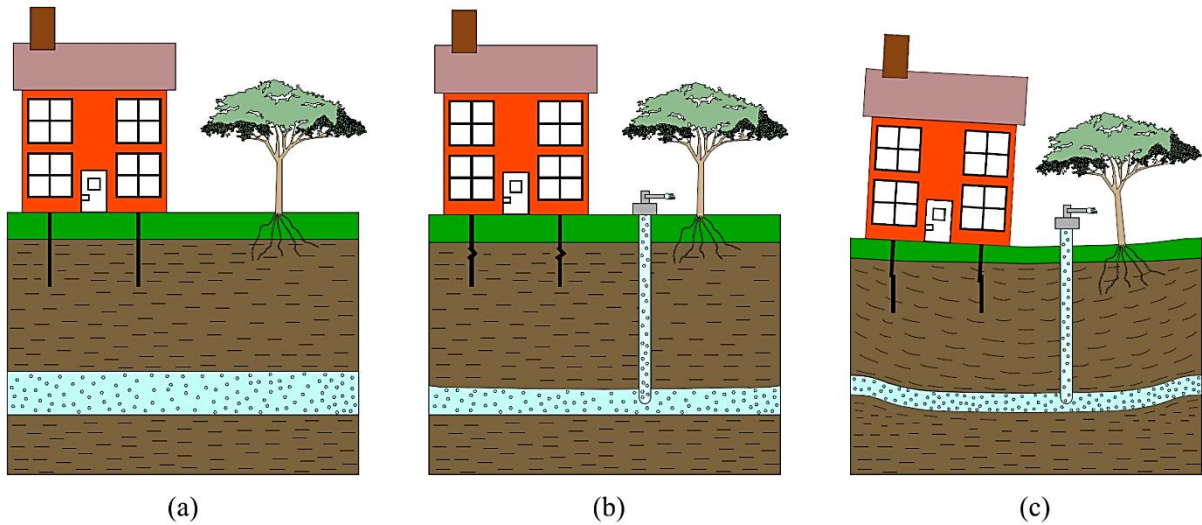
### 2.3 Características da Subsidência do Solo

A subsidência<sup>14</sup> ou adensamento do solo é um fenômeno geológico que implica afundamento da superfície da crosta terrestre – continental ou submarina – devido à modificação das camadas do subsolo. Segundo Cabral *et al.* (2006), resulta no rebaixamento do nível do terreno em função da retirada de suporte subterrâneo (petróleo, gás natural, minérios, água). Quanto a isso, o termo subsidência também é utilizado em problemas geotécnicos (engenharia geotécnica) para expressar ou representar a diminuição de volume do solo sob a ação de cargas aplicadas.

Para Corapcioglu (1984), esse fenômeno está relacionado a processos naturais ou atividades humanas de grande impacto. Logo, a modificação superficial advém em reposta a causas geológicas ou induzidas por ação antrópica. A ação do fenômeno, em geral, não ocasiona fatalidade. Porém, seus efeitos podem causar danos materiais consideráveis. Em particular, em áreas urbanas – onde prejuízos causados são mais elevados com risco para todo tipo de construção no solo devido à possibilidade de deformação (Figura 6).

<sup>14</sup> A palavra “subsidência” se emprega também em Meteorologia – estudo científico de fenômenos atmosféricos, cuja análise permite a previsão do tempo – para indicar o movimento do ar de cima para baixo (ar subsidente) em sistema de alta pressão atmosférica de ocorrência em qualquer época do ano. Além disso, a expressão subsidência, por vezes, é usada como: colapso. No entanto, há uma diferença conceitual. O processo da subsidência dos solos corresponde ao movimento lento vertical descendente do terreno. O colapso apresenta a mesma definição, mas ocorre em movimento brusco de afundamento do terreno.

Figura 6 – Desenvolvimento da subsidência do solo: (a) situação estável, (b) início da compactação e (c) movimentação das camadas internas da Terra.



Fonte: adaptado de Ketelaar (2009).

De acordo com Poland, Lofgren e Riley (1972), o movimento do terreno corresponde à direção vertical de sentido descendente. A velocidade pode ocorrer de forma rápida (em poucos segundos) ou muito lenta, isto é, quando a compactação do solo se passa em longos períodos de tempos (milhares de anos), conforme Tabela 4.

Tabela 4 – A subsidência do solo conforme área, intervalo e causa.

Área (km <sup>2</sup> )	Intervalo de tempo (anos)	Causa (natural e humana)
	10 <sup>4</sup>	Ajustes isostáticos da crosta
10 <sup>2</sup> a 10 <sup>3</sup>	10 a 10 <sup>2</sup>	Placas tectônicas
	10 a 10 <sup>2</sup>	Exploração de água em grande escala
10 a 10 <sup>2</sup>	10 <sup>-7</sup> a 10 <sup>-6</sup>	Terremoto
	10 a 10 <sup>2</sup>	Exploração de petróleo e gás
10 <sup>0</sup> a 10	10 a 10 <sup>2</sup>	Extração de sólidos
10 <sup>-1</sup> a 10 <sup>0</sup>	10 a 10 <sup>2</sup>	Carregamento da superfície, consolidação, hidrocompactação
10 <sup>-1</sup> a 10 <sup>0</sup>	10 <sup>-7</sup> a 10 <sup>-6</sup>	Densificação por vibração
10 <sup>-2</sup> a 10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>	Compactação

Fonte: Scott (1978).

Evidencia-se na Tabela 4 que a subsidência do solo pode ocorrer em várias dimensões e envolver áreas de poucos metros até extensões quilométricas, em períodos variados. De modo geral, o processo de rebaixamento tem magnitude da ordem de poucos centímetros por ano. A médio e longo prazo a taxa de deslocamento é capaz de se intensificar e alcançar nível de redução importante. Isso pode desencadear graves consequências ao meio ambiente e às infraestruturas, e resultar em sérios prejuízos econômicos, com impacto direto à vida social humana (ABIDIN *et al.*, 2015a, 2015b).

Na maioria das vezes a subsidência do solo está associada ao desenvolvimento humano, isto é, por meio da ocupação e da urbanização de grandes áreas territoriais. São por elas que o fenômeno da subsidência do solo afeta um número maior de obras civis distribuídas ao longo do mundo (TOMÁS-JOVER, 2008). Tais como: casas, edifícios, tubulações, pontes, viadutos, estradas. Segundo Santos (2005), a importância em se conhecer profundamente esse fenômeno, de forma a identificar sua ocorrência e aplicar medidas de prevenção e mitigação, torna-se imprescindível.

#### 2.4 Fatores da Subsidência do Solo

De acordo com Prokopovich (1979), a subsidência do solo é classificada em dois grupos de fatores: exogênica e endogênica. A subsidência exogênica se origina próxima à superfície da Terra em virtude de atividades humanas relativas à extração de fluidos de reservas subterrâneas. A subsidência endogênica está associada a processos naturais que se originam no interior da crosta terrestre (Tabela 5).

Tabela 5 – Classificação da subsidência do solo em grupos de fatores.

Fenômeno	Fatores	Causas
Subsidência do solo	Exogênica	Retirada de reserva subterrânea Diminuição da resistência do solo Aumento do carregamento
	Endogênica	Falha geológica Vulcanismo Deriva continental

Fonte: Prokopovich (1979).

Segundo Scott (1978), a subsidência do solo pode ser classificada também em função dos mecanismos que a desencadeiam. Nesse aspecto, Mingnorange (2000) subdivide as ocorrências em cinco grupos devido à hidrocompactação<sup>15</sup>; à dissolução de rochas e sais; à retirada de água subterrânea; à extração de petróleo ou gás natural; e à atividade mineira. Entre essas, Cabral *et al.* (2006) ressaltam que somente as três primeiras têm importância no estudo dos recursos hídricos – na qual apenas a subsidência do solo devido à retirada ou drenagem de água subterrânea é tratada nesta pesquisa.

<sup>15</sup> A hidrocompactação é um fenômeno de saturação rápida em depósitos finos não saturados e mal compactados. Nesses materiais, ocorre uma reorientação das partículas do solo devido à adição de água. O solo perde sua capacidade de suporte e resulta na consolidação em função de seu próprio peso. É um processo que pode atingir alguns metros de profundidade – comum em ambientes desérticos e em regiões semiáridas. É provocada por atividades humanas como: irrigação, construção de pequenos reservatórios artificiais, construção de canais.

## 2.5 Subsidiência do Solo em Sistema Aquífero

É o resultado da exploração hídrica demasiada em reservatórios subterrâneos, a qual reduz a pressão dos poros – responsáveis por ajudar a suportar as camadas subjacentes dos solos. A redução da pressão é consequência da diminuição dos níveis de água. Isso ocorre quando o bombeamento de água está além da capacidade de recarga do aquífero, sem permitir a regeneração hídrica do manancial subterrâneo. A compactação do solo via rebaixamento dos níveis de água pode ocasionar perdas irreparáveis ao sistema aquífero, tais como: na diminuição de sua capacidade de armazenamento ou, em casos extremos, na sua extinção.

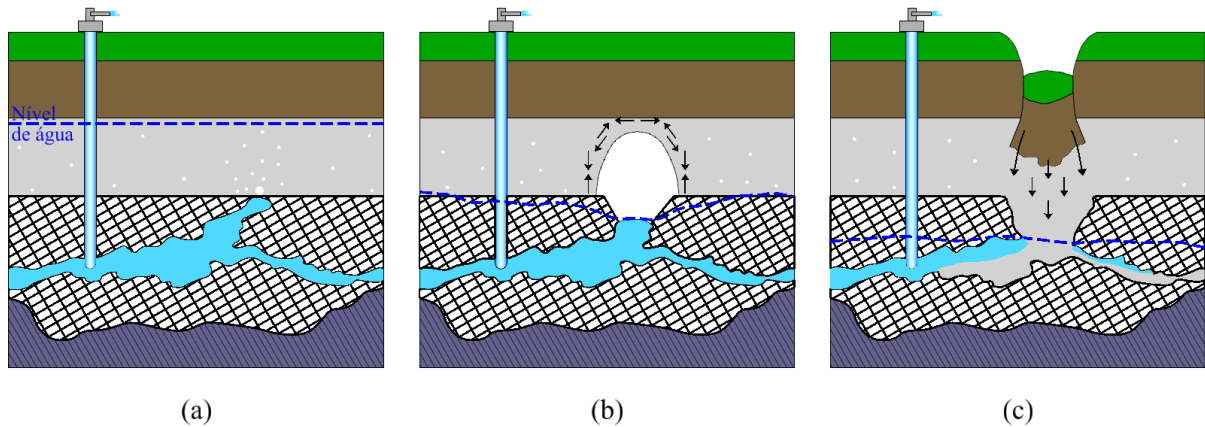
A primeira vez a vincular a diminuição dos níveis das águas subterrâneas de sistema aquífero com o rebaixamento do solo ocorre em 1908, a partir de estudo desenvolvido por Fuller (1908). Passado mais de um século dessa constatação é válido o entendimento que a exploração de aquífero pressupõe modificação de seu funcionamento. Em especial, quando se realiza de forma intensa e prolongada, e gera instabilidade do terreno. Ao longo do tempo, o adensamento territorial pode se manter ativo. Isso depende, sobretudo, de ação humana e de circunstâncias hidrológicas envolvidas; com indicadores de sustentabilidade da exploração de águas subterrâneas (SANTOS; CABRAL, 2011).

Neste contexto, a atuação antrópica, por vezes, desmedida na obtenção de recursos hídricos subterrâneos exige medidas de proteção dos ambientes, dos bens e das pessoas quanto às consequências da subsidiência do solo devido à exploração hídrica excessiva em sistema aquífero. Exemplos: aquíferos cársticos e sedimentares.

### 2.5.1 Aquíferos Cársticos

A subsidiência do solo ocasionada pelo bombeamento de aquíferos em terrenos cársticos resulta no colapso de vazios em rocha calcária, antes preenchidos e suportados por água existente em seu interior. Para Teixeira *et al.* (2009), a extração e a não reposição de água destas cavidades aumentam o perigo do teto ceder às pressões das porções superiores. A dissolução de rochas e sais ocorre devido ao fenômeno chamado carstificação: processo do meio físico que consiste na dissolução de rochas devido à ação de águas subterrâneas e superficiais (CABRAL *et al.*, 2006). Tem como consequências a formação de cavernas subterrâneas (Figura 7).

Figura 7 – Subsidiência do solo em aquífero cárstico: (a) início da exploração, (b) rebaixamento excessivo do nível da água subterrânea provoca o carreamento de material carstificado e o surgimento de cavidade e (c) desmoronamento das camadas de solos sobrejacentes.



Fonte: Khanlari *et al.* (2012).

A carstificação é mais comum na dissolução de rochas calcárias ou carbonáticas (calcário, dolomito, mármore) e evaporitos (halita, gipsita, anidrita); e menos comum em rochas silicáticas (granito, quartzito). O processo de dissolução da rocha<sup>16</sup> ocorre, em grande parte, devido à presença de ácido carbônico na água das chuvas e na água que atravessa os solos. Segundo Tominaga, Santoro e Do Amaral (2009), apesar das rochas serem em parte solúveis em água, entende-se como rocha solúvel aquela em que a maioria dos minerais que a compõem apresenta dissolução total em contato com a água ácida. As rochas solúveis, portanto, são as que mais favorecem o surgimento da carstificação.

No planeta os afloramentos carbonáticos correspondem por mais de 10% da área continental não congelada, enquanto os carbonatos subsuperficiais envolvidos na circulação de água subterrânea estão em torno de 15% da superfície (MATRANGOLO *et al.*, 2010). No Brasil, cerca de 2,2% do território nacional apresenta carbonatos aflorantes (AULER, 2002). A distribuição espacial de regiões cársticas no mundo varia de um lugar a outro em função de suas características geomorfológicas e hidrogeológicas (Figura 8). Além de reservatório de água subterrânea, estudos dos aquíferos cársticos crescem em importância devido à influência antrópica em seus ambientes (SANTOS; MANOEL; NASCIMENTO, 2010).

<sup>16</sup> Antes da precipitação, a água (H<sub>2</sub>O) na atmosfera dissolve pequenas partes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Isso resulta em água da chuva com pequena quantidade de ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Na superfície, à medida que se infiltra no sistema de águas subterrâneas e tem contato com rochas carbonáticas, como o calcário, consegue dissolver a calcita pela reação química:  $CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca^{+2} + 2HCO_3^-$

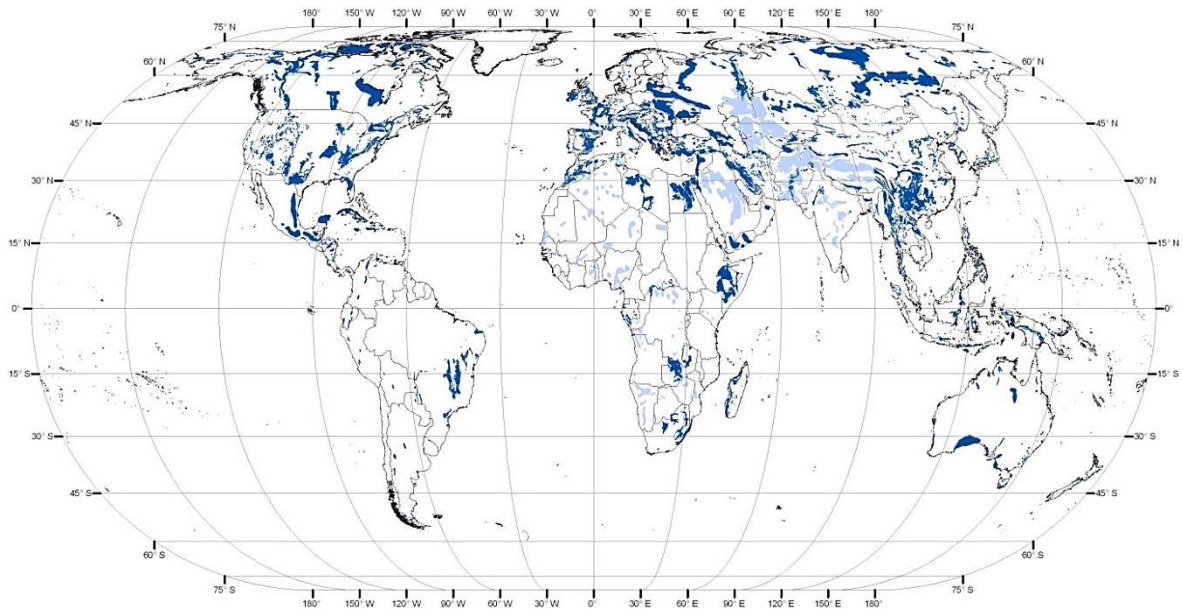
Em que:

$CaCO_3$ : é o carbonato de cálcio;

$Ca^{+2}$ : é o íon de cálcio; e

$2HCO_3^-$ : é o hidrogenocarbonato.

Figura 8 – Mapa de distribuição das rochas carbonáticas no mundo, as áreas em azul escuro correspondem a regiões carbonáticas relativamente contínuas.



Fonte: Williams e Fong (2010).

### 2.5.2 Aquíferos Sedimentares

As consequências da subsidência do solo devido à exploração excessiva em aquíferos sedimentares são as mais recorrentes em âmbito global. Envolvem grandes regiões e contabilizam sérios prejuízos – com expressivos impactos nas regiões urbanas. De acordo com Teixeira *et al.* (2009), o efeito da subsidência é pronunciado em aquíferos espessos: compostos por sedimentos pouco consolidados, formados pela intercalação de camadas aquíferas, mais arenosas e mais argilosas.

A retirada de água em aquífero sedimentar ocorre, de preferência, pelas camadas mais arenosas que drenam de forma vertical a água das argilas. A exploração hídrica demasiada de aquífero é responsável pelo rebaixamento do lençol freático. A ação descendente do nível de água resulta no mecanismo da subsidência do solo. Esse entendimento implica na Lei de Terzaghi ou princípio das tensões efetivas, a qual governa o comportamento dos esforços que o terreno sofre dado pela Equação 1 (VÁZQUEZ, 2001; VÁZQUEZ; DE JUSTO, 2002):

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

Em que:

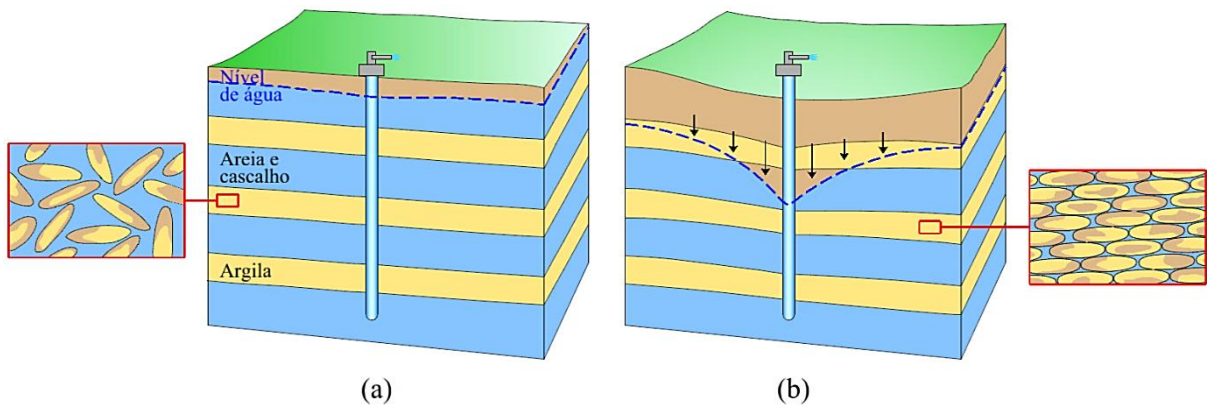
$\sigma'$ : é a pressão efetiva em um ponto no solo;

$\sigma$ : é a pressão total; e

$u$ : é a pressão no poro em solo saturado.

Na Equação 1, quando ocorre rebaixamento do nível do lençol freático a pressão do poro em solo saturado, localizado abaixo do nível de água, diminui. Como consequências, aumenta a pressão efetiva e inicia o processo de consolidação do solo (Figura 9). Quando essa situação é desenvolvida em grandes áreas, fenômenos importantes de consolidação do solo podem ocorrer com consequente deformação da superfície (TOMÁS-JOVER, 2008).

Figura 9 – Subsidiência do solo em aquífero sedimentar: (a) antes de bombeamento intenso e (b) após bombeamento intenso.



Fonte: Hartley (2014); Krieger (2016).

A compactação do terreno é oriunda da saída da água do interior dos vazios (poros ou cavidades) do solo saturado. A velocidade desse processo no tempo depende do tipo de solo em que a água se move. Segundo Tominaga, Santoro e Do Amaral (2009), nos solos arenosos saturados devido à sua alta permeabilidade o adensamento ocorre rápido uma vez que a água presente nos vazios desse solo é drenada com facilidade. Mas nos solos argilosos saturados, quando sob aplicação de carga, a saída da água dos vazios do solo é lenta devido à baixa permeabilidade. E, portanto, a magnitude do rebaixamento aumenta com o tempo.

Em geral, o fenômeno da subsidência do solo se expande por cerca de alguns centímetros por ano. Mas com o passar do tempo essa ação tem tendência a se acumular e, com isso, é capaz de atingir valores expressivos. Ademais, com o descenso do terreno, parte do sistema aquífero pode não se recuperar – mesmo com novos aportes de água no subsolo. Esse processo tem potencial de provocar diminuição volumétrica permanente em aquíferos.

## 2.6 Casos Conhecidos de Subsidiência do Solo no Mundo

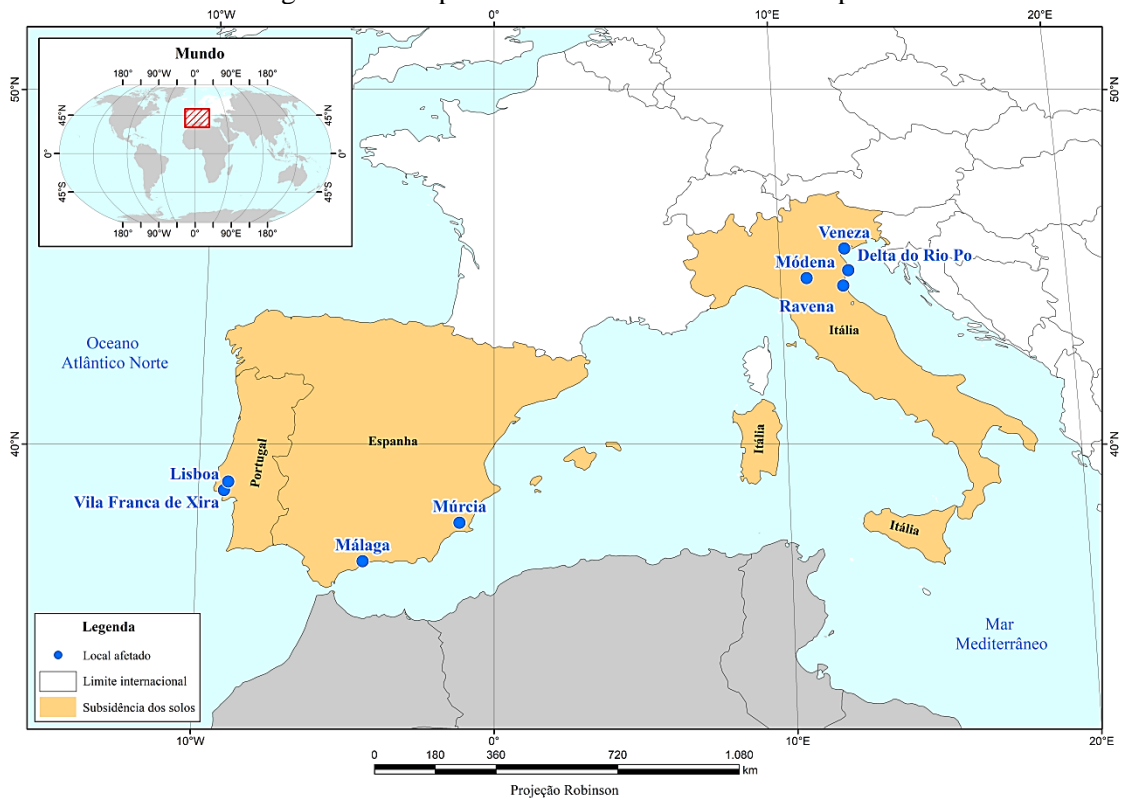
Em nível mundial, a ação antrópica na retirada de reservas naturais para além de sua capacidade de recarga há desencadeado várias áreas de subsidência do solo (DINAR *et al.*, 2021; HERRERA-GARCÍA *et al.*, 2021; BAGHERI-GAVKOSH *et al.*, 2021). A principal

causa está na exploração de mananciais subterrâneos associados, em grande parte, ao desenvolvimento humano com crescente uso para diversas finalidades (abastecimento, irrigação, indústria). A ocorrência do fenômeno em relação à exploração hídrica ocorre em vários locais no mundo: Europa, Ásia, Oceania, África, América do Norte e América do Sul.

### 2.6.1 Europa

Os países mais impactados pela subsidência do solo são (Figura 10, Tabela 6): Portugal (Lisboa e Vila Franca de Xira), Espanha (Múrcia, Málaga) e Itália (Ravena, Módena, Veneza, Delta do Rio Po).

Figura 10 – Mapa de subsidência do solo da Europa.



Fonte: dados geoespaciais (EUROSTAT, 2020).

Tabela 6 – Casos de subsidência do solo da Europa.

(continua)

País	Localidade	Período	Velocidade (cm/ano)	Rebaixamento máximo (cm)	Redução do nível de água (m)
Portugal	Lisboa	1992-06	0,6	8	
		2003-10	0,2		
	Vila Franca de Xira	1966-93			65
Espanha	Murcia	1992-03	1,3	15	
		1994-97		3,1	6 - 8
	Málaga	2005-07		3,9	8 - 10
		1992-18	1,1		140

Tabela 6 – Casos de subsidência do solo da Europa.

(conclusão)

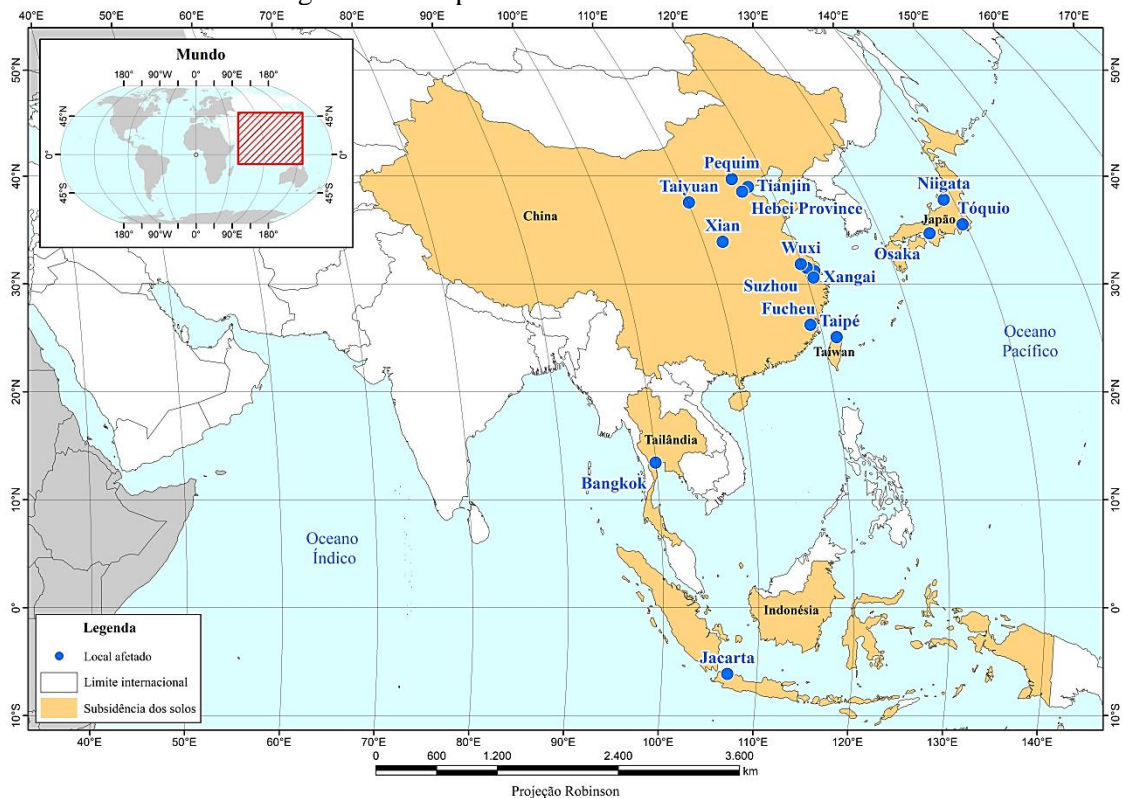
País	Localidade	Período	Velocidade (cm/ano)	Rebaixamento máximo (cm)	Redução do nível de água (m)
Itália	Ravena	1949-90		120	
		1982-86	0,5		43
		1987-93	3		
	Veneza	1900-80	0,3	22,4	
		1935-72	0,6		10
		1975-80		2	3
	Módena	1962-81		85	10
		1989	2,5		
	Delta do Rio Po	1950-65		350	50
1959		6 - 7			

Fonte: Gambolati e Freeze (1973); Ricceri e Butterfield (1974); Carbognin *et al.* (1977, 1978a, 1978b); Bouwer (1977); Corapcioglu (1984); Poland (1984); Placzek (1989); Ricceri e Favaretti (1992); Gambolati *et al.* (1999); Vázquez (2001); Vázquez e De justo (2002); Alberotanza *et al.* (2002); Carminati e Martinelli (2002); Tomás-Jover (2008); Heleno *et al.* (2011); Ruiz-Armenteros *et al.* (2018); Ruiz-Constán *et al.* (2018).

## 2.6.2 Ásia

Os principais países impactados pela subsidência do solo são (Figura 11, Tabela 7): China (Pequim, Tianjin, Hebe Province, Taiyuan, Xian, Suzhou, Xangai, Wuxi, Jiaying, Fucheu), Japão (Niigata, Tóquio, Osaka), Taiwan (Taipé), Tailândia (Bangkok), Indonésia (Jacarta).

Figura 11 – Mapa de subsidência do solo da Ásia.



Fonte: dados geoespaciais (EUROSTAT, 2020).

Tabela 7 – Casos de subsidência do solo da Ásia.

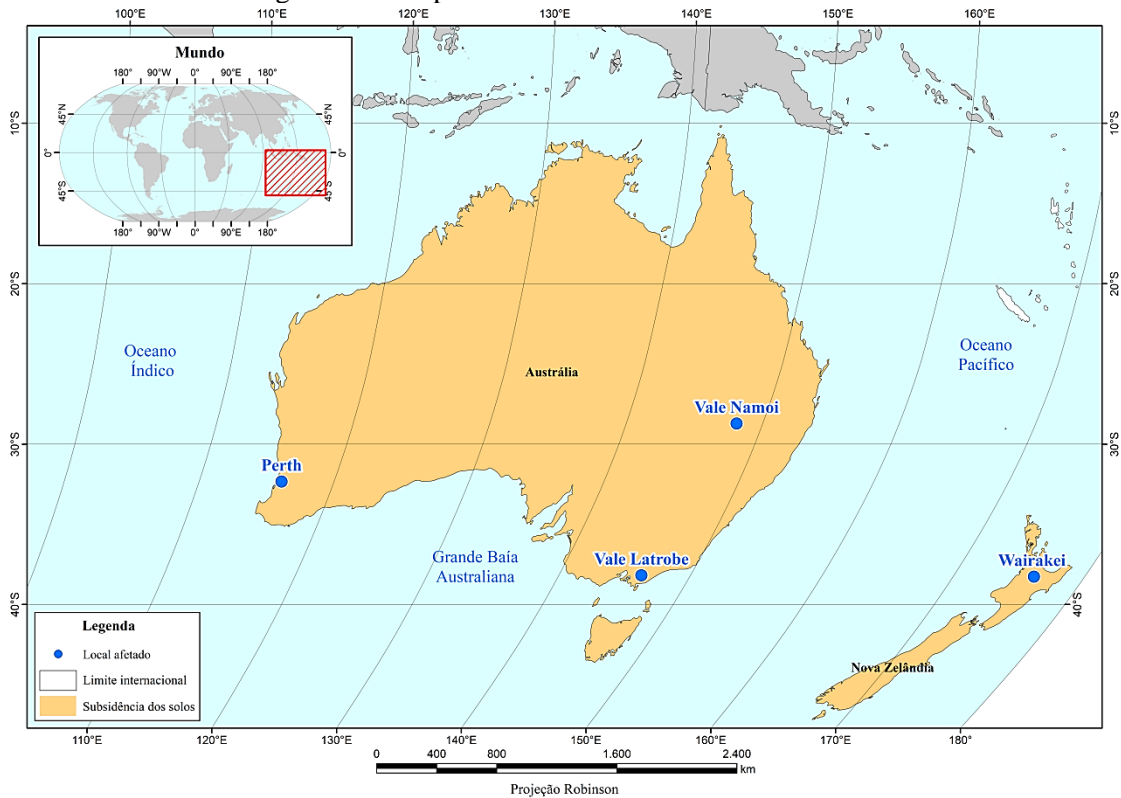
País	Localidade	Período	Velocidade (cm/ano)	Rebaixamento máximo (cm)	Redução do nível de água (m)
China	Pequim	1950		59,7	
	Tianjin	1941-59	0,07 - 0,79	410	
		1959-97	16	306	
	Hebe Province	1950	9,68	113,1	
	Taiyuan	1979	0,004 - 0,01	196,7	
	Xian	1950	13,6	190	
	Suzhou	1995		145	
		1983-97		100	
	Xangai	1920		263	
		1961-78		160	
	Wuxi	1960	1,5 - 2,5	105	
	Jiaxing	1960-89	4,2	59,7	
	Fucheu	1957	0,29 - 2,18	68	
Japão	Niigata	1959	50	200	
		97		240	
	Tóquio	1900-75		457	
		1975	1 - 2		
	Osaka	1885-62			30
		1935-68		280	
Taiwan	Taipé	1950-69	25	130	4
		1955-74		190	
		1957-67	10	90	15
Tailândia	Bangkok	1980-90	5 - 10		38 - 68
		2008	1,5 - 2,2		
Indonésia	Jacarta	1982-91		80	
		1991-97		160	
		1997-99		20	
		2009-18	25		

Fonte: Ricceri e Butterfield (1974); Aoki (1976); Bouwer (1977); Ishii, Kuramochi e Endo (1970); Carbognin *et al.* (1978a, 1978b); Scott (1978); Corapcioglu (1984); Poland (1984); Bergado *et al.* (1987); Prinzl e Nutalaya (1987); Akagi (1992); Yamamoto (1996); Hirose *et al.* (2001); Hu *et al.* (2002, 2004); Chen, Pei e Jiao (2003); Sato, Abe e Ootaki (2003); Abidin *et al.* (2001, 2009, 2011, 2015a, 2015b, 2016); Mei e Hidayat (2018).

### 2.6.3 Oceania

Os países que mais sofrem com a subsidência do solo são (Figura 12, Tabela 8): Austrália (Perth, Vale Namoi, Vale Latrobe) e Nova Zelândia (Wairakei).

Figura 12 – Mapa de subsidência do solo da Oceania.



Fonte: dados geoespaciais (EUROSTAT, 2020).

Tabela 8 – Casos de subsidência do solo da Oceania

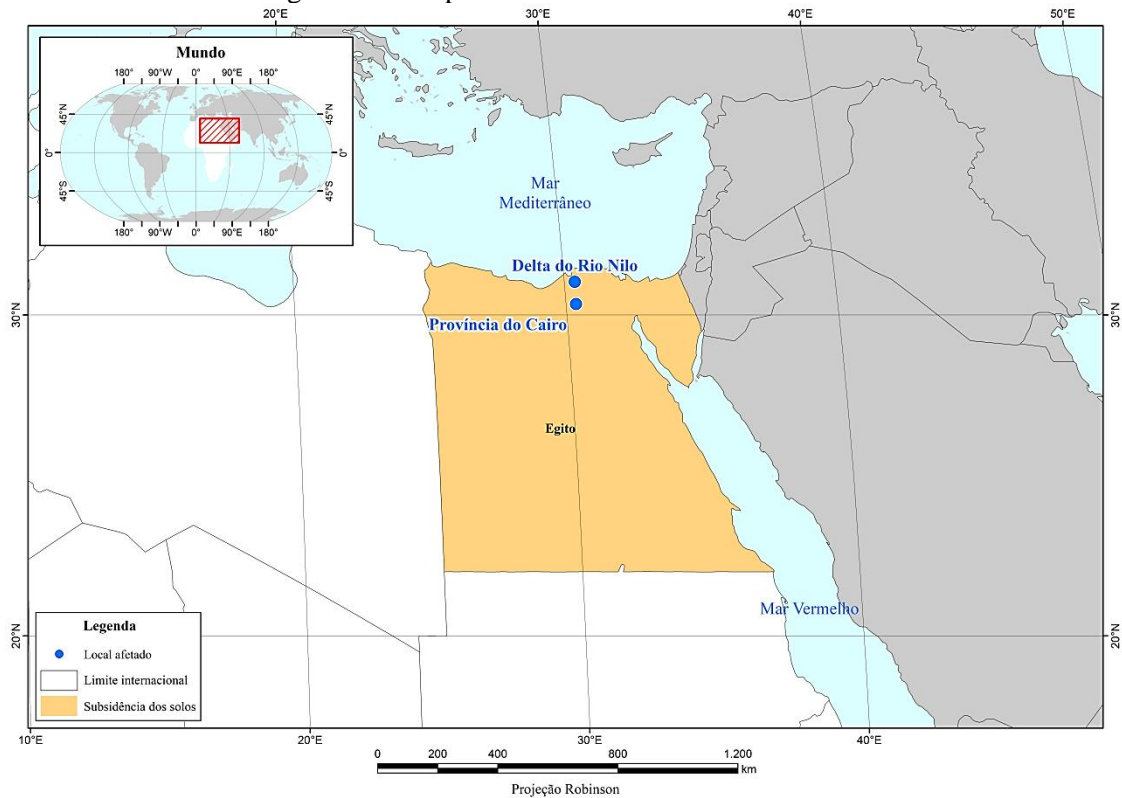
País	Localidade	Período	Velocidade (cm/ano)	Rebaixamento máximo (cm)	Redução do nível de água (m)
Austrália	Perth	1992-96	2,4		
	Vale Namoi	07-08		70	
	Vale Latrobe	92-11 09-10	3	250	
Nova Zelândia	Wairakei	1950-97 1957-07	22 - 48	1400 1500	

Fonte: Poland (1984); Holla (1997); Holla e Barclay (2000); Allis e Zhan (2000); Allis (2000); Hatton, Otto e Underschultz (2004); Ali *et al.* (2004); Allis, Bromley e Currie (2009); Ng *et al.* (2009); Fernando e Nag (2007); Li (2010); Ng *et al.* (2011); Ng, Ge e Li (2015).

#### 2.6.4 África

As principais ocorrências da subsidência do solo ocorrem (Figura 13, Tabela 9) no Egito (Delta do Rio Nilo, Província do Cairo).

Figura 13 – Mapa de subsidência do solo da África.



Fonte: dados geoespaciais (EUROSTAT, 2020).

Tabela 9 – Caso de subsidência do solo da África.

País	Localidade	Período	Velocidade (cm/ano)	Rebaixamento máximo (cm)	Redução do nível de água (m)
Egito	Delta do Rio Nilo	1993-00	0,9		
		1992-99	0,8		
	Província do Cairo	1993-00	0,7		
		2003-09	0,7		

Fonte: Stanley (1988, 1990); El-Fishawi (1989); El-Raey (1997); Frihy (2003); Aly, Giardino e Klein (2005); Aly *et al.* (2009, 2012); Becker e Sultan (2009); Poscolieri (2011); El Sayed Frihy *et al.* (2010).

### 2.6.5 América do Norte

Os países mais impactados pela subsidência do solo são (Figura 14, Tabela 10): Estados Unidos (Vale de San Joaquin, Vale de Santa Clara, Vale de Las Vegas, Área de Houston Galvestone) e México (Cidade do México, Cuenca Chalco).

Figura 14 – Mapa de subsidência do solo da América do Norte.



Fonte: dados geoespaciais (EUROSTAT, 2020).

Tabela 10 – Casos de subsidência do solo da América do Norte

País	Localidade	Período	Velocidade (cm/ano)	Rebaixamento máximo (cm)	Redução do nível de água (m)
Estados Unidos	Vale de San Joaquin	1926-70	50	880	130
		1921-60	8	310	34
		1979	10,8		
	Vale de Santa Clara	1912-66		393	75
		1969		400	
	Vale de Las Vegas	1967-75			32
		1912-72			70
		1912-90			90
		1992-97	19	5	
	Área Houston Galvestone	1943-73			61
1906-73			275	122	
1952			10,2		
Arizona Central	1948-76			320	140
	1948-67			230	
México	Cidade do México	1854-59		850	35
		1948-50	44	850	
		1996-97	30		
	Cuenca Chalco	2014-20	40		
		1970	12,5		
			1950-91		800

Fonte: Ricceri e Butterfield (1974); Gabrysch e Bonnet (1975); Logfren (1976); Poland (1977, 1984); Vega (1976); Winikka e Wold (1976); Bouwer (1977); Carbognin *et al.* (1978a); Scott (1978); Guacci (1979); Corapcioglu (1984); Placzek (1989); Burbey (1996); Birkle e Schneider (1998); Strozzi e Wegmüller (1999); Hoffmann (2003); Cigna e Tapete (2021).

### 2.6.6 América do Sul

Há histórico de subsidência do solo no Brasil, de maior ocorrência em terreno cárstico. Exemplos (SANTOS, 2008; TOMINAGA; SANTORO; DO AMARAL, 2009; MAIA; DIAS-NETO; CORRÊA-GOMES, 2010; ALVES, 2018; ROCHA, 2018; CPRM, 2019; MADEIRO, 2019):

- Mairinque-SP, em 1981: ocorrem trincas e rebaixamento de piso em várias edificações;
- Cajamar-SP, em 1986: aparecem colapso e subsidência do solo de grandes proporções na área urbana da cidade. Por volta de 60 dias após os primeiros sinais na área principal atingida, três casas são tragadas em uma cratera de cerca de 30 m de diâmetro e 15 metros de profundidade, enquanto recalques e trincas afetam dezenas de outros imóveis em uma distância de 400 m do local;
- Sete Lagoas-MG, em 1988: acontece afundamento de cerca de 20 m de diâmetro e 5 m de profundidade. E consome parte das arquibancadas do estádio municipal, assim como muros e paredes de edificações próximas. Sinais de movimentação do terreno são observados em residências situadas em um raio de 40 m;
- Almirante Tamandaré-PR, em 1992: surgem diversos pequenos descensos de terreno com trincas e inclinações de edificações, descolamento entre alvenaria e peças estruturais. E redução do nível de água em poços, cacimbas e pequenos lagos;
- Teresina-PI, em 1999: eclode na Rua Simplício Mendes, área central do município, grande abatimento superficial com deterioração total de várias edificações;
- Cajamar-SP, em 1999: ocorrem danos estruturais de parte das edificações da fábrica da empresa Natura cosméticos advindos de afundamentos em suas fundações;
- Almirante Tamandaré-PR, em 2007: ocorre um dos maiores afundamentos de que se tem notícia na região. Tem-se o desenvolvimento de uma cratera de formato elipsoidal de 50 m de comprimento, 40 m de largura e cerca de 30 m de profundidade;
- Bocaiuva do Sul-PR, em 2007: surge um colapso no bairro de Campininha do Capivari que se desencadeia em uma cratera de 5 m de diâmetro por 5 m de profundidade;

- Lapão-BA, em 2008: ocorrem rachaduras em ruas, danificações de seis casas, fissuras no solo com até 20 cm de largura e rebaixamento com 15 cm de rejeito em áreas rurais;
- Vera Cruz-BA, em 2018: eclode no meio de uma mata nativa na Ilha de Matarandiba uma cratera de 86 m de comprimento, 40 m de profundidade e 37 m de largura. Distante 1,1 km de onde vivem os moradores;
- Vazantes-MG, em 2018: aparecem crateras na Av. Geraldo Campos, Bairro Vazante Sul. E comprometem a pavimentação e ameaçam casas de moradores próximas do fenômeno; e
- Maceió-AL, em 2019: surge afundamento do terreno (característica sedimentar) com rachaduras de imóveis e de ruas em três bairros da cidade (Bebedouro, Mutange e Pinheiro). E deixa cerca de duas mil famílias desalojadas.

Além dessas localidades, há indícios de subsidência do solo também em terreno sedimentar – como no caso da cidade do Recife (Figura 15, Tabela 11).

Figura 15 – Mapa de subsidência do solo da América do Sul.



Fonte: dados geoespaciais (EUROSTAT, 2020).

Tabela 11 – Caso de subsidência do solo em terreno sedimentar do Recife no Brasil.

País	Localidade	Período	Velocidade (cm/ano)	Rebaixamento máximo (cm)	Redução do nível de água (m)
Brasil	Recife	1975-85			17
		1985-95			33
		1995-00			43
		1958-15	0,068	3,86	> 100

Fonte: Romão *et al.* (2003); Costa e Costa Filho (2004); Santos (2005); Santos, Cabral e Pontes Filho (2012); Luna *et al.* (2014, 2015, 2017, 2018).

## 2.7 Considerações Finais

No cenário mundial, grande parte dos históricos de ocorrências da subsidência do solo se origina da interferência humana nas reservas naturais da Terra (petróleo, gás natural, minérios, água), ou seja, na retirada excessiva de elementos naturais do subsolo para além de sua capacidade de renovação. Em relação à subsidência do solo devido à exploração hídrica subterrânea, aquíferos em terrenos sedimentares representam os casos mais críticos recorrentes em âmbito global. O declínio do nível nesses reservatórios aumenta a pressão efetiva e, com isso, ocasiona o adensamento das camadas internas da Terra.

A compactação do solo não se manifesta de forma homogênea. Mesmo com a diminuição dos valores potenciométricos, a resistência dos materiais compressíveis faz com que a magnitude do rebaixamento divirja. De modo geral, o deslocamento vertical da superfície é paulatino. Na ausência de medidas inibidoras, os efeitos desse movimento podem aumentar e alcançar proporções preocupantes. Ou seja, com expressivos impactos ao meio ambiente e à população – em particular, aos habitantes de áreas urbanas. Isso porque, a movimentação do terreno pode resultar em danos às infraestruturas e, por consequência, desencadear riscos iminentes a vida social humana e gerar graves prejuízos econômicos.

Em relação ao meio ambiente, ações oriundas da subsidência do solo são capazes de provocar alterações das características fisiográficas e hidrogeológicas de forma nociva às condições da natureza. Além de alterar a paisagem natural (inundação, depressão do relevo, inversão de fluxo de drenagem superficial), o afundamento do terreno devido à retirada acentuada de água do subsolo pode comprometer a capacidade de recuperação do sistema aquífero. Na impossibilidade de recarga hídrica subterrânea, esse processo resulta na redução volumétrica permanente e, como consequência, na possibilidade de extinção de aquífero.

Quanto às infraestruturas, o rebaixamento do terreno sugere maior atenção às áreas urbanas. Visto que, é capaz de proporcionar graves impactos aos ambientes edificados com prejuízos consideráveis a essas áreas a partir dos efeitos da subsidência solos. Exemplos: danificação de construções e estradas; inclinação de casas e prédios; ruptura de tubulações

subterrâneas e utilidades; afundamento de casas e edifícios; limitação do funcionamento do sistema de esgotos e drenagens; deterioração de imóveis e obras de engenharia. Tais consequências podem contabilizar perdas financeiras significativas e causar preocupação ao bem-estar dos cidadãos envolvidos.

Outro aspecto negativo referente aos efeitos do rebaixamento do solo surge quando há interferência à vida social dos habitantes. Em especial, quando ocorre deterioração em grandes proporções das infraestruturas e do meio ambiente. E por conta disso, acarretam limitação ou interrupção de serviços públicos e privados e, bem como, ocasionam transtornos a todos os indivíduos. Exemplos: paralisação de abastecimento de água e de fornecimento de energia; suspensão de atividades diárias das pessoas; restrição ao funcionamento de repartições públicas e de estabelecimentos comerciais, tais como: escolas, universidades, hospitais, bancos, shoppings, mercados. Ou seja, os efeitos desse fenômeno apresentam potencialidades para afetar a saúde, a mobilidade e as relações dos seres humanos.

De acordo com a Iniciativa Internacional da Subsidência do Solo da UNESCO (LaSII: *Land Subsidence International Initiative*), custos diretos e indiretos associados a danos decorrentes da subsidência do solo são numerosos. Exemplos (UNESCO, 2019): 2,5 bilhões de euros por ano na China; 1,1 bilhões de euros no vale de San Joaquim, Estados Unidos, de 1955 a 1972; 360 milhões de euros na Polônia; 50 milhões de euros na cidade de Múrcia, Espanha, de 1992 a 1995. Nos países baixos a previsão é gastar 5,2 bilhões de euros no reparo e manutenção de infraestruturas até 2050. Para as próximas décadas, a expectativa é que as consequências financeiras desse fenômeno se agravem ao longo do mundo.

Em território nacional se observam poucos casos documentados de afundamento do terreno relativo à extração de fluidos. Isso não significa inexistência desse fenômeno. Pelo contrário. É provável a ocorrência de mais eventos similares às cidades (Cajamar-SP, Teresina-PI, Sete Lagoas-MG, Almirante Tamandaré-PR, Bocaiuva do Sul-PR, Maceió-AL) em todo o país. E por não ter ocasionado danos relevantes resulta, portanto, na falta de cobertura da imprensa e na devida atenção de especialistas para análise e registro técnico.

Em várias regiões do Brasil é crescente o uso de aporte hídrico subterrâneo em complementação a água superficial por meio de poços, que na maioria das vezes fazem exploração de forma excessiva com diminuição acentuada do nível de água de sistemas aquíferos. Essa realidade se verifica no município do Recife: mananciais subterrâneos são utilizados de forma indiscriminada. A redução dos níveis das águas subterrâneas de maneira significativa aumenta o risco da subsidência do solo na cidade recifense – a qual, nesse contexto, é investigada no próximo capítulo.

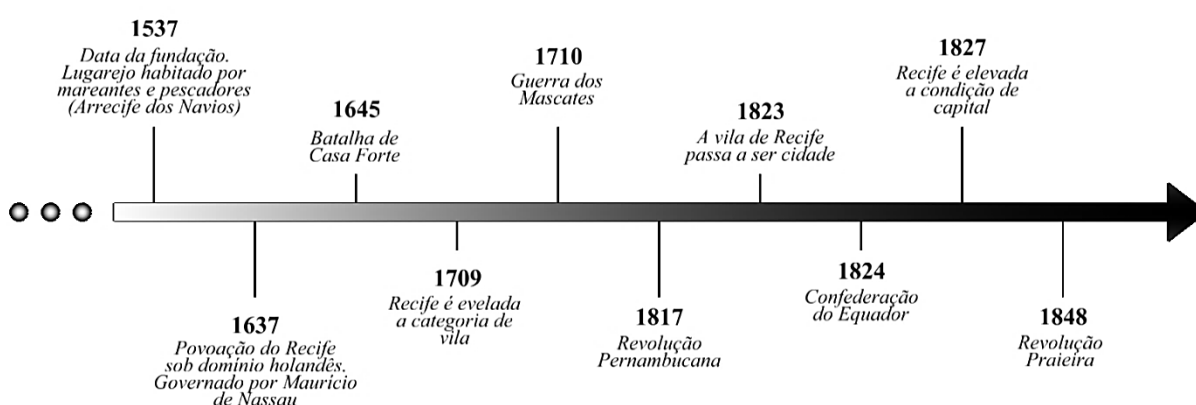
### 3 CONTEXTOS DO RECIFE

O capítulo analisa Recife em diversos aspectos, desde a sua fundação à época atual com indícios de subsidência do solo. Nessa passagem temporal, abordam-se acontecimentos históricos, processo de urbanização, manifestações culturais e elementos fisiográficos. O foco principal, no entanto, direciona-se aos recursos hídricos. Há maior atenção aos efeitos decorrentes da intensa exploração hídrica subterrânea, ao longo de décadas, com possibilidade de esgotamento de aquíferos. Isso pode ocasionar instabilidade superficial com riscos potenciais de desastres na cidade. Tal alerta é alvo de preocupação. Impõe ao Recife desafios iminentes no gerenciamento dos recursos hídricos esgotáveis do subsolo no presente para atender as futuras gerações.

#### 3.1 Dos Fatos Históricos aos Dias Atuais

Fundada em 12 de março de 1537, Recife<sup>17</sup> é a capital do estado de Pernambuco – localizado na região Nordeste do Brasil. É também a cidade sede mais antiga das Unidades Federativas do país com 485 anos. Ao longo de sua existência, o município recifense é palco de importantes revoltas no cenário histórico nacional (Figura 16).

Figura 16 – Linha do tempo do Recife.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

<sup>17</sup> A etimologia do nome “Recife” deriva da palavra “arrecife”: grande barreira rochosa de arenito (recifes) que se estende por toda costa recifense com formação de piscinas naturais.

Do passado a época atual, o legado dos primeiros habitantes do Recife se verifica nas características urbanas e nos costumes da cidade. Formas arquitetônicas são heranças vigentes em: pontes, igrejas, prédios, praças, ruas. Recife é uma cidade moldada através de referências históricas. Está construída em uma área do delta e do vale inferior do Rio Capibaribe, que estabelece em seu traçado uma espécie de cidade arquipélago (MELO, 1978).

A Veneza brasileira se caracteriza como fruto das mudanças e manifestações da soma das épocas. Possui rico patrimônio histórico, artístico e cultural herdado de povos indígenas, europeus, africanos, árabes. A adaptação e disseminação desse legado ocorrem na paisagem, na musicalidade, na gastronomia, na literatura do Recife. Esses aspectos atraem milhares de turistas devido à programação eclética disponível na cidade (Figura 17).

Figura 17 – Atrativos do Recife: (a) Pontes, (b) Carnaval, (c) Rua do Bom Jesus, (d) Praia de Boa Viagem, (e) Praça do Marco Zero e (f) Rua da Aurora.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



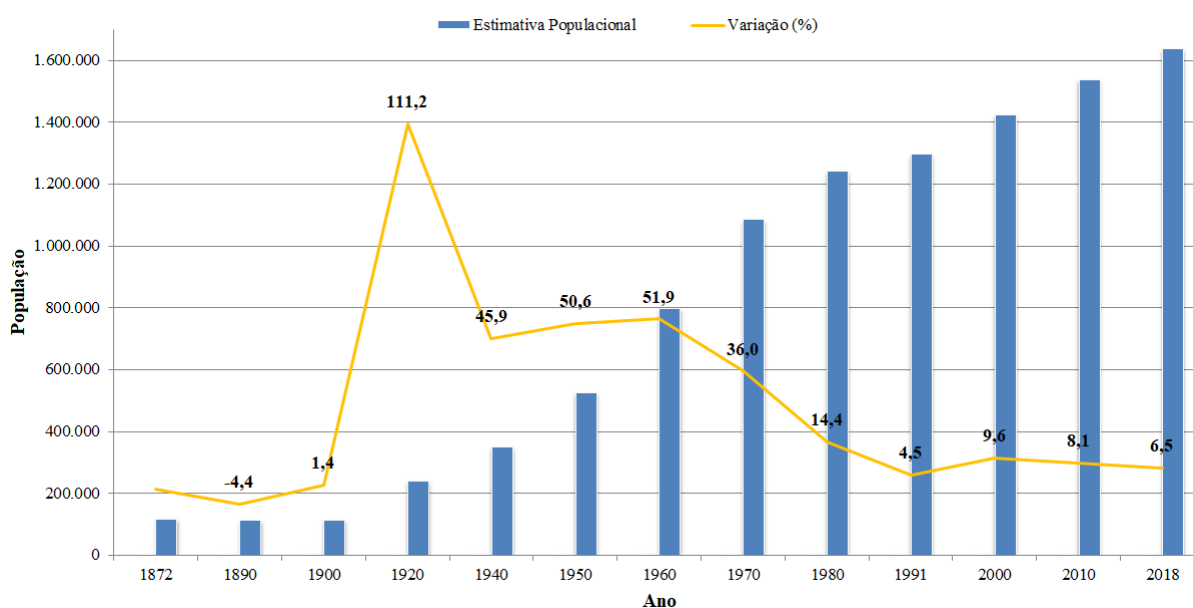
(f)

Fonte: Carević (2016); Viaja net (2018); Visit Recife (2019).

### 3.2 Indicadores Socioeconômicos

De forma histórica, a evolução populacional do Recife se intensifica no início do século XX até final da década de cinquenta com estimativa próxima de um milhão de habitantes (Figura 18.). É o período de maior crescimento em função da migração de pessoas do interior nordestino (IBGE, 2018c).

Figura 18 – Crescimento populacional do Recife.



Fonte: IBGE (2018c).

Hoje, com uma população urbana da ordem de 1,64 milhões de habitantes, equivalente a 17,25% da população estadual, Recife ocupa a quarta posição entre as metrópoles mais densamente habitadas do país. Possui densidade demográfica de 7.495,81 hab/km<sup>2</sup> – superada apenas pelas cidades de Fortaleza-CE, São Paulo-SP e Belo Horizonte-MG. Entre os gêneros, dados do último censo revelam que a população feminina corresponde por 53,84% enquanto que a masculina representa por 46,16% (IBGE, 2010, 2018c).

Apesar de abranger uma população numerosa, Recife possui o melhor Índice de Desenvolvimento Humano (IDHM<sup>18</sup>) dos municípios nordestinos, igual a 0,772. Isso situa a cidade na faixa de desenvolvimento humano alto (valor entre 0,700 e 0,799). A dimensão que mais contribui para o IDHM da capital pernambucana é a renda, com índice de 0,825; seguida da longevidade, com índice de 0,798; e da educação, com índice de 0,698 (ATLAS BRASIL, 2020).

<sup>18</sup> O IDHM faz parte do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD).

Na economia, a população ocupada<sup>19</sup> do Recife representa 44,8%. É a terceira maior economia do Norte e do Nordeste com PIB (Produto Interno Bruto) de R\$ 49,54 bilhões, depois de Salvador-BA e de Fortaleza-CE. Porém, Recife se distingue por possuir PIB *per capita* (PIB dividido pela quantidade de habitantes do município) acima dessas duas capitais com valor econômico de R\$ 31.994,38 contra R\$ 25.356,73 de Fortaleza-CE e contra R\$ 22.232,68 de Salvador-BA (IBGE, 2018d).

Entre as atividades, Recife se destaca no comércio e na prestação de serviços. Juntas, elas representam quase a totalidade de sua economia. O setor econômico dispõe de diversas matrizes e polos de desenvolvimento que tornam a cidade recifense atrativa para vários tipos de negócios, com ênfase para:

- Tecnologia da Informação (TI): referência nacional na área de TI, Recife consolida-se como o maior polo tecnológico do Brasil – conhecida também como Vale do Silício<sup>20</sup> brasileiro. A capital pernambucana possui o Porto Digital, maior centro de tecnologia do país instalado em uma área de 149 hectares. Abriga *startups*, pequenas, médias e grandes empresas e multinacionais, com atuação na geração de *softwares* e na economia criativa e inovação (BELLONI, 2015);
- Complexo de saúde: na área médica, Recife é o segundo maior polo do país. Destaca-se nas regiões Norte e Nordeste em diversas especialidades, tratamento e atendimento. O complexo médico recifense conta com mão de obra qualificada, infraestrutura moderna e equipamentos de ponta na prestação de serviços em hospitais, laboratórios, clínicas, centros de diagnósticos por imagem (DIÁRIO DE PERNAMBUCO, 2016);
- Operações portuárias: atividades marítimas são partes da história da cidade do Recife. A localização privilegiada do Porto do Recife permite acesso estratégico aos principais centros de distribuição de mercadorias, com destino ao interior e ao litoral do estado. Na época atual, o complexo portuário do Recife e Suape atende quase todo o Nordeste em um raio de alcance de 1 mil quilômetro. Faz parte das principais rotas de navegação internacional, como o MERCOSUL<sup>21</sup>. Além disso, o seu moderno terminal marítimo de passageiros movimentava a economia local com a atracação de embarcações nacionais e estrangeiras – exemplo: navios de cruzeiros (PORTO DO RECIFE S.A., 2009); e

---

<sup>19</sup> Recife possui a maior taxa de população ocupada do Norte-Nordeste (IBGE, 2019).

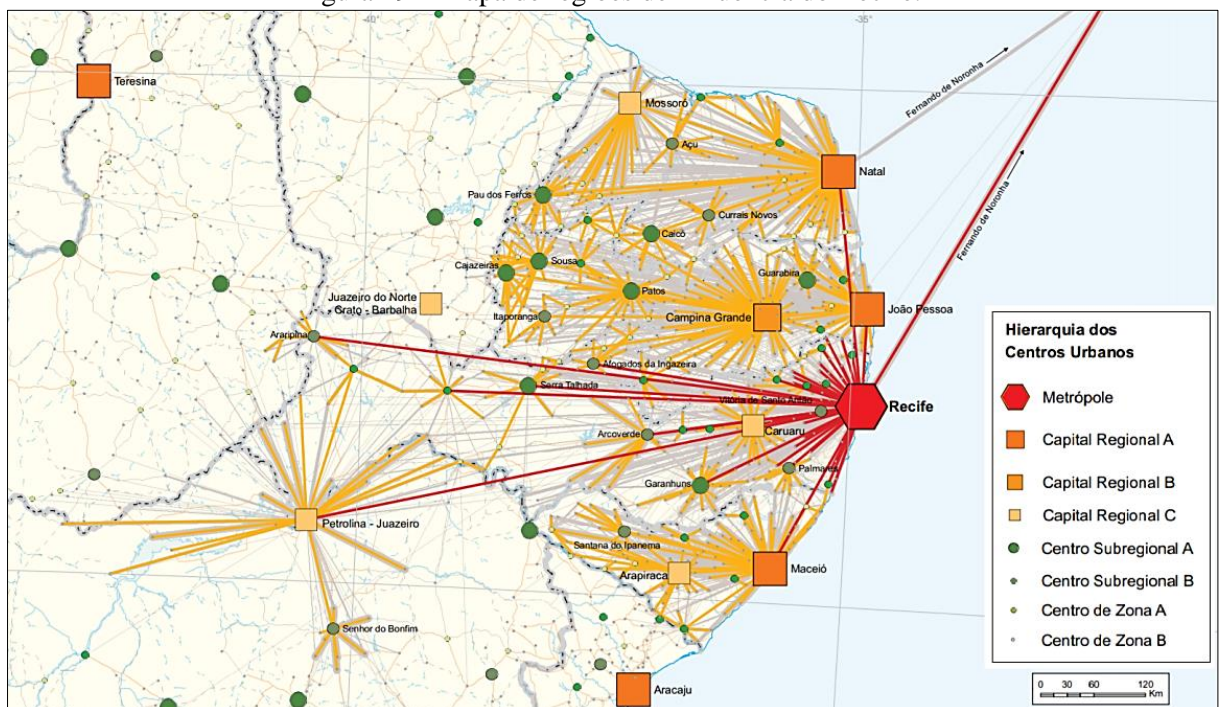
<sup>20</sup> Situado na Califórnia, Estados Unidos, o Vale do Silício abriga diversas empresas de alta tecnologia.

<sup>21</sup> Significa: Mercado Comum do Sul. Formado pelos países membros: Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai.

- Engenharia consultiva: formado por um conjunto articulado de atividades de prestação de serviços especializados, Recife se destaca na formação técnica qualificada<sup>22</sup> nas áreas da construção civil; indústria naval; tecnologia da informação; ambiental; geociências; petróleo e gás; automobilística; energias renováveis; metal-mecânica; eletrônica; química. Tais aspectos fazem do Recife importante reduto de empresas de variados segmentos, com participação de companhias regionais, nacionais e filiais internacionais (PCR, 2019a).

Desta forma, Recife – metrópole mais rica das regiões Norte e Nordeste (em PIB *per capita*) – desempenha papel centralizador em seu estado e exerce área de influência em outras capitais (IBGE, 2007). Como (Figura 19): João Pessoa-PB, Natal-RN e Maceió-AL. Reflexos de sua economia moderna, diversificada e mão de obra qualificada. Além disso, concentra inúmeras sedes<sup>23</sup> regionais e nacionais de instituições e empresas públicas e privadas.

Figura 19 – Mapa de regiões de influência do Recife.



Fonte: IBGE (2007).

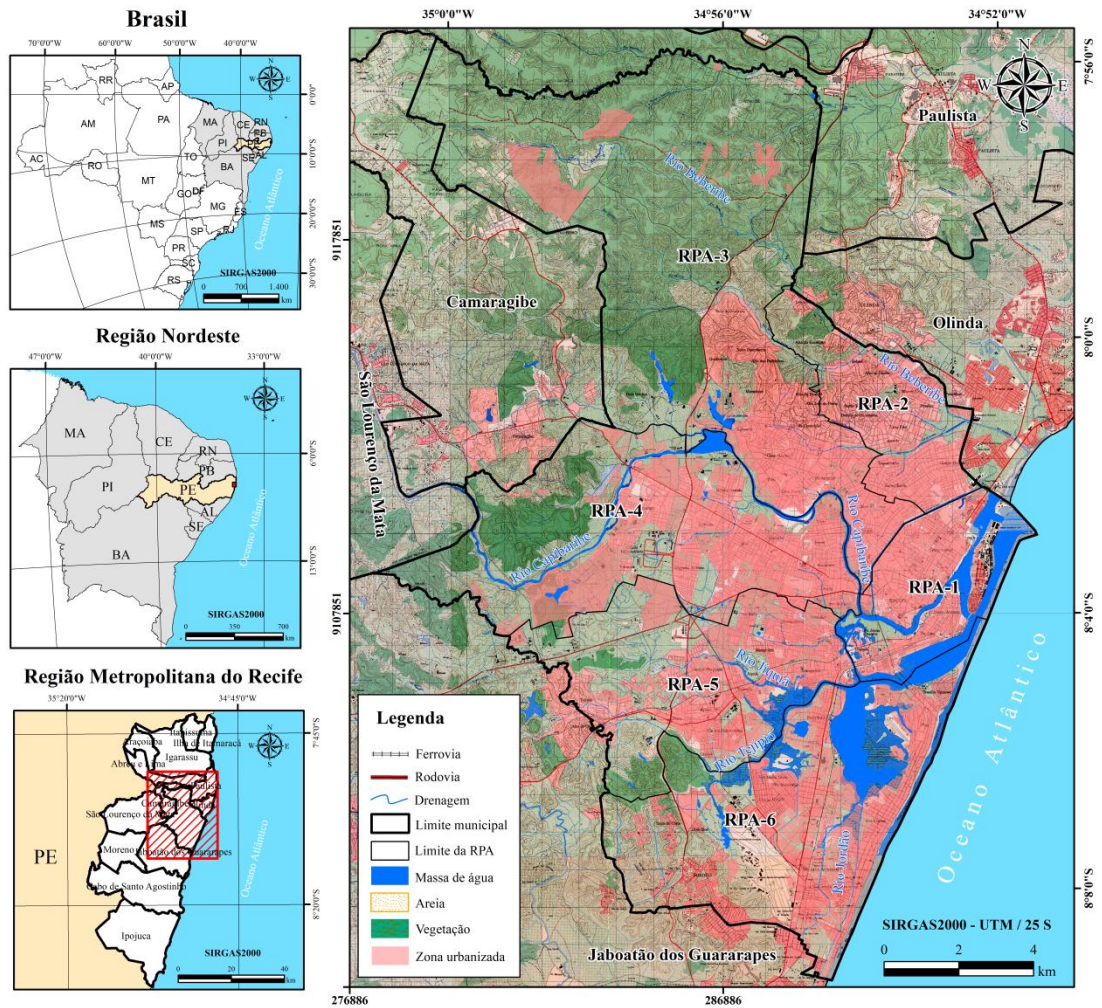
<sup>22</sup> A UFPE possui a melhor avaliação do Norte-Nordeste e a décima do Brasil (FOLHA DE S.PAULO, 2019).

<sup>23</sup> Exemplos: Chesf, SR/Infraero, Sudene, CMNE, TRF-5, II COMAR, SR/INSS, PRFN-5<sup>a</sup>R, CINDACTA III, sede de consulados geral e honorário de vários países: Estados Unidos, China, Alemanha, Reino Unido, França, Argentina, Áustria, Bulgária, Cabo Verde, Chipre, Costa do Marfim, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Finlândia, Gabão, Grécia, Guatemala, Itália, Japão, Luxemburgo, Malta, Países Baixos, Paraguai, Portugal, República Tcheca, Senegal, Suécia, Turquia.

### 3.3 Características Territoriais e Fisiográficas

Com área próxima de 218 km<sup>2</sup>, Recife ocupa posição central no Nordeste brasileiro. É sede da Região Metropolitana do Recife (RMR) – maior aglomeração urbana do Norte-Nordeste e o sexto maior do Brasil, com mais de quatro milhões de habitantes e com 14 municípios participantes<sup>24</sup> (IBGE, 2018c). Seu território se limita ao Norte com os municípios de Olinda e Paulista; ao Sul com Jaboatão dos Guararapes; a Oeste com São Lourenço da Mata e Camaragibe; e a Leste com o oceano Atlântico. Segundo a Prefeitura da Cidade do Recife (PCR, 2019b), a divisão territorial envolve 94 bairros e 6 Regiões Político-Administrativas (RPA). Ou seja (Figura 20): RPA-1, Centro (11 bairros); RPA-2, Norte (18 bairros); e RPA-3, Noroeste (29 bairros).

Figura 20 – Mapa de espacialidade do Recife.

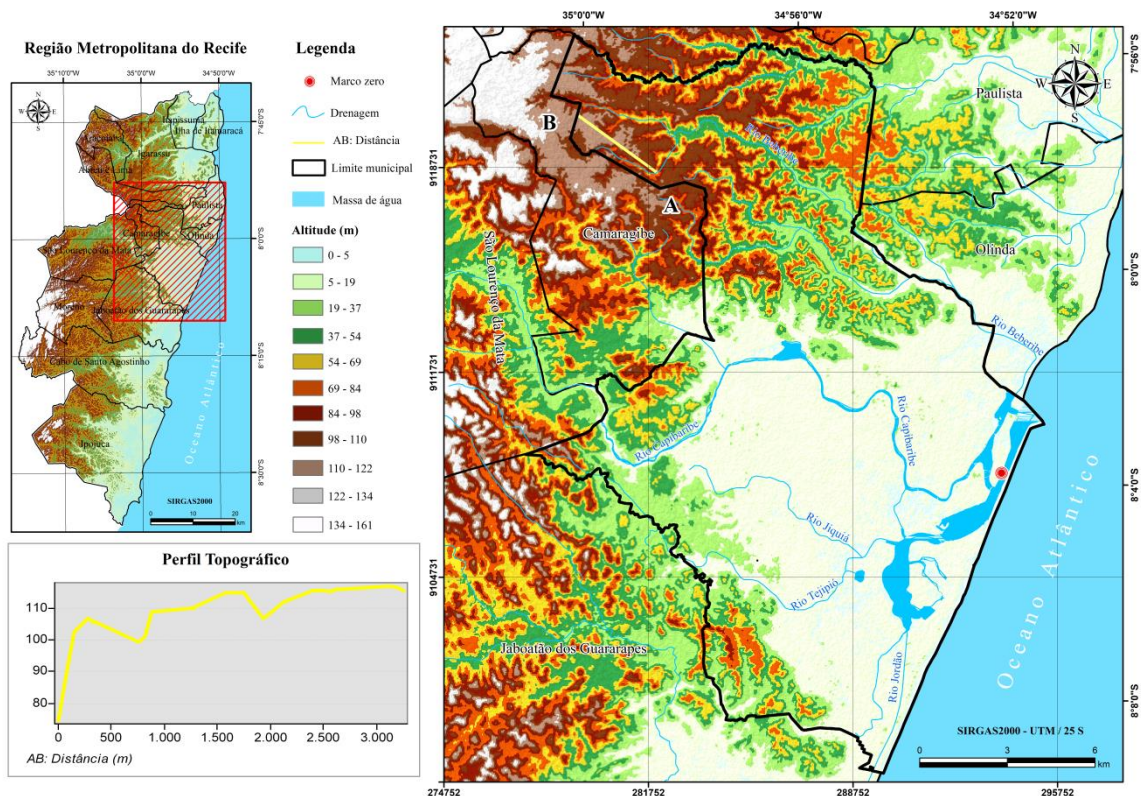


Fonte: dados geoespaciais (SUDENE, 1984; PCR, 2016, 2019b; IBGE, 2018a, 2018b).

<sup>24</sup> Além da capital pernambucana, a RMR é composta pelos municípios: Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Paulista, Igarassu, Abreu e Lima, Camaragibe, Cabo de Santo Agostinho, São Lourenço da Mata, Araçoiaba, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Moreno e Itapissuma.

Delimitada por coordenadas geodésicas elipsoidais SIRGAS2000, latitudes (8°9'S e 7°55'S) e longitudes (35°1'O e 34°50'O), a composição da área territorial do Recife é formada, de modo geral, por (PCR, 2019b): 67,43% de morros, 23,26% de planícies e 9,31% de aquáticas. Grande parte da urbanização da cidade está inserida em uma superfície de relevo de planície, situada em importantes bacias hidrográficas referentes aos rios: Capibaribe, Beberibe e Tejupió. A altitude recifense em relação ao nível do mar varia de 4,70 m na área central da cidade (marco zero), caracterizada por terreno de topografia plana, para mais de 100 m nas áreas de morros altos acidentados. Porém, mais da metade do seu território se encontra em altitude abaixo de 20 m (Figura 21).

Figura 21 – Mapa de altimetria da cidade do Recife.



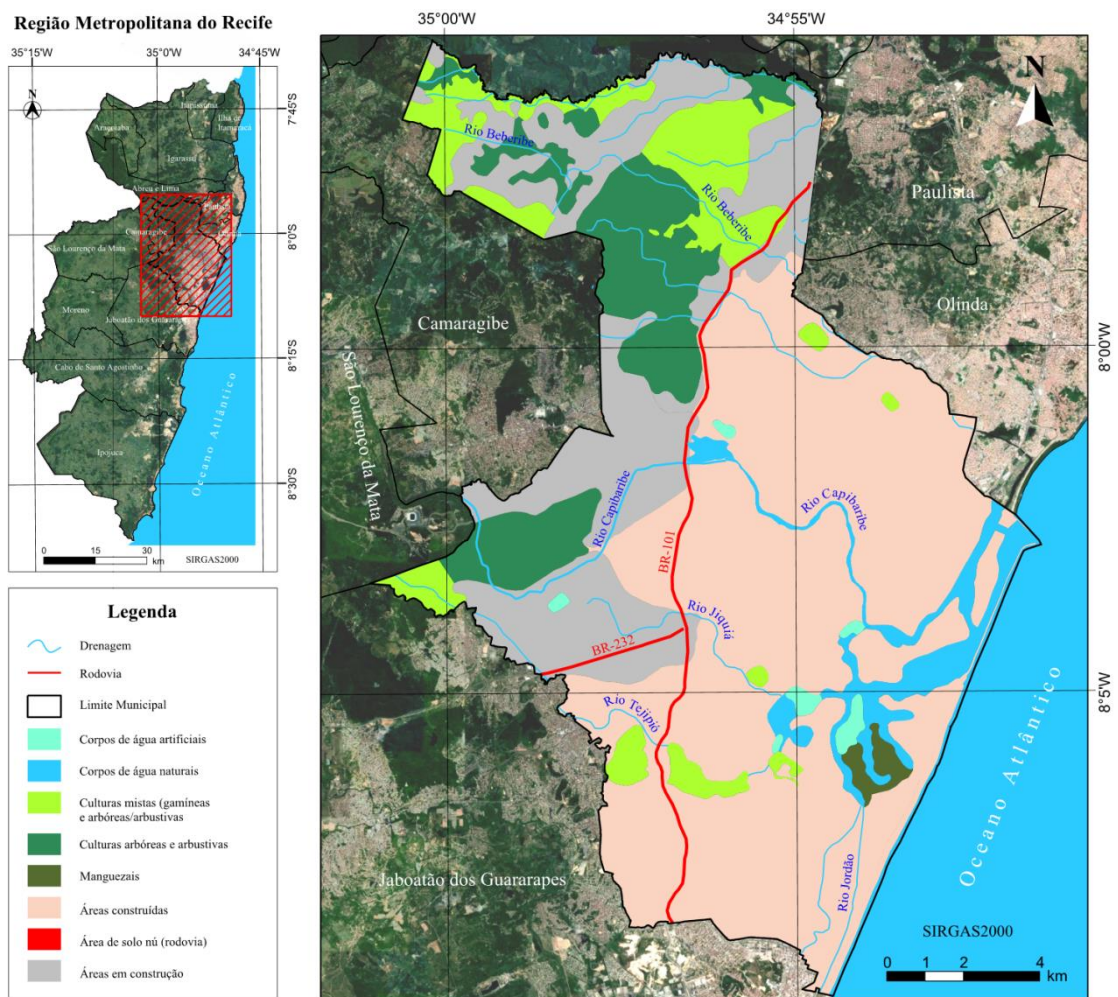
Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; SRTM, 2011).

### 3.3.1 Uso e Ocupação do Solo

Recife possui alto índice de urbanização em função da presença de edificações e sistemas viários pavimentados. De forma histórica, sua expansão urbana se dá nas áreas de planícies em direção aos morros. Tem ampla presença de construções verticalizadas nas localidades mais litorâneas da cidade – áreas imobiliárias com grande valor monetário. No momento, espaços naturais remanescentes de ação antrópica no Recife estão muito reduzidos. Resultam em menos de um terço de áreas permeáveis na cidade.

Segundo Silva *et al.* (2015), nas últimas quatro décadas há uma notável consolidação e estabilização das áreas densamente construídas que correspondem aos setores planície e encostas do planalto sedimentar litorâneo, do ponto de vista geomorfológico. Isso revela esgotamento do espaço urbano do Recife relativo às condições morfológicas viáveis para construção (Figura 22). Essa constatação pode encarecer o valor de terrenos urbanos e, por consequência, direcionar a expansão urbana para outros municípios da RMR.

Figura 22 – Mapa de uso e ocupação do terreno do Recife.



Fonte: Silva *et al.* (2015); dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; PCR, 2020c; GOOGLE, 2021).

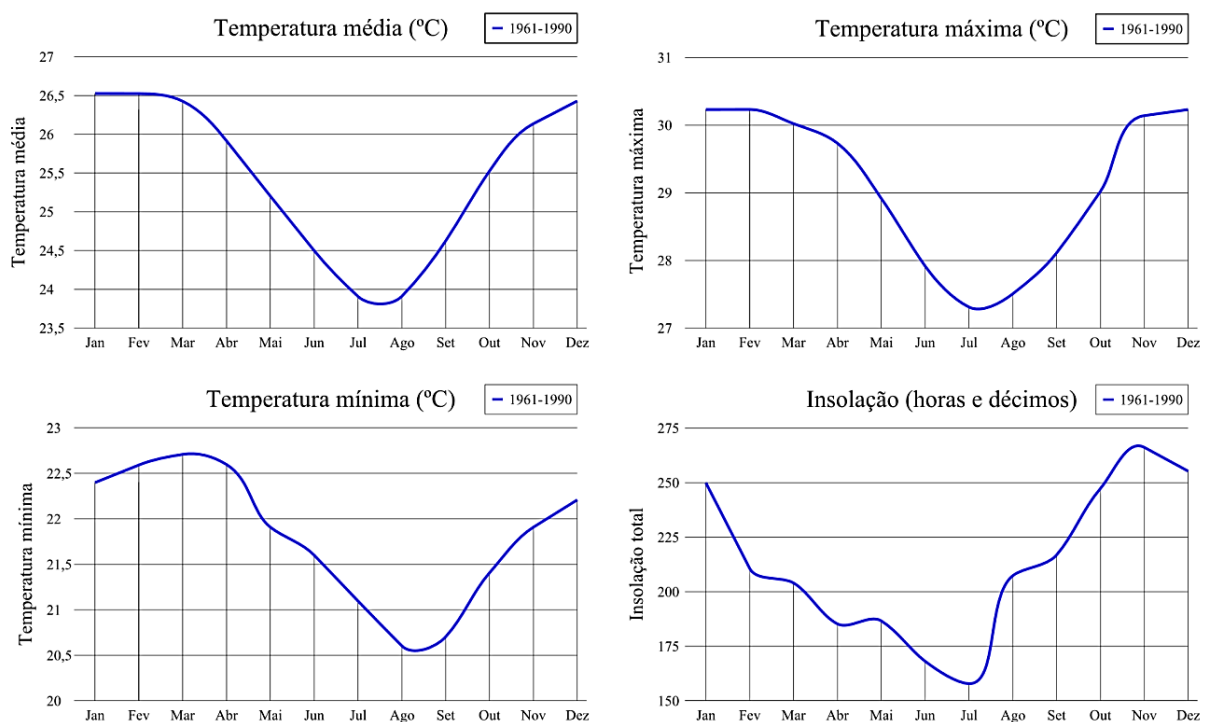
De acordo com a Figura 22, observa-se que o município recifense é bastante urbanizado. Sua área se distribui em: 0,97% de corpos de água artificiais; 4,92% de corpos de água naturais; 8,65% de culturas mistas (gramíneas e arbóreo-arbustivas); 11,40% de culturas arbóreas e arbustivas; 0,92% de manguezais; 55,32% de áreas construídas; 0,55% de áreas de solo nu (rodovia); e 21,15% de áreas em construção.

A impermeabilização da superfície em função da evolução urbana aumenta a pressão sobre mananciais de água superficial e subterrânea. Paiva *et al.* (2015) ressaltam que esse cenário de impermeabilização do terreno em Recife tem efeitos na recarga de aquíferos, com diminuição de reservas hídricas subterrâneas. Além de comprometer o abastecimento da população local, essa situação contribui para o risco da subsidência do solo na cidade.

### 3.3.2 Dados Climáticos

Segundo os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), de 1961 a 1990, o clima do Recife se configura como tropical quente e úmido – tipo As' pela classificação climática de Köppen-Geiger<sup>25</sup>. Apresenta temperatura média anual de 25°C, com amplitude térmica anual reduzida e inferior a 5°C. Tem temperaturas máximas, de cerca de 30°C, nos meses de novembro a abril; mínimas, próximas de 20°C, nos meses de julho a setembro. E possui incidência de radiação solar alta, com pouca variação ao longo do ano (Figura 23).

Figura 23 – Temperaturas e insolação no Recife (estação curado).



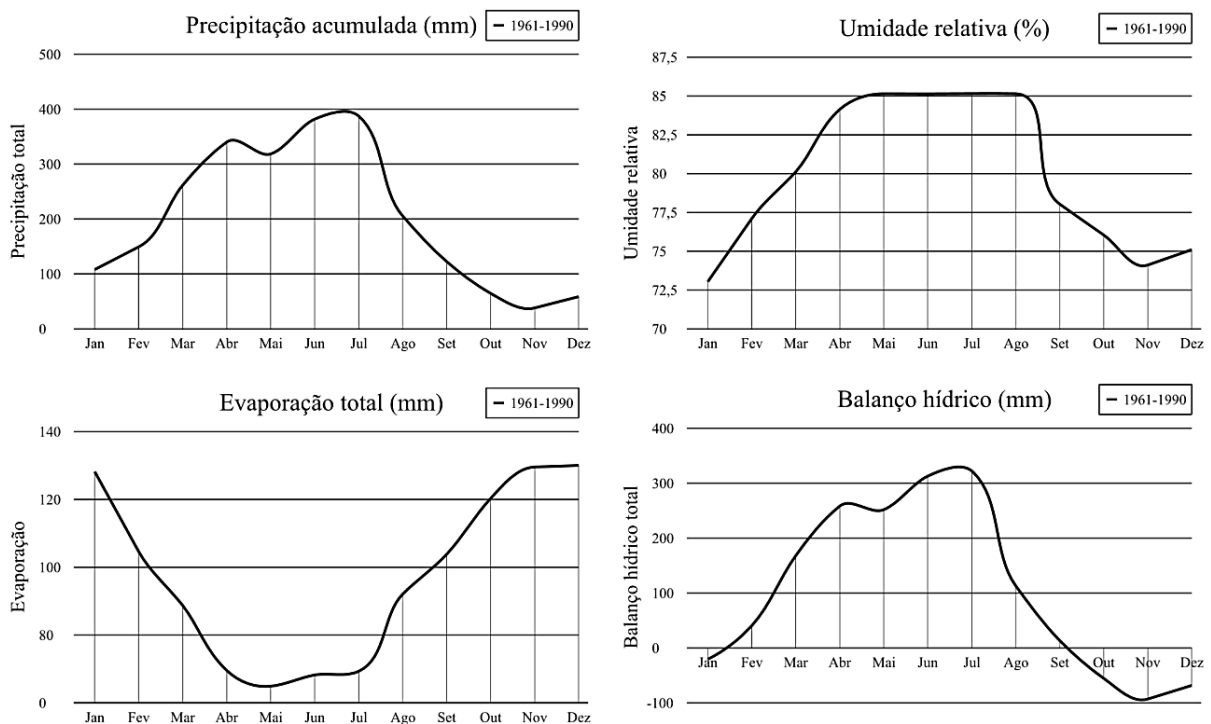
Fonte: INMET (2019).

<sup>25</sup> É o sistema de classificação climático mais adotado na climatologia. O nome remete ao climatologista russo Wladimir Köppen, que em 1900 propõe a referida classificação. Em colaboração com Rudolf Geiger, o sistema é aperfeiçoado com a publicação de novas versões. Dessa parceria, surge a referência climática: Köppen-Geiger.

A média histórica da precipitação pluviométrica em Recife aponta para duas estações típicas. A primeira com inverno chuvoso no período de março a agosto, com precipitações entre 200 e 400 mm/mês – picos em: maio, junho e julho. A segunda com época mais seca nos outros meses, com precipitações em geral menores que 100 mm/mês. Isso resulta em uma precipitação anual superior a 2000 mm. As séries históricas revelam também ocorrência de chuvas em todos os meses do ano no Recife, com umidade relativa do ar média anual de 85%.

Em épocas mais secas, a evaporação total no Recife apresenta valores acima de 100 mm/mês referentes aos meses de setembro a fevereiro – altas em: novembro, dezembro e janeiro; e valores abaixo de 100 mm/mês para os meses de março a agosto. Nesse sentido, informações de precipitação subtraídas de evaporação, inferem em balanço hídrico positivo para dois terços do ano – de fevereiro a setembro (Figura 24).

Figura 24 – Precipitação, umidade, evaporação e balanço hídrico no Recife (estação curado).



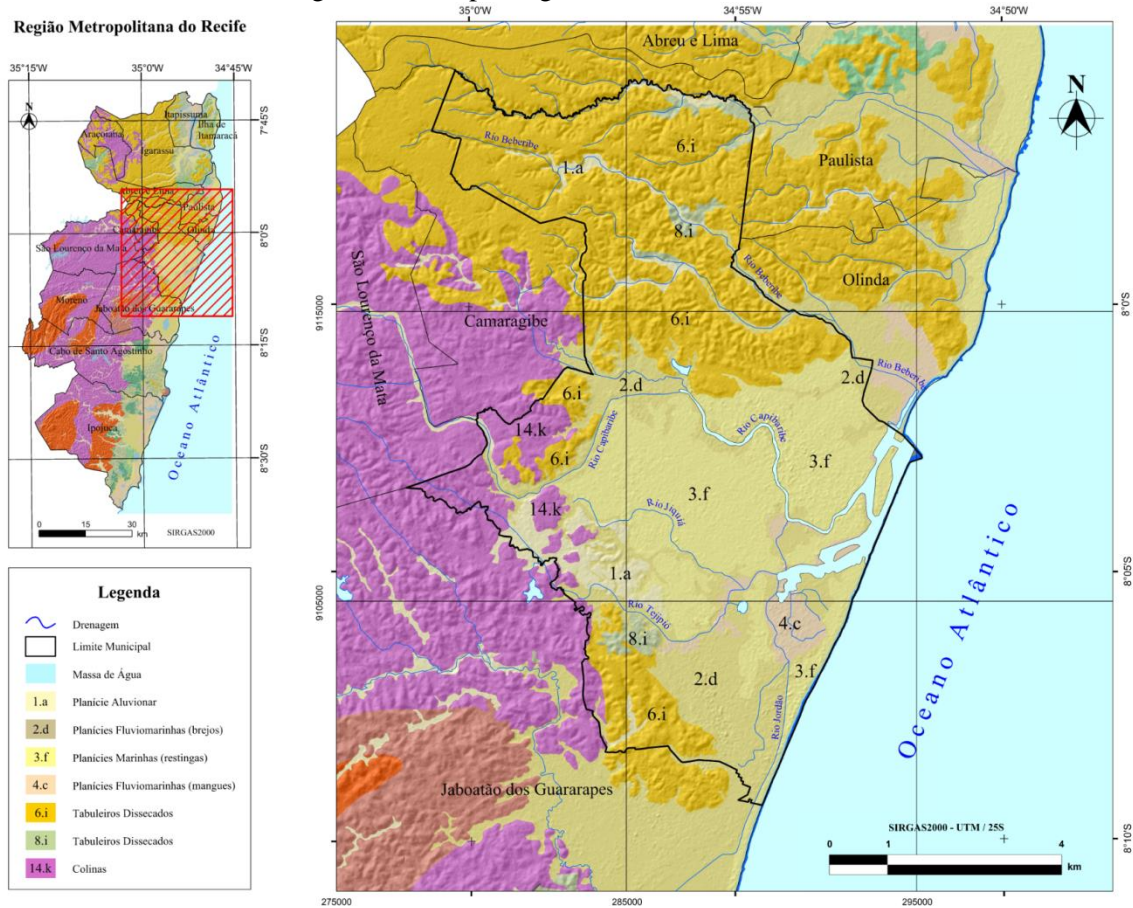
Fonte: INMET (2019).

### 3.3.3 Unidades Geológico-Ambientais

Com parte da costa marinha protegida por linha de arrecifes de arenito, Recife possui unidades geológico-ambientais formadas por (Figura 25): planícies aluvionares (planícies fluviais ou flúvio lacustres); marinho costeiro (planícies costeiras); ambiente misto (planícies flúvio-marinhas compostas de ilhas, penínsulas, alagados e mangues, envolvidos por braços

de rios); e alternância irregular entre camadas de sedimentos de composição diversa, como, tabuleiros dissecados (CPRM, 2010).

Figura 25 – Mapa de geodiversidade do Recife.



Fonte: dados geospaciais (CPRM, 2018; IBGE, 2018a, 2018b).

Da Figura 25, a geodiversidade do Recife tem como características (Tabela 12):

Tabela 12 – Detalhes geológico-ambientais do Recife.

(continua)

Unidade (afloramento principal/subjacente)	Padrões de relevo associados	Formações superficiais/perfil intempérico
1: Ambiente de planícies aluvionares recentes: material inconsolidado e de espessura variável. Da base para o topo é formado por cascalho, areia e argila. Depósito de planícies de inundação (em baixo curso-baixa energia)	a: Planície aluvionar	Areais e argilas depositadas em leitos e margens de drenagens
2: Ambiente fluvioacustre: predomínio de sedimentos arenosos, intercalados com camadas argilosas, às vezes com presença de turfa	d: Planícies fluviomarinhas (brejos)	Argilas, siltes e areias finas, com presença de matéria orgânica (turfa), assentados sobre sedimentos quaternários mais antigos

Tabela 12 – Detalhes geológico-ambientais do Recife.

(conclusão)

<b>Unidade (afioramento principal/subjacente)</b>	<b>Padrões de relevo associados</b>	<b>Formações superficiais/perfil intempérico</b>
3: Ambiente marinho costeiro: predomínio de sedimentos arenosos	f: Planícies marinhas (restingas)	Areias e restos de conchas
4: Ambiente misto (marinho/continental): intercalações irregulares de sedimentos arenosos, argilosos, em geral ricos em matéria orgânica (mangues)	c: Planícies fluviomarinhas (mangues)	Argilas com muita matéria orgânica misturada e areias finas. Área de manguezais
6: Alternância irregular entre camadas de sedimentos de composição diversa (arenito, siltito, argilito e cascalho)	i: Tabuleiros dissecados	Fina camada de solo antropizado sobre solo areno siltoso que cobre camadas de areais, siltes e argilas. Ocasionalmente o solo recobre solo saprolítico mosqueado
8: Predomínio de sedimentos quartzoarenosos e conglomeráticos, com intercalações de sedimentos siltico-argilosos e/ou calcíferos	i: Tabuleiros dissecados	Camada de solo silto-arenoso sobre solo saprolítico arenoso. Eventualmente ocorre uma fina camada de colúvio silto-argiloso recobrimdo o perfil de alteração
14: Predomínios de gnaisses ortoderivados. Podem conter porções migmatíticas	k: Colinas	Presença ocasional de fina camada de colúvio argiloso sobre espessa camada de solo argiloso ou silto-argiloso, camada pouco espessa de solo saprolítico silto-arenoso e saprolito de rocha gnáissica

Fonte: CPRM (2010, 2018).

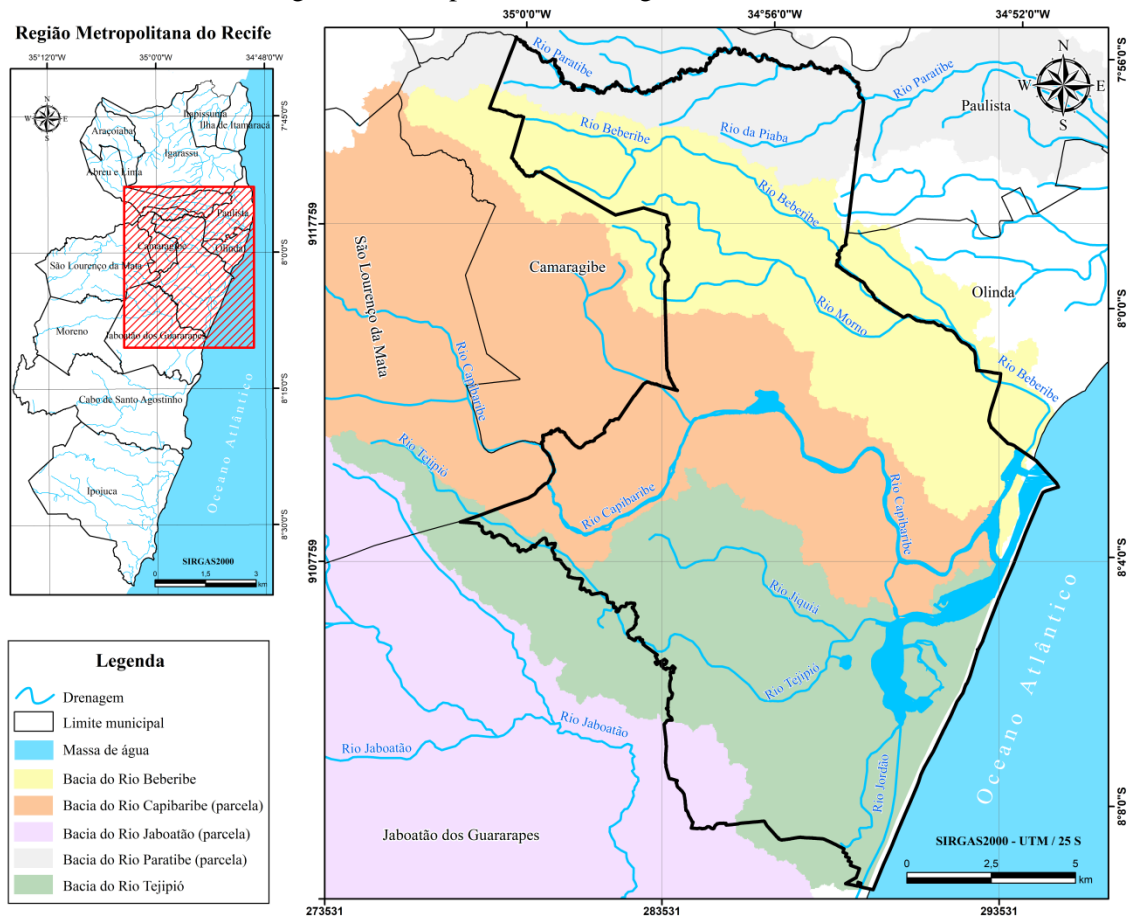
Da Tabela 12, tem-se que o ambiente geológico do Recife é constituído por: domínios de rochas cristalinas de idade pré-cambriana, domínio de rochas sedimentares de idade do cretáceo e domínio dos sedimentos de cobertura. Os sedimentos de coberturas recobrem as rochas cristalinas e sedimentares. E fazem parte da formação barreiras, que constituem a maioria dos morros da cidade do Recife de idade do terciário; e os sedimentos inconsolidados de idade do quaternário, que formam à planície da cidade (VASCONCELOS, BEZERRA, 2000).

### 3.3.4 Especificidades Hidrográficas

Situada em uma localização hídrica privilegiada, Recife tem na hidrografia uma de suas características mais marcantes. É uma cidade cercada e cortada pelas águas de vários rios que a margeiam por todos os lados e lhe conferem paisagem natural única – que a diferencia das demais cidades do Brasil. Nesse aspecto, o município é caracterizado pela abundância hídrica em virtude de estar inserido em importantes bacias hidrográficas – referentes aos rios: Capibaribe, Beberibe e Tejiupió. A foz desses rios constitui um estuário compartilhado com

formação de várias ilhas e diversos braços de rios, os quais se encontram e desaguam suas águas no oceano Atlântico, sobretudo, no mesmo lugar<sup>26</sup> (Figura 26).

Figura 26 – Mapa de rede hidrográfica do Recife.



Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2017, 2018a, 2018b; PCR, 2020c).

Os principais rios do Recife têm como características (SRH-PE, 2010; NAVARRO, 2013; CAMARA, 2015; APAC, 2019):

- Rio Capibaribe<sup>27</sup>: é um dos rios mais importantes do estado de Pernambuco. Ele nasce nas vertentes da Serra do Jacarará, no olho de água do gavião e lagoa do angu, entre os municípios de Poção e Jataúba. Da sua nascente até desaguar no oceano Atlântico, o rio corta 42 municípios e possui 240 km de extensão – cerca de 25 km presentes em Recife. Tem como principal afluente o rio Tapacurá. De forma histórica, o rio Capibaribe é responsável pela formação urbana do Recife,

<sup>26</sup> De modo irreverente, os recifenses costumam dizer que o rio Capibaribe se encontra com o rio Beberibe para juntos formar o Oceano Atlântico.

<sup>27</sup> O nome Capibaribe provém da língua tupi: *Capibaribe*, *Caapiuar-y-be* ou *Capibara-ybe*. Significa: rio das capivaras devido à presença desses animais em abundância em suas margens.

isto é, como via de penetração e limitador natural para ocupação do território. Em especial, em seu baixo curso desde os manguezais até as planícies fluviais desenvolvidas – local da instalação dos engenhos de cana de açúcar. Hoje ocupados por uma densa rede urbana. A bacia hidrográfica do rio Capibaribe abrange uma área de 7.454 km<sup>2</sup>, que representa 7,58% do território de Pernambuco. A abrangência da referida bacia hidrográfica corresponde por 26% da área do Recife, em contato com 49 bairros;

- Rio Beberibe<sup>28</sup>: nasce no município de Camaragibe, na confluência dos seus dois rios formadores – Pacas e Araçá. Possui 27,7 km de comprimento, cerca de 18,3 km se situam em Recife. Tem como principais afluentes o rio Morno e os riachos da Malária, do Euclides e do Vasco da Gama. No final de seu curso o rio Beberibe corre paralelo ao oceano Atlântico na direção Sul até sua foz, onde se encontra com o rio Capibaribe e desembocam juntos no mar – próximo do limite entre Recife e Olinda. Sua bacia hidrográfica se localiza na RMR e dispõe de 84,5 km<sup>2</sup>, dos quais 72% estão em Recife que equivalem a 27% do território recifense ao longo de 43 bairros; e
- Rio Tejipió<sup>29</sup>: nasce no município de São Lourenço da Mata. Caracteriza-se como um rio de pequena extensão com 20 km, dos quais 18 km se localizam em Recife. Tem como principal afluente o rio Jiquiá. É responsável por drenar a área Oeste e também o centro da cidade em direção ao braço Sul do rio Capibaribe – que tem como foz. Sua bacia hidrográfica possui 94 km<sup>2</sup>, desse total 78% residem em Recife que cobrem 33% da área recifense através de 34 bairros.

Além dos principais rios que banham e delimitam a cidade do Recife, há também – em menor proporção – bacias hidrográficas dos rios: Paratibe<sup>30</sup> e Jaboatão<sup>31</sup>. O curso de água do primeiro limita a capital pernambucana com o município de Paulista – na confluência do rio da Piaba. Sua bacia hidrográfica representa 10% da área recifense – situada ao longo de 2 bairros. Em relação ao segundo rio, seu curso de água não passa por Recife e sua bacia hidrográfica cobre apenas 3% do território da referida cidade via 4 bairros.

---

<sup>28</sup> O nome Beberibe possui três significados. O primeiro refere-se ao lugar onde cresce a cana. O segundo deriva do termo tupi: *îabebyrype*. Significa: rio das raias, dos peixes chatos. Por último, relaciona-se à bebé e ribe, que quer dizer voar em bando – referência aos pássaros que se reúnem nas margens do rio.

<sup>29</sup> O nome Tejipió resulta da modificação do tupi antigo: *teîuyppyó*. Significa: multidão de teju – planta que existia em abundância naquelas terras.

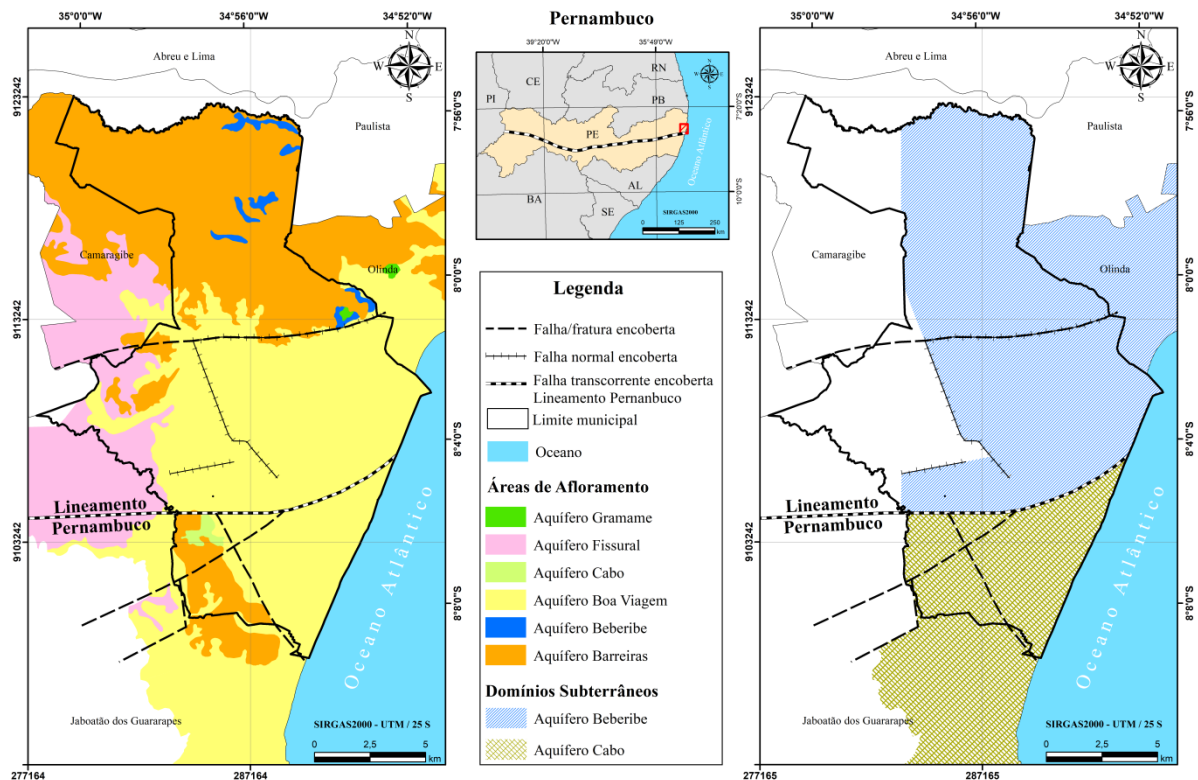
<sup>30</sup> O nome Paratibe vem do tupi: *pirátype*. Significa: rio das águas claras e dos peixes prateados.

<sup>31</sup> O nome Jaboatão origina do tupi: *yapuatã*. Significa: rio fortemente barulhento.

### 3.4 Análise Hidrogeológica

Segundo Costa *et al.* (2005), a cidade do Recife se assenta sobre bacias sedimentares de idade cretácea recobertas por sedimentos recentes de origens diversas (fluvial, marinho, eólico, mangue) em que algumas se constituem em aquíferos (Figura 27).

Figura 27 – Mapa hidrogeológico simplificado do Recife.



Fonte: Costa *et al.* (2002); dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b).

Os aquíferos da Figura 27 ocorrem em diversos domínios hidrogeomórficos do grande Recife, os quais se apresentam de formas diferentes e possuem como aspectos (COSTA *et al.*, 1998a, 1998b, 2002; 2005; COSTA, COSTA FILHO, 2004; COSTA; SANTOS; COSTA FILHO, 2008; CABRAL, 2008; SILVA *et al.*, 2008; BORBA; COSTA FILHO; MASCARENHAS, 2010):

- Aquífero Gramame: apresenta-se na forma livre e localiza-se em subsuperfície sotoposta ao aquífero Boa Viagem e sobreposta ao aquífero Beberibe. Sua ocorrência se caracteriza como lentes delgadas em áreas restritas da porção nordeste da planície do Recife. Suas águas não são exploradas devido à dureza e baixas vazões obtidas nos poços;

- **Aquífero Fissural:** apresenta-se na forma livre e localiza-se com predomínio na região ocidental do Recife nos bairros da Várzea, Curado e nos morros de Tejipló – que se estende para Oeste até Jaboatão dos Guararapes. As águas armazenadas nas fraturas de rochas do embasamento cristalino possuem volumes reduzidos e, por vezes, salinizados. A captação de água via poços não ultrapassa 30 m de profundidade, com vazões inferiores a 10 m<sup>3</sup>/h;
- **Aquífero Barreiras:** apresenta-se nas formas livre e semi-confinada. Situa-se nos arredores da planície do Recife de forma descontínua no formato de morros. Consiste de sedimentos areno-argilosos estabelecidos em camadas estratificadas com espessura média de 40 m. Em função da predominância das fácies psamítica ou pelítica, esse aquífero possui variada condição de permeabilidade e de armazenamento. Sua exploração é pouco desenvolvida. A exploração de água via poços apresenta vazões médias da ordem de 13 m<sup>3</sup>/h na região de Ibura e Jordão; e 3 m<sup>3</sup>/h na região de Aldeia;
- **Aquífero Boa Viagem:** apresenta-se nas formas livre e semi-confinado. Encontra-se na região deltaica dos rios Capibaribes, Beberibe e Tejipló. É formado por sedimentos de aluviões, terraços fluvio-marinhos, dunas antigas, areais de praias, paleomangues. Afloram por quase toda a superfície da planície do Recife e constituem a cobertura do aquífero Beberibe (ao Norte), do aquífero Cabo (ao Sul) e do embasamento cristalino (na região mais Oeste). Esses depósitos sedimentares possuem espessura média de 50 m, com valor máximo de 80 m próximo à região de Boa Viagem. Além disso, a exploração de águas do aquífero Boa Viagem é bastante intensa por poços rasos que dispõe mais de 28% dos poços com vazões superiores a 20 m<sup>3</sup>/h;
- **Aquífero Beberibe:** apresenta-se nas formas livre, confinado e semi-confinado. Encontra-se limitado ao Sul pelo Lineamento Pernambuco e a Oeste pelo embasamento cristalino. Possui espessura média de 100 m com ampliação desse valor no sentido de Oeste para Leste em direção ao oceano Atlântico, no qual atinge espessura de 200 m na zona costeira. Esse aquífero dispõe de dois membros denominados de Beberibe Inferior e Beberibe Superior, ambos formados por arenitos. O primeiro se caracteriza por uma camada de argila calcífera quase contínua ao longo da área. É considerado como principal aquífero em termos de armazenamento e exploração. O segundo apresenta arenitos calcíferos que passam a calcários ou calcarenitos em transição para os calcários da formação Gramame –

de ocorrência em algumas áreas mais a Leste. De modo geral, esses dois membros são tratados como unidade única. Em relação ao abastecimento de água, o aquífero Beberibe é o mais importante em toda faixa costeira de Pernambuco. É explorado para as mais diversas finalidades de uso, com a COMPESA responsável pelos maiores volumes extraídos. Os poços explorados por essa concessionária, no aquífero Beberibe, operam vazões médias de 50 m<sup>3</sup>/h a 70 m<sup>3</sup>/h. Mas alguns desses poços podem atingir 400 m<sup>3</sup>/h; e

- Aquífero Cabo: apresenta-se nas formas livre, confinado e semi-confinado. Localiza-se no domínio hidrogeológico da porção Sul na planície do Recife, limitado ao Norte pelo Lineamento Pernambuco e a Oeste pelo embasamento cristalino. A formação Cabo tem variadas granulometrias, desde o conglomerado polimítico da base, com passagem pelo arenito arcoseano, até camadas de argila. Essa variação faciológica ocorre na orientação vertical e horizontal. Com isso, possui maior permeabilidade em função do predomínio das fácies arenosas. E também menor permeabilidade devido às fácies siltico-argilosa. A recarga do aquífero Cabo se dá de duas formas. A primeira em função da passagem de água por drenança vertical descendente do aquífero Boa Viagem de forma muito lenta. Isso porque as camadas silticoargilosas que ocorrem no aquífero superior possuem condutividade hidráulica muito baixa. A segunda se realiza na planície do Recife no bairro do Barro, em área de apenas 5,5 km<sup>2</sup>. Quanto à exploração, o aquífero Cabo é o segundo mais empregado depois do aquífero Beberibe. Apesar de sua intensa exploração, a unidade aquífera é de baixa vocação hidrogeológica devido à presença de argila e lentes silto-argilosas. Poços perfurados no aquífero Cabo na região de Boa Viagem tem vazões inferiores a 5 m<sup>3</sup>/h.

De modo geral, as características dos principais aquíferos do domínio da planície do Recife se resumem da seguinte forma (Tabela 13):

Tabela 13 – Aspectos dos principais aquíferos da planície do Recife.

(continua)

Propriedade	Aquífero		
	Boa Viagem	Beberibe	Cabo
Transmissividade	7,0 x10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s	2,2 x10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s	8,6 x10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
Condutividade hidráulica	1,7 x10 <sup>-4</sup> m/s	2,2 x10 <sup>-5</sup> m/s	1,0 x10 <sup>-5</sup> m/s
Porosidade eficaz	1,0 x10 <sup>-1</sup>	1,0 x10 <sup>-1</sup>	7,0 x10 <sup>-2</sup>
Coefficiente de Armazenamento	-	2,0 x10 <sup>-4</sup>	1,0 x10 <sup>-4</sup>

Tabela 13 – Aspectos dos principais aquíferos da planície do Recife.

(conclusão)

Propriedade	Aquífero		
	Boa Viagem	Beberibe	Cabo
Espessura média (m)	40	100	90
Idade geológica	Quaternário	Cretáceo superior	Cretáceo inferior
Constituição litológica	Areias, siltes e argilas	Arenitos com intercalações de siltitos e argilitos	Arenitos, siltitos e argilitos

Fonte: Costa *et al.* (1998a).

### 3.4.1 Exploração de Águas Subterrâneas

A água subterrânea quando utilizada com critérios – técnicos e legais – caracteriza-se em reserva estratégica importante, que pode ser usada como recurso mineral complementar para enfrentar períodos de crise hídrica. Essa constatação assertiva se opõe à realidade da região do Grande Recife. A perfuração desenfreada de poços no auge da crise hídrica de abastecimento, na década de 1990, há deixado como herança milhares de poços clandestinos. Tamanho descontrolado, desde então, geram sérias consequências aos mananciais subterrâneos os quais têm reduzido de forma alarmante os níveis de suas águas.

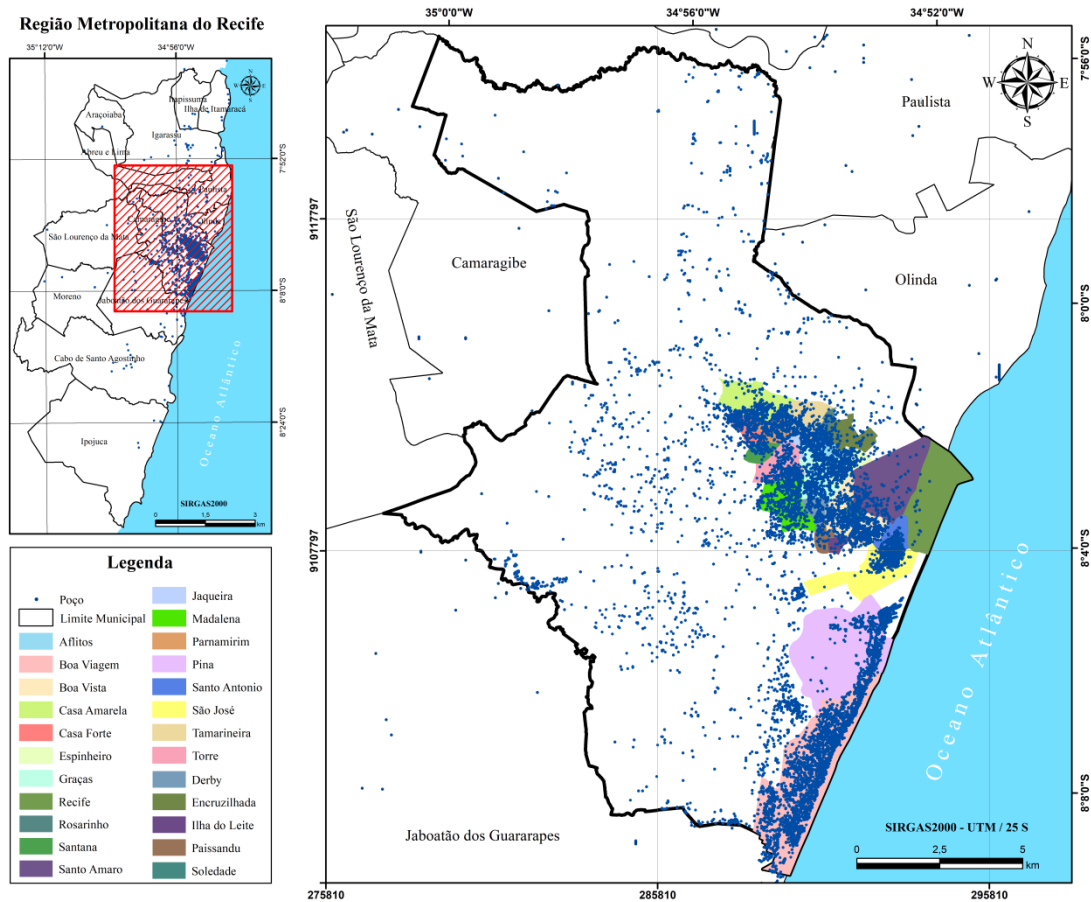
De forma histórica, as explorações de águas subterrâneas na região do Grande Recife, em especial na planície recifense, são realizadas a mais de 60 anos de forma desordenada e sem critérios técnicos (MONTEIRO, 2000). Segundo Costa *et al.* (2005), há relatos de poços construídos no bairro de Boa Viagem na década de 1930. E para fins de abastecimento, tem-se registro de poços perfurados pela COMPESA e pelo DNPM, entre outros, na década de 1970 (MONTENEGRO *et al.*, 2009).

Nos anos seguintes em Recife, potencializa-se a captação hídrica subterrânea via perfuração de poços decorrentes de uma série de fatores. Isto é, devido à oferta insuficiente dos sistemas de águas superficiais; à falta de controle na perfuração e exploração; o aumento populacional; e às condições climáticas – refletidas por graves estiagens e regimes de racionamento. Ou seja, resultado da significativa diminuição das precipitações em função do fenômeno *El Niño* para os períodos de 1979 a 1983, de 1992 a 1993 e de 1997 a 1999 (MONTEIRO, 2000; CASTRO; HELLER; MORAIS, 2015).

Nos dias atuais, a exploração de água subterrânea na Região Metropolitana do Recife corresponde por mais de 14 mil poços (entre públicos e privados) – responsável por atender 28% do consumo dos habitantes (ARANTES, 2016). Entre os municípios dessa região, Recife detém a maior quantidade de poços do país com estimativa de 13 mil captações – porém, a maioria não é cadastrada e de existência desconhecida de órgãos públicos administradores (ALISSON, 2013). Desse valor aproximado possuem termo de outorga cerca de 43% dos

poços perfurados<sup>32</sup> no Recife, os quais, quanto à sua localização, estão mais concentrados nos bairros das zonas Sul (Boa Viagem e Pina) e Norte-Centro (Casa Forte, Casa Amarela, Parnamirim, Jaqueira, Espinheiro, Tamarineira, Aflitos, Graças, Madalena, Torre, Boa Vista, São José, Santo Antonio, Derby, Soledade, Santo Amaro, Encruzilhada, Rosarinho, Ilha do Leite, Paissandu, Recife e Santana) da cidade (Figura 28).

Figura 28 – Mapa de poços outorgados em Recife.

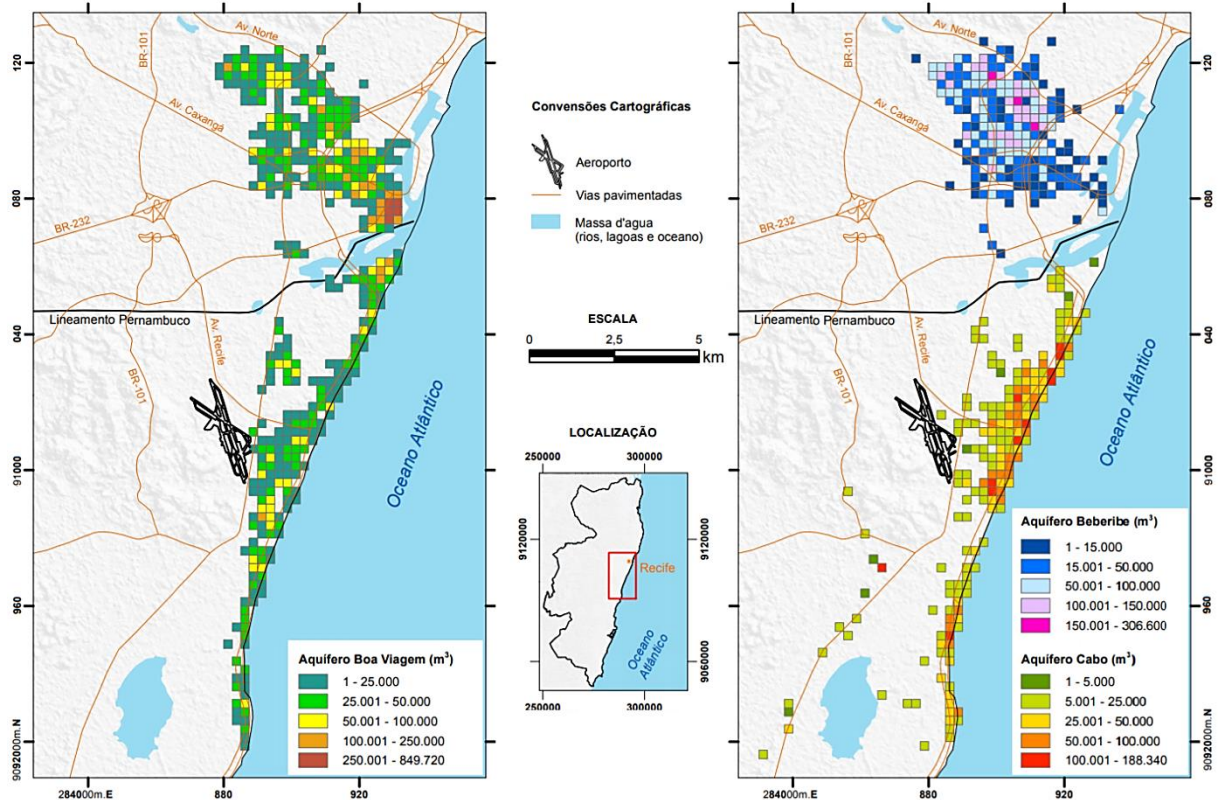


Fonte: dados geoespaciais (CPRM, 2019; IBGE, 2018a, 2018b).

Enfatiza-se que a maioria das captações de águas subterrâneas no Recife ocorre sem fiscalização. A Figura 28 representa uma parte da realidade recifense referente, apenas, a poços outorgados – ou seja, supervisionados por órgãos públicos administradores. Além disso, o volume hídrico explotado por esses poços é bem intenso (Figura 29). Em especial, no aquífero Cabo – na zona Sul do Recife.

<sup>32</sup> Consulta realizada em 15 de julho de 2019 na base de dados do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS, [http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/visualizar\\_mapa.php](http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/visualizar_mapa.php)) – desenvolvido e mantido pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) por meio da CPRM – consta que Recife possui 5647 poços outorgados.

Figura 29 – Mapas de volumes anuais explotados dos aquíferos: Boa Viagem, Beberibe e Cabo.



Fonte: CPRM (2017).

### 3.4.2 Situação dos Aquíferos

A cidade do Recife apresenta um quadro de sustentação hídrica baseado, sobretudo, na utilização de águas superficiais de reservatórios. Nas últimas décadas, no entanto, situações adversas – decorrentes de efeitos climáticos convertidos em secas prolongadas somadas ao aumento populacional – impulsionam o uso de águas subterrâneas para atender a crescente demanda do município. Entretanto, a retirada desse recurso mineral – de forma intensa e desordenada – ocasiona redução acentuada nos níveis dos seus aquíferos.

A época mais crítica da falta de água em Recife se registra na década de 1990, em decorrência de períodos de estiagens prolongadas ocorridas em todo o estado de Pernambuco. A década é marcada por um colapso nos reservatórios hídricos superficiais, com redução a 10% de suas reservas. Tal situação, desde então, estimula a demanda por água subterrânea com a finalidade de atender: indústrias, condomínios, hospitais, escolas. E, bem como, de suprir a ineficiência do serviço de abastecimento público.

A ampla mobilização dos municípios pernambucanos por aportes hídricos subterrâneos no final do século passado, com destaque para a cidade do Recife, resulta em áreas em processo de exaustão de aquíferos (MONTEIRO, 2000) – uma vez que a exploração excessiva de águas subterrâneas, em desequilíbrio com processo de recarga natural, provoca o

rebaixamento piezométrico do aquífero. E como consequência pode expor as futuras gerações à escassez desse precioso bem mineral.

Quanto a essa projeção catastrófica, ressalta-se que a diminuição no nível dos aquíferos do Recife já alcança valores preocupantes. Os principais aquíferos – Boa Viagem, Beberibe e Cabo – apresentam quadro de redução de água subterrânea acentuada. Estudos realizados por Manoel Filho (2004) referentes ao balanço hídrico entre potencialidade (P)<sup>33</sup> e disponibilidade (D)<sup>34</sup>, sugerem um déficit de 55,12 hm<sup>3</sup>/ano nos aquíferos da planície recifense (Tabela 14).

Tabela 14 – Balanço hídrico dos aquíferos da planície do Recife.

Aquífero	Recarga (hm <sup>3</sup> /ano)	30% da reserva permanente em 50 anos (hm <sup>3</sup> /ano)	P (hm <sup>3</sup> /ano)	D (hm <sup>3</sup> /ano)	Número de poços	Fluxo natural (hm <sup>3</sup> /ano)	Balanço
Boa Viagem	28,7	2,69	31,39	-11,82	8094	-11,64	7,93
Beberibe	9,14	2,69	11,83	-64,04	1687	-7,49	-59,7
Cabo	5,35	0,88	6,23	-28,71	1478	-7,16	-29,64
<b>Total</b>	<b>43,19</b>	<b>6,26</b>	<b>49,45</b>	<b>-104,57</b>	<b>11259</b>	<b>-26,29</b>	<b>-81,41</b>

Fonte: Manoel Filho (2004).

Em Recife, a maior atenção do rebaixamento potenciométrico excessivo ocorre nos aquíferos profundos. Apenas no intervalo de cinco anos – de 1997 a 2002 – investigações hidrogeológicas conduzidas por Costa *et al.* (2002) revelam que os aquíferos Beberibe (ao Norte) e Cabo (ao Sul) possuem redução hídrica acentuada com valores de 40 m e 30 m, respectivamente. Ainda de acordo com esses autores, tais mananciais subterrâneos se encontram em regime de elevada exploração – com saldo negativo entre as camadas (recarga natural) e saídas (exutórios naturais e artificiais).

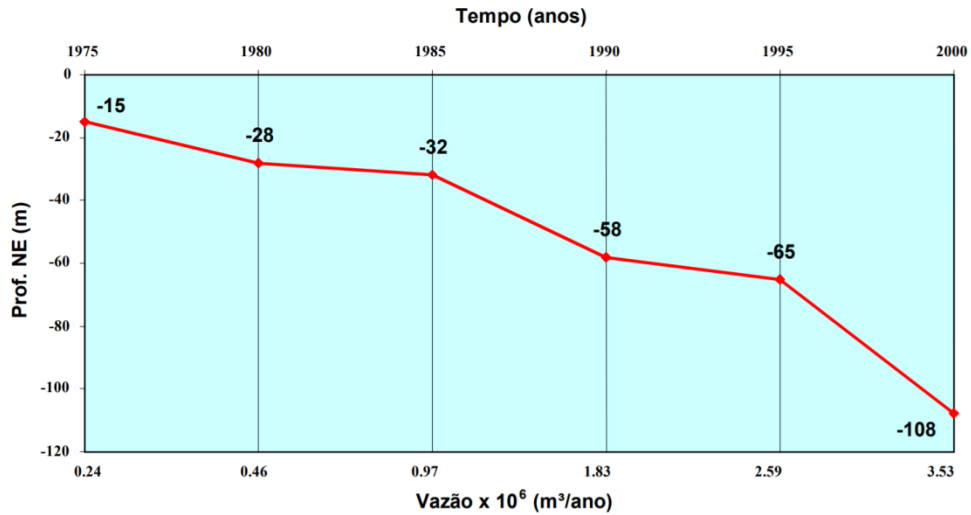
Entre os aquíferos profundos, o Cabo possui a situação hídrica mais preocupante. Na área de Boa Viagem (Figura 30) a depleção média de 1975 a 1985 é de 17 m, ou seja, 1,7 m por ano; de 1985 a 1995 é de 33 m, isto é, 3,3 m por ano; e de 1995 a 2000 é de 43 m, ou seja, redução de 8,6 m por ano (COSTA; COSTA FILHO, 2004). Isso significa que os níveis potenciométricos do aquífero se localizam em profundidades superiores a 100 m. Destaca-se que no início de 1970 a mesma superfície hídrica é localizada na profundidade de 10 m. Ao considerar que o topo da camada aquífera semi-confinada se encontra a cerca de 60 m no

<sup>33</sup> Potencialidade: soma da recarga natural mais 30% da reserva permanente em 50 anos.

<sup>34</sup> Disponibilidade: quantidade extraída por poços.

começo dos anos 2000, logo, os constantes rebaixamentos podem ocasionar esgotamento do aquífero em poucos anos (COSTA, 2000).

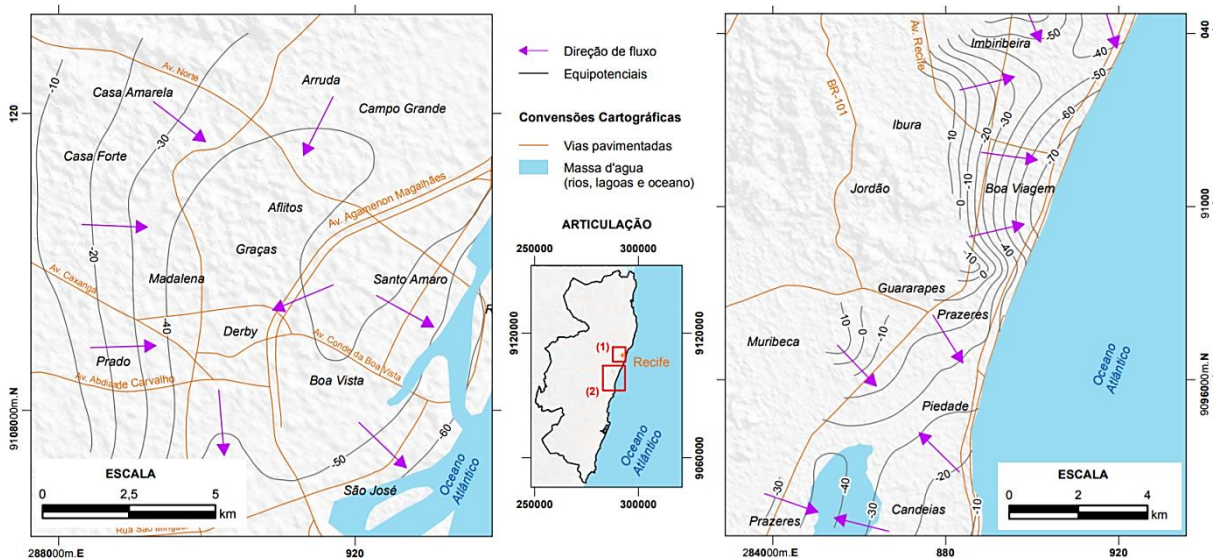
Figura 30 – Redução dos níveis de água do aquífero Cabo, em Boa Viagem.



Fonte: Costa e Costa Filho (2004).

Nessa perspectiva, o risco potencial da superexploração de mananciais subterrâneos em Recife é considerado como risco real. Isso porque o rebaixamento das reservas hídricas do subsolo se identifica em quase toda a área do Recife. Ênfase da redução potenciométrica para às zonas Norte-Centro e Sul da cidade, com variação das curvas potenciométricas da ordem de -60 m e -70 m, respectivamente, de 2003 a 2013 (Figura 31).

Figura 31 – Mapas potenciométricos dos aquíferos: Beberibe <sup>(1)</sup> (à esquerda) e Cabo <sup>(2)</sup> (à direita) para o período de 2003 a 2013.



Fonte: CPRM (2017).

De maneira oportuna, desde 2001 o governo de Pernambuco utiliza a barragem de Pirapama<sup>35</sup> com capacidade de fornecimento de 5.000 L/s. Com isso, no momento atual a COMPESA consegue evitar o racionamento de água das zonas Sul e Centro do Recife. O abastecimento por meio do reservatório há proporcionado diminuição da vazão bombeada pelos poços em tais regiões e, como consequência, tem possibilitado – ainda que de forma lenta – a recuperação dos níveis potenciométricos de aquíferos.

### 3.4.3 Desenvolvimento da Subsidência do Solo

Em várias partes no mundo, casos conhecidos de subsidência do solo decorrentes da exploração de água subterrânea estão relacionados ao expressivo rebaixamento dos níveis de aquíferos. Isso porque a subtração hídrica significativa e contínua em longo prazo – acima de sua capacidade natural de regeneração – promove a exaustão desse precioso recurso mineral. E, assim, interfere na estabilidade da superfície terrestre por meio do abatimento do solo.

É nesse cenário que a cidade do Recife se situa. A retirada desmedida de água subterrânea causa regressão acentuada nos níveis de aquíferos, com aumento sensível a zona de aeração, isto é, área não saturada do aquífero. Logo, o risco eventual da compactação de sedimentos na planície do Recife se revela real uma vez que a recarga é muito mais lenta que a retirada por bombeamento excessivo. Desta forma, ocasiona diminuição significativa da superfície potenciométrica – com implicações diretas na diminuição da oferta de água e no comprometimento da segurança hídrica.

Outro aspecto importante à subsidência do solo em Recife consiste na falta de uma recarga eficaz nos mananciais subterrâneos. A superexploração de aquíferos não é compensada de forma adequada, ou seja, as formações geológicas Beberibe e Cabo não afloram nas proximidades da zona de exploração. Dessa maneira, a recarga se processa através de transferência por drenança vertical descendente do aquífero Boa Viagem nos locais onde a camada basal de argila é menos espessa ou escassa (COSTA *et al.*, 2005).

A possibilidade de subsidência do solo em Recife devido à falta de regeneração de aquíferos – intensamente explorados e em longo prazo – verifica-se também em função do processo de urbanização da cidade. A superfície impermeabilizada de vastas áreas construídas (edificações, indústrias, sistemas viários pavimentados) compromete a capacidade natural de

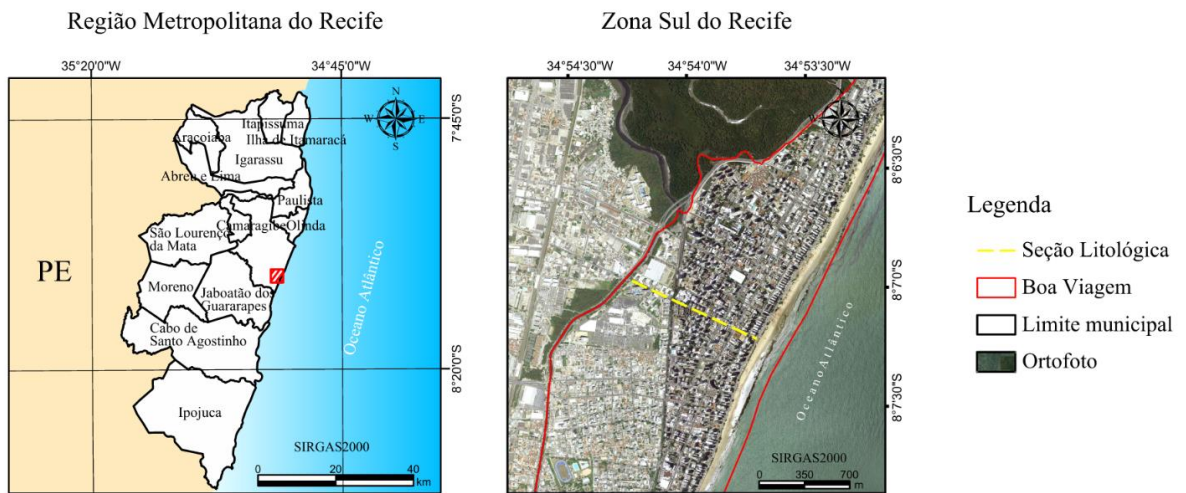
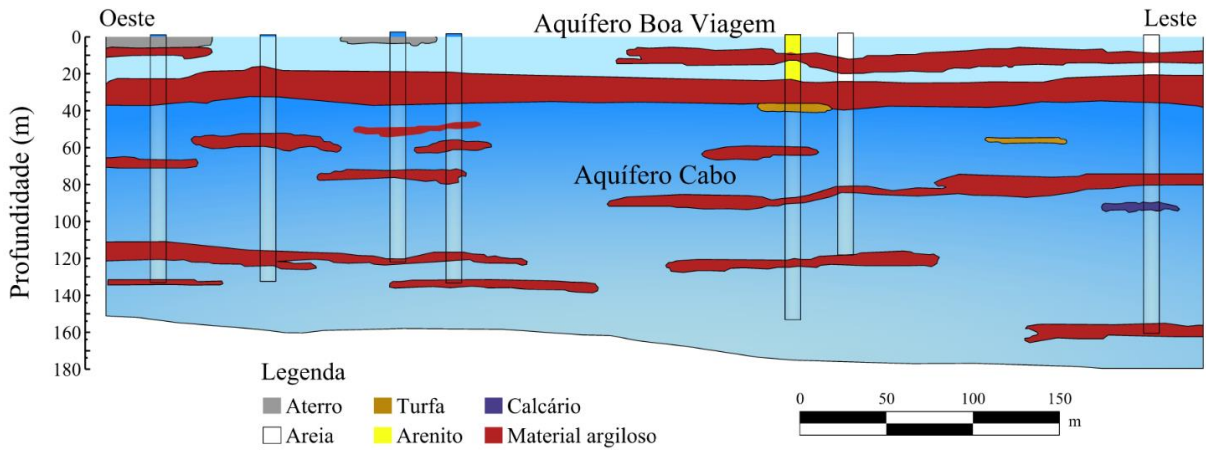
---

<sup>35</sup> A barragem de Pirapama se localiza no município do Cabo de Santo Agostinho. É o principal manancial do complexo de sistemas de abastecimento de água que atende a RMR, responsável por 35% do atendimento. Possui capacidade de armazenamento total de 60,88 hm<sup>3</sup>.

regeneração de mananciais subterrâneos pela diminuição da infiltração de água superficial. E, por consequência, gera impactos ao abastecimento pelo bombeamento hídrico subterrâneo.

Além disso, acrescenta-se que a composição litológica dos aquíferos confinados na cidade do Recife é muito perigosa (Figura 32): o aquífero Boa Viagem é limitado pela camada argilosa que vai até a profundidade de 40 m. Abaixo, reside o aquífero Cabo que também possui diversas lentes argilosas descontínuas. Ao tempo em que o aquífero freático Boa Viagem se encontra saturado com nível muito raso (2 m a 3 m), o nível atual do aquífero Cabo a ele sotoposto se situa nessa região a 100 m de profundidade – o qual, em processo de rebaixamento, deixa uma zona desprovida de água de saturação de 60 m de espessura. E aumenta mais a chance de subsidência do solo (COSTA *et al.*, 2005).

Figura 32 – Seção litológica de direção Oeste a Leste em Boa Viagem.



Fonte: Cabral *et al.*, (2004); dados geoespaciais (APAC, 2015b; IBGE, 2018a, 2018b).

A concepção popular de que o nível freático na planície do Recife se mantém próximo do nível do mar e dos níveis dos rios, canais e estuários – todos invadidos pela maré – e, com isso, é capaz de evitar o rebaixamento do solo não se aplica. Isso porque a ingressão da cunha salina não se propaga para o interior no mesmo ritmo do decréscimo de água doce. Logo, não impede a compactação de sedimentos pela sua massa. Riscos alarmantes de subsidência do solo em Recife são considerados em função das seguintes condições naturais (COSTA, 2000):

- Planície: por está situada em altitude de 0 a 5 m acima do nível do mar, o rebaixamento superficial de apenas 2 m permite uma inundação pelo mar de cerca de 50% da área da cidade; e
- Camadas de argila: por serem descontínuas e de variadas espessuras, a compactação de sedimentos acarreta deformação estrutural com fissuras e rachaduras em obras civis.

Em outras palavras, o sistema aquífero do Recife é estratificado e existem algumas camadas intermediárias com baixa condutividade hidráulica que se caracterizam em equitardo, ou seja, isola a camada de cima da camada de baixo. No mesmo terreno, algumas vezes existe poço raso com nível de água próximo do solo e poço profundo com nível de água algumas dezenas de metros abaixo.

Em vista dessa perspectiva, indícios de afundamento do solo em Recife são motivos de investigação nas últimas décadas (ROMÃO *et al.*, 2003; SANTOS, 2005; SANTOS; CABRAL; PONTES FILHO, 2012; LUNA *et al.*, 2014, 2015, 2017, 2018, 2021). Até o momento, por ser a área com redução hídrica mais acentuada referente à exploração do aquífero Cabo, estudos voltados ao rebaixamento do solo na capital pernambucana se concentram nos bairros da zona Sul. Há constatado na região afundamento de 3,86 cm em valor de altitude para um dos marcos analisados entre os anos de 1958 e 2015, com velocidade de deslocamento vertical estimada em -0,68 mm/ano (LUNA *et al.*, 2017, 2018).

### **3.5 Considerações Finais**

De lugarejo habitado por mareantes e pescadores à metrópole regional cosmopolita, Recife é uma cidade que se coloca a frente de seu tempo sem se desprender do seu passado – característica presente na preservação de fatos históricos e do patrimônio multicultural. Isso se verifica no seu amplo legado histórico, herdado de povos estrangeiros (europeus, africanos, árabes) e nativos (indígenas) que se fundem na paisagem, na musicalidade, no comércio, na

gastronomia, na literatura, nos hábitos e costumes da cidade. Tais atrativos atraem milhares de turistas devido à programação eclética disponível no Recife e, por consequência, geram benefícios diretos para a economia local.

Do passado aos dias atuais, a capital de Pernambuco se caracteriza como fruto das mudanças e manifestações da soma das épocas. Mas com desafios iminentes para solucionar em vários aspectos. Em especial, decorrentes de riscos potenciais da subsidência do solo relativos à excessiva exploração das águas subterrâneas – com significativa diminuição dos níveis potenciométricos de aquíferos da planície recifense. Redução motivada, nas últimas décadas, devido à oferta insuficiente dos sistemas de águas superficiais, o aumento populacional, às mudanças climáticas, e à falta de controle na perfuração e captação hídrica.

Nesses aspectos, a crescente demanda por água potável é motivo de preocupação para às futuras gerações, sobretudo, em virtude da carência de água superficial. Isso faz Recife lidar com o dilema que advém do desenvolvimento urbano, isto é: promover o abastecimento público no presente sem comprometer os recursos hídricos esgotáveis do subsolo para atender as gerações futuras. A água subterrânea representa uma das principais fontes de abastecimento da cidade, a qual possui uma das maiores densidades de poços do país – superior a 13 mil (entre públicos e privados). A maior parte não é cadastrada, tem existência desconhecida de órgãos administradores e uso desmedido, o que resulta em sérios impactos nos aquíferos.

Ao longo de anos, os principais mananciais subterrâneos do Recife possuem quadro de intensa redução hídrica em quase toda área da cidade – efeitos da exploração demasiada em desequilíbrio com o processo de recarga natural. A maior atenção, no entanto, ocorre nos aquíferos profundos situados na planície recifense, ou seja: Beberibe, Cabo e Boa Viagem. A situação hídrica mais crítica se verifica no aquífero Cabo. Estudos realizados por Costa e Costa Filho (2004) indicam depleção acima de 100 m de 1975 a 2000, com tendência ao esgotamento em poucos anos. Quanto à localização, as maiores reduções das reservas hídricas do subsolo residem nas zonas Norte-Centro e Sul da cidade com variação das curvas potenciométricas de -60 m e -70 m, respectivamente, de 2003 a 2013 (CPRM, 2017). Apesar de haver uma leve recuperação dos níveis hídricos subterrâneos após a construção da barragem de Pirapama, o alerta para evitar bombeamento excessivo continua pertinente.

Paralelo a isso, nota-se que a exploração acentuada de água subterrânea além de provocar danos irreparáveis a aquíferos pela sua exaustão, ocasiona também instabilidade à superfície. E, em decorrência disso, diversos problemas (ambientais, sociais, econômicos, estruturais) podem surgir. A situação da cidade do Recife converge para essa constatação. Há grande risco de se desenvolver sérios problemas quanto ao afundamento do solo devido às

condições dominantes, ou seja: composição litológica com inúmeras camadas e lentes de argila; quadro de intensa exploração hídrica com redução contínua dos níveis de aquíferos; recarga precária dos mananciais subterrâneos. Ademais, quando existe carregamento de pavimentos e edificações, a liberação de água dos poros do solo também causa rebaixamento do nível do terreno. No caso de solos moles pode acumular significativos deslocamentos verticais descendentes ao longo de alguns anos.

Da combinação desses elementos, por conseguinte, projetam-se desastres na cidade quanto à deformação superficial. Pode ter como consequências: inundação pelo mar, fissuras e rachaduras de obras civis. Tais circunstâncias fazem do Recife uma cidade bastante vulnerável à subsidência do solo. Mantidas essas projeções, sinalizam para um cenário de catástrofe anunciada. Em vista disso, uma das principais adversidades à capital pernambucana é evitar a tragédia dos bens comuns em que a soma dos interesses individuais das pessoas (perfuração de poços) leva ao esgotamento dos recursos hídricos subterrâneos comuns (exploração de aquíferos) e, além do mais, ocasiona problemas para todos (subsidência do solo). Quanto a isso, a zona Sul do Recife, por ser a localidade mais impactada pela exploração do aquífero Cabo, há tempos é motivo de investigação por parte da comunidade técnica-científica. Na região, tem-se registro de afundamento de 3,68 cm situado na área de Boa Viagem (LUNA *et al.*, 2017, 2018).

Acerca disso, até o momento, estudos avaliativos do rebaixamento do terreno em Recife se concentram na zona Sul da cidade por meio de métodos geodésicos terrestres de precisão: posicionamento por GNSS e nivelamento geométrico. Os procedimentos, entretanto, são responsáveis por detectar de forma pontual e restrita a deformação superficial. Nessa ocasião, a intervenção antrópica desmedida nos recursos hídricos subterrâneos com impactos à superfície carece por investigações na totalidade da planície recifense. Áreas habitadas que apresentam risco potencial desse fenômeno devem ser avaliadas e seus limites bem definidos de modo a evitar problemas inerentes ao afundamento do solo.

Desta forma, técnicas espaciais de observação de grandes áreas baseadas em Geodésia de precisão são requeridas à instabilidade superficial do Recife a fim de identificar, monitorar e mitigar a subsidência do solo. Isto é, através de ampla densificação de pontos de medição e de elevada frequência temporal. Esses aspectos demandam por procedimentos geodésicos de precisão, do tipo: teledeteção remota com interferometria de Radar – ferramenta vigente em investigações precisas à deformação do solo de maneira ampla, densa e repetitiva. Em vista disso, portanto, tem suas funcionalidades descritas no próximo capítulo.

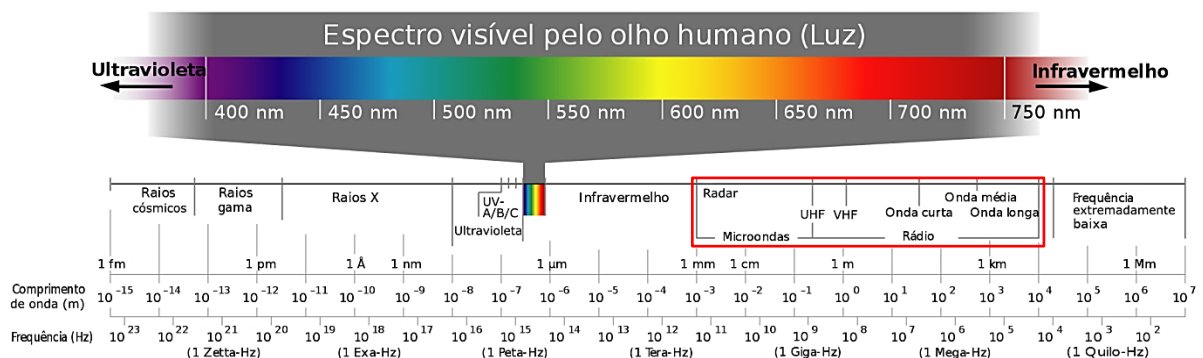
## 4 INTERFEROMETRIA DE RADAR POR SATÉLITE

O capítulo examina conceitos básicos envolvidos nas tecnologias Radar e interferometria de Radar por satélite, com descrição do sinal de onda eletromagnética – importante no processo matemático de detecção de objetos. Na sequência, enfatizam-se as características essenciais de Radar de abertura sintética referentes aos aspectos geométricos, orbitais e missões espaciais. Há destaque para imagens orbitais e fatores que ocasionam distorções em sua aquisição. Em seguida, abordam-se as propriedades InSAR quanto à geometria, ao corregristo, ao interferograma e às fontes de erros. Ao final, verificam-se técnicas InSAR voltadas à instabilidade superficial com análise dos principais métodos de processamento InSAR para monitoramento do relevo da Terra.

### 4.1 Considerações sobre Radar

A palavra Radar significa detecção e telemetria por rádio. Refere-se à técnica e, bem como, ao instrumento propriamente referido – construído em 1904 por Christian Hülsmeier<sup>36</sup> em Duesseldorf, na Alemanha. Funciona na emissão de feixes (ou pulsos) de energia eletromagnética da região espectral de ondas de rádio e microondas (Figura 33).

Figura 33 – Espectro eletromagnético, com destaque para ondas de rádio e microondas.

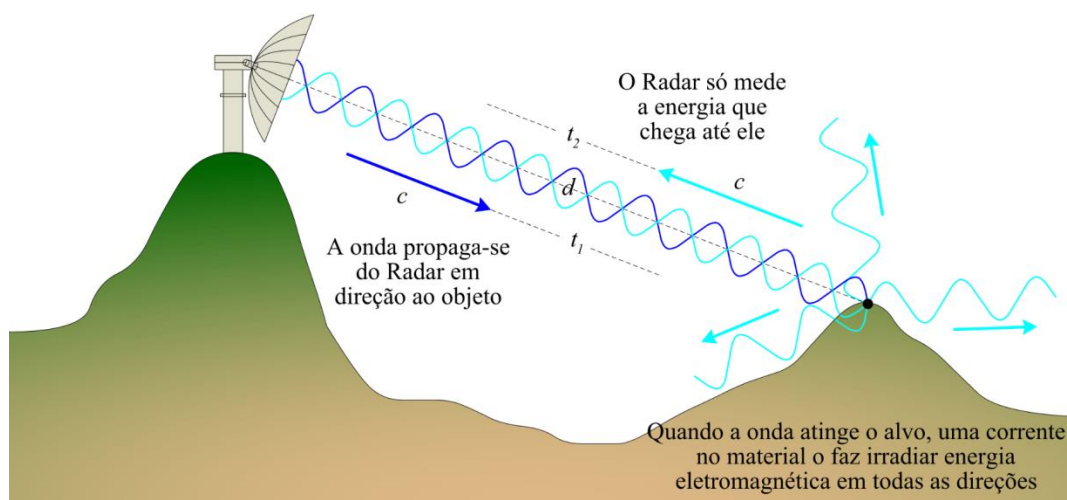


Fonte: Frank (2007).

<sup>36</sup> O engenheiro alemão Christian Hülsmeier é o inventor do Telemobiloscópio: sistema transmissor-receptor usado para detectar objetos metálicos distantes por meio de ondas elétricas (HOLLMANN, 2007).

O procedimento consiste em usar o tempo de percurso bidirecional do pulso para determinar o alcance do elemento detectado e sua intensidade de retroespalhamento para inferir quantidades físicas. Tais como: tamanho ou rugosidade da superfície. As ondas eletromagnéticas são emitidas pela antena do aparelho que ao atingir alvos distantes são refletidas de volta em forma de eco. O cálculo do tempo entre transmissão e recepção do sinal permite a localização do objeto na linha de visão (LOS: *Line-Of-Sight*) do Radar (Figura 34).

Figura 34 – Princípio da detecção de objeto pelo Radar. Elementos: distância ( $d$ ), velocidade da luz ( $c$ ), tempo de transmissão ( $t_1$ ) e tempo de retorno ( $t_2$ ).



Fonte: adaptado de Moreira (2011).

Na Figura 34, tem-se que a distância ( $d$ ) é obtida por meio da medição do atraso de propagação entre a transmissão e o eco da onda eletromagnética (Equação 2):

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2)$$

Em que:

$d$ : é a distância média;

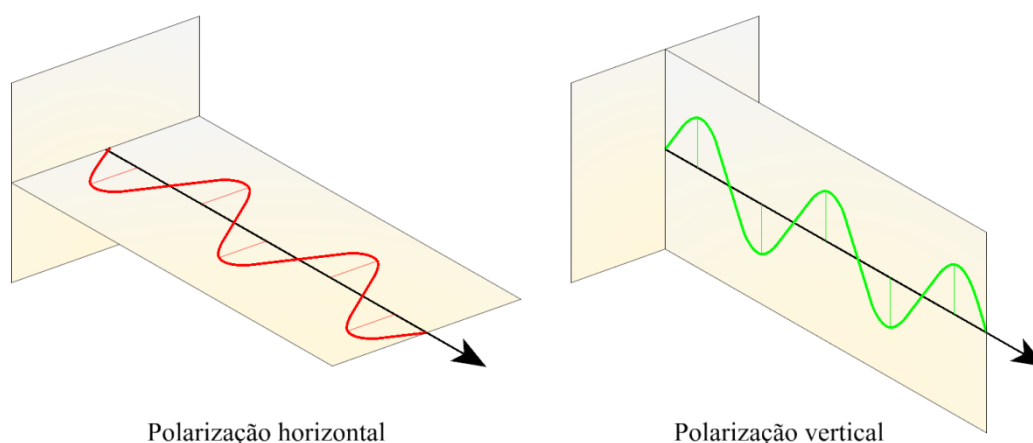
$c$ : é a velocidade da luz, igual a  $3 \cdot 10^8$  m/s; e

$\Delta t$ : é a variação do tempo de ida e de retorno do sinal.

As ondas eletromagnéticas resultam da interação de campos elétricos e campos magnéticos – perpendiculares entre si. A antena do Radar pode ser configurada para transmitir e receber radiação eletromagnética (do campo elétrico) polarizada horizontal (H) e/ou vertical

(V). A polarização é definida em função das energias transmitidas e recebidas. Paralelas (HH e VV) quando as energias transmitidas e recebidas são polarizadas na mesma direção. E cruzadas (HV ou VH) quando as energias transmitidas e recebidas são polarizadas na direção ortogonal (Figura 35).

Figura 35 – Polarização de ondas eletromagnéticas.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A capacidade do Radar em detectar alvos a certas distâncias se revela importante para fins militares. De modo histórico, no prelúdio da segunda guerra mundial países envolvidos nesse conflito buscam de forma independente e em segredo aperfeiçoar o dispositivo. Exemplos de melhorias significativas ocorrem na Inglaterra em termos de exatidão do processamento de sinal. Durante a segunda guerra os ingleses conseguem prever com sucesso bombardeios efetuados pelos alemães. Dessa maneira, obtêm tempo hábil de soar o alarme para a população se proteger. E, com isso, evitar baixas civis (MOREIRA, 2011).

Após a segunda guerra mundial, o uso do Radar de forma exitosa para fins bélicos proporciona expansão de sua aplicação para outras áreas devido à capacidade de identificar dados relacionados a quatro dimensões do objeto. Tais como: distância (pelo tempo decorrido entre a emissão e recepção do eco); tamanho (de acordo com a forma e comportamento visual do sinal); posição (com uma antena direcional chamada goniômetro); e altitude (conseguido com a conexão entre várias antenas).

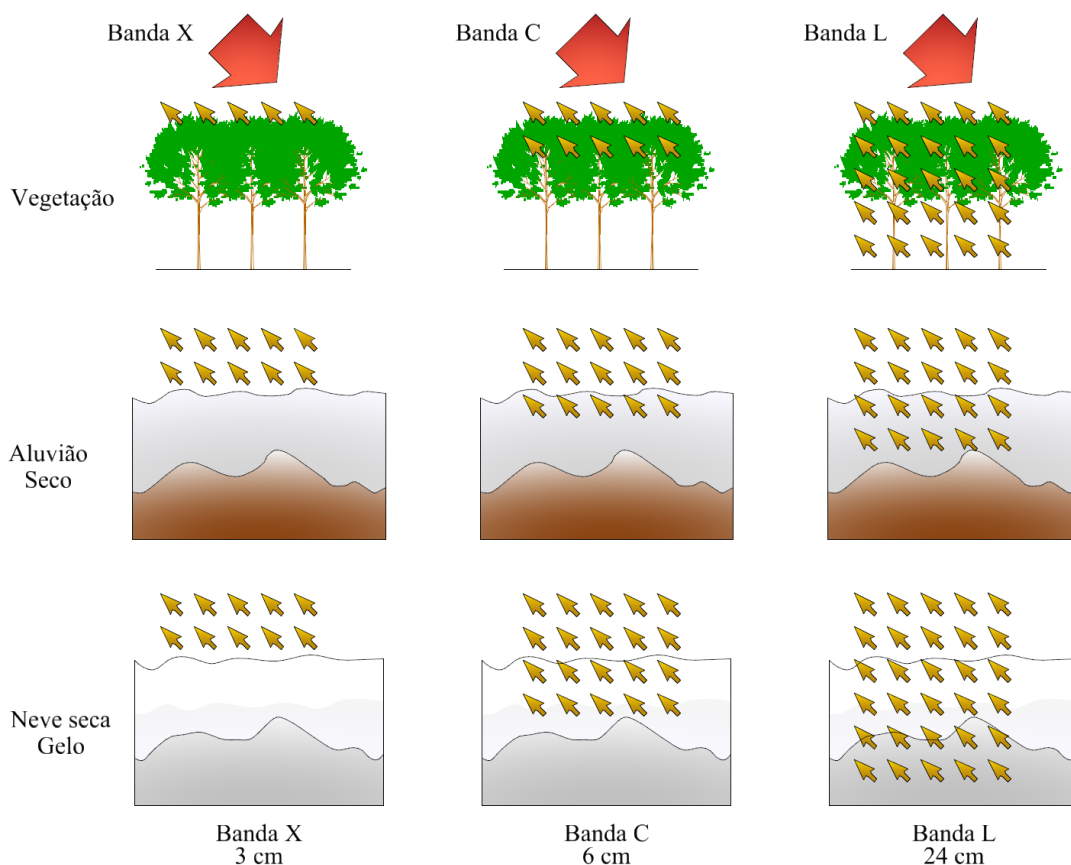
Em vista disso, o emprego do Radar nos dias atuais é bastante diversificado. Há exemplos: nos sistemas antimísseis; no monitoramento meteorológico de precipitação pluviométrica; no controle de tráfego aéreo em aeroportos; nos sistemas anticolidão de aeronaves; na astronomia; nos sistemas de monitoramento e controle de rodovias; nos sistemas marítimos e vigilância do mar para localizar pontos de referência e embarcações;

entre outras aplicações. Em especial, na indústria espacial por meio da instalação de sensores Radar em satélites para observação da Terra.

Nas últimas décadas, a possibilidade de usufruir das utilidades do Radar em nível orbital para observação da Terra há potencializado oportunidades sem precedentes ao segmento espacial e a usuários (cientistas, pesquisadores) envolvidos com os benefícios dessa tecnologia. Isso porque o monitoramento do meio ambiente, a gestão dos recursos naturais, o planejamento urbano e agrícola, além da avaliação de riscos naturais, são apenas alguns exemplos das inúmeras aplicações para as quais satélites com Radar são utilizados.

Além do mais, aplicações orbitais por Radar contam com a vantagem de observar objetos independentes das condições climáticas (nuvens e sombras) e da iluminação solar – caracterizado como sensor ativo. Também é possível investigar maiores detalhes da superfície terrestre a partir das características do comprimento de onda eletromagnética (Figura 36). Isso possibilita analisar em profundidade aspectos da Terra de forma assertiva. Em relação ao uso, satélites Radar operam em determinado tipo de banda e frequência (Tabela 15). A escolha varia em função de sua aplicação.

Figura 36 – Alcance das bandas em diferentes características da superfície.



Fonte: ESA (2019).

Tabela 15 – Principais bandas utilizadas no Radar.

Banda	Frequência (GHz)	Aplicações
VHF	$3 \cdot 10^{-4} - 0,3$	Folhagem, penetração do solo, biomassa
P	0,3 – 1	Biomassa, umidade do solo, penetração no terreno
L	1 – 2	Agricultura/silvicultura, umidade do solo, penetração no terreno
S	3 – 4	Agricultura, biomassa, oceano
C	4 – 8	Oceano, agricultura, investigação da superfície
X	8 – 12	Oceano, agricultura, investigação da superfície (imagem de alta resolução)
Ku	14 – 18	Gelo/glacial, cobertura de neve
K	18 – 27	Comunicações
Ka	27 – 47	Gelo/glacial (imagens de alta resolução)

Fonte: adaptado de Moreira (2011).

Em geral, o Radar pode ser agrupado em sistemas imageadores e não imageadores. Quanto a esse último, destacam-se: os escaterômetros, os espectrômetros e os altímetros. Os imageadores compreendem os sistemas de antena rotatória e os Radares de visada lateral, ou seja: o Radar de Abertura Real (RAR) – mais antigo e fora de funcionamento – e o Radar de Abertura Sintética (SAR) – atual, em funcionamento e empregado nesta pesquisa.

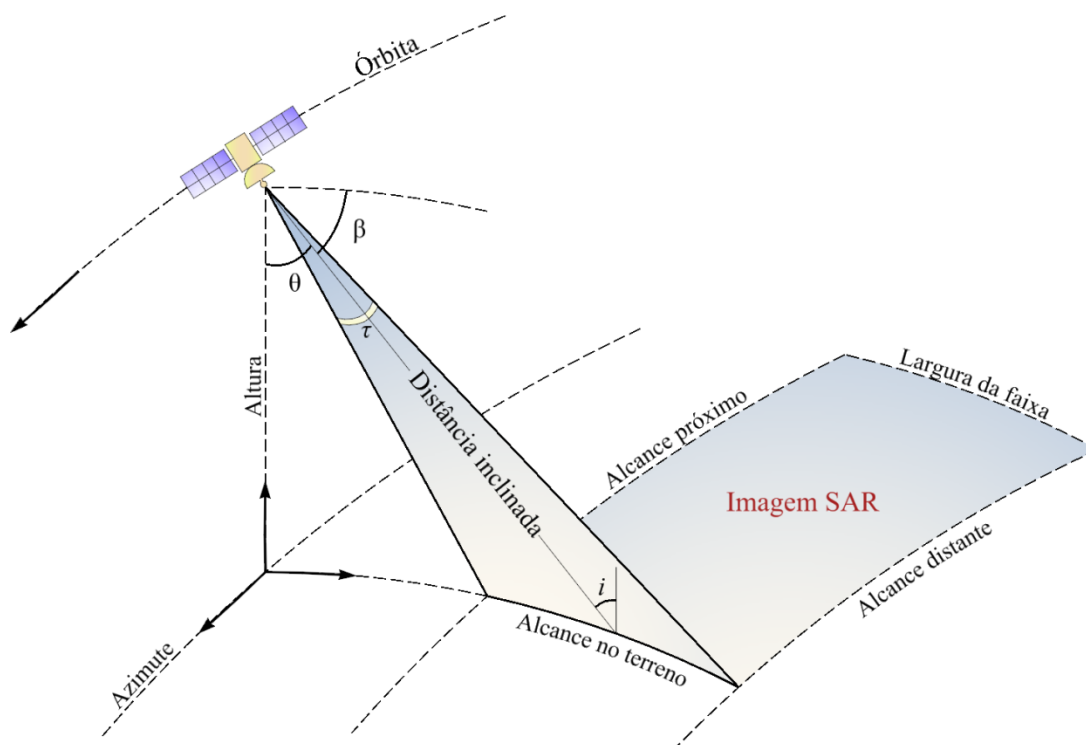
#### 4.2 Radar de Abertura Sintética (SAR)

O SAR surge como uma solução eficaz às limitações operacionais do sistema RAR. A tecnologia RAR tem como inconveniente a resolução azimutal diretamente proporcional à distância entre a antena e o alvo imageado, e inversamente proporcional ao comprimento de onda da antena utilizada no imageamento. Com isso, para obter melhor resolução azimutal ou se diminui a distância entre o Radar e o alvo, ou se aumenta o comprimento da antena. O SAR resolve o problema do sistema antecessor na utilização da resolução azimutal independente da distância entre o Radar e o alvo.

De maneira básica, o SAR consiste em um sensor no qual o comprimento da antena é simulado em outra de dimensões maiores. Isso objetiva garantir uma abertura de feixe do sensor mais estreita para obter resolução espacial maior na imagem captada – uma vez que no sistema RAR não é possível devido à necessidade da dimensão da antena instalada na plataforma ser da ordem quilométrica. Esse problema é superado por meio da “síntese” de uma antena virtual de dimensão maior, a partir do registro acumulado dos sinais de retorno de cada objeto na antena durante o período em que ela se desloca sobre determinada região do terreno. Desta forma, o satélite SAR utiliza antena física de alguns metros de comprimento com capacidade de sintetizar (simular) antena virtual de vários quilômetros (BENEVIDES, 2009; MOREIRA, 2011).

A geometria do sistema SAR se baseia no modo de observação inclinada e perpendicular à trajetória do satélite (Figura 37).

Figura 37 – Geometria do sistema SAR.



Fonte: Hassen (2001); Fonseca e Fernandes (2004).

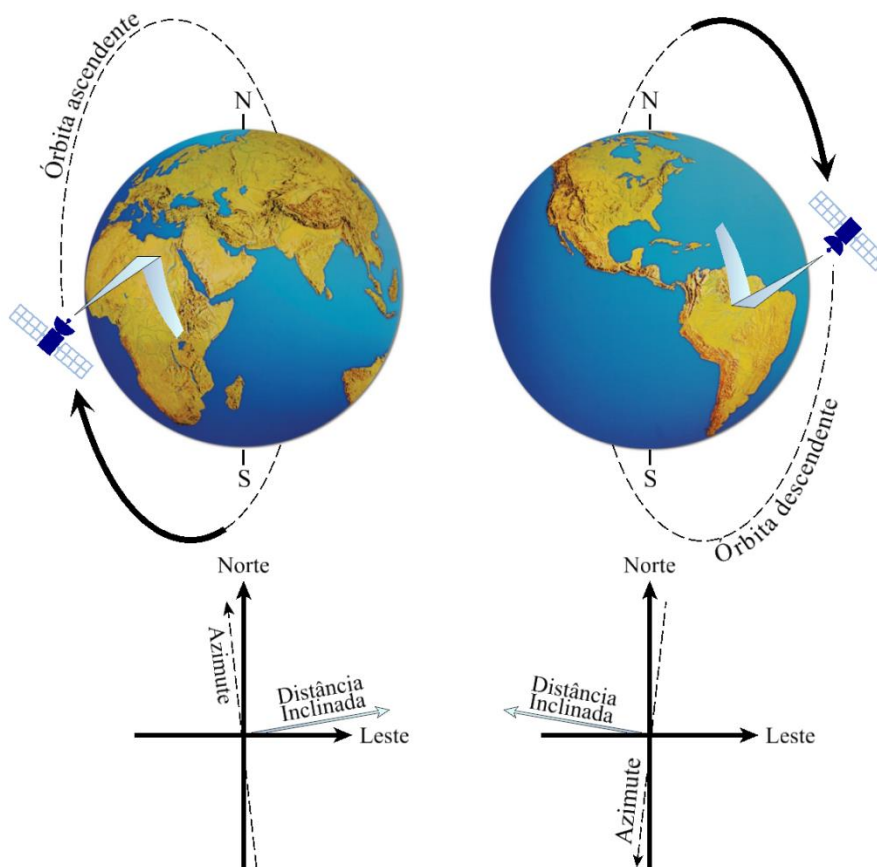
Na Figura 37, tem-se que: a altura é a distância vertical compreendida entre o satélite e o elipsoide de referência<sup>37</sup>; o azimute denota a direção no terreno paralela ao movimento da plataforma; a distância inclinada (*slant range*) se caracteriza pela distância do sensor ao alvo, perpendicular ao deslocamento do satélite; o alcance no terreno (*ground range*) significa a distância inclinada projetada sobre a superfície terrestre, também conhecida por distância real ou distância geográfica; o alcance próximo (*near range*) é a região mais próxima do ponto Nadir<sup>38</sup>; enquanto o alcance distante (*far range*) é a região mais afastada desse mesmo ponto; a largura da faixa (*swath width*) representa a largura da faixa imageada na direção perpendicular ao deslocamento do satélite;  $\theta$  é o ângulo de observação formado entre a altura e a distância inclinada;  $\beta$  é o ângulo de depressão medido entre a distância inclinada e o plano horizontal; e  $i$  é o ângulo de incidência definido entre a distância inclinada e a vertical do ponto no terreno alcançado pelo comprimento do pulso eletromagnético ( $\tau$ ).

<sup>37</sup> Trata-se de um modelo matemático (elipsoide de revolução) adotado para representar a Terra.

<sup>38</sup> Termo empregado na esfera celeste em Astronomia para se referir ao ponto abaixo do observador.

Além disso, de acordo com Simons e Rosen (2007), os satélites SAR percorrem órbitas heliossíncrona<sup>39</sup> e quase polar<sup>40</sup> com oportunidade de efetuar observações em trajetória ascendente ou descendente (Figura 38).

Figura 38 – Órbitas SAR ascendente e descendente.



Fonte: Lauknes (2010).

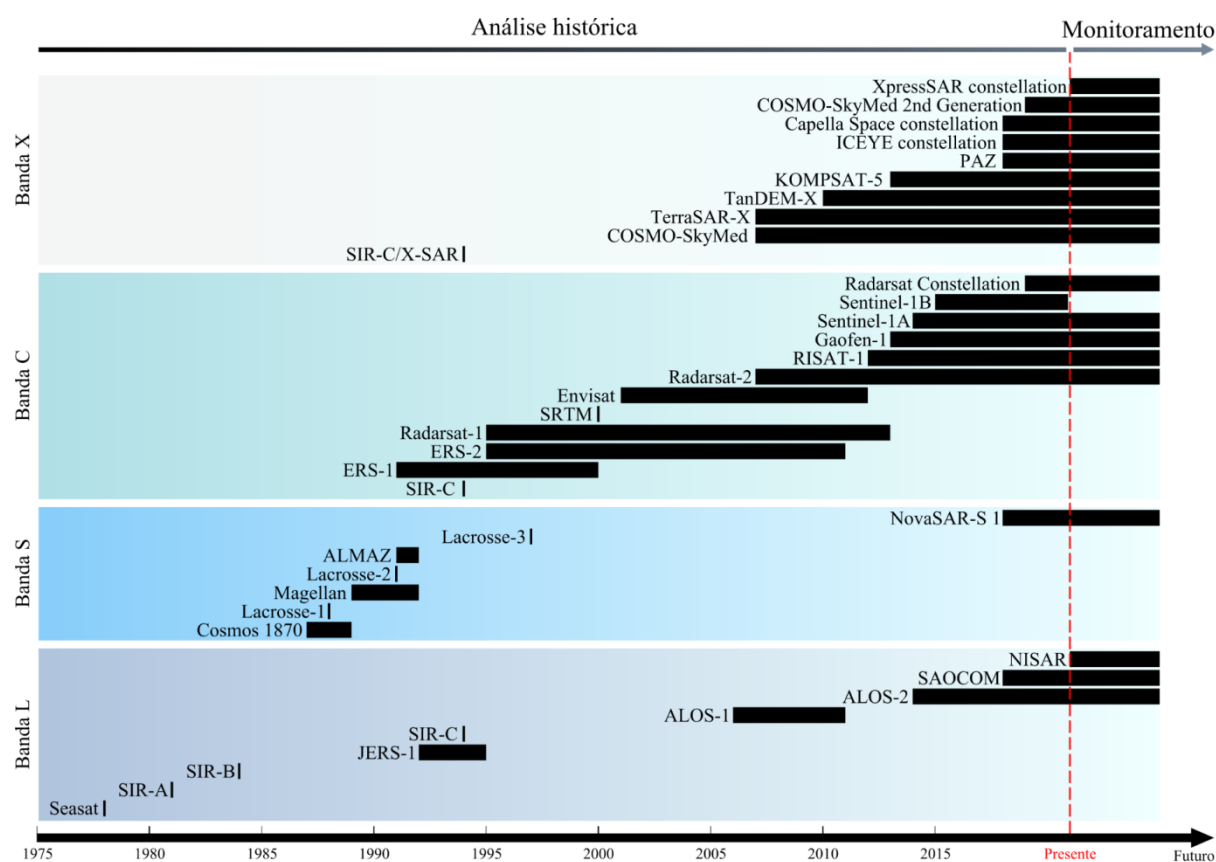
Em nível orbital, missões civis com SAR tem início em 26 de junho de 1978 com o lançamento do Seasat – desenvolvido pela NASA para testar vários sensores oceanográficos e obter melhor compreensão dos mares da Terra. O satélite permanece na órbita terrestre por 105 dias. Durante esse tempo, o Seasat consegue medir dados climáticos da superfície do mar (vento e temperatura), alturas de onda, conteúdo de água líquida da atmosfera, características do gelo marinho e topografia oceânica, antes de um grande curto-circuito no sistema elétrico da espaçonave finalizar a missão em 10 de outubro do mesmo ano.

<sup>39</sup> Localiza-se em altitude de 600 km a 800 km e descreve uma órbita polar sempre alinhada à posição do sol.

<sup>40</sup> Situa-se em altitude de 200 km a 1.000 km e vai de um polo a outro com uma inclinação de cerca de 90°. Sua direção Norte-Sul permite observar toda a superfície da Terra.

O êxito da aplicação Seasat em observações oceânicas em 1978 revela, desde então, o SAR como uma valiosa ferramenta para cientistas e pesquisadores que estudam a Terra e seus ambientes. Ao longo do tempo, essa constatação impulsiona diversas agências espaciais de âmbito internacional a se lançar em missões espaciais, sobretudo, em função da capacidade que a aplicação SAR tem em analisar a diversidade terrestre. Nesse propósito, estão disponíveis várias missões SAR para atender a diversos fins (Figura 39).

Figura 39 – Missões espaciais do sistema SAR.

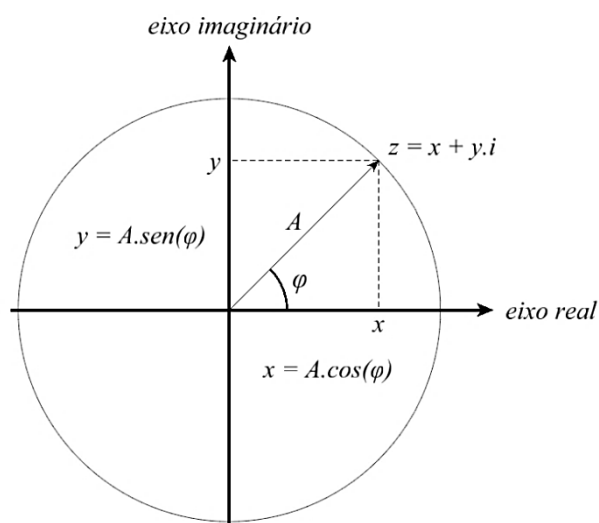


Fonte: adaptado de Pope *et al.* (2014).

#### 4.2.1 Características das Imagens SAR

A coleta de informações no sistema SAR se dá por meio de processador (*Doppler*) que converte o sinal retroespalhado em imagem, após a transmissão de uma Frequência Modulada (FM) linearmente por um pulso (*chirp*). Em seguida, com uso de técnicas de processamento a intensidade e a fase do sinal retroespalhado de cada célula de resolução da superfície são calculadas na forma de imagem de valor complexo (SLC: *Single-Look Complex*) (GAMA *et al.*, 2013). Nesse formato, cada *pixel* da imagem SAR corresponde a um número complexo ( $z$ ) do tipo:  $z = x + y.i$ . Em que:  $x$  é a parte real,  $y$  é a parte imaginária e  $i$  é unidade imaginária (Figura 40). A expressão contém também valores de fase ( $\varphi$ ) e de amplitude ( $A$ ).

Figura 40 – Coordenadas polares no plano complexo.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Para cada *pixel* da imagem SAR o par de coordenadas  $(x, y)$  é representado no referencial cartesiano pelo fasor<sup>41</sup> complexo ( $P$ ), conforme Equação 3 (HANSSEN, 2001):

$$P(x, y) = Ae^{i\varphi} \quad (3)$$

A amplitude e a fase são obtidas pela Equação 4 e Equação 5, respectivamente:

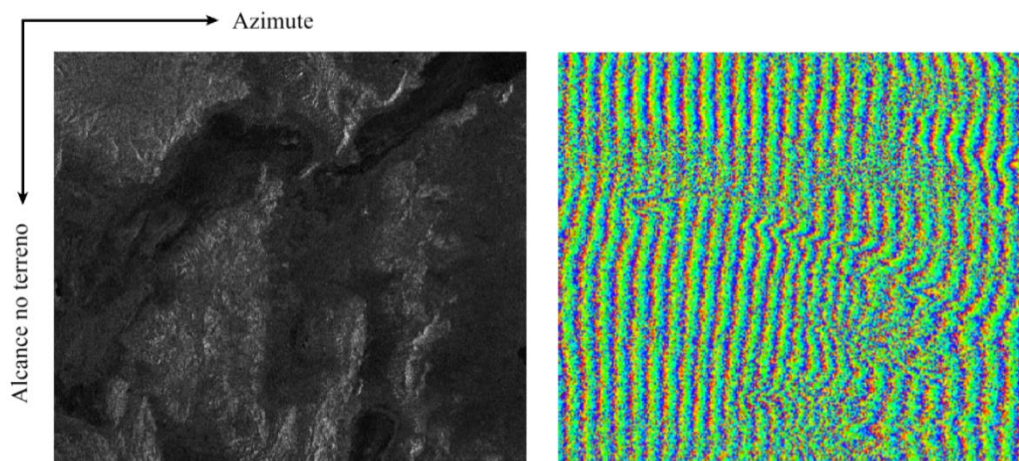
$$A = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right), \quad x \neq 0, \quad y \neq 0 \quad (5)$$

A amplitude fornece informações sobre a refletividade (brilho) do terreno e está relacionada à quantidade de energia retroespalhada do solo na antena receptora. Pode fornecer também informações sobre a rugosidade da superfície e propriedades dielétricas. A fase é uma propriedade relacionada à distância do sensor ao alvo, que se traduz pela diferença observada na onda eletromagnética no percurso entre o impulso transmitido e o impulso refletido do alvo. Seu aspecto visual não traz muita utilidade (Figura 41). Mas a combinação de fase de várias imagens SAR permite aplicação de técnicas interferométricas na detecção da deformação superficial (ROUYET; LAUKNES; HOGDA, 2015).

<sup>41</sup> Vetor de fase ou fasor é um termo usado em Física e Engenharia para representar uma função senoidal cuja amplitude, frequência angular e fase são constantes.

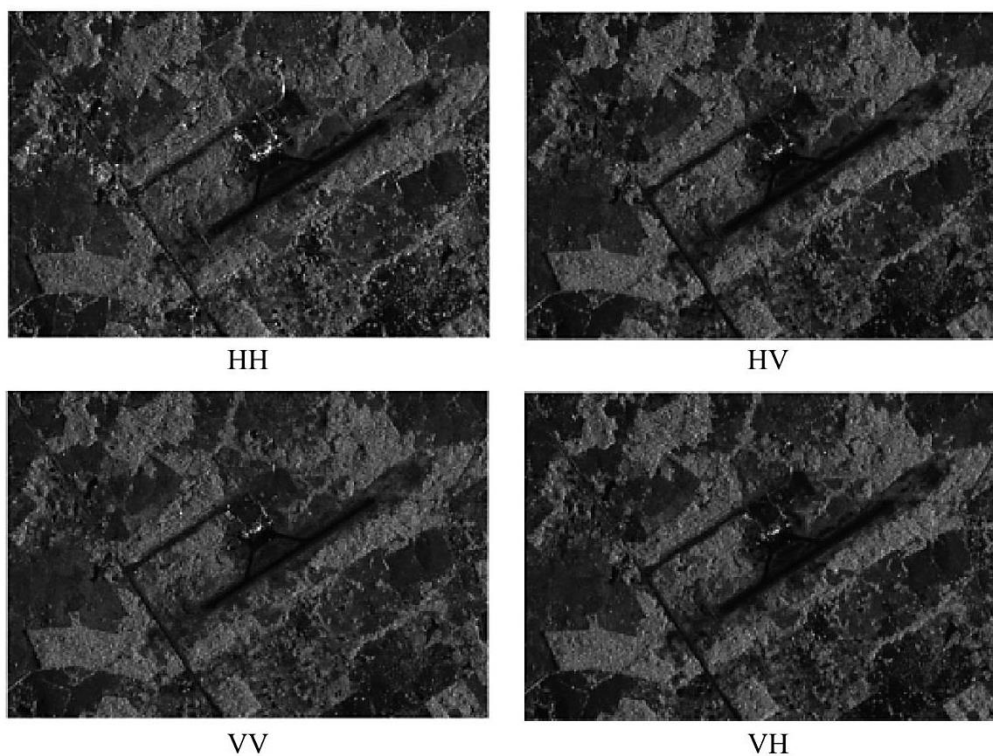
Figura 41 – Amplitude (esquerda) e fase (direita) de uma imagem SAR.



Fonte: Brown, Black e Gallagher (2018).

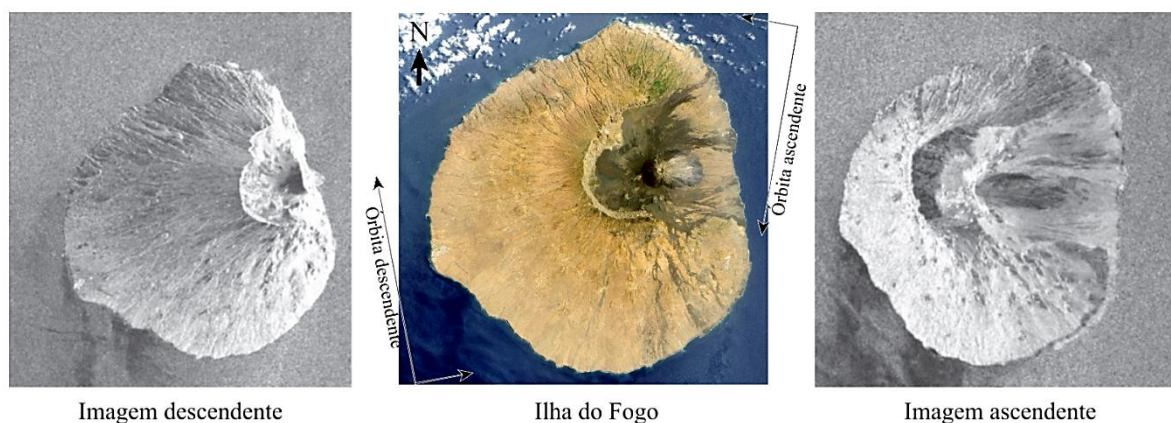
Outra característica importante das imagens SAR reside em sua aquisição. A depender do tipo de onda eletromagnética e do sentido da órbita, elas podem ser adquiridas em polarização vertical ou horizontal (Figura 42) e trajetória ascendente ou descendente (Figura 43), respectivamente.

Figura 42 – Amostras de imagens SAR polarizadas do aeroporto Presidente Médici, Acre. Energias transmitidas e recebidas: paralelas (HH e VV) e cruzadas (HV e VH).



Fonte: Lopes e Lima (2009).

Figura 43 – Exemplos de imagens SAR em função da órbita. Ilha do Fogo, Cabo Verde.



Fonte: Nasa earth observatory (2009); Heleno *et al.* (2010).

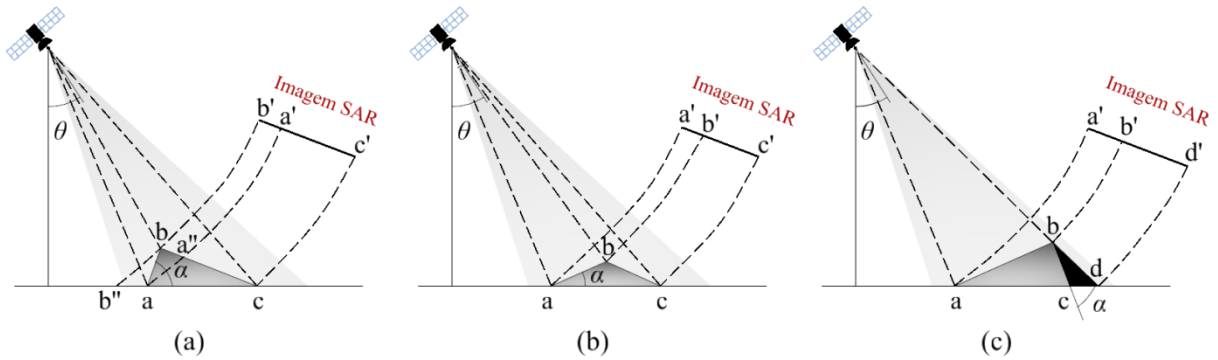
A imagem SAR é constituída por uma matriz de grade regular formada por linhas e colunas. As linhas estão associadas com azimute e as colunas estão relacionadas com a distância inclinada. A localização e a dimensão das células de resolução dependem dos aspectos de cada sistema SAR utilizado. Assim, um *pixel* na imagem SAR é definido pela posição (coordenadas), azimute e alcance do sinal no terreno.

#### 4.2.2 Distorções Ocasionadas pelo Terreno

Devido à inclinação do sistema SAR, a aquisição de imagens sofre distorções geométricas (Figura 44). Isso porque a formação da cena orbital advém da coleta da reflexão do sinal eletromagnético oriundo da superfície, e não de suas coordenadas espaciais. Nesse sentido, distorções ocasionadas pelo terreno são classificadas em três fenômenos (TOMÁS-JOVER, 2008):

- *layover*: reside na inversão da geometria da imagem, na presença de relevos elevados com declives ( $\alpha$ ) superiores ao ângulo de observação do satélite ( $\theta$ );
- *foreshortening*: consiste na expansão ou contração da célula de resolução e depende da inclinação ( $\alpha$ ) da cena dentro do intervalo  $[-\theta, \theta]$ ; e
- *shadowing*: ocorre devido à presença de declives acentuados que evita a reflexão do sinal em direção ao Radar e, com isso, não permite a geração da imagem. As zonas de sombra surgem quando a inclinação do terreno ( $\alpha$ ) é menor ou igual ao ângulo de observação do satélite ( $\theta$ ) menos  $\pi/2$ .

Figura 44 – Distorções geométricas em imagem SAR. Fenômenos: (a) *layover*, (b) *foreshortening* e (c) *shadowing*.

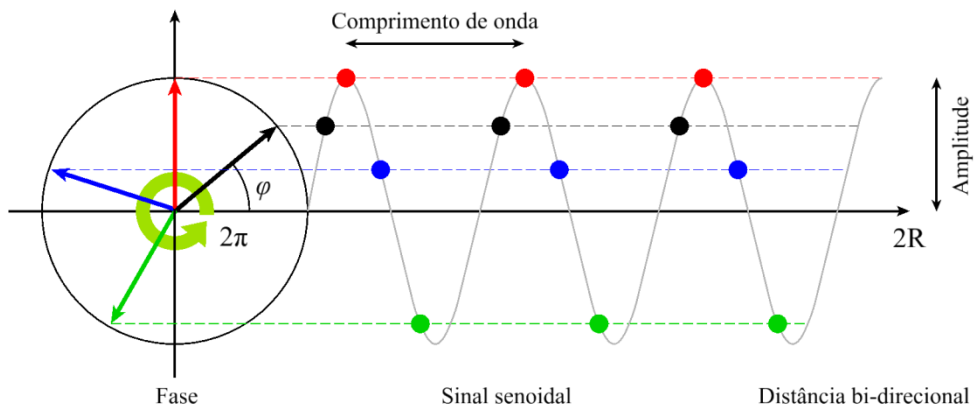


Fonte: ESA (2007).

### 4.3 Princípio da Interferometria SAR (InSAR)

A concepção da interferometria de Radar por satélite se baseia no uso de informações de fase ( $\varphi$ ) da onda eletromagnética proporcionada pela combinação de duas ou mais imagens SAR, obtidas da mesma área de observação. Nesse aspecto, cada sinal transmitido pelo sistema SAR se assemelha a uma função senoidal do tipo (Figura 45):  $\text{sen}(\varphi)$ .

Figura 45 – Relação da fase e comprimento de onda com a distância inclinada.



Fonte: Ferretti *et al.*, (2007b).

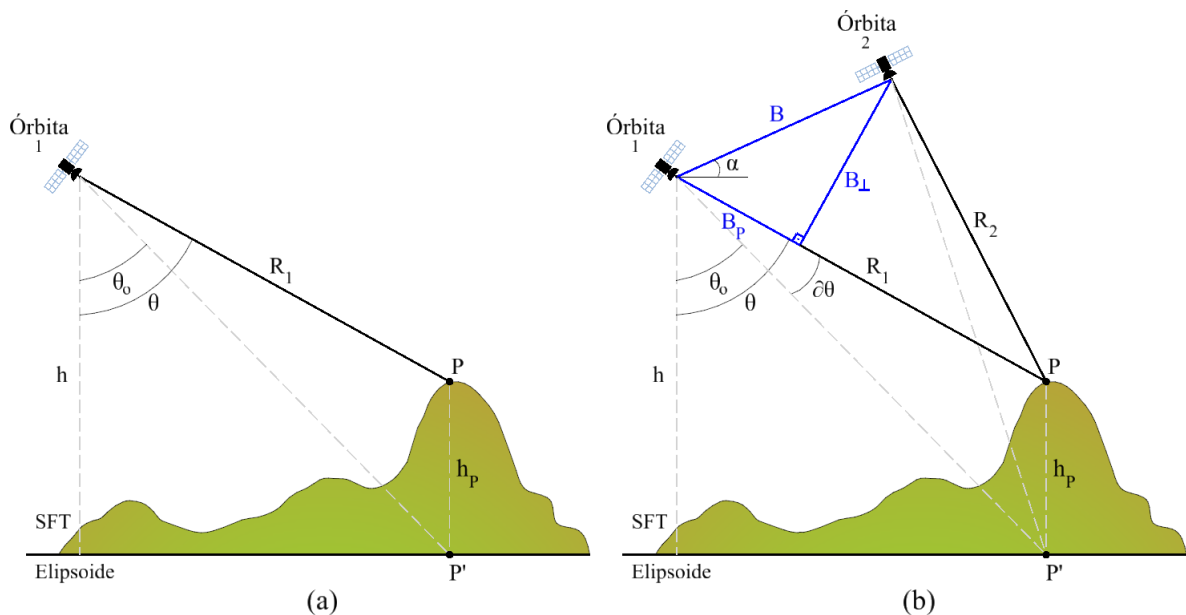
Essa função é periódica com um período de  $2\pi$  radianos. Devido ao percurso bidirecional, o comprimento de onda ( $\lambda$ ) efetivo corresponde a  $\lambda/2$ . Logo, a fase corresponde à fração do ciclo de onda que varia de 0 a  $360^\circ$  ou de 0 a  $2\pi$  (módulo  $2\pi$ ). E se relaciona com a distância inclinada ( $R$ ) por meio da equação linear (Equação 6; FERRETTI *et al.*, 2007b):

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} R \tag{6}$$

### 4.3.1 Geometria InSAR

O registro de imagens SAR ocorre por meio de duas geometrias do sistema interferométrico. A primeira faz uso de duas antenas transportadas por uma única plataforma para aquisição de duas cenas simultâneas, denominada por interferometria de passagem única. A segunda, utilizada nesta pesquisa, é conhecida por interferometria de passagem repetitiva: uma única antena realiza os registros em épocas diferentes e em posições aproximadas (Figura 46). Nesse aspecto, cada registro possui geometria de aquisição específica que não se repete entre as passagens do satélite, sobretudo, em função de desvios nas coordenadas orbitais (LAUKNES, 2004). Ou seja, existe uma ligeira diferença em termos de alcance entre duas imagens SAR. Isso porque a área iluminada é captada em duas posições espaciais diferentes, dessa forma resulta em ângulos de observação distintos (SIMONS; ROSEN, 2007).

Figura 46 – Geometria interferométrica SAR: (a) passagem única e (b) passagem repetitiva.



Fonte: Hanssen (2001).

Na Figura 46, os elementos básicos da geometria InSAR são: órbita 1 representa a aquisição de referência (*master*) e órbita 2 a aquisição de repetição (*slave*);  $B$  é a linha de base interferométrica, na qual suas componentes são a base paralela  $B_p$  e a base perpendicular  $B_{\perp}$ , e pode ser obtida pelo teorema de Pitágoras ( $B = \sqrt{B_p^2 + B_{\perp}^2}$ );  $R_1$  é a distância inclinada na órbita 1 e  $R_2$  é a distância inclinada na órbita 2, ambas direcionadas ao ponto  $P$  localizado na Superfície Física da Terra (SFT);  $\theta$  é o ângulo de observação formado entre a altura elipsoidal

(h) e a distância inclinada  $R_1$  na SFT;  $\partial\theta$  é a diferença de observação entre o ponto P e sua projeção ponto P' situado na superfície do Elipsoide;  $\alpha$  é o ângulo em relação à horizontal na órbita 1; e  $\theta_0$  é o ângulo formado entre h e a distância inclinada.

A combinação de duas imagens SAR que observam uma área comum do terreno origina uma série de características geométricas, pelas quais o produto final interferométrico é dependente. Isso porque os parâmetros envolvidos nos dois registros orbitais são diferentes. Relativos, por exemplo, à trajetória do satélite, ao instante de aquisição ou ao comprimento de onda do sinal, e pode causar interferência no produto final (BAMLER; HARTL, 1998). Desta forma, conhecida a geometria de aquisição de um par de cenas SAR é possível determinar a diferença de fase interferométrica ( $\Delta\varphi_{Int}$ )<sup>42</sup> entre os sinais de Radar enviados para o mesmo alvo. Isto é, por meio da combinação da fase observada em épocas distintas (Equação 7).

$$\Delta\varphi_{Int} = \frac{4\pi}{\lambda} \overbrace{(R_2 - R_1)}^{\Delta R} \quad (7)$$

Na Equação 7, a quantidade  $\Delta R$  representa a parte fracionária do comprimento de onda. É utilizada na detecção da deformação superficial a partir da condição de paralelismo aproximado de duas distâncias inclinadas ( $R_1$  e  $R_2$ ) – situação considerada devido à elevada altitude a que os satélites SAR se encontram.

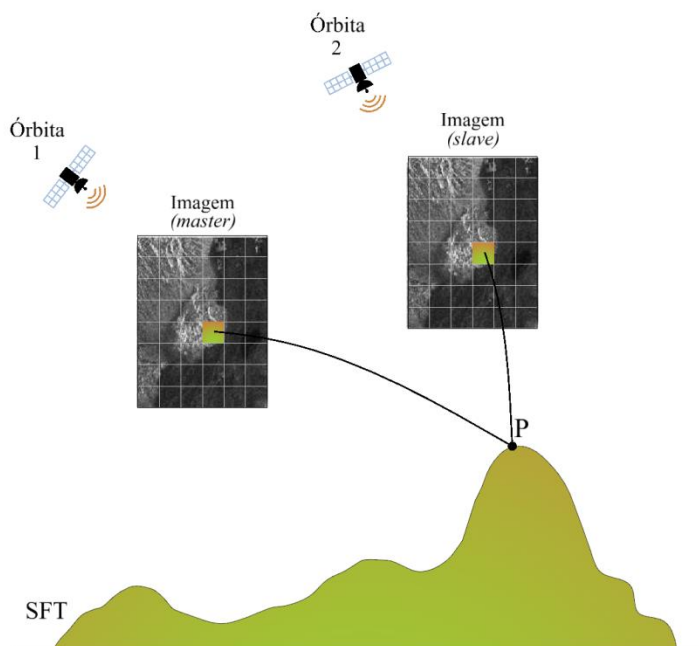
#### 4.3.2 Corregistro

A combinação de duas imagens SAR fica limitada ao desvio espacial que há entre elas (*master* e *slave*). De modo a contornar isso, o corregistro consiste no alinhamento da segunda cena com a primeira por meio da determinação de um polinômio de interpolação (KAMPES; HANSSSEN; PERSKI, 2003). Assim, o registro da segunda passagem SAR é reamostrado na matriz de malha regular espacial da imagem *master*. Ou seja, *pixel a pixel* da mesma posição entre as duas imagens que descrevem o mesmo elemento de resolução do solo (Figura 47).

---

<sup>42</sup> De acordo com Hanssen (2001), o elemento  $\Delta\varphi_{Int}$  por vezes é representado na literatura científica com sinal negativo. Isso equivale à diminuição de fase com aumento do  $\Delta R$  ao longo da distância inclinada. Na prática, significa fixar a origem do sistema cartesiano no ponto P (Figura 46) – ao invés das expressões convencionais em que a origem se localiza no próprio sistema SAR.

Figura 47 – Representação de duas imagens correregistradas: *master* e *slave*.

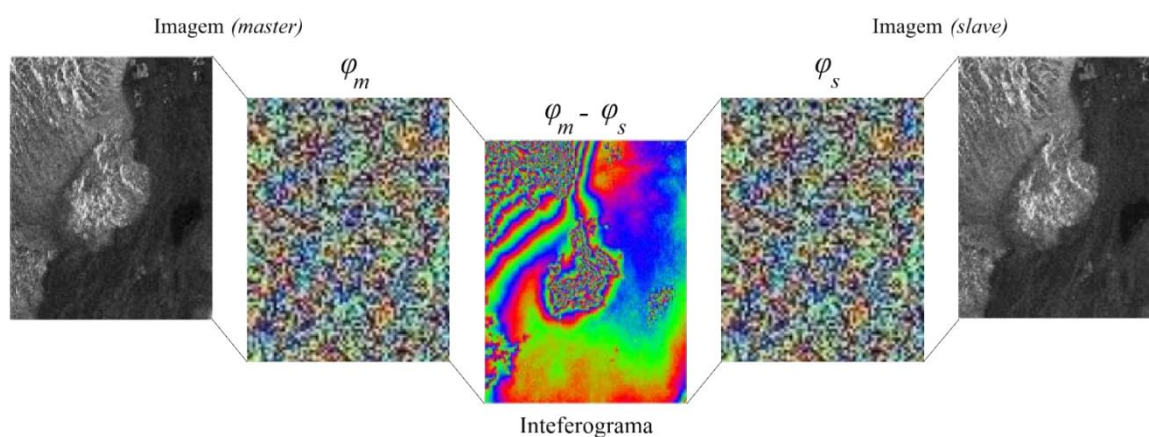


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

#### 4.3.3 Interferograma

Representa o resultado da diferença de fase interferométrica entre o par de cenas correregistradas. É determinado para toda área da imagem por meio da multiplicação complexa de valores de fase de uma imagem, no processo de *pixel a pixel*, pelo complexo conjugado dos valores de outra imagem que forma o par interferométrico. Isso resulta no conjunto de franjas coloridas distribuídas ao longo da imagem (Figura 48). O padrão de interferência de franjas contém informações relativas à geometria do terreno (MASSONNET, *et al.*, 1993; MASSONNET; FEIGL, 1998).

Figura 48 – Geração de interferograma.



Fonte: Taylor *et al.* (1999).

As medições obtidas pela interferometria SAR são, em geral, avaliadas por meio do grau de coerência. Apresenta alto valor quando alvos refletidos em duas imagens de áreas comuns exibem correlação elevada. A qualidade do interferograma é afetada pela diminuição do grau de coerência, responsável por desarrumar a organização do padrão de franjas do interferograma (MASSONNET; FEIGL, 1998). A qualidade das franjas é inferida pela expressão de coerência interferométrica ( $\gamma$ ), medida entre valores de 0 (mínima) e 1 (máxima) para o par de imagens SAR, que formam o interferograma (Equação 8; HANSSSEN, 2001).

$$\gamma = \frac{\left| \sum_p^n [M_p \cdot S_p^*] \right|}{\sqrt{\sum_p^n |M_p|^2 \cdot \sum_p^n |S_p|^2}} \quad (8)$$

Em que:

$n$ : é a dimensão da janela avaliada *pixel a pixel*;

$p$ : é a posição de cada *pixel*;

$M$ : é a imagem *master*; e

$S$ : é a imagem *slave*.

#### 4.3.4 Fontes de Erro

A qualidade do interferograma é influenciada pela diminuição do grau de coerência, conhecido como descorrelação<sup>43</sup>. Traduz a relação de similaridade entre duas imagens SAR de áreas comuns, obtidas em épocas distintas. As causas dessa diminuição têm origem em várias fontes de erros ou ruídos. Quando a fase medida pelo Radar está eivada desses erros, a geração de interferograma referente à diferença de percurso dos sinais SAR fica prejudicada. Afeta a determinação da posição e deslocamento de alvos. Os principais erros são:

- Descorrelação temporal: caracteriza-se pelo aumento do intervalo de tempo decorrente de mudanças ambientais entre dois registros SAR que formam o interferograma. É ocasionado, por exemplos, pela presença de vegetação, neve, regiões secas, baixa cobertura vegetal ou outro aspecto distinto para períodos variados no tempo que possa tornar a fase descorrelacionada;

---

<sup>43</sup> Refere-se ao fenômeno que interfere na organização do padrão de franjas do interferograma. Segundo Massonnet e Feigl (1998), cada *pixel* afetado sofre alteração de fase aleatória que corresponde a um efeito “salpicado de cores variadas” no interferograma.

- Descorrelação geométrica: representa significativas variações do comprimento da linha de base espacial entre duas imagens SAR. Ocasiona mudanças no ângulo de incidência e provoca diferenças geométricas. Por consequência, resulta na descorrelação do sinal eletromagnético; e
- Efeitos atmosféricos: contribuem para atrasos na propagação do sinal de Radar por conta de alterações no comportamento da atmosfera, que ocorrem em função das condições de refratividade no meio ambiente. Exemplos: umidade, pressão atmosférica e temperatura. Como também, por causa das camadas da ionosfera e troposfera devido à existência de vapor de água.

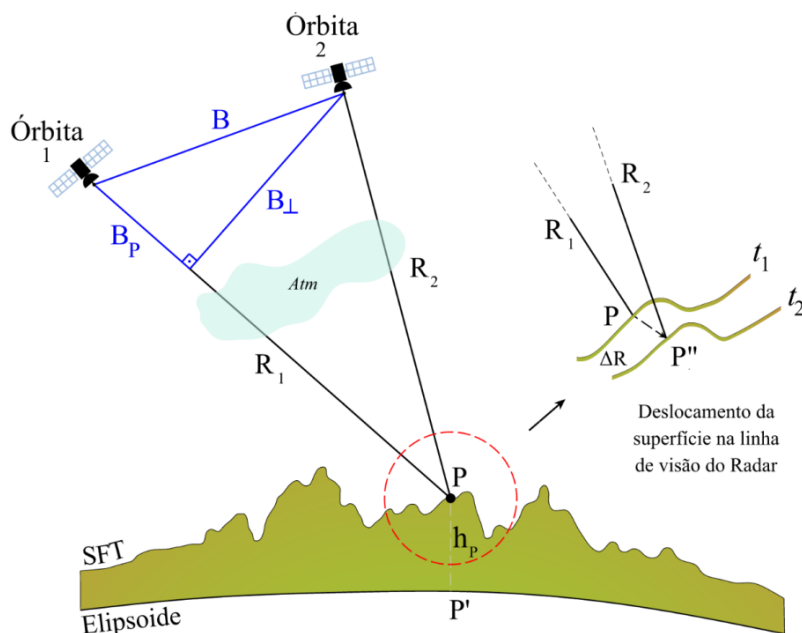
A presença desses erros nas cenas SAR compromete a medição da diferença de fase e impossibilita determinar de forma assertiva o valor de deformação. Além dos elementos descritos, outros erros são considerados. Ou seja, presente na órbita do satélite; no Modelo Digital do Terreno (MDT); derivados da etapa de formação do interferograma referente ao correção e à interpolação de cenas *master* e *slave*; entre outros. No entanto, busca-se eliminar e/ou minimizar essas inconsistências na fase de processamento de dados com técnicas InSAR voltadas à instabilidade superficial.

#### **4.4 Técnicas InSAR à Instabilidade Superficial**

A capacidade InSAR para detectar movimentações sutis do terreno é uma das características mais relevantes dessa tecnologia. Ao longo do tempo, seu uso há intensificado em aplicações importantes da Terra em atenção aos recursos naturais e ao meio ambiente. Tais elementos estão em constantes mudanças devido à evolução natural e às atividades humanas. Em especial, na determinação da deformação superficial decorrente da intervenção antrópica nos recursos hídricos subterrâneos, ou seja, na subsidência do solo. A compreensão de fenômenos que causam alterações superficiais pode ser melhor entendida por meio da detecção precisa de sua ação.

A observação terrestre por técnicas InSAR é uma forma eficaz de monitorar a dinamicidade de processos ambientais. A separação temporal na passagem interferométrica de repetição de dias, meses ou até anos, pode ser utilizada como vantagem para o monitoramento a longo prazo de fenômenos geológicos – visto que alguns objetos monitorados mudam de posição em um ritmo relativamente lento, como: subsidência do solo. Nesse aspecto, variações do terreno permitem ser identificadas por procedimento InSAR a partir de um conjunto de observáveis SAR de forma periódica referente ao mesmo elemento (Figura 49).

Figura 49 – Representação da técnica InSAR na detecção da deformação superficial.



Fonte: adaptado de Rouyet, Lauknes e Hogda (2015).

A Figura 49 evidencia a utilidade da interferometria SAR para determinar mudanças posicionais referentes à movimentação da superfície terrestre – imageada em épocas distintas ( $t_1$  e  $t_2$ ). Em relação às técnicas InSAR à instabilidade superficial, destacam-se: DInSAR, PSInSAR, SBAS e métodos híbridos.

#### 4.4.1 Interferometria Diferencial SAR (DInSAR)

A técnica é pioneira na determinação de deslocamento do relevo. É apresentada pela primeira vez por Gabriel, Goldstein e Zebker (1989) para detectar pequenos movimentos (magnitude  $\leq 1$  cm) da elevação superficial de grandes regiões (faixas de 50 km) via imagens SAR do Seasat. Os autores mostram a possibilidade da aplicação DInSAR para mensurar deformações causadas por diversos fenômenos geofísicos. Exemplos: dilatação e flambagem em zonas de falhas, variações residuais de eventos sísmicos, entre outros.

Na Figura 49, a DInSAR detecta mudança posicional do ponto P'' (deslocado de P) durante o intervalo de tempo entre duas aquisições de imagens SAR. O processo utiliza informação da diferença de fase entre dois *pixels* de mesma posição aparente do solo, obtidos em períodos diferentes, na determinação da deformação.

Na posição orbital 1 (*master: M*), adquire-se a primeira imagem SAR pela medição de fase  $\varphi_M$  (Equação 9). Em seguida, o deslocamento do ponto P para P'', obtém-se na posição orbital 2 (*slave: S*), segunda imagem SAR, pela medição de fase  $\varphi_S$  (Equação 10):

$$\varphi_M = \frac{4\pi}{\lambda} R_1 + \varphi_{Atm\_M} \quad (9)$$

$$\varphi_S = \frac{4\pi}{\lambda} R_2 + \varphi_{Atm\_S} \quad (10)$$

Em que:  $R_1$  é a distância inclinada na órbita 1 ao ponto P; e  $R_2$  é a distância inclinada na órbita 2 ao ponto P";  $\varphi_{Atm\_M}$  é a mudança de fase referente à atmosfera na interação das microondas e o ponto P;  $\varphi_{Atm\_S}$  é a mudança de fase relativo à atmosfera na interação das microondas e o ponto P";  $\lambda$  é o comprimento de onda; e  $4\pi$  é devido ao duplo percurso, sensor-alvo-sensor.

O cálculo DInSAR explora a diferença de fase interferométrica ( $\Delta\varphi_{Int} = \varphi_S - \varphi_M$ ) para determinar a deformação superficial ( $\varphi_{Des}$ ). Isso inclui as seguintes componentes (Equação 11; CROSETTO *et al.*, 2016):

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{Int} &= \frac{4\pi}{\lambda} \overbrace{(R_2 - R_1)}^{\Delta R} = \\ &= \varphi_{Des} + \varphi_{Top} + \varphi_{Ruí} + \overbrace{(\varphi_{Atm\_S} - \varphi_{Atm\_M})}^{\Delta\varphi_{Atm}} + \overbrace{(\varphi_{Orb\_S} - \varphi_{Orb\_M})}^{\Delta\varphi_{Orb}} + 2k\pi \end{aligned} \quad (11)$$

Em que:  $\varphi_{Top}$  é a componente do erro topográfico residual;  $\varphi_{Ruí}$  é a componente devido ao ruído;  $\varphi_{Atm}$  é a componente da fase atmosférica na aquisição de cada imagem;  $\varphi_{Orb}$  é a componente da fase devido aos erros orbitais em cada posição; e  $k$  é o valor inteiro chamado de ambiguidade de fase, resultado da natureza da fase interferométrica ( $\varphi_{Int}$ ) enrolada (*wrapped*) limitada no intervalo  $(-\pi, \pi)$ .

O interferograma gerado a partir das imagens SAR nas órbitas (1 e 2) apresenta componentes de fase devido às contribuições da deformação, topografia, ruído, atmosfera, órbita de satélite. Em vista disso, a Equação 11 possibilita extrair das diferentes componentes o deslocamento ( $\varphi_{Desl}$ ) do terreno em pares de cenas que possuem elevada coerência entre si.

As limitações do DInSAR incluem: descorrelações (temporais e geométricas) que influenciam a componente  $\varphi_{Ruí}$  (HANSSEN, 2001), a estimativa do valor de  $k$  (GHIGLIA; PRITT, 1998) e a componente da fase atmosférica  $\varphi_{Atm}$ . Esses elementos limitam a aplicação DInSAR. A detecção de deformação por essa técnica resulta na ordem centimétrica. É indicada na determinação de variações superficiais significativas.

Nesse aspecto, a DInSAR é uma ferramenta valiosa para medir a deformação da superfície devido à alta resolução espacial alcançada e à capacidade de adquirir dados remotamente. No entanto, problemas no espalhamento do sinal de Radar referentes às mudanças nas propriedades atmosféricas e na precisão tanto na órbita do satélite quanto na determinação da elevação da superfície restringem a sua aplicabilidade. Para superar as limitações da tecnologia DInSAR, surgem as técnicas denominadas multitemporais InSAR (MT-InSAR). Elas envolvem o processamento de várias aquisições SAR no tempo e, com isso, fornecem uma maneira efetiva de resolver às deficiências apresentadas.

A ideia consiste em comparar muitas imagens SAR – em vez de apenas duas, como na técnica convencional – e focar a análise em alvos de Radar confiáveis. Em geral, esses *pixels* exibem assinatura estável e permitem a utilização de eficazes algoritmos em procedimento de filtragem para estimar e remover efeitos da decorrelação do sinal de Radar. Nos dias atuais, existem duas categorias da técnica MT-InSAR: espalhadores persistentes (PSInSAR) e linhas de base curtas (SBAS). A utilização desses métodos possibilita significativo aumento de pontos de medição em deslocamento superficial de forma robusta, e com possibilidade de utilização integrada (método híbrido) para detectar um maior número de deformação em áreas urbanas e não urbanas (HO TONG MINH; HANSSSEN; ROCCA, 2020).

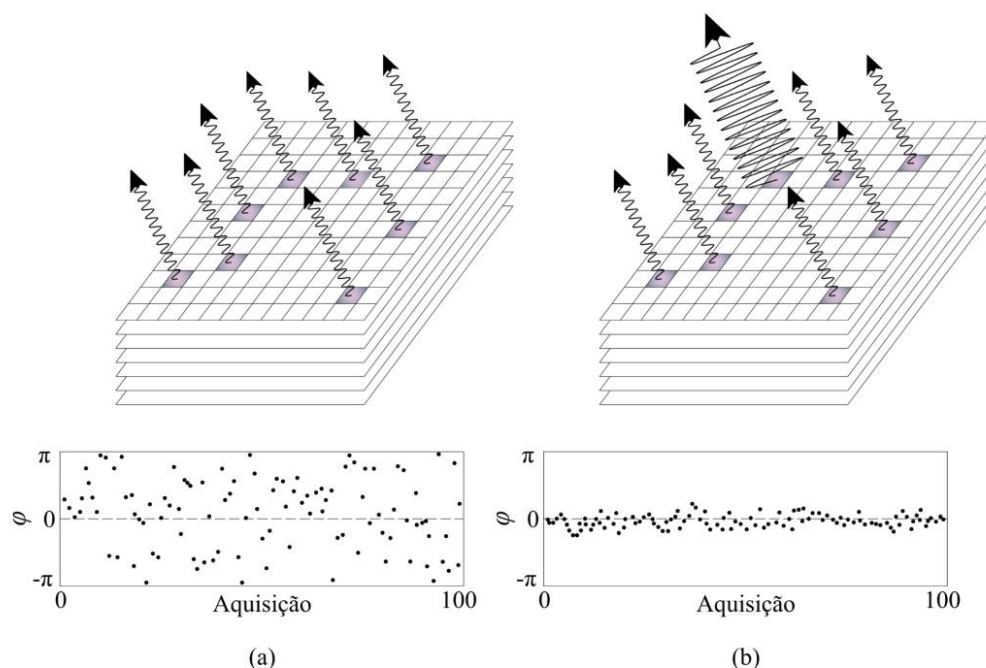
#### 4.4.2 Interferometria por Espalhadores Persistentes SAR (PSInSAR)

Desenvolvida e patenteada em 1999 por um grupo de Engenheiros Eletrônicos da Universidade Politécnica de Milão (POLIMI), na Itália (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 1999), a técnica representa uma classe específica da DInSAR. Trata-se da evolução do método interferométrico diferencial, descrita por alguns autores (HERRERA *et al.*, 2007, 2009c) como avançada (A-DInSAR: *Advanced Differential SAR interferometry*). A PSInSAR explora várias imagens SAR adquiridas da mesma área com procedimentos adequados de processamento e de análise de dados para separar  $\varphi_{Desl}$  das outras componentes de fase, representadas na Equação 11. Desta forma, a ferramenta se configura como referência importante no monitoramento de deformação devido à escolha, à precisão e à confiabilidade de alvos (pontos ou *pixels*) empregados.

Elementos identificados nas imagens SAR com essas características são denominados de (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 2000b, 2001): espalhadores persistentes (PS: *Persistent Scatterers*), referentes à técnica espalhadores persistentes interferométricos (PSI: *Persistent Scatterers Interferometric*). O método consiste na identificação de *pixels* com fase estável nas cenas de série temporal de interferogramas, em que possibilita gerar uma espécie de “rede

natural” do tipo GPS para monitorar a deformação em cada ponto (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 1999). Porém, isolada das componentes restantes do sinal Radar referentes à topografia, à atmosfera e o ruído (COLESANTI *et al.*, 2003a). Isso permite identificar *pixels* mais coerentes na análise de uma série temporal de interferogramas (Figura 50).

Figura 50 – Representação da refletividade de espalhadores persistentes da superfície com variabilidade da fase interferométrica. (a) sem PS e (b) com PS.

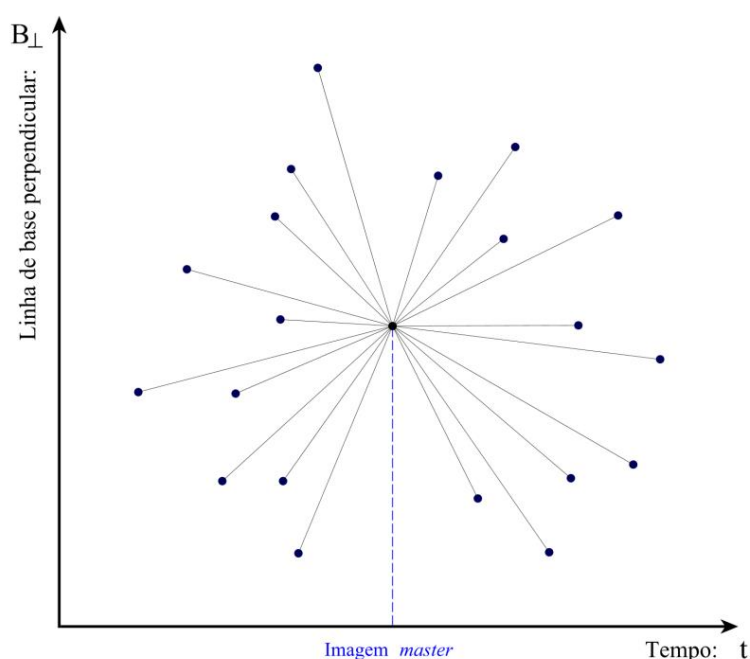


Fonte: Hooper (2006).

Alvos que se comportam como PS são refletores de Radar estáveis. Caracterizam-se em dois tipos: estruturas construídas pelo homem (postes das ruas, torres de transmissão, edifícios, pontes, dutos expostos, estruturas de telhado, encostas) e elementos naturais (afloramentos rochosos, superfícies dos solos não vegetadas, rochedos, taludes). Ao analisar o conjunto de cenas SAR temporais, selecionam-se as imagens em que os *pixels* são afetados por mínimas desconexões (espacial e temporal) – indicadores de fase interferométrica estável e com baixo nível de ruído (HOOPER *et al.*, 2004). O conjunto de *pixels* com essas características é determinante para observações interferométricas precisas.

A combinação de cenas SAR para formar o conjunto de interferogramas diferenciais (pilha de imagens) se realiza a partir da escolha de uma imagem de referência (*master*) comum a todas elas. A cena é selecionada, de modo geral, no centro da série temporal para maximizar a coerência do conjunto de interferogramas diferenciais (Figura 51).

Figura 51 – Exemplo da configuração do método PSInSAR.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

As principais características de PSInSAR se referem a utilização de apenas *pixels* PS e o emprego de um único conjunto de interferogramas diferenciais referente à imagem *master*. Além disso, desde o desenvolvimento da primeira técnica PSI proposta por Ferretti, Prati e Rocca (1999), há na atualidade outros algoritmos com conceitos comparáveis em que o termo PSI se mantém o mesmo na abordagem a todos eles (Tabela 16).

Tabela 16 – Principais características das abordagens de espalhadores persistentes.

(continua)

Configuração da rede	Critério de seleção de <i>pixel</i>	Modelo de deformação	Referência
Imagem <i>master</i>	Dispersão de amplitude	Deformação linear	Ferretti, Prati e Rocca (1999, 2000b, 2001)
Imagem <i>master</i>	Dispersão de amplitude e diversidade de fase espectral	Deformação linear	Werner <i>et al.</i> (2003)
Imagem <i>master</i>	Estabilidade de fase	Suavidade espacial e desenrolamento de fase 3D	Hooper <i>et al.</i> (2004)
Imagem <i>master</i>	Dispersão de amplitude	Diferentes tipos de modelos de deformação	Kampes (2006)
Imagem <i>master</i>	Dispersão de amplitude	Deformação linear	Costantini <i>et al.</i> (2008)
Alvos dependentes de um subconjunto de interferograma	Abordagem quase PS	Deformação linear	Perissin e Wang (2012)

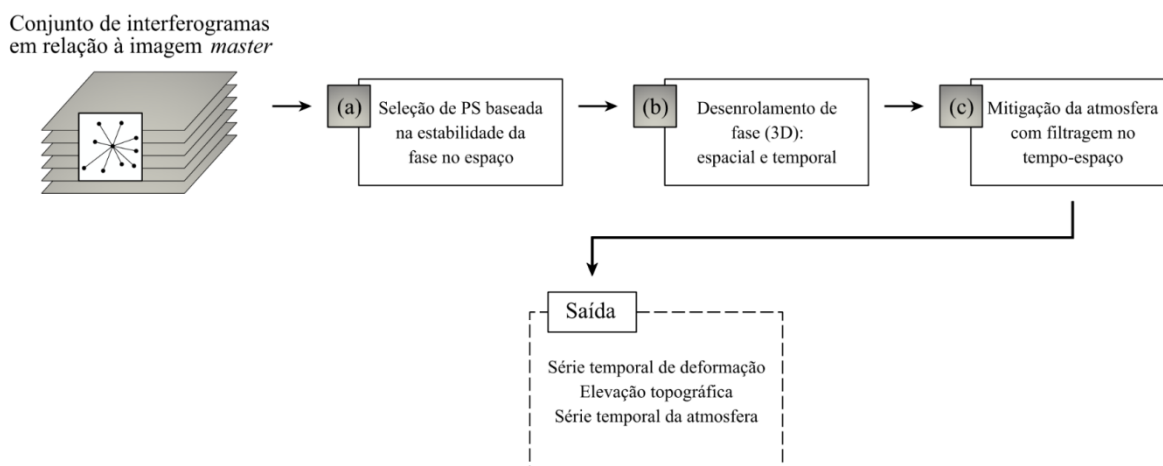
Tabela 16 – Principais características das abordagens de espalhadores persistentes. (conclusão)

Configuração da rede	Critério de seleção de <i>pixel</i>	Modelo de deformação	Referência
Imagem <i>master</i>	Dispersão de amplitude	Diferentes tipos de modelos de deformação	Van Leijen (2014)
Linha de base curta	Dispersão de amplitude e primo de PS	Suavidade espacial	Devanthery <i>et al.</i> (2014)
Imagem <i>master</i>	Dispersão de amplitude e diversidade de fase espectral	Diferentes tipos de modelos de deformação e tomografia	Siddique <i>et al.</i> (2016)

Fonte: Crosetto *et al.* (2016); Ho Tong Minh, Hanssen e Rocca (2020).

Apesar dos detalhes desses algoritmos serem distintos quanto à implementação, contudo, todos eles contêm três blocos principais de processamento (Figura 52): seleção coerente de *pixels*; desenrolamento de fase 3D (espaço-temporal); e mitigação do sinal atmosférico. Essas etapas podem ser aplicadas de forma combinada, independente ou iterativa em diferentes usos de PS.

Figura 52 – Fluxo genérico de processamento PSInSAR. Etapas: (a) seleção de *pixels* PS, (b) desenrolamento de fase interferométrica e (c) mitigação do sinal atmosférico.



Fonte: Samiei-Esfahany (2017).

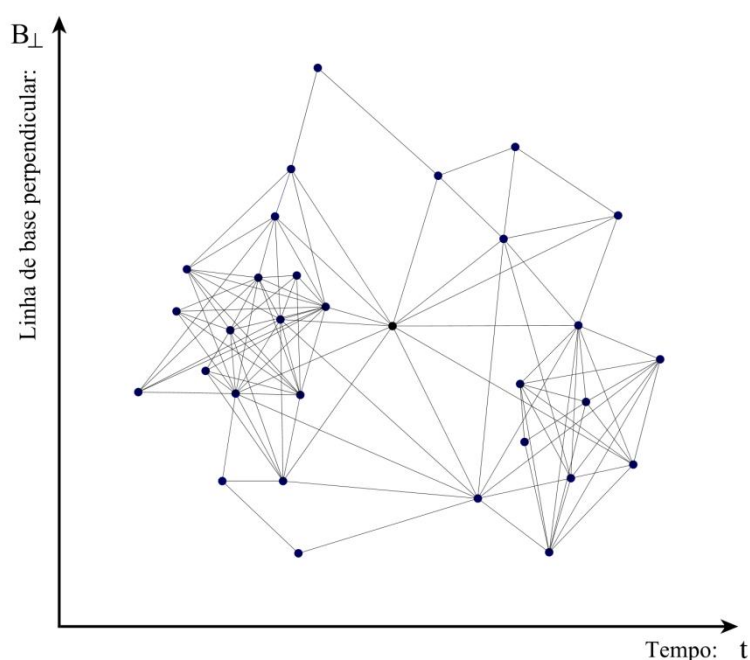
A Figura 52 retrata de maneira geral o procedimento do algoritmo PSInSAR. Essa abordagem envolve o uso da fase estável em relação ao modelo predefinido para selecionar *pixels* PS. São selecionados *pixels* que apresentam baixo desvio de fase interferométrica em relação ao PS vizinho. No passo seguinte, realiza-se o desenrolamento de fase 3D, seguido pela mitigação do sinal atmosférico com uso de filtragem passa alta no tempo e filtragem

passa baixa no espaço. Os principais resultados incluem série temporal e velocidade de deformação. Enfatiza-se que a série temporal de monitoramento representa produtos avançados de PS, a qual fornece histórico de deformação para um dado período de observação. Ou seja, essencial para diversas aplicações por meio da correlação com fatores determinantes – como na subsidência do solo devido à exploração de água subterrânea.

#### 4.4.3 Interferometria por Linhas de Base Curtas (SBAS)

Desenvolvido por Berardino *et al.* (2002), a SBAS surge paralela ao desenvolvimento de metodologias PSI. A técnica se baseia em vários subgrupos de linhas de base curtas de séries de interferogramas, gerados por uma seleção adequada de pares de imagens SAR para fornecer um mapa denso de medidas de deformação (Figura 53). Esses pares se caracterizam por uma pequena separação espacial e temporal entre as órbitas de aquisição. Isso aumenta a amostragem temporal pelo uso de todas as cenas SAR de diferentes subgrupos de pequenas linhas de base e preserva a capacidade do sistema (GAMA *et al.*, 2015).

Figura 53 – Exemplo da configuração do método SBAS.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A técnica reúne vários subgrupos de pequenas linhas de base de séries de interferogramas com objetivos de diminuir a descorrelação geométrica provocada pela separação orbital entre imagem SAR, reduzir o ruído do sinal e, por consequência, melhorar a coerência de interferogramas. A ideia principal consiste na escolha de pares de imagens SAR

envolvidos na geração de interferogramas, de forma a minimizar a linha de base espacial e, com isso, reduzir o fenômeno da descorrelação e erros topográficos (LANARI *et al.*, 2004a). O resultado é uma amostragem espacial e temporal aumentada em relação à abordagem PSI.

Para isso, usam-se alvos denominados de espalhadores distribuídos (DS: *distributed scatterers*). Em geral, correspondem a muitos pixels adjacentes em imagem SAR. Exibem assinatura de Radar muito semelhante, onde fenômenos de descorrelação temporal, ainda presentes, permitem a recuperação de dados de deslocamento. De maneira habitual, esses sinais estão relacionados a áreas rochosas, detritos, regiões não cultivadas.

O algoritmo SBAS utiliza alvos DS com método dos mínimos quadrados (MMQ) para detectar a deformação e analisar a evolução temporal, na geração de mapas de deslocamento e de velocidade. Ao longo do tempo, essa abordagem proposta por Berardino *et al.* (2002) está presente em outros algoritmos com conceitos semelhantes (Tabela 17).

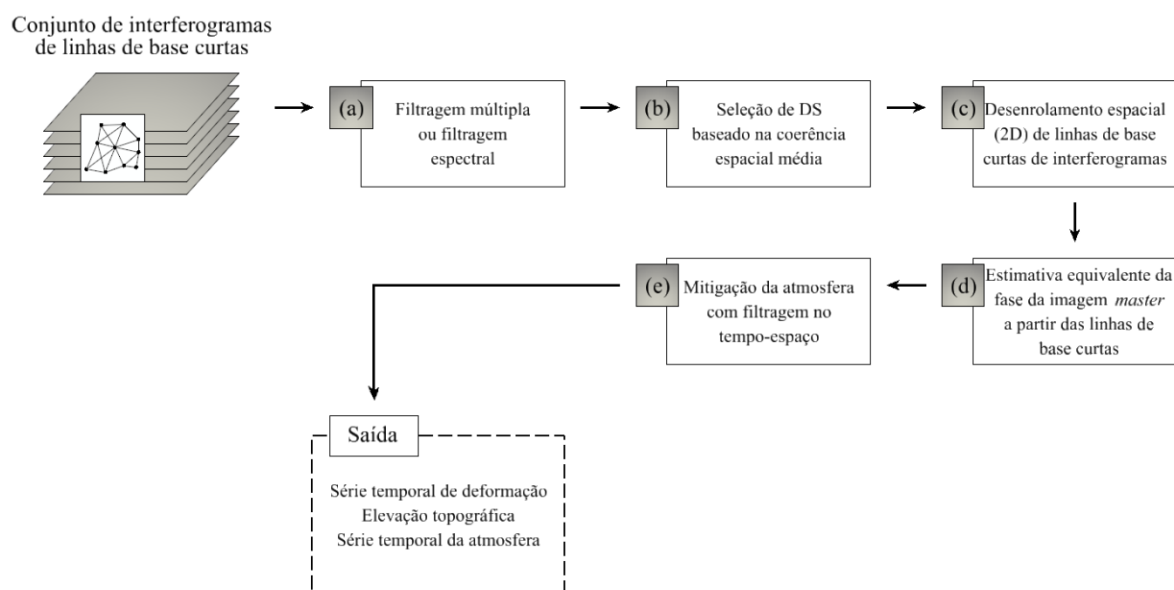
Tabela 17 – Principais características das abordagens de espalhadores distribuídos.

<b>Configuração da rede</b>	<b>Critério de seleção do <i>pixel</i></b>	<b>Modelo de deformação</b>	<b>Referência</b>
Linhas de base curtas	Coerente	Suavidade espacial	Berardino <i>et al.</i> (2002)
		Deformação linear	Mora, Mallorqui e Broquetas (2003)
		Suavidades espacial e temporal	Schmidt e Bürgmann (2003)
		Suavidade espacial e resolução completa	Lanari <i>et al.</i> (2004a)
		Função linear gradual	Crosetto, Crippa e Biescas (2005)
		Suavidade espacial	López-Quiroz <i>et al.</i> (2009)
		Diferentes tipos de modelos de deformação	Hetland <i>et al.</i> (2012)
		Suavidade espacial e paralela	Casu <i>et al.</i> (2014); Manunta <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Crosetto *et al.* (2016); Ho Tong Minh, Hanssen e Rocca (2020).

As implementações desses algoritmos têm em comum cinco blocos principais de processamento (Figura 54): filtragem; seleção coerente de *pixels*; desenrolamento espacial (2D) de linhas de base curtas de interferogramas; estimativa equivalente da fase da imagem *master* a partir das linhas de base curtas; e mitigação do sinal atmosférico.

Figura 54 – Fluxo genérico de processamento SBAS. Etapas: (a) filtragem, (b) seleção de *pixels* DS, (c) desenrolamento de fase interferométrica, (d) estimativa equivalente da fase em referência à imagem *master* e (e) mitigação do sinal atmosférico.



Fonte: Samiei-Esfahany (2017).

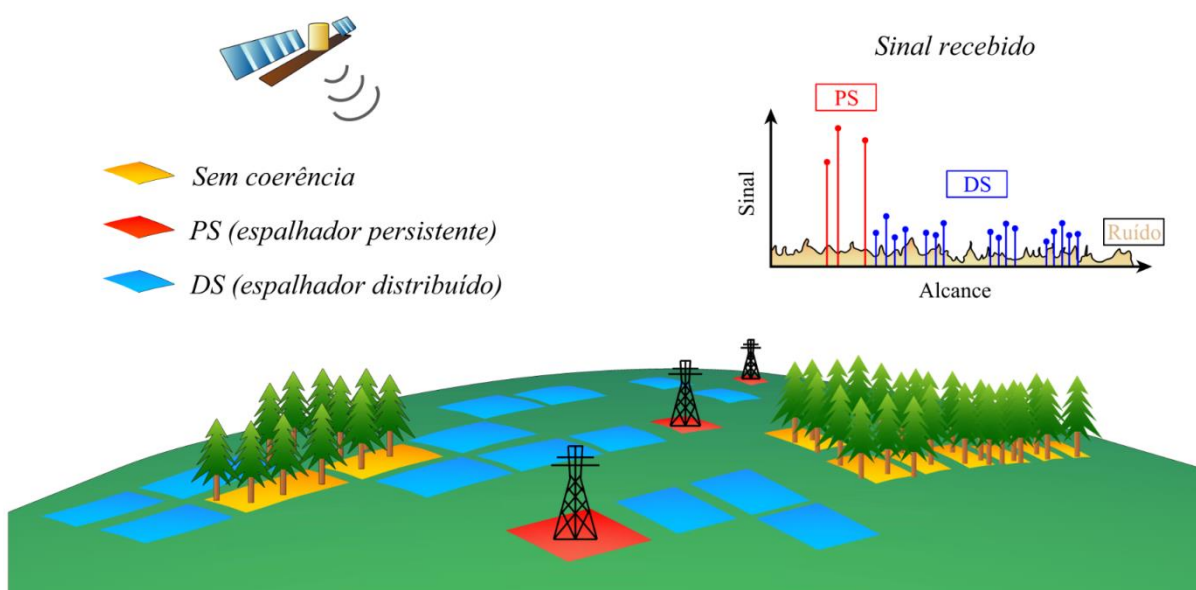
Na Figura 54, observa-se que primeiro os interferogramas selecionados são filtrados para reduzir o ruído da decorrelação. Em seguida, são identificados *pixels* coerentes baseados na coerência espacial média de subgrupos de interferogramas. Depois, as fases dos *pixels* selecionados nas linhas de base curtas de todos os interferogramas são desenroladas no domínio espacial. Após isso, os interferogramas desenrolados são invertidos para uma série temporal de referência – a qual permite estimar as séries temporais finais para cada *pixel*. Na sequência, diferentes sinais SAR são separados e os efeitos atmosféricos filtrados de forma semelhante aos métodos PSI. As principais diferenças entre SBAS e PSInSAR residem nas etapas: filtragem e estimativa equivalente da fase em referência à imagem *master*.

Em geral, destaca-se que apesar da utilização de *pixels* PS ou DS apresentar definições distintas, na prática, entretanto, as características de dispersão de objetos no terreno estão presentes entre eles de forma comum. Elementos detectados por PSInSAR podem se sobrepor aos identificados pelo SBAS – bem como no caso contrário. Em especial, em pilhas SAR com linhas de base curtas. Exemplos: *pixels* PS muito brilhantes e coerentes que mostram alta coerência espacial podem ser detectados pela abordagem SBAS. De maneira semelhante, *pixels* DS com alta coerência em áreas rochosas ou desertas também podem ser detectados pelos métodos PSI. Portanto, apesar de desenvolvidos para diferentes alvos, esses dois métodos são capazes de se integrar – conhecidos por métodos híbridos.

#### 4.4.4 Métodos híbridos

Apresentam significativos avanços na integração de técnicas (MT-InSAR) referentes à combinação de PS e DS. Em comparação com PS, DS são caracterizados por valores de refletividade mais baixos (Figura 55). Isso é melhorado pela média espacial de amostras vizinhas (FERRETTI, 2014). Em geral, os métodos híbridos buscam extrair informações de deslocamento mediante processamento conjunto dessas observáveis. O conceito pode ser visto de duas perspectivas distintas. A primeira na ampliação do método PSI pela incorporação de DS com diversas linhas de base curtas, filtradas em relação à imagem *master*. A segunda na extensão da metodologia SBAS via integração de informações de fase de *pixels* PS sem filtragem em interferogramas filtrados, com várias linhas de base curtas. Essas abordagens estão presentes em diversos trabalhos (Tabela 18).

Figura 55 – Esquema das características de *pixels* PS e DS.



Fonte: Ferretti (2014).

Tabela 18 – Principais características das abordagens integradas entre espalhadores persistentes e espalhadores distribuídos.

(continua)

Configuração da rede	Critério de seleção de <i>pixel</i>	Modelo de deformação	Referência
Imagem <i>master</i> e linha de base curta	Estabilidade de fase	Suavidade espacial e desenrolamento de fase 3D	Hooper (2008)
Empilhamento de dados completo	Teste estatístico de homogeneidade	Deformação linear e fase de ligação	Ferretti <i>et al.</i> (2011)
Linhas de base curtas		Deformação linear	Goel e Adam (2014)
Imagem <i>master</i>		Deformação linear	Lv <i>et al.</i> (2014)

Tabela 18 – Principais características das abordagens integradas entre espalhadores persistentes e espalhadores distribuídos.

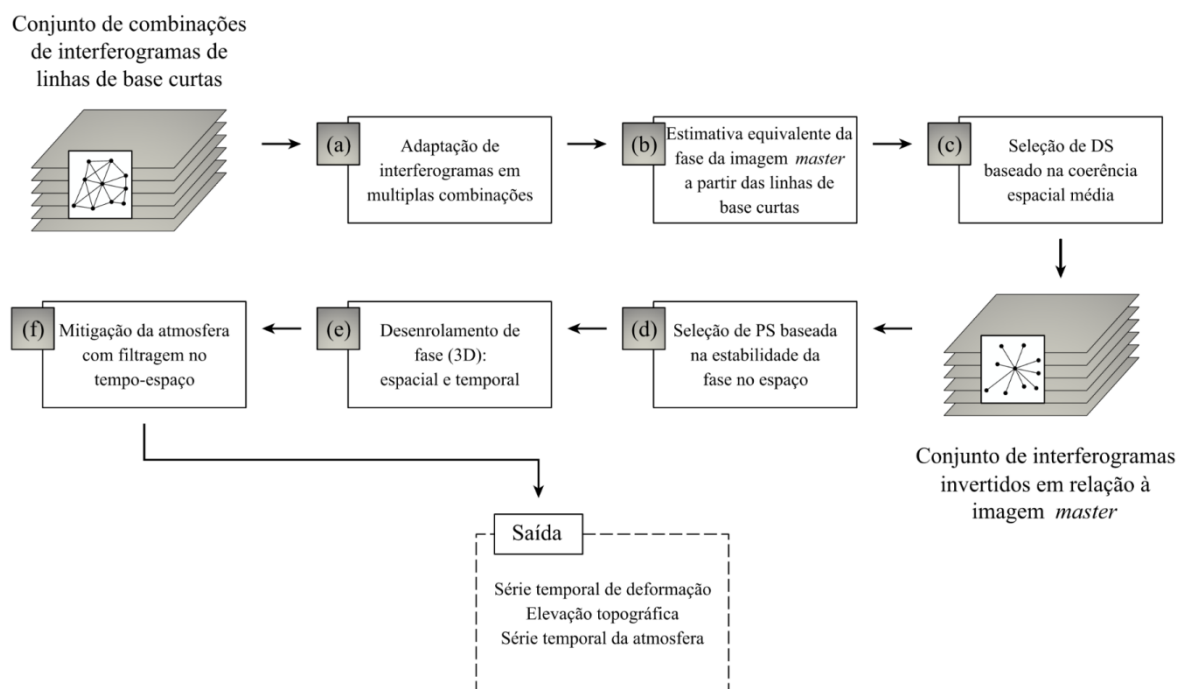
(continua)

Configuração da rede	Critério de seleção de <i>pixel</i>	Modelo de deformação	Referência
Empilhamento de dados completo		Diferentes tipos de deformação e fase de ligação	Samiei-Esfahany <i>et al.</i> (2016)
Empilhamento de dados completo	Teste estatístico de homogeneidade	Deformação linear, ligação de fase e múltiplo espalhamento	Cao, Lee e Jung (2016); Engelbrecht e Ingg (2016)
Empilhamento de dados eficiente		Deformação linear e ligação de fase	Ansari, Zan e Bamler (2017)
Empilhamento de dados		Deformação linear, ligação de fase e polarização	Mullissa <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Crosetto *et al.* (2016); Ho Tong Minh, Hanssen e Rocca (2020).

Na atualidade, entre as principais técnicas híbridas empregadas, têm relevância o algoritmo denominado de SqueeSAR. Desenvolvido por Ferretti *et al.* (2011) e patentado pela empresa TRE-Altamira, esse método híbrido realiza processamento combinado e análise estatística em relação aos *pixels* PS e DS. Resulta na melhora da densidade e da qualidade de pontos de medição quanto à deformação superficial, com aplicação relevante para áreas não urbanas. De forma usual, o fluxograma do algoritmo está descrito na Figura 56.

Figura 56 – Fluxo genérico de processamento SqueeSAR. Etapas: (a) filtragem, (b) estimativa equivalente da fase em referência à imagem *master*, (c) seleção de *pixels* DS, (d) seleção de *pixels* PS (e) desenrolamento de fase interferométrica e (f) mitigação do sinal atmosférico.



Fonte: Ferretti *et al.* (2011); Samiei-Esfahany (2017).

Na Figura 56, o processo ocorre em cinco blocos distintos referentes à filtragem (a), à estimativa equivalente da fase da imagem *master* (b), à seleção de *pixels* (c) e (d), ao desenrolamento de fase interferométrica (e) e à mitigação do sinal atmosférico (f), ambos relacionados à junção de metodologias InSAR (PS e DS). O uso desses procedimentos integrados confere ao SqueeSAR capacidade essencial para extrair diversas informações no conjunto de aquisições SAR. Permite explorar não apenas as limitações de PSInSAR e/ou SBAS, mas com habilidade para processar todos os possíveis interferogramas. Isso porque, a técnica híbrida utiliza as combinações possíveis de interferogramas de todas as cenas SAR. Dessa forma, o SqueeSAR se traduz em uma técnica avançada para detectar deslocamentos superficiais precisos em áreas urbana e/ou rural.

#### 4.5 Considerações Finais

De forma remota espacial, a percepção humana em detectar sutis alterações da superfície da Terra advém de imagens do Seasat – primeiro satélite com sensor SAR, lançado em 1978. Em termos de medição, esse feito se equipara aos métodos terrestre e aéreo de observação. Porém, capaz de analisar deformações de maneira mais detalhada por meio de grandes áreas, elevada densidade de pontos de observação e alta frequência temporal – sem necessidade de coletar dados em campo. Por isso, ao longo de décadas, as potencialidades da interferometria SAR despertam interesse da indústria espacial e da comunidade científica, respectivamente, na disponibilidade de novos produtos e na pesquisa metodológica de processamento InSAR. Essas duas questões propiciam oportunidades sem precedentes na detecção e monitoramento de fenômenos que causam instabilidade superficial.

A utilização InSAR para detectar e monitorar processos que geram deslocamento do terreno se consolida em uma ferramenta madura. Apta a medir pequenos movimentos que ocorrem em larga escala e por longos intervalos de tempo. Tem uso requerido em diversas especialidades do conhecimento das Geociências e das Engenharias. Possui aplicação, por exemplo, na sismologia, glaciologia vulcanologia, oceanografia, hidrogeologia, mineralogia, infraestrutura, estudos atmosféricos, geotécnicos, geofísicos. E também nos recursos hídricos: na detecção do rebaixamento superficial pela ação da subsidência do solo.

Em vista disso, a InSAR se mostra uma alternativa eficaz e complementar aos procedimentos tradicionais de observação. Ademais, em virtude das diversas missões ativas e da expectativa por novos lançamentos, à tendência é que a técnica continue a se desenvolver. Isso viabiliza produtos com menor período de revisita e alta resolução espacial, ou seja, maior amostragem para mensuração precisa de eventos relativos à movimentação do relevo.

Como técnica geodésica de medição, o desenvolvimento da InSAR se verifica pela condição eminente em monitorar de forma sistemática e acurada diversos fenômenos que provocam deformação superficial. Isto é, com impactos consideráveis ao meio ambiente, as infraestruturas, a economia e, sobretudo, com implicações na vida social das pessoas afetadas. A importância de salvaguarda dessas questões, em várias partes da Terra, contribui para a promoção da InSAR como uma ferramenta de uso quase indispensável na identificação e observação regular de elementos que afetam a rigidez do solo. Logo, o progresso da InSAR se deduz por meio de cinco aspectos principais.

O primeiro se refere à indústria espacial de observação da Terra, responsável por fornecer produtos e serviços baseados em tecnologia satelital. Nos últimos anos, constata-se crescimento significativo de empresas envolvidas na produção de novos sensores SAR. Há investimentos em características relacionadas à polarização do sinal eletromagnético, à alta resolução espacial de imageamento, à abertura do ângulo de inclinação, ao menor tempo de revisita, aos diversos tipos de banda e, bem como, à implantação de constelação de satélites. Exemplo: a *PredaSAR Corporation* pretende implantar uma constelação inicial de 48 satélites SAR com tempo de revisitação de poucos minutos de observação da Terra.

O segundo se relaciona à fonte financiadora. Várias agências espaciais nacionais e/ou internacionais<sup>44</sup> exercem significativo papel no financiamento de missões SAR para atender diversos propósitos regionais e/ou globais. Há destaque para a Agência Espacial Europeia ESA (*European Space Agency*), que desde os anos 90 investe na aquisição de imagens SAR de observação da Terra. De início pelos satélites ERS-1 (1991-2000), ERS-2 (1995-2011) e Envisat (2002-2012). E nos dias atuais pelos satélites Sentinel-1A (2014) e Sentinel-1B (2016), ambos operados no âmbito do programa Copernicus<sup>45</sup>. Têm atuação importante em mudanças climáticas; monitoramento dos meios terrestre e marinho; suporte à gestão de emergências; segurança do ambiente marítimo; apoio a desastres naturais.

O terceiro se vincula à disponibilidade de produtos. A ascensão da tecnologia InSAR passa pela capacidade do segmento espacial em ofertar infraestrutura apropriada na liberação e/ou comercialização de dados de forma confiável, uma vez que o conjunto de séries temporais de interferogramas permite a divulgação da InSAR como ferramenta geodésica de monitoramento terrestre. É capaz de fornecer informações precisas a partir de aquisições SAR suficientes e disponíveis de áreas de interesses, adequadas para diversas aplicações em

---

<sup>44</sup> Exemplos: americana (NASA); francesa (CNES: *French Space Agency*); japonesa (JAXA: *Japan Aerospace Exploration Agency*); russa (RKA: *Russian Federal Space Agency*); alemã (DLR: *German Aerospace Center*); italiana (ASI: *Agenzia Spaziale Italiana*); espanhola (INTA: *Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial*).

<sup>45</sup> O programa Copernicus desenvolve o Sentinel-1C e Sentinel-1D sem datas de lançamento definidas.

Geociências e Engenharias. Nesse sentido, a Agência Espacial Europeia (ESA), por exemplo, contribui para a promoção<sup>46</sup> da InSAR por meio da disponibilização de insumos SAR de forma gratuita das missões: ERS-1/2, Envisat, Sentinel-1.

O quarto diz respeito à produção científica, exposta em: livros, artigos, seminários, simpósios, congressos. A participação da comunidade acadêmica por esses meios colabora de maneira efetiva para a evolução da InSAR, em várias partes do mundo. Assim como, nas atividades de ensino, pesquisa, extensão e orientação no âmbito educacional – voltados aos cursos de graduação e aos programas de mestrado e doutorado. Há destaque para trabalhos aplicados em casos reais, uma vez que os resultados podem ser convertidos em melhorias para a sociedade por meio da utilização interferométrica SAR em ações naturais e/ou humanas que influenciam a estabilidade superficial.

O último, nessa perspectiva, remete à evolução dos algoritmos InSAR. A capacidade considerável para detectar pequenas alterações da superfície terrestre de forma precisa advém do aperfeiçoamento de modelos computacionais matemáticos. A ação é fruto de investigações contínuas no desenvolvimento e inovação de processos eficientes, os quais são objeto de estudo e pesquisa de desenvolvedores – acadêmicos e particulares – em promover melhores soluções. Nesse sentido, destacam-se procedimentos envolvidos com PS, DS e métodos híbridos – responsáveis por significativos resultados em deslocamento referente à quantidade e à confiabilidade de pontos de medição.

Deste modo, a relação mútua entre esses aspectos proporciona nos dias atuais diversas aplicações – algumas inimagináveis, décadas passadas, com o lançamento do Seasat em 1978. Em especial, no estudo do monitoramento da subsidência do solo. Para isso, a modernização da tecnologia espacial aliada ao avanço computacional na otimização de processamento de dados confere a InSAR: técnica geodésica de medição por teledetecção remota orbital precisa, capaz de mensurar alterações milimétricas da superfície da Terra.

Assim, a InSAR apresenta atraentes funcionalidades para cenários de mudança superficial. Tais como: possibilidade de cobertura espacial de grandes áreas; capacidade de medir deformações passadas com uso de séries temporais de imagens SAR; ampla densidade de pontos de medição com precisão da ordem milimétrica; acesso a dados gratuitos a partir da década de 90; ausência de instalação de equipamentos em campo. Nesse contexto, portanto, as utilidades da InSAR se revelam adequadas e atrativas. Isso assegura a sua utilização para aplicação em subsidência do solo. Agora é hora de usá-la.

---

<sup>46</sup> Algo similar na promoção InSAR também ocorre a partir de outras agências espaciais. Ou seja, na liberação de dados SAR por meio de aprovação de projetos de pesquisas. Exemplos: JAXA, DLR, ASI, INTA.

## 5 METODOLOGIA

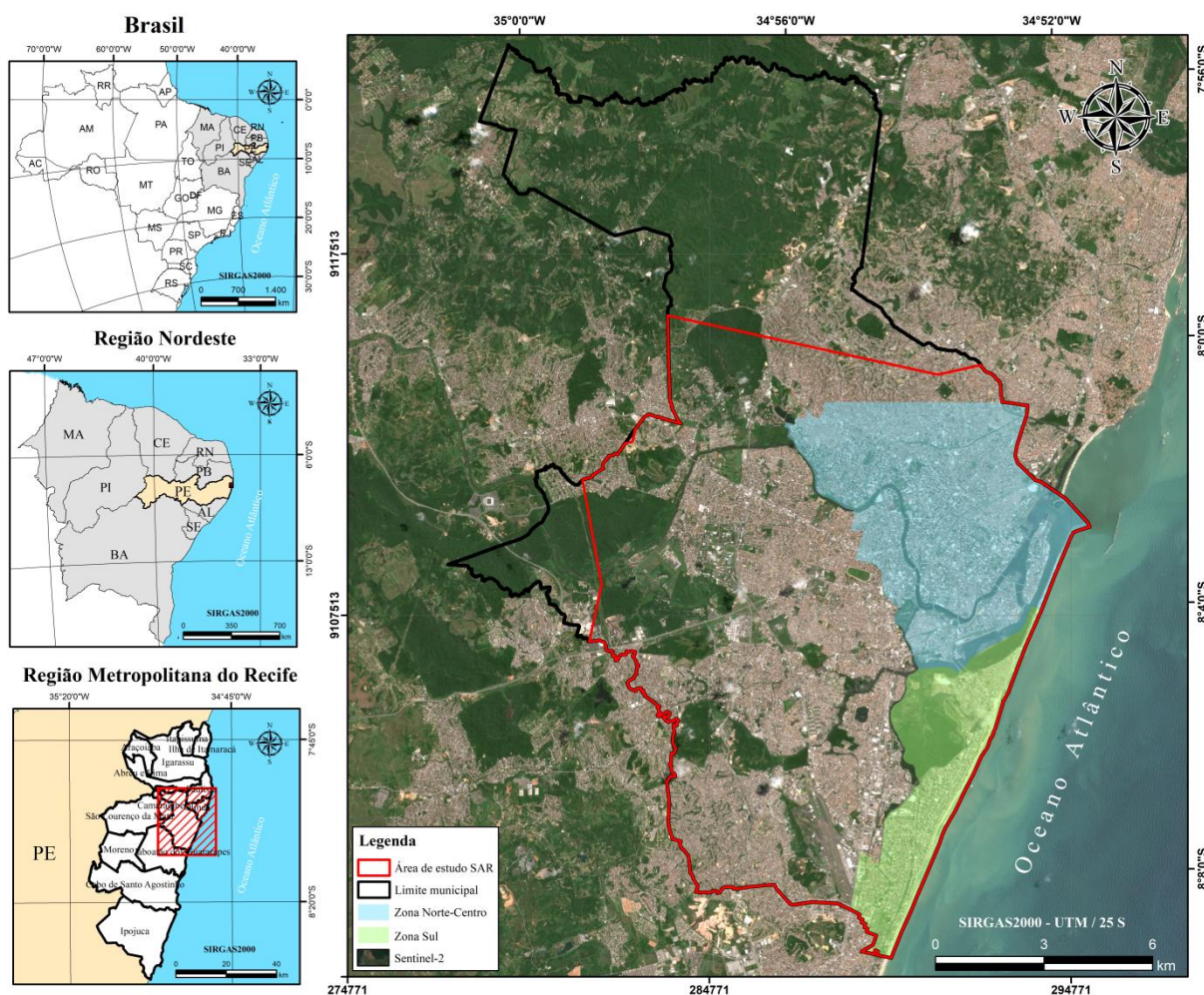
O capítulo aborda procedimentos relativos ao processamento InSAR, de modo a atender a finalidade investigativa da pesquisa quanto à detecção da movimentação da superfície terrestre. Para tanto, enfatiza-se a utilização de materiais e programa científico nessa ação referente à inserção de dados, à execução de rotinas e à geração de resultados. Tais etapas se desenvolvem com uso da técnica PSInSAR. Ela possui significativa aplicação em diversos fenômenos geológicos e ações antrópicas que provocam deformação do relevo. Isso denota a sua utilização neste estudo. Por meio da ferramenta, tem-se a realização de processamento e análise de séries temporais de imagens SAR relativas à determinação da subsidência do solo em Recife.

### 5.1 Caracterização da Área de Estudo

O estudo da subsidência do solo em Recife se realizou em localidades com histórico de áreas impactadas pela exploração hídrica subterrânea, nas quais se constataram diminuição dos níveis de água de sistemas aquíferos de maneira acentuada. Desta forma, a pesquisa abrangeu duas regiões distintas. Os bairros da zona Sul: Boa Viagem, Pina e Brasília Teimosa. Mais os bairros da zona Norte-Centro: Campo Grande, Arruda, Peixinhos, Aflitos, Graças, Madalena, Monteiro, Poço, Casa Forte, Casa Amarela, Jaqueira, Torre, Espinheiro, Tamarineira, Parnamirim, Boa Vista, São José, Santo Antonio Derby, Soledade, Santo Amaro, Encruzilhada, Rosarinho, Ilha do Leite, Paissandu, Recife, Santana.

O domínio territorial dessas regiões correspondeu ao valor aproximado de 54 km<sup>2</sup>. Isso representou cerca de 25% da cidade do Recife. Tal percentual englobou a maioria da população e, também, de moradores com maior concentração de renda *per capita*: responsáveis pela maior quantidade de poços do município. Nessas localidades, ao longo de décadas, a intensa captação de recursos minerais do subsolo provocou significativa redução dos aquíferos Cabo e Beberibe (COSTA *et al.*, 2002; COSTA; COSTA FILHO, 2004; MANOEL FILHO, 2004). Os efeitos dessa ação à superfície recifense delimitaram a área de estudo (Figura 57) em coordenadas geodésicas elipsoidais SIRGAS2000: latitudes (8°9'20"S e 7°59'38"S) e longitudes (34°59'2"O e 34°51'27"O).

Figura 57 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: dados geospaciais (PCR, 2016; IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

## 5.2 Materiais Utilizados

A investigação experimental da pesquisa empregou os seguintes materiais:

### 5.2.1 Recursos Computacionais

- *Notebook:* adotou-se o computador portátil da marca Acer, modelo *Predator Helios 300 Gamer*. O equipamento teve como configurações: tela de 15,6" *Full High Definition* (1920 x 1080 pixels) IPS (*In-Plane Switching*), processador da Intel Core i7 (7700HQ de 2.80 GHz a 3.8 GHz), placa de vídeo dedicada da NVIDIA GeForce GTX 1060 com 6 GB GDDR5, memória de 32 GB DDR4 2400 MHz, armazenamento de 256 GB SSD (*Solid State Drive*) mais 2 TB HD (*Hard Disk*) e sistema operacional de 64 bits com *Windows 10 Home* versão 1903;

- HD externo: empregou-se o disco rígido externo da marca Seagate para salvar informações e produtos geoespaciais. O aparelho teve como aspectos: capacidade de armazenamento de 8 TB e transferência de dados com conectividade USB 3.0;
- Microsoft Office: empregou-se a versão *Home and student* 2010 de licença proprietária do autor na utilização de pacote de programas para edição de texto, planilha e apresentação, em respectivo, *Word, Excel e PowerPoint*;
- QGIS (*Quantum Geographic Information System*): executou-se a versão 3.0 Girona desse programa, licenciado segundo Licença Pública Geral (GPL: *General Public License*) na operação de rotinas de geoprocessamento e na produção de mapas temáticos; e
- Google Earth Pro: usou-se a versão 7.3.4 gratuita desse programa para visualizar e interpretar resultados em ambiente 2D e 3D.

### 5.2.2 SARProz

A ferramenta consiste em uma série de técnicas de processamento de imagens SAR, interferométrico SAR (InSAR), multitemporal InSAR (MT-InSAR). Tem como principais características: interface gráfica intuitiva, sem conhecimento de codificação para uso padrão; construção em Matlab (*Matrix Laboratory*), usuários avançados podem desenvolver extensões próprias do programa; execução independente da instalação do Matlab nas plataformas operacionais (Unix, Windows, Mac); funcionamento em vários núcleos de CPU ou clusters de computador de forma automática; atuação em modo automático a partir da linha de comando sem interface gráfica; suporte para a maioria dos formatos de satélites.

A versatilidade e a utilização desse programa por meio de licença demonstrativa possibilitam ampla disponibilidade e aplicação em diversos estudos. Consulta realizada na plataforma do Google Acadêmico<sup>47</sup> (<https://scholar.google.com.br>) revela mais de 400 trabalhos com uso do SARProz. Entre as investigações, destacam-se publicações nas revistas: *Nature* (MILILLO *et al.*, 2016; KHORRAMI *et al.*, 2020), *Remote Sensing of Environment* (BOZZANO *et al.*, 2015), *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (FOROUGHNIA *et al.*, 2019), *Remote Sensing* (ROCCEGGIANI *et al.*, 2019; TARIGHAT; FOROUGHNIA; PERISSIN, 2021).

---

<sup>47</sup> Pesquisa ocorrida em 23 de maio de 2022 apresentou 440 resultados.

Em meio a isso, utilizou-se a versão gratuita do *software* para processar e analisar imagens SAR. A solicitação de licença de avaliação se deu através do domínio do SARProz (<https://www.sarproz.com/application-form/>). Nessa opção, a utilização do programa contou com licença temporária de duração de 3 meses. No entanto, possibilitou exportar os resultados em formatos GeoTIFF (.tif) e Google Earth (.kml). A ferramenta foi desenvolvida em 2009 pelo desenvolvedor Dr. Daniele Perissin<sup>48</sup>, com atuação do método PSInSAR (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 2000, 2001).

### 5.2.3 Sentinel-1

A missão Sentinel-1 se constitui por uma constelação de 2 satélites idênticos denominados Sentinel-1A e Sentinel-1B os quais usam sensores Radar com o objetivo de monitorar a Terra, em operação desde 2014 e 2016, respectivamente. As plataformas satelitais fazem parte do Programa Copernicus – resultado da parceria firmada entre a União Europeia (UE), a Agência Espacial Europeia (ESA) e os vários Estados-Membros (EM).

As imagens dos satélites Sentinel-1 e toda informação produzida no âmbito da família Sentinel<sup>49</sup> estão agrupados em seis serviços Copernicus ([www.copernicus.eu/pt-pt/servicos](http://www.copernicus.eu/pt-pt/servicos)): atmosfera, meio marinho, meio terrestre, alterações climáticas, segurança e emergências. As atividades fornecem dados quase em tempo real em nível global, mas permitem seu uso para as necessidades locais e regionais. São distribuídos com base em uma política de acesso aberto e sem custos para usuários europeus e fora da Europa.

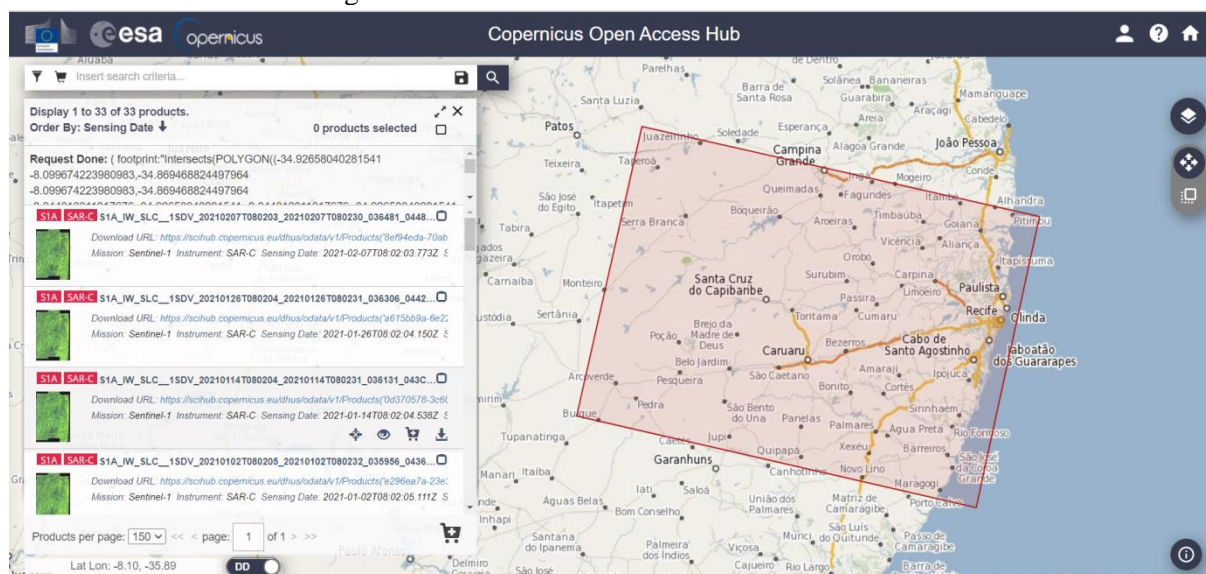
A partir do *Sentinels Scientific Data Hub* (<https://scihub.copernicus.eu/dhus>) da ESA (Figura 58), adquiriram-se 135 imagens SAR do satélite Sentinel-1A<sup>50</sup> de tamanho 981 GB (*Gigabytes*) para o período de 25 de setembro de 2016 a 8 de abril de 2021 (Tabela 19). As cenas tiveram como características: tempo de revisita 12 dias, resolução espacial (*range x azimuth*) 5 m x 20 m, polarização simples (VV) banda C, órbita descendente, largura da faixa imageada 250 km, ângulo de incidência 29.1° a 46°, órbita relativa de número 9, modo IW (*Interferometric Wide swath*), nível-1, tipo de produto SLC.

<sup>48</sup> Pesquisador e desenvolvedor de sistema de análise de interferometria SAR na RASER (*Radar and Software Engineering Research Company*, Hong Kong).

<sup>49</sup> Além da missão Radar de abertura sintética do Sentinel-1, a família Sentinel engloba ([www.copernicus.eu](http://www.copernicus.eu)): Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-4, Sentinel-5 e Sentinel-6.

<sup>50</sup> Para a área de estudo do Recife não há dados do Sentinel-1B. A utilização dos satélites (Sentinel-1A e Sentinel-1B) assegura tempo de revisita de 6 dias. No entanto, essa possibilidade está disponível apenas para países europeus (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario>).

Figura 58 – Dados de recobrimento do Sentinel-1.



Fonte: <https://scihub.copernicus.eu/dhus>.

Tabela 19 – Data de aquisição de imagens do satélite Sentinel-1.

Sentinel-1								
Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano
25	Set	2016	12 e 24	Abr	2018	21	Nov	2019
7, 19 e 31	Out	2016	6, 18 e 30	Mai	2018	3, 15 e 27	Dez	2019
12 e 24	Nov	2016	11 e 23	Jun	2018	8 e 20	Jan	2020
6, 18 e 30	Dez	2016	5, 17 e 29	Jul	2018	1, 13 e 25	Fev	2020
11 e 23	Jan	2017	10 e 22	Ago	2018	8 e 20	Mar	2020
4, 16 e 28	Fev	2017	3, 15 e 27	Set	2018	1, 13 e 25	Abr	2020
12 e 24	Mar	2017	9 e 21	Out	2018	7 e 31	Mai	2020
5, 17 e 29	Abr	2017	2, 14 e 26	Nov	2018	12 e 24	Jun	2020
11 e 23	Mai	2017	8 e 20	Dez	2018	6, 18 e 30	Jul	2020
4, 16 e 28	Jun	2017	1, 13 e 25	Jan	2019	11 e 23	Ago	2020
10 e 22	Jul	2017	6 e 18	Fev	2019	4, 16 e 28	Set	2020
3, 15 e 27	Ago	2017	2, 14 e 26	Mar	2019	10 e 22	Out	2020
8 e 20	Set	2017	7 e 19	Abr	2019	3, 15 e 27	Nov	2020
2, 14 e 26	Out	2017	1 e 13	Mai	2019	9 e 21	Dez	2020
7 e 19	Nov	2017	6 e 18	Jun	2019	2, 14 e 26	Jan	2021
1, 13 e 25	Dez	2017	12 e 24	Jul	2019	7 e 19	Fev	2021
6, 18 e 30	Jan	2018	5, 17 e 29	Ago	2019	3, 15 e 27	Mar	2021
11 e 23	Fev	2018	10 e 22	Set	2019	8	Abr	2021
7, 19 e 31	Mar	2018	4, 16 e 28	Out	2019	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

#### 5.2.4 COSMO-SkyMed

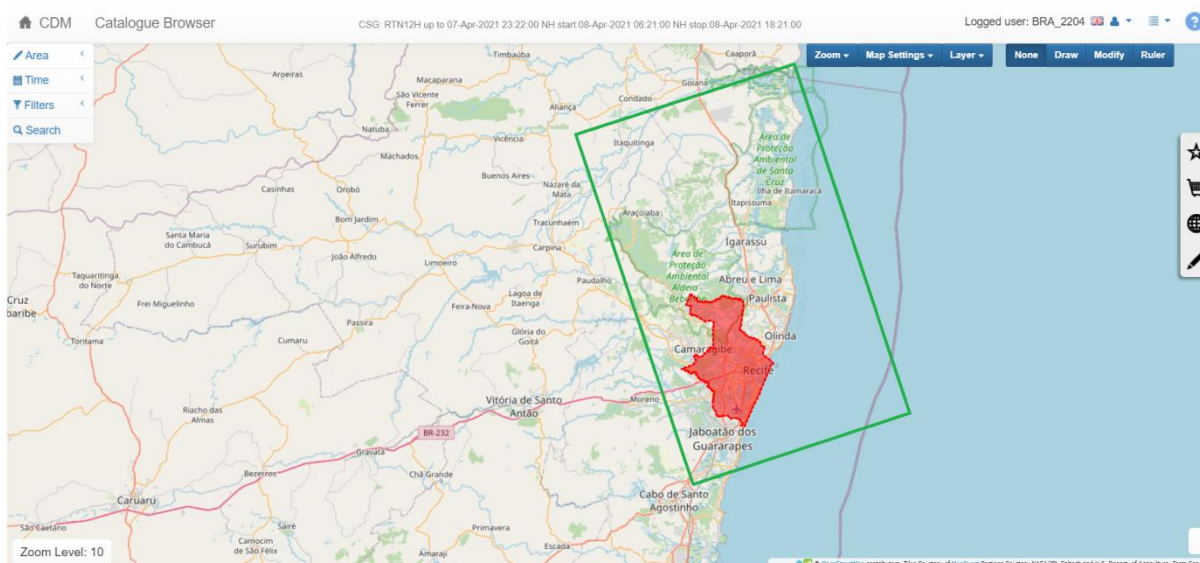
A missão COSMO-SkyMed (CSK) é composta por uma constelação de 4 satélites idênticos (CSK-1, CSK-2, CSK-3 e CSK-4) de tamanho médio, equipados com Radar de abertura sintética de alta resolução espacial. O primeiro satélite opera desde 2007 e o último a partir de 2010. O sistema faz parte da Agência Espacial Italiana (ASI), e possui dupla

utilização de observação do espaço-Terra dedicado a fornecer produtos/serviços para os seguintes fins ([www.cosmo-skymed.it/en/index.htm](http://www.cosmo-skymed.it/en/index.htm)): aplicações em monitoramento e vigilância ambiental para a gestão de riscos exógenos, endógenos e antropogênicos; e fornecimento de produtos e serviços comerciais.

A utilização do CSK também ocorre em estudos de: prevenção e gestão de desastres ambientais, controle dos oceanos e costas marinhas, controle de recursos agrícolas e florestais, controle de edifícios, Cartografia. Para investigações científicas, a obtenção de produtos CSK de forma gratuita se dá pela aprovação de projeto de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) à ASI, a qual contempla propostas focadas na exploração de dados para aplicações civis. A solicitação se destina à comunidade científica nacional e internacional.

Por meio desse auxílio à pesquisa, obteve-se aprovação do projeto (00020/8/783/1520) para aquisição de produtos sem custo. A partir do catálogo (<https://portal.cosmo-skymed.it/CDMFE/catalogue>) da ASI (Figura 59), adquiriram-se 100 imagens do satélite COSMO-SkyMed<sup>51</sup> de tamanho 167 GB para o período de 6 de julho de 2011 a 10 de dezembro de 2019 (Tabela 20). As cenas tiveram como características: tempo de revisita 30 dias, resolução espacial (*range x azimuth*) 2,6 m x 2,6 m, polarização simples (HH), banda X, órbita ascendente, largura da faixa imageada 40 km, ângulo de incidência 19,93° a 20,11°, modo *Stripmap (HIMAGE)*.

Figura 59 – Dados de recobrimento do COSMO-SkyMed.



Fonte: <https://portal.cosmo-skymed.it/CDMFE/catalogue>.

<sup>51</sup> As cenas COSMO-SkyMed são comercializadas pela e-geos, em: <https://www.e-geos.it>. A aquisição consiste de dados de acervo e novos produtos.

Tabela 20 – Data de aquisição de imagens do satélite COSMO-SkyMed.

COSMO-SkyMed								
Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano
6	Jul	2011	19	Mai	2014	17	Abr	2017
9	Ago	2011	12	Jun	2014	15	Mai	2017
16	Set	2011	14	Jul	2014	12	Jun	2017
18	Out	2011	15	Ago	2014	14	Jul	2017
19	Nov	2011	16	Set	2014	15	Ago	2017
21	Dez	2011	10	Out	2014	16	Set	2017
14	Jan	2012	15	Nov	2014	18	Out	2017
15	Fev	2012	17	Dez	2014	19	Nov	2017
11	Mar	2012	14	Jan	2015	13	Dez	2017
19	Abr	2012	15	Fev	2015	14	Jan	2018
17	Mai	2012	19	Mar	2015	15	Fev	2018
18	Jun	2012	12	Abr	2015	19	Mar	2018
17	Jul	2012	14	Mai	2015	16	Abr	2018
17	Ago	2012	15	Jun	2015	18	Mai	2018
18	Set	2012	13	Jul	2015	19	Jun	2018
20	Out	2012	14	Ago	2015	17	Jul	2018
13	Nov	2012	15	Set	2015	22	Ago	2018
23	Dez	2012	13	Out	2015	23	Set	2018
12	Jan	2013	18	Nov	2015	10	Nov	2018
17	Fev	2013	16	Dez	2015	12	Dez	2018
17	Mar	2013	17	Jan	2016	13	Jan	2019
18	Abr	2013	5	Mar	2016	14	Fev	2019
17	Mai	2013	10	Abr	2016	18	Mar	2019
17	Jun	2013	12	Mai	2016	3	Abr	2019
19	Jul	2013	13	Jun	2016	5	Mai	2019
20	Ago	2013	15	Jul	2016	1	Jun	2019
9	Set	2013	12	Ago	2016	3	Jul	2019
15	Out	2013	13	Set	2016	4	Ago	2019
16	Nov	2013	15	Out	2016	5	Set	2019
18	Dez	2013	16	Nov	2016	7	Out	2019
19	Jan	2014	18	Dez	2016	8	Nov	2019
16	Fev	2014	11	Jan	2017	10	Dez	2019
16	Mar	2014	12	Fev	2017	-	-	-
17	Abr	2014	16	Mar	2017	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

### 5.2.5 PAZ

A missão PAZ, antes denominada de Satélite Espanhol de Observação SAR (SEOSAR/PAZ), faz parte do Programa Nacional de Observação da Terra por Satélite (PNOTS). A iniciativa resulta de um acordo de cooperação entre o Ministério da Defesa e o Ministério da Indústria, Turismo e Comércio da Espanha. Surge como resposta à demanda por tecnologia Radar com características requeridas para ações de segurança e defesa pelas Forças Armadas espanholas, como para as necessidades de usuários civis.

Com esse objetivo, a plataforma PAZ emprega sensor SAR com capacidade de obter imagens de alta resolução espacial. Isso permite observação terrestre para várias aplicações

(<https://www.hisdesat.es/paz/>): controle ambiental e de fronteira, proteção dos recursos naturais, operações militares, verificação de tratados internacionais, vigilância marítima, planejamento urbano, engenharia civil e infraestruturas, avaliação de desastres naturais e emergências. Para tais atividades, o PAZ opera desde 2018. Localiza-se na mesma órbita dos satélites: TerraSAR-X e TanDEM-X. Juntos formam a constelação TerraSAR-X/PAZ.

A obtenção de imagens PAZ de forma gratuita se dá por meio de aprovação de proposta de exploração científica ao Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), o qual é responsável por gerenciar o segmento terrestre do sistema PAZ. O apoio do INTA tem como propósito incentivar a disseminação e a promoção da tecnologia SAR e suas aplicações a entidades nacionais e internacionais dedicadas à pesquisa.

Em vista desse incentivo científico, obteve-se aprovação do projeto (AO-001-039) de autoria do Prof. Dr. Antonio Miguel Ruiz-Armenteros para aquisição de produtos sem custo. Por meio do INTA, adquiriram-se 41 imagens do satélite PAZ<sup>52</sup> de tamanho 105 GB para o período de 21 de outubro de 2019 a 21 de novembro de 2021 (Tabela 21). As cenas tiveram como características: tempo de revisita 33 dias, resolução espacial (*range x azimuth*) 1,76 m x 3,01 m, polarização simples (HH), banda X, órbita ascendente e descendente, largura da faixa imageada 30 km x 50 km, ângulo de incidência 20° a 45°, modo *Stripmap*.

Tabela 21 – Data de aquisição de imagens do satélite PAZ.

PAZ (ascendente)								
Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano
24	Out	2019	16	Ago	2020	7	Mai	2021
26	Nov	2019	18	Set	2020	9	Jun	2021
29	Dez	2019	21	Out	2020	16	Set	2021
31	Jan	2020	23	Nov	2021	19	Out	2021
9	Mai	2020	26	Dez	2021	21	Nov	2021
11	Jun	2020	28	Jan	2021	-	-	-
14	Jul	2020	2	Mar	2021	-	-	-
PAZ (descendente)								
Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano
21	Out	2019	11	Jul	2020	1	Abr	2021
23	Nov	2019	13	Ago	2020	4	Mai	2021
26	Dez	2019	15	Set	2020	6	Jun	2021
28	Jan	2020	18	Out	2020	13	Set	2021
1	Mar	2020	20	Nov	2021	16	Out	2021
3	Abr	2020	23	Dez	2021	18	Nov	2021
6	Mai	2020	25	Jan	2021	-	-	-
8	Jun	2020	27	Fev	2021	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

<sup>52</sup> As cenas PAZ são comercializadas pela hisdesat, em: <https://www.hisdesat.es>. A obtenção envolve imagens de acervo e novos produtos.

### 5.2.6 ERS-1/2 e Envisat

De modo a ampliar o período de investigação, analisaram-se outras missões científicas SAR de disponibilização de dados gratuitos a partir da ESA<sup>53</sup>. Exemplos:

- ERS-1/2: composta por dois satélites a missão operou de 1991 a 2011 – ERS-1 (1991-2000) e ERS-2 (1995-2011). Para a área de estudo (Figura 60) foram imageadas (Tabela 22): 7 imagens em órbita ascendente (5 de 1992 a 1993, e 2 em 1996). Teve como características: nível 1, banda C, polarização simples (VV), largura da cena 100 km, tempo de revisita variado (3, 35, 168) dias, resolução espacial 30 m, sensor SAR; e

Figura 60 – Dados de recobrimento do ERS-1/2.



Fonte: [http://esar-ds.eo.esa.int/socat/SAR\\_IMS\\_1P/search](http://esar-ds.eo.esa.int/socat/SAR_IMS_1P/search).

Tabela 22 – Disponibilidade de imagens dos satélites ERS-1/2.

ERS-1/2								
Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano
23	Nov	1992	21	Jun	1993	30	Mai	1996
8	Mar	1993	30	Ago	1993	-	-	-
12	Abr	1993	25	Abr	1996	-	-	-

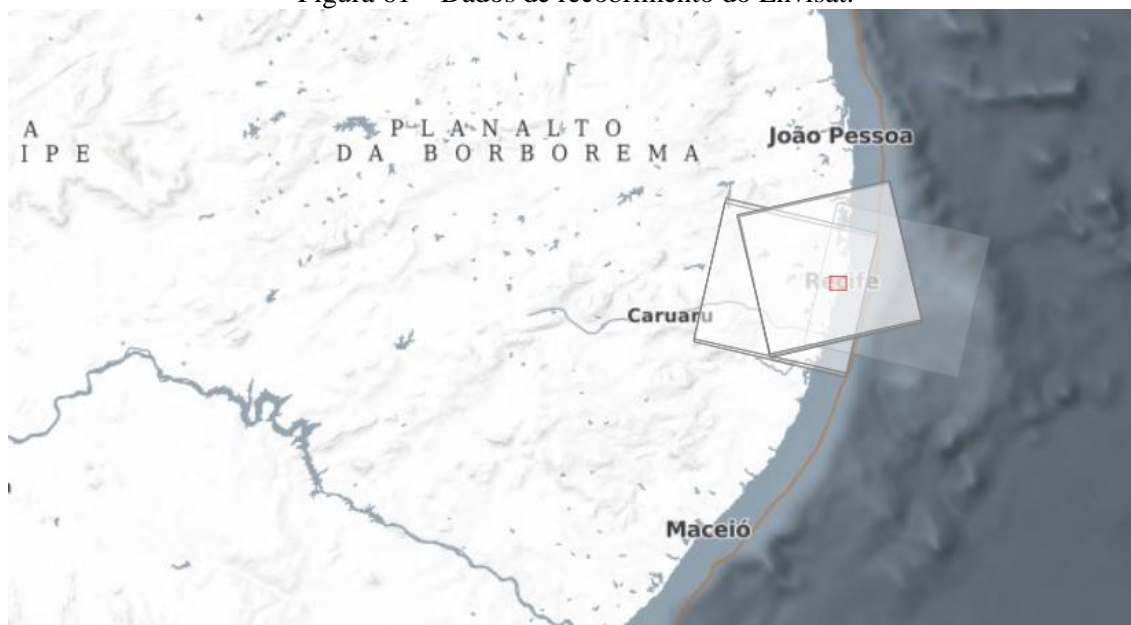
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

- Envisat: a missão operou de 2002 a 2012. Para a área de estudo (Figura 61) foram imageadas (Tabela 23): 12 imagens de órbita ascendente (2005 a 2006) e 13 imagens de órbita descendente (2005 a 2007). Teve como características: banda C,

<sup>53</sup> Imagens ERS-1/2 e Envisat estão disponíveis em: <https://eocat.esa.int>.

tempo de revisita 35 dias, resolução espacial 30 m, sensor ASAR (*Advanced SAR*), polarização dupla (VV/HH), largura da cena 100 km.

Figura 61 – Dados de recobrimento do Envisat.



Fonte: [http://esar-ds.eo.esa.int/socat/ASA\\_IMS\\_1P/search](http://esar-ds.eo.esa.int/socat/ASA_IMS_1P/search).

Tabela 23 – Disponibilidade de imagens do satélite Envisat.

Envisat (ascendente)								
Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano
17	Fev	2005	29	Dez	2005	22	Jun	2006
24	Mar	2005	2	Fev	2006	27	Jul	2006
28	Abr	2005	9	Mar	2006	31	Ago	2006
2	Jun	2005	18	Mai	2006	5	Out	2006
Envisat (descendente)								
Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano	Dia	Mês	Ano
23	Mar	2005	17	Mai	2006	29	Dez	2006
27	Abr	2005	21	Jun	2006	21	Fev	2007
23	Nov	2005	11	Ago	2006	28	Mar	2007
17	Fev	2006	15	Set	2006	-	-	-
5	Mar	2006	8	Nov	2006	-	-	-

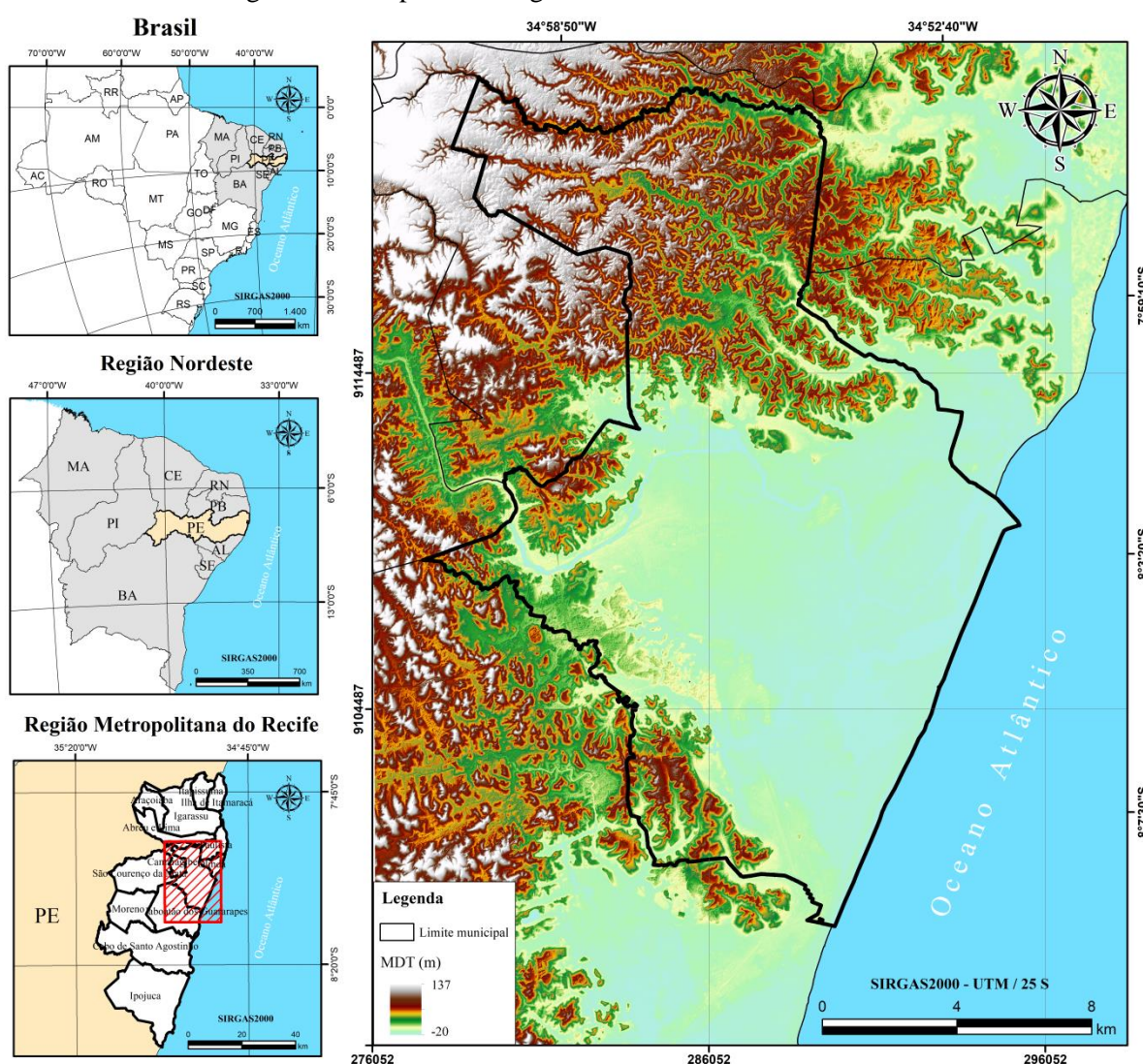
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

De acordo com as Tabelas (22 e 23), para o período de 1992 a 2010, o baixo número de cenas de satélites relativo à área de estudo inviabilizou fazer um estudo multitemporal com aplicação do método PSInSAR. Estudos da literatura (HANSSEN, 20001; FÁROVÁ *et al.*, 2019) indicaram que o algoritmo requer pelo menos de 15 a 20 imagens para a obtenção de resultados de melhor precisão.

### 5.2.7 MDT de Alta Resolução Espacial

Usaram-se produtos do programa Pernambuco Tridimensional (PE3D<sup>54</sup>), adquiridos por meio da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC, 2015a). A obtenção do MDT de alta resolução espacial resultou de varredura a laser. Teve como características: erro máximo altimétrico melhor que 25 cm, resolução espacial 1 m, coordenadas no referencial SIRGAS2000 e projeção UTM (Universal Transversa de Mercator). Para a área de estudo (Figura 62), utilizou-se mosaico de 73 quadrículas (Tabela 24).

Figura 62 – Mapa de abrangência do MDT da área de estudo.



Fonte: dados geoespaciais (APAC, 2015a; IBGE, 2018a, 2018b).

<sup>54</sup> O programa se insere no contexto do Projeto de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco (PSHPE). Visa dar suporte à Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE) no que tange ao gerenciamento do setor hídrico e desenvolvimento institucional. O PE3D resulta de recobrimento aerofotogramétrico digital e de perfilamento a laser de todo o Estado de Pernambuco (98.146 km<sup>2</sup>). Informações em: <http://www.pe3d.pe.gov.br>.

Tabela 24 – Quadrículas utilizadas do PE3D.

<b>Nomenclatura</b>		
SC-25-V-A-III-1-NO-C-II	SC-25-V-A-III-1-NO-C-II	SB-25-Y-C-VI-3-SO-F-III
SC-25-V-A-III-1-NO-C-I	SC-25-V-A-III-1-NO-C-I	SB-25-Y-C-VI-3-SO-F-II
SC-25-V-A-III-1-NO-B-IV	SC-25-V-A-III-1-NO-B-IV	SB-25-Y-C-VI-3-SO-F-I
SC-25-V-A-III-1-NO-B-III	SC-25-V-A-III-1-NO-B-III	SB-25-Y-C-VI-3-SO-E-IV
SC-25-V-A-III-1-NO-B-II	SC-25-V-A-III-1-NO-B-II	SB-25-Y-C-VI-3-SO-E-III
SC-25-V-A-III-1-NO-B-I	SC-25-V-A-III-1-NO-B-I	SB-25-Y-C-VI-3-SO-E-II
SC-25-V-A-III-1-NO-A-IV	SC-25-V-A-III-1-NO-A-IV	SB-25-Y-C-VI-3-SO-E-I
SC-25-V-A-III-1-NO-A-III	SC-25-V-A-III-1-NO-A-III	SB-25-Y-C-VI-3-SO-D-IV
SC-25-V-A-III-1-NO-A-II	SC-25-V-A-III-1-NO-A-II	SB-25-Y-C-VI-3-SO-D-III
SC-25-V-A-III-1-NO-A-I	SC-25-V-A-III-1-NO-A-I	SB-25-Y-C-VI-3-SO-D-II
SC-25-V-A-III-1-NE-E-I	SC-25-V-A-III-1-NE-E-I	SB-25-Y-C-VI-3-SO-D-I
SC-25-V-A-III-1-NE-C-III	SC-25-V-A-III-1-NE-C-III	SB-25-Y-C-VI-3-SO-C-IV
SC-25-V-A-III-1-NE-C-I	SC-25-V-A-III-1-NE-C-I	SB-25-Y-C-VI-3-SO-C-III
SC-25-V-A-III-1-NE-A-III	SC-25-V-A-III-1-NE-A-III	SB-25-Y-C-VI-3-SO-C-II
SC-25-V-A-III-1-NE-A-I	SC-25-V-A-III-1-NE-A-I	SB-25-Y-C-VI-3-SO-C-I
SC-25-V-A-II-2-SE-D-II	SC-25-V-A-II-2-SE-D-II	SB-25-Y-C-VI-3-SE-E-III
SC-25-V-A-II-2-SE-B-IV	SC-25-V-A-II-2-SE-B-IV	SB-25-Y-C-VI-3-SE-E-I
SC-25-V-A-II-2-SE-B-II	SC-25-V-A-II-2-SE-B-II	SB-25-Y-C-VI-3-SE-C-III
SC-25-V-A-II-2-NE-F-IV	SC-25-V-A-II-2-NE-F-IV	SB-25-Y-C-VI-3-SE-C-I
SC-25-V-A-II-2-NE-F-II	SC-25-V-A-II-2-NE-F-II	SB-25-Y-C-V-4-SE-F-IV
SC-25-V-A-II-2-NE-D-IV	SC-25-V-A-II-2-NE-D-IV	SB-25-Y-C-V-4-SE-F-II
SC-25-V-A-II-2-NE-D-II	SC-25-V-A-II-2-NE-D-II	SB-25-Y-C-V-4-SE-D-IV
SC-25-V-A-II-2-NE-B-IV	SC-25-V-A-II-2-NE-B-IV	SB-25-Y-C-V-4-SE-D-II
SC-25-V-A-II-2-NE-B-II	SC-25-V-A-II-2-NE-B-II	-
SB-25-Y-C-VI-3-SO-F-IV	SB-25-Y-C-VI-3-SO-F-IV	-

Fonte: APAC (2015a).

A utilização do MDT de resolução espacial de 1 m ocorreu na compatibilização com imagens SAR dos satélites: COSMO-SkyMed (2,6 m x 2,6 m) e PAZ (1,76 m x 3,01 m). A compatibilidade com cenas do Sentinel-1 (5 m x 20 m) se realizou a partir da reamostragem do MDT de resolução espacial de 1 m para 10 m. A alteração visou maior similaridade na resolução espacial de imagens satelitais e MDT. Além do mais, nos dois casos, efetuou-se transformação dos MDT's (1 m e 10 m) de projeção UTM para coordenadas geodésicas elipsoidais SIRGAS2000. A mudança do sistema plano para curvilíneo ficou em conformidade com a exigência do processamento InSAR no SARProz.

### 5.2.8 Efemérides Orbitais

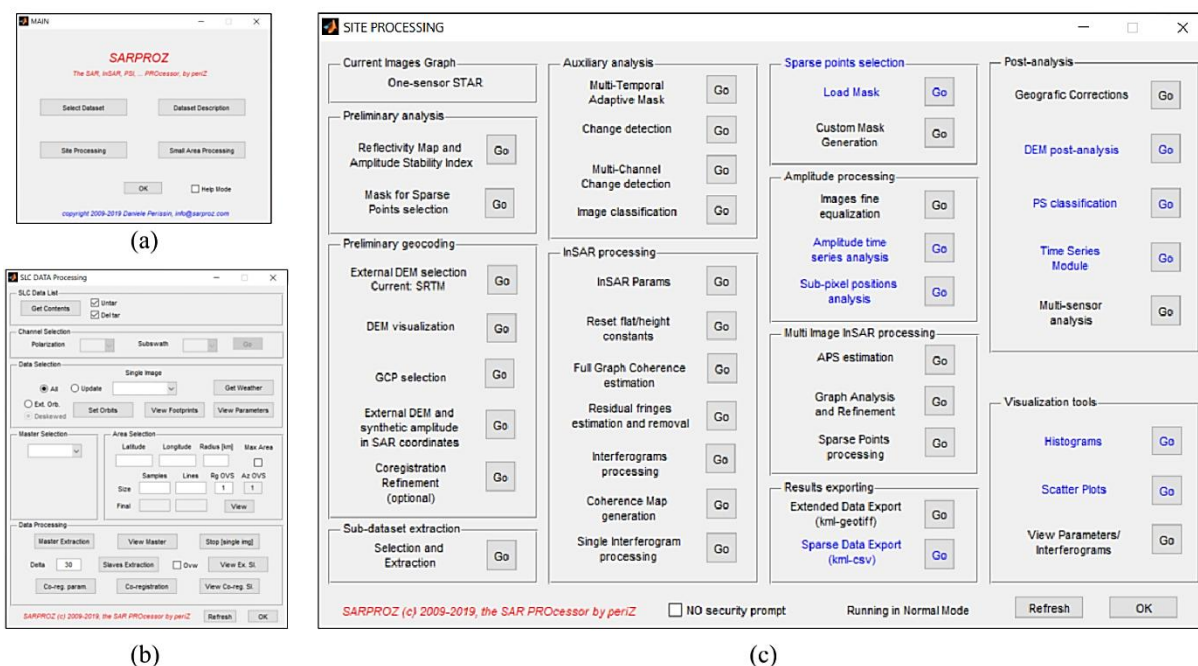
Empregaram-se informações posicionais de órbitas precisas das imagens satelitais: Sentinel-1, disponível após 20 dias do registro<sup>55</sup>; e COSMO-SkyMed e PAZ com dados orbitais precisos inclusos no recebimento de produtos SAR.

<sup>55</sup> Dados da órbita precisa disponíveis em: <http://step.esa.int/auxdata/orbits/Sentinel-1/POEORB/S1A>.

### 5.3 Método de Processamento InSAR

A metodologia empregou a técnica PSInSAR (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 1999, 2000, 2001) por meio do programa SARProz (Figura 63) para processar imagens SAR (SARPROZ, 2019). A utilização ocorreu em processamento multitemporal (MT-PSInSAR) de alvo PS, com modelo de deformação linear no tempo.

Figura 63 – SARProz: (a) interface inicial, (b) importação de dados e (c) processamento InSAR.

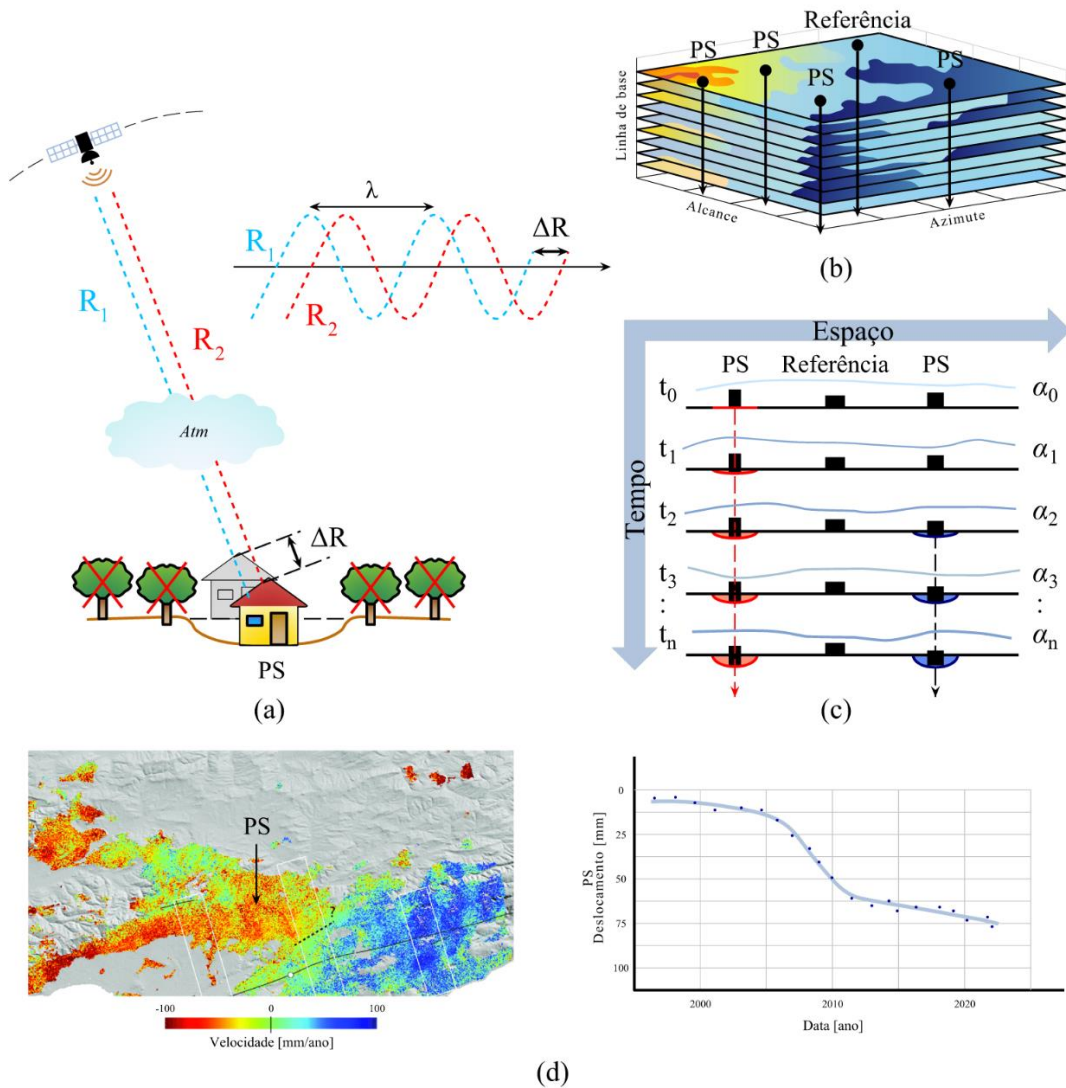


Fonte: SARPROZ (2019).

A escolha pelo método PSInSAR resultou de sua capacidade de processar um grande conjunto de pares de cenas SAR para produzir interferogramas, em que *pixels* de imagens com fortes características de espalhamento e informação de fase estável ao longo de longos períodos de tempo permitiram ser analisados para produzir a evolução temporal em cada alvo PS. E, assim, fornecer um mapa de deformação em nível milimétrico (Figura 64).

A obtenção da deformação decorreu da exploração da fase interferométrica ( $\varphi_{Int}$ ) calculada a partir da diferença de fase entre duas imagens adquiridas em momentos diferentes, quase na mesma posição de satélite (HANSSEN, 2001). A informação do deslocamento derivou da fase interferométrica a qual sofreu influência de vários fatores, como (Equação 12): imprecisão do MDT externo, componente atmosférico, movimento dos PS, ruído de decorrelação (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 1999, 2000, 2001; CROSSETTO *et al.*, 2016; KHORRAMI *et al.*, 2020).

Figura 64 – Aspectos: (a) medição de deslocamento a partir de alvos PS, (b) conjunto de dados interferométrico, (c) relação espaço  $\times$  tempo da deformação, e (d) informação da movimentação.



Fonte: Ferretti (2014).

$$\varphi_{Int} = \varphi_{Des} + \varphi_{Top} + \varphi_{Atm} + \varphi_{Orb} + \varphi_{Ruí} + 2k\pi \quad (12)$$

O primeiro termo  $\varphi_{Des}$  é a componente do deslocamento. Consiste na velocidade de deformação linear ( $v$ ) decorrente do deslocamento dos alvos PS durante o período de aquisição no tempo ( $T$ ), conforme Equação 13, com uso do comprimento de onda ( $\lambda$ ).

$$\varphi_{Des} = \frac{4\pi}{\lambda} Tv \quad (13)$$

O segundo termo  $\varphi_{Top}$  é a componente do erro topográfico residual. Está relacionada ao erro topográfico por causa da imprecisão do MDT, conforme Equação 14. A expressão envolve altura elipsoidal ( $h$ ), ângulo de observação ( $\theta$ ), valor da linha de base normal (perpendicular) do interferograma ( $B_{\perp}$ ) e distância inclinada ( $R$ ).

$$\varphi_{Top} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \cdot \sin\theta} h \quad (14)$$

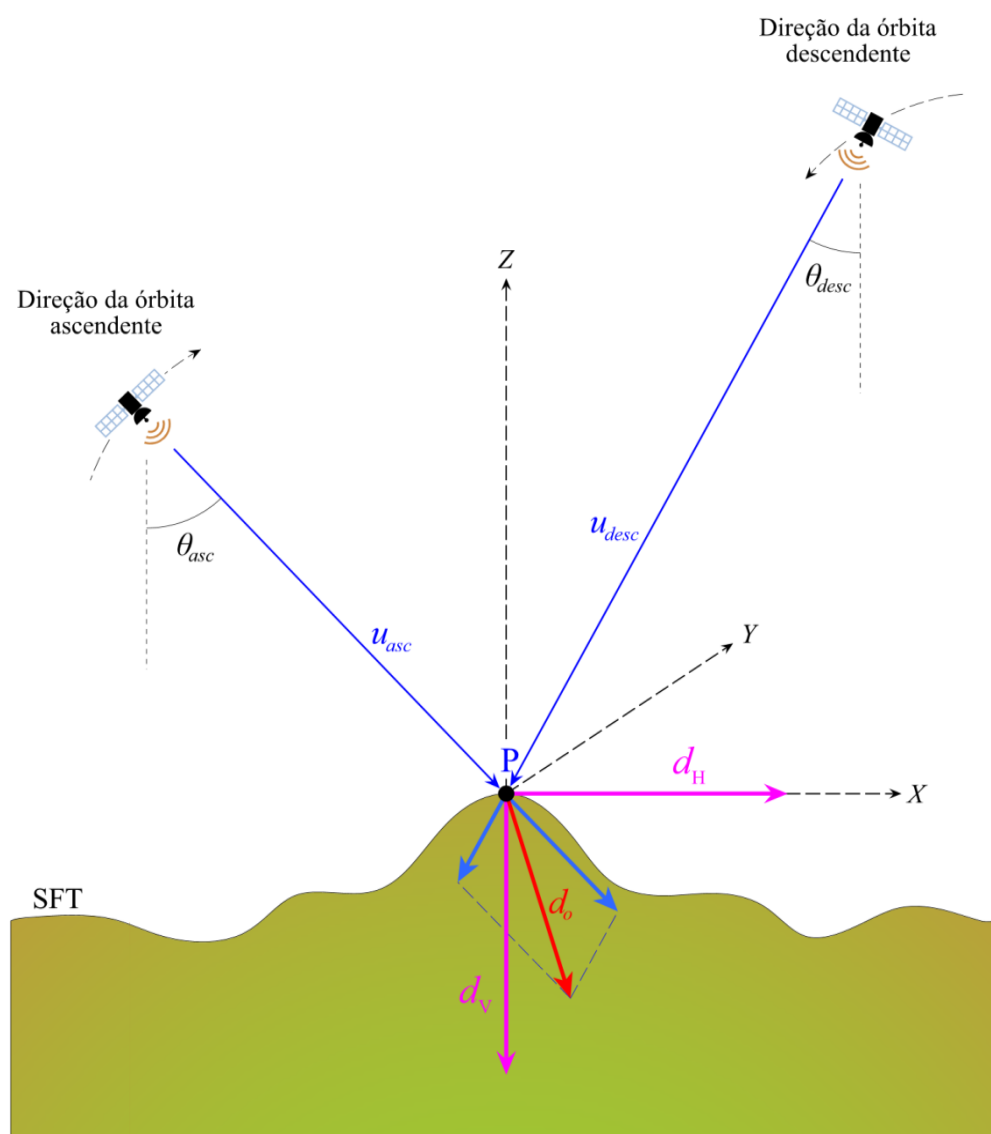
Os demais termos da Equação 12 compreendem:  $\varphi_{Atm}$  é a componente da fase atmosférica na aquisição de cada imagem;  $\varphi_{Orb}$  é a componente da fase de erros orbitais da posição;  $\varphi_{Rui}$  é a componente da fase do ruído da decorrelação (temporal e geométrica); e  $k$  é o valor inteiro chamado de ambiguidade de fase, resultado da natureza da fase interferométrica ( $\varphi_{Int}$ ). A Equação 12 pode ser estendida como (Equação 15):

$$\varphi_{Int} = \frac{4\pi}{\lambda} Tv + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \cdot \sin\theta} h + \varphi_{Atm} + \varphi_{Orb} + \varphi_{Rui} + 2k\pi \quad (15)$$

A interferometria SAR é afetada por limitações importantes de acordo com as componentes da Equação 15. Tais como: imprecisão topográfica em função do MDT externo, o que dificulta distinguir entre topografia residual e deslocamento do terreno; atraso do sinal SAR por diferentes condições atmosféricas, como por exemplo, devido à presença de vapor de água; e imprecisão da fase interferométrica em razão da decorrelação geométrica e/ou temporal. Nesse sentido, a técnica multitemporal com PSI oferece uma série de ferramentas para atenuar as limitações do InSAR, e torna possível processar e analisar séries temporais de deslocamento com precisão milimétrica.

Além da investigação principal do rebaixamento superficial – caracterizado pela subsidência do solo –, a pesquisa analisou também, de forma secundária, a movimentação horizontal (Leste-Oeste) a partir da utilização de imagens SAR (ascendente e descendente) do satélite PAZ. Nessa situação foi possível estimar as componentes horizontal e vertical por meio da combinação adequada de dados interferométricos, adquiridos da mesma área de interesse, mas de diferentes geometrias de aquisição (Figura 65).

Figura 65 – Combinação de dados orbitais (ascendente e descendente) na determinação das componentes horizontal e vertical.



Fonte: adaptado de Pepe e Calò (2017).

De acordo com Ferretti (2014), ao considerar na Figura 65 um sistema de referência cartesiano no qual o eixo X representa a direção Leste-Oeste, o eixo Y a direção Norte-Sul, o eixo Z a direção vertical e os elementos  $(u_x, u_y, u_z)$  vetores unitários associados a cada direção  $(d_x, d_y, d_z)$ , o vetor deslocamento  $(d_o)$  para um ponto P na superfície física da Terra (SFT) resulta na seguinte relação (Equação 16):

$$d_o = d_x u_x + d_y u_y + d_z u_z \quad (16)$$

A projeção da deformação em relação à linha de visão (LOS) do Radar ( $u_{asc}$ ,  $u_{desc}$ ) não possibilita recuperar o vetor de deslocamento tridimensional. Porém, o uso da combinação de dados de direções ascendente e descendente permite a recuperação de dois das três componentes do vetor deslocamento. Nessa situação,  $d_o$  é decomposto em elementos horizontal ( $d_H$ ) e vertical ( $d_V$ ), conforme Equação 17 (PEPE; CALÒ, 2017):

$$\begin{cases} d_{asc} = d_o \cdot u_{asc} = d_H \text{sen}\theta_{asc} + d_V \text{cos}\theta_{asc} \\ d_{desc} = d_o \cdot u_{desc} = -d_H \text{sen}\theta_{desc} + d_V \text{cos}\theta_{desc} \end{cases} \quad (17)$$

A representação do sistema da Equação 17 em matriz resulta em (Equação 18):

$$\begin{bmatrix} d_{asc} \\ d_{desc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_H \\ d_V \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{sen}\theta_{asc} & \text{cos}\theta_{asc} \\ -\text{sen}\theta_{desc} & \text{cos}\theta_{desc} \end{bmatrix} \quad (18)$$

A solução direta se obtém da seguinte forma (Equação 19):

$$\begin{bmatrix} d_H \\ d_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{asc} \\ d_{desc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{sen}\theta_{asc} & \text{cos}\theta_{asc} \\ -\text{sen}\theta_{desc} & \text{cos}\theta_{desc} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{\begin{bmatrix} d_{asc} \text{cos}\theta_{desc} - d_{desc} \text{cos}\theta_{asc} \\ d_{asc} \text{sen}\theta_{desc} + d_{desc} \text{sen}\theta_{asc} \end{bmatrix}}{\text{sen}(\theta_{asc} + \theta_{desc})} \quad (19)$$

A Equação 19 pode ser simplificada ao considerar que os dados SAR ascendente e descendente são adquiridos com o mesmo ângulo de observação ( $\theta$ ). Com isso, o resultado se particulariza na expressão (Equação 20):

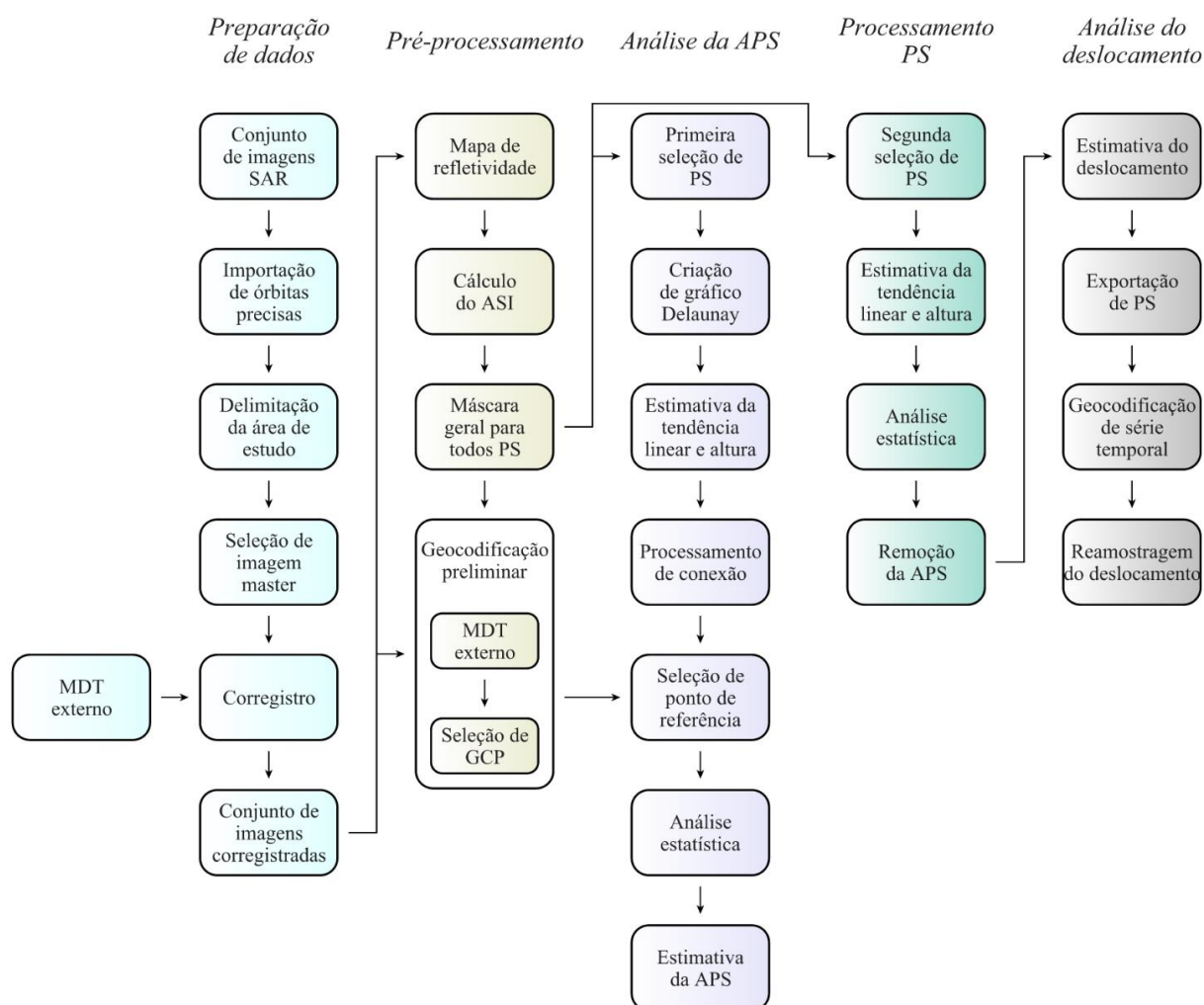
$$\begin{bmatrix} d_H \\ d_V \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} d_{asc} \text{cos}\theta_{desc} - d_{desc} \text{cos}\theta_{asc} \\ d_{asc} \text{sen}\theta_{desc} + d_{desc} \text{sen}\theta_{asc} \end{bmatrix}}{\text{sen}(\theta_{asc} + \theta_{desc})} = \begin{bmatrix} \frac{d_{asc} - d_{desc}}{2 \text{sen}\theta} \\ \frac{d_{asc} + d_{desc}}{2 \text{cos}\theta} \end{bmatrix} \quad (20)$$

A utilização conjunta de dados ascendente e descendente de mesmo satélite para análise da subsidência do solo tem como principal vantagem obtenção do vetor deslocamento real da superfície. Desta forma, a sua decomposição nos eixos Z e X possibilita maior assertividade na detecção do rebaixamento e na movimentação plana, respectivamente.

A partir da plataforma SARProz, o processamento PSInSAR se desenvolveu em cinco etapas (Figura 66): preparação de dados, pré-processamento, análise da fase atmosférica (APS), processamento PS e análise do deslocamento. O processo levou em consideração as características das imagens SAR utilizadas neste estudo. Isso permitiu obter e analisar seis resultados da instabilidade superficial – 4 movimentações na linha de visão (LOS) do Radar mais 2 deslocamentos (vertical e horizontal) – decorrentes dos aspectos orbitais e polarizações presentes nas cenas:

- Sentinel-1: órbita descendente e polarização simples (VV);
- COSMO-SkyMed: órbita ascendente e polarização simples (HH); e
- PAZ: órbitas ascendente e descendente e polarização simples (HH).

Figura 66 – Fluxograma de processamento InSAR no SARProz.



### 5.3.1 Preparação de Dados

Originou-se com a entrada de produtos SAR de nível de processamento SLC (*Single-Look Complex*) na plataforma SARProz. De forma sequenciada, empregou-se o seguinte quantitativo de imagens de satélites: 135 cenas do Sentinel-1 (órbita descendente e polarização simples VV); 100 cenas do COSMO-SkyMed (órbita ascendente e polarização simples HH); 19 cenas do PAZ (órbita ascendente e polarização simples HH) e 22 cenas do PAZ (órbita descendente e polarização simples HH). Em seguida, utilizaram-se para cada imagem SAR, efemérides orbitais precisas (observáveis GNSS pós-processadas).

De modo a trabalhar em uma área menor e com redução de tempo de processamento, optou-se por delimitar a área de estudo em um raio  $< 7$  km com origem em coordenadas geodésicas SIRGAS2000:  $8^{\circ}4'52''S$  e  $34^{\circ}55'27''O$  para imagens descendentes; e  $8^{\circ}5'8''S$  e  $34^{\circ}54'38''O$  para imagens ascendentes. Ao passo seguinte, por meio do conjunto de dados SAR, houve a seleção da imagem *master* de forma automática para evitar o uso de cena de dia chuvoso. Para tal, o SARProz utilizou a base de dados meteorológica do domínio do DarkSky (<https://darksky.net/>) que contém informações da cidade do Recife. Isso possibilitou a construção de pares interferométricos mais confiáveis referentes à imagem *master* aos demais registros *slaves*. Em geral, o quantitativo de pares InSAR resultou em: 134 Sentinel-1 (descendente, VV); 99 COSMO-SkyMed (ascendente, HH); 18 PAZ (ascendente, HH) e 21 PAZ (descendente, HH)

A partir do conjunto de pares interferométricos com suas efemérides orbitais e MDT externo (PE3D), realizou-se o corregristo por meio da combinação da posição de *pixels* da cena *master* com as imagens *slaves* na obtenção de imagens secundárias de igual geometria da principal. Após o corregristo, a geração de interferogramas ocorreu no cálculo de produtos complexos conjugados das imagens corregristadas *pixel a pixel* seguida de aplicação de MDT externo para remover a componente de fase topográfica. Os interferogramas diferenciais gerados representaram diferença de fase entre as imagens *master* e *slaves*.

### 5.3.2 Pré-Processamento

Consistiu na análise preliminar do processamento InSAR a partir da construção do mapa de refletividade oriundo da média temporal de todas as imagens SAR, o qual resultou no primeiro produto significativo a ser avaliado (CAVUR *et al.* 2021). Por meio desse resultado se determinou o índice de estabilidade de amplitude (*ASI: Amplitude Stability Index*), responsável por fornecer uma análise estatística da série de amplitude com base na Equação 21 (FERRETTI; PRATI; ROCCA, 2001):

$$ASI = 1 - D_A = 1 - \left( \frac{\sigma_A}{m_A} \right) \quad (21)$$

Em que:  $D_A$  representa a dispersão da amplitude;  $\sigma_A$  é o desvio padrão da amplitude no tempo; e  $m_A$  é o desvio médio da amplitude no tempo. Segundo Ferretti, Prati e Rocca (2001), o índice de dispersão  $D_A$  é uma medida de estabilidade de fase, pelo menos para altos valores da relação sinal-ruído (SNR: *Signal-to-Noise Ratio*). Os candidatos a PS podem ser escolhidos ao calcular o índice de dispersão dos valores de amplitude em relação a cada *pixel* da área de interesse. Os autores recomendam considerar apenas alvos que exibem valores  $D_A$  sob um determinado limite, de forma típica:  $D_A < 0,25$ .

A partir desse critério, utilizou-se valor de limiar 0,75 para o *ASI*. Como esperado, isso ocasionou em um resultado final de PS espaçados, ou seja, com menos pontos. Ao passo seguinte, após selecionar todos os pontos dispersos, obteve-se um mapa geocodificado com utilização de MDT e de pontos de controle do terreno (GCP: *Ground Control Point*). A adoção de MDT externo se deu na remoção da componente topográfica, enquanto os GCP foram usados como referência na análise de PS. Essa geocodificação preliminar se aplicou também na seleção do ponto de referência.

### 5.3.3 Análise da APS

A estimativa da fase atmosférica (APS: *Atmospheric Phase Screen*, ou componente da fase atmosférica) se iniciou a partir da primeira seleção de PS, com base no índice da estabilidade de amplitude:  $ASI \geq 0,75$ . Os PS corresponderam às áreas urbanas, como por exemplo, construções existentes que se mantiveram estáveis ao longo do tempo tanto na radiométrica como na fase interferométrica. Em seguida, realizou-se uma verificação espacial para garantir que os PS apresentavam distribuição normal. Na sequência, criou-se uma rede de referência para conectar PS por triangulação de Delaunay.

Após a criação do gráfico Delaunay, estimaram-se os parâmetros de tendência linear e de altura por meio do processamento de conexão com PS. Na continuação, verificou-se a coerência das conexões. Para tanto, analisaram-se informações do histograma a partir do gráfico da coerência das conexões. O histograma ofereceu uma visão estatística da coerência dos PS, útil na identificação de áreas isoladas – caracterizadas por baixa coerência com os demais pontos devido à presença de água. A solução ideal consistiu no ajuste de parâmetros

(tendência linear e altura) e do ajuste de pesos não lineares na conexão da coerência para a obtenção de um maior número de PS com alto valor de coerência.

Na sequência, em local estável em termos de deformação, determinou-se um ponto de referência o qual foi responsável por medir o movimento relativo InSAR. Esse processo consistiu de forma automática e manual na identificação de um ponto de referência com alta coerência temporal, ou seja, com maior probabilidade de ser estável. A partir disso a verificação da seleção de PS estáveis se deu pela análise estatística dos histogramas (velocidade integrada e altura residual integrada), os quais se acumularam no eixo zero e indicaram estabilidade – aspecto adequado para análise posterior.

A partir da obtenção estimada desses parâmetros de forma satisfatória, desenvolveu-se a estimativa do ruído atmosférico. Isso ocorreu através da opção padrão de resíduos invertidos, a qual se desenvolveu por meio de processo iterativo para a solução com resíduos relativos. Em seguida, avaliou-se a qualidade da estimativa da APS mediante análise da coerência temporal referentes à imagem *master* e os registros *slaves* após a fase atmosférica estimada.

#### 5.3.4 Processamento PS

O cálculo da série temporal se iniciou por meio da segunda seleção de PS com base no índice da estabilidade de amplitude. Para tanto, adotou-se valor  $ASI \geq 0,60$ , ou seja, menos rigoroso que a primeira seleção para obter uma coleção de PS mais densificada. Na sequência, empregaram-se os mesmos parâmetros (tendência linear e altura), mesmo ponto de referência e mesma estimativa de ruído atmosférico no conjunto de pontos selecionados com opção de resíduos invertidos – semelhantes à etapa de análise da APS.

Após a configuração dessas informações, realizou-se o processamento de pontos espaçados para estimar os parâmetros e, desta forma, remover a contribuição atmosférica (componente da APS). Em seguida, de posse de tais ajustes, verificou-se o histograma de coerência temporal dos pontos após estimativa dos parâmetros e remoção da APS. Isso permitiu analisar a estabilidade do ponto de referência empregado como referência para: a velocidade estimada, o deslocamento acumulado, a altura estimada e a altura residual. Por fim, examinou-se a fase residual (ao remover APS e estimar parâmetros) e a coerência dos pontos utilizados dos resultados satisfatórios.

### 5.3.5 Análise do Deslocamento

A última etapa se deu pela análise multitemporal PSInSAR. Permitiu detectar a movimentação da superfície topográfica de acordo com a variação da fase de cada *pixel* ao longo do tempo. O procedimento se originou a partir da seleção de PS com base no índice de estabilidade de amplitude – para o qual se utilizou valor  $ASI \geq 0,60$  para a obtenção de um conjunto de pontos da rede de conexão voltada à estimativa do deslocamento. Esse critério na escolha dos PS possibilitou analisar o histograma da coerência temporal e identificar a quantidade de elementos envolvidos. Em seguida, o passo posterior ocorreu na exportação de PS para o processo de geocodificação da série temporal.

A geocodificação se iniciou a partir da utilização do conjunto de pontos de série temporal definido no momento anterior. O procedimento consistiu na estimativa da taxa de deformação de PS selecionados para a geração de mapas de rebaixamento. Cada PS foi associado ao valor da velocidade linear anual (mm/ano), estimada durante o período analisado e o deslocamento acumulado relativo à data de aquisição SAR. Para tanto, considerou-se o deslocamento acumulado = velocidade  $\times$  tempo. Na sequência, houve a exportação dos resultados de deslocamento por meio de pontos de medição e de pontos reamostrados, ambos, em formatos de arquivo GeoTIFF (.tif) e Google Earth (.kml).

A fase final do processamento ocorreu na construção de mapas de deformação elaborado a partir de pontos PS exportados. Ou seja, da área representada pela série temporal de interferogramas processados. Para isso, usou-se a lista de pontos – obtida do procedimento anterior – em programas de geoprocessamento do QGIS e de visualização da Terra do Google Earth Pro na construção de mapas de deformação. A partir dessas ferramentas, elaboraram-se mapas de velocidade e de deslocamento acumulado – ambos relativos à subsidência do solo da cidade do Recife.

## 5.4 Validação dos Resultados

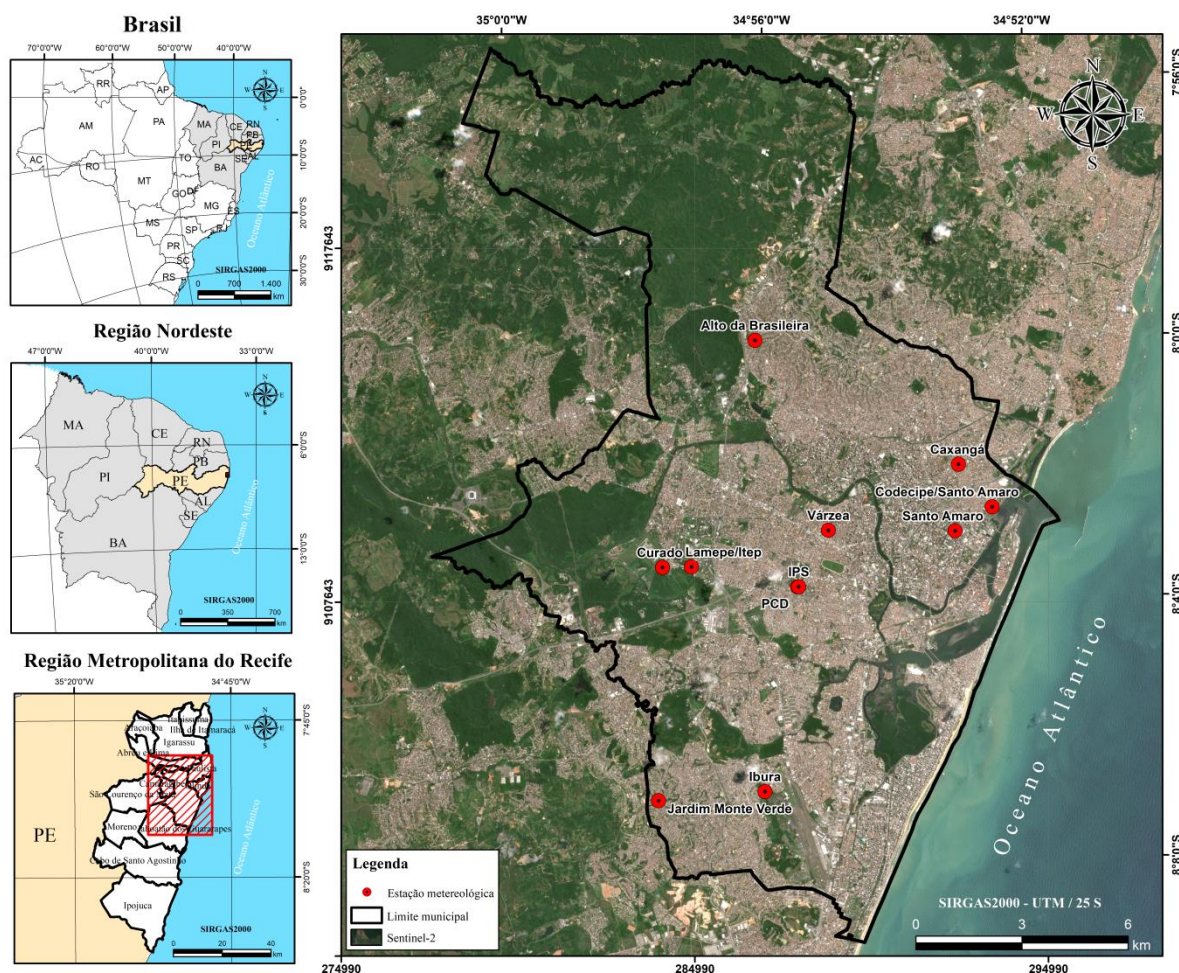
A interpretação de áreas de rebaixamento superficial do Recife pela técnica PSInSAR se realizou com análise de informações derivadas de: dados de medição meteorológicas; características hidrogeológicas; desenvolvimento da urbanização; e levantamento geodésico.

### 5.4.1 Informações Meteorológicas

Utilizaram-se dados de medição mensal de dez estações de precipitação adquiridas da APAC (2021) e dados de medição diária de uma estação de precipitação e temperatura obtida do INMET (2021), para o período de 1960 a 2021 (Figura 67, Tabela 25). A análise das

condições climáticas nesse intervalo ocorreu pela média dos dados registrados nas onze estações meteorológicas. Em especial, na investigação da temperatura e da precipitação para o período de 2011 a 2021 abrangido por imagens SAR.

Figura 67 – Mapa de localização das estações meteorológicas.



Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019; APAC, 2021).

Tabela 25 – Estações meteorológicas com dados de Precipitação (P) e Temperatura (T).

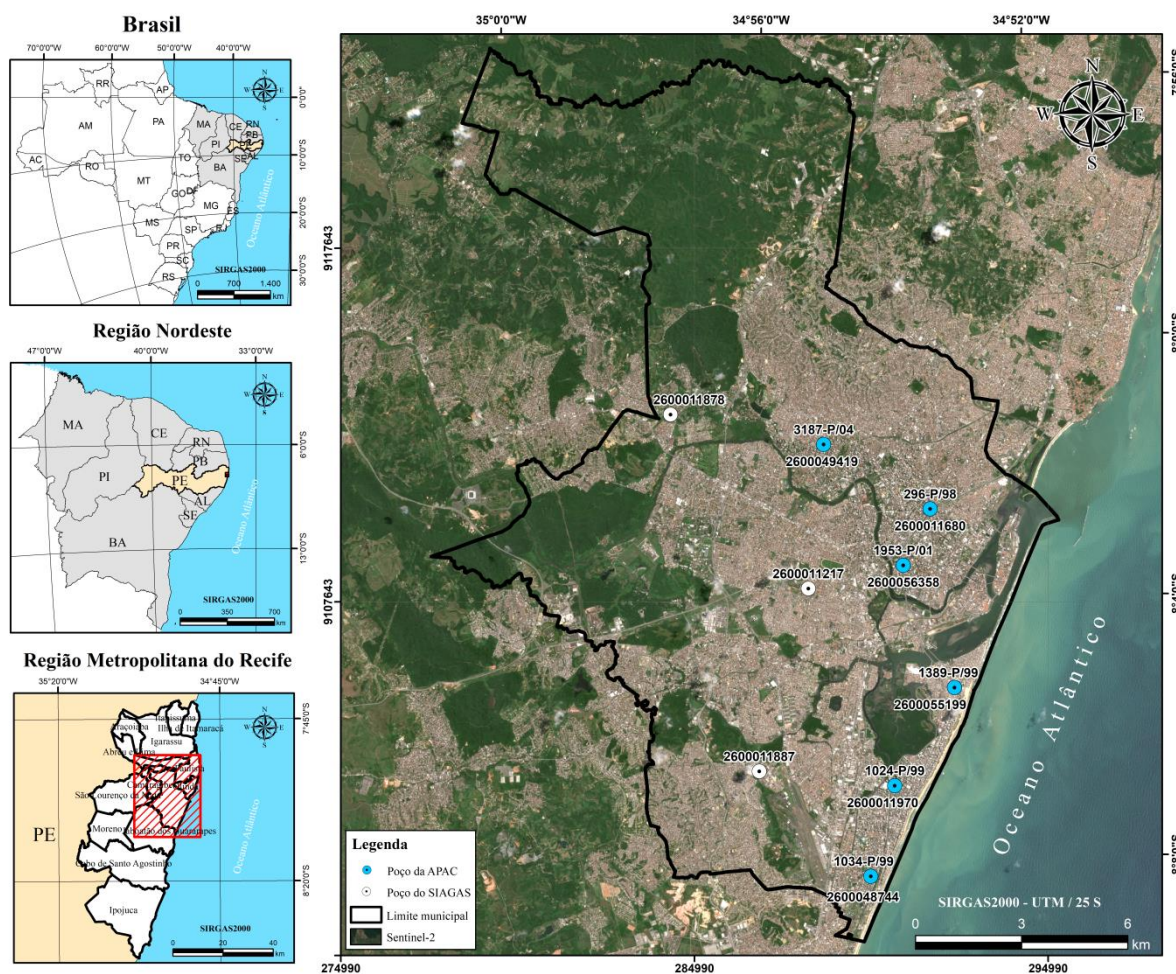
Código	Órgão	Posto	Período	Dados
82900	INMET	Curado	1961-2021	P-T
307		Caxangá	1960-1970	
30		Várzea	1967-1985 e 1993-2021	
381		Ibura	1968-1974	
196		Codecipe/Santo Amaro	1994-2005 e 2014-2021	
265	APAC	Alto da Brasileira	1996-2021	P
263		IPA	1996-2002	
264		Jardim Monte Verde	1996-2001	
480		PCD	1997-2013	
344		Lamepe/Itep	2001-2002 e 2006-2013	
378		Santo Amaro	2002-2013	

Fonte: INMET (2021); APAC (2021).

#### 5.4.2 Monitoramento Hidrológico e Dados Litológicos

Usaram-se dados do nível das águas subterrâneas da APAC (PERNAMBUCO, 2017), instituição estadual responsável pelo monitoramento de mananciais subterrâneos da planície recifense. Por meio desse órgão, utilizaram-se informações de níveis piezométricos de seis poços de monitoramento (Figura 68) e de três períodos de curvas isopiezométricas para os aquíferos profundos (Cabo e Beberibe) de 1998 a 2000, de 2007 a 2009 e de 2013 a 2015.

Figura 68 – Mapa de localização de poços monitorados.



Fonte: Pernambuco (2017); dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

Empregaram-se também nove dados litológicos (Figura 68; Tabela 26) por meio da plataforma do SIAGAS<sup>56</sup>, pertencente ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2021). A espessura das camadas compressíveis do tipo argila e silte localizadas dentro dos sedimentos aluviais da planície recifense, na maior parte dos casos, influenciaram o desenvolvimento da subsidência do solo decorrente da exploração de água subterrânea.

<sup>56</sup> Sistema de Informações de Águas Subterrâneas.

Tabela 26 – Monitoramento hidrológico (APAC) e dados litológicos (SIAGAS).

APAC	SIAGAS	Distância (m)	Profundidade (m)	Aquífero	Bairro
3187-P/04	2600049419	214	122		Casa Amarela
296-P/98	2600011680	104	98	Beberibe	Espinheiro
1953-P/01	2600056358	169	154		Boa Vista
1389-P/99	2600055199	280	162		Pina
1024-P/99	2600011970	209	144	Cabo	Boa Viagem
1034-P/99	2600048744	62	134		
-	2600011878	-	45	-	Sítio dos Pintos
-	2600011217	-	56	-	Bongi
-	2600011887	-	46	-	Ibura

Fonte: Pernambuco (2017); CPRM (2021).

#### 5.4.3 Registro da Evolução Urbana

Empregaram-se documentos cartográficos com informações do crescimento urbano do Recife, desde a sua formação no século XVII à época atual (Tabela 27). Nessa passagem temporal, analisaram-se as transformações ocorridas na cidade relativas ao uso e ocupação do solo ao longo dos últimos 400 anos. Em particular, na investigação dos reflexos das mudanças longínquas e recentes para o intervalo de 2011 a 2021 compreendido por dados SAR.

Tabela 27 – Materiais cartográficos na identificação da expansão urbana.

Produto	Escala/resolução	Ano	Fonte
Mapa da Ilha de Antonio Vaz	-	1631	
	-	1644	Reis Filho (2001)
Mapa do Recife e cidade Mauricéia	-	1771	
Planta da cidade do Recife e seus arredores	1/100.000	1870	
Planta da cidade do Recife	1/10.000	1906	Menezes (1988)
	-	1932	Barreto (1994)
Mapa do Recife	1/20.000	1951	Menezes (1988)
Ortofoto do Recife	1/10.000	1974	CONDEPE (1974)
Cartas topográficas	1/25.000	1985	SUDENE (1984)
	9 cm	2007	PCR (2007)
Ortofoto do Recife	8 cm	2013	PCR (2013a)
	50 cm	2015	APAC (2015b)
Dados de lotes	1/1.000	2020	PCR (2020a)
Dados de logradouro	1/1.000	2020	PCR (2020b)

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 27, os materiais cartográficos empregados na identificação da expansão urbana resultaram de atividades de descrição de campo, técnicas de medição terrestre e levantamento aerofotogramétrico. Entre os produtos gerados, dados de lotes e de logradouro se realizaram de forma sistemática na atualização da dinâmica urbana da cidade.

Utilizou-se também imagem multiespectral do satélite Sentinel-2/MSI (*Multi-Spectral Instrument*). O uso procedeu com técnica de composição de imagem em cor natural para o período de 1 de janeiro a 7 de maio de 2021. O processo ocorreu na plataforma do Google

Earth Engine (GEE, <https://code.earthengine.google.com>) e consistiu na seleção de *pixels* sem nuvens em cenas de correção atmosférica da reflectância da superfície (Tabela 28).

Tabela 28 – Características das bandas utilizadas do Sentinel-2.

Satélite	Bandas	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolução (m)	Nível
Sentinel-2	B2 (azul)	0.496 (S2A) / 0.492 (S2B)	10	L2A
	B3 (verde)	0.560 (S2A) / 0.559 (S2B)		
	B4 (vermelho)	0.664 (S2A) / 0.665 (S2B)		

Fonte: GEE (2021).

#### 5.4.4 Levantamento Geodésico

Empregaram-se dados do registro da subsidência do solo do Recife por meio de dois trabalhos: Luna *et al.* (2017) e Bedini (2020). O primeiro utilizou nivelamento geométrico de precisão no monitoramento de altitudes. O segundo usou tecnologia PSInSAR com imagens Sentinel-1 na detecção de deformação. Além desses estudos, empregou-se também estação de monitoramento contínuo por GNSS (IBGE, 2022a) na análise de áreas de rebaixamento.

### 5.5 Considerações Finais

O processamento interferométrico possibilita relacionar coordenadas de pontos de medição em imagens SAR com sua real posição na superfície da Terra – útil para detectar e dimensionar deslocamentos ocasionados por ações naturais e/ou antrópicas. Em tais situações, a aplicação demanda entendimento de conceitos e técnicas InSAR. Como também, adequada familiarização com programas computacionais. Ou seja, referente ao manuseio apropriado na importação de materiais, na execução de rotinas e na obtenção de resultados consistentes. Em geral, as particularidades na condução desses processos remetem à utilização de *software* específico no âmbito do processamento InSAR – relevante na determinação de pequenas deformações, às vezes, de magnitude imperceptível pela visão humana.

Em vista desse aspecto, a pesquisa usa o aplicativo científico SARProz desenvolvido pelo Dr. Daniele Perissin. Por mais de uma década, pesquisadores em todo o mundo empregam a ferramenta na detecção de diversos fenômenos relacionados à deformação superficial-estrutural. Inclusive com inúmeras aplicações em subsidência do solo devido à exploração de água subterrânea. Fato este que implica a utilização da ferramenta neste estudo. O referido programa está presente em todas as etapas alusivas ao processamento PSInSAR. É responsável por especificidades referentes à preparação de dados, à filtragem, à geração de interferogramas, à escolha de candidatos PS, à estimativa e remoção das componentes topográfica e atmosférica, à análise de série temporal e à exportação de resultados.

O desenvolvimento adequado das características do processamento PSInSAR é essencial para o êxito na determinação precisa da movimentação do relevo, com início na fase de preparação de dados. Isto é, na realização de atividades relativas à leitura de imagens SAR, à delimitação da área de interesse, à obtenção de dados meteorológico, à conversão de produtos, ao processo de órbitas precisas e ao corregristo. No passo seguinte, efetuam-se cálculos de interferogramas referentes às operações de reamostragem de imagens *slave*. Em seguida, há a remoção do efeito topográfico pela utilização de MDT. Na sequência, tem-se a verificação de pontos candidatos a PS – empregados para estimar e remover a componente atmosférica. Tais depurações asseguram melhora no processo interferométrico.

Após a eliminação de componentes e de efeitos relativos, sobretudo, aos ruídos topográficos e atmosféricos que afetam a qualidade do conjunto de interferogramas, inicia-se a etapa final do processamento interferométrico. Para isso, utiliza-se uma série temporal de interferogramas obtida de pares de imagens SAR referente à imagem principal estabelecida (*master*) com as demais imagens secundárias (*slaves*). Assim, baseado na técnica PSInSAR, realiza-se o processamento estatístico de análise da fase interferométrica ao longo do período temporal de dados SAR o qual tem por objetivo obter reflexão de pontos de medição PS. O conjunto desses elementos possibilita determinar mapas de deformação – fundamental na detecção da movimentação superficial da área de estudo.

A obtenção satisfatória de elementos PS referente à deformação permite identificar *pixels* com características estatísticas de fase interferométrica estável, com estabilidade suficiente para ser um refletor natural permanente. Isto é, equiparável em importância a outros métodos de observação de deslocamento como técnicas terrestres de mensuração. Porém, com o benefício de detectar movimentações do solo para extensas áreas de investigação por meio de ampla densidade de pontos de medição, alta frequência temporal e sem a necessidade de instalar equipamentos em campo.

No âmbito geral, a cadeia metodológica do processamento PSInSAR resulta na seleção coerente de alvos PS. A exportação desses dados para formatos compatíveis com programas de GIS e de visualizador da Terra oportuniza relacionar sua informação posicional com o ambiente do mundo real. Isso potencializa diversas funcionalidades operativas referentes à construção de produtos geoespaciais, como na elaboração de mapas referentes à velocidade e à deformação acumulada – vitais para fins de simulações e tomadas de decisão no contexto da subsidência do solo do Recife. Em especial na análise assertiva da distribuição geográfica de áreas rebaixadas pela exploração hídrica subterrânea, conforme resultados a seguir.

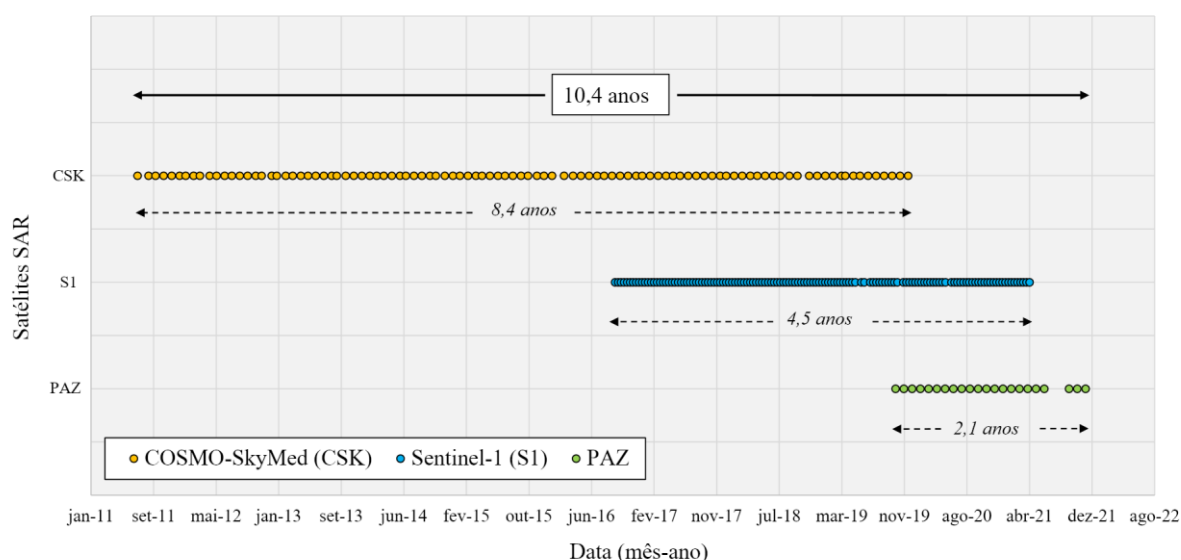
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo apresenta os resultados da aplicação da interferometria de Radar por satélite do Recife. Ao longo de décadas se verifica diminuição expressiva do nível de água de sistemas aquíferos profundos em várias partes da cidade, fruto de intensa subtração dos recursos hídricos subterrâneos com implicações na estabilidade da superfície terrestre. Abordam-se os resultados da técnica PSInSAR com dados SAR dos satélites Sentinel-1, COSMO-SkyMed e PAZ de observação da planície recifense. A investigação resulta da análise de série temporal de mais de 10 anos de monitoramento oriunda de observáveis PS coerentes, com base no índice de amplitude estável. Isso assegura maior confiabilidade à detecção da subsidência do solo do Recife.

### 6.1 Dados Satelitais SAR da Área de Estudo

A obtenção de imagens SAR abrangeu um intervalo temporal total de 10,4 anos (6/7/2011 a 21/11/2021) de monitoramento interferométrico SAR (Figura 69). Isso envolveu períodos de: 8,4 anos (6/7/2011 a 10/12/2019) por COSMO-SkyMed; 4,5 anos (25/9/2016 a 8/4/2021) por Sentinel-1; e 2,1 anos (21/10/2019 a 21/11/2021) por PAZ.

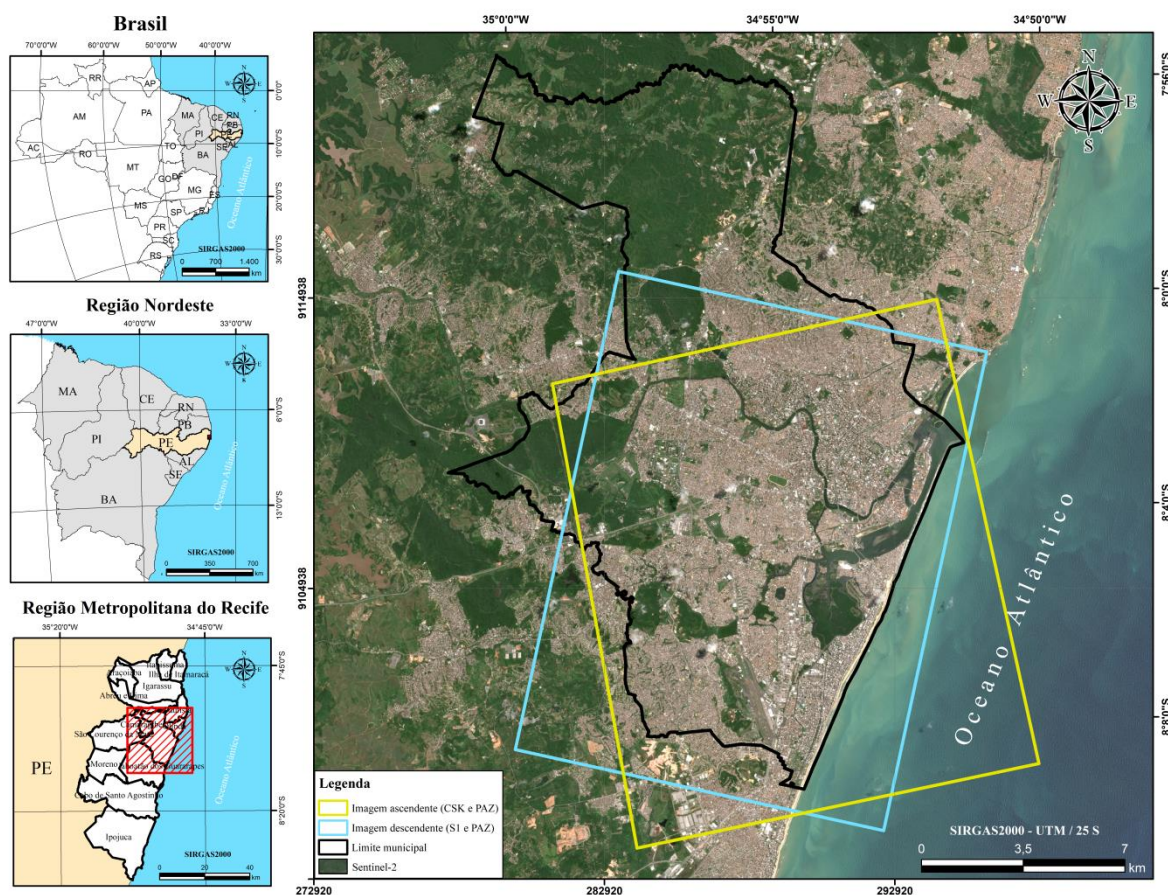
Figura 69 – Abrangência temporal de produtos SAR.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 69, o tempo médio de revisita foi de: 31,1 dias, com variação máxima de 48 dias e mínima de 16 dias, pelo COSMO-SkyMed; 12,2 dias, com variação máxima de 24 dias e mínima de 12 dias, pelo Sentinel-1; 42,2 dias pelo PAZ ascendente e 36,1 dias pelo PAZ descendente, ambos com variação máxima de 99 dias e mínima de 33 dias. A cobertura da área de estudo desses dados variou em função da direção orbital (Figura 70).

Figura 70 – Mapa de área de cobertura de imagens SAR.



Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b, USGS, 2019).

De acordo com a Figura 70, a utilização do método PSInSAR se desenvolveu com imagens reduzidas (Tabela 29) para diminuir o tempo operacional e, com isso, aumentar a capacidade de processamento. Os resultados dessa aplicação e a representação geral do monitoramento foram descritos na sequência.

Tabela 29 – Delimitação de imagens SAR.

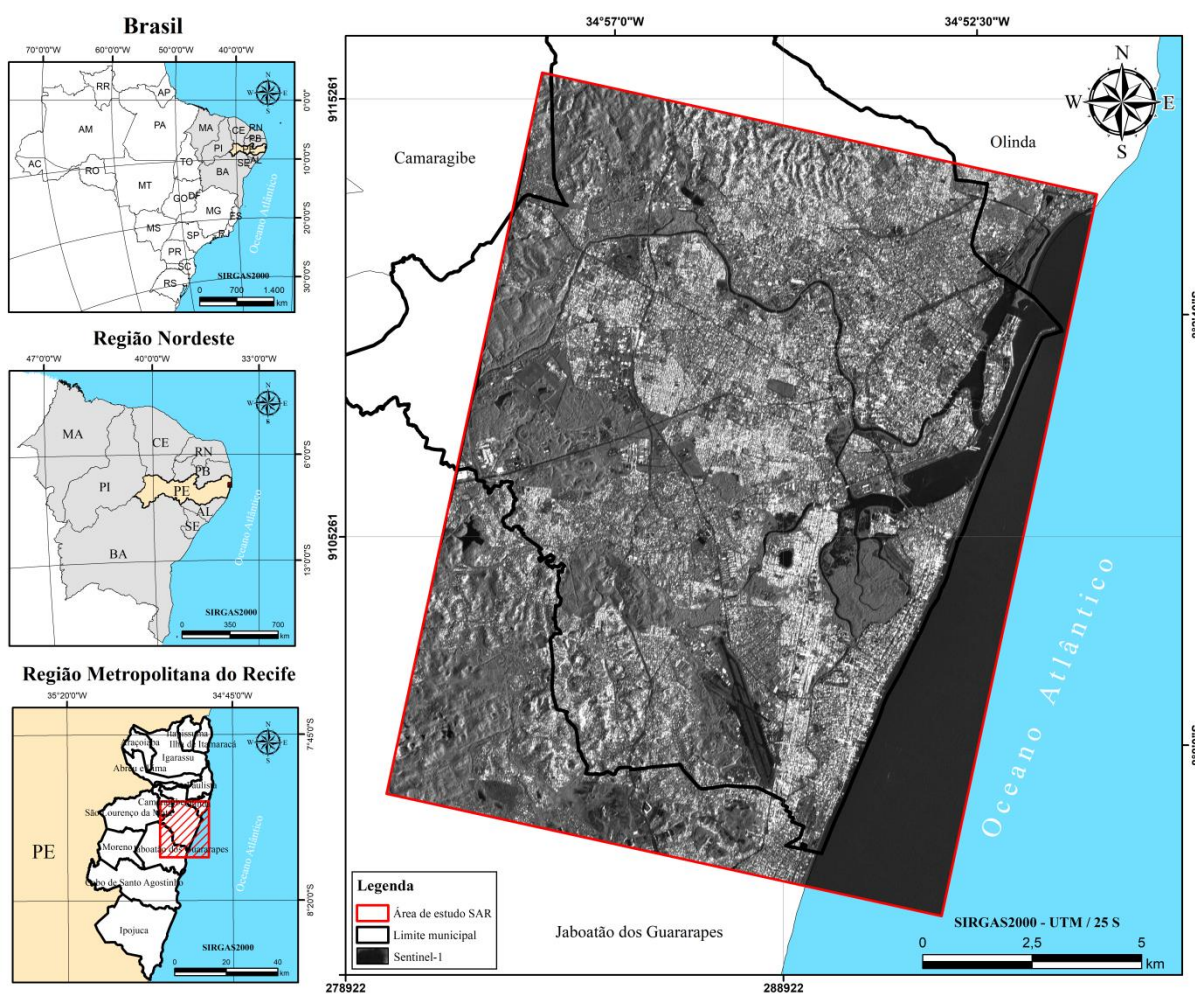
Direção orbital (satélite)	Centro de coordenadas (SIRGAS2000)	Dimensões (km)	Área do Recife (km <sup>2</sup> )
Ascendente (CSK e PAZ)	8°5'8" S e 34°54'38" O	12,97 x 16,84	142,685
Descendente (S1 e PAZ)	8°4'52" S e 34°55'27" O	13,54 x 16,36	153,037

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

## 6.2 PSInSAR com Imagens Sentinel-1

A aquisição de produtos SAR do Sentinel-1 ocorreu para o período de 25 de setembro de 2016 a 8 de abril de 2021. Ao longo desse intervalo, adquiriram-se 135 imagens de valor SLC (Apêndice A) da área de estudo (Figura 71).

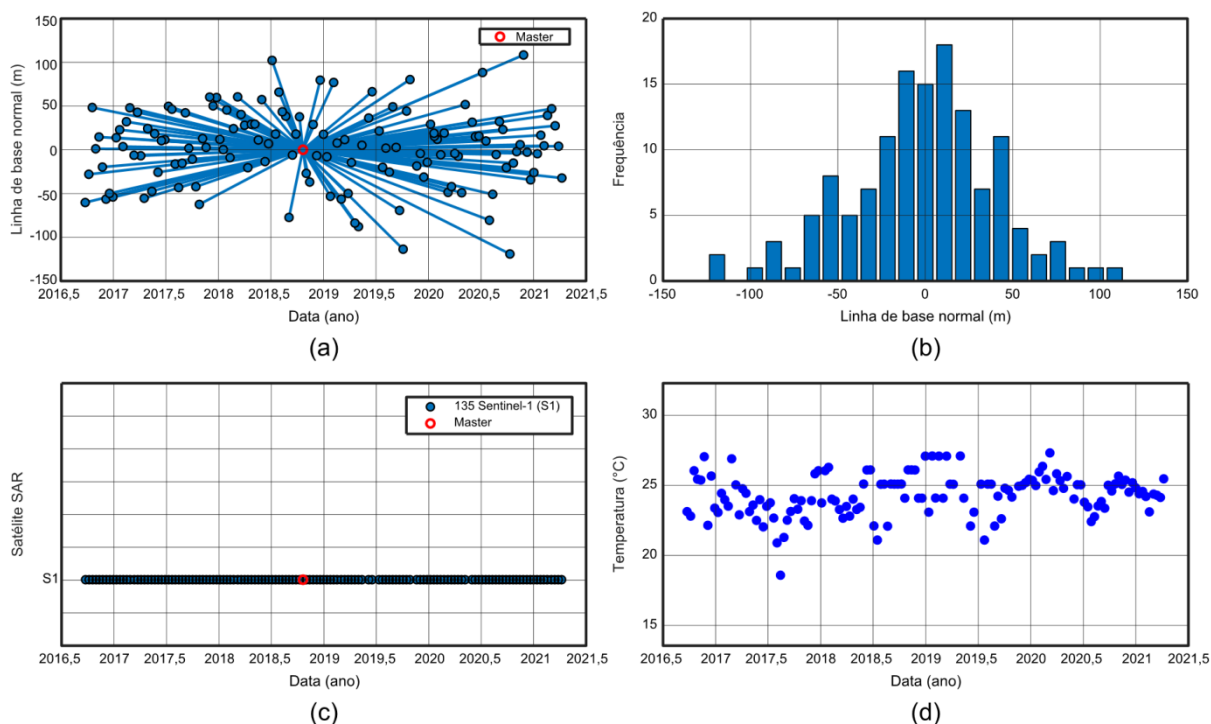
Figura 71 – Mapa de imagem SAR do Sentinel-1 da área de estudo.



Fonte: dados geospaciais (IBGE, 2018a, 2018b).

O processamento das 135 imagens SAR do Sentinel-1 no SARProz (Figura 72) determinou a cena *master* de data 21 de outubro de 2018 como referência no desenvolvimento PSInSAR (Figura 72a). A imagem obtida para essa época buscou minimizar efeitos das linhas de base normais (Figura 72b) e temporais (Figura 72c), conforme Tabela 30. Na Figura 72d, a temperatura média no momento de aquisição de dados SAR foi de 24,5° C, com variação mínima de 19° C e máxima de 27,4° C.

Figura 72 – Aspectos: (a) gráfico da linha de base, (b) histograma da linha de base, (c) intervalo de aquisição e (d) temperatura no momento de obtenção de imagens SAR.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Tabela 30 – Informações de imagens *slaves* referente à cena *master*.

(continua)					
Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)	Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)
25/09/2016	-60,298	-756	28/06/2017	11,533	-480
07/10/2016	-27,981	-744	10/07/2017	49,699	-468
19/10/2016	48,350	-732	22/07/2017	46,334	-456
31/10/2016	1,147	-720	03/08/2017	-16,301	-444
12/11/2016	14,683	-708	15/08/2017	-43,193	-432
24/11/2016	-19,716	-696	27/08/2017	-15,354	-420
06/12/2016	-56,389	-684	08/09/2017	42,268	-408
18/12/2016	-49,832	-672	20/09/2017	1,771	-396
30/12/2016	-53,921	-660	02/10/2017	-10,718	-384
11/01/2017	13,820	-648	14/10/2017	-42,227	-372
23/01/2017	22,950	-636	26/10/2017	-62,387	-360
04/02/2017	3,670	-624	07/11/2017	12,808	-348
16/02/2017	32,084	-612	19/11/2017	2,754	-336
28/02/2017	47,975	-600	01/12/2017	60,271	-324
12/03/2017	-6,241	-588	13/12/2017	50,232	-312
24/03/2017	42,864	-576	25/12/2017	59,770	-300
05/04/2017	-6,835	-564	06/01/2018	11,979	-288
17/04/2017	-55,389	-552	18/01/2018	0,219	-276
29/04/2017	24,257	-540	30/01/2018	45,530	-264
11/05/2017	-47,570	-528	11/02/2018	-8,932	-252
23/05/2017	18,350	-516	23/02/2018	24,191	-240
04/06/2017	-25,730	-504	07/03/2018	60,498	-228
16/06/2017	10,436	-492	19/03/2018	40,427	-216

Tabela 30 – Informações de imagens *slaves* referente à cena *master*.

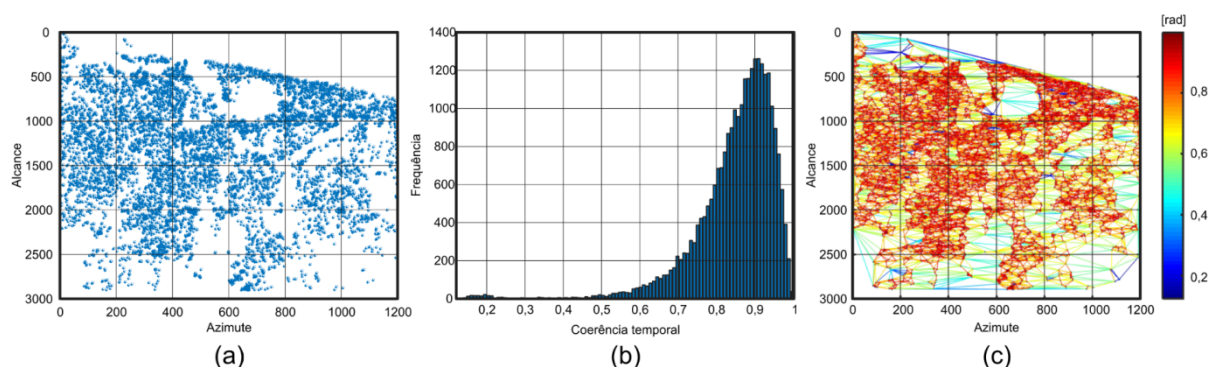
Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)	(conclusão)		
			Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)
31/03/2018	28,006	-204	16/10/2019	44,264	360
12/04/2018	-20,450	-192	28/10/2019	80,279	372
24/04/2018	29,170	-180	21/11/2019	-18,523	396
06/05/2018	29,388	-168	03/12/2019	-4,275	408
18/05/2018	11,168	-156	15/12/2019	-31,189	420
30/05/2018	57,394	-144	27/12/2019	-14,248	432
11/06/2018	-13,471	-132	08/01/2020	29,188	444
23/06/2018	6,995	-120	20/01/2020	18,930	456
05/07/2018	102,156	-108	01/02/2020	12,088	468
17/07/2018	17,978	-96	13/02/2020	-5,688	480
29/07/2018	65,927	-84	25/02/2020	19,122	492
10/08/2018	43,484	-72	08/03/2020	-48,704	504
22/08/2018	38,437	-60	20/03/2020	-42,088	516
03/09/2018	-77,328	-48	01/04/2020	-4,186	528
15/09/2018	-6,024	-36	13/04/2020	-7,455	540
27/09/2018	18,003	-24	25/04/2020	-49,109	552
09/10/2018	37,738	-12	07/05/2020	51,718	564
21/10/2018	0	0	31/05/2020	31,502	588
02/11/2018	-26,930	12	12/06/2020	15,074	600
14/11/2018	-36,868	24	24/06/2020	15,710	612
26/11/2018	28,929	36	06/07/2020	88,312	624
08/12/2018	-6,669	48	18/07/2020	10,082	636
20/12/2018	79,656	60	30/07/2020	-80,554	648
01/01/2019	17,740	72	11/08/2020	-50,855	660
13/01/2019	-7,971	84	23/08/2020	-5,496	672
25/01/2019	-53,212	96	04/09/2020	32,209	684
06/02/2019	76,969	108	16/09/2020	23,185	696
18/02/2019	7,766	120	28/09/2020	-20,338	708
02/03/2019	-56,330	132	10/10/2020	-119,097	720
14/03/2019	11,676	144	22/10/2020	-15,200	732
26/03/2019	-49,899	156	03/11/2020	-2,133	744
07/04/2019	-14,557	168	15/11/2020	5,931	756
19/04/2019	-83,745	180	27/11/2020	108,366	768
01/05/2019	-87,813	192	09/12/2020	-2,690	780
13/05/2019	5,199	204	21/12/2020	-34,330	792
06/06/2019	36,374	228	02/01/2021	-25,985	804
18/06/2019	66,424	240	14/01/2021	-4,428	816
12/07/2019	21,554	264	26/01/2021	16,649	828
24/07/2019	-20,005	276	07/02/2021	4,614	840
05/08/2019	1,905	288	19/02/2021	39,268	852
17/08/2019	-25,464	300	03/03/2021	46,960	864
29/08/2019	49,194	312	15/03/2021	27,458	876
10/09/2019	2,728	324	27/03/2021	4,075	888
22/09/2019	-69,330	336	08/04/2021	-32,239	900
04/10/2019	-113,636	348	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

### 6.2.1 Candidatos a PS na Estimativa do Efeito Atmosférico

Adotou-se *ASI* com valor igual a 0,75 na seleção de pontos PS. Isso possibilitou 8.874 *pixels* espalhados em imagens SAR e gerou 26.578 conexões entre eles (Figura 73).

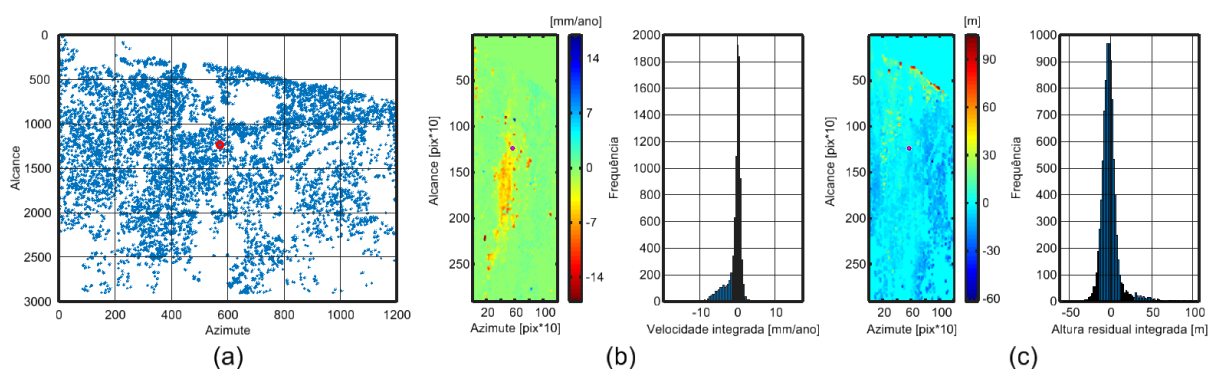
Figura 73 – Informações: (a) pontos candidatos a PS, (b) histograma coerente da conexão e (c) gráfico da conexão coerente.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 73a, determinou-se um ponto de referência estável com valor de coerência temporal igual a 1,0 a partir dos parâmetros estimados: tendência linear [-20 e 20] mm/ano e altura [-50 e 50] m. Essas informações serviram de base para o cálculo da medição InSAR (Figura 74). Na Figura 73b, constatou-se valor de coerência próximo ou igual a 0,9 para grande parte dos candidatos PS. Na Figura 73c, verificou-se valor de coerência de conexão melhor ou igual a 0,8. Essa visão estatística possibilitou analisar a existência de pequenas áreas isoladas com baixa coerência entre os pontos utilizados.

Figura 74 – Elementos: (a) indicação do ponto de referência em vermelho, (b) velocidade integrada e (c) altura residual integrada.

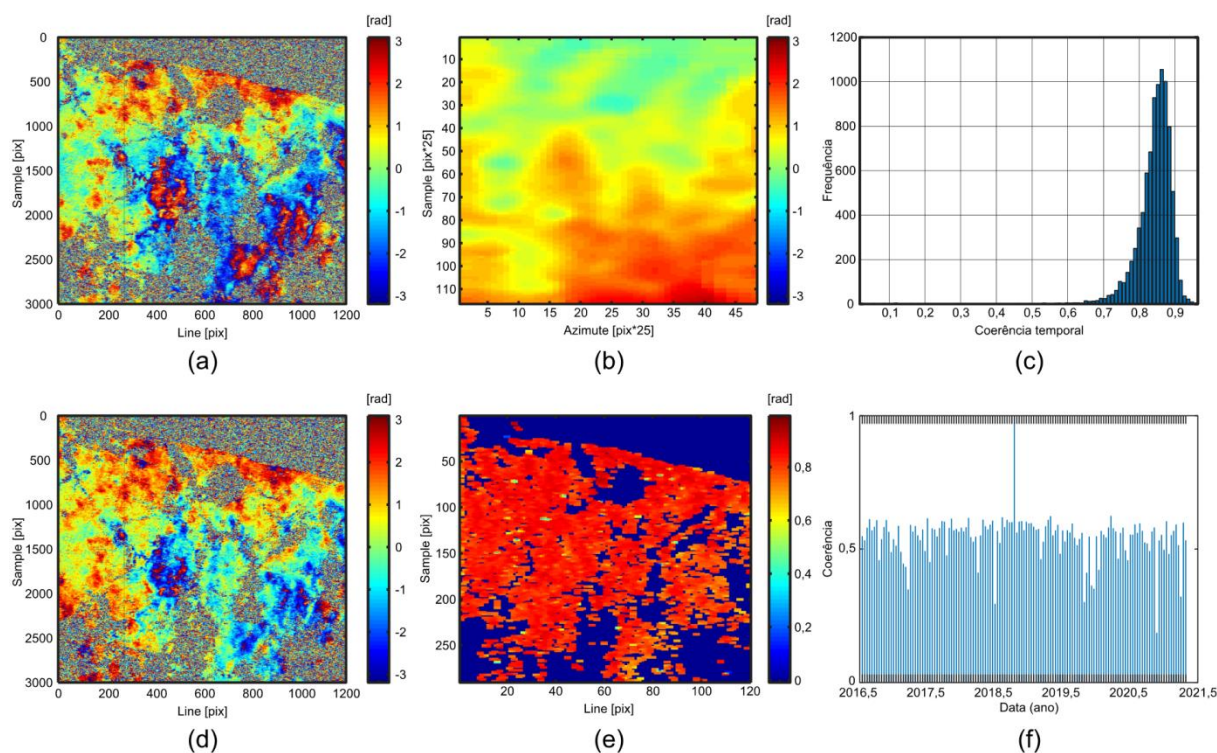


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Quando comparado com o ponto de referência (Figura 74a), o pico do histograma da velocidade integrada (Figura 74b) e da altura residual integrada (Figura 74c) tiveram valor em torno de zero. A maioria dos pontos possui velocidade relativa e altura relativa próxima de zero. Tais situações indicaram que o ponto de referência se situou em local estável.

Em seguida, a estimativa do efeito atmosférico se realizou para todas as imagens e possibilitou eliminar e/ou reduzir sua ação nos interferogramas. Isso permitiu aumentar o valor da coerência temporal para a maioria dos produtos (Figura 75).

Figura 75 – Aspectos: (a) interferograma com APS (12/11/2016), (b) estimativa do efeito atmosférica (12/11/2016), (c) gráfico da conexão coerente, (d) interferograma sem APS (12/11/2016), (e) coerência temporal e (f) coerência de cada imagem *slave* em relação à cena *master*.



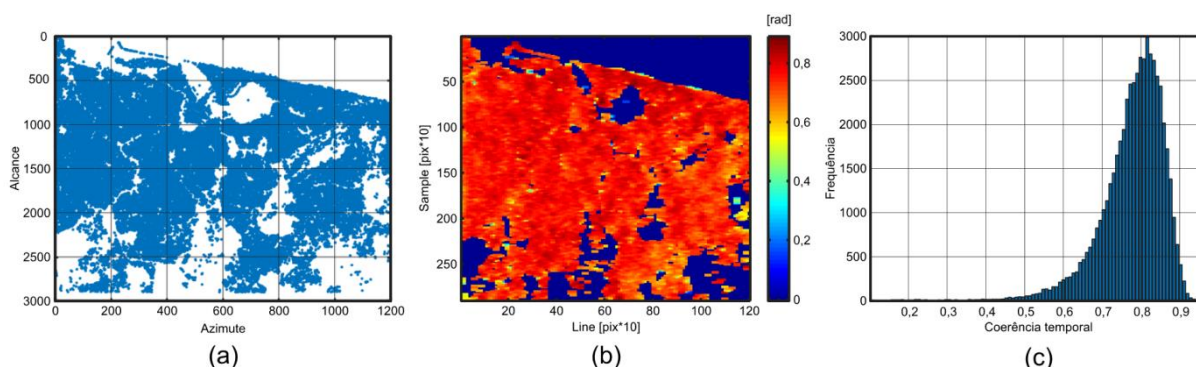
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 75a, houve maior intensidade do efeito atmosférico na área Centro-Sul. A eliminação e/ou redução dessa perturbação ocorreu em cada imagem SAR a partir de sua estimativa, a exemplo da Figura 75b. Isso melhorou a coerência temporal do histograma, que resultou em valor melhor que 0,8 (Figura 75c). A utilização de imagens corrigidas proporcionou interferogramas aprimorados (Figura 75d). A melhora se deu a partir da estimativa e remoção de APS via candidatos PS (Figura 75e), os quais apresentaram alta coerência temporal. Essa ação se repetiu para os demais produtos. Na Figura 75f, a maioria das imagens *slaves* exibiu valor de coerência próximo de 0,6 em relação à cena *master*.

### 6.2.2 Seleção de PS na Análise de Série Temporal

Adotou-se *ASI* com valor igual a 0,6 na seleção de observáveis PS (Figura 76). Isso gerou 54.550 pontos de medição na análise temporal (Figura 76a).

Figura 76 – Análise de dados PS: (a) pontos de medição, (b) coerência temporal e (c) histograma da coerência temporal.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

De acordo com a Figura 76b e a Figura 76c, a densidade de pontos de medição PS selecionados revelou em sua maioria alto valor de coerência temporal com grandeza melhor ou igual a 0,8. A maior coerência temporal indicou conformidade na adoção dos parâmetros estimados  $[-20$  e  $20]$  mm/ano e  $[-50$  e  $50]$  m. Esses aspectos se refletiram na análise estatística de observáveis PS referentes à tendência linear e à altura. Em seguida, pontos PS para o monitoramento PSInSAR foram processadas com os valores (Figura 77):  $[-25$  e  $25]$  mm/ano e  $[-60$  e  $60]$  m.

Figura 77 – Análise estatística de pontos de medição PS: (a) velocidade, (b) deslocamento acumulado, (c) altura e (d) altura residual.

(continua)

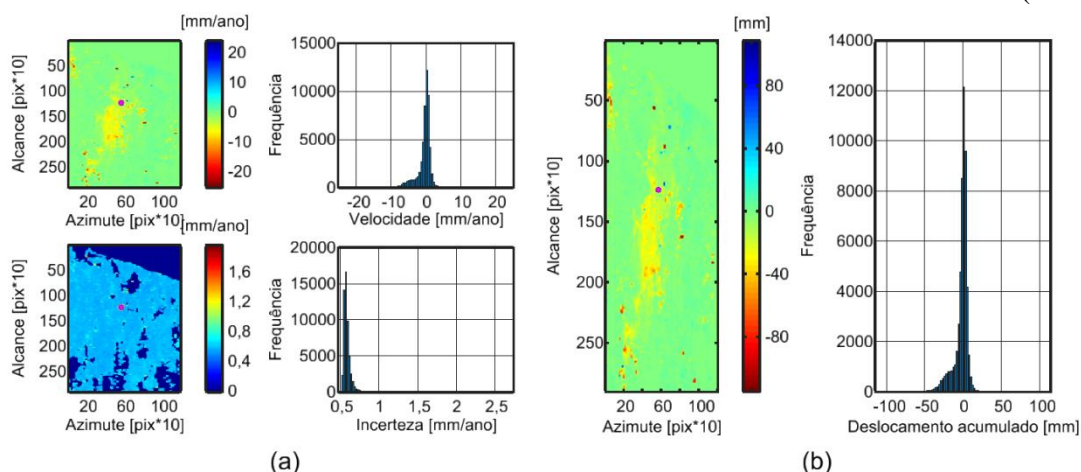
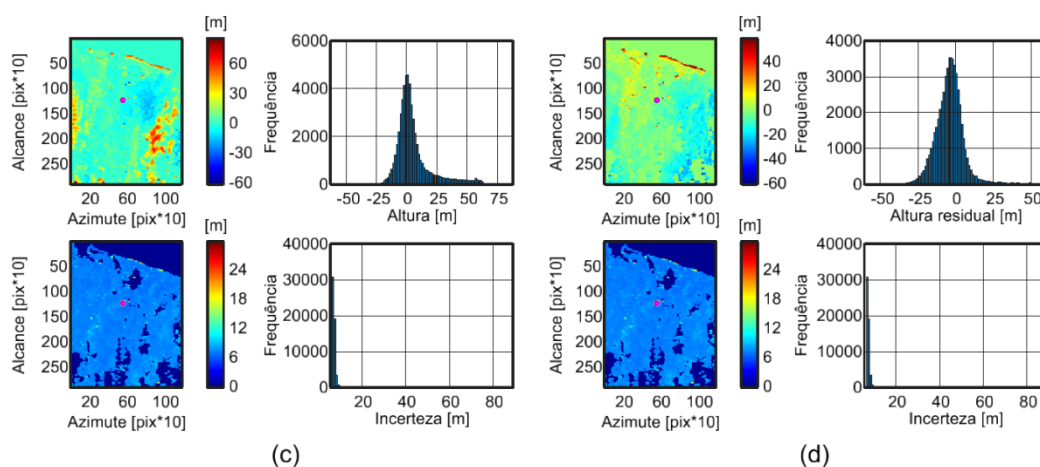


Figura 77 – Análise estatística de pontos de medição PS: (a) velocidade, (b) deslocamento acumulado, (c) altura e (d) altura residual. (conclusão)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 77a, a maioria da velocidade variou de -10 mm/ano a 3 mm/ano com maior ocorrência para grandezas negativas. A incerteza da velocidade revelou em sua maioria valores em torno de 0,6 mm/ano. Na Figura 77b, verificou-se variação em sua maior parte para deslocamento acumulado negativo – caracterizado por rebaixamento – com grandeza próxima de -50 mm e valor positivo em torno de 20 mm. Na Figura 77c, a maioria de pontos de medição PS se situou em terreno com altura abaixo de 20 m. Na Figura 77d, a altura residual apresentou valores entre -35 m e 50 m. Para ambas as figuras, a incerteza altimétrica foi melhor que 10 m.

### 6.3 PSInSAR com Imagens COSMO-SkyMed

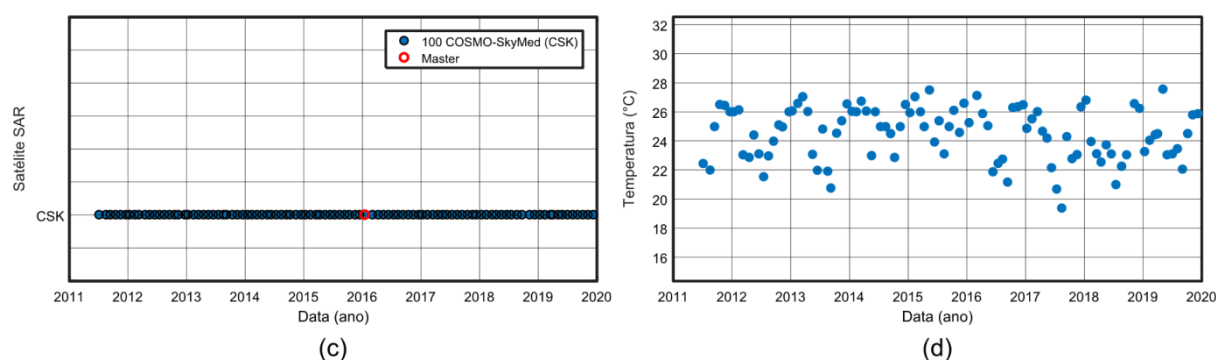
A aquisição de produtos SAR do COSMO-SkyMed ocorreu para o período de 6 de julho de 2011 a 10 de dezembro de 2019. Nesse intervalo, adquiriram-se 100 imagens de valor SLC (Apêndice B) da área de estudo (Figura 78).

O processamento das 100 imagens SAR do COSMO-SkyMed no SARProz (Figura 79) determinou a cena *master* de data 17 de janeiro de 2016 como referência no desenvolvimento PSInSAR (Figura 79a). A imagem obtida buscou minimizar efeitos das linhas de base normais (Figura 79b) e temporais (Figura 79c), conforme Tabela 31. Na Figura 79d, a temperatura média no momento de aquisição de dados SAR foi de 24,5° C, com variação mínima de 19,4° C e máxima de 27,5° C.



Figura 79 – Aspectos: (a) gráfico da linha de base, (b) histograma da linha de base, (c) intervalo de aquisição e (d) temperatura no momento de obtenção de imagens SAR.

(conclusão)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Tabela 31 – Informações de imagens *slaves* referente à cena *master*.

(continua)

Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)	Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)
06/07/2011	805,559	-1656	17/04/2014	573,094	-640
19/08/2011	446,552	-1612	19/05/2014	753,240	-608
16/09/2011	-316,632	-1584	12/06/2014	1307,958	-584
18/10/2011	-508,537	-1552	14/07/2014	-113,918	-552
19/11/2011	-647,337	-1520	15/08/2014	161,187	-520
21/12/2011	917,029	-1488	16/09/2014	82,709	-488
14/01/2012	1125,444	-1464	10/10/2014	10,974	-464
15/02/2012	762,743	-1432	15/11/2014	-369,204	-428
11/03/2012	525,850	-1407	17/12/2014	367,233	-396
19/04/2012	683,749	-1368	14/01/2015	1299,859	-368
17/05/2012	265,794	-1340	15/02/2015	166,543	-336
18/06/2012	142,612	-1308	19/03/2015	1313,209	-304
17/07/2012	-479,753	-1279	12/04/2015	-384,164	-280
17/08/2012	-65,263	-1248	14/05/2015	818,501	-248
18/09/2012	389,780	-1216	15/06/2015	1297,824	-216
20/10/2012	628,328	-1184	13/07/2015	259,227	-188
13/11/2012	1353,162	-1160	14/08/2015	753,217	-156
23/12/2012	430,073	-1120	15/09/2015	444,226	-124
12/01/2013	266,339	-1100	13/10/2015	1183,487	-96
17/02/2013	1119,450	-1064	18/11/2015	571,014	-60
17/03/2013	-721,037	-1036	16/12/2015	582,112	-32
18/04/2013	-5,089	-1004	17/01/2016	0	0
17/05/2013	135,792	-975	05/03/2016	-494,468	48
17/06/2013	-239,504	-944	10/04/2016	1292,596	84
19/07/2013	-162,892	-912	12/05/2016	1403,707	116
20/08/2013	516,160	-880	13/06/2016	-361,902	148
09/09/2013	400,729	-860	15/07/2016	914,467	180
15/10/2013	568,373	-824	12/08/2016	-5,539	208
16/11/2013	-733,432	-792	13/09/2016	-753,389	240
18/12/2013	-381,753	-760	15/10/2016	372,871	272
19/01/2014	736,018	-728	16/11/2016	1496,328	304
16/02/2014	-334,662	-700	18/12/2016	-701,077	336
16/03/2014	137,553	-672	11/01/2017	-192,293	360

Tabela 31 – Informações de imagens *slaves* referente à cena *master*.

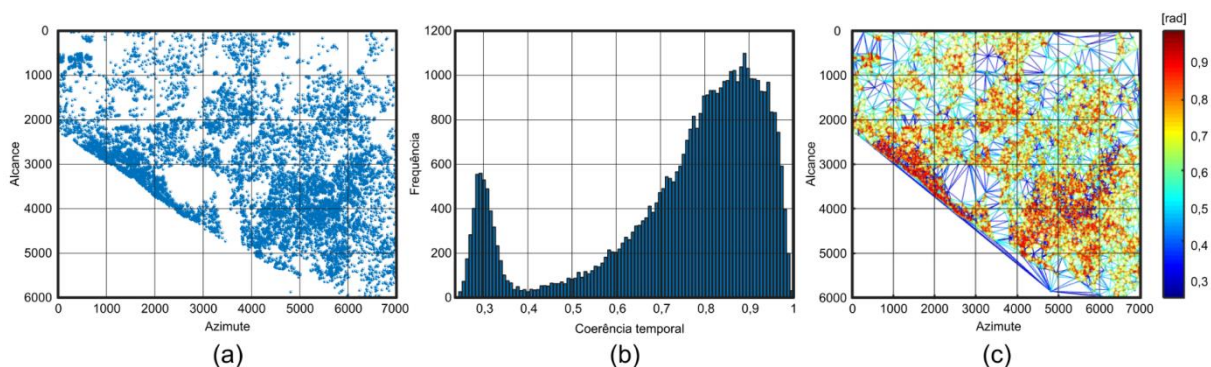
Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)	(conclusão)		
			Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)
12/02/2017	-165,203	392	17/07/2018	978,625	912
16/03/2017	192,049	424	22/08/2018	-717,832	948
17/04/2017	463,459	456	23/09/2018	168,841	980
15/05/2017	594,208	484	10/11/2018	1142,109	1028
12/06/2017	260,532	512	12/12/2018	6,166	1060
14/07/2017	-287,231	544	13/01/2019	535,457	1092
15/08/2017	-912,338	576	14/02/2019	298,519	1124
16/09/2017	-186,792	608	18/03/2019	664,298	1156
18/10/2017	-613,966	640	03/04/2019	1327,974	1172
19/11/2017	475,639	672	05/05/2019	-115,630	1204
13/12/2017	-1190,676	696	01/06/2019	-843,956	1231
14/01/2018	356,965	728	03/07/2019	-190,994	1263
15/02/2018	-14,502	760	04/08/2019	-364,342	1295
19/03/2018	-2,826	792	05/09/2019	246,848	1327
16/04/2018	626,272	820	07/10/2019	-179,184	1359
18/05/2018	-287,409	852	08/11/2019	1225,526	1391
19/06/2018	580,481	884	10/12/2019	1312,678	1423

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

### 6.3.1 Candidatos a PS na Estimativa do Efeito Atmosférico

Utilizou-se *ASI* com valor igual a 0,75 na seleção de pontos PS. Isso possibilitou 14.139 *pixels* espalhados em imagens SAR e gerou 42.388 conexões entre eles (Figura 80).

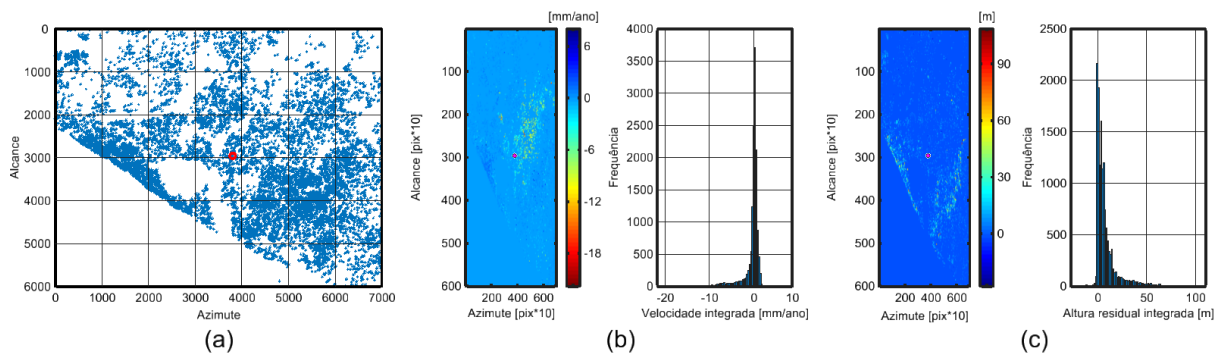
Figura 80 – Informações: (a) pontos candidatos a PS, (b) histograma coerente da conexão e (c) gráfico da conexão coerente.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 80a, obteve-se um ponto de referência estável com valor de coerência temporal igual a 0,85 a partir dos parâmetros estimados: tendência linear [-10 e 10] mm/ano e altura [-25 e 25] m. Essas informações serviram de base para o processo da medição InSAR (Figura 81). Na Figura 80b, a maioria dos pontos PS apresentou coerência temporal acima de 0,8. Na Figura 80c, verificou-se valor de coerência de conexão próxima de 0,8.

Figura 81 – Elementos: (a) indicação do ponto de referência em vermelho, (b) velocidade integrada e (c) altura residual integrada.

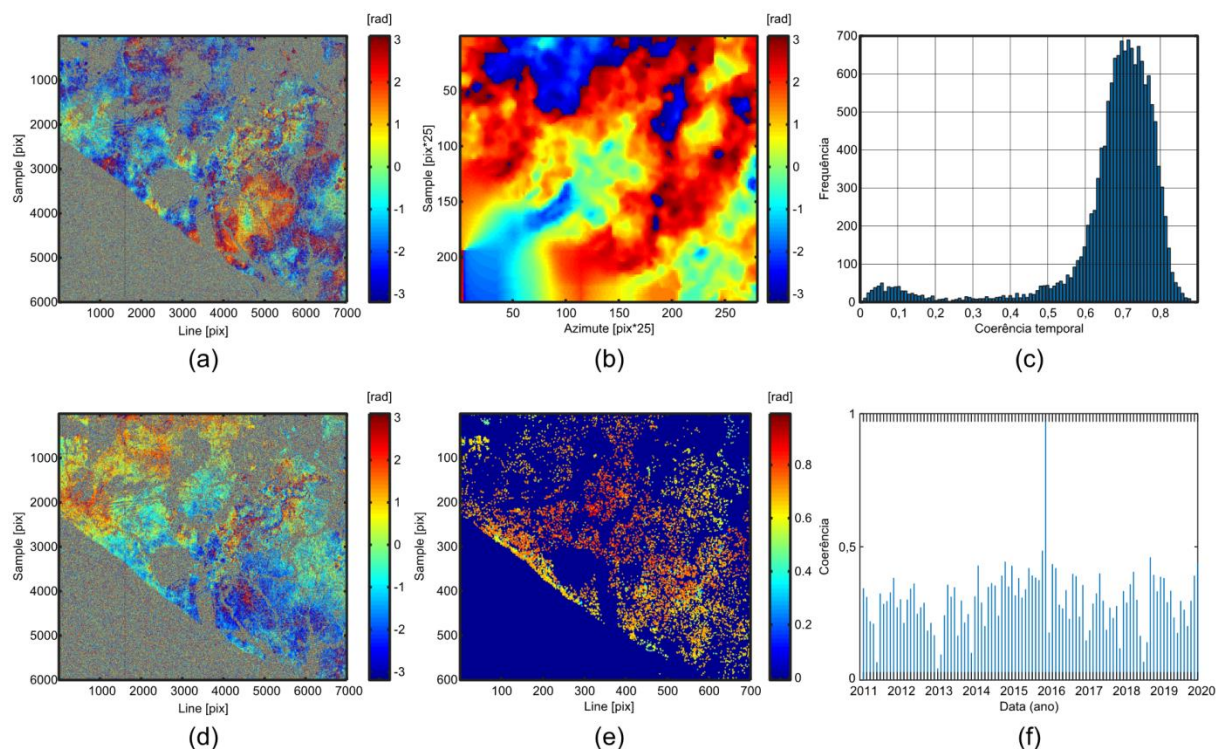


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na comparação com o ponto de referência (Figura 81a), o pico do histograma da velocidade integrado (Figura 81b) e da altura residual integrada (Figura 81c) exibiram valor em torno de zero. Tais aspectos indicaram estabilidade do ponto de referência utilizado.

Na sequência, a estimativa do efeito atmosférico ocorreu para todas as imagens e possibilitou eliminar e/ou reduzir sua ação nos interferogramas. Essa ação permitiu aumentar o valor da coerência temporal para a maioria dos produtos (Figura 82).

Figura 82 – Aspectos: (a) interferograma com APS (19/03/2018), (b) estimativa do efeito atmosférica (19/03/2018), (c) gráfico da conexão coerente, (d) interferograma sem APS (19/03/2018), (e) coerência temporal e (f) coerência de cada imagem *slave* em relação à cena *master*.



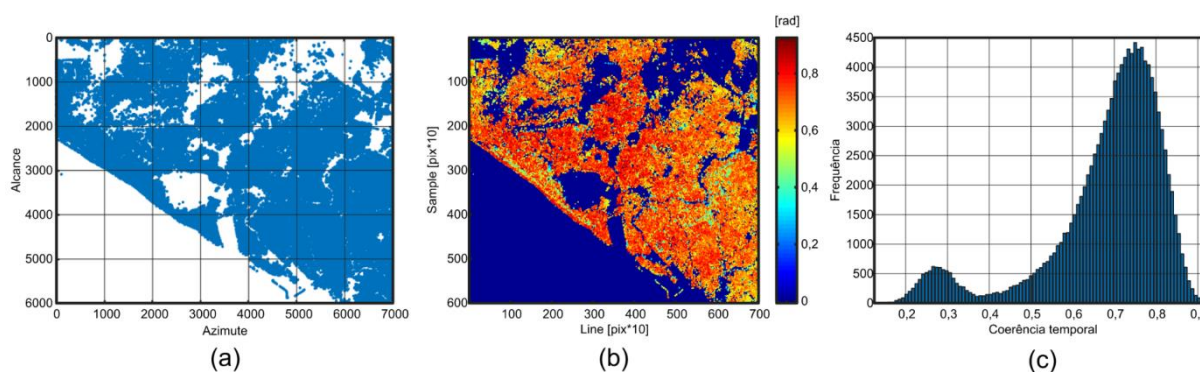
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 82a, houve maior intensidade do efeito atmosférico nas zonas Centro e Norte. A eliminação e/ou redução dessa perturbação ocorreu para cada imagem SAR a partir de sua estimativa, a exemplo da Figura 82b. A correção melhorou a coerência temporal do histograma, que resultou em valor melhor ou igual a 0,7 (Figura 82c). O uso de imagens corrigidas possibilitou interferogramas aperfeiçoados (Figura 82d). A melhora se deu a partir da estimativa e remoção de APS via candidatos PS (Figura 82e), os quais apresentaram coerência temporal em torno de 0,7. Essa ação se repetiu para todos os produtos. Na comparação com a cena *master*, imagens *slaves* tiveram valor de coerência abaixo de 0,5 (Figura 82f) – reflexo de ruídos remanescentes de outras fontes, tais como a presença de vegetação na área de estudo.

### 6.3.2 Seleção de PS na Análise de Série Temporal

Empregou-se *ASI* com valor igual 0,60 na seleção de observáveis PS (Figura 83). Isso resultou em 123.088 pontos de medição na análise temporal (Figura 83a).

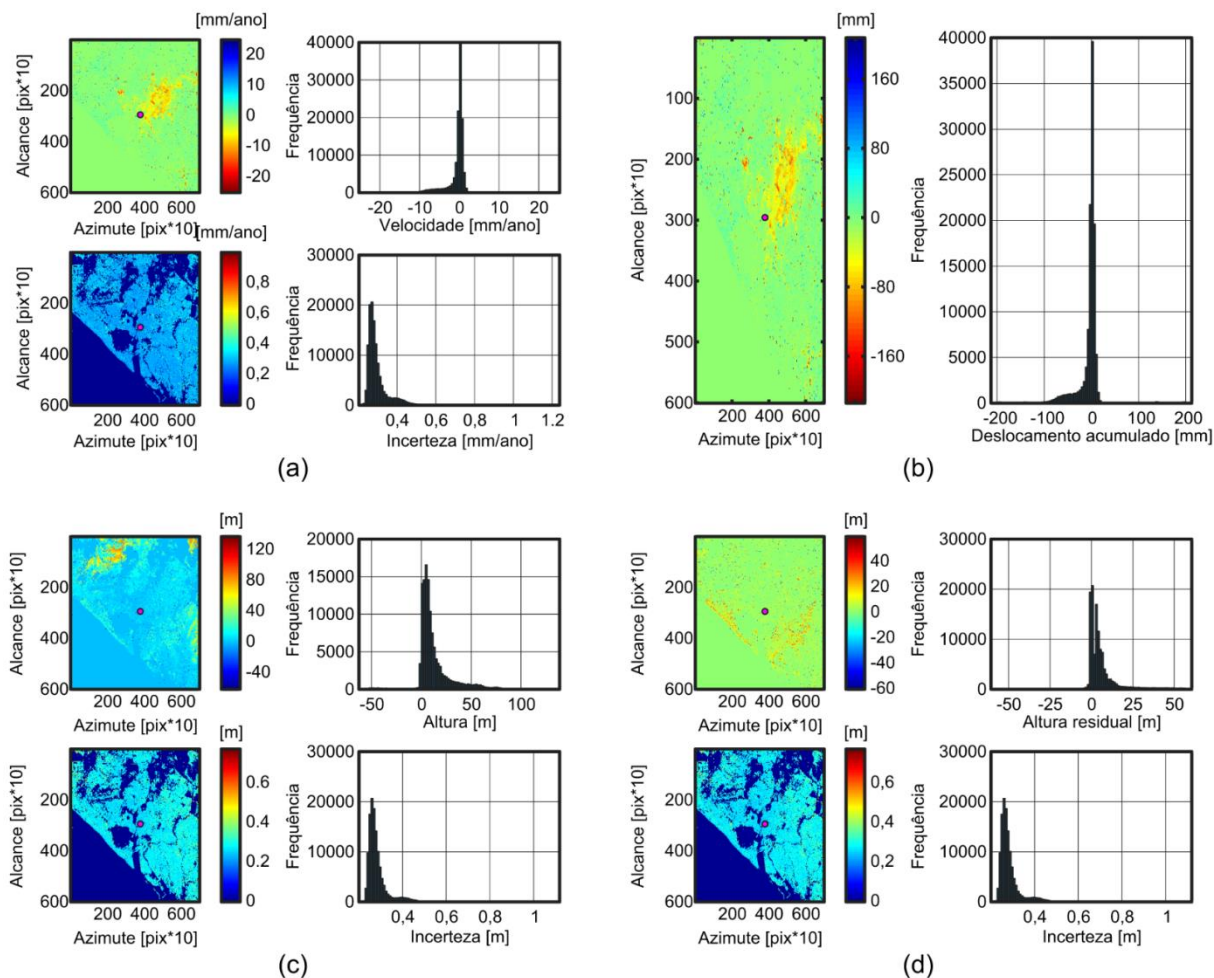
Figura 83 – Análise de dados PS: (a) pontos de medição, (b) coerência temporal e (c) histograma da coerência temporal.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

De acordo com a Figura 83b e a Figura 83c, a densidade de pontos de medição PS selecionados revelou em sua maioria alto valor de coerência temporal com grandeza melhor que 0,7. A maior coerência temporal indicou conformidade na adoção dos parâmetros estimados: [-10 e 10] mm/ano e [-20 e 20] m. Tais aspectos se refletiram na análise estatística de observáveis PS referente à tendência linear e à altura. Na sequência, pontos PS para o monitoramento PSInSAR foram processadas com os valores (Figura 84): [-25 e 25] mm/ano e [-60 e 60] m.

Figura 84 – Análise estatística de pontos de medição PS: (a) velocidade, (b) deslocamento acumulado, (c) altura e (d) altura residual.



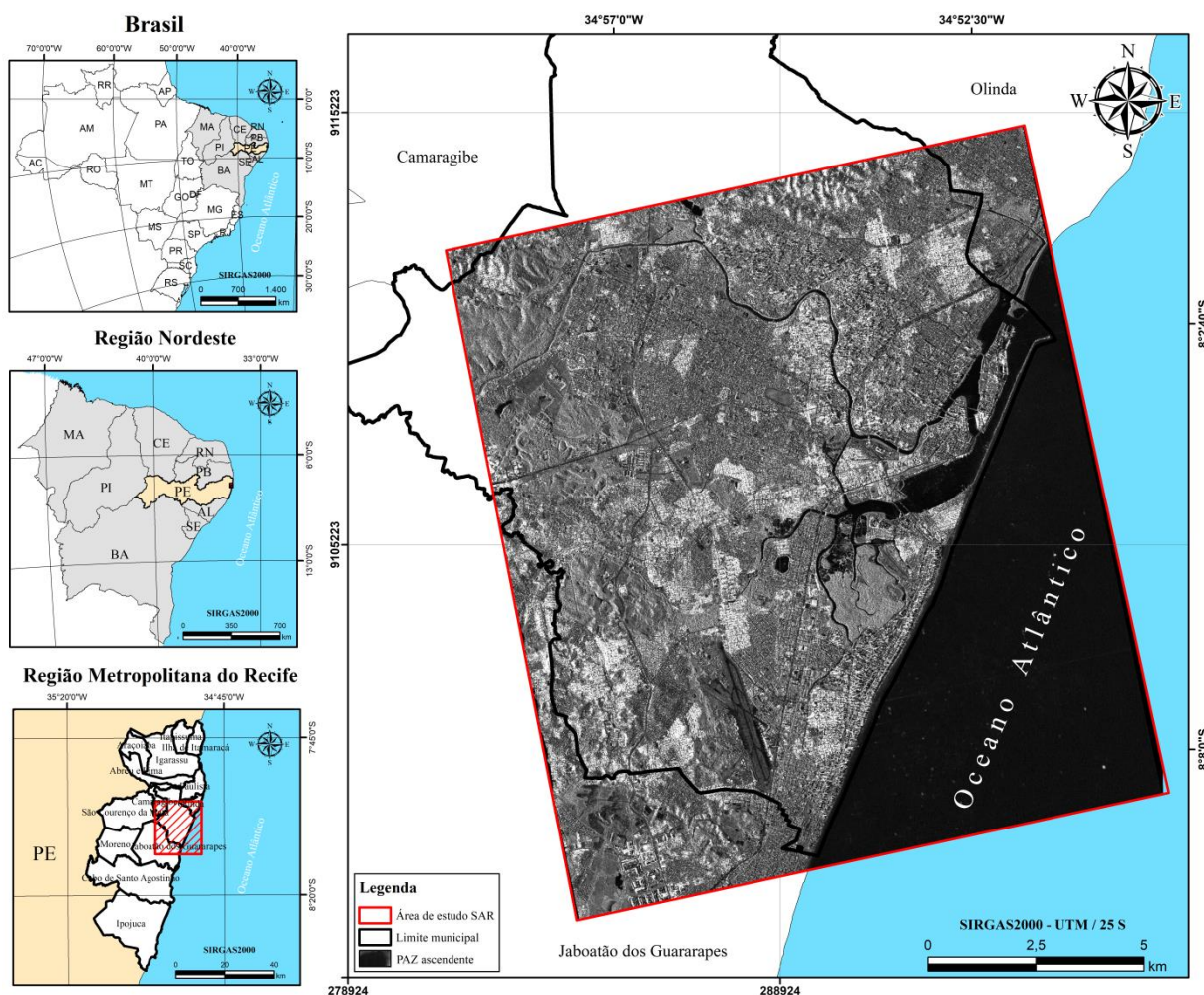
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 84a, a maioria da velocidade se situou entre -10 mm/ano a 3 mm/ano com maior ocorrência para grandezas negativas. A incerteza da velocidade revelou em sua maioria valores em torno de 0,3 mm/ano. Na Figura 84b, verificou-se em sua maior parte deslocamento acumulado negativo – caracterizado por rebaixamento – com variação em um intervalo de -100 mm a valor positivo próximo de 25 mm. Na Figura 84c, a maioria de pontos de medição PS se situou em terreno com altura abaixo de 20 m. Na Figura 84d, a altura residual denotou valores entre -5 m e 20 m. Para ambas as figuras, a incerteza altimétrica foi melhor que 0,5 m.

#### 6.4 PSInSAR com Imagens PAZ Ascendente

A aquisição de produtos SAR do PAZ ascendente ocorreu para o período de 24 de outubro de 2019 a 21 de novembro de 2021. Nesse intervalo, adquiriram-se 19 imagens de valor SLC (Apêndice C) da área de estudo (Figura 85).

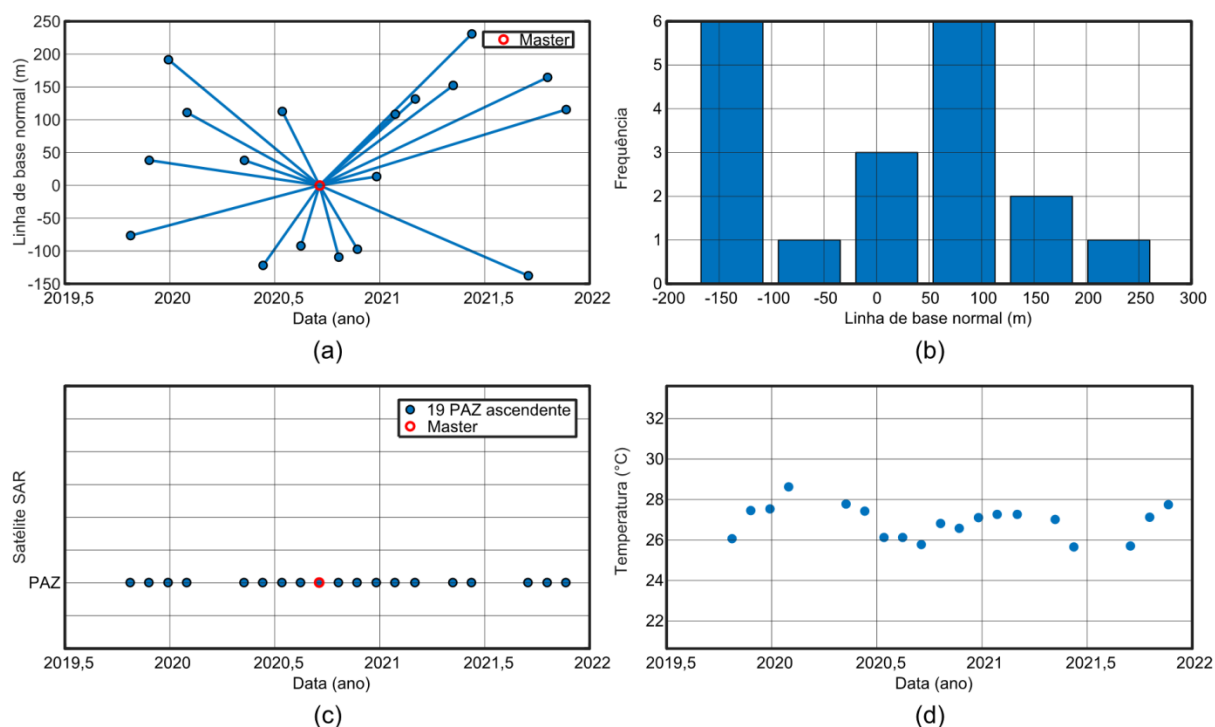
Figura 85 – Mapa de imagem SAR do PAZ ascendente da área de estudo.



Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b).

O processamento das 19 imagens SAR do PAZ no SARProz (Figura 86) determinou a cena *master* de data 18 de setembro de 2020 como referência no desenvolvimento PSInSAR (Figura 86a). A imagem obtida buscou minimizar efeitos das linhas de base normais (Figura 86b) e temporais (Figura 86c), conforme Tabela 32. Na Figura 86d, a temperatura média na aquisição de dados SAR foi de 27° C, com variação mínima de 25,6° C e máxima de 28,6° C.

Figura 86 – Aspectos: (a) gráfico da linha de base, (b) histograma da linha de base, (c) intervalo de aquisição e (d) temperatura no momento de obtenção de imagens SAR.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Tabela 32 – Informações de imagens *slaves* referente à cena *master*.

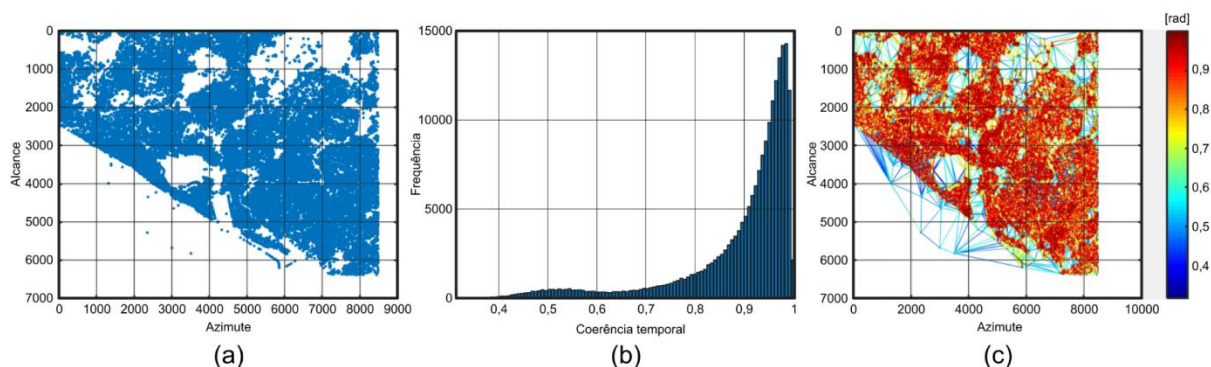
Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)	Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)
24/10/2019	-76,450	-330	23/11/2020	-97,357	66
26/11/2019	38,193	-297	26/12/2020	13,389	99
29/12/2019	191,413	-264	28/01/2021	108,418	132
31/01/2020	110,954	-231	02/03/2021	131,575	165
09/05/2020	38,092	-132	07/05/2021	152,225	231
11/06/2020	-121,948	-99	09/06/2021	230,772	264
14/07/2020	112,650	-66	16/09/2021	-137,741	363
16/08/2020	-92,177	-33	19/10/2021	164,519	396
18/09/2020	0	0	21/11/2021	115,487	429
21/10/2020	-109,378	33	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

#### 6.4.1 Candidatos a PS na Estimativa do Efeito Atmosférico

Adotou-se *ASI* com valor igual a 0,85 na seleção de pontos PS. Isso possibilitou 66.735 *pixels* espalhados em imagens SAR e gerou 200.157 conexões entre eles (Figura 87).

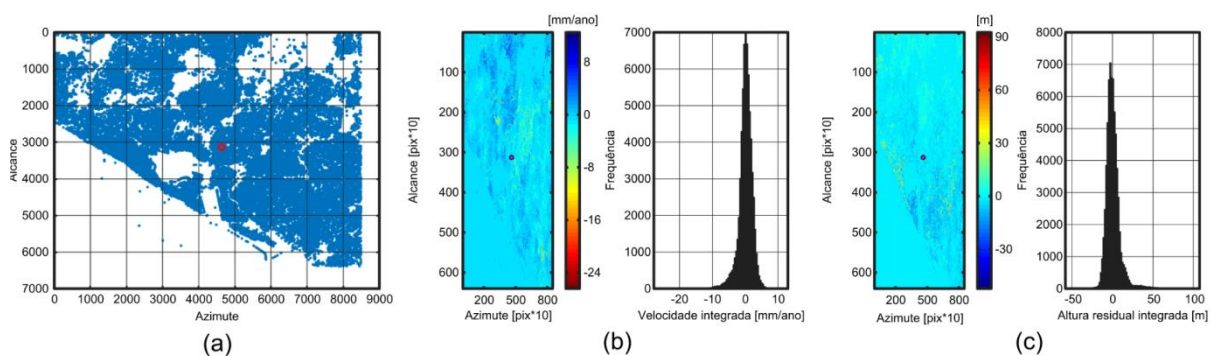
Figura 87 – Informações: (a) pontos candidatos a PS, (b) histograma coerente da conexão e (c) gráfico da conexão coerente.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 87a, determinou-se um ponto de referência estável com valor de coerência temporal igual a 0,99 a partir dos parâmetros estimados: tendência linear [-10 e 10] mm/ano e altura [-20 e 20] m. Essas informações serviram de base para o cálculo da medição InSAR (Figura 88). Na Figura 87b, constatou-se valor de coerência maior que 0,9 para grande parte dos pontos PS. Na Figura 87c, verificou-se valor de coerência de conexão melhor ou igual a 0,9. Essa visão estatística possibilitou analisar a existência de pequenas áreas isoladas com baixa coerência entre os pontos utilizados.

Figura 88 – Elementos: (a) indicação do ponto de referência em vermelho, (b) velocidade integrada e (c) altura residual integrada.

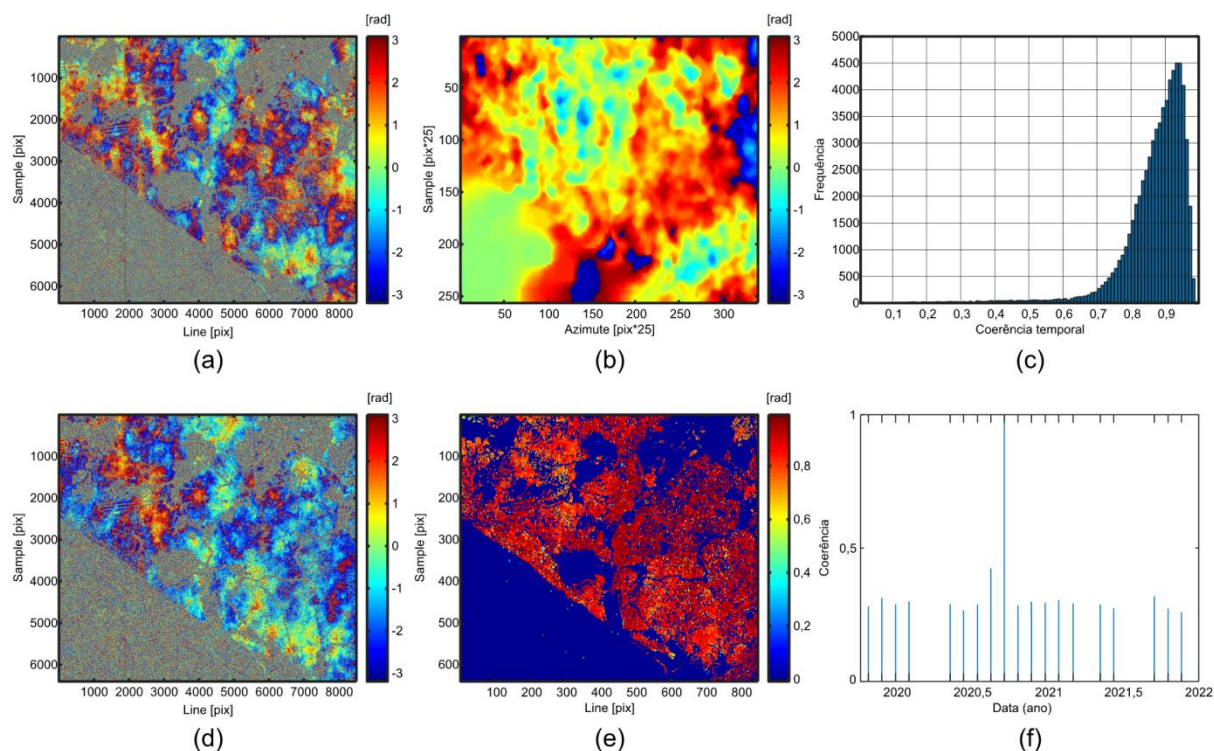


Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Quando comparado com o ponto de referência (Figura 88a), o pico do histograma da velocidade integrada (Figura 88b) e da altura residual integrada (Figura 88c) tiveram valores em torno de zero. A maioria dos pontos possuiu velocidade relativa e altura relativa próxima de zero. Tais situações indicaram que o ponto de referência se situou em local estável.

Em seguida, a estimativa do efeito atmosférico se realizou para todas as imagens e possibilitou eliminar e/ou reduzir sua ação nos interferogramas. Isso permitiu aumentar o valor da coerência temporal para a maioria dos produtos (Figura 89).

Figura 89 – Aspectos: (a) interferograma com APS (18/09/2020), (b) estimativa do efeito atmosférica (18/09/2020), (c) gráfico da conexão coerente, (d) interferograma sem APS (18/09/2020), (e) coerência temporal e (f) coerência de cada imagem *slave* em relação à cena *master*.



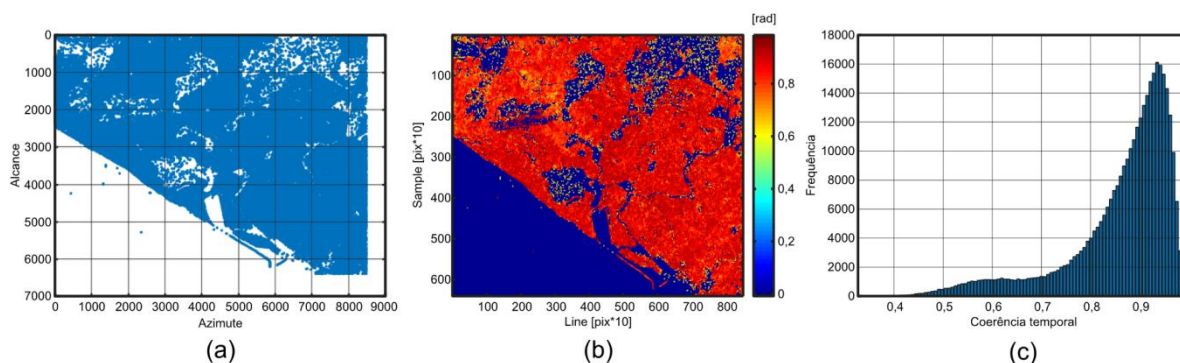
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 89a, o efeito atmosférico se situou em várias partes da cidade. A eliminação e/ou redução dessa perturbação ocorreu em cada imagem SAR a partir de sua estimativa, a exemplo da Figura 89b. Isso melhorou a coerência temporal do histograma, que resultou em valor maior que 0,8 (Figura 89c). A utilização de imagens corrigidas proporcionou interferogramas aprimorados (Figura 89d). A melhora se deu a partir da estimativa e remoção de APS via candidatos PS (Figura 89e), os quais apresentaram alta coerência temporal. Essa ação se repetiu para os demais produtos. Em relação à cena *master*, a maioria das imagens *slaves* exibiu valor de coerência em torno de 0,3 (Figura 89f).

#### 6.4.2 Seleção de PS na Análise de Série Temporal

Adotou-se *ASI* com valor igual a 0,7 na seleção de observáveis PS (Figura 90). Isso gerou 341.307 pontos de medição na análise temporal (Figura 90a).

Figura 90 – Análise de dados PS: (a) pontos de medição, (b) coerência temporal e (c) histograma da coerência temporal.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

De acordo com a Figura 90b e a Figura 90c, a densidade de pontos de medição PS selecionados revelou em sua maioria alto valor de coerência temporal com grandeza melhor que 0,8. A maior coerência temporal indicou conformidade na adoção dos parâmetros estimados [-10 e 10] mm/ano e [-20 e 20] m. Esses aspectos se refletiram na análise estatística de observáveis PS referentes à tendência linear e à altura. Em seguida, pontos PS para o monitoramento PSInSAR foram processadas com os valores (Figura 91): [-25 e 25] mm/ano e [-60 e 60] m.

Figura 91 – Análise estatística de pontos de medição PS: (a) velocidade, (b) deslocamento acumulado, (c) altura e (d) altura residual.

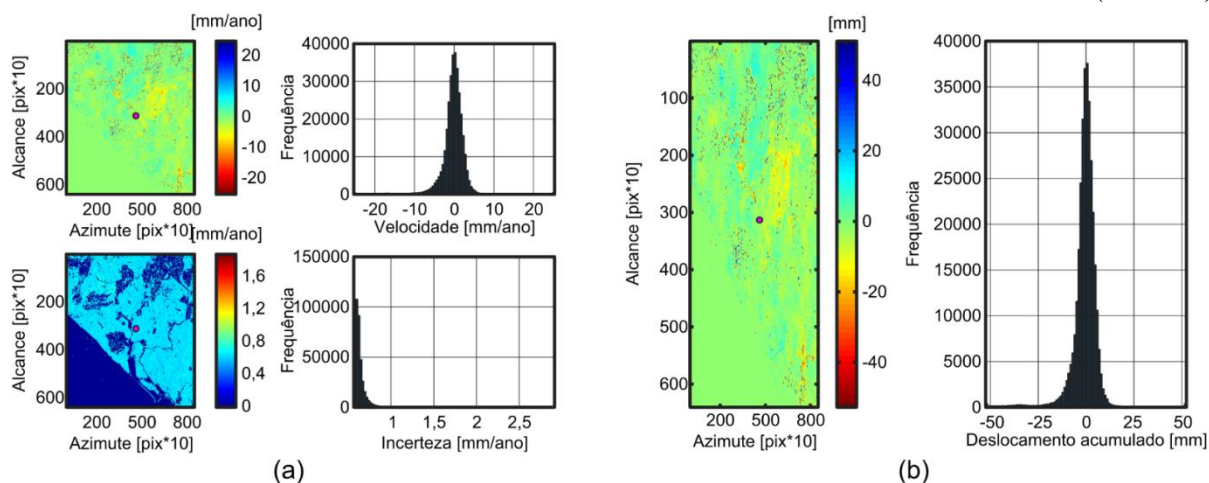
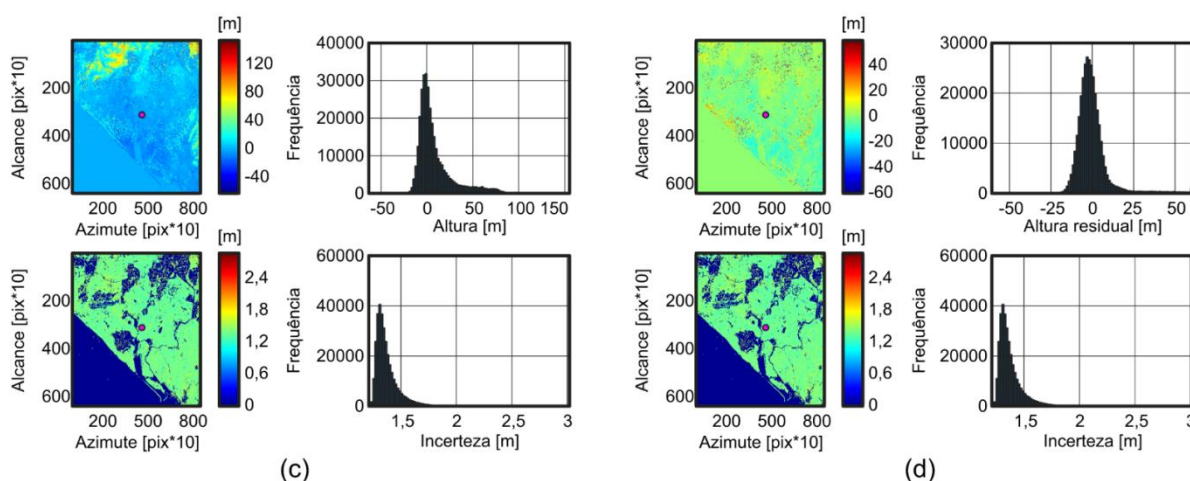


Figura 91 – Análise estatística de pontos de medição PS: (a) velocidade, (b) deslocamento acumulado, (c) altura e (d) altura residual.

(conclusão)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

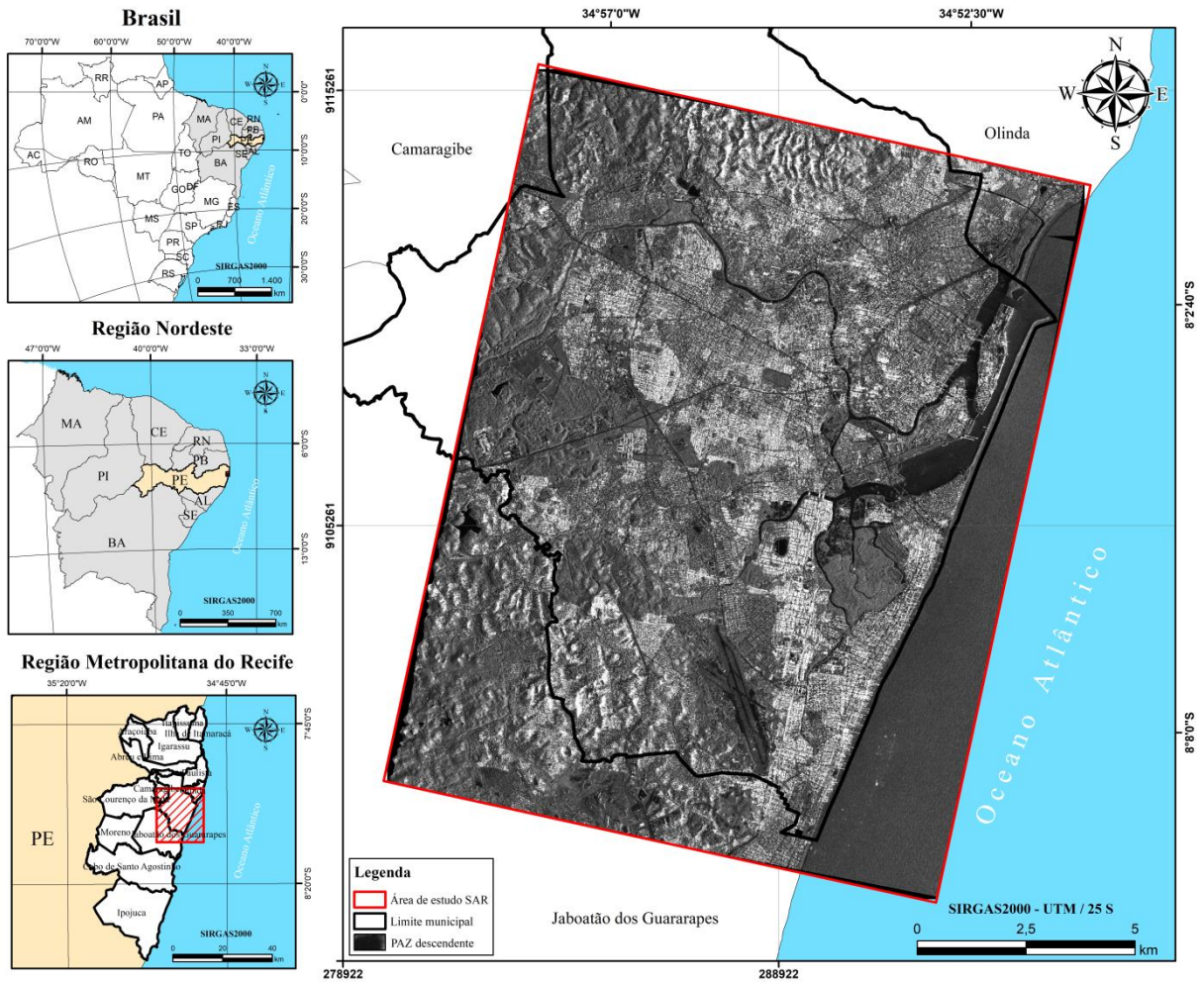
Na Figura 91a, a velocidade variou de -10 mm/ano a 5 mm/ano com maior ocorrência para grandezas negativas. A incerteza da velocidade revelou em sua maioria valores em torno de 0,3 mm/ano. Na Figura 91b, verificou-se variação com maior tendência para deslocamento acumulado negativo – caracterizado por rebaixamento – com grandeza próxima de -25 mm e valor positivo em torno de 15 mm. Na Figura 91c, a maioria de pontos de medição PS se situou em terreno com altura abaixo de 25 m. Na Figura 91d, a altura residual apresentou valores entre -20 m e 30 m. Para essas figuras, a incerteza altimétrica foi melhor que 2 m.

## 6.5 PSInSAR com Imagens PAZ Descendente

A aquisição de produtos SAR do PAZ descendente ocorreu para o período de: 21 de outubro de 2019 a 18 de novembro de 2021. Nesse intervalo, adquiriram-se 22 imagens de valor SLC (Apêndice C) da área de estudo (Figura 92).

O processamento das 22 imagens SAR do PAZ no SARProz (Figura 93) determinou a cena *master* de data 11 de julho de 2020 como referência no desenvolvimento PSInSAR (Figura 93a). A imagem obtida buscou minimizar efeitos das linhas de base normais (Figura 93b) e temporais (Figura 93c), conforme Tabela 33. Na Figura 93d, a temperatura média na aquisição de dados SAR foi igual a 24,7° C, com variação mínima de 23,4° C e máxima de 26,1° C.

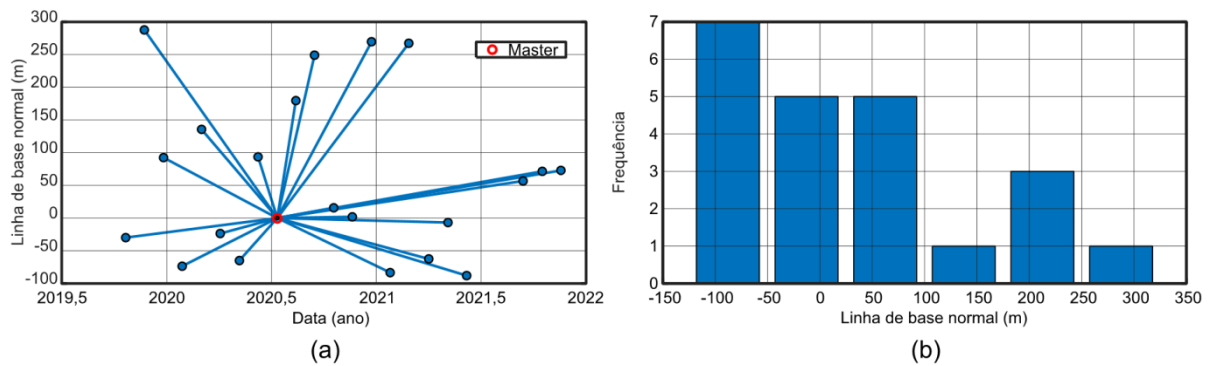
Figura 92 – Mapa de imagem SAR do PAZ descendente da área de estudo.



Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b).

Figura 93 – Aspectos: (a) gráfico da linha de base, (b) histograma da linha de base, (c) intervalo de aquisição e (d) temperatura no momento de obtenção de imagens SAR.

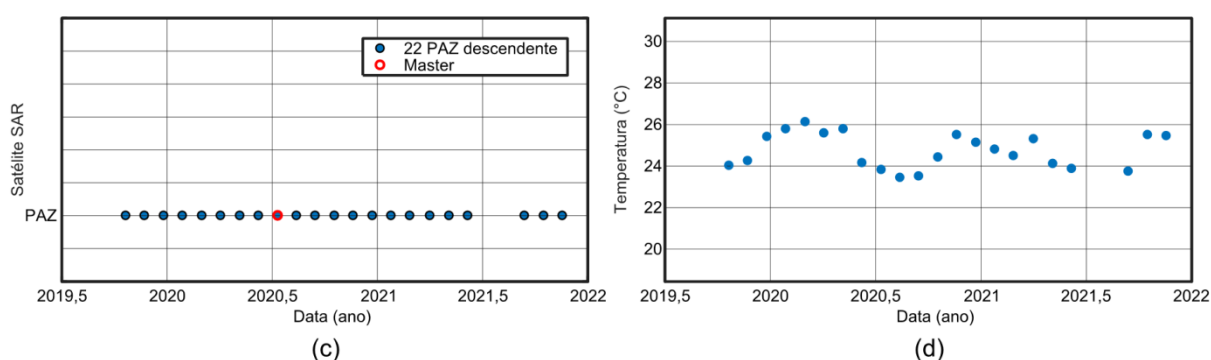
(continua)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Figura 93 – Aspectos: (a) gráfico da linha de base, (b) histograma da linha de base, (c) intervalo de aquisição e (d) temperatura no momento de obtenção de imagens SAR.

(conclusão)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Tabela 33 – Informações de imagens *slaves* referente à cena *master*.

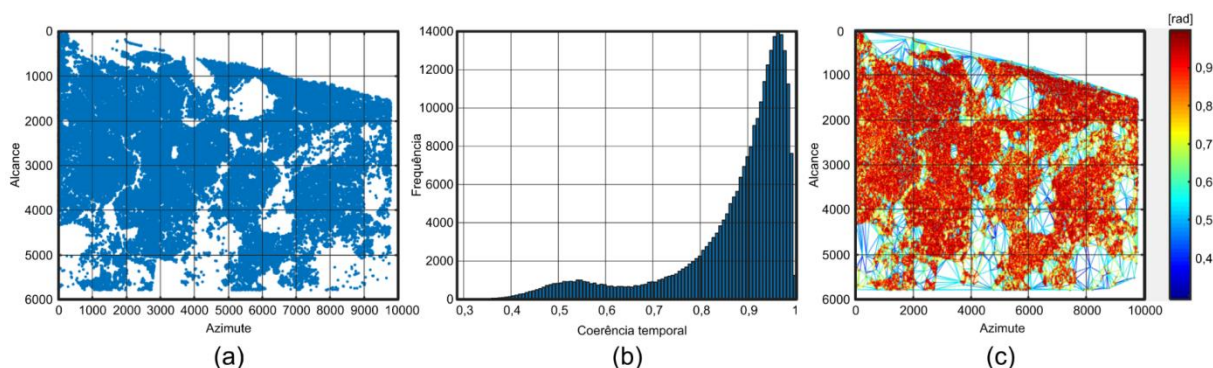
Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)	Data de aquisição	Linha de base normal (m)	Intervalo temporal (dias)
21/10/2019	-29,853	-264	18/10/2020	15,724	99
23/11/2019	287,686	-231	20/11/2020	1,942	132
26/12/2019	92,467	-198	23/12/2020	269,672	165
28/01/2020	-73,550	-165	25/01/2021	-83,337	198
01/03/2020	135,683	-132	27/02/2021	267,336	231
03/04/2020	-23,571	-99	01/04/2021	-62,389	264
06/05/2020	-64,901	-66	04/05/2021	-6,734	297
08/06/2020	93,630	-33	06/06/2021	-87,896	330
11/07/2020	0	0	13/09/2021	56,770	429
13/08/2020	179,648	33	16/10/2021	71,458	462
15/09/2020	249,054	66	18/11/2021	72,943	495

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

### 6.5.1 Candidatos a PS na Estimativa do Efeito Atmosférico

Utilizou-se *ASI* com valor igual a 0,80 na seleção de pontos PS. Isso possibilitou 87.608 *pixels* espalhados em imagens SAR e gerou 262.790 conexões entre eles (Figura 94).

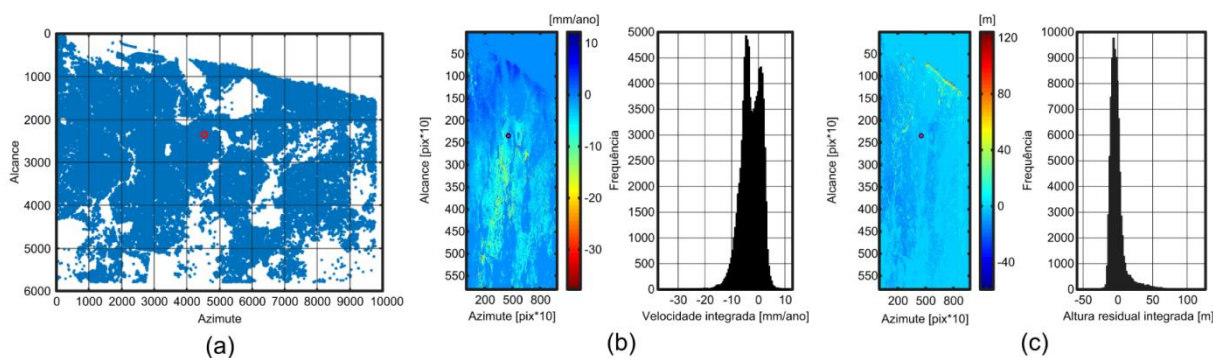
Figura 94 – Informações: (a) pontos candidatos a PS, (b) histograma coerente da conexão e (c) gráfico da conexão coerente.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 94a, obteve-se um ponto de referência estável com valor de coerência temporal igual a 0,99 a partir dos parâmetros estimados: tendência linear [-10 e 10] mm/ano e altura [-20 e 20] m. Essas informações serviram de base para o processo da medição InSAR (Figura 95). Na Figura 94b, constatou-se valor de coerência melhor que 0,9 para pontos PS. Na Figura 94c, verificou-se valor de coerência de conexão acima de 0,8.

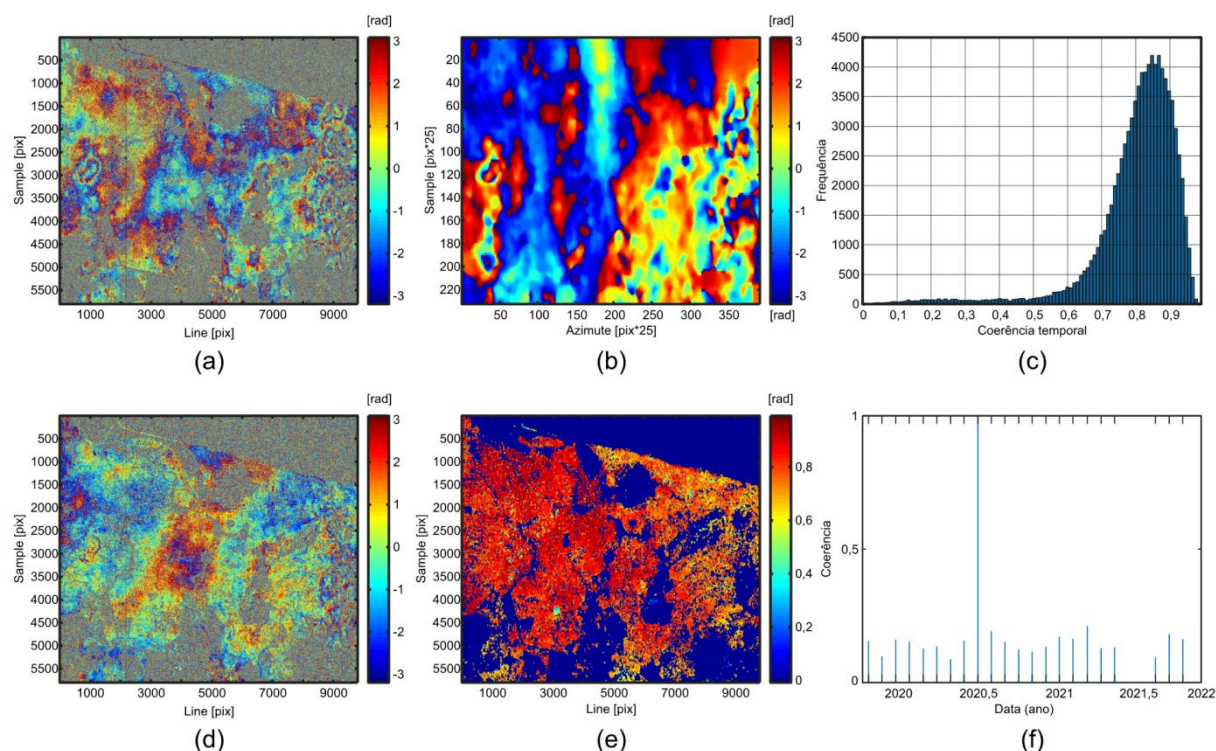
Figura 95 – Elementos: (a) indicação do ponto de referência em vermelho, (b) velocidade integrada e (c) altura residual integrada.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na comparação com o ponto de referência (Figura 95a), o histograma da velocidade integrada (Figura 95b) apresentou dois picos: um centrado em zero e outro em -5 mm/ano – referente à pontos de rebaixamento. O pico do histograma da altura residual integrada (Figura 95c) exibiu valor em torno de zero. Esses aspectos indicaram estabilidade do ponto de referência adotado. Na sequência, a estimativa do efeito atmosférico ocorreu para todas as imagens e possibilitou eliminar e/ou reduzir sua ação nos interferogramas. Essa ação permitiu aumentar o valor da coerência temporal para a maioria dos produtos (Figura 96).

Figura 96 – Aspectos: (a) interferograma com APS (13/08/2020), (b) estimativa do efeito atmosférica (13/08/2020), (c) gráfico da conexão coerente, (d) interferograma sem APS (13/08/2020), (e) coerência temporal e (f) coerência de cada imagem *slave* em relação à cena *master*.



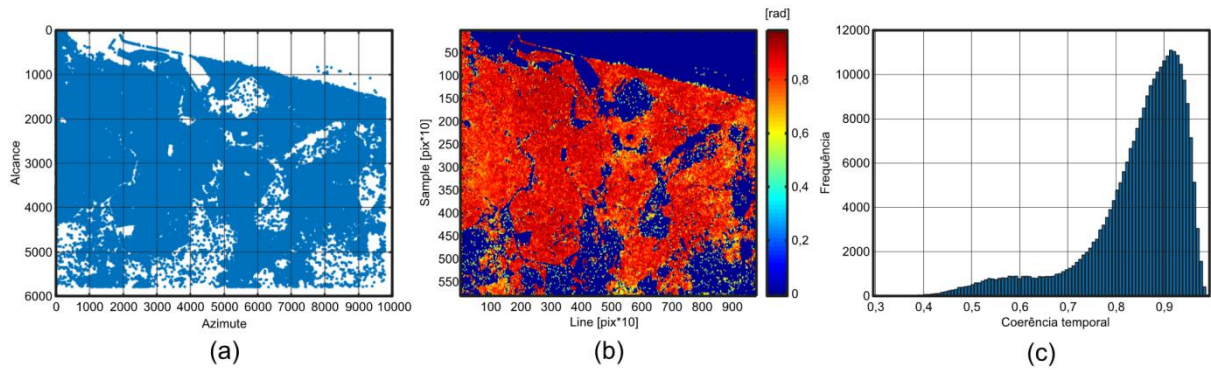
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 96a, houve maior intensidade do efeito atmosférico nas zonas Norte e Oeste. A eliminação e/ou redução dessa perturbação ocorreu para cada imagem SAR a partir de sua estimativa, a exemplo da Figura 96b. A correção melhorou a coerência temporal do histograma, que resultou em valor melhor que 0,8 (Figura 96c). O uso de imagens corrigidas possibilitou interferogramas aperfeiçoados (Figura 96d). A melhora se deu a partir da estimativa e remoção de APS via candidatos PS (Figura 96e), os quais apresentaram coerência temporal em torno de 0,7. Essa ação se repetiu para todos os produtos. Na comparação com a cena *master*, a maioria das imagens *slaves* exibiu valor de coerência abaixo de 0,3 (Figura 96f).

### 6.5.2 Seleção de PS na Análise de Série Temporal

Empregou-se *ASI* com valor igual 0,70 na seleção de observáveis PS (Figura 97). Isso resultou em 270.826 pontos de medição na análise temporal (Figura 97a).

Figura 97 – Análise de dados PS: (a) pontos de medição, (b) coerência temporal e (c) histograma da coerência temporal.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

De acordo com a Figura 97b e a Figura 97c, a densidade de pontos de medição PS selecionados revelou em sua maioria alto valor de coerência temporal com grandeza acima de 0,8. A maior coerência temporal indicou conformidade na adoção dos parâmetros estimados: [-10 e 10] mm/ano e [-20 e 20] m. Esses aspectos se refletiram na análise estatística de observáveis PS referentes à tendência linear e à altura. Na sequência, pontos PS para o monitoramento PSInSAR foram processadas com os valores (Figura 98): [-25 e 25] mm/ano e [-60 e 60] m.

Figura 98 – Análise estatística de pontos de medição PS: (a) velocidade, (b) deslocamento acumulado, (c) altura e (d) altura residual.

(continua)

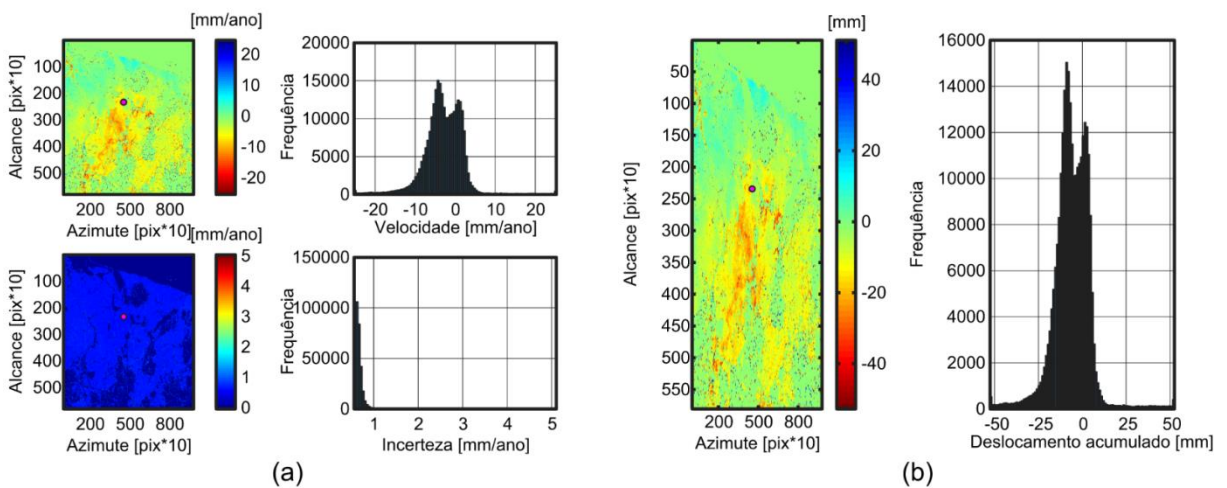
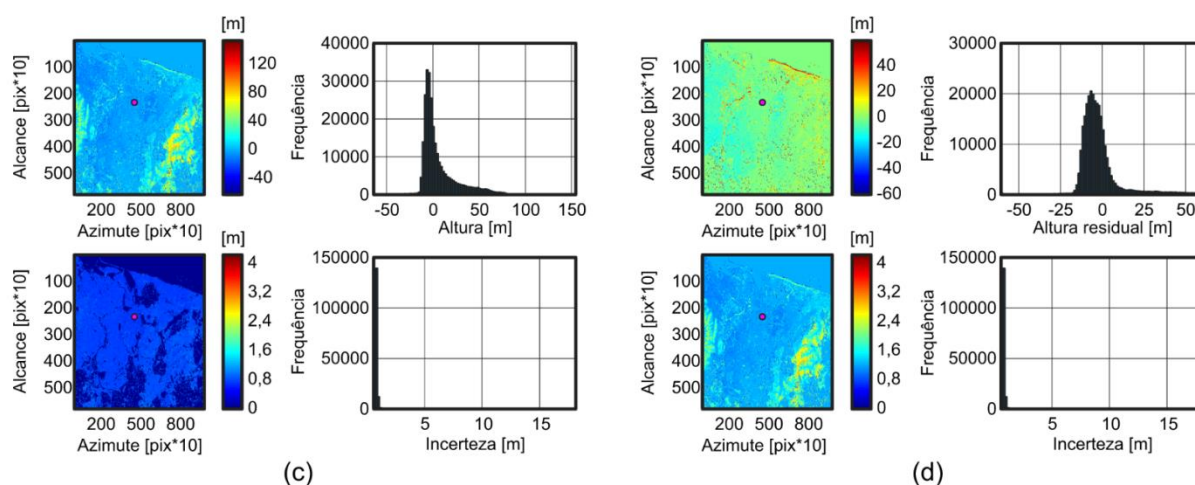


Figura 98 – Análise estatística de pontos de medição PS: (a) velocidade, (b) deslocamento acumulado, (c) altura e (d) altura residual.

(conclusão)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 98a, a velocidade variou de -20 mm/ano a 5 mm/ano com maior ocorrência para grandezas negativas. A incerteza da velocidade revelou em sua maioria valores em torno de 0,3 mm/ano. Na Figura 98b, verificou-se em sua maior parte deslocamento acumulado negativo – caracterizado por rebaixamento – com grandeza próxima de -30 mm e valor positivo em torno de 20 mm. Na Figura 98c, a maioria de pontos de medição PS se situou em terreno com altura abaixo de 20 m. Na Figura 98d, a altura residual denotou valores entre -20 m e 25 m. Para ambas as figuras a incerteza altimétrica foi melhor que 1,5 m.

## 6.6 Representação do Monitoramento

O monitoramento resultou da geocodificação de série temporal de imagem SAR na geração de pontos PS. Para isso, utilizaram-se como critério os parâmetros (Tabela 34): índice de estabilidade de amplitude (*ASI*), coerência temporal e refletividade.

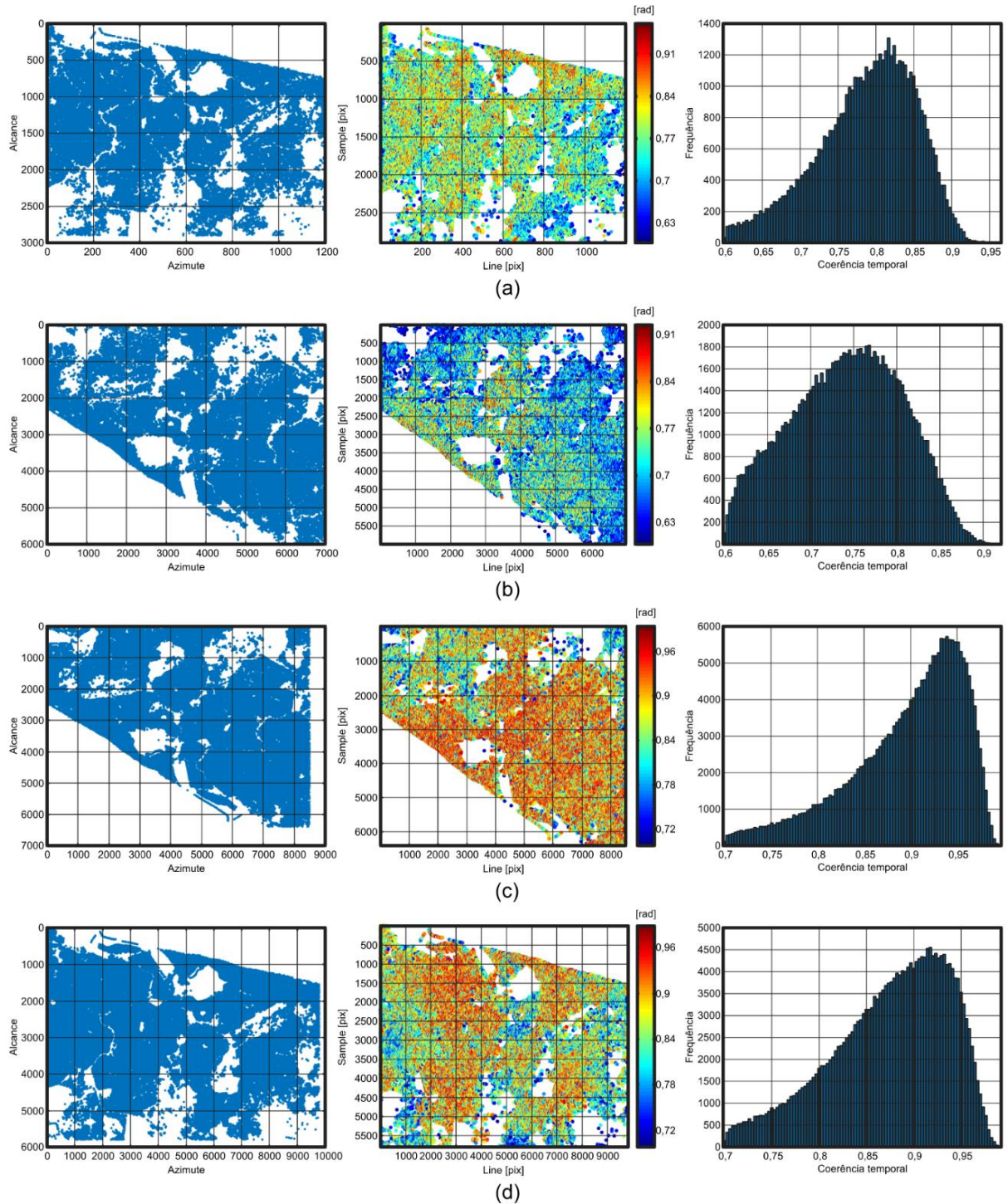
Tabela 34 – Informações envolvidas na série temporal.

Imagem SAR	Parâmetros			Pontos PS
	<i>ASI</i>	Coerência temporal	Refletividade	
Sentinel-1			0	52.449
COSMO-SkyMed	> 0,60	> 0,60		99.277
PAZ ascendente			> 2,2	226.300
PAZ descendente	> 0,70	> 0,70	> 1,5	226.642

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A utilização dos parâmetros da Tabela 34 permitiu eliminar pontos de medição em água (Figura 99). A maior densidade de observáveis PS ocorreu no satélite PAZ devido à alta resolução espacial (1,76 m x 3,01 m)  $\approx$  13 pontos/ha em relação ao COSMO-SkyMed (2,6 m x 2,6 m)  $\approx$  6 pontos/ha e ao Sentinel-1 (5 m x 20 m)  $\approx$  3 pontos/ha.

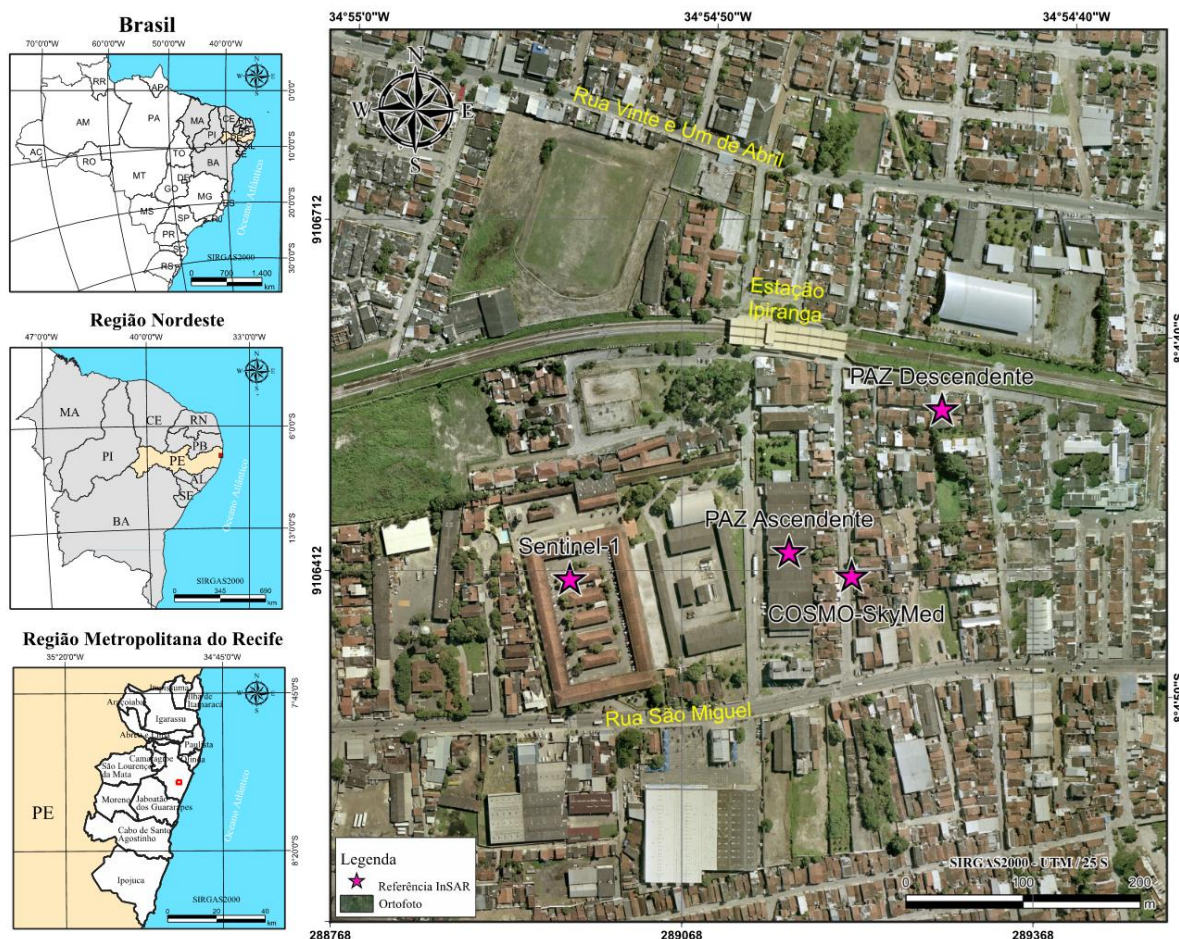
Figura 99 – Pontos de medição PS mais coerência temporal das imagens: (a) Sentinel-1, (b) COSMO-SkyMed, (c) PAZ ascendente e (d) PAZ descendente.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

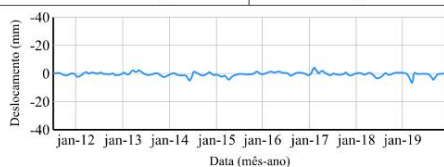
O processamento de dados da Figura 99 ocorreu com ponto de referência InSAR em área comum nas imagens de satélite. A marcação se situou em uma zona geológica estável para o período de estudo (Figura 100). Isso assegurou maior confiabilidade às medições PS.

Figura 100 – Mapa de localização da referência InSAR.



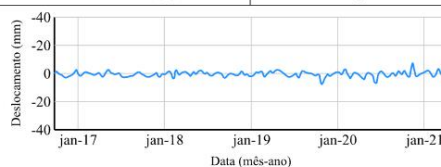
**COSMO-SkyMed**

Informações da referência	Velocidade LOS (mm/ano): $0,0 \pm 0,21$
Altura (m): $1,6 \pm 0,2$	Deslocamento acumulado (mm): 0
Altura relativa ao terreno (m): -0,7	Coerência temporal: 0,85



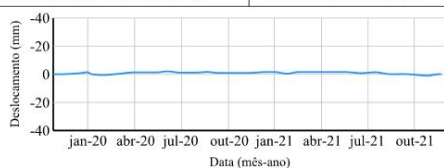
**Sentinel-1**

Informações da referência	Velocidade LOS (mm/ano): $0,0 \pm 0,48$
Altura (m): $2,50 \pm 6,0$	Deslocamento acumulado (mm): 0
Altura relativa ao terreno (m): -0,7	Coerência temporal: 1,0



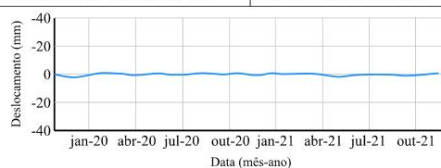
**PAZ Ascendente**

Informações da referência	Velocidade LOS (mm/ano): $0,0 \pm 0,57$
Altura (m): $2,9 \pm 1,2$	Deslocamento acumulado (mm): 0
Altura relativa ao terreno (m): 0,0	Coerência temporal: 0,99



**PAZ Descendente**

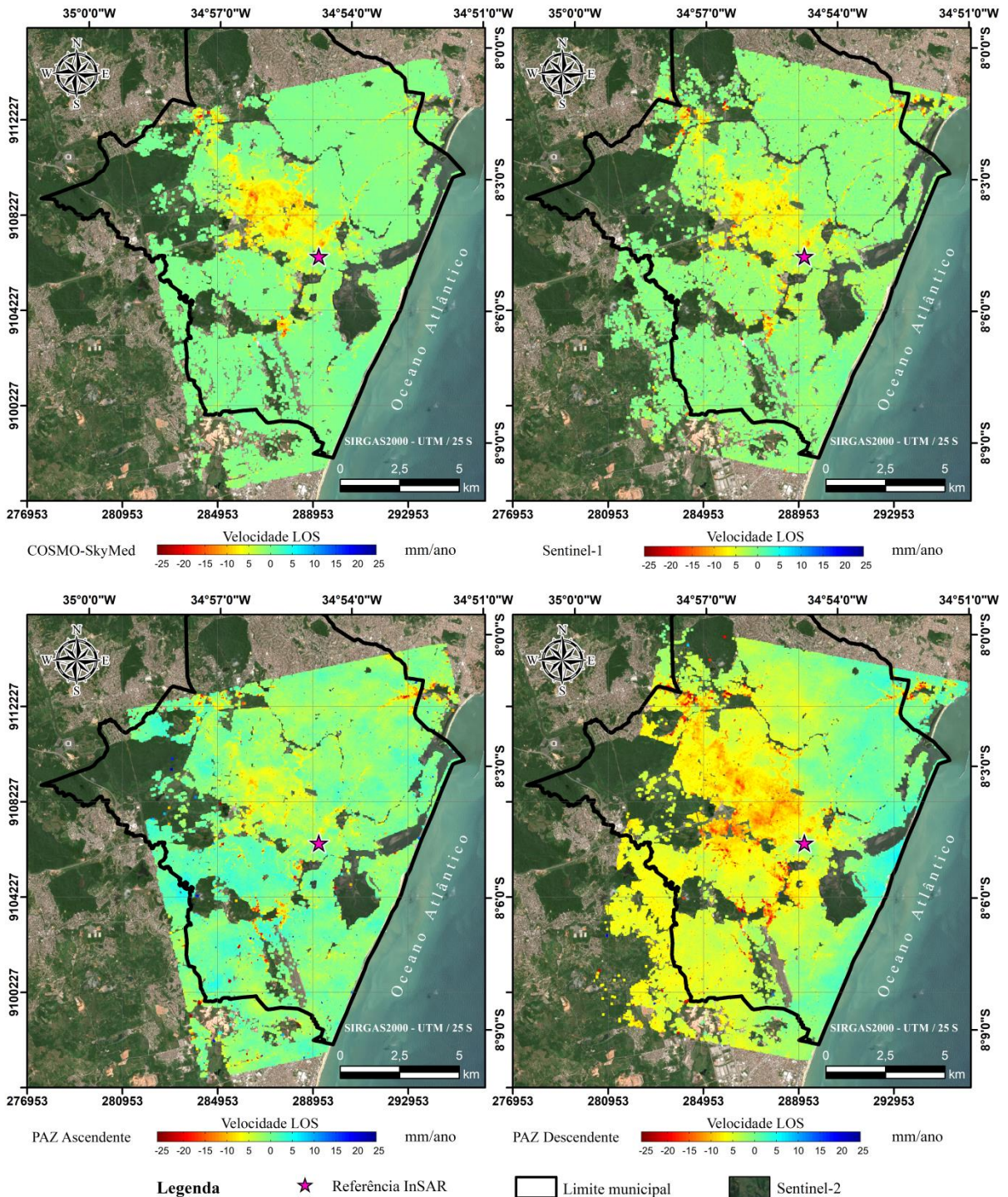
Informações da referência	Velocidade LOS (mm/ano): $0,0 \pm 0,58$
Altura (m): $3,2 \pm 0,7$	Deslocamento acumulado (mm): 0
Altura relativa ao terreno (m): 0,0	Coerência temporal: 0,99



Fonte: dados geoespaciais (PCR, 2007; IBGE, 2018a, 2018b).

O estudo da subsidência do solo resultou em mapas e séries temporais de velocidade média de deslocamento para o intervalo de tempo de mais de 10 anos de monitoramento, de julho de 2011 a novembro de 2021. Ao longo desse período, detectou-se um amplo rebaixamento superficial do Recife (Figura 101).

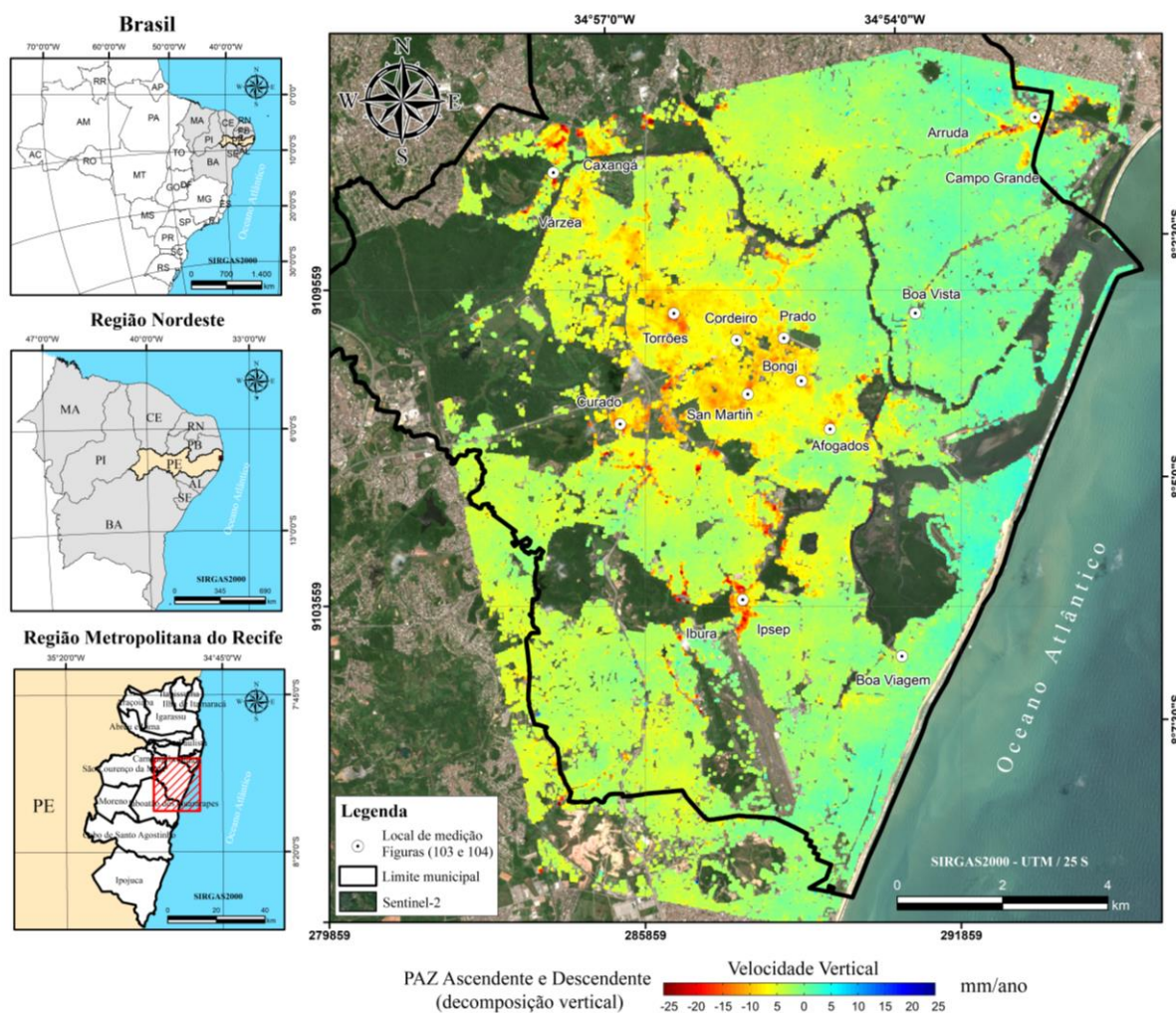
Figura 101 – Mapas de velocidade na direção LOS dos satélites: COSMO-SkyMed (2011-2019), Sentinel-1 (2016-2021) e PAZ (2019-2021).



Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2018b; USGS, 2019).

Na Figura 101, a subsidência do solo apresentou mesmo padrão de deformação nas imagens COSMO-SkyMed, Sentinel-1 e PAZ. Esse aspecto permitiu confirmar os resultados entre os produtos SAR. A velocidade medida ocorreu na linha de visão (LOS) do Radar, menos preciso. No entanto, por meio de imagens PAZ de órbita ascendente e descendente se obteve a movimentação real (vertical) da superfície (Figura 102).

Figura 102 – Mapa de velocidade na direção vertical via satélite PAZ (2019-2021).



Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

A análise da Figura 101 e da Figura 102 revelou diversos locais de rebaixamento. Os valores negativos (amarelo a vermelho) exibiram movimentos para longe do satélite (subsidência do solo), enquanto os valores positivos (ciano a azul) indicaram movimentos em direção ao satélite (elevação superficial). Os pixels de cor verde foram considerados estáveis, tiveram taxa de deslocamento em torno de:  $\pm 0,30$  mm/ano para COSMO-SkyMed;  $\pm 0,55$  mm/ano para Sentinel-1; e  $\pm 0,60$  mm/ano para PAZ (ascendente e descendente).

As principais ocorrências da subsidência do solo se situaram na zona Oeste com grandes áreas e velocidades de rebaixamento (Figura 103). A região exibiu deslocamento em torno de -15 mm/ano ao longo dos bairros do Prado, Afogados, Torrões, Cordeiro, Bongí, San Martin, Curado, Várzea e Caxangá. Casos semelhantes, mas de área menor, ocorreram entre os bairros do Ipsep e Ibura – responsáveis pelo maior afundamento da cidade com velocidade próxima de -25 mm/ano.

Figura 103 – Séries temporais de deslocamento da zona Oeste: COSMO-SkyMed (CSK) à esquerda, Sentinel-1 (S1) no meio e PAZ (asc e desc) à direita.

(continua)

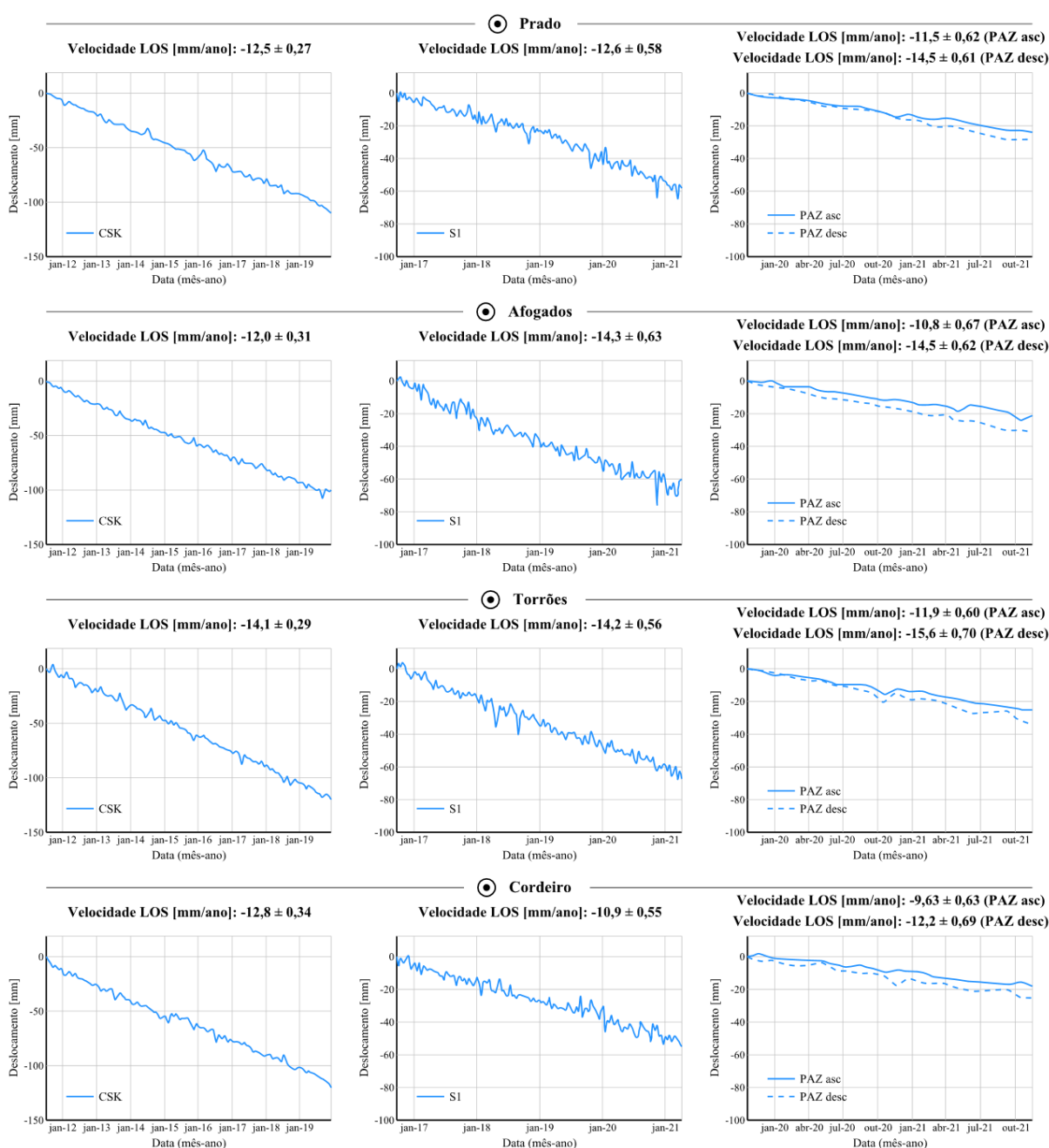
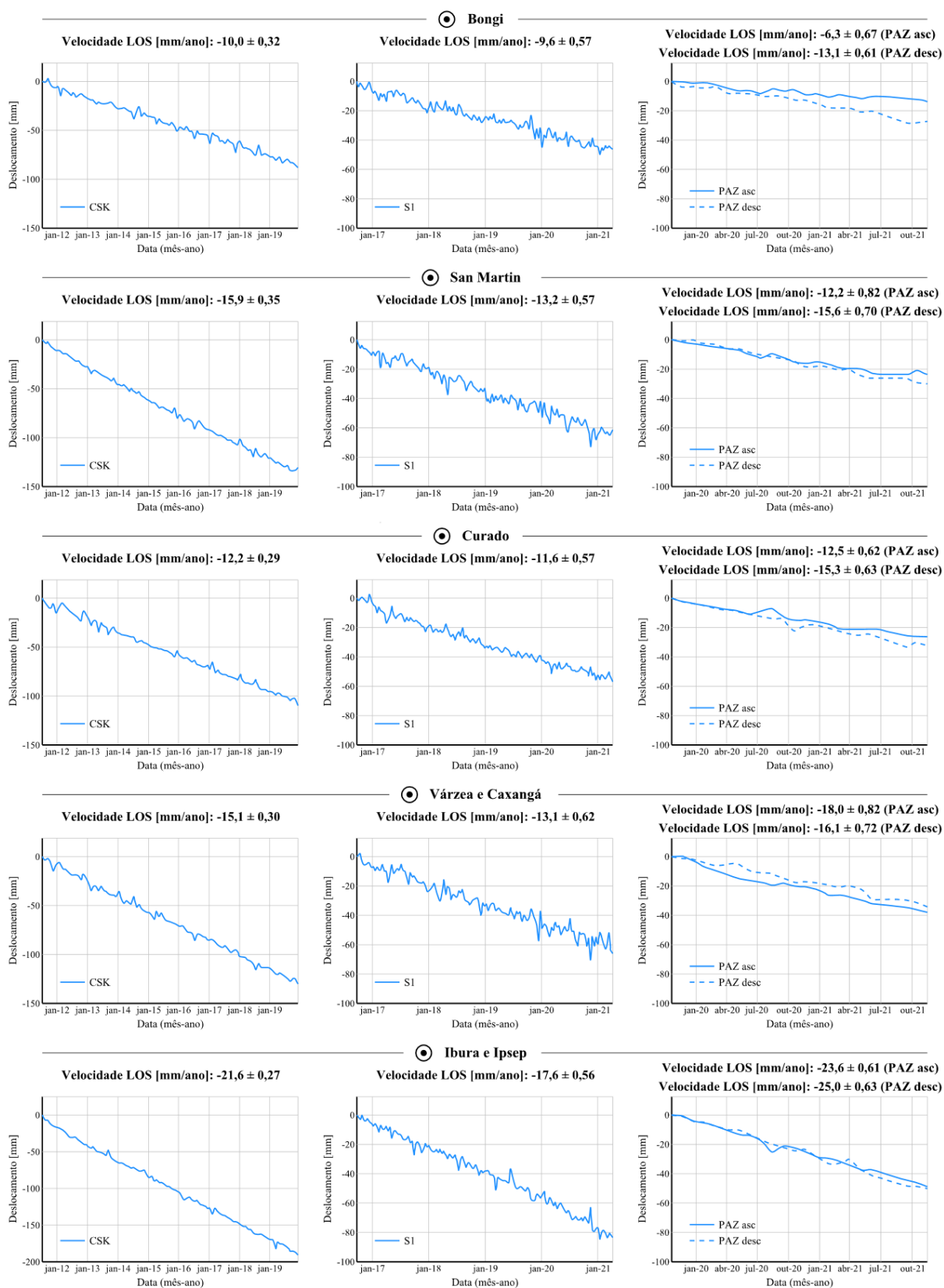


Figura 103 – Séries temporais de deslocamento da zona Oeste: COSMO-SkyMed (CSK) à esquerda, Sentinel-1 (S1) no meio e PAZ (asc e desc) à direita.

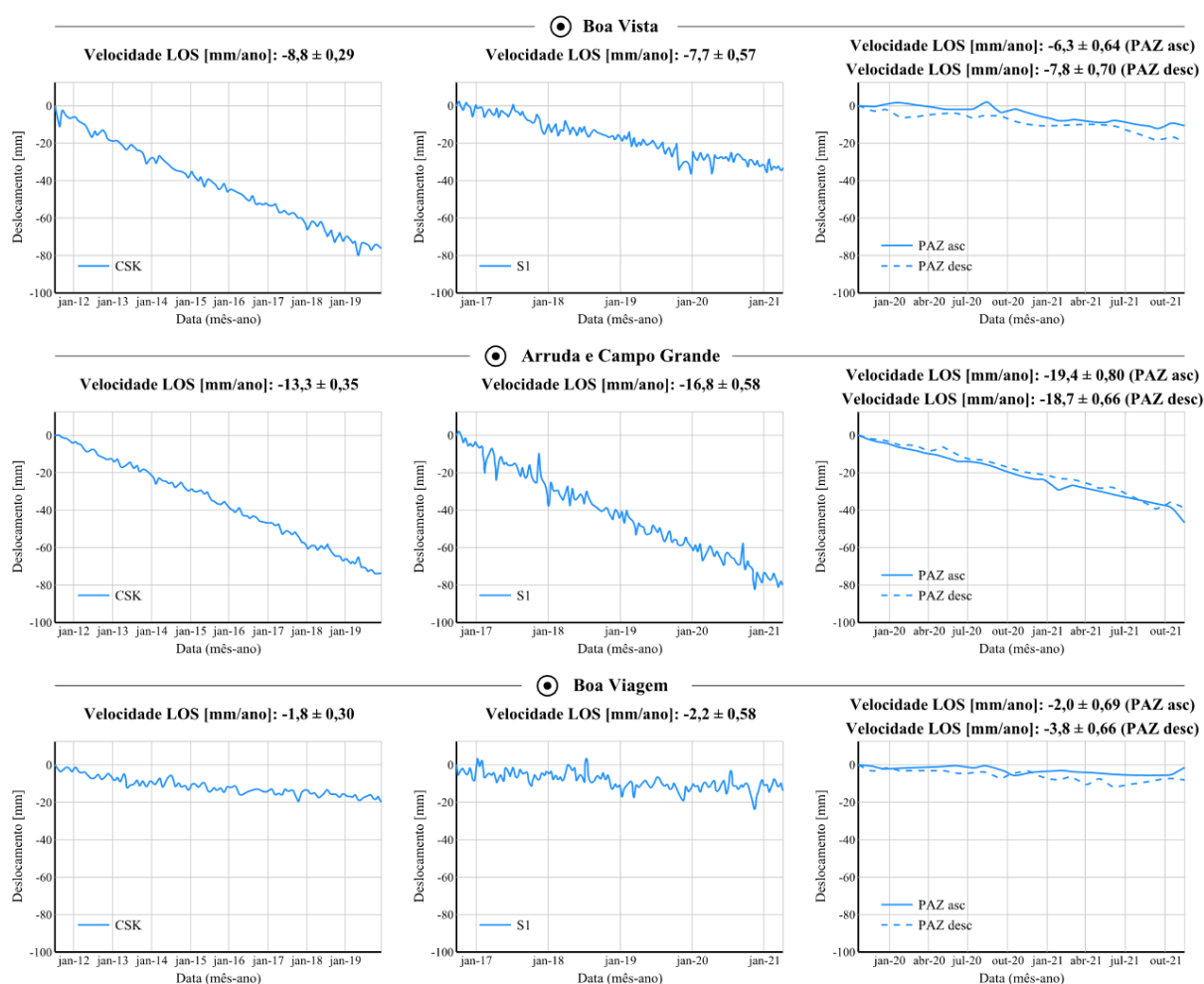
(conclusão)



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Além dessas localidades, observaram-se rebaixamentos nas zonas (Figura 104): Norte (Arruda e Campo Grande) com velocidades próximas de  $-20$  mm/ano; Centro (Boa Vista) com valores perto de  $-10$  mm/ano; e Sul (Boa Viagem) com taxas próximas de  $-4$  mm/ano.

Figura 104 – Séries temporais de deformação da zona Norte, Centro e Sul: COSMO-SkyMed (CSK) à esquerda, Sentinel-1 (S1) no meio e PAZ à direita (asc e desc).



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Em geral, a classificação da subsidência do solo da cidade do Recife apresentou quatro níveis de rebaixamento (Tabela 35): baixo, moderado, elevado e alto.

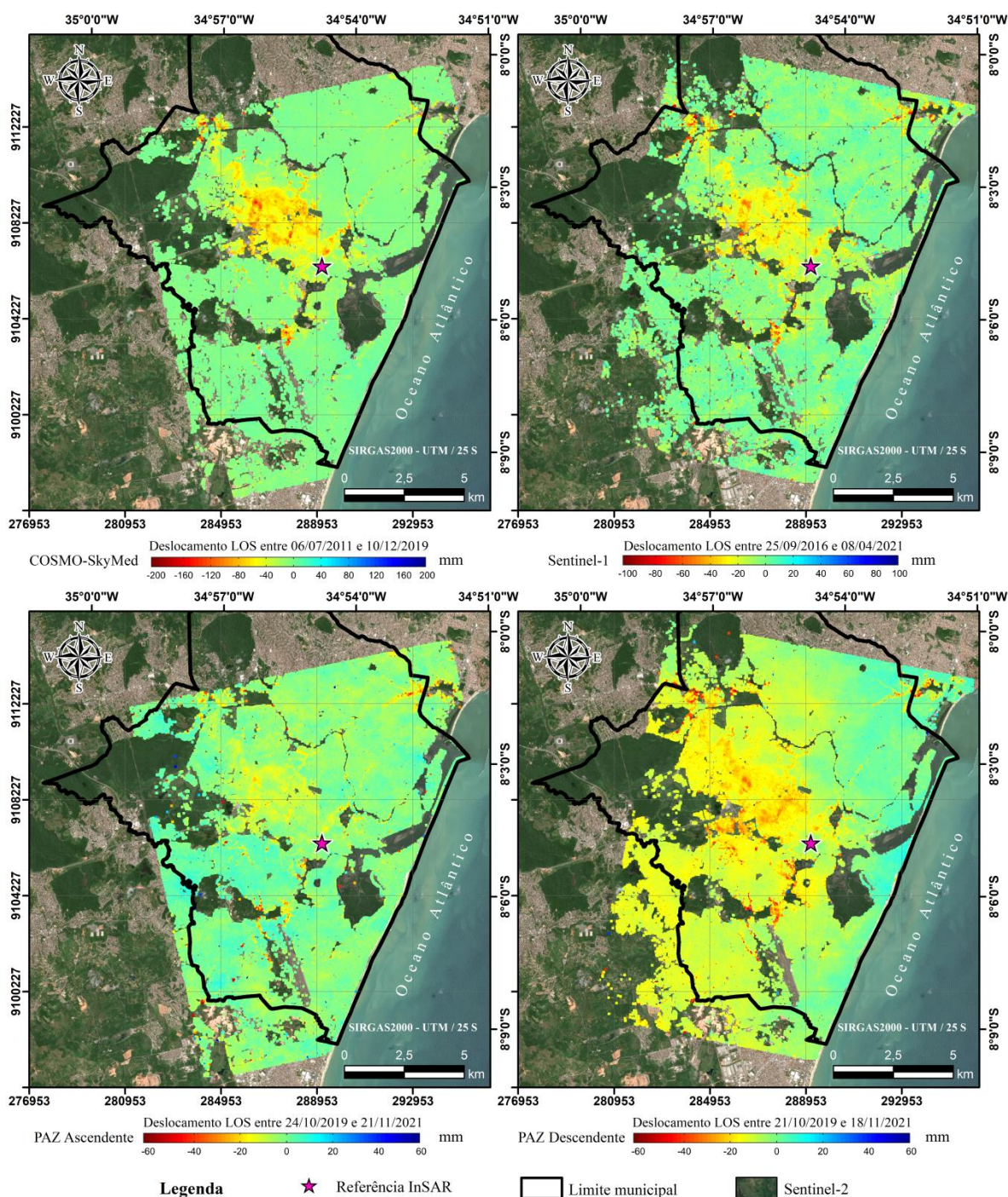
Tabela 35 – Classificação da subsidência do solo do Recife.

Velocidade LOS (mm/ano)	Rebaixamento superficial	Zona
$\geq -10$	Baixo	Sul
$\geq -15$	Moderado	Centro
$\geq -20$	Elevado	Norte
$\leq -25$	Alto	Oeste

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

As altas taxas de subsidência do solo da zona Oeste foram responsáveis pelos os maiores deslocamentos. O rebaixamento acumulado das regiões Oeste, Norte, Centro e Sul, nessa ordem, foi cerca de (Figura 105): 120 mm, 110 mm, 75 mm e 15 mm por COSMO-SkyMed; 60 mm, 75 mm, 35 mm e 10 mm por Sentinel-1; 27 mm, 23 mm, 15 mm e 8 mm por PAZ ascendente; e 30 mm, 25 mm, 20 mm e 10 mm por PAZ descendente.

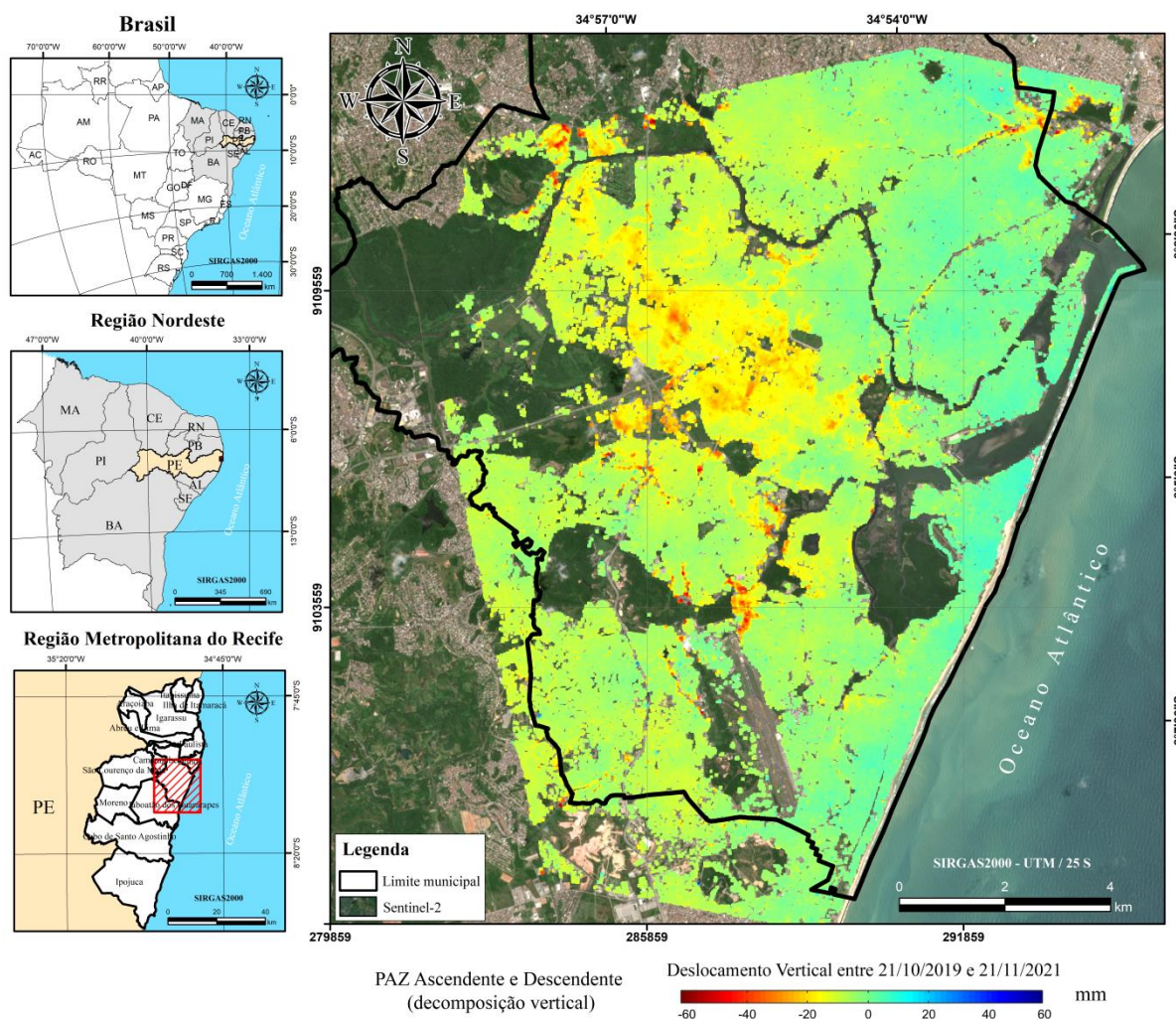
Figura 105 – Mapas de rebaixamento acumulado na direção LOS dos satélites: COSMO-SkyMed (2011-2019), Sentinel (2016-2021) e PAZ (2019-2021).



Fonte: dados geospaciais (IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

O rebaixamento acumulado da Figura 105 foi na linha de visão (LOS) do Radar e apresentou mesmo padrão de deslocamento da subsidência do solo da Figura 101. Isso denotou conformidade com a variação dos valores empregados para esses resultados. Ademais, a utilização de imagens PAZ de órbita ascendente e descendente possibilitou a determinação do rebaixamento acumulado real da superfície (Figura 106).

Figura 106 – Mapa de rebaixamento acumulado na direção vertical via satélite PAZ (2019-2021).



Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

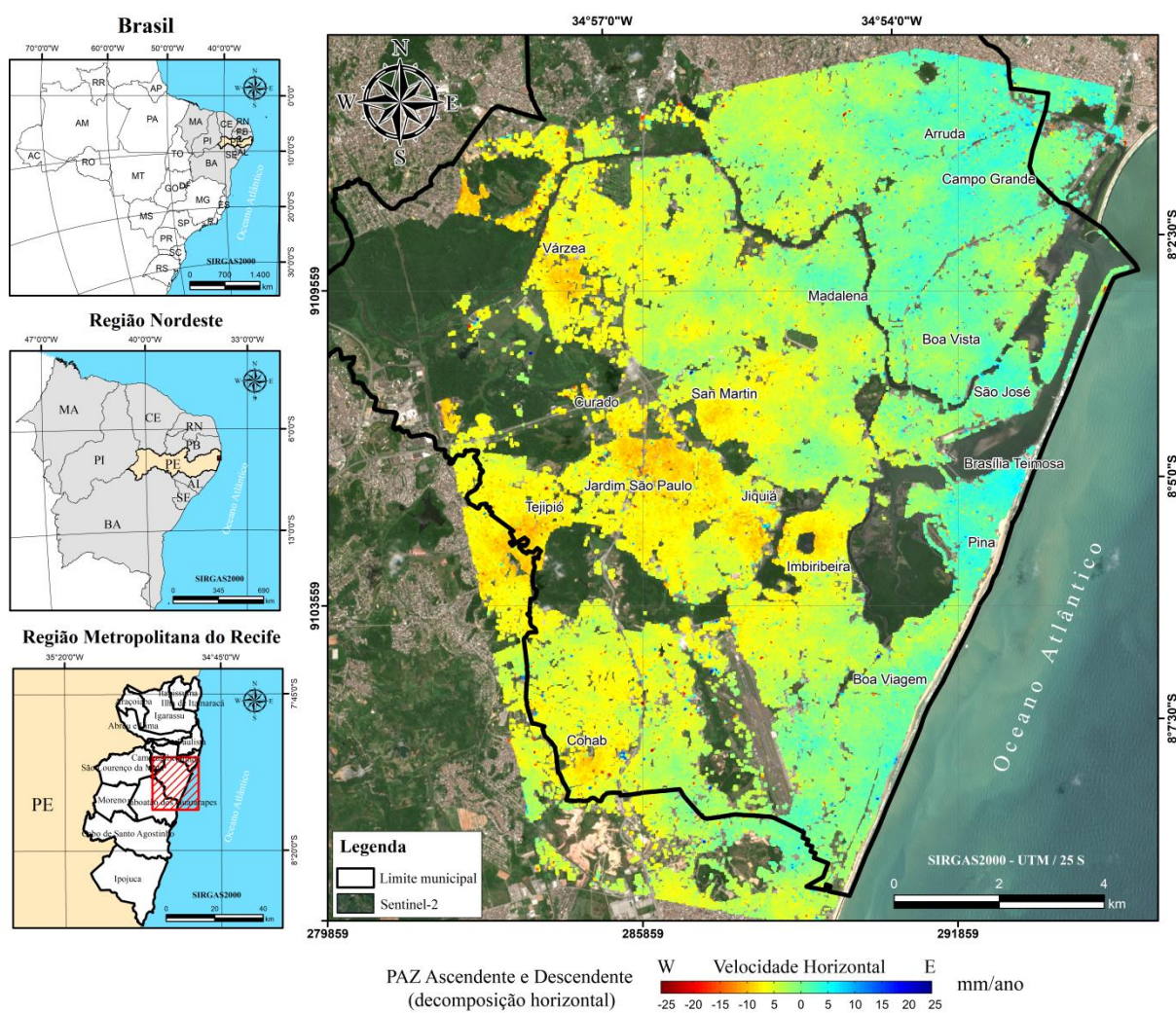
Na Figura 106, o rebaixamento acumulado real das regiões Oeste, Norte, Centro e Sul, nessa ordem, foi cerca de: 35 mm, 30 mm, 25 mm e 10 mm. Os valores foram referentes a 2,1 anos de monitoramento por imagens PAZ (2019-2021), e apresentaram similaridades com os produtos COSMO-SkyMed e Sentinel-1 (Figura 105).

De modo geral, ao longo de mais de 10 anos de observação SAR o rebaixamento acumulado nas regiões Oeste, Norte, Centro e Sul resultou em valores da ordem de: 150 mm, 135 mm, 90 mm e 25 mm, respectivamente. No entanto, o maior afundamento da cidade

ocorreu entre os bairros do Ibura e Ipsep, situado na zona Oeste, com valor perto de 230 mm para o período investigado (2011-2021).

Além de determinar o fenômeno da subsidência do solo, a pesquisa obteve também, de forma secundária, a movimentação horizontal (Leste-Oeste) da superfície do Recife. A obtenção resultou da utilização conjunta de imagens PAZ de órbita ascendente e descendente nesta investigação (Figura 107).

Figura 107 – Mapa de velocidade na direção horizontal via satélite PAZ (2019-2021).



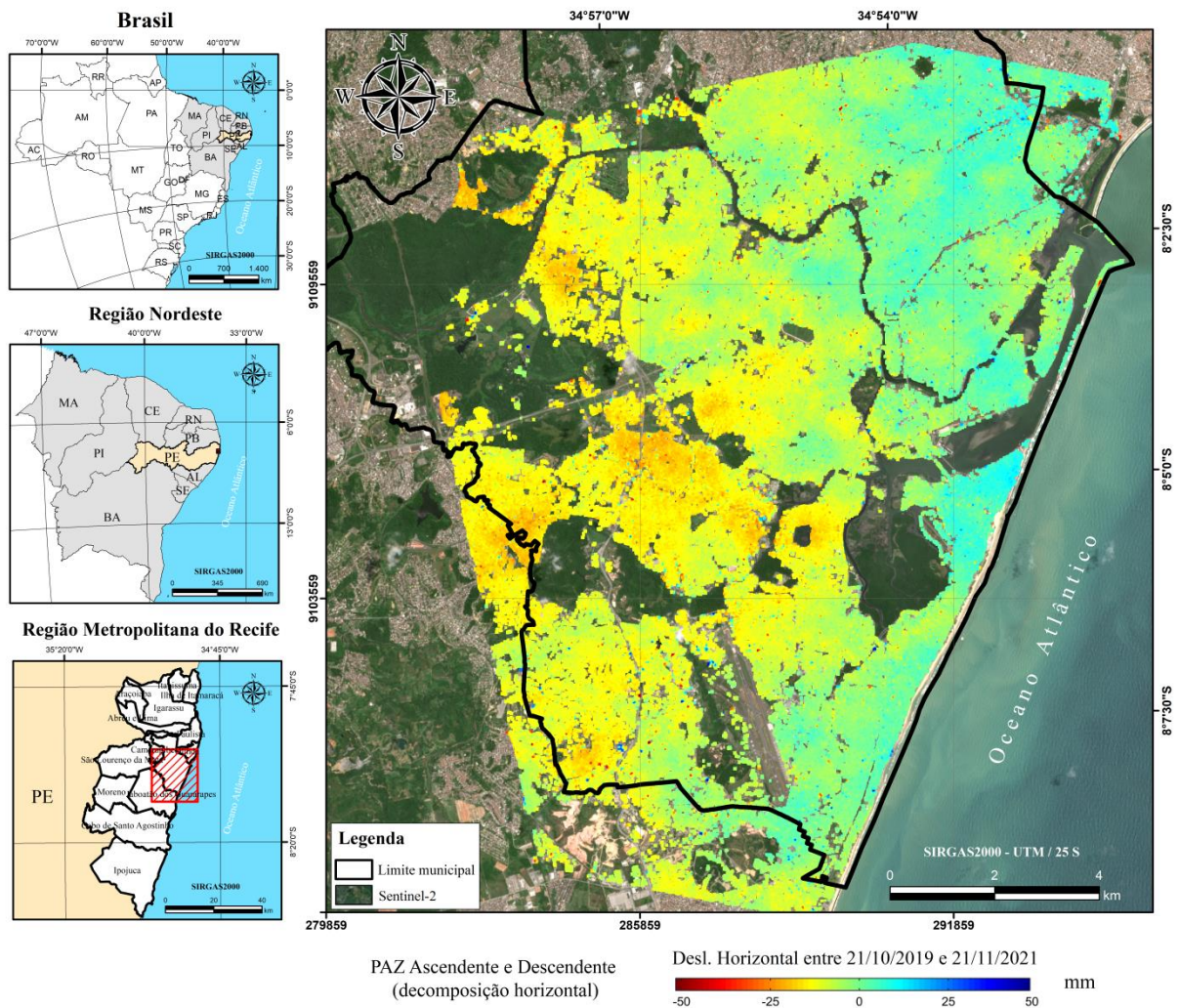
Fonte: dados geospaciais (IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

A análise da Figura 107 revelou diversos locais de deslocamento horizontal. Os valores negativos (amarelo a vermelho) representaram movimentos no sentido Oeste (W), enquanto os valores positivos (ciano a azul) indicaram movimentos no sentido Leste (E). As principais ocorrências da velocidade planimétrica se localizaram na zona Oeste.

Nessa região a taxa de movimentação plana foi em torno de -10 mm/ano ao longo dos bairros do Curado, Várzea, San Martin, Jardim São Paulo, Tejipió, Jiquiá, Cohab e Imbiribeira. Além desses bairros, observaram-se também deslocamentos horizontais com valores próximo de 7 mm/ano nas zonas: Norte-Centro (Arruda, Campo Grande, Madalena, Boa Vista e São José) e Sul (Brasília Teimosa, Pina e Boa Viagem).

A movimentação horizontal acumulada da superfície (Figura 108) exibiu valores em torno de -20 mm para a zona Oeste e valores próximo de 15 mm para as regiões Norte-Centro e Sul. Em geral, tanto as áreas de deslocamento planimétrico quanto as localidades de subsidência do solo apresentaram as maiores extensões de deformação na zona Oeste da cidade. O padrão da deformação superficial do Recife revelou alguns locais de similaridade entre as movimentações horizontal (Figura 107) e vertical descendente (Figura 102). As prováveis causas podem estar relacionadas ao fenômeno da subsidência do solo.

Figura 108 – Mapa de deslocamento horizontal acumulado via satélite PAZ (2019-2021).



Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

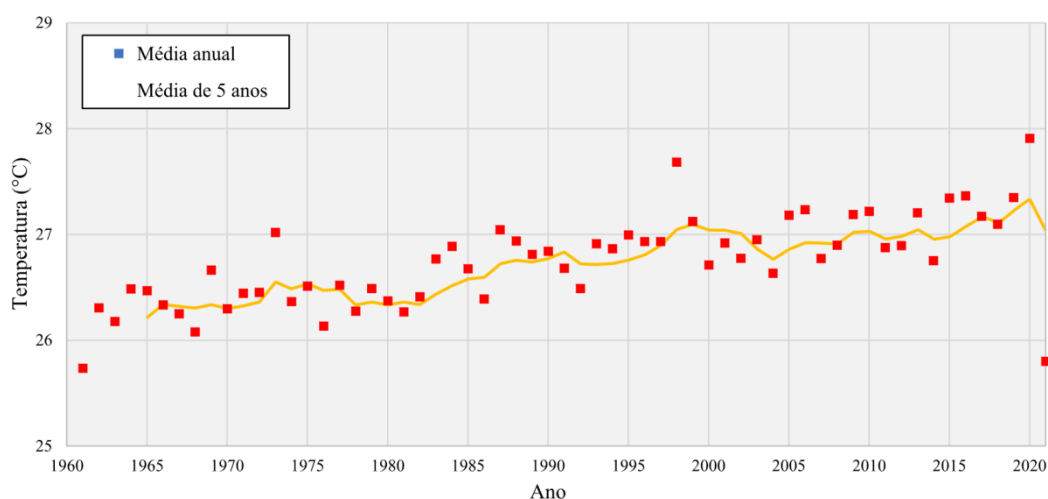
## 6.7 Validação dos Resultados PSInSAR

A análise do rebaixamento superficial do Recife ocorreu com investigação de: dados de estudos meteorológicos; características hidrogeológicas; expansão urbana; e levantamento geodésico. Isso de modo a compreender o papel dessas informações na avaliação, na predisposição e/ou no desencadeamento da subsidência do solo.

### 6.7.1 Análise Meteorológica

A análise das medições registradas pelas estações meteorológicas, disponíveis pelo INMET e pela APAC, permitiu a identificação das variações de precipitação e de temperatura ocorridas na área de estudo. A análise da temperatura (Figura 109), com base no cálculo da temperatura média anual para a série histórica de 1961 a 2021, identificou elevação de 0,9° C para o período de observação com crescimento uniforme a partir de 2004. O acréscimo da temperatura apresentou similaridade com dados de aquecimento climático no mundo. Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2021), a década (2011-2020) foi a mais quente já registrada. A temperatura média global em 2020 foi 1,2° C acima da era pré-industrial (1850-1900). Em geral, a evolução da temperatura contribuiu para o aumento da necessidade de água (TRATA BRASIL, 2020).

Figura 109 – Informações de temperatura média anual e média de cinco anos.

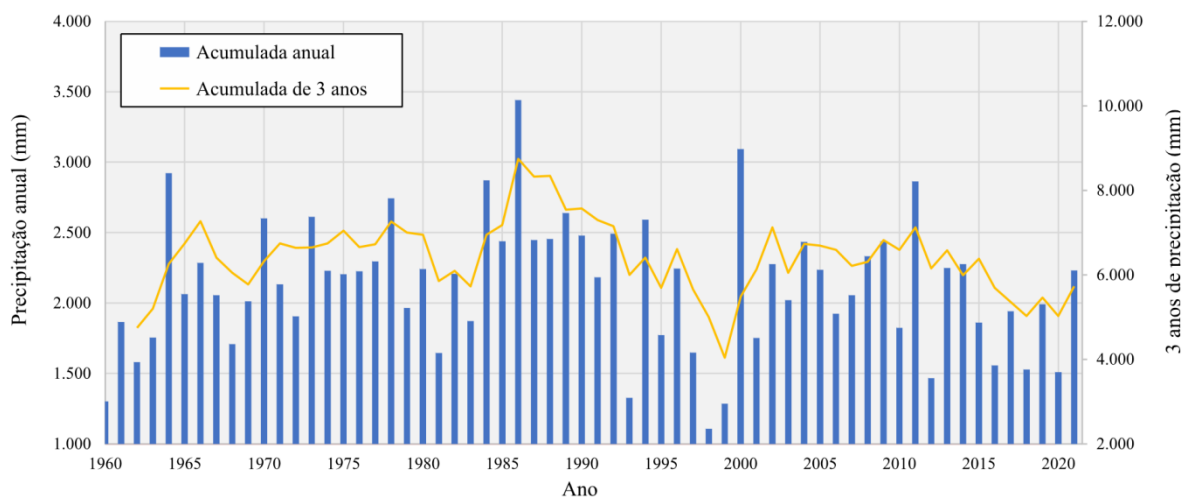


Fonte: APAC (2021); INMET (2021).

A observação da precipitação acumulativa de 1 ano e, bem como, de 3 anos para a série histórica de 1960 a 2021 não revelou nenhuma tendência climática (Figura 110). No entanto, identificaram-se ciclos de períodos úmido e seco. Em particular, ao analisar a precipitação acumulada de 3 anos se verificaram intervalos de precipitação máxima no

intervalo de 1984 a 1986 e mínima no intervalo de 1998 a 1999 – anterior em mais de uma década ao período de observação por imagens SAR.

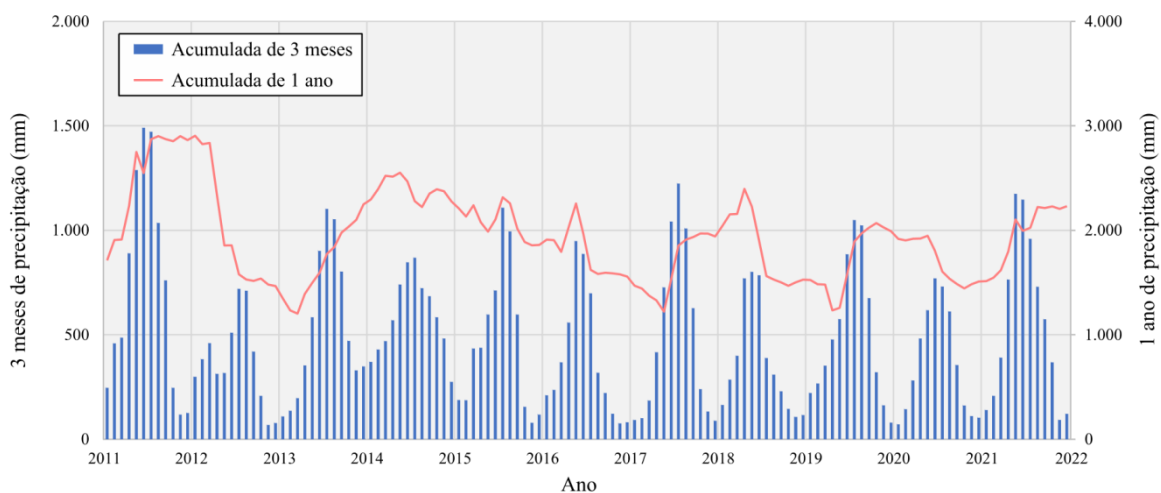
Figura 110 – Informações de precipitação acumulada anual e de três anos.



Fonte: APAC (2021); INMET (2021).

Para o intervalo de aquisição de dados SAR (2011-2021), realizou-se análise de precipitação acumulada de 1 ano e de forma trimestral (Figura 111). A análise dos dados de precipitação acumulada de 3 meses indicou uma tendência sazonal típica, com até 1500 mm de maio a julho e menos de 500 mm de setembro a novembro. A análise dos dados de precipitação acumulada de 1 ano revelou um período úmido de 2011 a 2012 com valores acima de 2500 mm e um período menor de chuva de 2016 a 2021 com precipitação em grande parte abaixo de 2000 mm.

Figura 111 – Informações de precipitação acumulada de 1 ano e de três meses.

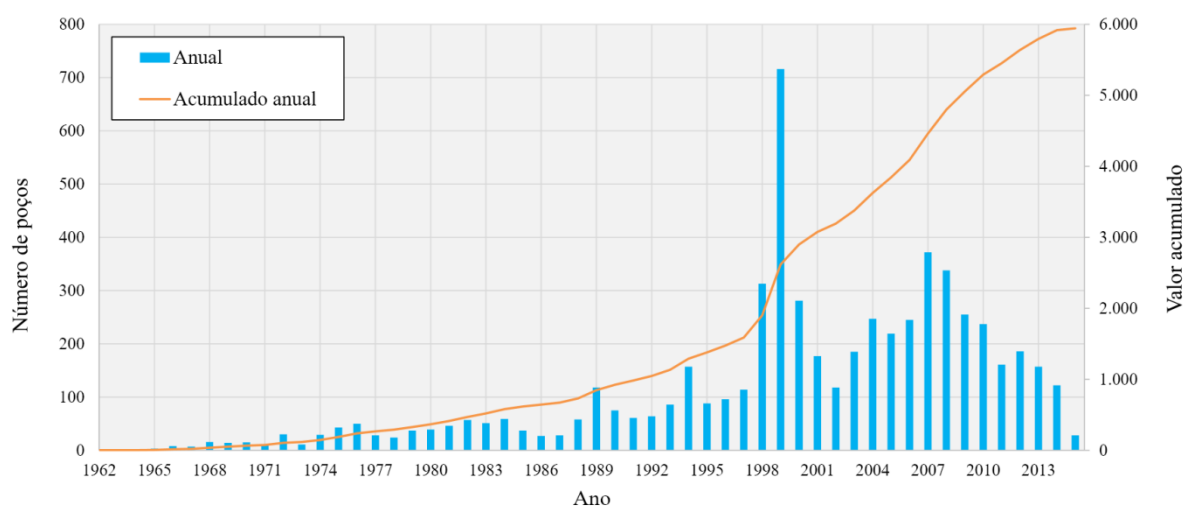


Fonte: APAC (2021); INMET (2021).

### 6.7.2 Análise do Monitoramento Hidrológico e de Dados Litológicos

A concentração de poços em Recife se estimou como uma das maiores do país com valor estimado em 13 mil captações (ALISSON, 2013). No entanto, apenas menos da metade desse valor foi registrado na base de dados do SIAGAS (CPRM, 2021) – algo em torno de 5.080 poços. Segundo Pernambuco (2017), de forma histórica (Figura 112) a perfuração de poços em Recife se impulsionou a partir da década de 1970 com média anual de 28 poços; na década de 1980 esse número se elevou para 52 poços anuais; na década de 1990 teve um aumento para 177 poços por ano; nos anos 2000 houve um crescimento para 243 poços anuais; e de 2010 a 2015 apresentou um registro médio de 148 poços por ano.

Figura 112 – Evolução de poços no Recife.

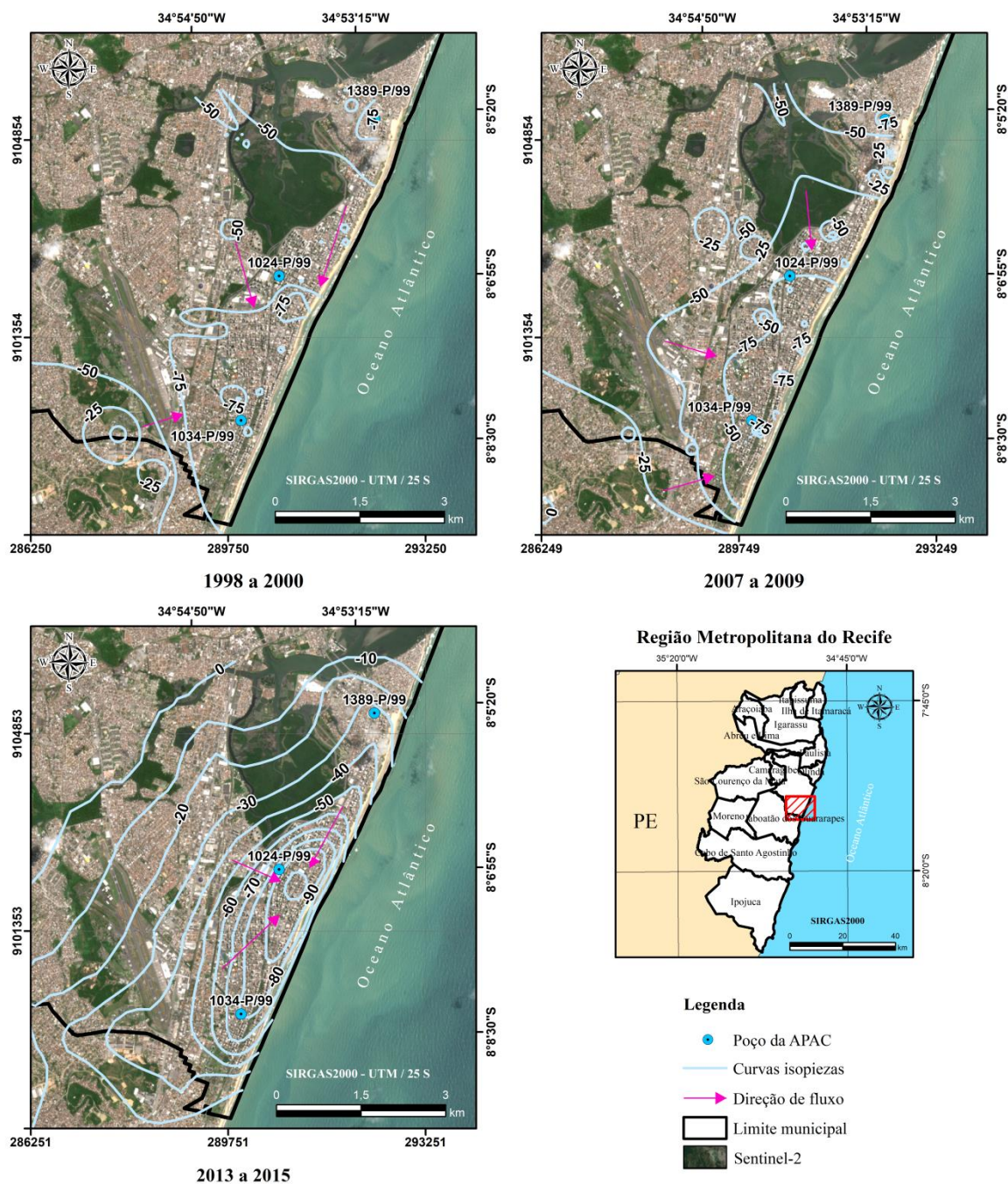


Fonte: Pernambuco (2017).

Na Figura 112, a perfuração de poços no Recife se intensificou no ano de 1998 a 1999. Essas épocas se caracterizaram por fortes estiagens na cidade, com enfrentamento de longos períodos de racionamento de água pela população. Tal fato contribuiu para a depleção da superfície potenciométrica de forma acentuada em vários locais da região devido às intensas explorações das águas subterrâneas dos sistemas aquíferos Cabo e Beberibe, ao longo de décadas (COSTA; COSTA FILHO, 2004).

A análise do monitoramento desses mananciais envolveu três momentos: (i) de 1998 a 2000, (ii) de 2007 a 2009 e (iii) de 2013 a 2015. O estudo dos dois primeiros períodos ocorreu com informações de níveis piezométricos de poços observados (PERNAMBUCO, 2017). A investigação do intervalo mais recente se realizou com simulação numérica de dados de recarga e perda de água (PERNAMBUCO, 2017). Os trabalhos resultaram na descrição de curvas isopiezas dos aquíferos Cabo (Figura 113) e Beberibe (Figura 114).

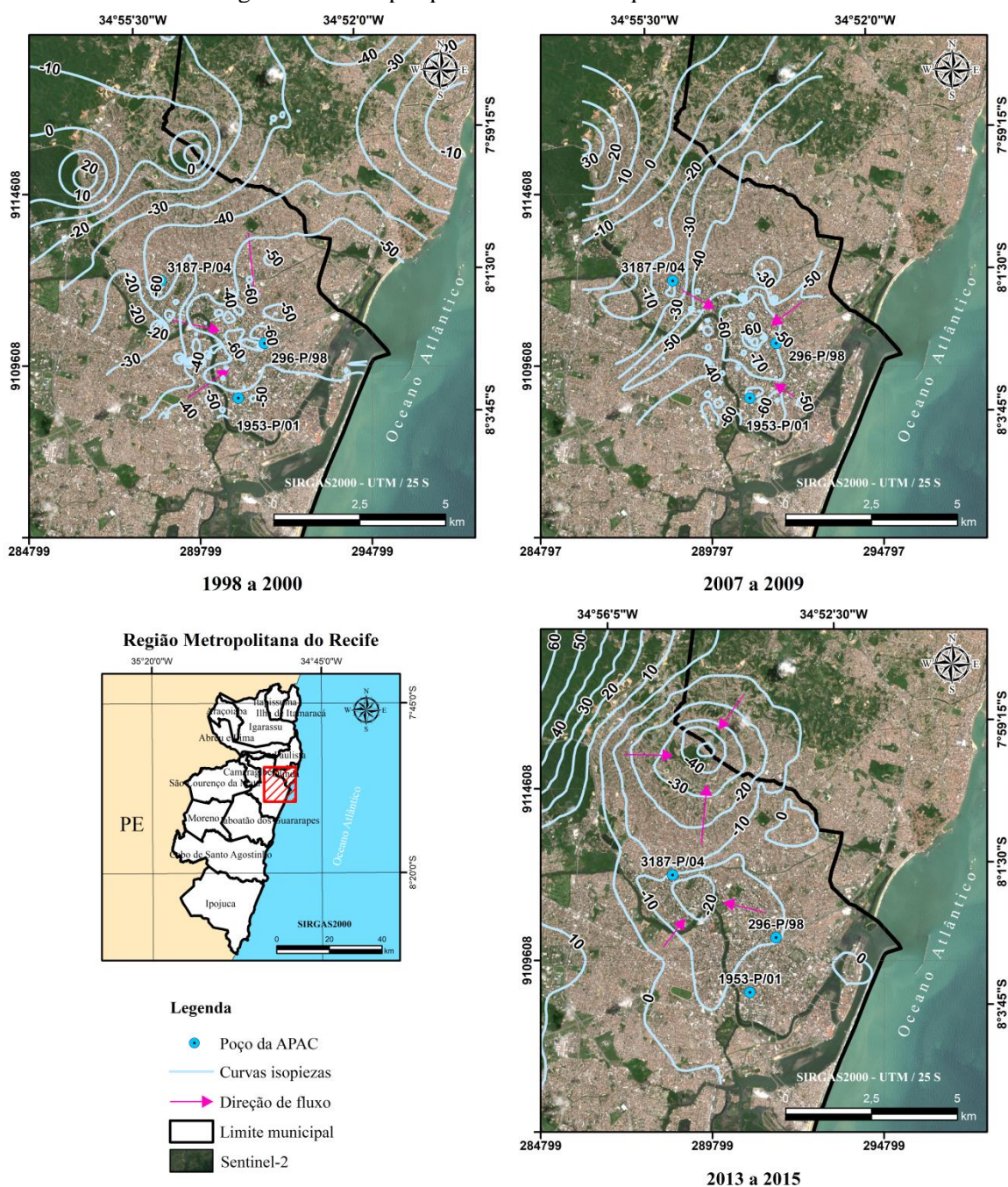
Figura 113 – Mapas piezométricos do aquífero Cabo.



Fonte: Pernambuco (2017); dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

Na Figura 113, a observação de poços do primeiro período (1998-2000) revelou diversas curvas piezométricas negativas – caracterizadas pela diminuição do aquífero Cabo. Na comparação com o segundo intervalo (2003-2013), verificou-se uma leve melhora na regeneração hídrica do manancial. Houve o deslocamento da cota isopieza de -75 m para o sentido Leste. Porém, para a época mais recente (2013-2015) a simulação numérica (PERNAMBUCO, 2017) estimou curvas isopiezas com valor mínimo de -103 m. As zonas de piezometria rebaixadas ocorreram na área Sul da cidade, nos bairros de Boa Viagem e Pina.

Figura 114 – Mapas piezométricos do aquífero Beberibe.



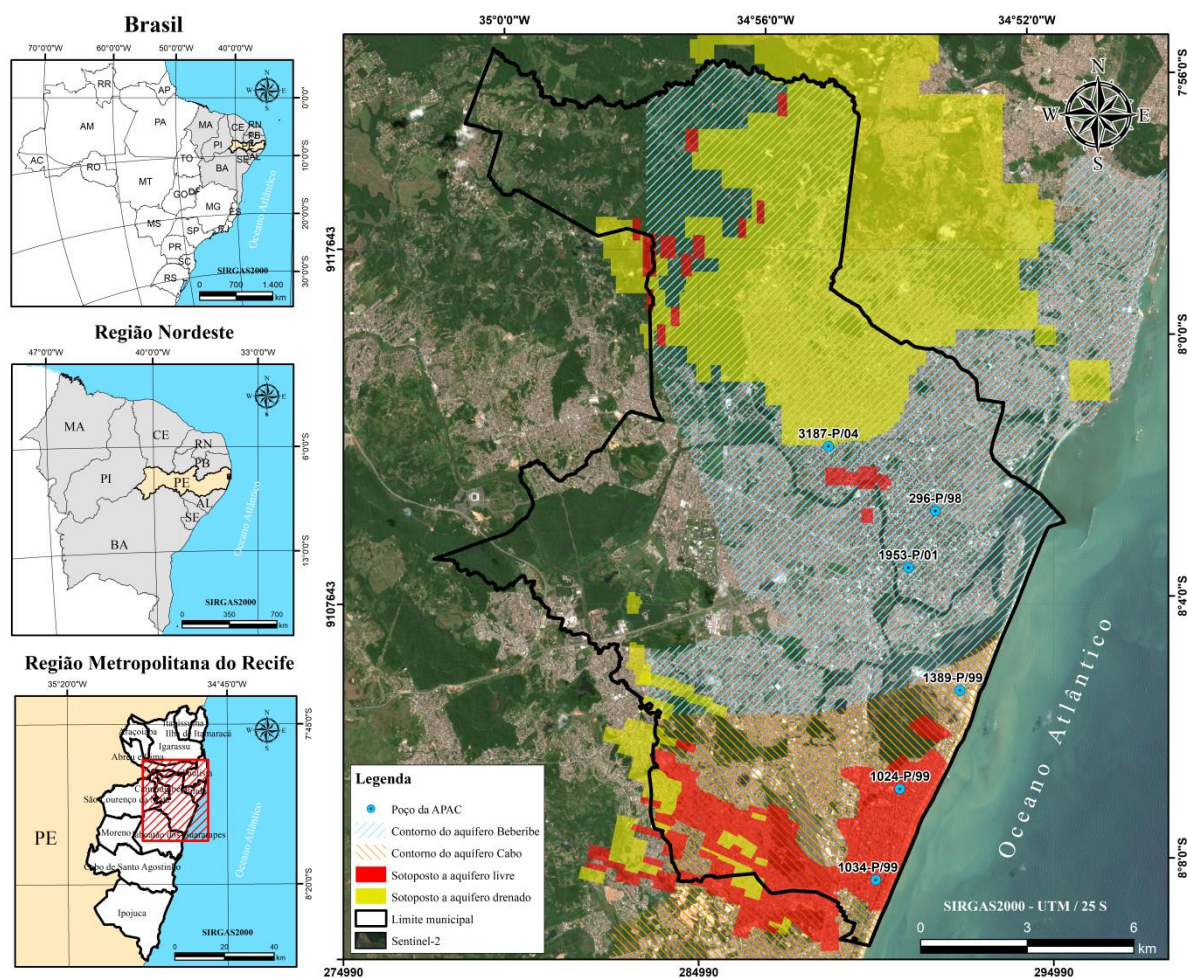
Fonte: Pernambuco (2017); dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

Na Figura 114, a análise de poços do primeiro período (1998-2000) apresentou várias curvas piezométricas negativas – reflexo da diminuição do aquífero Beberibe. Na comparação com o segundo intervalo (2003-2013), observou-se manutenção do rebaixamento volumétrico do manancial na área Norte-Centro. Entretanto, para a época mais recente (2013-2015) a simulação numérica (PERNAMBUCO, 2017) identificou duas situações para os níveis hídricos do aquífero: melhora das curvas isopiezas na área Centro com valor mínimo de -20 m e piora das curvas isopiezas na região Norte com valor mínimo de -53 m.

A análise do monitoramento dos aquíferos (Cabo e Beberibe) se apresentou como um desafio devido à ausência de informações comuns empregadas nos três períodos estudados, ou seja: curvas isopiezas oriundas de monitoramento de poços distintos entre os intervalos (1998-2000 e 2007-2009) e de simulação numérica de dados de entrada e saída de água para a época mais recente (2013-2015). Tais aspectos dificultaram a interpretação dos resultados. Porém, de modo geral, a heterogeneidade das informações indicou tendência de rebaixamento dos níveis de água dos mananciais subterrâneos em questão.

Em relação a isso, de acordo com Pernambuco (2017), a simulação numérica dos aquíferos confinados (Beberibe e Cabo) revelou também áreas de dessaturação – locais em que os sistemas hídricos subterrâneos, em condição natural de confinado, passaram a ter níveis piezométricos abaixo do topo do aquífero (Figura 115). Esses elementos sinalizaram para a possibilidade de ocorrência da subsidência do solo nas zonas piezométricas mais deprimidas, em razão da alta exploração desses aquíferos.

Figura 115 – Mapa de áreas de dessaturação dos aquíferos Cabo e Beberibe, de 2013 a 2015.

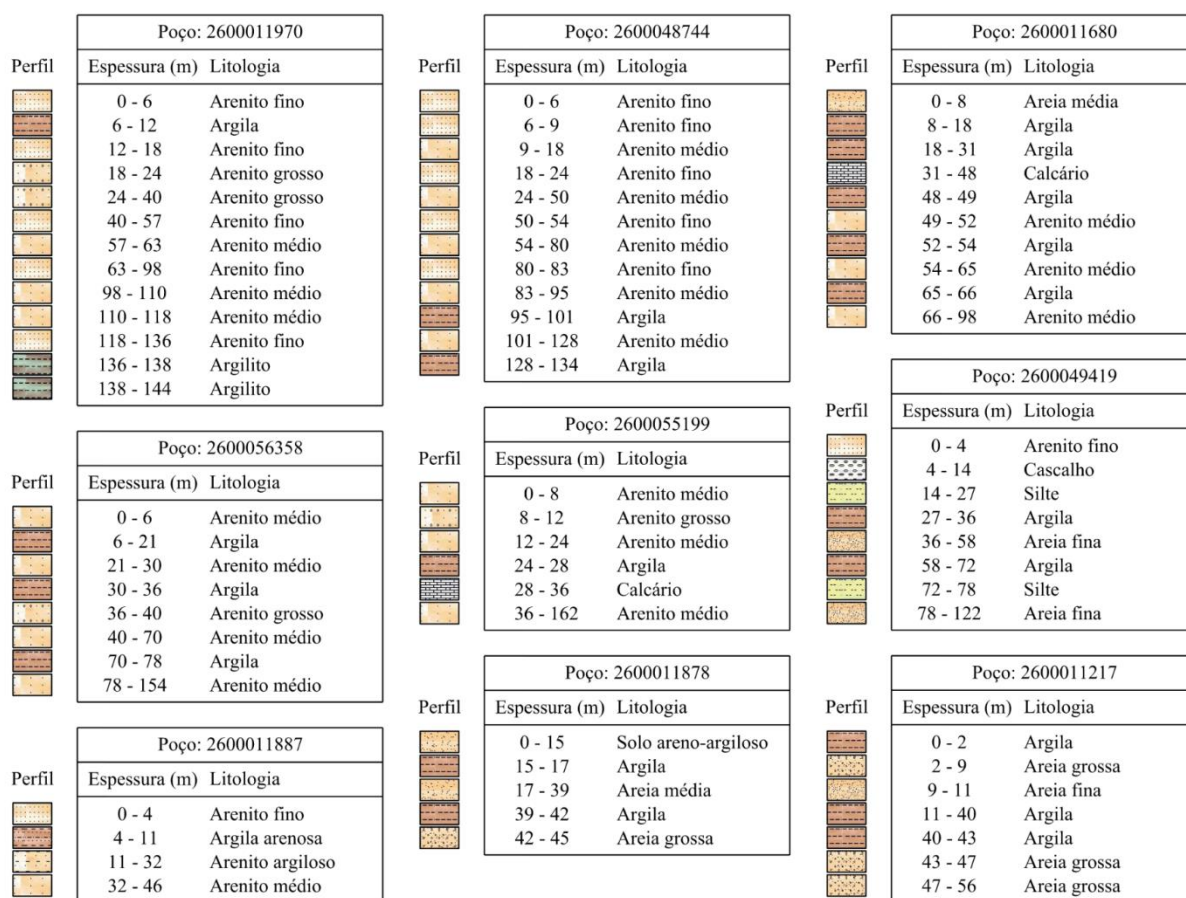


Fonte: Costa *et al.* (2002); Pernambuco (2017); dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).



A análise da planície recifense evidencia a presença de uma grande variedade de depósitos sedimentares de ação marinha, flúvio-marinha, fluvial e coluvial ao longo de sua extensão (Figura 117). Em especial, compostos de argila, areia e silte estão amplamente presentes nas áreas aplainadas da cidade. As unidades de argila e silte se caracterizam por alta compressibilidade. Atuam como fator predisponente nos processos de subsidência do solo induzidos pela exploração de água subterrânea.

Figura 117 – Perfil litológico de poços do SIAGAS.

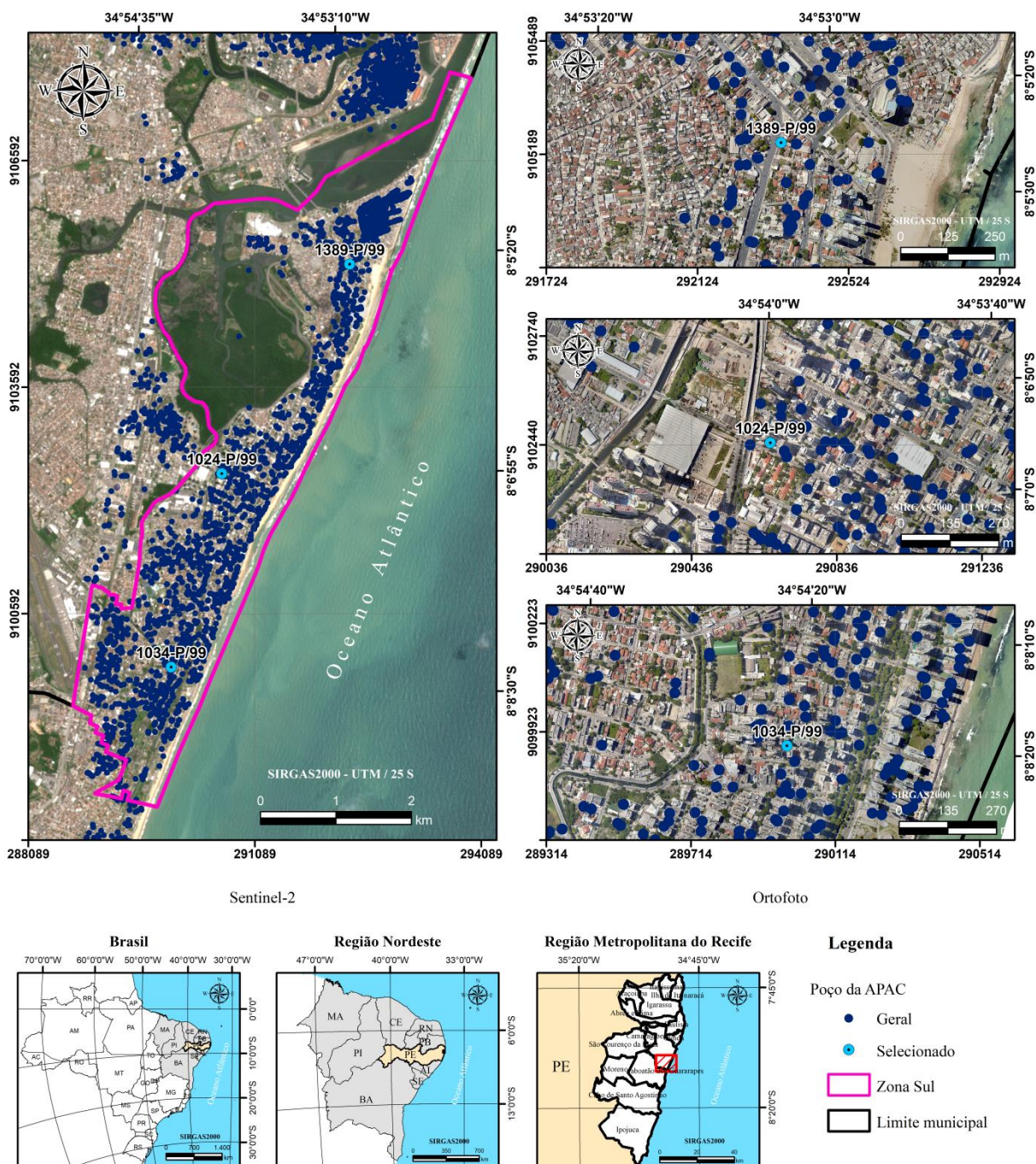


Fonte: adaptado de CPRM (2021).

### 6.7.2.1 Correlação entre Subsidência do Solo e Redução das Águas Subterrâneas

A escassez hídrica no final do século passado se revelou em um dos gatilhos na ampla densificação de poços no Recife – a maioria de forma irregular –, o que resultou na diminuição acentuada dos sistemas Cabo e Beberibe. A análise da correlação entre subsidência do solo e redução das águas subterrâneas ocorreu a partir de dados piezométricos de seis poços, situados em áreas propensas a rebaixamento devido à intensa exploração hídrica. Ou seja: zona Sul referente ao aquífero Cabo (Figuras 118, 119, 120, 121) e zona Norte-Centro relativo ao aquífero Beberibe (Figuras 122, 123, 124, 125).

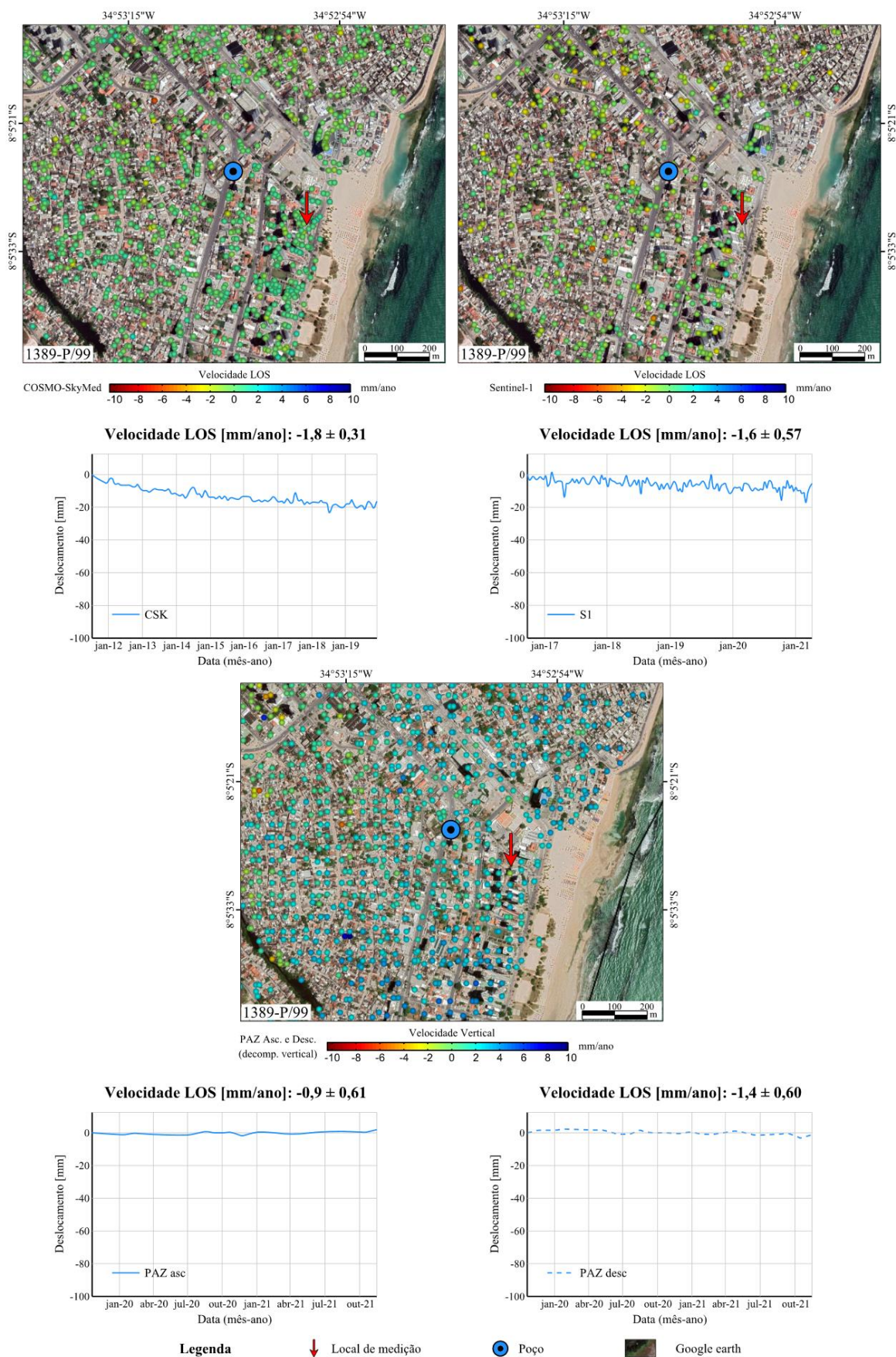
Figura 118 – Mapa de densidade de poços na zona Sul.



Fonte: Pernambuco (2017); dados geoespaciais (PCR, 2013a, 2016; IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

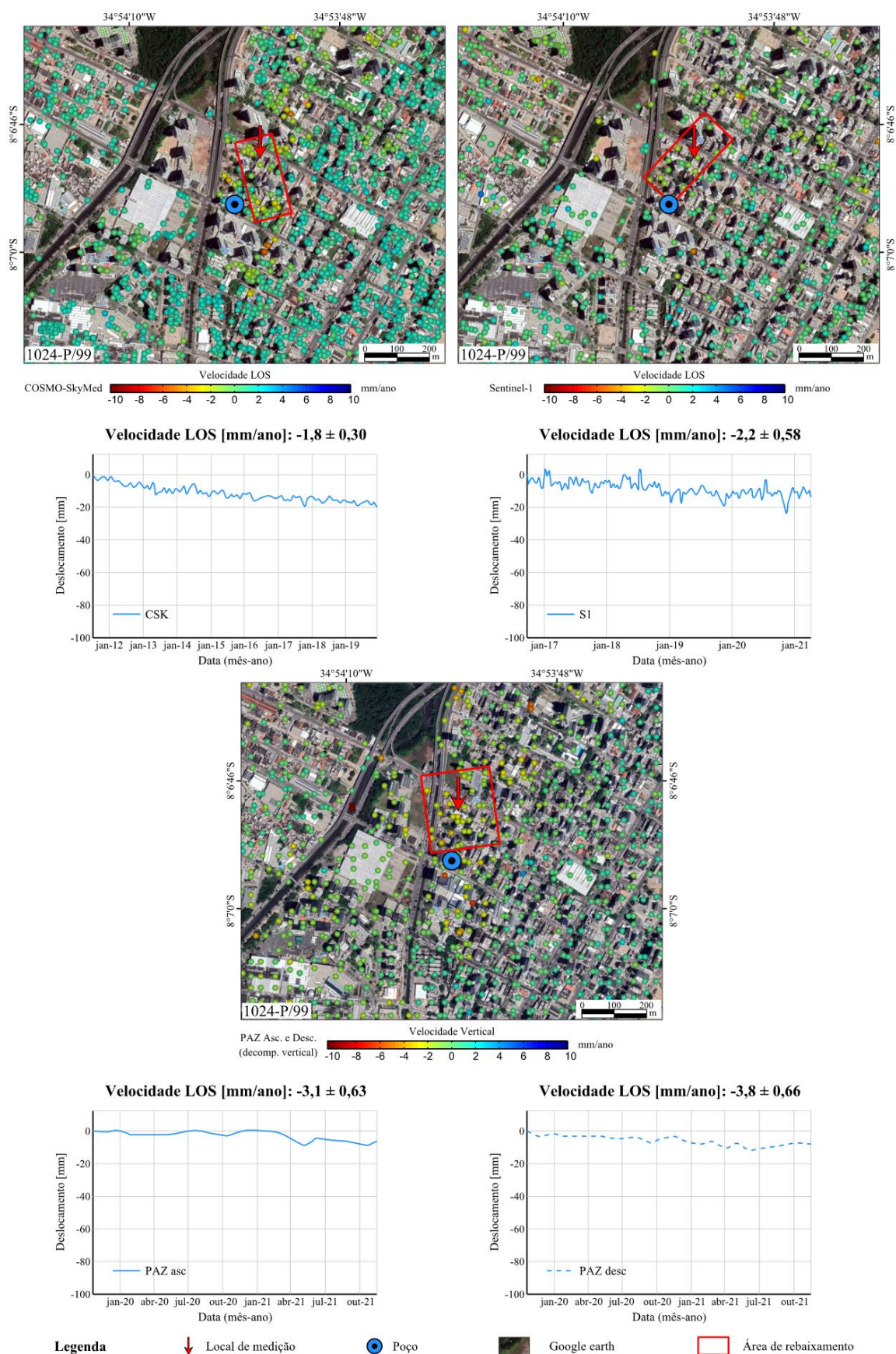
Na Figura 118, a densidade de captações hídricas subterrâneas na zona Sul apresentou valor médio de 145 poços/km<sup>2</sup>. A maior concentração se localizou no bairro de Boa Viagem com cerca de 171 poços/km<sup>2</sup>. No entorno dos poços selecionados, de raio igual a 500 m de distância, verificou-se quantidade aproximada de: 189 poços para o poço 1389-P/99, 104 poços para o poço 1024-P/99 e 155 poços para o poço 1034-P/99.

Figura 119 – Velocidade de deslocamento na zona Sul, poço 1389-P/99.



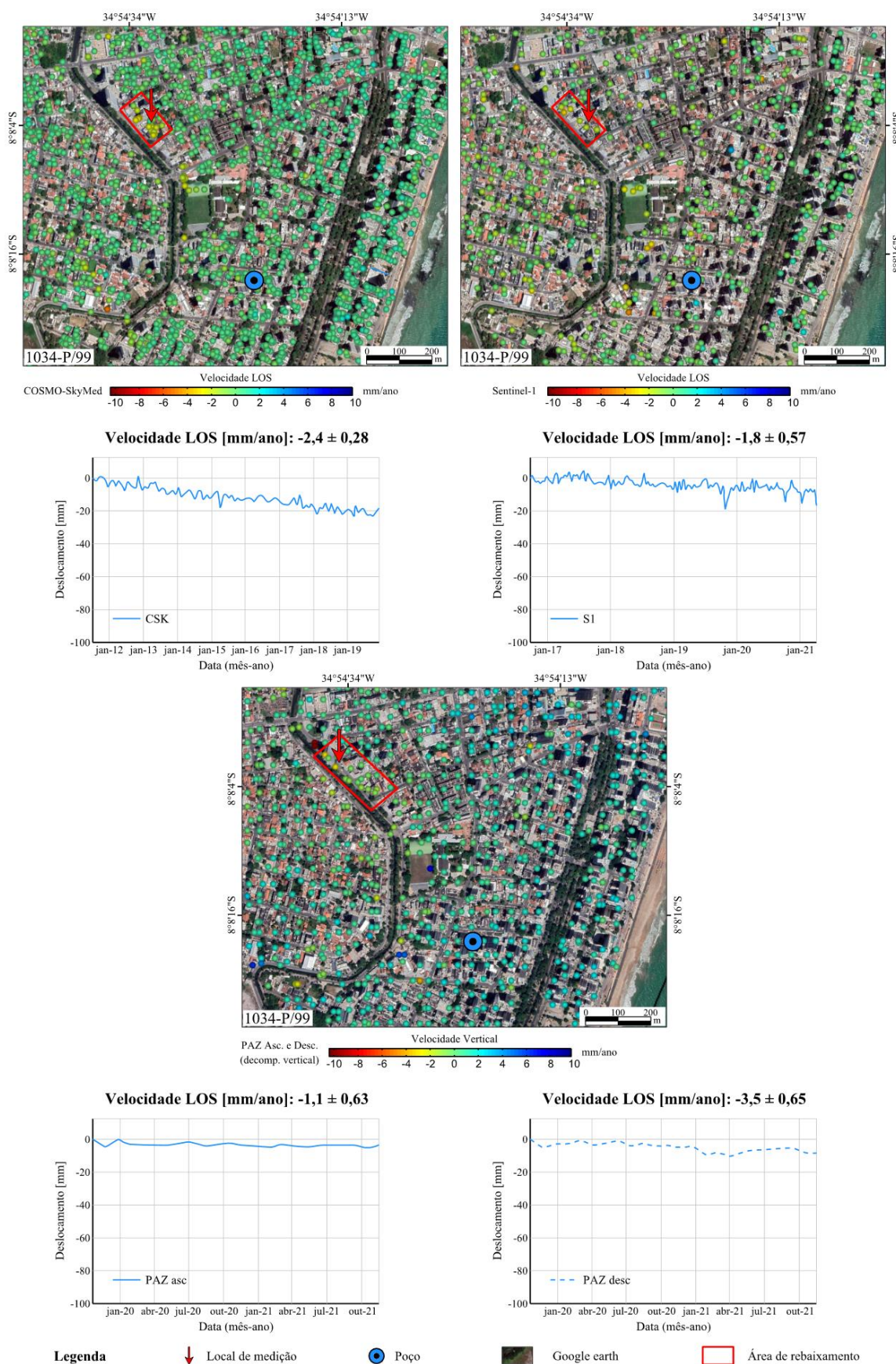
Fonte: Pernambuco (2017); dados geospaciais (GOOGLE, 2021).

Figura 120 – Velocidade de deslocamento na zona Sul, poço 1024-P/99.



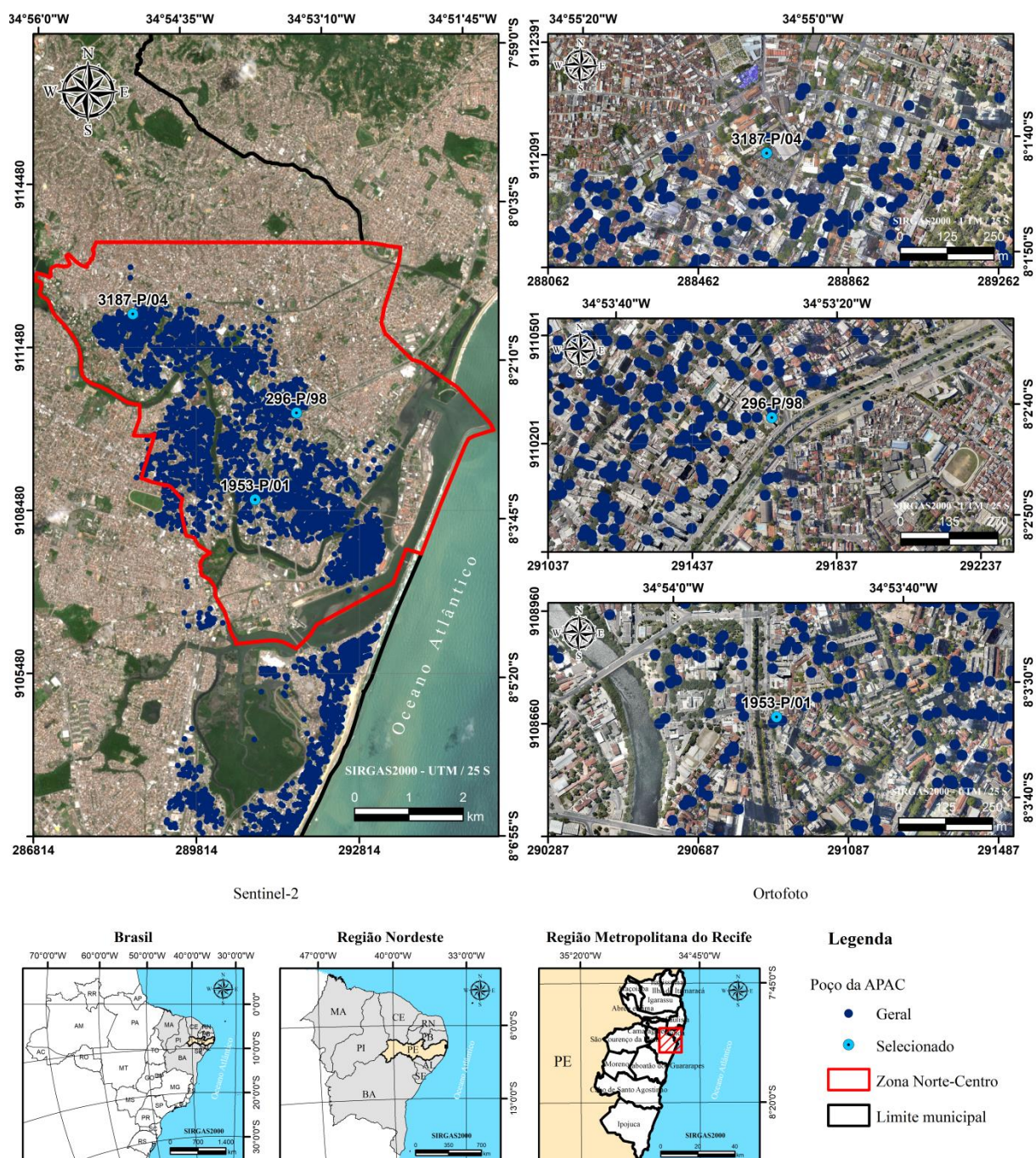
Fonte: Pernambuco (2017); dados geospaciais (GOOGLE, 2021).

Figura 121 – Velocidade de deslocamento na zona Sul, poço 1034-P/99.



Fonte: Pernambuco (2017); dados geospaciais (GOOGLE, 2021).

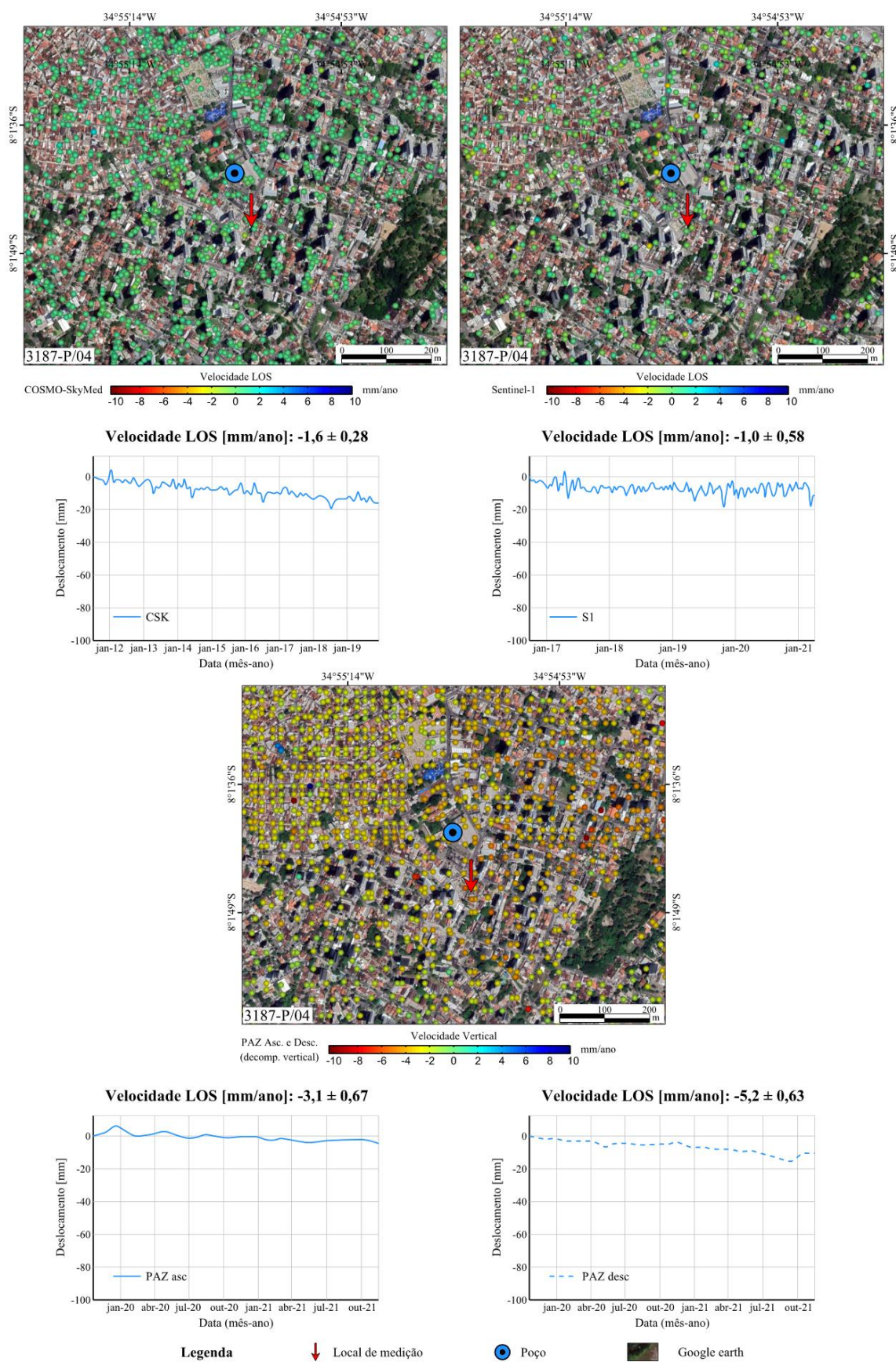
Figura 122 – Mapa de densidade de poços na zona Norte-Centro.



Fonte: Pernambuco (2017); dados geoespaciais (PCR, 2013, 2021; IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

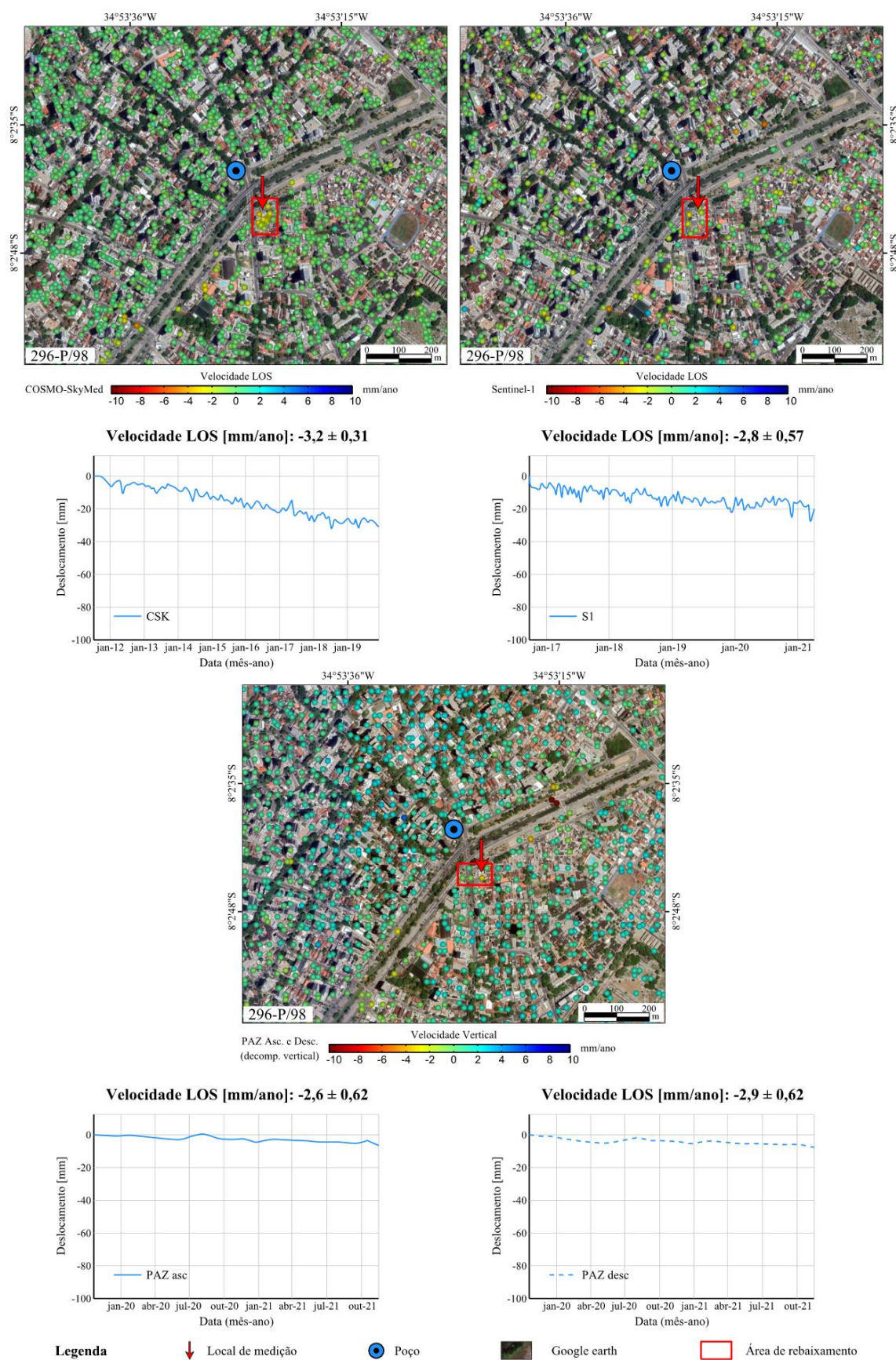
Na Figura 122, a densidade de captações hídricas subterrâneas na zona Norte-Centro apresentou valor médio de 118 poços/km<sup>2</sup>. A maior parte ocorreu no bairro da Boa Vista com cerca de 675 poços. Nas adjacências dos poços selecionados, de raio igual a 500 m de distância, contabilizou-se valor próximo de: 252 poços para o poço 3187-P/04, 159 poços para o poço 296-P/98 e 156 poços para o poço 1953-P/01.

Figura 123 – Velocidade de deslocamento na zona Norte, poço 3187-P/04.



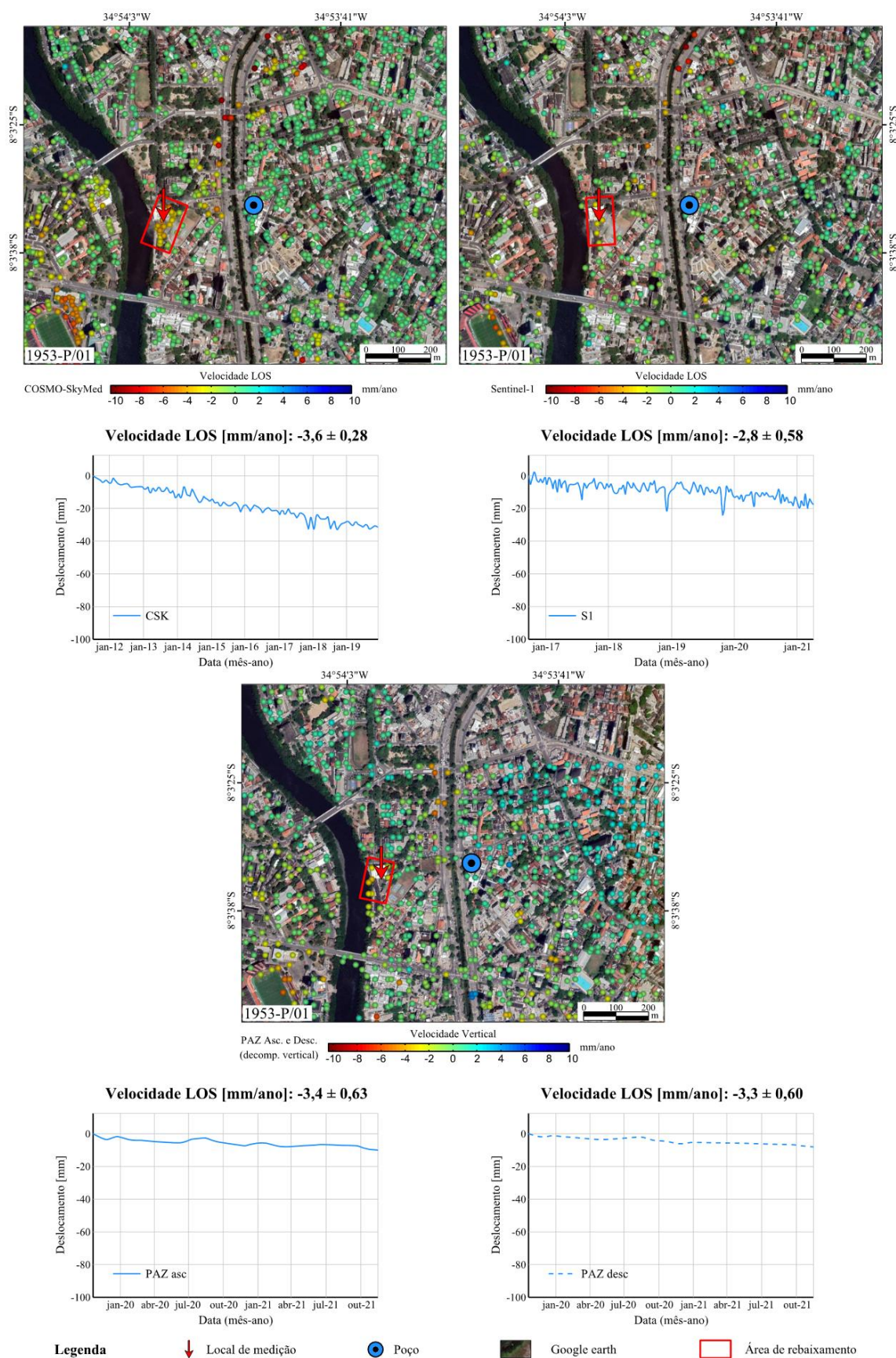
Fonte: Pernambuco (2017); dados geospaciais (GOOGLE, 2021).

Figura 124 – Velocidade de deslocamento na zona Centro, poço 296-P/98.



Fonte: Pernambuco (2017); dados geospaciais (GOOGLE, 2021).

Figura 125 – Velocidade de deslocamento na zona Centro, poço 1953-P/01.



Fonte: Pernambuco (2017); dados geospaciais (GOOGLE, 2021).

Para investigar a instabilidade do solo da Figura 118 e da Figura 122, no primeiro momento, realizou-se levantamento conjunto da série temporal de deformação PSInSAR e série temporal de dados piezométricos dos seis poços selecionados. Porém, o baixo registro do monitoramento hídrico dos aquíferos Cabo e Beberibe impediu uma análise quantitativa da correlação entre subsidência do solo e redução das águas subterrâneas (Tabela 36).

Tabela 36 – Série temporal de informações piezométricas de poços selecionados da APAC.

Poço	Monitoramento hídrico (m) [ano]	Aquífero
3187-P/04	-47,3 [1998], -27,5 [2003], -12,5 [2003], -14,5 [2006]	Beberibe
296-P/98	-70,5 [1998], -59,5 [2001], -70,5 [2005], -70,5 [2009]	
1953-P/01	-58,5 [2000], -65,5 [2000], -53,5 [2004], -60,5 [2005], -49,5 [2006]	
1389-P/99	-82,2 [1999], -82,2 [2000], -95,6 [2008]	Cabo
1024-P/99	-75 [2004], -80 [2004], -80 [2006], -91,6 [2010]	
1034-P/99	-93,5 [1999], -84,5 [2004], -95,5 [2007], -93,5 [2008]	

Fonte: Pernambuco (2017).

Em vista disso, a análise da variação hídrica resultou de curvas isopiezas oriundas de informações piezométricas e de simulação numérica dos sistemas Cabo (Figura 113) e Beberibe (Figura 114), os quais indicaram tendência de diminuição para o período de observação SAR – de 2011 a 2021. Ou seja, revelação preponderante para o processo de rebaixamento superficial nas localidades dos poços selecionados (Figura 118 e Figura 122). Nessas áreas de planície (Figura 116), devido à alta exploração dos aquíferos, há uma maior possibilidade de correlação entre subsidência do solo e redução das águas subterrâneas.

Em relação à exploração do aquífero Cabo, nas proximidades do poço 1389-P/99 (Figura 119) se identificaram casos pontuais de subsidência do solo. Alguns pontos de rebaixamento tiveram velocidade igual a 1,8 mm/ano. A maioria das medições apresentou taxa de deslocamento média em torno de -0,5 mm/ano. Contudo, a análise não encontrou correlação entre subsidência do solo e redução das águas subterrâneas. Houve recuperação hídrica na área de estudo, de curva isopieza de -75 m no período de 1998 a 2000 para próxima de -30 m no intervalo recente de 2013 a 2015 (Figura 113).

Nas imediações do poço 1024-P/99 (Figura 120), observou-se área rebaixamento com velocidade igual a 3,8 mm/ano. A maior parte das medições revelou taxa de deslocamento média próxima de -1 mm/ano. A investigação apontou indícios da correlação entre subsidência do solo e redução das águas subterrâneas. Consequência da diminuição hídrica acentuada na área de estudo, de curva isopieza menor que -50 m no período de 1998 a 2000 para próxima de -90 m no intervalo de 2013 a 2015 (Figura 113), situada em local de dessaturação do aquífero Cabo (Figura 115).

Nas adjacências do poço 1034-P/99 (Figura 121), detectaram-se casos isolados de subsidência do solo. A maioria dos pontos de medição apresentou taxa de deslocamento média igual a -0,5 mm/ano. Entretanto, 500 m afastado do poço 1034-P/99, identificou-se área de rebaixamento com velocidade igual a 3,5 mm/ano. A verificação apontou indícios da correlação entre subsidência do solo e redução das águas subterrâneas. Isso decorreu da redução hídrica na área de estudo, de curva isopieza próxima de -75 m no período de 1998 a 2000 para menor que -80 m no intervalo de 2013 a 2015 (Figura 113), localizada em local de dessaturação do aquífero Cabo (Figura 115).

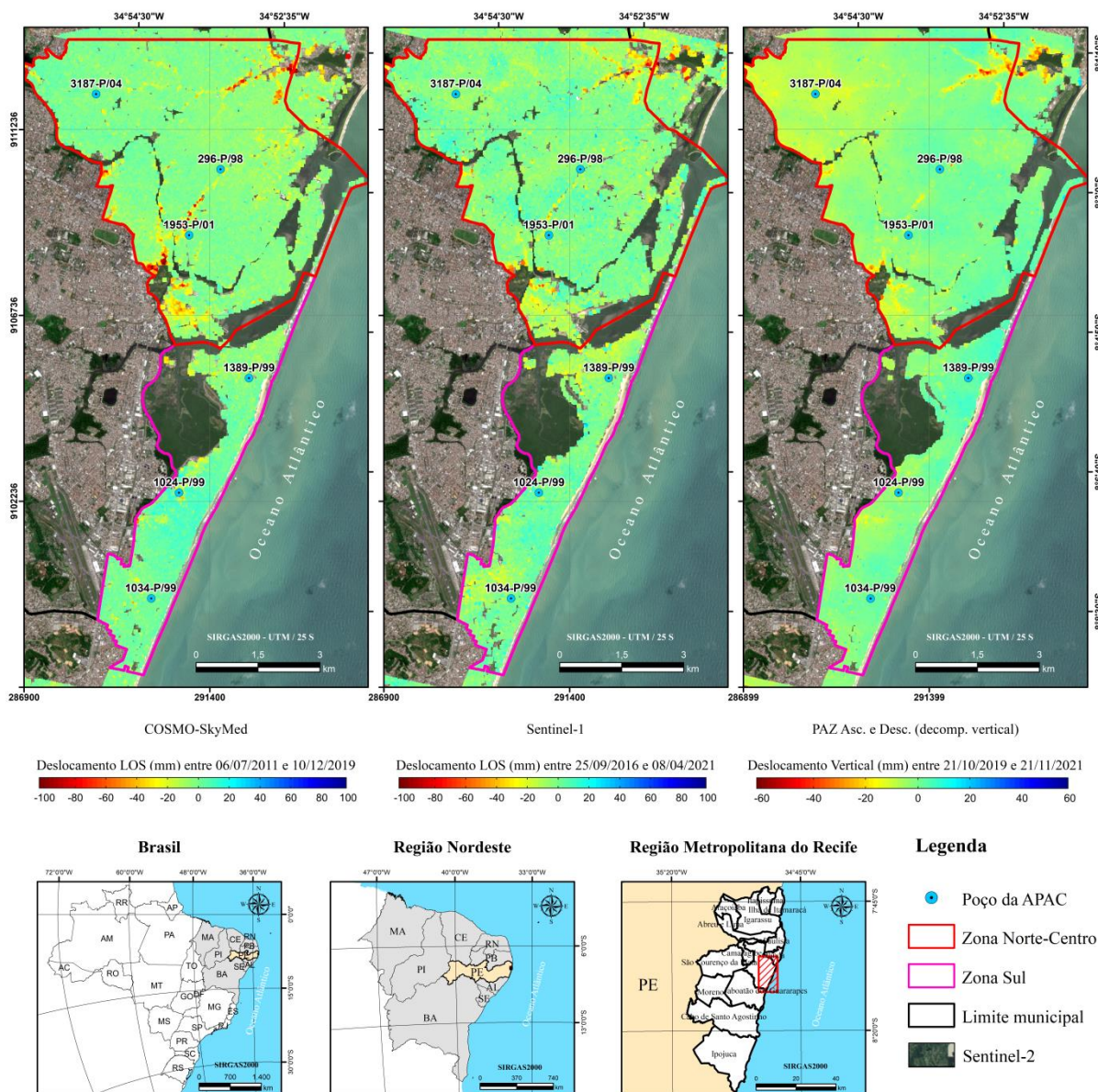
Referente à exploração do aquífero Beberibe, nas redondezas do poço 3187-P/04 (Figura 123) se identificaram vários pontos de subsidência do solo nos dados PAZ. Alguns pontos com velocidade igual a 5,2 mm/ano. A maior parte das medições teve taxa de deslocamento média em torno de -3,0 mm/ano. No entanto, a análise não encontrou correlação entre subsidência do solo e redução das águas subterrâneas. Houve recuperação hídrica na área de estudo, de curva isopieza menor que -50 m no período de 1998 a 2000 para próxima de -10 m no intervalo de 2013 a 2015 (Figura 114).

Nos arredores do poço 296-P/98 (Figura 124), observaram-se casos isolados de subsidência do solo. Grande parte das observações revelou taxa de deslocamento média em torno de -1 mm/ano. Todavia, 130 m distante do poço 296-P/98, detectou-se área de rebaixamento com velocidade igual a 3,2 mm/ano. A investigação não apontou indícios da correlação entre subsidência do solo e redução das águas subterrâneas. Consequência da recuperação hídrica na área de estudo, de curva isopieza de -60 m no período de 1998 a 2000 para -10 m no intervalo de 2013 a 2015 (Figura 114).

Nas proximidades do poço 1953-P/01 (Figura 125), constataram-se casos individuais de subsidência do solo. A maioria das medições apresentou taxa de deslocamento média próxima de -1 mm/ano. Porém, 270 m afastado do poço 1953-P/01, observou-se área de maior rebaixamento com velocidade igual a 3,6 mm/ano. A análise não detectou indícios da correlação entre subsidência do solo e redução das águas subterrâneas. Houve recuperação hídrica na área de estudo, de curva isopieza de -50 m no período de 1998 a 2000 para em torno de -10 m no intervalo de 2013 a 2015 (Figura 114).

Em geral, nas localidades dos poços das zonas Sul e Norte-Centro, o monitoramento PSInSAR ao longo de 10,4 anos (de julho de 2011 a novembro de 2021) resultou em valores de rebaixamento acumulado em torno de (Figura 126): 17 mm para o poço 1389-P/99, 23 mm para o poço 1024-P/99, 25 mm para o poço 1034-P/99, 18 mm para o poço 3187-P/04, 30 mm para o poço 2964-P/98 e 33 mm para o poço 1953-P/01.

Figura 126 – Mapa de deslocamento acumulado nas zonas Sul e Norte-Centro.



Fonte: Pernambuco (2017); dados geoespaciais (PCR, 2016; IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

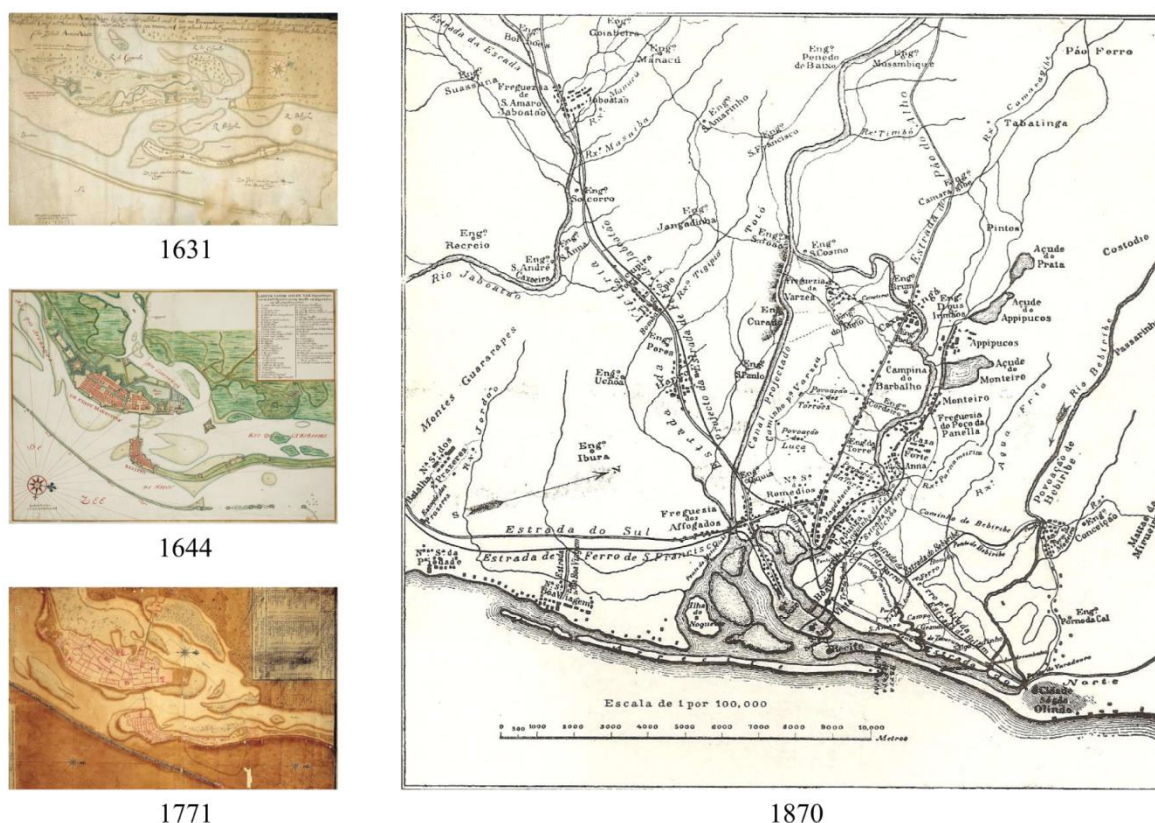
Na Figura 126, têm-se indícios de afundamento para áreas situadas fora dos poços: 1389-P/99, 1024-P/99, 1034-P/99, 3187-P/04, 2964-P/98 e 1953-P/01. A identificação desses locais de rebaixamento pode estar relacionada a outros poços de monitoramento, uma vez que segundo Alisson (2013) a quantidade de poços em Recife se estima como uma das maiores do país com estimativa de 13 mil captações. Há possibilidade de correlação entre subsidência do solo e redução de águas subterrâneas para o intervalo de tempo de 2016 a 2021 – período sem dados de monitoramento hídrico – caracterizado por aumento de temperatura (Figura 109) e baixa precipitação (Figura 110) na cidade.

### 6.7.3 Análise da Evolução Urbana

De maneira efetiva, o processo de ocupação e expansão urbana da planície recifense se iniciou no século XVII – época em que Recife esteve sob o domínio dos holandeses (1630-1654). Desse momento até o século atual (XXI), a cidade de origem portuária passou por profundas transformações em sua fisionomia e estrutura.

Para o período compreendido do século XVII ao XIX, as mudanças ocorridas na cidade se deram do Centro do Recife em direção a áreas drenadas pelo Rio Capibaribe. Ou seja, locais em que se concentravam engenhos de cana-de-açúcar situados nas proximidades desse curso de água – utilizado para escoar a produção canieira até a sua foz no Oceano Atlântico, localização do porto do Recife (Figura 127).

Figura 127 – Crescimento urbano do Recife do século XVII ao XIX.

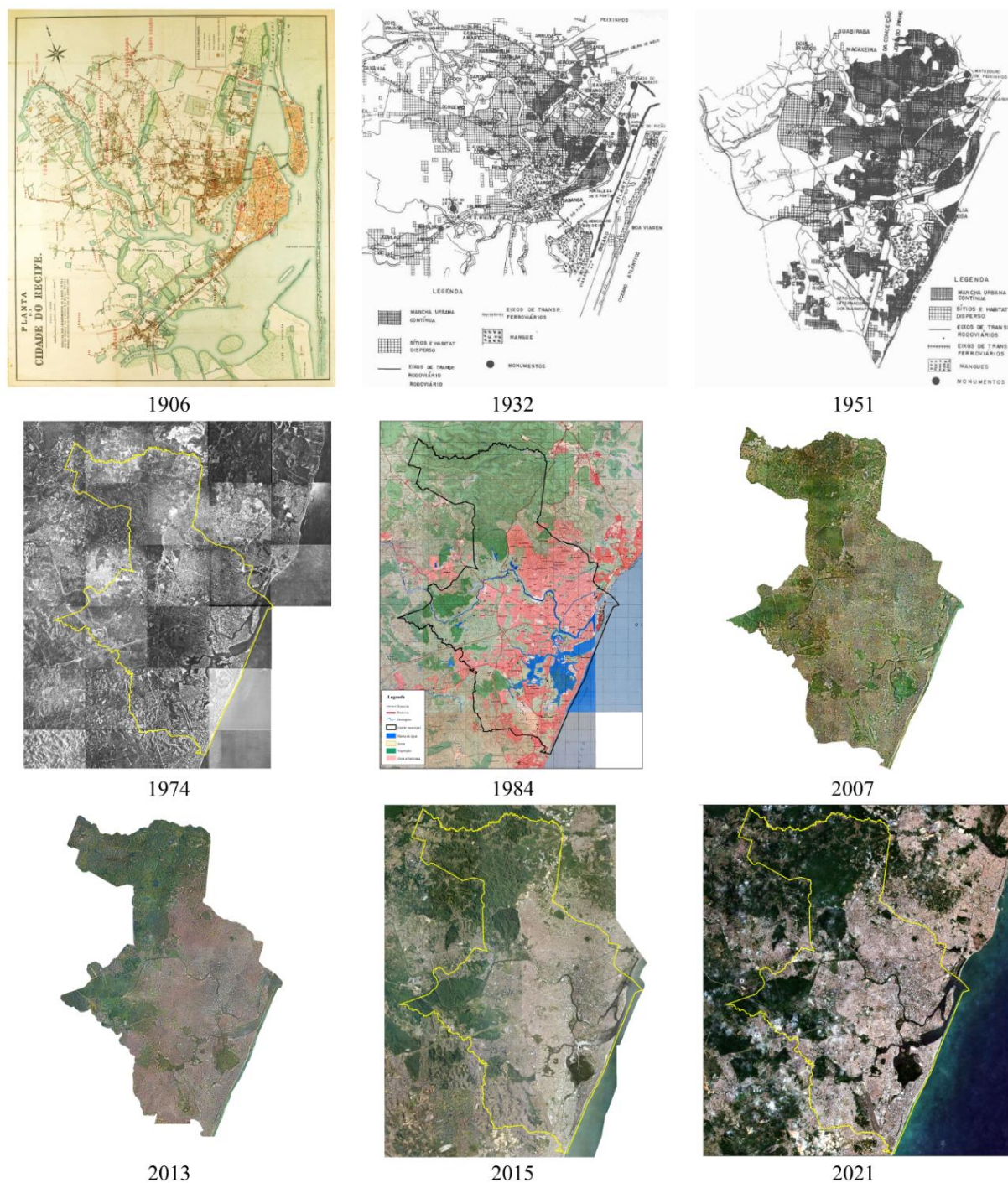


Fonte: Reis Filho (2001); Menezes (1988).

As alterações ocorridas nesse período na planície flúvio-marinha recifense se realizaram de forma profunda, com destaque para: aterro de mangues, locais alagadiços e encharcados; implantação de plano urbanístico; moradias habitacionais e fortificações; abertura de estradas, canais e drenagem de gamboas; e construções de pontes e estradas que passaram a conectar o Centro urbano com outras localidades.

Ao longo do século XX à época atual, a evolução da malha urbana se manteve ativa com incorporação de novos espaços e acidentes geográficos nas direções Sul, Norte e Oeste do Recife. Nesse período, a cidade cresceu de forma acelerada com expansão sobre áreas alagadas, aterro do leito de rios e ocupação de morros (Figura 128).

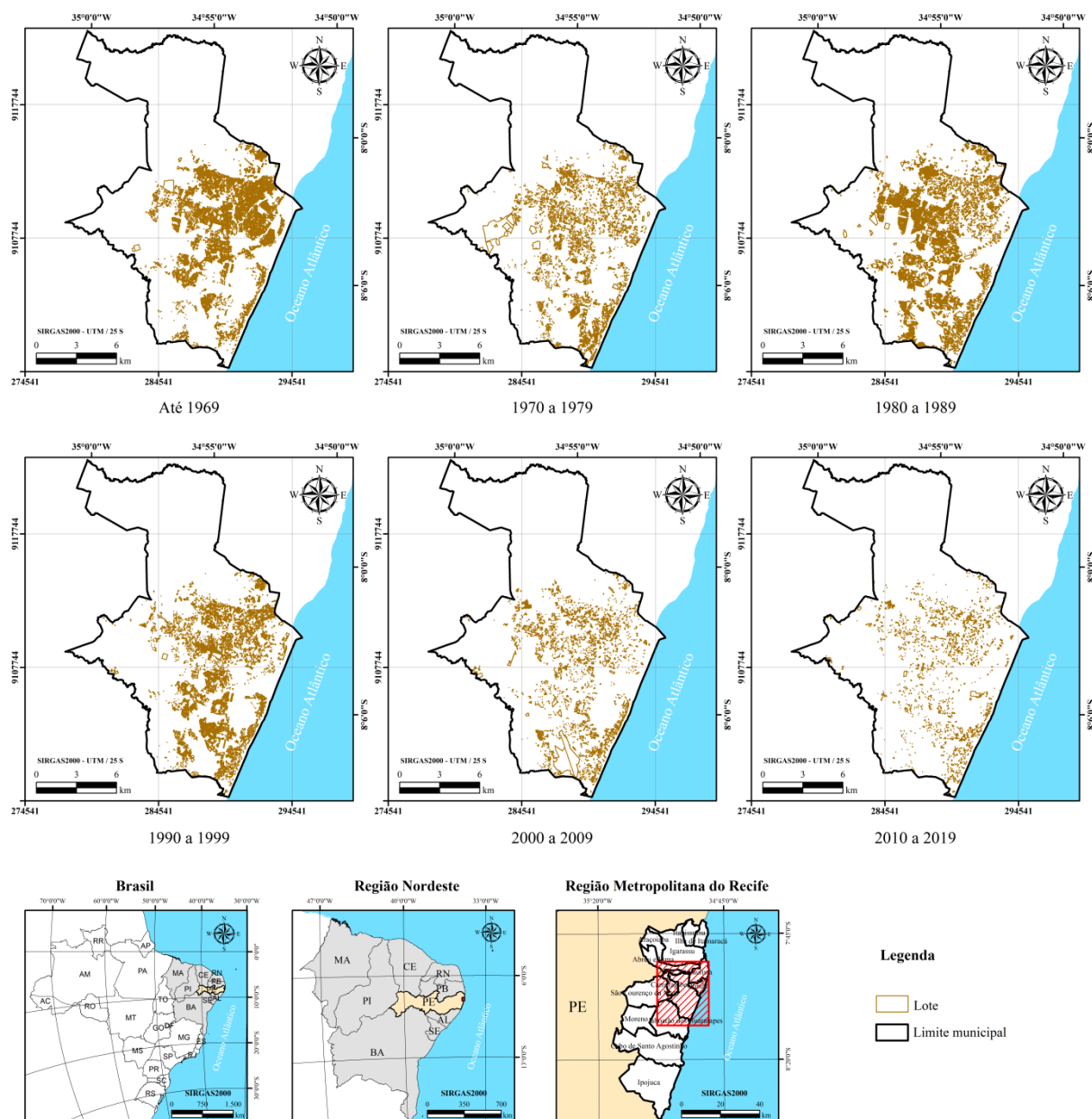
Figura 128 – Crescimento urbano do Recife do século XX ao XXI.



Fonte: Menezes (1988); Barreto (1994); dados geoespaciais (CONDEPE, 1974; SUDENE, 1984; PCR, 2007, 2013a; APAC, 2015b).

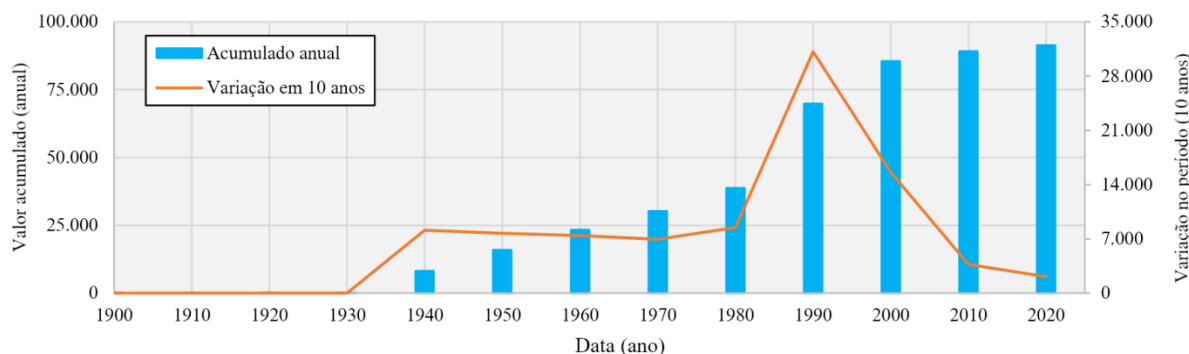
Segundo dados da PCR (2020a), sem considerar as áreas de morros e o bairro de Brasília Teimosa, a evolução de lotes apresentou maior ocorrência entre os anos de 1980 e 1990 com a implantação de mais de 30 mil áreas de loteamento (Figura 129). O período foi responsável por uma taxa de mais de 80% desse crescimento, envolvido em construções de espaços públicos, ambientes residências e comerciais (Figura 130).

Figura 129 – Mapas de expansão de lotes na planície recifense



Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; PCR, 2020a).

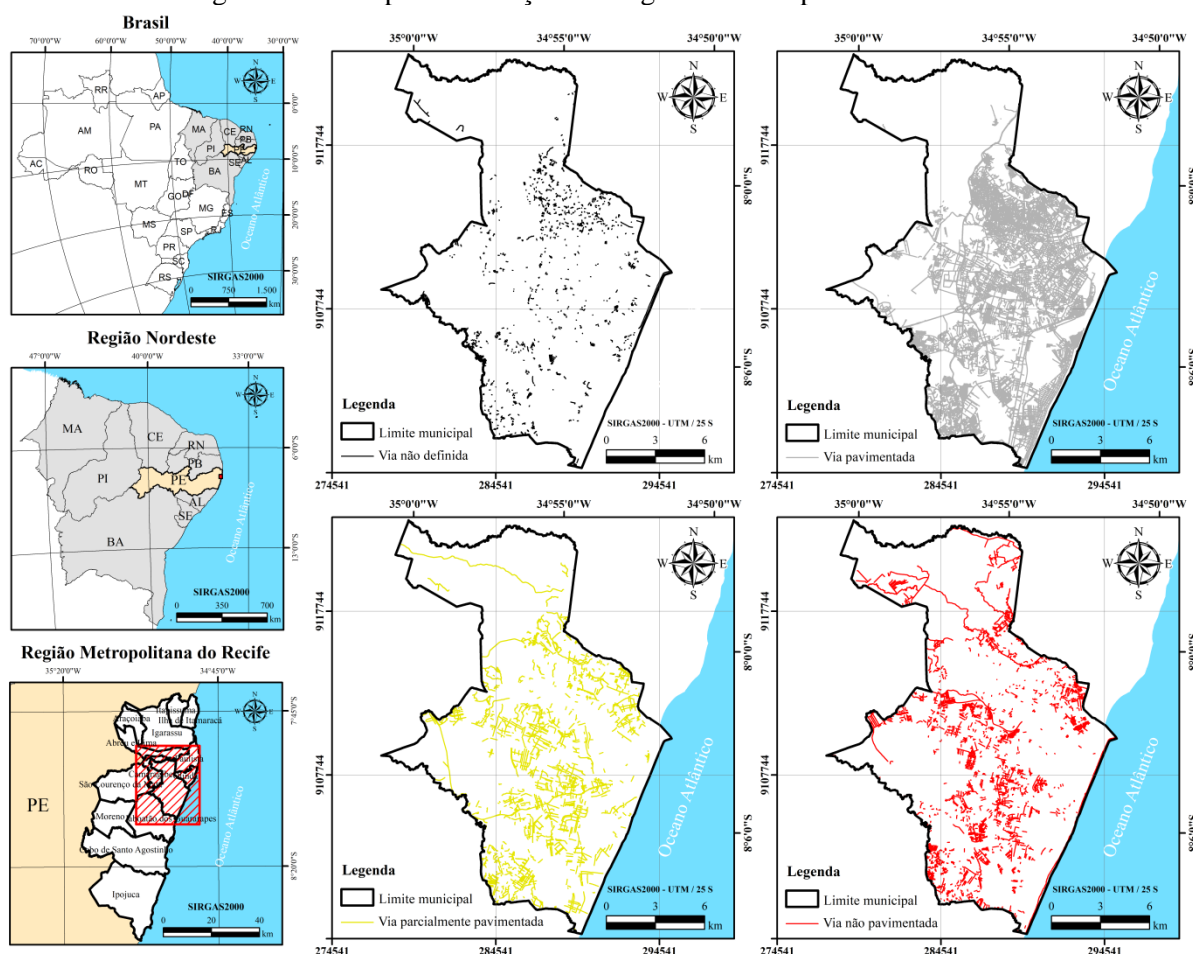
Figura 130 – Progresso de lotes na planície recifense



Fonte: PCR (2020a).

Na atualidade, a planície recifense se encontra bastante urbanizada. As áreas mais pavimentadas da cidade se concentram nas zonas Centro e Sul. As localidades responsáveis por maior espaço arborizado e menor ambiente pavimentado ocorrem nas regiões Norte e Oeste do Recife, respectivamente (Figura 131).

Figura 131 – Mapas de situação dos logradouros na planície recifense.



Fonte: dados geoespaciais (IBGE, 2018a, 2018b; PCR, 2020b).

Em geral, no decurso da história a expansão do solo recifense ao longo de quase 400 anos, tomado às águas entre mangues e áreas alagadas, atingiu 19 km<sup>2</sup> – equivalente a 17,5% da área da planície e 9,1% da área total da cidade. A ampla intervenção antrópica no meio físico do Recife, ao longo do século XVII até o tempo presente, resultou em diversos problemas nos dias atuais. Tais como (GUSMÃO FILHO, 1998): sufocamento da drenagem com diversos locais de alagamento e vários pontos da planície com rebaixamento do solo sob a carga dos aterros (Tabela 37).

Tabela 37 – Processo do meio físico relacionado à subsidência do solo do Recife.

<b>Processo</b>	<b>Fatores passivos (essenciais ao processo)</b>	
	<b>Material natural</b>	<b>Fluxo de energia</b>
Subsidência do solo	Argila orgânica muito mole e espessa	Gravidade (provoca a drenagem)
	<b>Fatores ativos (deflagradores ou reguladores do processo)</b>	
	Remoção de águas subterrâneas e aterro do terreno (provocados pelo homem)	

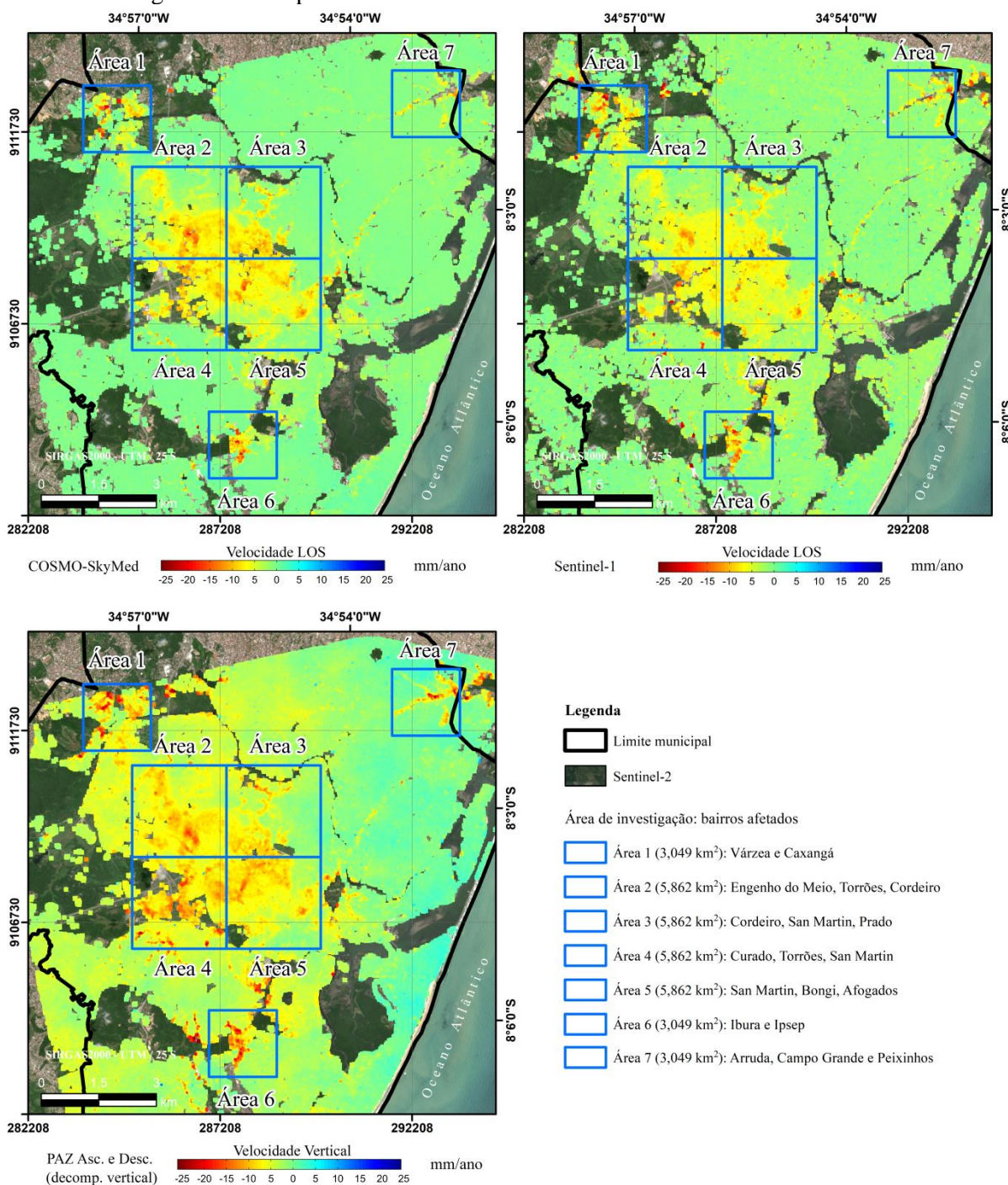
Fonte: Gusmão Filho (1998).

De acordo com a Tabela 37, a subsidência do solo em Recife faz parte do processo do meio físico em que o subsolo compressível (material natural) ocasiona afundamento da superfície por causa da drenagem (ação da gravidade) devido à remoção de águas subterrâneas (agente ativo) e/ou à carga de aterros (também por gravidade). Nesse cenário, os riscos geológicos da subsidência do solo da planície recifense resultam de características dos recursos hídricos subterrâneos e/ou de especificidades geotécnicas.

#### 6.7.3.1 Correlação entre Subsidência do Solo e Urbanização

A análise da subsidência do solo devido à depleção das águas subterrâneas é o objeto principal desta investigação. Contudo, a verificação também inclui o efeito da urbanização por ter relação com a deformação do relevo. A construção do Recife sobre áreas recuperadas de planície é passível de subsidência do solo em virtude da presença de cargas atuantes. O processo resulta da adição de cargas permanentes (elementos construtivos) e móveis (pessoas, veículos), as quais exercem pressão sobre a superfície (Figura 132).

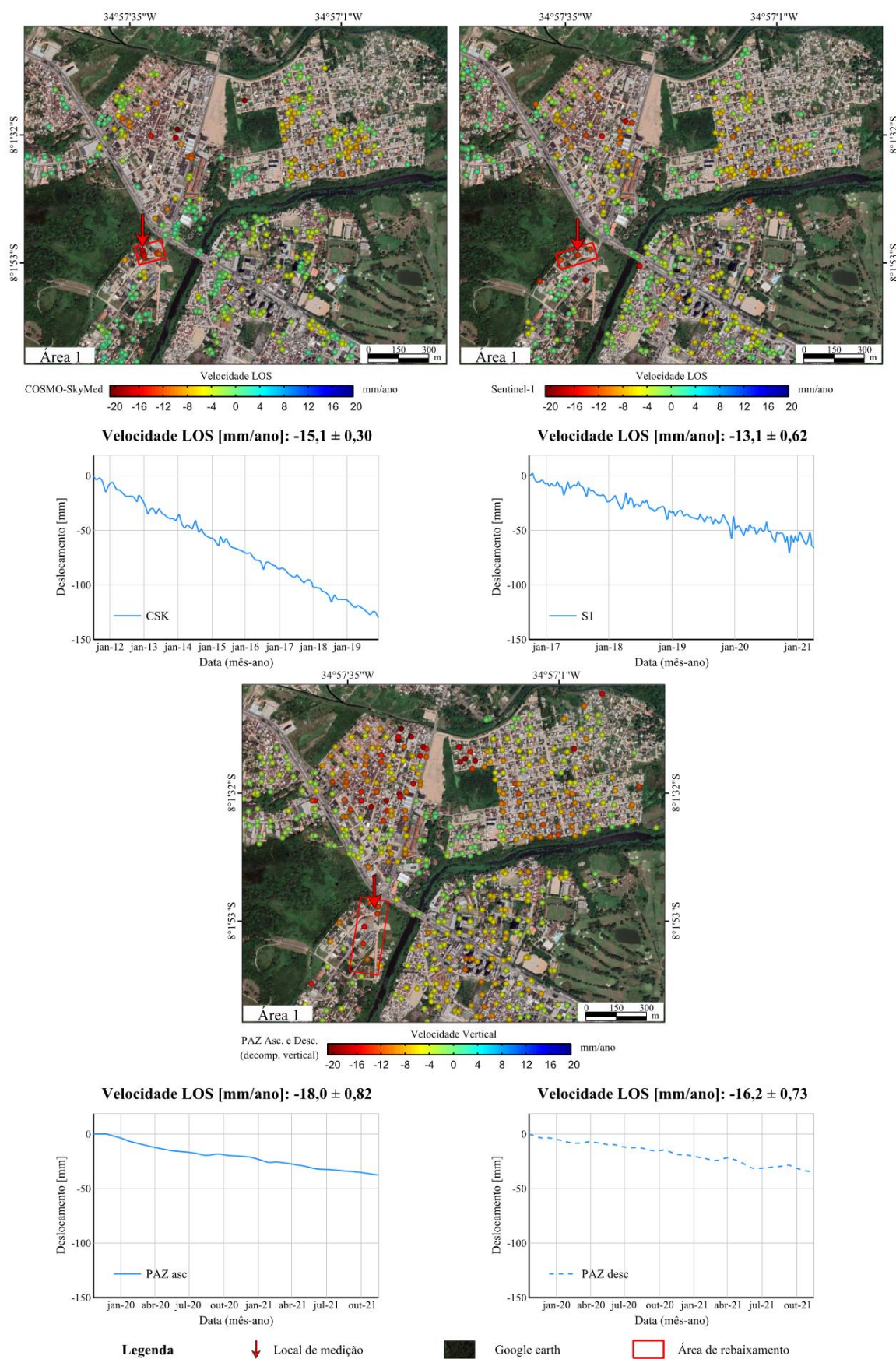
Figura 132 – Mapas de velocidade de deslocamento nas zonas Oeste e Norte.



Fonte: dados geospaciais (PCR, 2016; IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019).

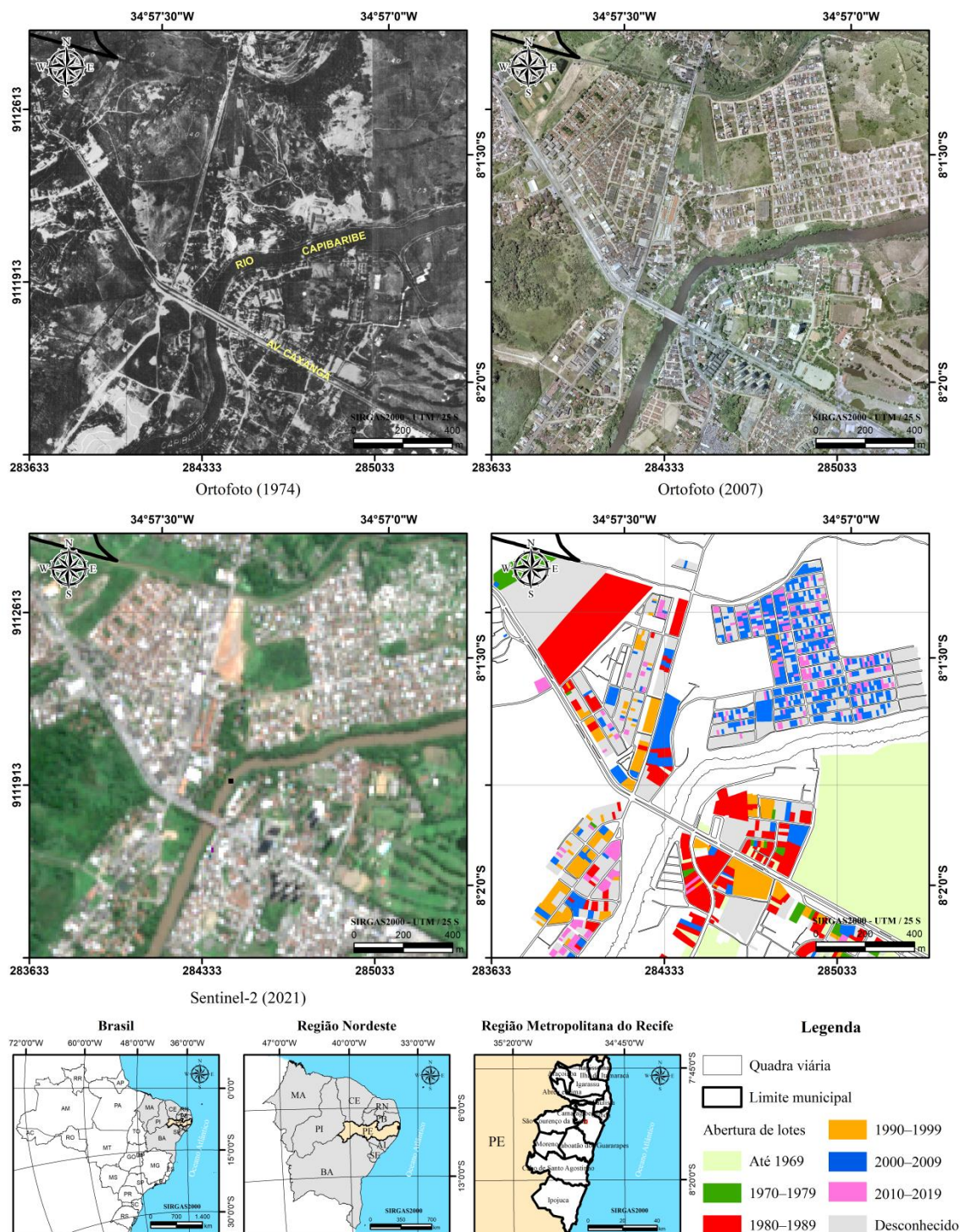
Na Figura 132, a análise da correlação entre subsidência do solo e urbanização se deu via produtos cartográficos do registro da malha urbana do Recife relativo às zonas Oeste e Norte da cidade – divididas em áreas de investigação. A primeira região envolveu: Área 1 (Figura 133, Figura 134), Área 2 (Figura 135, Figura 136), Área 3 (Figura 137, Figura 138), Área 4 (Figura 139, Figura 140), Área 5 (Figura 141, Figura 142) e Área 6 (Figura 143, Figura 144). A segunda zona abrangue: Área 7 (Figura 145, Figura 146).

Figura 133 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 1.



Fonte: dados geoespaciais (GOOGLE, 2021).

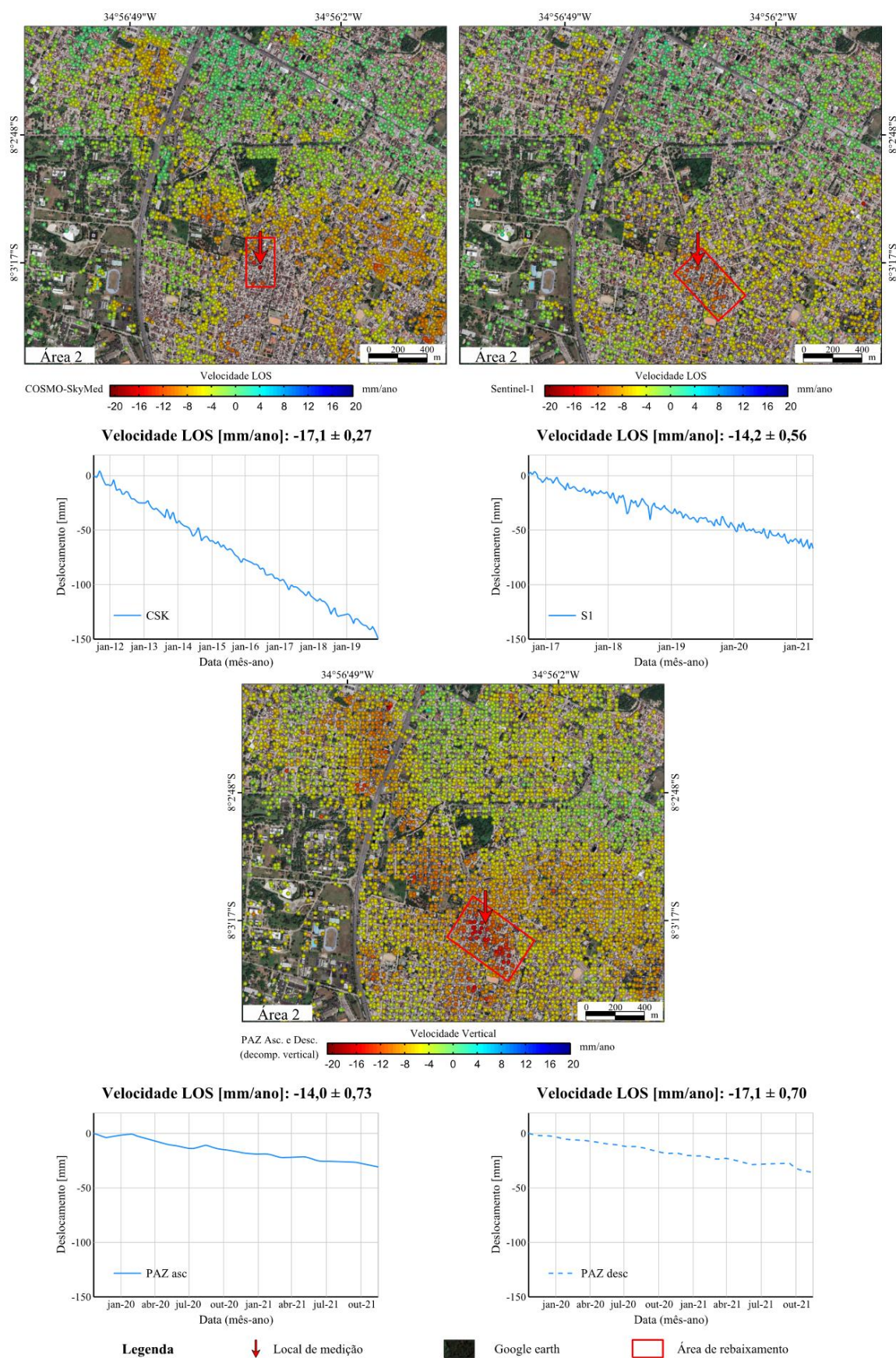
Figura 134 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 1.



Fonte: dados geospaciais (CONDEPE, 1974; PCR, 2007, 2020a, 2020d; IBGE, 2018a, 2018b).

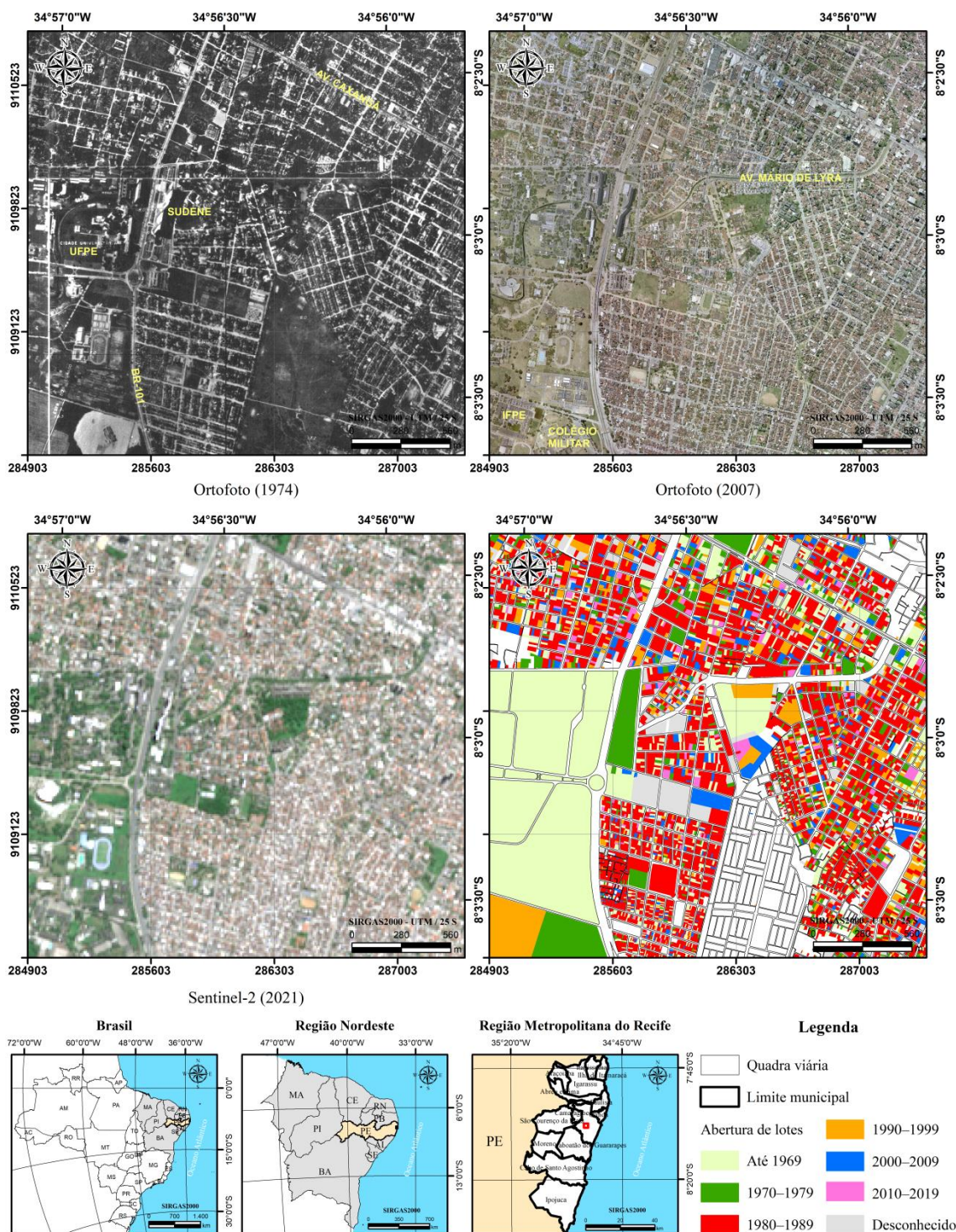
Na Figura 134, o crescimento urbano ocorreu ao longo da Av. Caxangá e do rio Capibaribe com modificação no curso de água. Houve abertura de lotes para edificação de imóveis e construção de vias de circulação. A urbanização se intensificou nos anos 2000.

Figura 135 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 2.



Fonte: dados geoespaciais (GOOGLE, 2021).

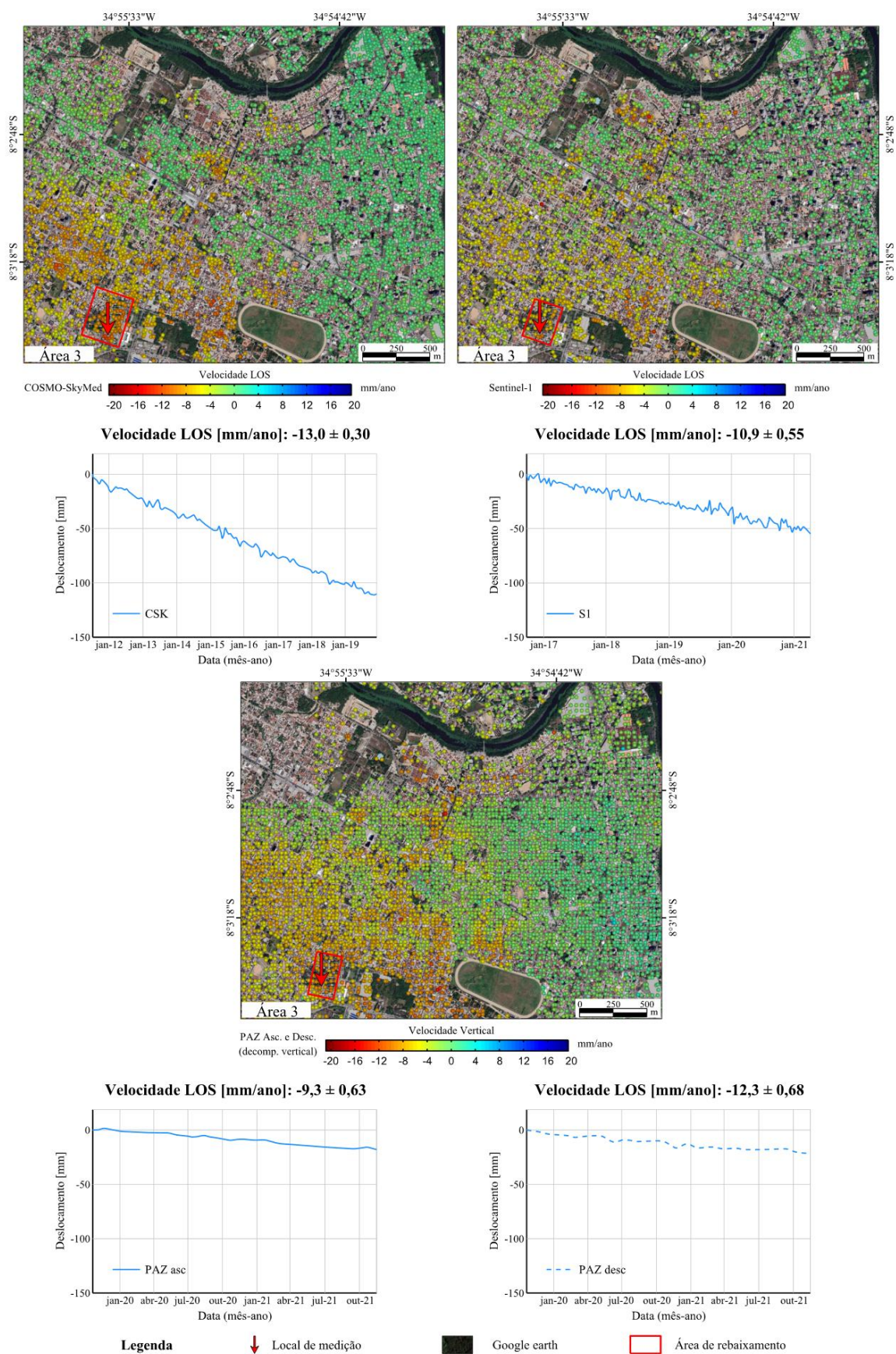
Figura 136 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 2.



Fonte: dados geospaciais (CONDEPE, 1974; PCR, 2007, 2020a, 2020d; IBGE, 2018a, 2018b).

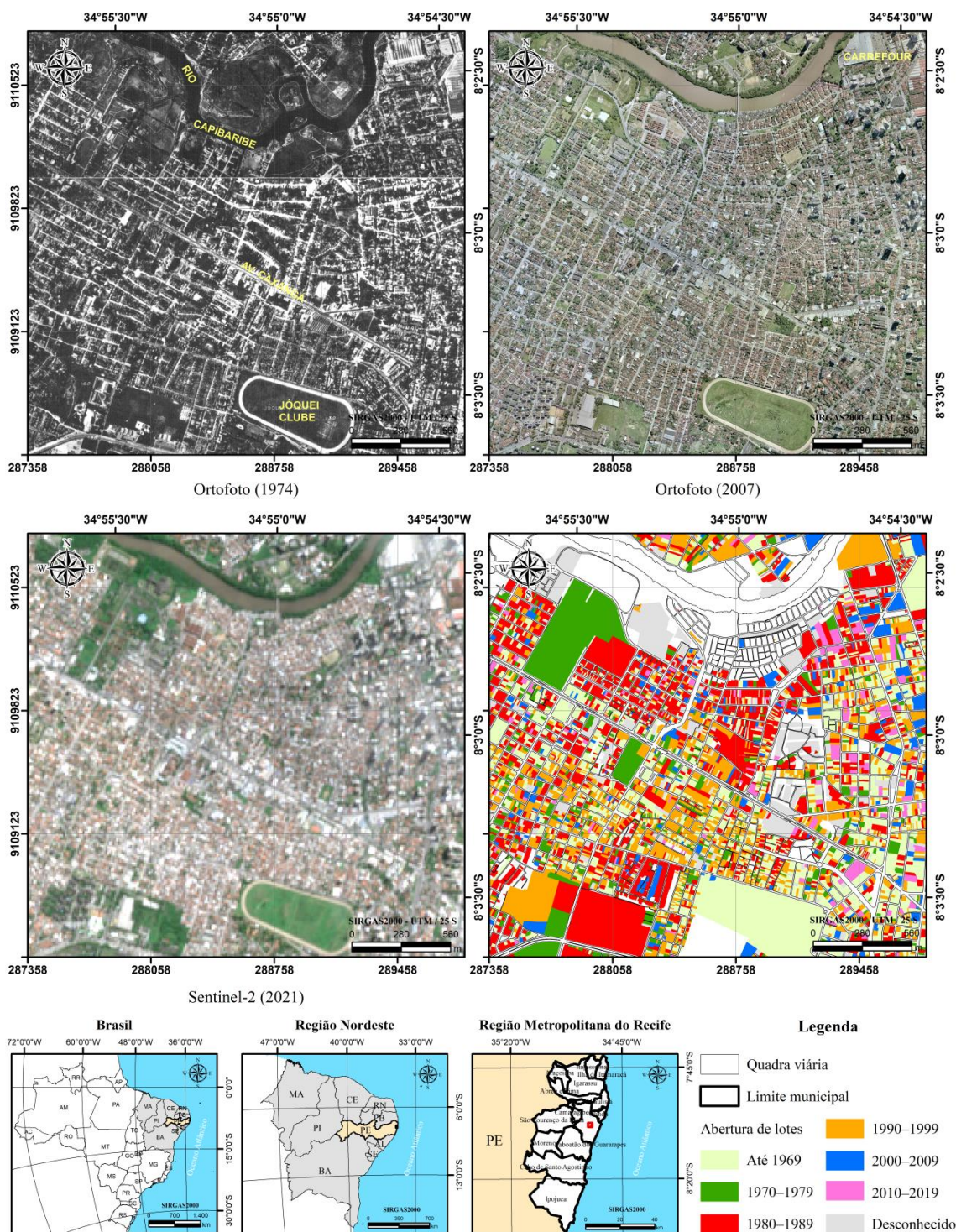
Na Figura 136, o crescimento urbano ocorreu ao longo da UFPE e da SUDENE (situadas às margens da BR-101) e da Av. Caxangá. Houve abertura de lotes para edificação de imóveis, construção de vias de circulação (Av. Mário de Lyra), unidades de ensino (IFPE, Colégio Militar). A urbanização se intensificou nos anos de 1980.

Figura 137 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 3.



Fonte: dados geospaciais (GOOGLE, 2021).

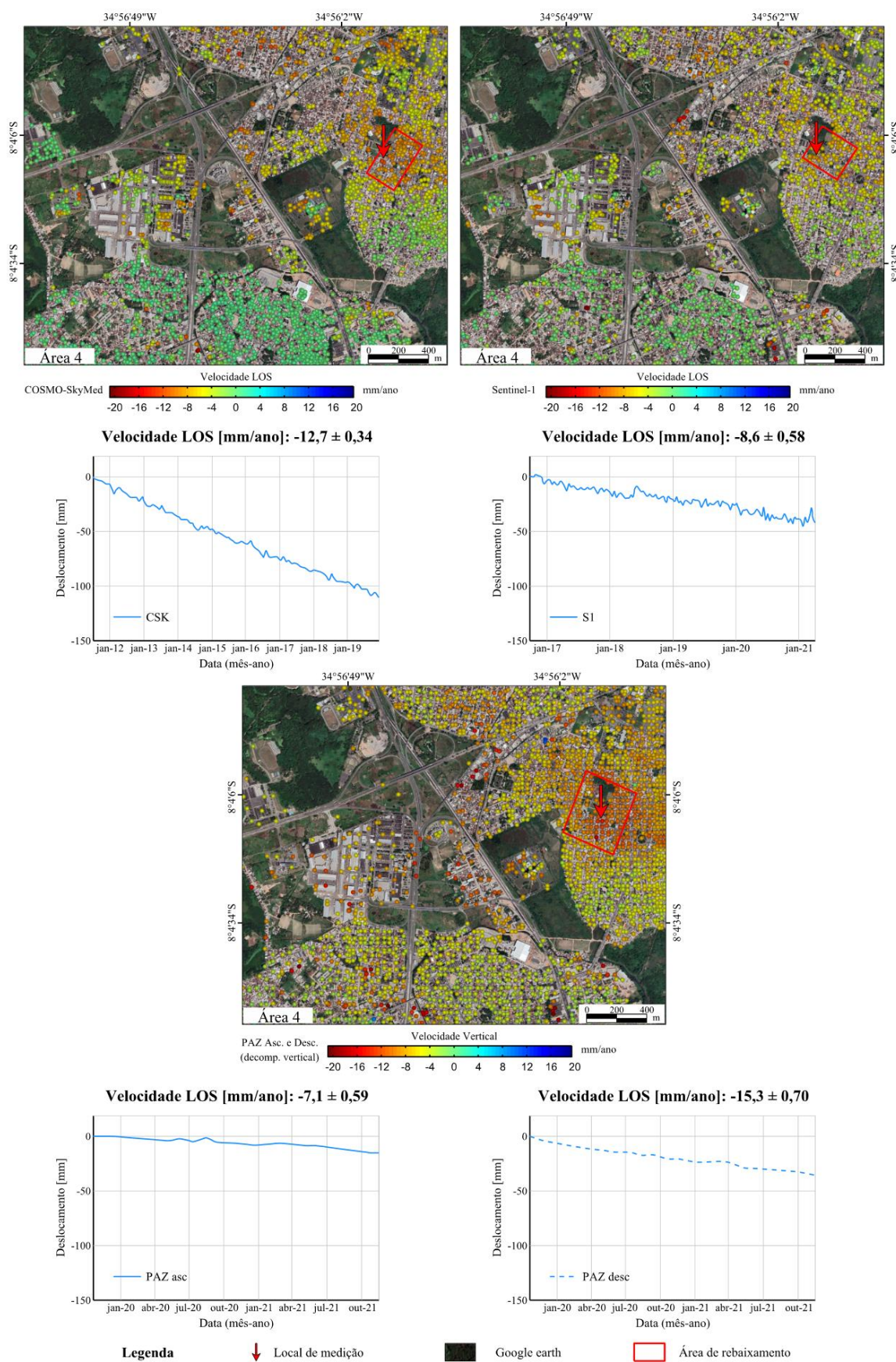
Figura 138 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 3.



Fonte: dados geoespaciais (CONDEPE, 1974; PCR, 2007, 2020a, 2020d; IBGE, 2018a, 2018b).

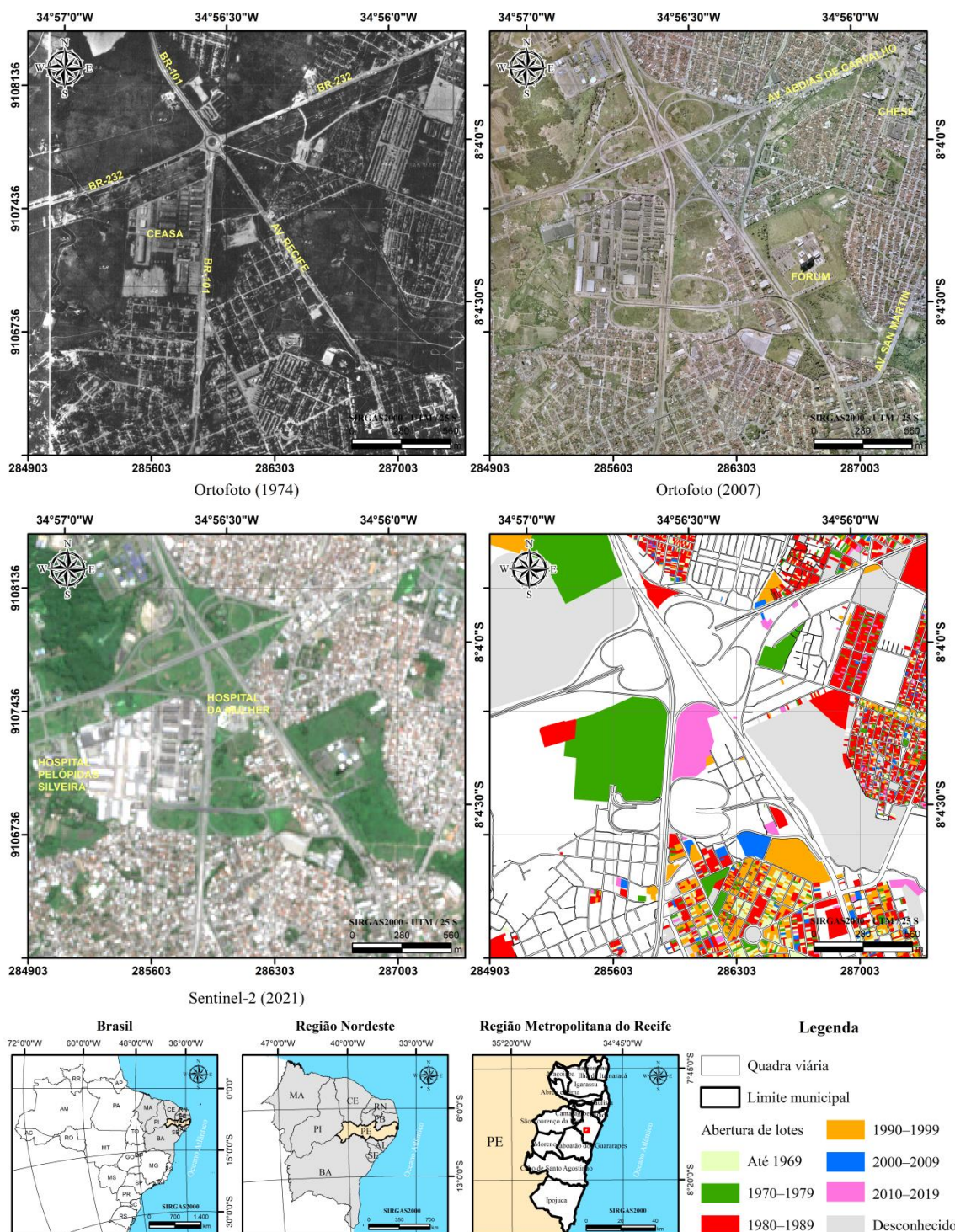
Na Figura 138, o crescimento urbano ocorreu ao longo da Av. Caxangá e de áreas recuperadas do rio Capibaribe com modificação do curso de água. Houve abertura de lotes para edificação de imóveis, construção de vias de circulação, supermercado (Carrefour). A urbanização se intensificou nos anos de 1980.

Figura 139 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 4.



Fonte: dados geoespaciais (GOOGLE, 2021).

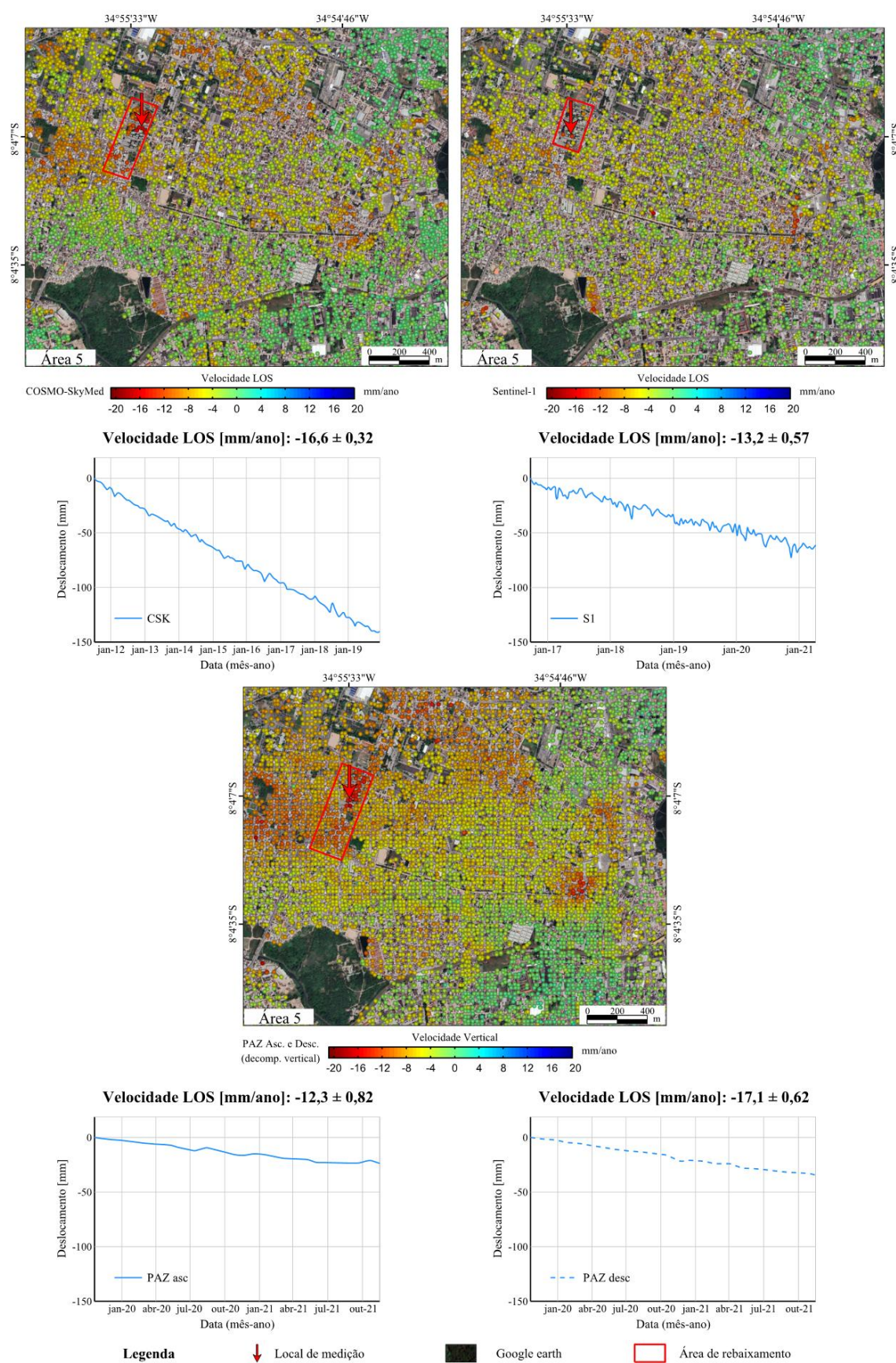
Figura 140 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 4.



Fonte: dados geospaciais (CONDEPE, 1974; PCR, 2007, 2020a, 2020d; IBGE, 2018a, 2018b).

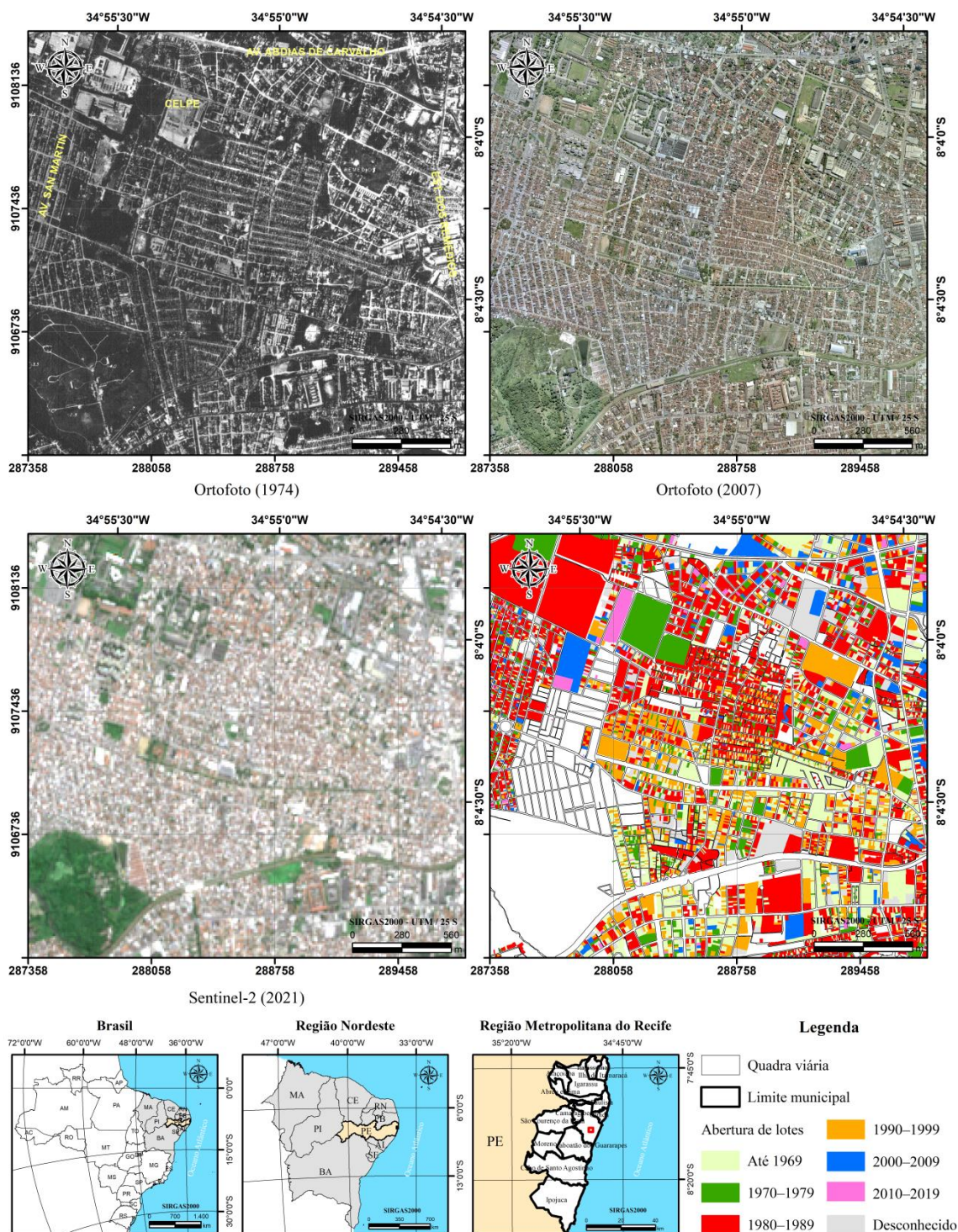
Na Figura 140, o crescimento urbano ocorreu ao longo das rodovias (BR-232 e BR-101) e da Av. Recife. Houve abertura de lotes para edificação de imóveis, construção de vias de circulação, hospitais (Pelópidas Silveira, e da Mulher), repartições públicas (Fórum, Chesf). A urbanização se intensificou nos anos de 1980.

Figura 141 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 5.



Fonte: dados geoespaciais (GOOGLE, 2021).

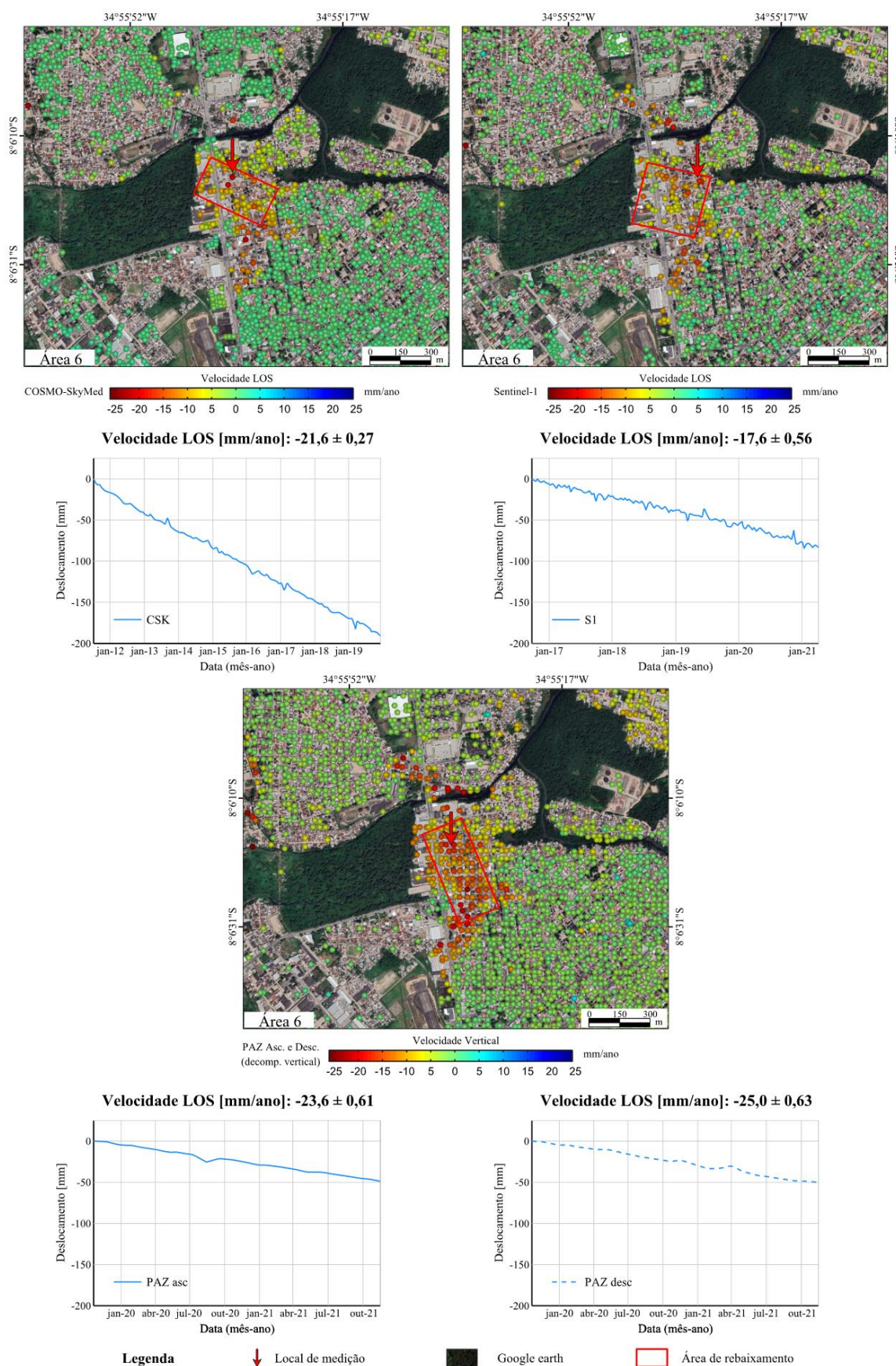
Figura 142 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 5.



Fonte: dados geospaciais (CONDEPE, 1974; PCR, 2007, 2020a, 2020d; IBGE, 2018a, 2018b).

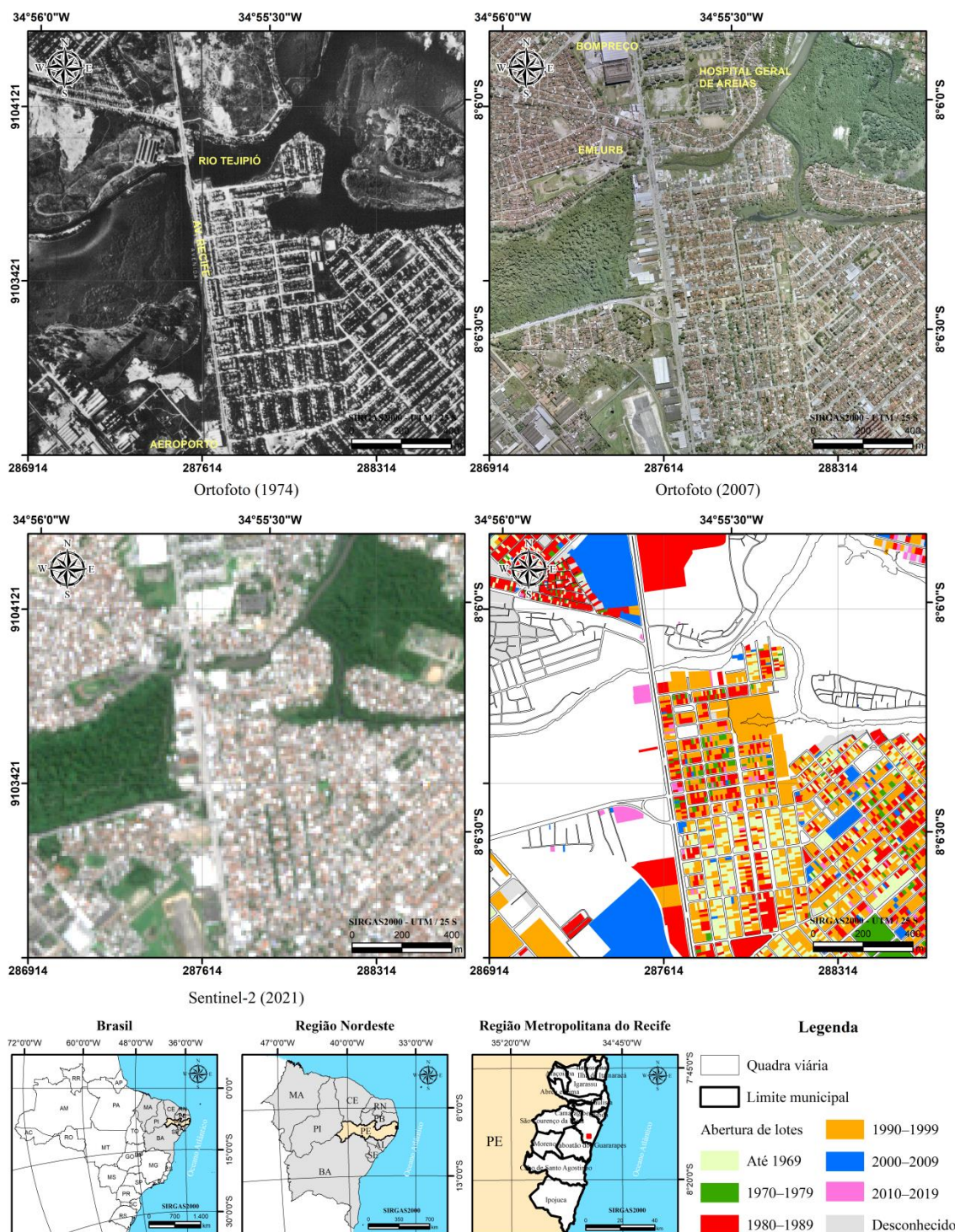
Na Figura 142, o crescimento urbano ocorreu ao longo da Av. San Martin e nas proximidades da Av. Abdias de Carvalho. Houve abertura de lotes para edificação de imóveis, construção de vias de circulação. A urbanização se intensificou nos anos de 1980.

Figura 143 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, Área 6.



Fonte: dados geoespaciais (GOOGLE, 2021).

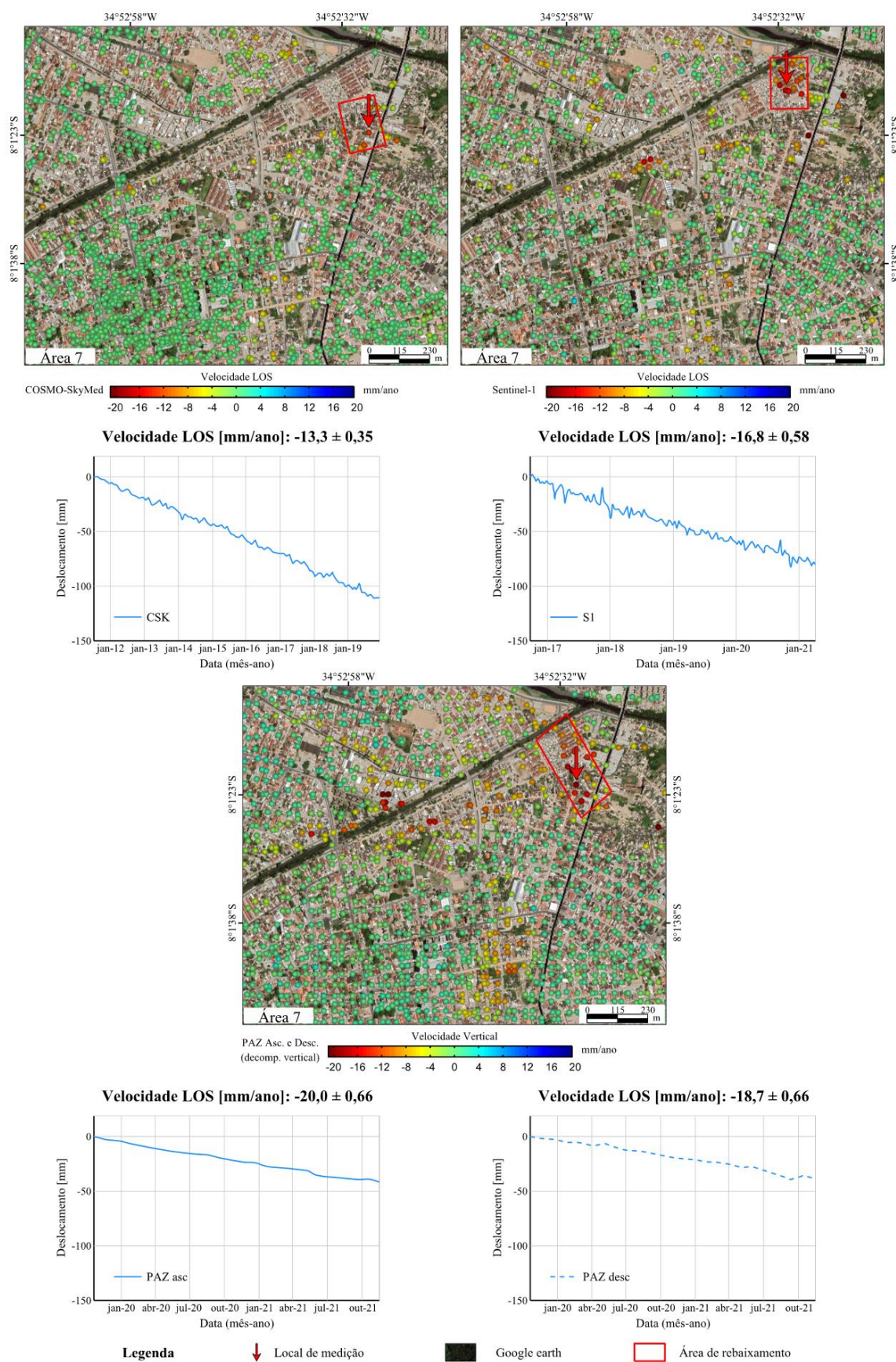
Figura 144 – Mapas de avanço da urbanização na zona Oeste, Área 6.



Fonte: dados geoespaciais (CONDEPE, 1974; PCR, 2007, 2020a, 2020d; IBGE, 2018a, 2018b).

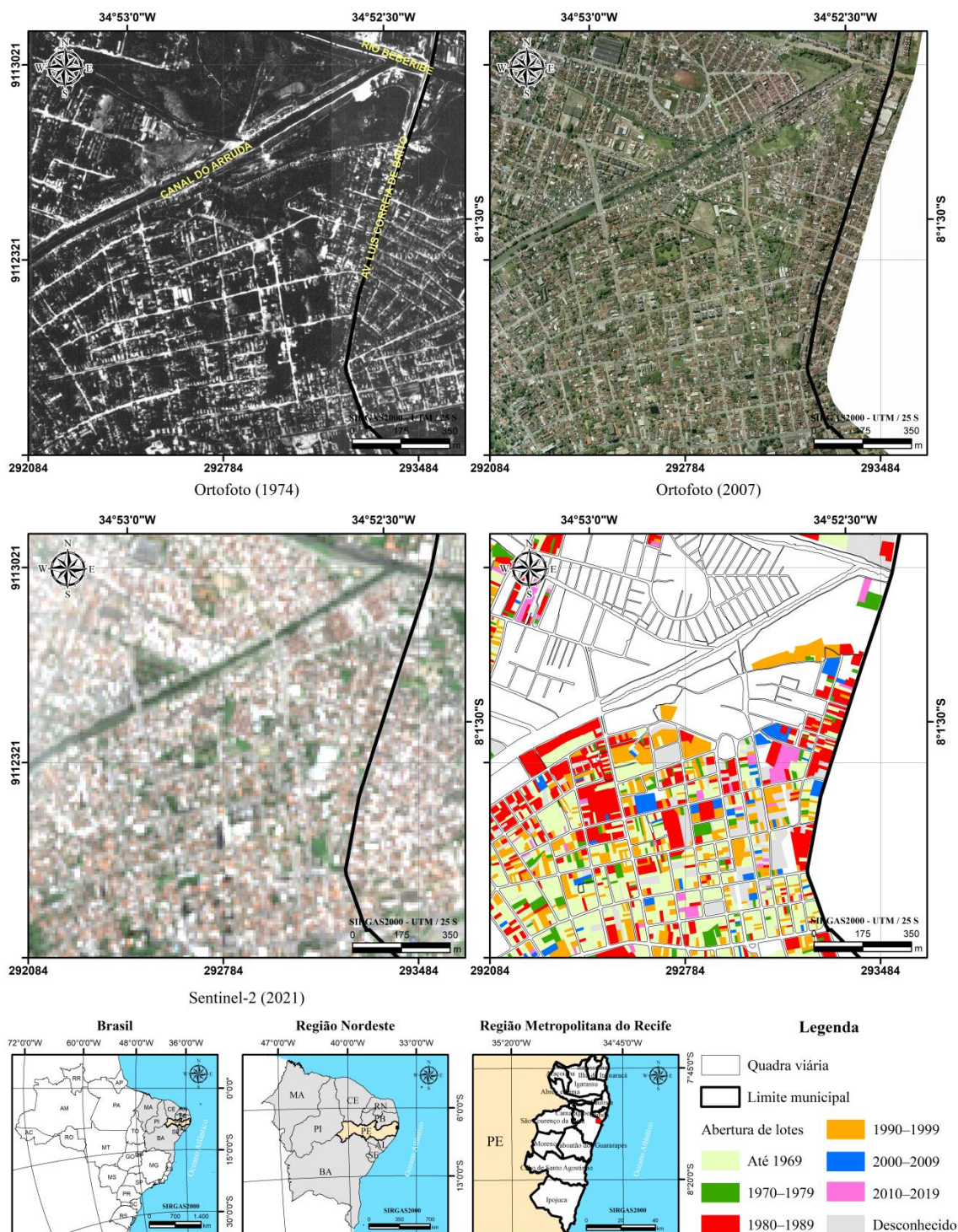
Na Figura 144, o crescimento urbano ocorreu ao longo da Av. Recife (situada às margens do rio Tejiú) nas proximidades do aeroporto. Houve abertura de lotes para edificação de imóveis, construção de vias de circulação, hospital, supermercado (Bompreço), equipamento público (EMLURB, Hospital). A urbanização se intensificou nos anos de 1990.

Figura 145 – Velocidade de deslocamento na zona Norte, Área 7.



Fonte: dados geospaciais (GOOGLE, 2021).

Figura 146 – Mapas de avanço da urbanização na zona Norte, Área 7.



Fonte: dados geospaciais (CONDEPE, 1974; PCR, 2007, 2020a, 2020d; IBGE, 2018a, 2018b).

Na Figura 146, o crescimento urbano ocorreu nas proximidades do Rio Beberibe e do Canal do Arruda e ao longo da Av. Prof. José dos Anjos. Houve abertura de lotes para edificação de imóveis e construção de vias de circulação. A urbanização se intensificou a partir dos anos 1980.

De maneira cronológica, a dinâmica construtiva do Recife se originou do Centro (atividade portuária) para as regiões Norte (engenhos) e Sul (praias). A expansão urbana para outros locais, como a zona Oeste (interior), resultou de ocupação tardia. Talvez por isso, nessa localidade ocorreram as maiores taxas de subsidência do solo nos anos recentes.

Ademais, a análise do perfil litológico da planície recifense (Figura 117) revelou a presença de argila e silte. A capacidade de compressibilidade desses elementos contribuiu para o desenvolvimento da compactação do solo decorrente de cargas aplicadas à superfície, tais como: espaços construídos, edificações, circulação de pessoas, tráfego de veículos.

Em vista disso, analisaram-se casos de instabilidade superficial em sete áreas de investigação: seis na zona Oeste e uma na região Norte. A verificação encontrou indícios da correlação entre subsidência do solo e urbanização. Isso decorreu da ocupação urbana, nas últimas décadas, em locais de recuperação de terrenos alagados e/ou de áreas instáveis.

Na Área 1 (Figura 133), detectaram-se casos espaçados de subsidência do solo. As medições apresentaram taxa de deslocamento média em torno de -5 mm/ano. Identificou-se área de rebaixamento com velocidade igual a 18 mm/ano nas proximidades do Rio Capibaribe e da Av. Caxangá, situada no bairro da Várzea (Figura 134).

Na Área 2 (Figura 135), observaram-se casos concentrados de subsidência do solo. As medições revelaram taxa de deslocamento média próxima de -7 mm/ano. Verificou-se área de rebaixamento com velocidade igual a 17,1 mm/ano nas adjacências da UFPE, localizada no bairro do Engenho do Meio (Figura 136).

Na Área 3 (Figura 137), constataram-se casos concentrados de subsidência do solo. As medições tiveram taxa de deslocamento média em torno de -5 mm/ano. Observou-se área de rebaixamento com velocidade igual a 13 mm/ano nos arredores do Jôquei Clube e da Av. Caxangá, situada no bairro do Prado (Figura 138).

Na Área 4 (Figura 139), detectaram-se casos concentrados de subsidência do solo. As medições indicaram taxa de deslocamento média perto de -5 mm/ano. Identificou-se área de rebaixamento com velocidade igual a 15,3 mm/ano no entorno da Av. San Martin, localizada no bairro de mesmo nome (Figura 140).

Na Área 5 (Figura 141), observaram-se casos concentrados de subsidência do solo. As medições exibiram taxa de deslocamento médio em torno de -6 mm/ano. Verificou-se área de rebaixamento com velocidade igual a 17,1 mm/ano nas proximidades da Celpe, situada no bairro de San Martin (Figura 142).

Na Área 6 (Figura 143), constataram-se casos concentrados de subsidência do solo. As medições apresentaram taxa de deslocamento média próxima de -8 mm/ano. Observou-se área

de rebaixamento com velocidade igual a 25 mm/ano ao longo da Av. Recife sobre o Rio Tejiptió, localizada nos bairros do Ibura e Ipsep (Figura 144).

Na Área 7 (Figura 145), identificaram-se casos concentrados de subsidência do solo. As medições revelaram taxa de deslocamento médio perto de -6 mm/ano. Verificou-se área de rebaixamento com velocidade igual a 20 mm/ano nas proximidades do Rio Beberibe e do Canal do Arruda, situada no bairro de Campo Grande (Figura 146).

De modo geral, nas áreas de investigação das zonas Oeste e Norte, o rebaixamento acumulado no período (2011-2021) apresentou valor próximo de (Figura 147): 160 mm para a Área 1, 180 mm para a Área 2, 135 mm para a Área 3, 140 mm para a Área 4, 175 mm para a Área 5, 230 mm para a Área 6 e 152 mm para a Área 7.

Figura 147 – Mapas de deslocamento acumulado em áreas de investigação nas zonas Oeste e Norte. (continua)

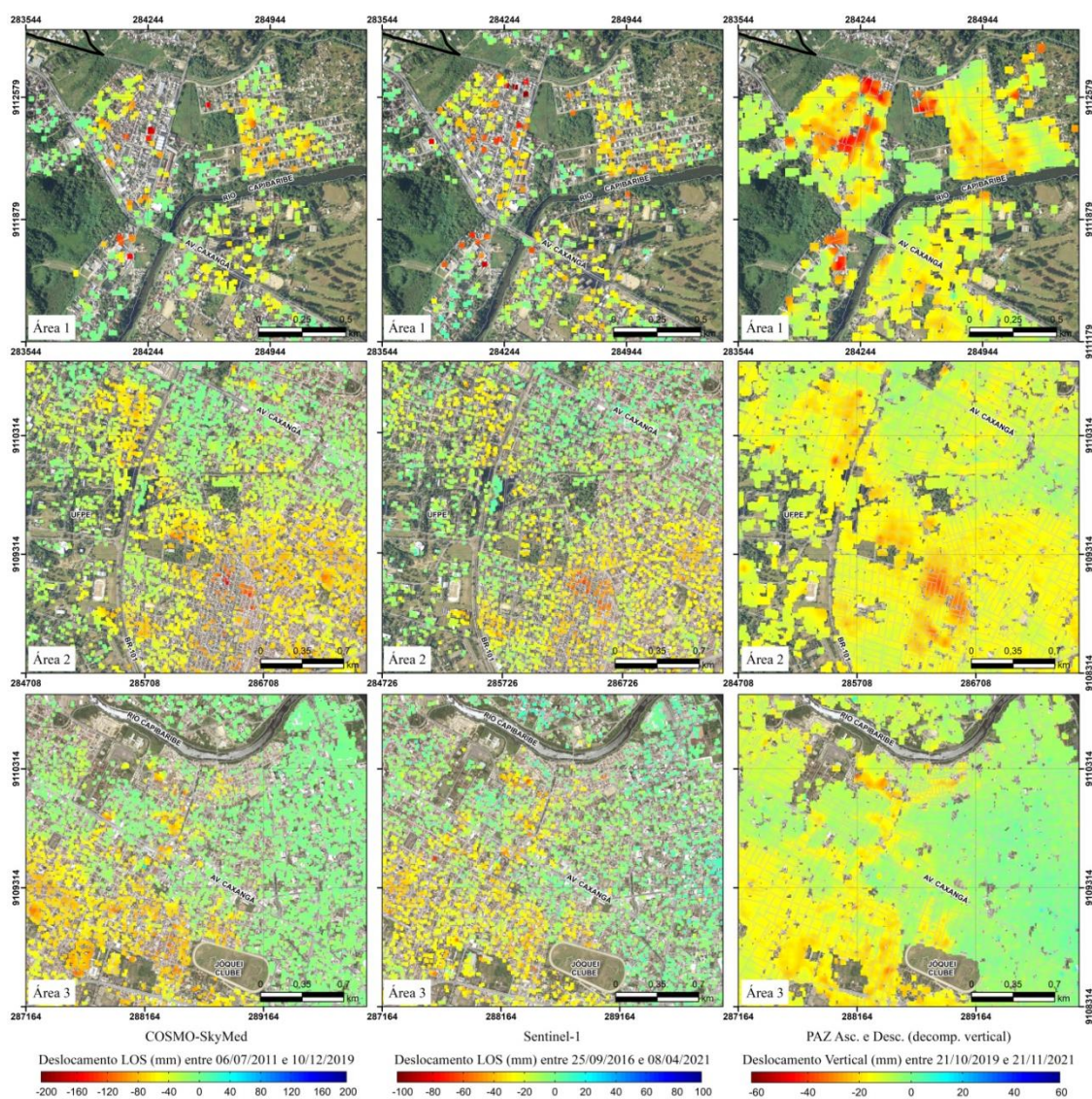
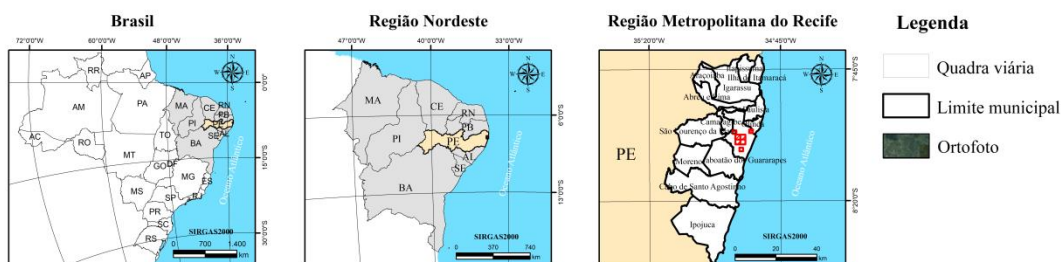
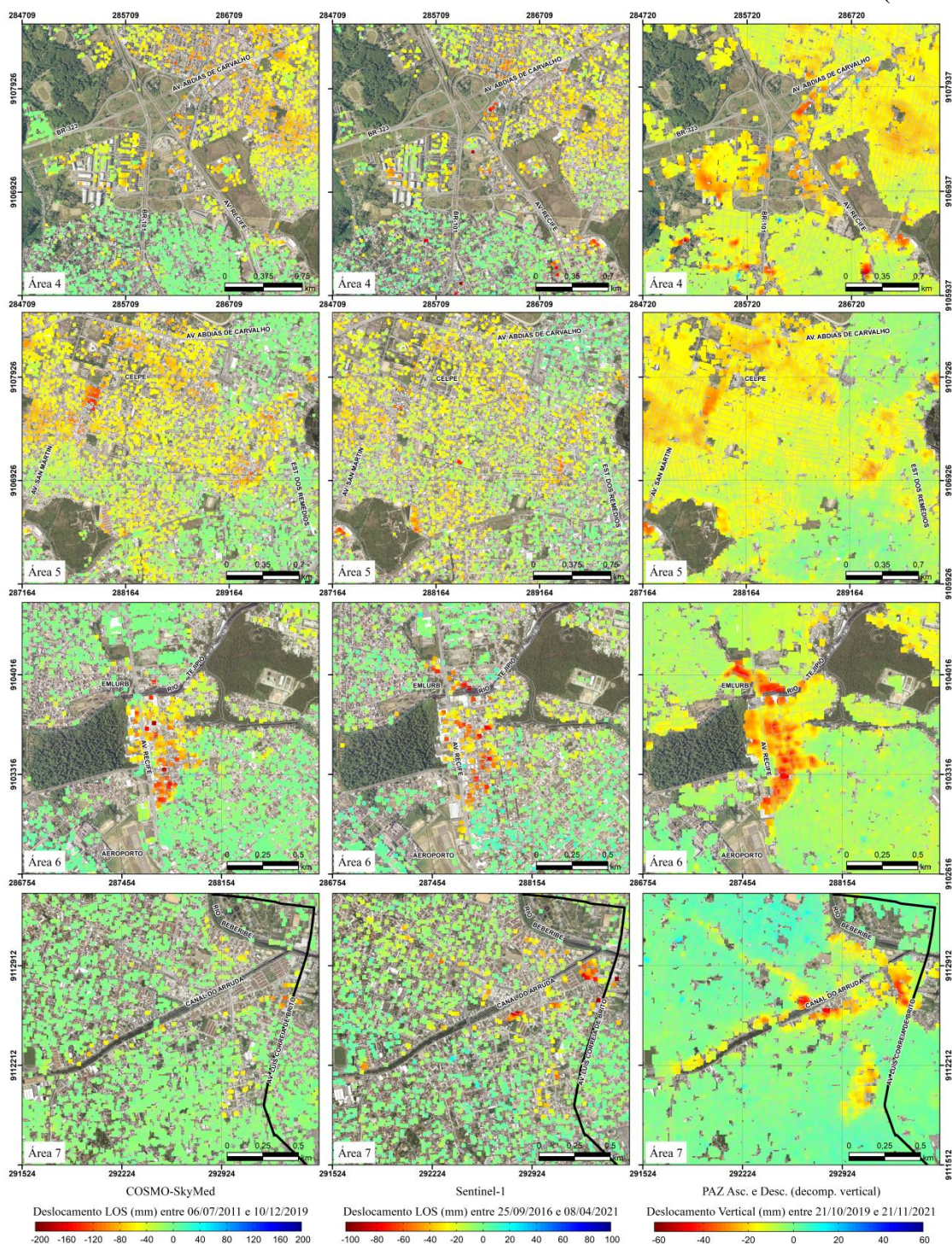


Figura 147 – Mapas de deslocamento acumulado em áreas de investigação nas zonas Oeste e Norte. (conclusão)



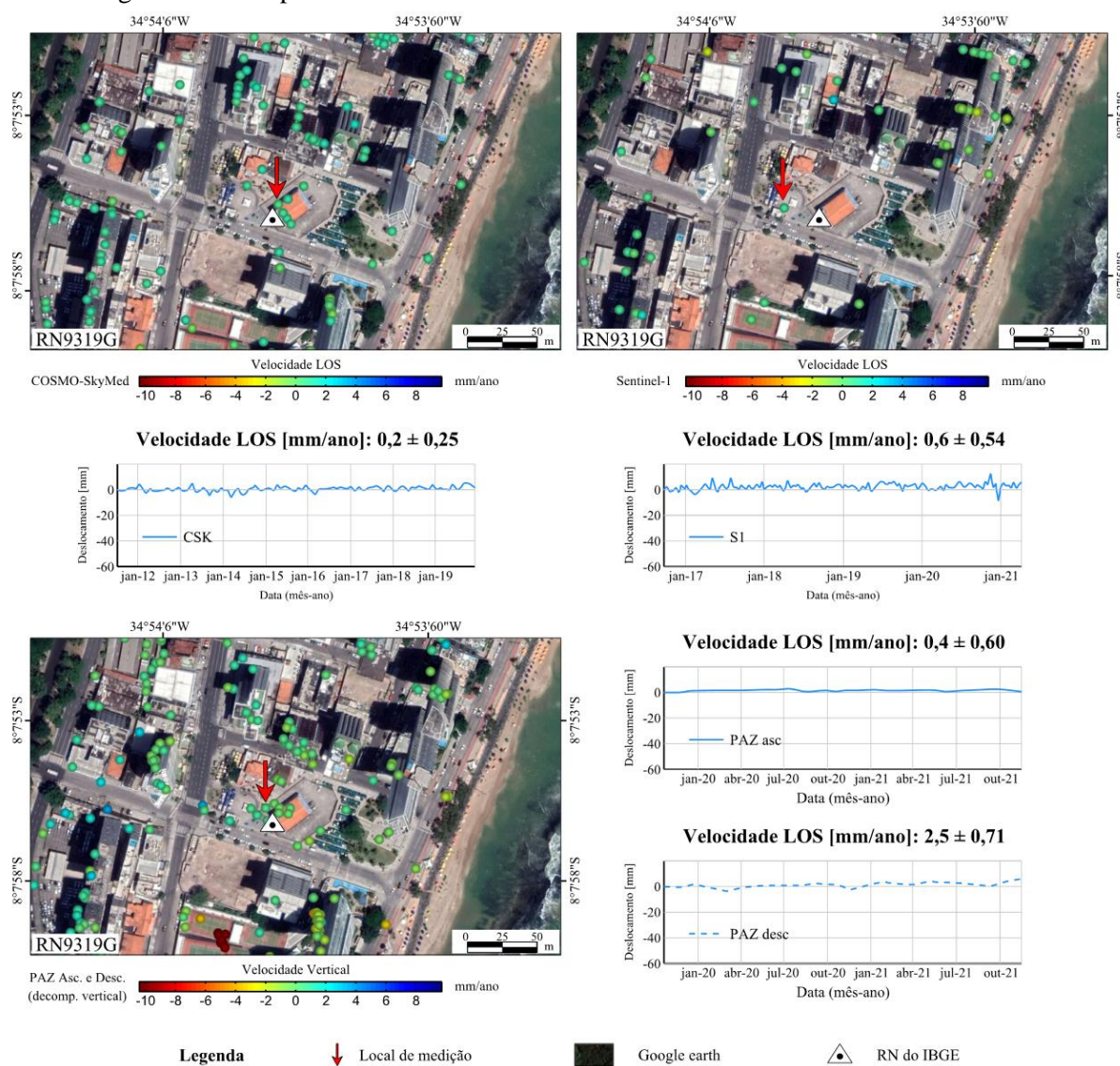
Fonte: dados goespaciais (APAC, 2015b; PCR, 2016, 2020d; IBGE, 2018a, 2018b).

#### 6.7.4 Análise de Levantamento Geodésico

A avaliação da subsidência do solo do Recife procedeu com análise comparativa aos estudos de Luna *et al.* (2017) e Bedini (2020), e ao monitoramento contínuo de estação GNSS (IBGE, 2022a), produtos envolvidos na detecção de áreas de rebaixamento da cidade.

O primeiro trabalho (LUNA *et al.*, 2017) empregou nivelamento geométrico de precisão na comparação temporal de altitude no período de 57 anos – de 1958 a 2015. O resultado revelou rebaixamento de 3,86 cm para a Referência de Nível do IBGE (RN 9319G) situada na área de Boa Viagem, caracterizada por intensa exploração de água subterrânea. A velocidade de deslocamento nesse intervalo foi de -0,68 mm/ano. A análise dessa informação ocorreu com o mapa de velocidade de deslocamento PSInSAR (Figura 148).

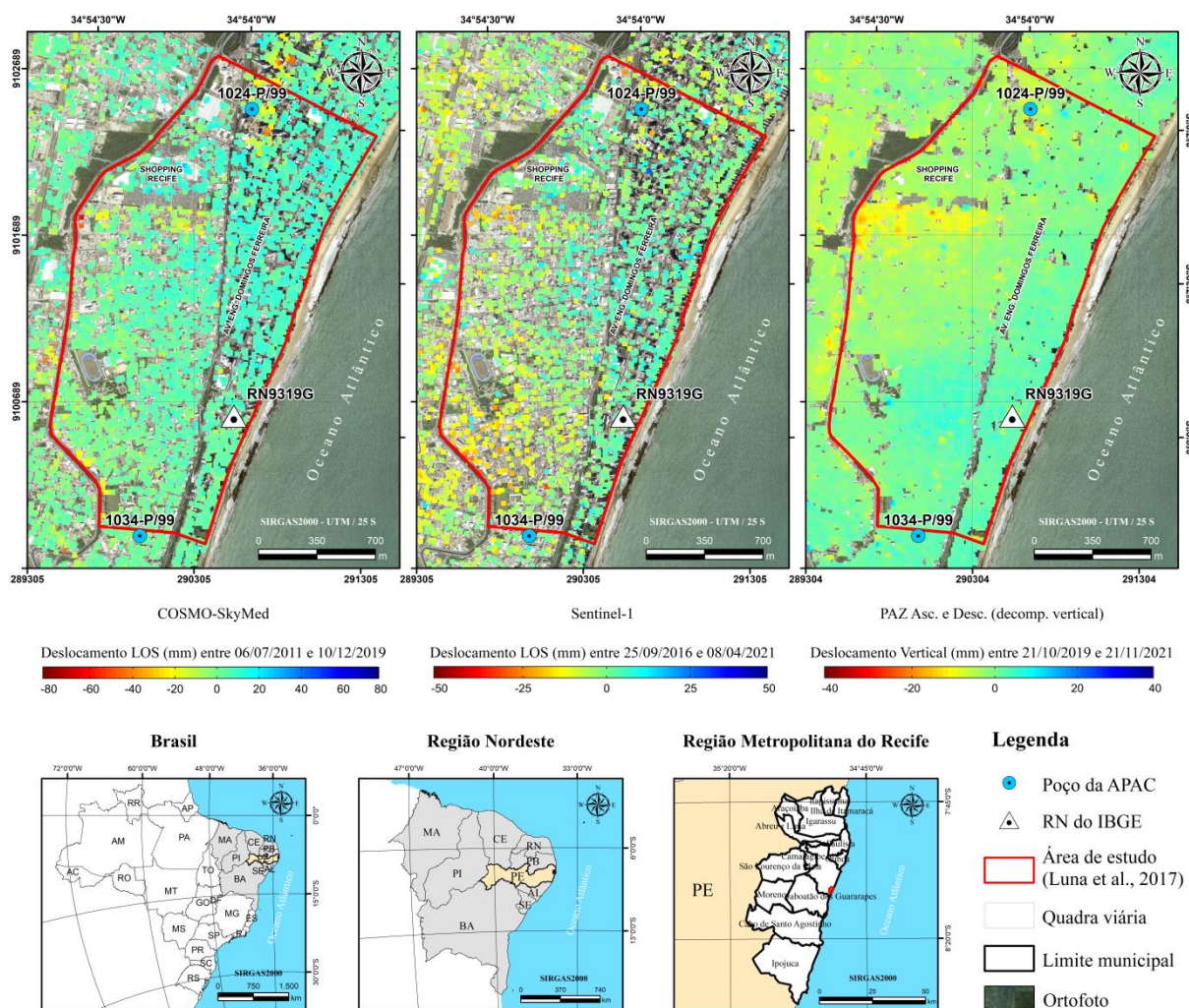
Figura 148 – Mapas de velocidade de deslocamento no entorno do marco RN 9319G.



Fonte: dados geospaciais (IBGE, 2018e; GOOGLE, 2021).

Na Figura 148, houve ausência de pontos de medições PS com tendência de rebaixamento nas imediações do marco RN 9319G para o período de investigação PSInSAR (2011-2021). Entretanto, na área de estudo utilizada por Luna *et al.* (2017) se identificaram locais de deslocamento superficial em relação aos poços da APAC (Figura 149): 1024-P/99 (Figura 120) e 1034-P/99 (Figura 121) – envolvidos na acentuada captação dos recursos hídricos subterrâneas na região Sul.

Figura 149 – Mapas de deslocamento acumulado na área de estudo de Luna *et al.* (2017).



Fonte: Luna *et al.* (2017); dados geoespaciais (APAC, 2015b; IBGE, 2018a, 2018b, 2018e; PCR, 2020a, 2020d).

Na Figura 149, além dos locais de rebaixamento causados pelos poços 1024-P/99 e 1034-P/PP, observaram-se também outras localidades com deformação na área de estudo empregada por Luna *et al.* (2017) – situada na região de dessaturação do aquífero Cabo (Figura 115) – com valor de deslocamento acumulado (2011-2021) perto de -40 mm.

O segundo trabalho (BEDINI, 2020) utilizou tecnologia PSInSAR com 68 imagens do Sentinel-1 no período de 2,5 anos, de abril de 2017 a setembro de 2019. O estudo detectou intenso rebaixamento na região Oeste, resultado da urbanização recente com efeito na compactação do solo. Devido às condições geológicas do Recife (zonas estuarinas, áreas recuperadas), esse processo requer vários anos para o assentamento do terreno. A análise da movimentação superficial ocorreu com o mapa de velocidade de deslocamento (Figura 150).

Figura 150 – Mapas de velocidade de deslocamento da análise PSInSAR.

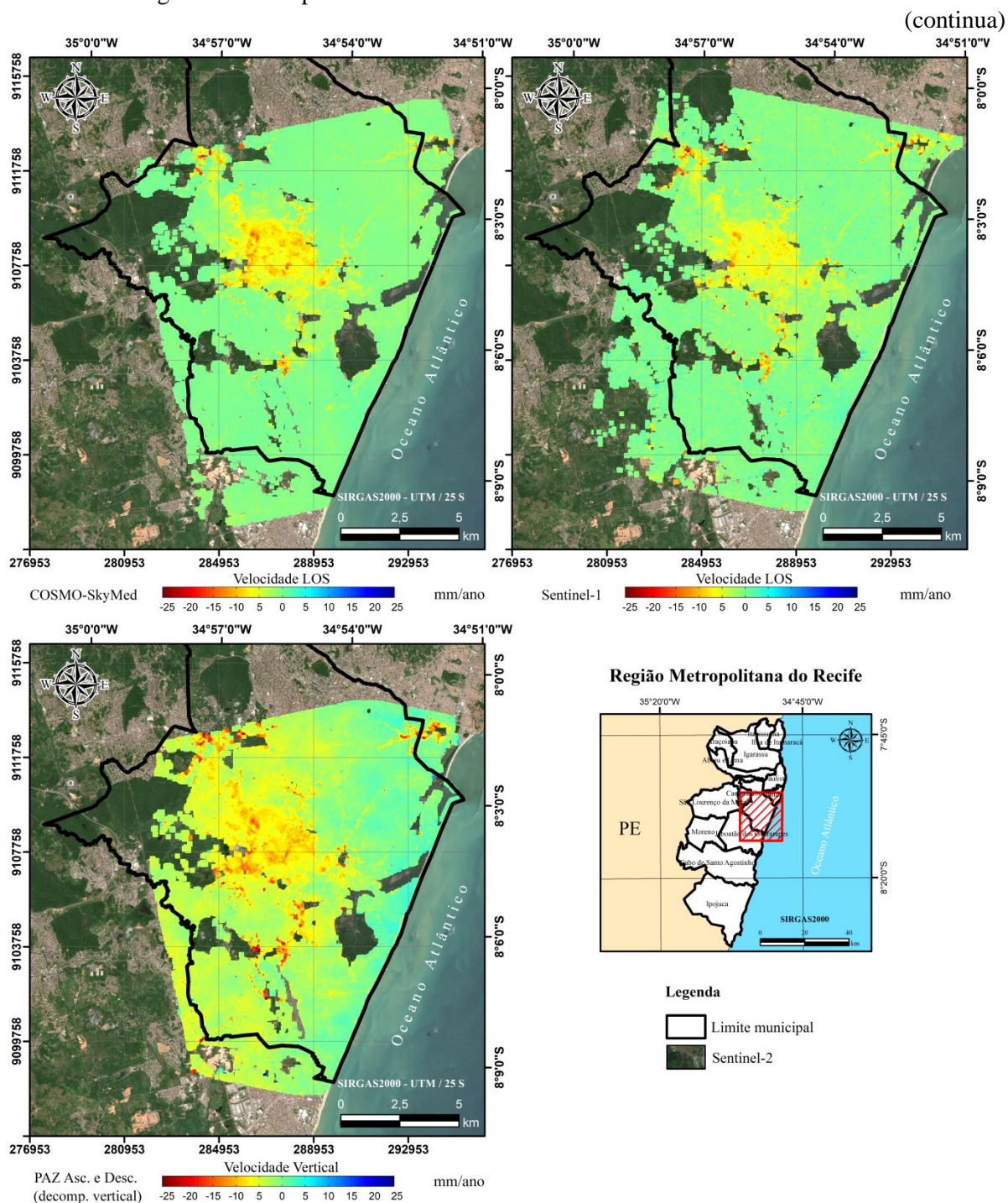
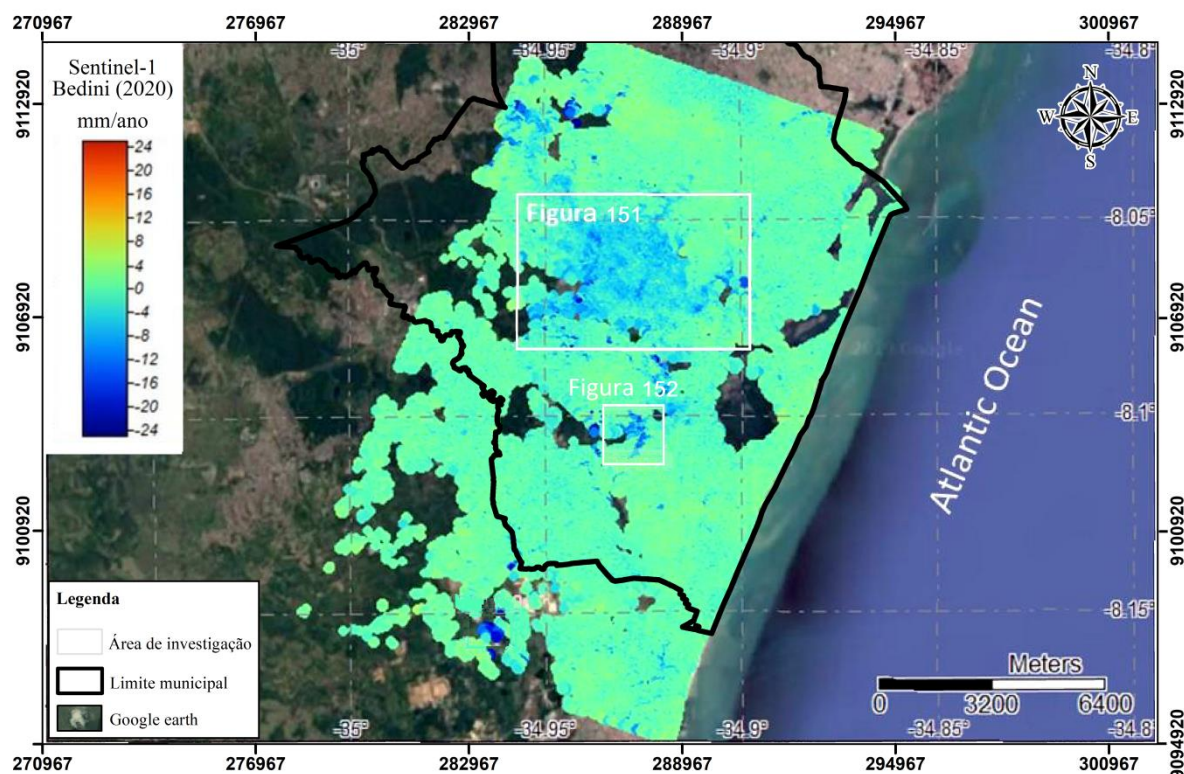


Figura 150 – Mapa de velocidade de deslocamento da análise PSInSAR.

(conclusão)



Fonte: dados geospaciais (IBGE, 2018a, 2018b; USGS, 2019); Bedini (2020).

Na Figura 150, os resultados apresentaram mesmo padrão de subsidência do solo entre esta pesquisa e o trabalho do Bedini (2020). Em ambos os estudos as maiores áreas de rebaixamento ocorreram na zona Oeste, nos bairros de (Figura 151): Afogados, Torrões, Cordeiro, Bongí, San Martin, Curado, Várzea e Caxangá. Também se observaram áreas menores de subsidência do solo em outras localidades com alto rebaixamento (Figura 152).

Figura 151 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, e na área de San Martin.

(continua)

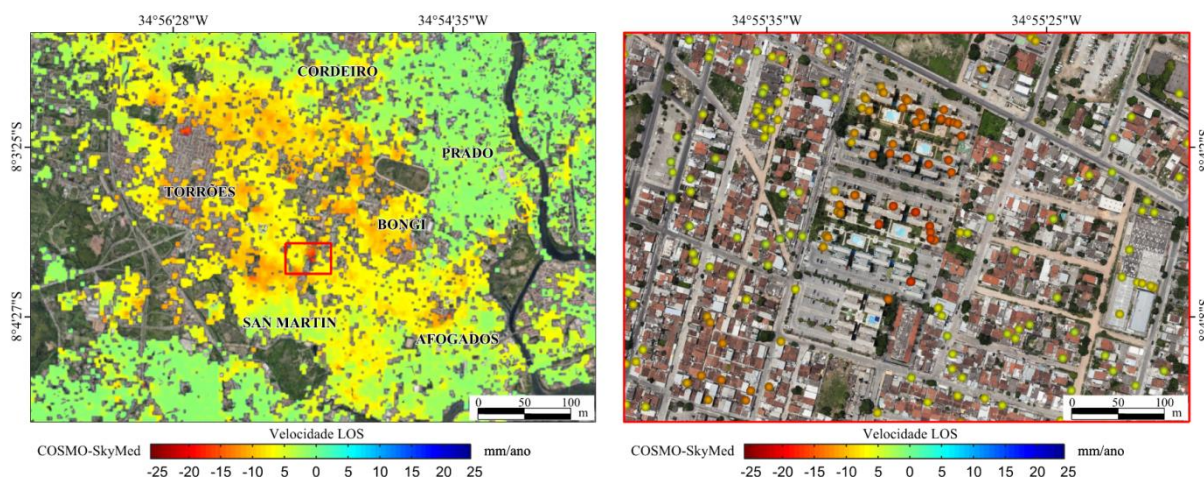
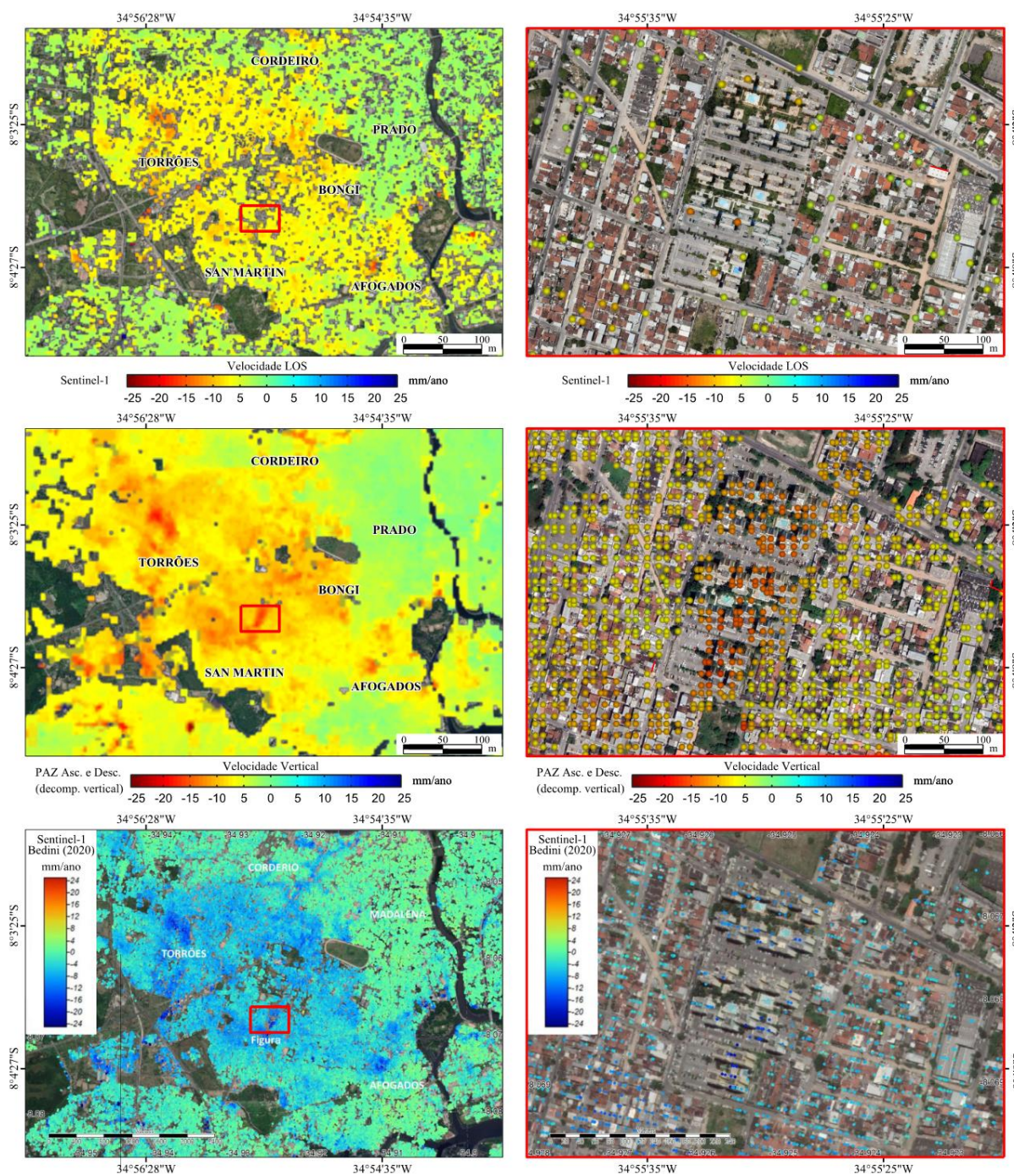


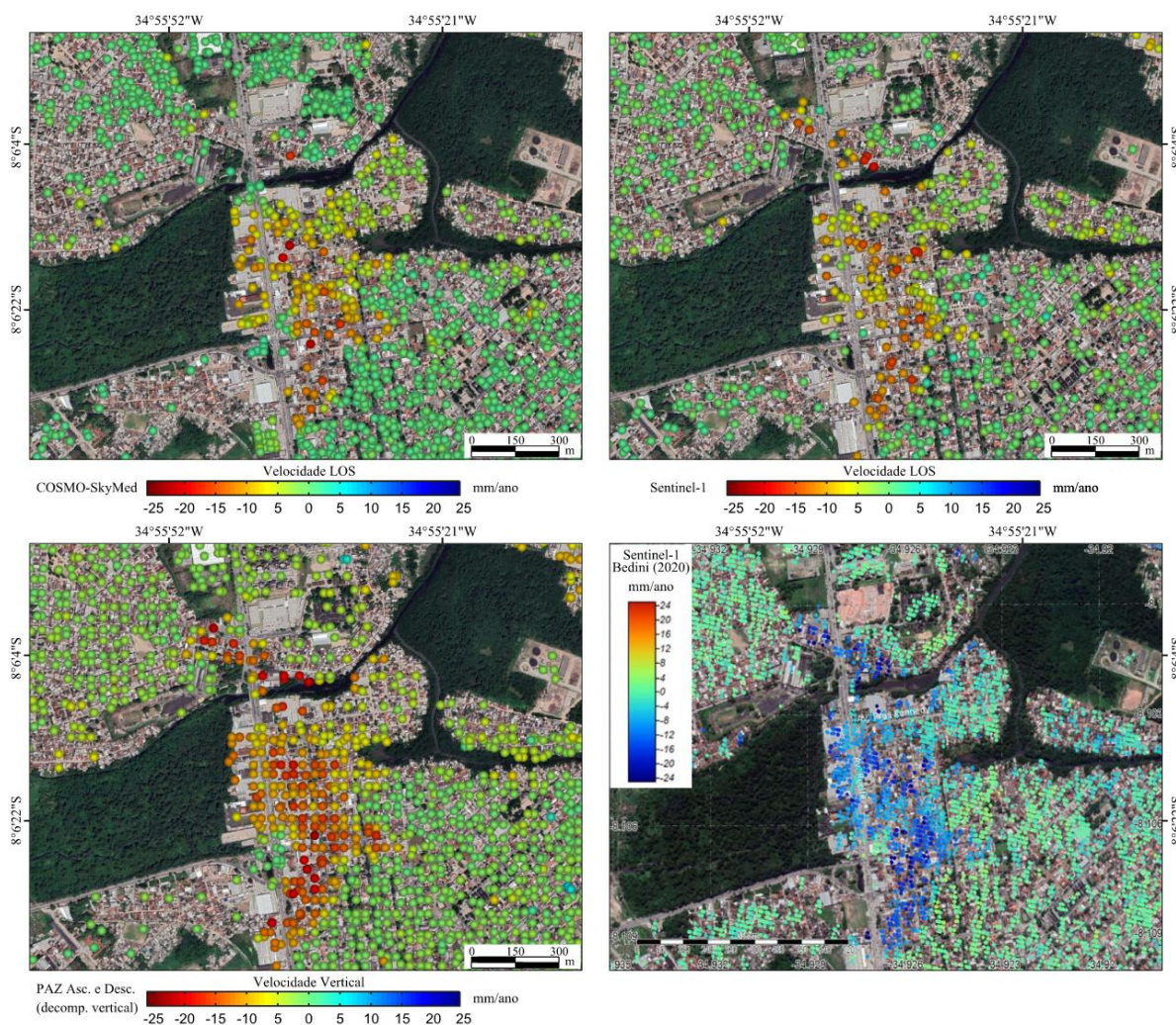
Figura 151 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste, e na área de San Martin.  
(conclusão)



Fonte: Bedini (2020); dados geospaciais (GOOGLE, 2021).

Na Figura 151, as taxas de deslocamento superficial variaram de poucos mm/ano até: - 16,6 mm/ano para COSMO-SkyMed; -13,2 mm/ano para Sentinel-1; -17,1 mm/ano para PAZ ascendente e descendente (decomposição vertical); e -15 mm/ano para Sentinel-1 relativo ao trabalho do Bedini (2020).

Figura 152 – Velocidade de deslocamento na zona Oeste entre os bairros do Ibura e Ipsep.



Fonte: Bedini (2020); dados geoespaciais (GOOGLE, 2021).

Na Figura 152, as taxas de deslocamento superficial variaram de poucos mm/ano até: - 21,6 mm/ano para COSMO-SkyMed; -17,6 mm/ano para Sentinel-1; -25 mm/ano para PAZ ascendente e descendente (decomposição vertical); e velocidade próxima de -25 mm/ano para Sentinel-1 referente aos resultados do Bedini (2020).

A diferença de velocidade de rebaixamento do Sentinel-1 entre esta pesquisa e o trabalho do Bedini (2020) ocorreu, provavelmente, devido à configuração de parâmetros no processamento PSInSAR (tendência linear, altura, referência InSAR) e/ou na seleção de pontos de medição (coerência temporal, *ASI* e refletividade). Isso gerou menos observáveis do Sentinel-1 nesta pesquisa, porém com maior confiabilidade (menor ruído). De modo geral, apesar das semelhanças entre tais resultados, o trabalho do Bedini (2020) não identificou subsidência do solo da zona Sul ocasionada pela exploração das águas subterrâneas.

A limitação temporal na investigação PSInSAR (2017-2019) por Bedini (2020) pode ter impossibilitado a detecção da movimentação superficial da zona Sul, caracterizada por apresentar rebaixamento do terreno lento. O estudo da subsidência do solo nessa região requer maior intervalo de observação SAR, conforme empregado nesta pesquisa. Desta forma, a aplicação da interferometria SAR por Bedini (2020) ocorreu de maneira pioneira na detecção da subsidência do solo da zona Oeste do Recife.

Por último, o terceiro estudo utilizou estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE (2022a) pertencente ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Todas as estações da RBMC foram equipadas com receptor GNSS de alto desempenho na observação de coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altura elipsoidal) e, bem como, de suas velocidades referidas ao SIRGAS2000. A pesquisa empregou dados posicionais das estações da RBMC: RECF e PERC, ambas situadas em Recife.

A referência RECF se localizou na Cidade Universitária da UFPE. Funcionou por quase 20 anos, com período de observação de 9 de janeiro de 2000 a 17 de fevereiro de 2018 (IBGE, 2022b). A sua substituição ocorreu pela estação PERC, localizada no Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) – distante em 875 m da antiga estrutura geodésica. A atual referência apresentou dados de observação desde 15 de agosto de 2018 (IBGE, 2022c).

De acordo com o IBGE (2021, 2022d), o monitoramento multianual das estações observou movimentação das componentes (Figura 153): Norte, Leste e Vertical. A análise da variação posicional de tais estações ocorreu com dados de velocidade de deslocamento PSInSAR (Figura 154; Tabela 38).

Figura 153 – Monitoramento posicional das estações RECF e PERC.

(continua)

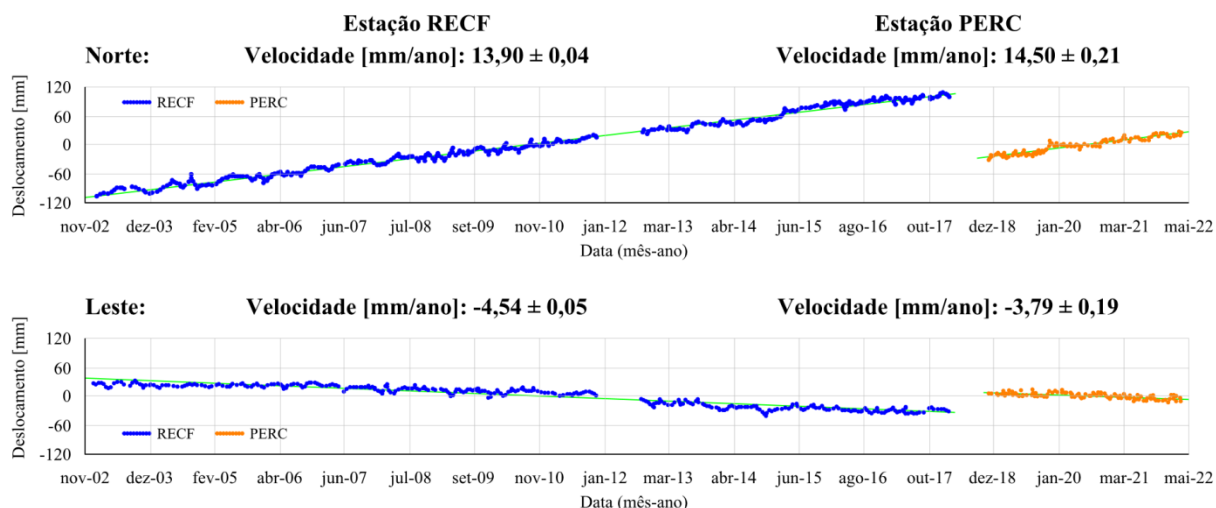
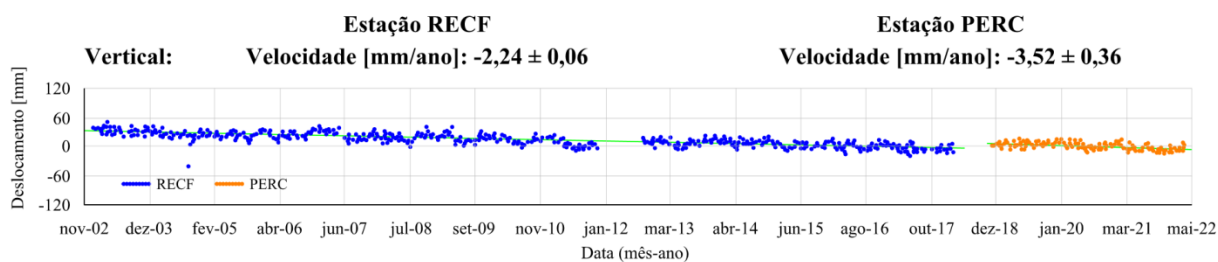


Figura 153 – Monitoramento posicional das estações RECF e PERC.

(conclusão)



Fonte: IBGE (2021, 2022d).

Figura 154 – Mapas de velocidade de deslocamento das estações RECF e PERC.

(continua)

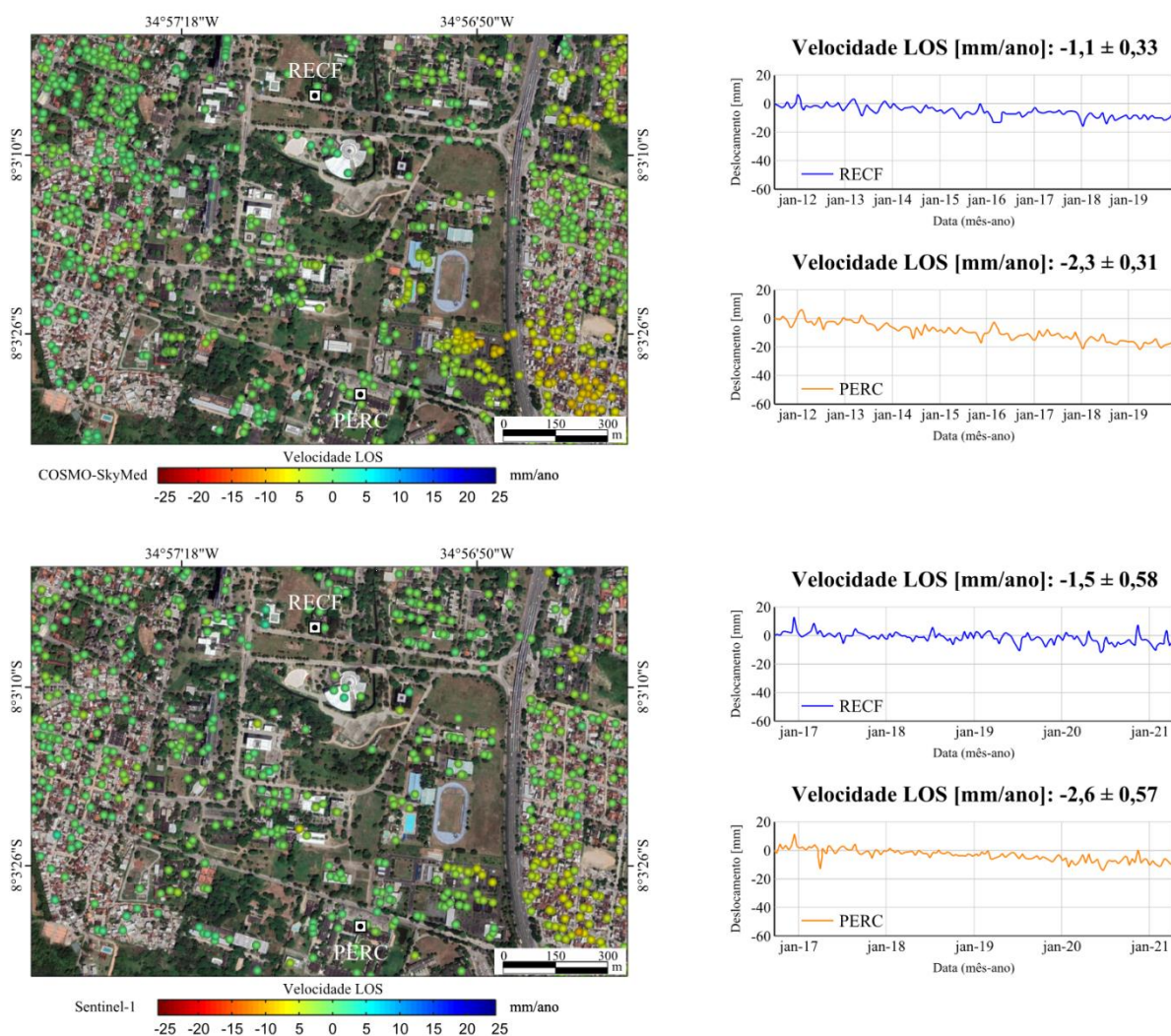
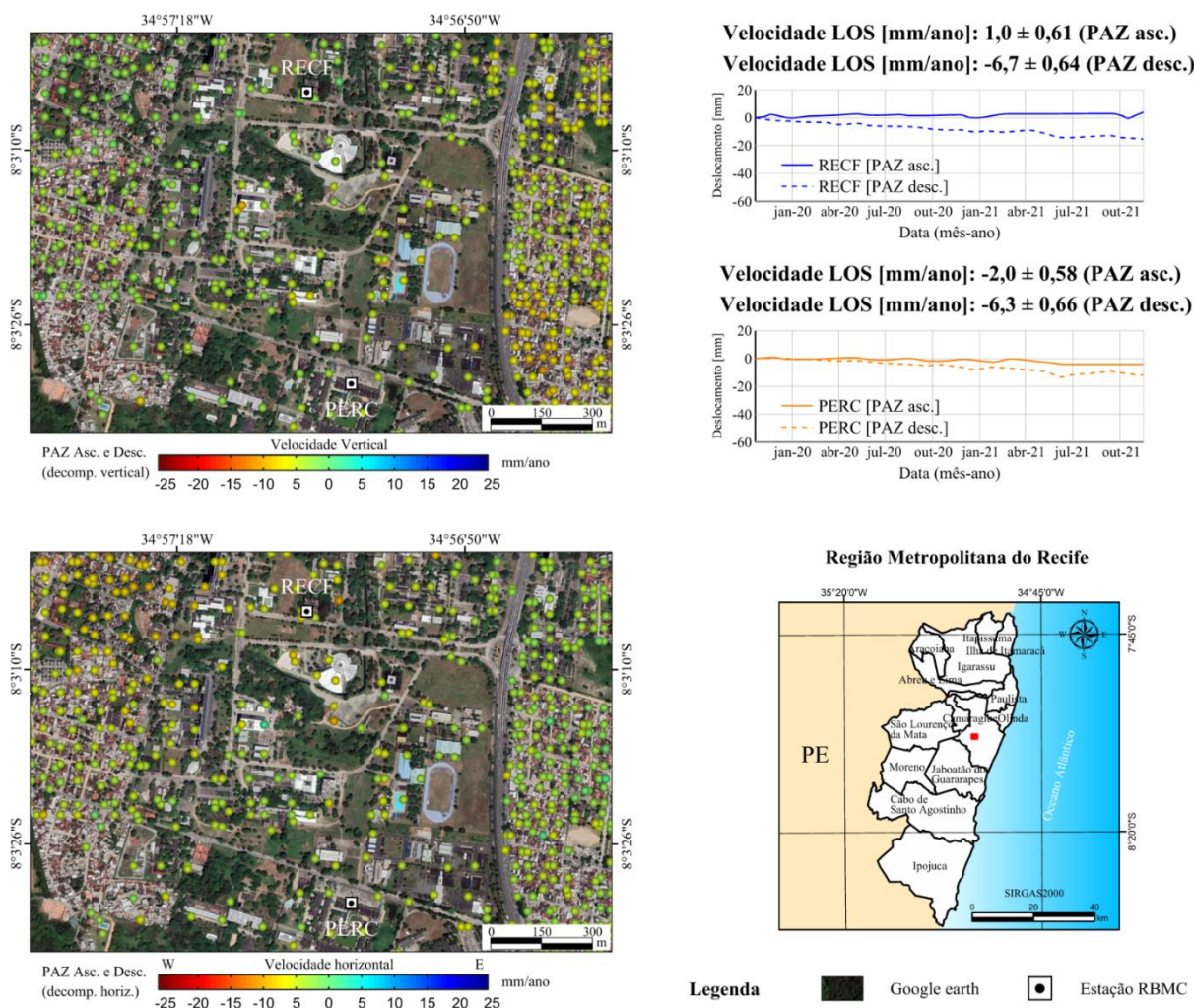


Figura 154 – Mapas de velocidade de deslocamento das estações RECF e PERC. (conclusão)



Fonte: dados geoespaciais (GOOGLE, 2021); IBGE (2021, 2022d).

Tabela 38 – Resultado GNSS e PSInSAR do monitoramento das estações RECF e PERC.

Tecnologia	Estação RECF				Estação PERC				Período
	Velocidade (mm/ano)				Velocidade (mm/ano)				
	Norte	Leste	Vertical	LOS	Norte	Leste	Vertical	LOS	
GNSS	13,90*	-4,54*	-2,24*	-	14,50**	-3,79**	-3,52**	-	2002-2018
	$\pm 0,04$	$\pm 0,05$	$\pm 0,06$	-	$\pm 0,21$	$\pm 0,19$	$\pm 0,36$	-	2018-2022
CSK	-	-	-	-1,1 $\pm 0,33$	-	-	-	-2,3 $\pm 0,31$	2011-2019
S1	-	-	-	-1,5 $\pm 0,58$	-	-	-	-2,6 $\pm 0,57$	2016-2021
PAZ (asc.)	-	-	-	-1,0 $\pm 0,61$	-	-	-	-2,0 $\pm 0,58$	
PAZ (desc.)	-	-	-	-6,7 $\pm 0,64$	-	-	-	-6,3 $\pm 0,66$	2019-2021
PAZ (decomp.)	-	-5,9	-4,0	-	-	-4,1	-4,2	-	

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

(\*) período de 2002-2018. (\*\*) período de 2018-2022.

Na Tabela 38, o comportamento posicional das estações RECF e PERC apresentou deslocamento vertical descendente (subsidiência do solo) e movimentação horizontal orientada para Norte e para Oeste (componente Leste). De acordo com os resultados, a referências PERC exibiu forte proximidade entre os dados GNSS e PAZ (decomp.) devido à semelhança no período de observação e ao deslocamento real envolvido. A diferença nas componentes Leste e Vertical foi de 0,31 mm/ano e 0,68 mm/ano, respectivamente.

## 6.8 Efeitos da Subsidiência do Solo em Recife

A ocorrência da subsidiência do solo se verificou em diversas partes da cidade. Em particular, na zona Oeste com expressivo rebaixamento superficial. Alguns efeitos desse fenômeno causaram impactos nas estruturas geodésicas e interferências na drenagem urbana.

### 6.8.1 Estruturas Geodésicas

A movimentação vertical descendente de áreas materializadas por marcos geodésicos ocorreu de forma significativa em 14 estações: 6 Referências de Nível (RRNN) relacionadas à Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do IBGE; e 8 cadastrais vinculadas à Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) da PCR. Analisou-se também de forma secundária a movimentação horizontal dessas marcações, uma vez que o deslocamento plano da superfície pode ter relação com o efeito da subsidiência do solo (Figura 155).

Figura 155 – Mapas de estações geodésicas em áreas de movimentação superficial.

(continua)

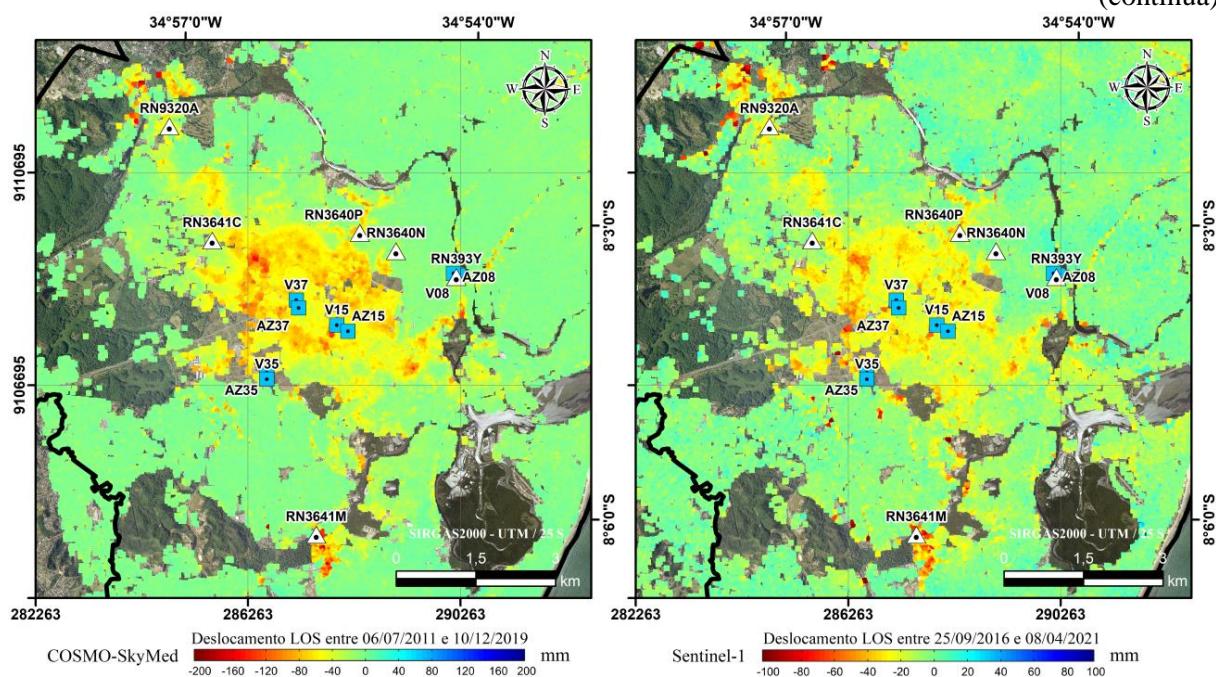
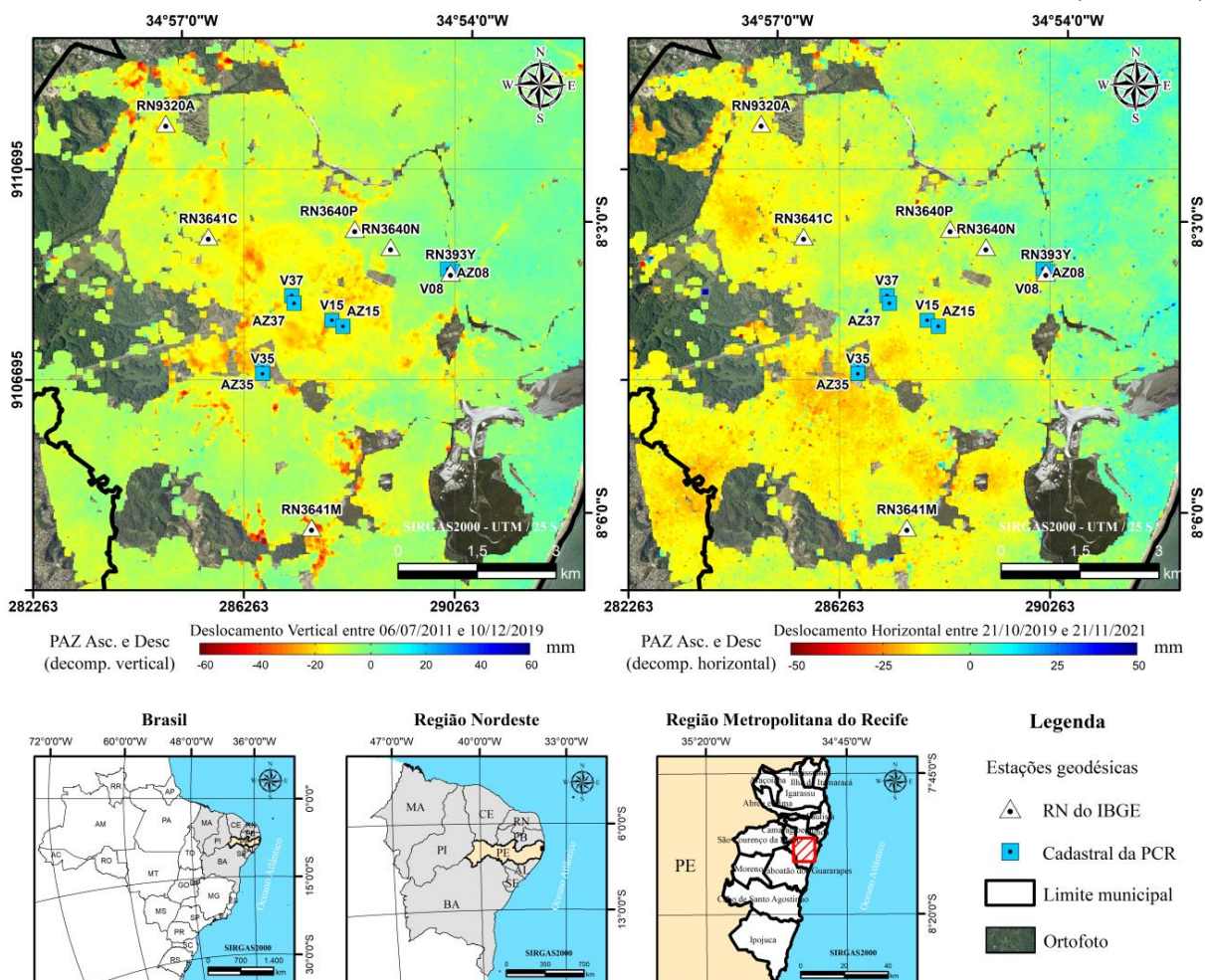


Figura 155 – Mapas de estações geodésicas em áreas de movimentação superficial.  
(conclusão)



Fonte: dados geospaciais (PCR, 2013b; IBGE, 2018a, 2018b, 2018e).

Na Figura 155, as áreas materializadas por marcos geodésicos tiveram (Tabela 39): rebaixamento acumulado da ordem de 12 mm até 108 mm (de 2011 a 2021) e variação horizontal de -3 mm até -15 mm em sentido Oeste (de 2019 a 2021). As regiões com deformações apresentaram alta potencialidade de comprometer a utilização das estações (RN e cadastral) em estudos da realidade física e geométrica da superfície terrestre, presentes em: investigações científicas e obras de engenharia.

Tabela 39 – Deslocamento em estações geodésicas RN e cadastral.

(continua)

Código	Estação	Órgão	Rebaixamento (mm)	Varição horizontal (mm)
9320A			49	-7
3640P			41	-9
393Y	RN	IBGE	14	-8
3641C			35	-9
3640N			22	-3
3641M			53	-15

Tabela 39 – Deslocamento em estações geodésicas RN e cadastral.

(conclusão)

Código	Estação	Órgão	Rebaixamento (mm)	Varição horizontal (mm)
V15			108	-12
AZ15			58	-11
V37			94	-5
AZ37	Cadastral	PCR	66	-3
V35			51	-11
AZ35			60	-15
V08			12	-6
AZ08			12	-5

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

De acordo com a Tabela 39, as referências geodésicas estabelecidas em terrenos afetados pela subsidência do solo requer contínua atualização das coordenadas (Figura 156). Em especial, da componente altimétrica – observável mais impactada pelo afundamento do relevo. Dados da última medição evidenciaram maior desatualização para as estações cadastrais com levantamento realizado em 2013 (PCR, 2013b), enquanto as RRNN apresentaram ajustamento em 2018 (IBGE, 2018e).

Figura 156 – Referências geodésicas em áreas de deslocamento.

(continua)



Figura 156 – Referências geodésicas em áreas de deslocamento.

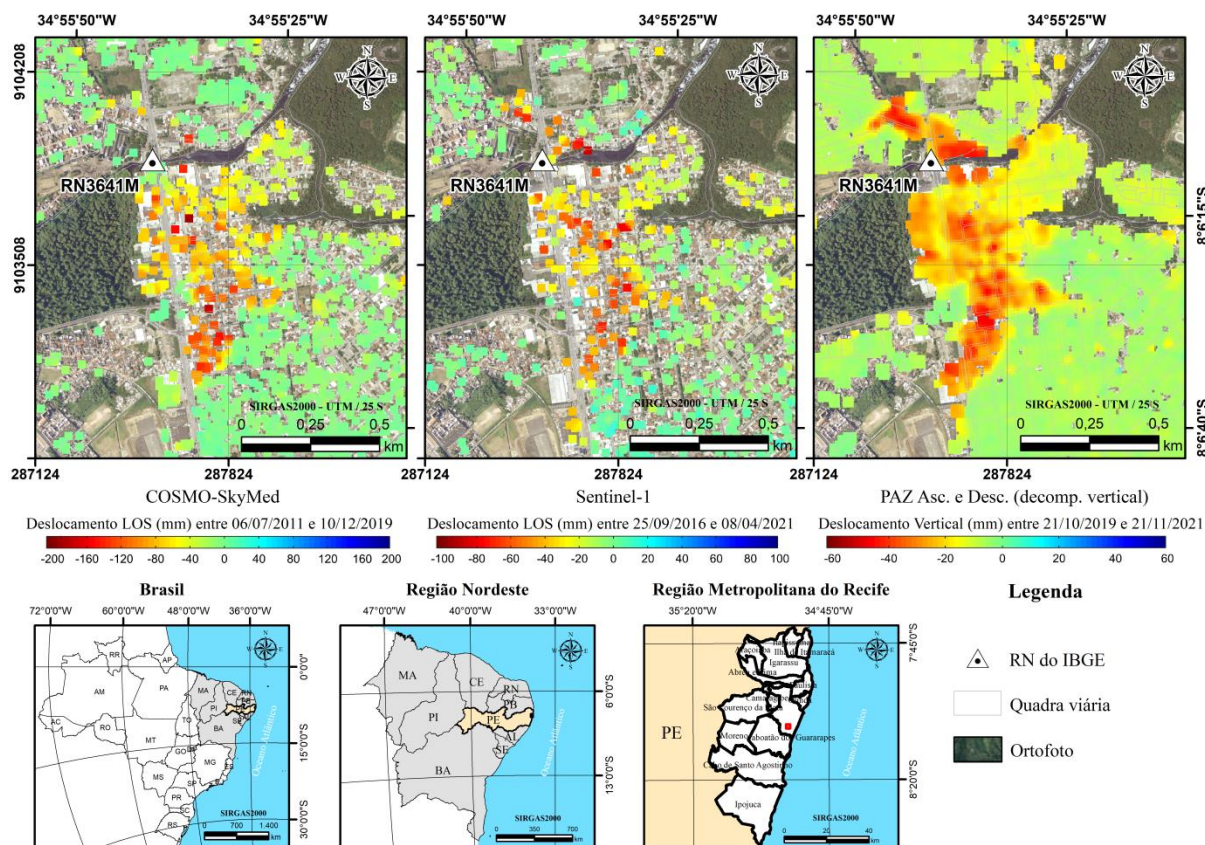
(conclusão)



Fonte: PCR (2013b); IBGE (2018f).

Das estações geodésicas da Figura 156, a RN 3641M se situou na principal área de subsidência do solo do Recife – localizada entre os bairros do Ibura e Ipsep, na zona Oeste da cidade (Figura 157). Ao longo do período de estudo InSAR (2011-2021), o rebaixamento acumulado na região resultou em valor perto de 230 mm. Áreas de afundamento da localidade causaram impactos à estação RN 3641M devido a sua proximidade com o fenômeno.

Figura 157 – Mapas de deslocamento no entorno do marco RN 3641M do IBGE.



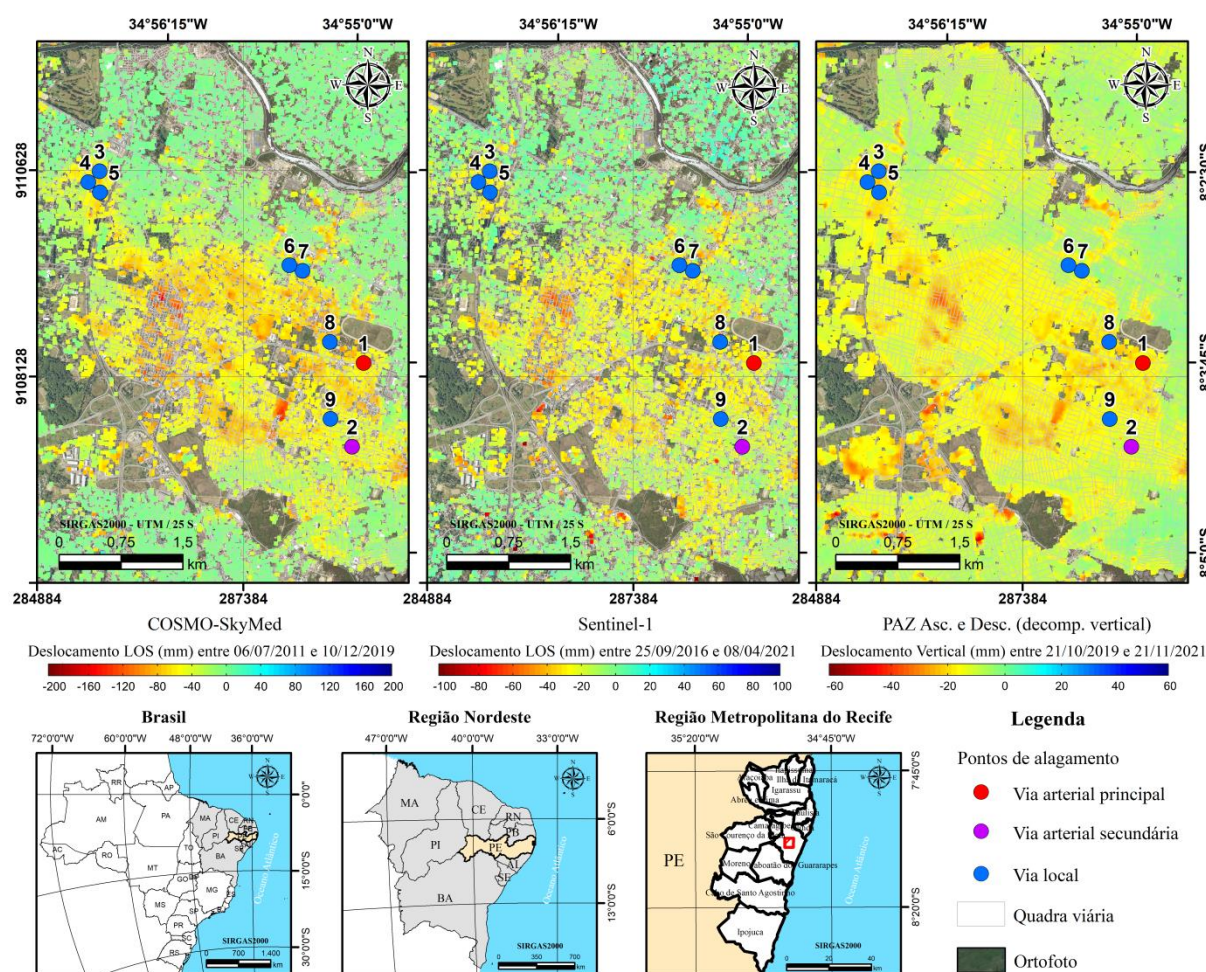
Fonte: dados geoespaciais (APAC, 2015b; IBGE, 2018a, 2018b, 2021).

Segundo o IBGE (2021), a RN 3641M pertence a uma linha que forma circuitos cujos erros de fechamento não atendem às especificações de alta precisão. Portanto, seu ajustamento foi realizado separadamente em relação ao bloco principal do REALT-2018<sup>57</sup>. Na região da Figura 157, a entidade recomenda a adoção de cuidados adicionais na utilização da rede altimétrica. Exemplos: o aumento do número de RRNN consideradas no controle do levantamento e a validação dos respectivos desníveis com renivelamento.

## 6.8.2 Áreas de Alagamento

A cidade do Recife apresentou mais de 160 pontos de alagamento, de acordo com o Plano Diretor de Drenagem do Recife (PDDR). Desse total, 9 se localizaram em áreas bastante afetadas pelo rebaixamento superficial (Figura 158).

Figura 158 – Mapas de pontos de alagamento em áreas de rebaixamento.



Fonte: dados geoespaciais (APAC, 2015b; IBGE, 2018a, 2018b).

<sup>57</sup> Reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais, disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101666.pdf>

Na Figura 158, os locais com pontos de alagamento rebaixaram de 20 mm até 96 mm (Tabela 40). As principais localidades de subsidência do solo apresentaram capacidade de interferir no processo de escoamento das águas pluviais, com desenvolvimento de áreas de alagamento – maior risco em eventos de chuvas intensas combinados com maré cheia (CABRAL *et al.*, 2021).

Tabela 40 – Deslocamento acumulado em áreas com pontos de alagamento.

Ponto	Tipo	Bairro	Rebaixamento (mm)
1	Via arterial principal	Prado	56
2	Via arterial secundária	Mustardinha	62
3			93
4		Várzea	49
5			96
6	Via local		20
7		Cordeiro	69
8		Prado	95
9		Bongi	49

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A estimativa volumétrica das águas superficiais retidas em área de subsidência do solo no entorno de pontos de alagamento – em um raio de 100 m de distância e rebaixamento de 100 mm –, resultou em valores próximos de 10.500 m<sup>3</sup> (Figura 159). Na estimaco, admitiu-se afundamento uniforme da superfície e ausência de perdas de água por: evaporao, transpirao, infiltrao.

Figura 159 – Situao de pontos de alagamento em áreas de rebaixamento.

(continua)

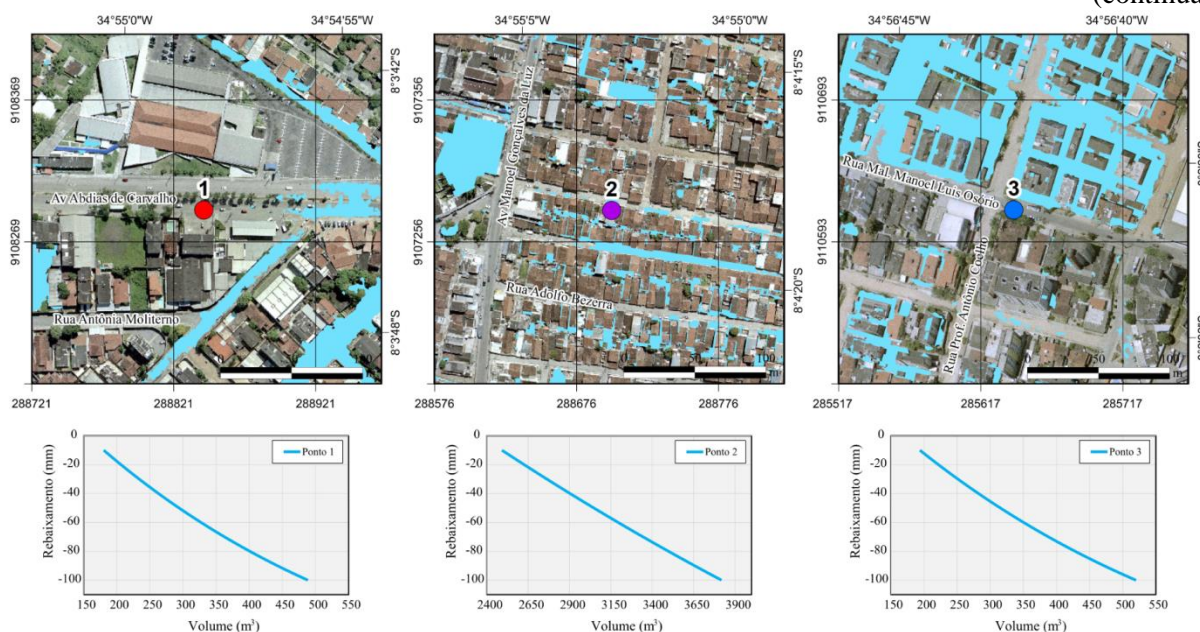
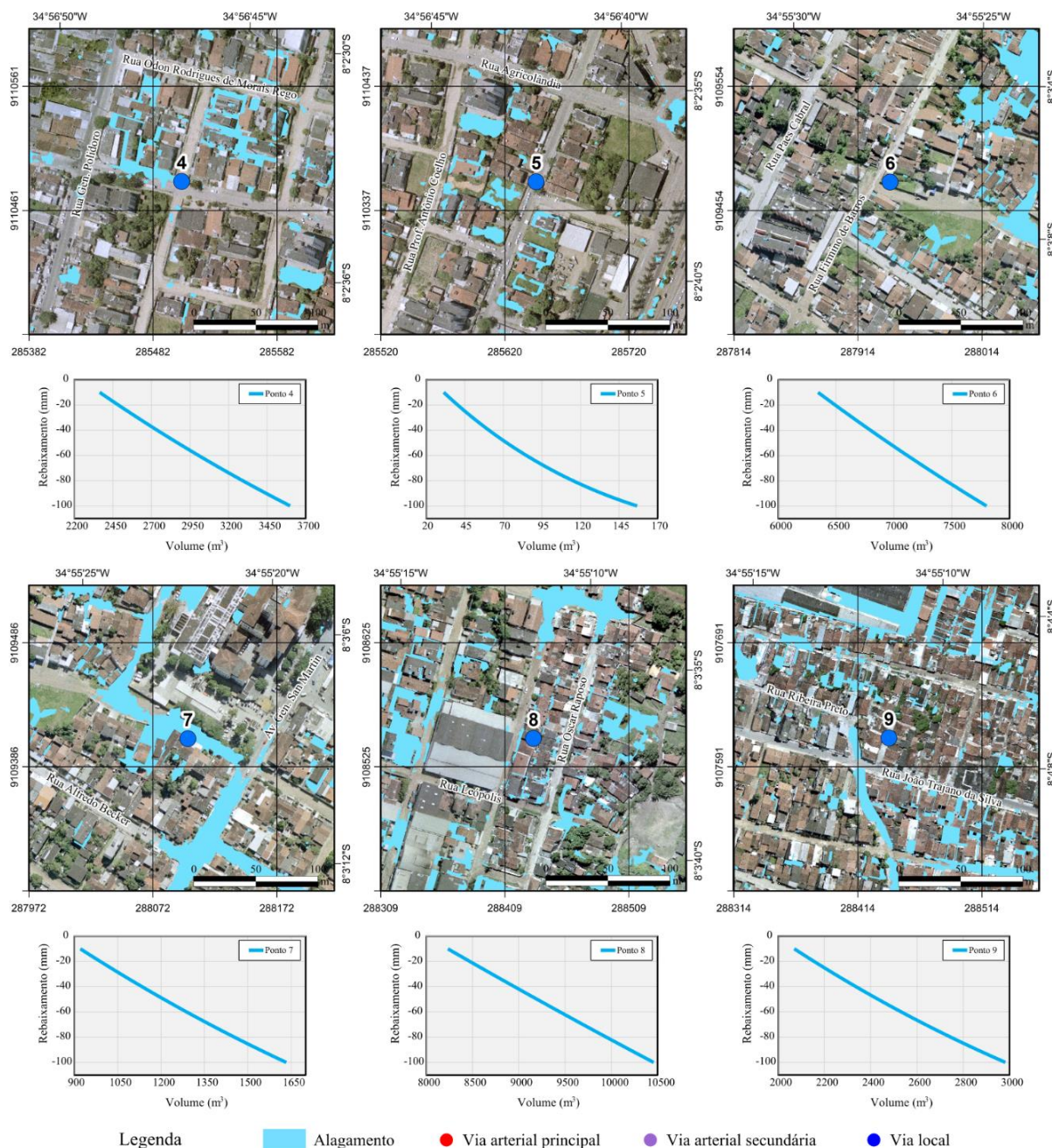


Figura 159 – Situação de pontos de alagamento em áreas de rebaixamento. (conclusão)



Fonte: dados geoespaciais (PCR, 2013a).

Na Figura 159, o rebaixamento superficial gerou interferência na drenagem do Recife. Contribuiu para maior retenção de águas pluviais, caracterizadas em áreas de alagamento. Em geral, as consequências dessa ação se refletiram na mobilidade urbana da cidade. Além disso, a intensidade de afundamento de algumas localidades revelou potencialidades de desencadear outros tipos de impactos da subsidência do solo ocasionada pela urbanização recente e/ou pela exploração de águas subterrâneas ao longo dos próximos anos (Tabela 41).

Tabela 41 – Possibilidade de impactos da subsidência do solo em Recife.

<b>Categoria</b>	<b>Representação do impacto</b>	<b>Nível de impacto</b>
Infraestrutura	Inclinação de casas e edifícios	Direto
	Mau funcionamento do sistema de esgotos e drenagem	
	Deterioração de edifícios e infraestruturas	
Ambiental	Aumento da intrusão da água do mar	Indireto
	Deterioração na qualidade da condição ambiental	
Econômico	Aumento no custo de manutenção de infraestrutura	
	Diminuição de valores da Terra e da propriedade	
	Perturbação de atividades econômicas	
Social	Comprometimento de abastecimento de água	
	Suspensão de atividades diárias das pessoas	

Fonte: adaptado de Abidin *et al.* (2015a, 2015b).

## 6.9 Considerações Finais

A tecnologia InSAR é uma ferramenta geodésica valiosa no estudo da instabilidade superficial. O monitoramento da subsidência do solo da cidade do Recife evidencia a necessidade do seu uso de forma sistemática, voltada à detecção da movimentação do terreno devido às ações antrópicas de impactos a superfície. A utilização permite determinar áreas instáveis a partir de série temporal de imageamento SAR, com ampla abrangência espacial e com elevada densidade de pontos de medição. Esses aspectos são importantes na identificação assertiva do rebaixamento da planície costeira do Recife ocasionado por características dos recursos hídricos subterrâneos e/ou por especificidades geotécnicas.

A principal investigação da pesquisa ocorre na análise das implicações da intensa exploração dos recursos hídricos subterrâneos à superfície. A falta de chuvas no final do século passado se apresenta como um ponto de partida na densificação de poços no Recife, estimados em mais de 13 mil (ALISSON, 2013). A grande maioria opera de maneira irregular com exploração de aquíferos acima de sua capacidade de regeneração. A manutenção desse cenário ao longo de décadas contribui para a redução do nível das águas subterrâneas de forma acentuada. Isso se revela como um indicativo do desenvolvimento da subsidência do solo nas zonas Sul e Norte-Centro da cidade, regiões afetadas por esse fenômeno.

Além da subtração desmedida dos mananciais subterrâneos, os riscos geológicos da subsidência do solo da planície recifense resultam também de especificidades geotécnicas. De forma secundária, a pesquisa analisa os efeitos da urbanização à superfície devido a sua correlação com o rebaixamento do terreno. A expansão urbana sobre locais de planície instáveis (zonas estuarinas, áreas recuperadas) é passível de afundamento em virtude da presença de cargas atuantes. O processo resulta da adição de cargas permanentes (elementos construtivos) e móveis (pessoas, veículos), as quais exercem pressão sobre o relevo.

Em tais casos, a aplicação PSInSAR com imagens SAR (Sentinel-1, COSMO-SkyMed e PAZ) obtém medições PS com precisão melhor ou igual a 1 mm. E, por vezes, mais preciso ou da mesma ordem de grandeza de observações obtidas por técnicas geodésicas tradicionais (poligonização, trilateração, GNSS). Isso se verifica nas observáveis determinadas por tais cenas SAR, com quantidade próxima de: 53 mil pontos para Sentinel-1; 100 mil pontos para COSMO-SkyMed; e 227 mil pontos para PAZ. As características desse conjunto de dados possibilita mapear em detalhe áreas afetadas pela subsidência do solo e, bem como, regiões com deslocamento horizontal da superfície via análise PAZ (ascendente e descendente).

O mapeamento detalhado da movimentação superficial oportuniza identificar locais com potencial de afundamento, por ventura, ausentes de estudo. Essa ação é importante em tomadas de decisão no âmbito da subsidência do solo, ou seja: na verificação de atividades de campo referente à investigação de regiões com risco real de deformação. Nesse sentido, a região mais impactada pelo rebaixamento superficial ocorre na zona Oeste e a menos na zona Sul. A subsidência do solo na primeira localidade resulta do assentamento de construções recentes em áreas instáveis, enquanto que na última advém da degradação da capacidade de suporte dos recursos hídricos subterrâneos.

Nessas zonas, a deformação do terreno atua de maneira distinta. Na região Oeste, ocorrem as maiores áreas e velocidade de afundamento. Na zona Sul, há pequenos locais e baixa intensidade de rebaixamento. Em geral, a classificação da subsidência do solo do Recife possui quatro níveis: baixo, moderado, elevado e alto para as regiões Sul, Centro, Norte e Oeste, nessa ordem. Ademais, a análise da movimentação horizontal apresenta valores em torno de -10 mm/ano para a zona Oeste e 7 mm/ano para as regiões Norte-Centro e Sul. Os resultados revelam indícios consistentes do deslocamento superficial em localidades pouco exploradas da cidade. Tal constatação demanda contínua observação InSAR.

A importância dessa ação se exige em dois casos: nos locais de dessaturação do solo em função da intensa captação das águas subterrâneas; e nas áreas de expansão urbana recente em virtude da compactação do solo. No primeiro, verifica-se correlação entre subsidência do solo e exploração dos recursos hídricos subterrâneos na zona Sul no entorno dos poços 1024-P/99 e 1034-P/99 com velocidade igual a 3,8 mm/ano e 3,5 mm/ano, respectivamente. No segundo, observa-se correlação entre subsidência do solo e urbanização na zona Oeste com velocidade em torno de 15 mm/ano em grandes áreas e valor igual a 25 mm/ano em locais menores. Na atualidade, as principais consequências provocam impactos nas estruturas geodésicas e interferências na drenagem urbana. Todavia, a ocorrência da subsidência do solo em Recife pode aumentar e tornar seus efeitos mais preocupantes nos próximos anos.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação da tecnologia InSAR se revela significativa na detecção de áreas afetadas pela subsidência do solo. Permite, no primeiro momento, a utilização dos resultados como insumos importantes. Como em cenários de risco superficial-estrutural, com capacidade de analisar deformações de maneira detalhada por meio de ampla densidade de pontos de medição e alta frequência temporal. Ao passo seguinte, possibilita direcionar ações *in-loco* de órgãos fiscalizadores na avaliação de deslocamentos em geomorfologia e infraestruturas. E, bem como, na identificação de potenciais fenômenos que possam representar problemas em um futuro próximo decorrentes da movimentação do terreno.

A previsão do Recife, nesse sentido, aponta para uma situação preocupante para os próximos anos do ponto de vista do gerenciamento dos recursos hídricos com implicações à estabilidade do relevo. Fatores como anomalias climáticas, precipitação irregular, aumento da população, impermeabilização do solo, elevação da temperatura, devem pressionar o sistema de abastecimento público e limitar o acesso à água potável. A incerteza quanto ao futuro das águas superficiais deve impulsionar à procura por águas subterrâneas para atender a crescente demanda da população (domicílio, comércio, agricultura, indústria).

As reservas de águas subterrâneas em Recife estão sujeitas a alta procura desde os anos de 1990, com o aumento da perfuração de poços, sobretudo na zona Sul – aquífero Cabo. Além dessa região, a evolução da exploração de mananciais subterrâneos se verifica também em outras partes da cidade, como na zona Norte – aquífero Beberibe. A movimentação das águas subterrâneas nesses sistemas denota locais de dessaturação – áreas em que os aquíferos em condição natural de confinado passam a ter níveis piezométricos abaixo do seu topo. Os reflexos dessa situação se traduzem na ocorrência da subsidência do solo na região Sul, bairro de Boa Viagem, com valor de poucos mm/ano a 3,8 mm/ano.

A investigação da subsidência do solo do Recife revela que o município também convive com casos de rebaixamento superficial decorrentes da expansão urbana recente. O afundamento do terreno resulta da compactação do solo, e requer vários anos para o seu assentamento. Isso se verifica no desenvolvimento de grandes áreas de subsidência do solo provocada pela urbanização – nas últimas décadas – da região Oeste, ao longo dos bairros do: Prado, Afogados, Torrões, Cordeiro, Bongü, San Martín, Curado, Várzea e Caxangá. Em tais locais, a taxa está próxima de 15 mm/ano. Casos semelhantes, porém de área menor, ocorrem

entre os bairros do Ibura e Ipsep com valor igual a 25 mm/ano – responsável pela maior taxa de rebaixamento superficial da cidade.

As características geológicas do Recife, no contexto da subsidência do solo, também contribuem para a instabilidade superficial em virtude da exploração dos recursos hídricos subterrâneos e do assentamento de áreas urbanizadas recentes. A planície recifense possui uma grande variedade de depósitos sedimentares de ação marinha, flúvio-marinha, fluvial e coluvial. Compostos de argila, areia e silte estão amplamente presentes nas áreas aplainadas da cidade. As unidades de argila e silte se caracterizam por alta compressibilidade. Atuam como fator predisponente nos processos de subsidência do solo induzidos por características dos recursos hídricos subterrâneos e/ou por especificidades geotécnicas.

A influência desses aspectos impõe ao Recife desafios atuais iminentes que advém do seu desenvolvimento: promover o abastecimento público e a ampliação de espaço urbano no presente, sem comprometer os recursos hídricos esgotáveis do subsolo para atender as futuras gerações. Essas circunstâncias fazem do Recife uma cidade bastante vulnerável à subsidência do solo. No presente, os principais efeitos do fenômeno provocam impactos nas estruturas geodésicas com considerável variação da componente altimétrica e interferências na drenagem urbana com retenção de águas pluviais caracterizadas em áreas de alagamento.

Além desses danos, a intensidade do rebaixamento superficial de algumas áreas denota potencialidades para desencadear outros tipos de impactos nos próximos anos. A ausência de medidas efetivas pode resultar em graves problemas: estruturais, econômicos, ambientais e sociais. Avanços científicos e tecnológicos, portanto, são vitais no enfrentamento dos desafios do Recife em relação à subsidência do solo. A utilização InSAR de forma contínua é uma estratégia assertiva no monitoramento da superfície e na promoção do uso racional dos recursos hídricos subterrâneos do município – ações relevantes ao bem estar da população.

Em novos estudos InSAR, a capacidade investigativa da subsidência do solo do Recife pode ser aperfeiçoada com inclusão de: mais banda; maior intervalo temporal; e método híbrido de processamento. Ou seja, a partir das seguintes ações:

- Uso de imagens ALOS/PALSAR: dados SAR de banda L com resolução espacial de 20 m e tempo de revista de 46 dias para o período de 2006 a 2011. Possibilita investigar geometria distinta e frequência temporal longínqua; e
- Emprego do aplicativo StaMPS: ferramenta científica que utiliza as modernas técnicas PSInSAR+SBAS de forma integrada. Permite aumentar a densidade e a confiabilidade de pontos de medição por meio de alvos PS e DS.

## REFERÊNCIAS

- ABIDIN, H. Z.; DJAJA, R.; DARMAWAN, D.; HADI, S.; AKBAR, A.; RAJIYOWIRYONO, H.; SUDIBYO, Y.; MEILANO, I.; KASUMA, M.A.; KAHAR, J.; SUBARYA, C. Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and its Geodetic Monitoring System. **Natural Hazards**, v. 23, n. 2, p. 365-387, 2001. DOI: 10.1023/A:1011144602064.
- ABIDIN, H. Z.; ANDREAS, H.; GUMILAR, I.; GAMAL, M.; FUKUDA, Y.; DEGUCHI, T. Land subsidence and urban development in Jakarta (Indonesia). *In: 7th FIG regional conference, spatial data serving people: land governance and the environment*, Hanoi, Vietnam, 2009, p. 19-22.
- ABIDIN, H. Z.; ANDREAS, H.; GUMILAR, I.; FUKUDA, Y.; POHAN, Y. E.; DEGUCHI, T. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. **Natural Hazards**, v. 59, n. 3, p. 1753, 2011. DOI: 10.1023/A:1011144602064.
- ABIDIN, H. Z.; ANDREAS, H.; GUMILAR, I.; SIDIQ, T. P.; GAMAL, M. Environmental impacts of land subsidence in urban areas of Indonesia. *In: FIG Working Week*, 2015a, p. 1-12.
- ABIDIN, H. Z.; ANDREAS, H.; GUMILAR, I.; WIBOWO, I. On correlation between urban development, land subsidence and flooding phenomena in Jakarta. *In: Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015b, **370**. p. 15-20.
- ABIDIN, H. Z.; ANDREAS, H.; GUMILAR, I.; GUMILAR, I.; SIDIQ, T. P. Disaster risk reduction of land subsidence in Jakarta. *In: 2nd International Workshop on Coastal Subsidence*, 2016, Venice, Italy. **30**.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12244**. Poço tubular – construção de poço para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro: ABNT, 2006, p. 10.
- \_\_\_\_\_. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12212**. Projeto de poço tubular para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro: ABNT, 2017, p. 13.
- AKAGI, T. National contributions by TC12 land subsidence committee members Japan. *In: Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.*, Rio de Janeiro, 1992, **5**. p. 3205-3206.
- ALBEROTANZA, L.; CONCHETTO, E.; DONNICI, S.; BARBERO, R. S.; SERANDREI; ZAMBON, G. Informational elements for monitoring land elevation at the historical building sites of an urban area in assessing a change in their reuse. **Journal of Cultural Heritage**, v. 3, n. 1, p. 15-20, 2002. DOI: 10.1016/S1296-2074(02)01154-8.
- ALI, A.; MERRICK, N.; WILLIAMS, R.; MAMPITIYA, D.; D’HAUTEFEUILLE, F.; SINCLAIR, P. Land settlement due to groundwater pumping in the Lower Namoi Valley of NSW. *In: Proceedings of 9th Murray Darling Basin Groundwater Workshop*, Bendigo, Australia, 2004.
- ALISSON, E. **Aquíferos do Recife correm risco de salinização**, 2013. Disponível em: <<https://agencia.fapesp.br/aquiferos-do-recife-correm-risco-de-salinizacao/18377/>>. Acesso em: 04 out. 2018.

ALLIS, R. G. Review of subsidence at Wairakei field, New Zealand. **Geothermics**, v. 29, n. 4, p. 455-478, 2000. DOI: 10.1016/S0375-6505(00)00016-X.

ALLIS, R. G.; ZHAN, X. Predicting subsidence at Wairakei and Ohaaki geothermal fields, New Zealand. **Geothermics**, v. 29, n. 4, p. 479-497, 2000. DOI: 10.1016/S0375-6505(00)00017-1.

ALLIS, R.; BROMLEY, C.; CURRIE, S. Update on subsidence at the Wairakei–Tauhara geothermal system, New Zealand. **Geothermics**, v. 38, n. 1, p. 169-180, 2009. DOI: 10.1016/j.geothermics.2008.12.006.

ALVES, A. T. **Cratera em Vera Cruz: O que se sabe e o que falta esclarecer sobre buraco misterioso que aumentou de 69m para 86m em 4 meses**, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/2018/11/20/cratera-em-vera-cruz-o-que-se-sabe-e-o-que-falta-esclarecer-sobre-buraco-misterioso-que-aumentou-de-69m-para-86m-em-4-meses.ghtml>>. Acesso em: 14 jan. 2020.

ALY, M.; GIARDINO, J.; KLEIN, A. Local subsidence in Greater Mahala, Egypt, detected by radar interferometry. *In: AGU Fall Meeting Abstracts*, 2005, v. **2005**. p. G11A-1204.

ALY, M. H.; ZEBKER, H. A.; GIARDINO, J. R.; KLEIN, A. G. Permanent Scatterer investigation of land subsidence in Greater Cairo, Egypt. **Geophysical Journal International**, v. 178, n. 3, p. 1238-1245, 2009. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04250.x.

ALY, M. H.; KLEIN, A. G.; ZEBKER, H. A.; GIARDINO, J. R. Land subsidence in the Nile Delta of Egypt observed by persistent scatterer interferometry. **Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 7, p. 621-630, 2012. DOI: 10.1080/01431161.2011.652311.

AMELUNG, F.; GALLOWAY, D. L.; BELL, J. W.; ZEBKER, H. A.; LACZNIAK, R. J. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. **Geology**, v. 27, n. 6, p. 483-486, 1999. DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027<0483:STUADO>2.3.CO;2.

ANSARI, H.; ZAN, F. D.; BAMLER, R. Sequential Estimator: Toward Efficient InSAR Time Series Analysis. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 55, n. 10, p. 5637-5652, 2017. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2711037.

AOKI, S. Land subsidence in Niigata. *In: Proceedings of the Anaheim Symposium*, 1976.

APAC. Agência Pernambucna de Águas e Climas. **Bacias Hidrográficas**, 2019. Disponível em: <[http://www.sirh.srh.pe.gov.br/apac/pagina.php?page\\_id=5&subpage\\_id=14](http://www.sirh.srh.pe.gov.br/apac/pagina.php?page_id=5&subpage_id=14)>. Acesso em: 04 jul. 2019

\_\_\_\_\_. Agência Pernambucna de Águas e Climas. **Histórico de chuvas**, 2021. Disponível em: <<http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>>. Acesso em: 10 mai. 2022

\_\_\_\_\_. Agência Pernambucna de Águas e Climas. **Pernambuco Tridimensional**. MDT de resolução espacial 1 m. Escala 1:5.000. Recife, 2015a.

\_\_\_\_\_. Agência Pernambucna de Águas e Climas. **Pernambuco Tridimensional**. Ortofoto

colorida. GSD 50 cm. Escala 1:5.000. Recife, 2015b.

ARANTES, J. T. **Mau uso da água subterrânea agrava a crise hídrica**, 2016. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/mau-uso-da-agua-subterranea-agrava-a-crise-hidrica/22828/>>. Acesso em: 05 nov. 2018.

ATLAS BRASIL. **Ranking, 2010**. Disponível em: <<http://www.atlasbrasil.org.br/ranking>>. Acesso em: 01 dez. 2021.

AULER, A. S. Karst areas in Brazil and the potential for major caves-an overview. **Boletim Sociedad Venezolana de Espeleologia**, Caracas, v. 36, p. 1-18, 2002.

BAMLER, R.; HARTL, P. Synthetic aperture radar interferometry. **Inverse Problems**, v. 14, n. 4, p. R1-R54, 1998. DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001.

BARRETO, Â. M. M. **O Recife através dos tempos: a formação da sua paisagem**. FUNDARPE, 1994. 151 p. ISBN: 857240029X.

BAWDEN, G. W.; THATCHER, W.; STEIN, R. S.; HUDNUT, K. W.; PELTZER, G. Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects. **Nature**, v. 412, n. 6849, p. 812-815, 2001. DOI: 10.1038/35090558.

BECKER, R. H.; SULTAN, M. Land subsidence in the Nile Delta: inferences from radar interferometry. **The Holocene**, v. 19, n. 6, p. 949-954, 2009. DOI: 10.1177/0959683609336558.

BEDINI, E. Persistent Scatterer Interferometry of Sentinel-1 time series to detect ground subsidence in the city of Recife, Brazil. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 1-9, 2020. DOI: 10.29150/jhrs.v10.1.p1-9.

BELLONI. **Recife é o Vale do Silício brasileiro**, 2015. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/tecnologia/recife-o-vale-do-silicio-brasileiro/>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

BENEVIDES, P. J. S. C. **Aplicação da Interferometria Radar no estudo de deslizamentos de terra na região de Lisboa**. 2009. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica) – Faculdade de Ciência, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2009.

BERARDINO, P.; FORNARO, G.; LANARI, R.; SANSOSTI, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 11, p. 2375-2383, 2002. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.

BERGADO, D.; KHAW, L.; NUTALAYA, P.; BALASUBRAMANIAM, A. Subsidence effects on infrastructures and settlement predictions in the AIT Campus, Chao Phraya Plain, Thailand. *In*: European conference on soil mechanics and foundation engineering. 9, 1987, p. 277-284.

BIGNAMI, C.; RUCH, J.; CHINI, M.; NERI, M.; BUONGIORNO, M. F.; HIDAYATI, S.; SAYUDI, D. S.; SURONO. Pyroclastic density current volume estimation after the 2010 Merapi volcano eruption using X-band SAR. **Journal of Volcanology and Geothermal**

**Research**, v. 261, p. 236-243, 2013. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2013.03.023.

BIRKLE, P.; SCHNEIDER, J. F. Hydrogeological aspect of the Basin of Mexico City – A summary. **Felsbau**, v. 6, p. 435-441, 1998.

BONI, G.; CASTELLI, F.; FERRARIS, L.; PIERDICCA, N.; SERPICO, S.; SICCARDI, F. High resolution COSMO/SkyMed SAR data analysis for civil protection from flooding events. *In: 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. p. 6-9. 2007. DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4422716.

BORBA, A. L. S.; COSTA FILHO, W. D.; MASCARENHAS, J. D. C. Configuração geométrica dos aquíferos da região metropolitana do Recife. *In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E XVII ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS*, 2010, São Paulo, Brasil. **Anais [...]**. 2010.

BOUWER, H. Land Subsidence and Cracking Due to Ground-Water Depletion. **Groundwater**, v. 15, n. 5, p. 358-364, 1977. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1977.tb03180.x.

BOVENGA, F.; WASOWSKI, J.; NITTI, D. O.; NUTRICATO, R.; CHIARADIA, M. T. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 119, p. 272-285, 2012. DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.013.

BOZZANO, F.; ESPOSITO, C.; FRANCHI, S.; MAZZANTI, P.; PERISSIN, D.; ROCCA, A.; ROMANO, E. Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modelling with satellite InSAR data: The Acque Albule Plain case study. **Remote Sensing of Environment**, v. 168, p. 219-238, 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.010.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, 1997.

BROWN, N.; BLACK, S.; GALLAGHER, M. **The applications and benefits of synthetic aperture radar (SAR)**, 2018. Disponível em: <<https://www.harrisgeospatial.com/Company/Events/Webinar/Webinar-Detail/ArtMID/10251/ArticleID/23554/The-Applications-and-Benefits-of-Synthetic-Aperture-Radar-SAR>>. Acesso em: 07 jun. 2018.

BURBEY, T. The role of horizontal displacement in evaluating earth-fissure development in the vicinity of faults in subsidence-prone areas. *In: Abstracts with Programs*, 1996, **38**. Assoc. of Eng. Geol.

BÜRGMANN, R.; HILLEY, G.; FERRETTI, A.; NOVALI, F. Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis. **Geology**, v. 34, n. 3, p. 221-224, 2006. DOI: 10.1130/G22064.1.

CABRAL, J. J. S. P.; KOIDE, S.; SIMOES, S.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Recursos Hídricos Subterrâneos. *In: PAIVA, J. B. D.; DE PAIVA, E. M. C. (org.). Hidrologia*

**Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, 2001, p. 237-277.

CABRAL, J. J. S. P.; FERREIRA, J. P. C. L. (org.); MONTENEGRO, S. M. G. L. (org.); COSTA, W. D. (org.). **Água subterrânea: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento.** Recife: Editora Universitaria - UFPE, 2004, p. 447.

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

CABRAL, J. J. S. P. Movimento das águas subterrâneas. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008, p. 77-91.

CABRAL, J. J. S. P. GUSMÃO, A. D.; SILVA JUNIOR, M. A. B; BARROS, E. N. Mudanças climáticas e subsidência do terreno como dificuldades para a gestão urbana de uma avenida marginal de curso d'água em cidade costeira. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 38, n. 2, p. 436-460, 2021. DOI: 10.51359/2238-6211.2021.249051.

CAMARA, E. **Rios do Recife – Entenda a Veneza Brasileira**, 2015. Disponível em: <<https://visitarecife.com.br/rios-do-recife/>>. Acesso em: 25 jul. 2019.

CAO, N.; LEE, H.; JUNG, H. C. A Phase-Decomposition-Based PSInSAR Processing Method. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 1074-1090, 2016. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2473818.

CARBOGNIN, L.; GATTO, P.; MOZZI, G.; GAMBOLATI, G.; RICCERI, G. New trend in the subsidence of Venice. *In*: Land subsidence, 1977, Wallingford. IAHS Publ., 121. p. 65-81.

CARBOGNIN, L.; GATTO, P.; MOZZI, G.; GAMBOLATI, G. Land subsidence of Ravenna and its similarities with the Venice case. *In*: Evaluation and prediction of subsidence, 1978a, ASCE, p. 254-266.

CARBOGNIN, L.; GATTO, P.; MOZZI, G.; RICCERI, G. Subsidenza e ambiente. *In*: Atti del Convegno 'I Problemi della Subsidenza nella Politica del Territorio o della Difesa del Suolo', Pisa, 1978b, Pisa. p. 3-12.

CAREVIĆ, N. **Recife i novi brazilski zakoni anti-urbanosti**, 2016. Disponível em: <<https://www.gradnja.rs/recife-i-novi-brazilski-zakoni-anti-urbanosti/>>. Acesso em: 02 jun. 2019.

CARMINATI, E.; MARTINELLI, G. Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation. **Engineering Geology**, v. 66, n. 3, p. 241-255, 2002. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00031-5.

CASCINI, L.; FORNARO, G.; PEDUTO, D. Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. **Engineering Geology**, v. 112, n. 1, p. 29-42, 2010. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.01.003.

CASTRO, J. E.; HELLER, L.; MORAIS, M. P. **O direito à água como política pública na América Latina: uma exploração teórica e empírica.** Brasília: Ipea, 2015. 322 p. ISBN:

978-85-7811-238-7.

CASU, F.; ELEFANTE, S.; IMPERATORE, P.; ZINNO, I.; MANUNTA, M.; LUCA, C. D.; LANARI, R. SBAS-DInSAR Parallel Processing for Deformation Time-Series Computation. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 7, n. 8, p. 3285-3296, 2014. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2322671.

CAVUR, M.; MORAGA, J.; DUZGUN, H. S.; SOYDAN, H.; JIN, G. Displacement Analysis of Geothermal Field Based on PSInSAR And SOM Clustering Algorithms A Case Study of Brady Field, Nevada—USA. **Remote Sensing**, v. 13, n. 3, 2021. DOI: 10.3390/rs13030349.

CHEN, C.; PEI, S.; JIAO, J. Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China. **Hydrogeology Journal**, 11, n. 2, p. 275-287, 2003. DOI: 10.1007/s10040-002-0225-5.

CIGNA, F.; BIANCHINI, S.; CASAGLI, N. How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer Interferometry (PSI): the PSI-based matrix approach. **Landslides**, v. 10, n. 3, p. 267-283, 2013. DOI: 10.1007/s10346-012-0335-7.

CIGNA, F.; TAPETE, D. Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 253, p. 112161. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112161.

COLESANTI, C.; FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. **Engineering Geology**, v. 68, n. 1, p. 3-14, 2003a. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00195-3.

COLESANTI, C.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 7, p. 1685-1701, 2003b. DOI: 10.1109/TGRS.2003.813278.

COLESANTI, C.; MOUÉLIC, S. L.; BENNANI, M.; RAUCOULES, D.; FERRETTI, A. Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique – a case study in the east of France. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p. 201-207, 2005. DOI: 10.1080/0143116042000274069.

CONDEPE. Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco. **Levantamento aerofotogramétrico**. Ortofotocarta preto e branco. Escala: 1:10.000. Recife, 1974.

CORAPCIOGLU, M. Y. Land Subsidence – A. A State-of-the-Art Review. *In*: BEAR, J.; CORAPCIOGLU, M. Y. (Ed.). **Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1984. p. 369-444.

COSTA, W. D.; MANOEL FILHO, J.; SANTOS, A.; COSTA FILHO, W. D.; MONTEIRO, A. B.; SOUZA, F. J. A.; LOPES, A. V. G.; SANTOS, A. J. C.; SILVA FILHO, M. C.; SILVA, M. J. **Estudo Hidrogeológico da Região Metropolitana do Recife**. Relatório técnico (HIDROREC I). Recife: FADE/UFPE–IDRC, p. 126, 1998a.

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. *In*: X CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS,

1998. **Anais [...]**. 1998b.

COSTA, W. D. Riscos potenciais e reais decorrentes da super-exploração das águas subterrâneas no Recife-PE. *In*: 1st Joint World Congress on Groundwater, 2000.

COSTA, W. D.; COSTA, H. F.; FERREIRA, C. A.; MORAIS, J. F. S.; VILLA VERDE E. R.; COSTA, L. B.; COSTA FILHO, W. D. **Estudo Hidrogeológico de Recife, Olinda, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes**. Relatório Técnico (HIDROREC II). Recife: Secretaria de Recursos Hídricos – Governo do Estado de Pernambuco, p. 150, 2002.

COSTA, W. D.; COSTA FILHO, W. D. A gestão dos aquíferos costeiros de Pernambuco. *In*: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2004. **Anais [...]**. 2004

COSTA, W. D.; CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M.; COSTA FILHO, W. D. O risco de uma subsidência no Recife. **Estudos Geológicos**, v. 15, p. 90-101, 2005.

COSTA, W. D.; SANTOS, M. A. V.; COSTA FILHO, W. D. Novos elementos sobre a geologia e a hidrogeologia do município do Recife. *In*: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2008. **Anais [...]**. 2008.

COSTANTINI, M.; FALCO, S.; MALVAROSA, F.; MINATI, F. A New Method for Identification and Analysis of Persistent Scatterers in Series of SAR Images. *In*: IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008, v. 2. 2008. p. II-449-II-452. DOI: 10.1109/IGARSS.2008.4779025.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa geodiversidade do estado de Pernambuco**, 2010. Escala 1:500.000. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/14707>>. Acesso em: 17 jun. 2019

\_\_\_\_\_. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa hidrogeológico da Região Metropolitana do Recife**, 2017. Escala 1:150.000. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/19014?show=full>>. Acesso em: 15 jul. 2019

\_\_\_\_\_. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa geodiversidade da região metropolitana do Recife**, 2018. Escala 1:100.000. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20596>>. Acesso em: 17 jun. 2020

\_\_\_\_\_. Serviço Geológico do Brasil. **Estudos sobre a instabilidade do terreno no bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL)**, 2019. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/imprensa/pdf/relatoriosintese.pdf>>. Acesso em 18 jan. 2020

\_\_\_\_\_. Serviço Geológico do Brasil. **SIAGAS**, 2021. Disponível em: <[http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/visualizar\\_mapa.php](http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/visualizar_mapa.php)>. Acesso em: 15 out. 2021.

CROSETTO, M.; CRIPPA, B.; BIESCAS, E. Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. **Engineering Geology**, v. 79, n. 1, p. 81-91, 2005. DOI: 0.1016/j.enggeo.2004.10.016.

CROSETTO, M.; BIESCAS, E.; DURO, J.; CLOSA, J.; ARNAUD, A. Generation of advanced ERS and Envisat interferometric SAR products using the stable point network technique. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 74, n. 4, p. 443-450, 2008.

DOI: 10.14358/PERS.74.4.443.

CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; CUEVAS-GONZÁLEZ, M.; DEVANTHÉRY, N.; LUZI, G.; CRIPPA, B. Measuring thermal expansion using X-band persistent scatterer interferometry. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 100, p. 84-91, 2015. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.05.006.

DEVANTHÉRY, N.; CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; CUEVAS-GONZÁLEZ, M.; CRIPPA, B. An Approach to Persistent Scatterer Interferometry. **Remote Sensing**, v. 6, n. 7, 2014. DOI: 10.3390/rs6076662.

CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; CUEVAS-GONZÁLEZ, M.; DEVANTHÉRY, N.; CRIPPA, B. Persistent Scatterer Interferometry: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 78-89, 2016. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.

DI MARTIRE, D.; IGLESIAS, R.; MONELLS, D.; CENTOLANZA, G.; SICA, S.; RAMONDINI, M.; PAGANO, L.; MALLORQUÍ, J.; CALCATERRA, D. Comparison between Differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earth-dam of Conza della Campania (Italy). **Remote Sensing of Environment**, v. 148, p. 58-69, 2014. DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.014.

DINAR, A.; ESTEBAN, E.; CALVO, E.; HERRERA, G.; TEATINI, P.; TOMÁS, R.; LI, Y.; EZQUERRO, P.; ALBIAC, J. We lose ground: Global assessment of land subsidence impact extent. **Science of The Total Environment**, v. 786, p. 147415, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147415.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. **Polo médico é referência no país**, 2016. Disponível em: <<http://www.impresso.diariodepernambuco.com.br/noticia/especiais/2016/06/polo-medico-e-referencia-no-pais.html>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

DIXON, T. H.; AMELUNG, F.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; ROCCA, F.; DOKKA, R.; SELLA, G.; KIM, S-W.; WADOWINSKI, S.; WHITMAN, D. Subsidence and flooding in New Orleans. **Nature**, v. 441, n. 7093, p. 587-588, 2006. DOI: 10.1038/441587a.

DUMITRU, C. O.; CUI, S.; FAUR, D.; DATCU, M. Data Analytics for Rapid Mapping: Case Study of a Flooding Event in Germany and the Tsunami in Japan Using Very High Resolution SAR Images. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 1, p. 114-129, 2015. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2320777.

EL SAYED FRIHY, O.; DEABES, E. A.; SHEREET, S. M.; ABDALLA, F. A. Alexandria-Nile Delta coast, Egypt: update and future projection of relative sea-level rise. **Environmental Earth Sciences**, v. 61, n. 2, p. 253-273, 2010. DOI: 10.1007/s12665-009-0340-x.

ELACHI, C.; BICKNELL, T.; JORDAN, R. L.; CHIALIN, W. Spaceborne synthetic-aperture imaging radars: Applications, techniques, and technology. **Proceedings of the IEEE**, v. 70, n. 10, p. 1174-1209, 1982. DOI: 10.1109/PROC.1982.12448.

EL-FISHAWI, N. M. Coastal erosion in relation to sea level changes, subsidence and river

discharge, Nile Delta coast. *In: Acta Mineralogica Petrographica*, 1989, v. **30**. p. 161-171.

EL-RAEY, M. Vulnerability assessment of the coastal zone of the Nile delta of Egypt, to the impacts of sea level rise. **Ocean & Coastal Management**, v. 37, n. 1, p. 29-40, 1997. DOI: 10.1016/S0964-5691(97)00056-2.

ENGELBRECHT, J.; INGG, M. R. Coherence Optimization and Its Limitations for Deformation Monitoring in Dynamic Agricultural Environments. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n. 12, p. 5647-5654, 2016. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2593946.

ESA. European Space Agency. **ASAR Product Handbook**, 2007. Disponível em: <[https://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/ENVISAT/ASAR/asar.ProductHandbook.2\\_2.pdf](https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ENVISAT/ASAR/asar.ProductHandbook.2_2.pdf)>. Acesso em: 30 ago. 2019.

\_\_\_\_\_. European Space Agency. **Radar Course 2**, 2019. Disponível em: <[https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses/content-2/-/asset\\_publisher/qIBc6NYRXfnG/content/radar-course-2-parameters-affecting-radar-backscatter](https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses/content-2/-/asset_publisher/qIBc6NYRXfnG/content/radar-course-2-parameters-affecting-radar-backscatter)>. Acesso em: 07 ago. 2019.

EUROSTAT. **Countries**, 2020. Escala 1:1 milhão. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-units/countries>>. Acesso em: 11 nov. 2021

FARINA, P.; COLOMBO, D.; FUMAGALLI, A.; MARKS, F.; MORETTI, S. Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. **Engineering Geology**, v. 88, n. 3, p. 200-217, 2006. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.09.007.

FÁROVÁ, K.; JELÉNEK, J.; KOPAČKOVÁ-STRNADOVÁ, V.; KYCL, P. Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic. **Remote Sensing**, v. 11, n. 22, 2019. DOI: 10.3390/rs11222670.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p. ISBN: 978-85-7499-061-3.

FERNANDO, J.; NAG, D. Management of aquifer depressurization system in Hazelwood mine, Latrobe Valley, Australia. *In: International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, 2007, Citeseer, p. 314-329.

FERREIRA, A. N. P.; LIMA, C. F.; CARDOSO, F. B. D. F.; KETTELHUT, J. T. **Águas Subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido**. Brasília: Secretária de Recursos Hídricos e Ambiente, 2007. 40 p.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *In: IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99*, 1999, v. **3**. p. 1528-1530. DOI: 10.1109/IGARSS.1999.772008.

FERRETTI, A.; FERRUCCI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F. SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique. *In: IGARSS 2000. IEEE 2000 International*

Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings, 2000a, v. 7. p. 3219-3221. DOI: 10.1109/IGARSS.2000.860388.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 5, p. 2202-2212, 2000b. DOI: 10.1109/36.868878.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Permanent scatterers in SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 1, p. 8-20, 2001. DOI: 10.1109/36.898661.

FERRETTI, A.; SAVIO, G.; BARZAGHI, R.; BORGHI, A.; MUSAZZI, S.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F. Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 5, p. 1142-1153, 2007a. DOI: 10.1109/TGRS.2007.894440.

FERRETTI, A.; MONTI-GUARNIERI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA Publications, 48 p. 2007b.

FERRETTI, A.; FUMAGALLI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F.; RUCCI, A. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 9, p. 3460-3470, 2011. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465.

FERRETTI, A. **Satellite InSAR data: reservoir monitoring from space**. The Netherlands: EAGE Publications bv, 2014. 178 p. ISBN: 978-90-73834-71-2.

FOLHA DE S.PAULO. **Ranking de universidades**, 2019. Disponível em: <<https://ruf.folha.uol.com.br/2019/ranking-de-universidades/principal/>>. Acesso em: 02 dez. 2021.

FONSECA, A. D., FERNANDES, J C. **Deteção Remota: radiação electromagnética, sensores orbitais, processamentos de imagens e aplicações**. Lisboa: Lidel, 2004. 224 p. ISBN: 972-757-292-8.

FOROUGHNIA, F.; NEMATI, S.; MAGHSOUDI, Y.; PERISSIN, D. An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 74, p. 248-258, 2019. DOI: 10.1016/j.jag.2018.09.018.

FRANK H. **Electromagnetic Wave Spectrum**, 2007. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic\\_spectrum-es.svg#/media/File:Electromagnetic\\_spectrum-pt\\_br.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg#/media/File:Electromagnetic_spectrum-pt_br.svg)>. Acesso em: 03 jun. 2018

FRIHY, O. E. The Nile delta-Alexandria coast: vulnerability to sea-level rise, consequences and adaptation. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 8, n. 2, p. 115-138, 2003. DOI: 10.1023/A:1026015824714.

FULLER, M. L. Summary of the controlling factors of artesian flows. US Government

Printing Office, n. 319, 1908.

GABRIEL, A. K.; GOLDSTEIN, R. M. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. **International Journal of Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 857-872, 1988. DOI: 10.1080/01431168808954901.

GABRIEL, A. K.; GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H. A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 94, n. B7, p. 9183-9191, 1989. DOI: 10.1029/JB094iB07p09183.

GABRYSCH, R. K.; BONNET, C. **Land-surface subsidence in the Houston-Galveston region, Texas**. Austin, Texas. 1975.

GALLOWAY, D. L.; HUDNUT, K. W.; INGEBRITSEN, S. E.; PHILLIPS, S. P.; PELTZER, G.; ROGEZ, F.; ROSEN, P. A. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. **Water Resources Research**, v. 34, n. 10, p. 2573-2585, 1998. DOI: 10.1029/98WR01285.

GALLOWAY, D. L.; CARREON-FREYRE, D.; TEATINI, P.; YE, S. The UNESCO-IHP Working Group on Land Subsidence: Four Decades of International Contributions to Hydrogeological Related Subsidence Research and Knowledge Exchange. *In: AGU Fall Meeting Abstracts*, 2015, v. 2015. p. H51A-1344

GAMA, F. F.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; SANTOS, A. Técnicas de interferometria radar na detecção de deformação superficial utilizando dados orbitais. *In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 2013, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais [...]**. 2013, p. 13-18

GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; ASSIS, L. M. Proposta de avaliação de técnicas de interferometria diferencial avançada (A-Dinsar) de dados SAR orbitais dos satélites TerraSAR-X e COSMO-SkyMed no monitoramento de instabilidade de minas de ferro a céu aberto no Quadrilátero Ferrífero-MG. *In: Anais XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 2015, João Pessoa, Brasil. **Anais [...]**. 2015, p. 1539-1546.

GAMBOLATI, G.; FREEZE, R. A. Mathematical simulation of the subsidence of Venice: 1. Theory. **Water Resources Research**, v. 9, n. 3, p. 721-733, 1973. DOI: 10.1029/WR009i003p00721.

GAMBOLATI, G.; TEATINI, P.; TOMASI, L.; GONELLA, M. Coastline regression of the Romagna Region, Italy, due to natural and anthropogenic land subsidence and sea level rise. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 163-184, 1999. DOI: 10.1029/98WR01285.

GEE. Google Earth Engine. **Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A**, 2021. Disponível em: <[https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S2\\_SR](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR)>. Acesso em: 10 mai. 2021.

GERNHARDT, S.; ADAM, N.; EINEDER, M.; BAMLER, R. Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas. **Annals of GIS**, v. 16, n. 2, p. 103-111, 2010. DOI: 10.1080/19475683.2010.492126.

GERNHARDT, S.; BAMLER, R. Deformation monitoring of single buildings using meter-

resolution SAR data in PSI. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 73, p. 68-79, 2012. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.06.009.

GERNHARDT, S.; AUER, S.; EDER, K. Persistent scatterers at building facades – Evaluation of appearance and localization accuracy. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 100, p. 92-105, 2015. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.05.014.

GHIGLIA, D. C.; PRITT, M. D. **Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software**. New York: Wiley-Interscience, 1998. 512 p. ISBN: 978-0-471-24935-1.

GOEL, K.; ADAM, N. A Distributed Scatterer Interferometry Approach for Precision Monitoring of Known Surface Deformation Phenomena. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 9, p. 5454-5468, 2014. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2289370.

GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H. A.; WERNER, C. L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. **Radio Science**, v. 23, n. 4, p. 713-720, 1988. DOI: 0.1029/RS023i004p00713.

GOOGLE. Google Earth Pro. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 20 dez. 2018.

GUACCI, G. The Pixley fissure, San Joaquin Valley, California. *In: Evaluation and Prediction of Subsidence*, 1979, ASCE, p. 303-319.

GUSMÃO FILHO, J. A. **Fundações do conhecimento geológico à prática da engenharia**. Recife: Editora Universitária UFPE, 1998. 345 p. ISBN: 85-7315-108-0.

HANSEN, R. F. **Radar interferometry: data interpretation and error analysis**. Kluwer Academic Publishers, 2001. 308 p. ISBN: 0-7923-6945-9.

HARTLEY, J. **Draining the San Joaquin aquifers in California's Central Valley**, 2014. Disponível em: <<https://lessthan3ley.wordpress.com/2014/07/28/draining-the-san-joaquin-aquifers-in-californias-central-valley/>> Acesso em: 31 jan. 2019

HATTON, T. J.; OTTO, C. J.; UNDERSCHULTZ, J. R. **Falling Water Levels in the Latrobe Aquifer, Gippsland Basin: Determination of Cause and Recommendations for Future Work**. CSIRO. Australia, p. 37. 2004.

HEINE, C. A.; COELHO, O. G. W.; FACCINI, U.; DE ARAÚJO SILVA, M. C.; ESMERIS, C. Monitoramento da Depleção e Detecção dos Limites de Exploração do Sistema Aquífero Guarani em Ivoti (RS): uma aplicação de geoprocessamento no gerenciamento municipal do uso sustentável de recursos hídricos subterrâneos. **Gaea-Journal of Geoscience**, v. 1, n. 1, p. 26-35, 2005.

HELENO, S. I. N.; FRISCHKNECHT, C.; D'OREYE, N.; LIMA, J. N. P.; FARIA, B.; WALL, R.; KERVYN, F. Seasonal tropospheric influence on SAR interferograms near the ITCZ – The case of Fogo Volcano and Mount Cameroon. **Journal of African Earth Sciences**, v. 58, n. 5, p. 833-856, 2010. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2009.07.013.

HELENO, S. I. N.; OLIVEIRA, L. G. S.; HENRIQUES, M. J.; FALCÃO, A. P.; LIMA, J. N. P.; COOKSLEY, G.; FERRETTI, A.; FONSECA, A. M.; LOBO-FERREIRA, J. P.;

FONSECA, J. F. B. D. Persistent Scatterers Interferometry detects and measures ground subsidence in Lisbon. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 2152-2167, 2011. DOI: 10.1016/j.rse.2011.04.021.

HERRERA, G.; TOMÁS, R.; LOPEZ-SANCHEZ, J. M.; DELGADO, J.; MALLORQUI, J. J.; DUQUE, S.; MULAS, J. Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain). **Engineering Geology**, v. 90, n. 3, p. 148-159, 2007. DOI: 10.1016/j.enggeo.2007.01.001.

HERRERA, G.; TOMÁS, R.; LOPEZ-SANCHEZ, J. M.; DELGADO, J.; VICENTE, F.; MULAS, J.; COOKSLEY, G.; SANCHEZ, M.; DURO, J.; ARNAUD, A.; BLANCO, P.; DUQUE, S.; MALLORQUI, J. J.; DE LA VEGA-PANIZO, R.; MONSERRAT, O. Validation and comparison of Advanced Differential Interferometry Techniques: Murcia metropolitan area case study. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 5, p. 501-512, 2009a. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2008.09.008.

HERRERA, G.; DAVALILLO, J.; MULAS, J.; COOKSLEY, G.; MONSERRAT, O.; PANCIOLI, V. Mapping and monitoring geomorphological processes in mountainous areas using PSI data: Central Pyrenees case study. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, n. 5, p. 1587-1598, 2009b. DOI: 10.5194/nhess-9-1587-2009.

HERRERA, G.; FERNÁNDEZ, J. A.; TOMÁS, R.; COOKSLEY, G.; MULAS, J. Advanced interpretation of subsidence in Murcia (SE Spain) using A-DInSAR data – modelling and validation. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, n. 3, p. 647-661, 2009c. DOI: 10.5194/nhess-9-647-2009.

HERRERA, G.; NOTTI, D.; GARCÍA-DAVALILLO, J. C.; MORA, O.; COOKSLEY, G.; SÁNCHEZ, M.; ARNAUD, A.; CROSETTO, M. Analysis with C- and X-band satellite SAR data of the Portalet landslide area. **Landslides**, v. 8, n. 2, p. 195-206, 2011. DOI: 10.1007/s10346-010-0239-3.

HERRERA-GARCÍA, G.; EZQUERRO, P.; TOMÁS, R.; BÉJAR-PIZARRO, M.; LÓPEZ-VINIELLES, J.; ROSSI, M.; MATEOS, R. M.; CARREÓN-FREYRE, D.; LAMBERT, J.; TEATINI, P.; CABRAL-CANO, E.; ERKENS, G.; GALLOWAY, D.; HUNG, W.-C.; KAKAR, N.; SNEED, M.; TOSI, L.; WANG, H.; YE, S.. Mapping the global threat of land subsidence. **Science**, v. 371, n. 6524, p. 34-36, 2021. DOI: 10.1126/science.abb8549.

HETLAND, E. A.; MUSÉ, P.; SIMONS, M.; LIN, Y. N.; AGRAM, P. S.; DICAPRIO, C. J. Multiscale InSAR Time Series (MInTS) analysis of surface deformation. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 117, n. B2, 2012. DOI: 10.1029/2011JB008731.

HIRATA, R. C. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Eaux souterraines et sécurité hydrique dans la Région Métropolitaine de Recife. *In*: CARY, P.; GIGLIO, A.; MELO, A. (org.). **Affronter le manque d'eau dans une métropole. Le cas de Recife, Brésil**. 1 ed. Paris: Septentrion Presses Universitaires, 2018, p. 67-74.

HIROSE, K.; MARUYAMA, Y.; MURDOHARDONO, D.; EFFENDI, A.; ABIDIN, H. Z. Land subsidence detection using JERS-1 SAR Interferometry. *In*: 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 2001, Singapore. p. 5-9.

HOFFMANN, J.; ZEBKER, H. A.; GALLOWAY, D. L.; AMELUNG, F. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by Synthetic Aperture Radar Interferometry. **Water Resources Research**, v. 37, n. 6, p. 1551-1566, 2001. DOI: 10.1029/2000WR900404.

HOFFMANN, J. **The application of satellite radar interferometry to the study of land subsidence over developed aquifer systems**. 2003. 229 f. Thesis (PhD) – Department of Geophysics, Stanford University, 2003.

HOLLA, L. Ground movement due to longwall mining in high relief areas in New South Wales, Australia. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 34, n. 5, p. 775-787, 1997. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)00004-1.

HOLLA, L.; BARCLAY, E. **Mine subsidence in the southern coalfield, NSW, Australia**. Sydney: Department of Mineral Resources, 2000. 118 p. ISBN: 0731392256.

HOLLMANN, M. **Christian Huelsmeyer, the inventor**, 2007. Disponível em: <<https://www.radarworld.org/huelsmeyer.html>>. Acesso em: 07 ago. 2019

HOOPER, A.; ZEBKER, H.; SEGALL, P.; KAMPES, B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 23, 2004. DOI: 10.1029/2004GL021737.

HOOPER, A. J. **Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modelling of volcanic deformation**. 2006. 144 f. Thesis (PhD) – Department of Geophysics, Stanford University, 2006.

HOOPER, A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 16, 2008. DOI: 10.1029/2008GL034654.

HO TONG MINH, D.; HANSSSEN, R.; ROCCA, F. Radar Interferometry: 20 Years of Development in Time Series Techniques and Future Perspectives. **Remote Sensing**, v. 12, n. 9, 2020. DOI: 0.3390/rs12091364.

HU, R.; WANG, S.; LEE, C.; LI, M. Characteristics and trends of land subsidence in Tanggu, Tianjin, China. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 61, n. 3, p. 213-225, 2002. DOI: 0.1007/s100640100132.

HU, R. L.; YUE, Z. Q.; WANG, L. C.; WANG, S. J. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. **Engineering Geology**, v. 76, n. 1, p. 65-77, 2004. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.06.006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Região de influência das cidades - 2007**, 2007. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa797>>. Acesso em: 02 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**, 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>>. Acesso em: 02 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cartas e Mapas. Bases Cartográficas Contínuas. **BC250 - Versão 2017 (SHP-Hidrografia)**, 2017. Escala 1:250.000. Disponível

em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220344>>. Acesso em: 27 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Organização do Território. Malhas territoriais. Malhas de unidade da federação. Malha com todas as UFs. **Brasil - Unidades da Federação 2018**, 2018a. Disponível em:

<<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>>. Acesso em: 27 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Organização do Território. Malhas territoriais. Malha de municípios. **Pernambuco - Malha municipal 2018 (SHP)**, 2018b. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>>. Acesso em: 27 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da População 2018**, 2018c. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 05 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Economia. **PIB per capita [2018]**, 2018d. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>>. Acesso em: 04 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Relatório de estação geodésica. RN 9319G**, 2018e. Disponível em:

<<http://www.bdg.ibge.gov.br/bdg/pdf/relatorio.asp?L1=9319G/>>. Acesso em 17 nov. 2021

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Relatório de estação geodésica**. 2018f. Disponível em: <<http://www.bdg.ibge.gov.br/bdg/>>. Acesso em 22 mai. 2022

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Trabalho e rendimento. **População ocupada [2019]**, 2019. Disponível em:

<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>>. Acesso em: 03 dez. 2021.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Trabalho e rendimento. **Solução Multianual das Estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS no Período de 2000 a 2019**. IBGE. Rio de Janeiro, p. 117. 2021. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101895>>. Acesso em: 02 mai. 2022

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Trabalho e rendimento. **RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**, 2022a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/metodos-e-outros-documentos-de-referencia/outros-documentos-tecnicos-geo/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?edicao=16276&t=acesso-ao-produto>>. Acesso em: 02 mai. 2022.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Trabalho e rendimento. **Solução multianual: estação RECF**, 2022b. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=dados-diarios-e-situacao-operacional>>. Acesso em: 02 mai. 2022.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Trabalho e rendimento. **Solução multianual: estação PERC**, 2022c. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=dados-diarios-e-situacao-operacional>>. Acesso em: 02 mai. 2022.

geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-contínuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=dados-diarios-e-situacao-operacional>. Acesso em: 02 mai. 2022.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Trabalho e rendimento. **SIRGAS - Centro de Análise - IBGE**, gráficos, 2022d. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/sirgas/16257-centro-de-analise-ibge.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 06 mai. 2022.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Relatório de estação geodésica. RN 3641M**, 2021. Disponível em: <<http://www.bdg.ibge.gov.br/bdg/pdf/relatorio.asp?L1=3641M>>. Acesso em: 22 mai. 2022.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Gráficos Climatológicos. **Estação: RECIFE (CURADO) (82900)**, 2019. Disponível em: <<https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/PE/82900>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Nacional de Meteorologia. Tabela de dados das estações. **Estação: Recife (Curado) (82900)**, 2021. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes>>. Acesso em: 10 mai. 2022.

ISHII, M.; KURAMOCHI, F.; ENDO, T. Recent tendencies of the land subsidence in Tokyo. *In: Proceedings of the Anaheim Symposium*, 1970.

KAMPES, B.; HANSEN, R.; PERSKI, Z. Radar interferometry with public domain tools. *In: FRINGE 2003 Workshop*, 2003, Frascati, Italy. **550**.

KAMPES, B. M. **Radar interferometry: persistent scatterers technique**. The Netherlands: Springer, Dordrecht, 2006. 211 p. ISBN: 978-1-4020-4723-7.

KARILA, K.; KARJALAINEN, M.; HYYPPÄ, J.; KOSKINEN, J.; SAARANEN, V.; ROUHIAINEN, P. A Comparison of Precise Leveling and Persistent Scatterer SAR Interferometry for Building Subsidence Rate Measurement. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 2, n. 3, 2013. DOI: 10.3390/ijgi2030797.

KETELAAR, V. B. H. **Satellite radar interferometry: Subsidence monitoring techniques**. The Netherlands: Springer, Dordrecht, 2009. 244 p. ISBN: 978-1-4020-9427-9.

KHANLARI, G.; HEIDARI, M.; MOMENI, A. A.; AHMADI, M.; TALEB BEYDOKHTI, A. The effect of groundwater overexploitation on land subsidence and sinkhole occurrences, western Iran. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 45, n. 4, p. 447, 2012. DOI: 10.1144/qjegh2010-069.

KHORRAMI, M.; ABRISHAMI, S.; MAGHSOUDI, Y.; ALIZADEH, B.; PERISSIN, D. Extreme subsidence in a populated city (Mashhad) detected by PSInSAR considering groundwater withdrawal and geotechnical properties. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 11357, 2020, DOI: 10.1038/s41598-020-67989-1.

KRIEGER, L. M. **California Drought: Parts of Central Valley sinking 2 inches a month**, 2016. Disponível em: <<https://www.eastbaytimes.com/2015/08/19/california-drought-parts-of-central-valley-sinking-2-inches-a-month>> Acesso em: 31 jan. 2019

LAN, H.; LI, L.; LIU, H.; YANG, Z. Complex Urban Infrastructure Deformation Monitoring Using High Resolution PSI. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 643-651, 2012. DOI: 10.1109/JSTARS.2011.2181490.

LANARI, R.; MORA, O.; MANUNTA, M.; MALLORQUI, J. J.; BERARDINO, P.; SANSOSTI, E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 7, p. 1377-1386, 2004a. DOI: 10.1109/TGRS.2004.828196.

LANARI, R.; ZENI, G.; MANUNTA, M.; GUARINO, S.; BERARDINO, P.; SANSOSTI, E. An integrated SAR/GIS approach for investigating urban deformation phenomena: a case study of the city of Naples, Italy. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 14, p. 2855-2867, 2004b. DOI: 10.1080/01431160310001647750.

LANARI, R.; CASU, F.; MANZO, M.; LUNDGREN, P. Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, n. 1, p. 20-28, 2007. DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.003.

LAUKNES, T. R. **Long-term surface deformation mapping using small-baseline differential SAR interferograms**. 2004. 100 f. Dissertation (Master) – Faculty of Science, University of Tromso, Norway, 2004.

LAUKNES, T. R. **Rockslide mapping in Norway by means of interferometric SAR time series analysis**. 2010. 72 f. Thesis (PhD) – Faculty of Science, University of Tromso, Norway, 2010.

LI, F. K.; GOLDSTEIN, R. M. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radar. *In*: International geoscience and remote sensing symposium (IGARSS), 1987, Ann Arbor, USA. p. 1545-1550.

LI, F. K.; GOLDSTEIN, R. M. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 1, p. 88-97, 1990. DOI: 10.1109/36.45749.

LI, G.; STEUART, P.; PAQUET, R.; RAMAGE, R. A case study on mine subsidence due to multi-seam longwall extraction. *In*: 2nd Australasian Ground Control in Mining Conference. 2010, Sydney. p. 23-24.

LIU, D.; SOWTER, A.; NIEMEIER, W. Process-related deformation monitoring by PSI using high resolution space-based SAR data: a case study in Düsseldorf, Germany. **Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions**, v. 2, n. 7, p. 4813-4830, 2014. DOI: 10.5194/nhessd-2-4813-2014.

LOFGREN, B. Hydrogeologic effects of subsidence, San Joaquin Valley, California. *In*: Proceedings of the Anaheim Symposium, 1976, Citeseer.

LOPES, G. O.; LIMA, C. A. Características e aplicações das imagens SAR na identificação de alvos na Região Amazônica. *In*: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal, Brasil. **Anais [...]**. 2009.

LÓPEZ-QUIROZ, P.; DOIN, M.-P.; TUPIN, F.; BRIOLE, P.; NICOLAS, J.-M. Time series

analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. **Journal of Applied Geophysics**, v. 69, n. 1, p. 1-15, 2009. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.02.006

LOURENCETTI, J.; PRATES, M. M.; OLIVEIRA, J. N. Rebaixamento do aquífero Bauru em São José do Rio Preto, SP. *In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E XVIII ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS*, 2012. **Anais [...]**. 2012.

LU, Z.; FATLAND, R.; WYSS, M.; LI, S.; DEAN, K.; FREYMUELLER, J. Deformation of New Trident Volcano measured by ERS-1 SAR interferometry, Katmai National Park, Alaska. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 6, p. 695-698, 1997. DOI: 10.1029/97GL00539.

LU, Z.; KWOUN, O.; RYKHUS, R. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR): its past, present and future. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 73, n. 3, p. 217, 2007.

LUNA, R. M. R.; SANTOS, S. M.; CABRAL, J. J. S. P.; GARNES, S. J. A.; MARQUES, H. A. Resultados preliminares da estimativa de subsidência através do monitoramento com uso do GNSS. *In: XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE*, 2014, Natal, Brasil. **Anais [...]**. 2014, p. 1-10.

LUNA, R. M. R.; SANTOS, S. M.; CABRAL, J. J. S. P.; GARNES, S. J. A. Monitoramento da subsidência do solo com o uso do nivelamento geométrico de precisão em áreas costeiras da planície de Recife devido à superexploração de águas subterrâneas. *In: VIII CONGRESSO SOBRE PLANEAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA*, 2015, Lisboa, Portugal. **Anais [...]**. 2015.

LUNA, R. M. R.; GARNÉS, S. J. A.; CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M. Groundwater overexploitation and soil subsidence monitoring on Recife plain (Brazil). **Natural Hazards**, v. 86, n. 3, p. 1363-1376, 2017. DOI: 10.1007/s11069-017-2749-y.

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**. 2018. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

LUNA, R. M. R.; GARNÉS, S. J. A.; CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M. Suitability of GNSS for analysis of soil subsidence in Recife in a highly urbanized coastal area. **Natural Hazards**, v. 106, n. 3, p. 1821-1837, 2021. DOI: 10.1007/s11069-021-04513-2.

LV, X.; YAZICI, B.; ZEGHAL, M.; BENNETT, V.; ABDOUN, T. Joint-Scatterer Processing for Time-Series InSAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 11, p. 7205-7221, 2014. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2309346.

MADEIRO, C. **Mineração da Braskem fez bairros de Maceió afundarem, aponta laudo**, 2019. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2019/05/08/mineracao-fez-bairros-afundarem-diz-laudo.htm?cmpid=copiaecola>>. Acesso: em: 16 jan. 2020.

MAIA, P. H. P.; DIAS-NETO, B.; CORRÊA-GOMES, L. C. A análise geológica e estrutural das fissuras e subsidências do carste Lapão. **Cadernos de Geociências**, v. 7, n. 2, p. 112-121,

2010.

MANOEL FILHO, J. Exploração de água subterrânea em zona urbana: caso da grande Recife –PE. *In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 2004. **Anais [...]**. 2004

MANUNTA, M.; LUCA, C. D.; ZINNO, I.; CASU, F.; MANZO, M.; BONANO, M.; FUSCO, A.; PEPE, A.; ONORATO, G.; BERARDINO, P.; MARTINO, P. D.; LANARI, R. The Parallel SBAS Approach for Sentinel-1 Interferometric Wide Swath Deformation Time-Series Generation: Algorithm Description and Products Quality Assessment. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 57, n. 9, p. 6259-6281, 2019. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2904912.

MARINKOVIC, P.; KETELAAR, G.; VAN LEIJEN, F.; HANSSSEN, R. InSAR quality control: Analysis of five years of corner reflector time series. *In: Proceedings of Fringe 2007 Workshop (ESA SP-649)*, Frascati, Italy, 2007, v. 26. p. 30.

MASSONNET, D.; ROSSI, M.; CARMONA, C.; ADRAGNA, F.; PELTZER, G.; FEIGL, K.; RABAUTE, T. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. **Nature**, v. 364, n. 6433, p. 138-142, 1993. DOI: 10.1038/364138a0.

MASSONNET, D.; FEIGL, K.; ROSSI, M.; ADRAGNA, F. Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. **Nature**, v. 369, n. 6477, p. 227-230, 1994. DOI: 10.1038/369227a0.

MASSONNET, D.; BRIOLE, P.; ARNAUD, A. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. **Nature**, v. 375, n. 6532, p. 567-570, 1995. DOI: 10.1038/375567a0.

MASSONNET, D.; FEIGL, K. L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. **Reviews of Geophysics**, v. 36, n. 4, p. 441-500, 1998. DOI: 10.1029/97RG03139.

MATRANGOLO, W.; ALBERNAZ, W.; TRAVASSOS, L.; TEIXEIRA, F.; LANDAU, E. C.; MIRANDA, G. A. Diversidade na produção de milho na região central de Minas Gerais. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, p. 40, 2010.. ISSN: 1679-0154.

MEI, M; HIDAYAT, R. **Yakarta, la ciudad que más rápido se está hundiendo en el mundo**, 2018. Disponível em: <[https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-45168502?ocid=socialflow\\_twitter](https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-45168502?ocid=socialflow_twitter)>. Acesso em: 25 out. 2018.

MELO, M. L. **Metropolização e subdesenvolvimento – o caso do Recife**. Recife: UFPE, 1978. 257 p.

MENEZES, J. L. M. **Atlas histórico cartográfico do Recife**. Recife: Massangana, 1988. 114 p. ISBN: 8570191723.

MILILLO, P.; BÜRGMANN, R.; LUNDGREN, P.; SALZER, J.; Perissin, D.; Fielding, E.; Biondi, F.; Milillo, G. Space geodetic monitoring of engineered structures: The ongoing destabilization of the Mosul dam, Iraq. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 37408, 2016. DOI: 10.1038/srep37408.

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

MONTEIRO, A. B. **Modelagem de Fluxo subterrâneo nos aquíferos da planície do Recife seus encaixes**. 2000. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2000.

MONTEIRO, A. B.; COSTA, W. D.; FRANÇA, A. E. Zona "A" - o aquífero Cabo pede socorro. *In: IV SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO NORDESTE E XII ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS*, 2001. *Anais [...]*. 2001, p. 595-605.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; DEMETRIO, J. G. A.; CAVALCANTI, G. L. Águas subterrâneas na zona costeira da planície do Recife (PE): evolução da salinização e perspectivas de gerenciamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 3, p. 81-93, 2009.

MORA, O.; MALLORQUI, J. J.; BROQUETAS, A. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 10, p. 2243-2253, 2003. DOI: 10.1109/TGRS.2003.814657.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4 ed. atualizada e ampliada. Viçosa, MG: ED. UFV, 2011. 422 p. ISBN: 978-85-7269-381-3.

MOTAGH, M.; HOFFMANN, J.; KAMPES, B.; BAES, M.; ZSCHAU, J. Strain accumulation across the Gazikoy–Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 255, n. 3, p. 432-444, 2007. DOI: 10.1016/j.epsl.2007.01.003.

MULLISSA, A. G.; PERISSIN, D.; TOLPEKIN, V. A.; STEIN, A. Polarimetry-Based Distributed Scatterer Processing Method for PSI Applications. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 56, n. 6, p. 3371-3382, 2018. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2798705.

MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; GALO, M.; CAMARGO, P.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G. Monitoring of surface deformation in open pit mine using DInSAR time-series: a case study in the N5W iron mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data. *In: SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XIV*, 2014, v. **9243**. Amsterdam, Netherlands: International Society for Optics and Photonics, p. 924311. DOI: 10.1117/12.2066886.

NASA EARTH OBSERVATORY. **Fogo, Cape Verde Islands**, 2009. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/38963/fogo-cape-verde-islands>>. Acesso em: 29 ago. 2019.

NAVARRO, E. A. **Dicionário de tupi antigo: a língua indígena clássica do Brasil**. São Paulo: Global, 2013, 624 p. ISBN: 978-8526019331.

NG, A. H.-M.; CHANG, H.-C.; ZHANG, K.; GE, L.; RIZOS, C. Land subsidence monitoring in Australia and China using Satellite Interferometry. *In: Sideris M.G. (eds) Observing our Changing Earth*. International Association of Geodesy Symposia. Berlin, Heidelberg:

Springer, 2009. v. 133, p. 743-750. DOI: 10.1007/978-3-540-85426-5\_85.

NG, A. H.-M.; GE, L.; LI, X. Assessments of land subsidence in the Gippsland Basin of Australia using ALOS PALSAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 159, p. 86-101, 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2014.12.003.

NG, A. H.-M.; GE, L.; ZHANG, K.; CHANG, H.-C.; LI, X.; RIZOS, C.; OMURA, M. Deformation mapping in three dimensions for underground mining using InSAR – Southern highland coalfield in New South Wales, Australia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 22, p. 7227-7256, 2011. DOI: 10.1080/01431161.2010.519741.

NOTTI, D.; DAVALILLO, J.; HERRERA, G.; MORA, O. Assessment of the performance of X-band satellite radar data for landslide mapping and monitoring: Upper Tena Valley case study. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 10, n. 9, p. 1865-1875, 2010. DOI: 10.5194/nhess-10-1865-2010, 2010.

OMM. Organização Meteorológica Mundial. **2020 was one of three warmest years record**, 2021. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/media/press-release/2020-was-one-of-three-warmest-years-record>>. Acesso em: 04 jul. 2021

PAIVA, A. L. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CABRAL, J. J. S. P.; COUTINHO, A. P.; SILVA, S. C. Evolução da mancha urbana do Recife e seus efeitos na recarga do aquífero boa viagem. *In*: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2015, Brasília, DF, Brasil. **Anais [...]**. 2015.

PEPE, A.; CALÒ, F. A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. **Applied Sciences**, v. 7, n. 12, p. 1264, 2017. DOI: 10.3390/app7121264.

PCR. Prefeitura da Cidade do Recife. **Levantamento aerofotogramétrico**. Ortofoto colorida. GSD 0,09 cm. Escala 1:1.000. Recife, 2007.

\_\_\_\_\_. Prefeitura da Cidade do Recife. **Levantamento aerofotogramétrico**. Ortofoto colorida. GSD 0,08 cm. Escala 1:1.000. Recife, 2013a.

\_\_\_\_\_. Prefeitura da Cidade do Recife. **Monografia de marcos**, 2013b. Disponível em: <<https://esigportal2.recife.pe.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=7f6ee791d4d94be4bcf1d0bb93a162a9>>. Acesso em: 17 nov. 2021

\_\_\_\_\_. Prefeitura da Cidade do Recife. **Bairros do Recife**, 2016. Disponível em: <[http://dados.recife.pe.gov.br/pt\\_BR/dataset/area-urbana/resource/e43bee60-9448-4d3d-92ff-2378bc3b5b00](http://dados.recife.pe.gov.br/pt_BR/dataset/area-urbana/resource/e43bee60-9448-4d3d-92ff-2378bc3b5b00)>. Acesso em: 30 set. 2021.

\_\_\_\_\_. Prefeitura da Cidade do Recife. **Engenharia consultiva**, 2019a. Disponível em: <<http://www2.recife.pe.gov.br/pagina/engenharia-consultiva>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. Prefeitura da Cidade do Recife. **Caracterização do Território**, 2019b. Disponível em: <<http://www2.recife.pe.gov.br/pagina/caracterizacao-do-territorio>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. Prefeitura da Cidade do Recife. **Lotes**, 2020a. Disponível em: <[http://dados.recife.pe.gov.br/pt\\_BR/dataset/area-urbana/resource/c82a414a-066f-4acc-922c-](http://dados.recife.pe.gov.br/pt_BR/dataset/area-urbana/resource/c82a414a-066f-4acc-922c-)

e3a63ed047f8>. Acesso em: 10 dez. 2020.

\_\_\_\_\_. Prefeitura da Cidade do Recife. **Trechos de Logradouros**, 2020b. Disponível em: <[http://dados.recife.pe.gov.br/pt\\_BR/dataset/area-urbana/resource/18f16fda-32e2-4fe9-a5ab-0e7852258400](http://dados.recife.pe.gov.br/pt_BR/dataset/area-urbana/resource/18f16fda-32e2-4fe9-a5ab-0e7852258400)>. Acesso em: 10 dez. 2020.

\_\_\_\_\_. Prefeitura da Cidade do Recife. **Recursos hídricos**, 2020c. Disponível em: <[http://dados.recife.pe.gov.br/pt\\_BR/dataset/area-urbana/resource/47964772-09e5-4f6e-b9e3-3b829f475eec](http://dados.recife.pe.gov.br/pt_BR/dataset/area-urbana/resource/47964772-09e5-4f6e-b9e3-3b829f475eec)>. Acesso em: 10 dez. 2020.

\_\_\_\_\_. Prefeitura da Cidade do Recife. **Face de quadra**, 2020d. Disponível em: <[http://dados.recife.pe.gov.br/pt\\_BR/dataset/area-urbana/resource/24334dff-283f-443a-b95c-9aa40afed7aa](http://dados.recife.pe.gov.br/pt_BR/dataset/area-urbana/resource/24334dff-283f-443a-b95c-9aa40afed7aa)>. Acesso em: 10 dez. 2020.

PERISSIN, D.; PRATI, C.; ROCCA, F.; FERRETTI, A. ERS-ENVISAT Permanent Scatterers. *In: IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004, v. 2. p. 985-988. DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1368574.

PERISSIN, D.; WANG, T. Repeat-Pass SAR Interferometry With Partially Coherent Targets. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 1, p. 271-280, 2012. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2160644.

PERNAMBUCO. Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de Pernambuco. **Estudos sobre a disponibilidade e vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos da Região Metropolitana do Recife: Relatório 10**. Recife: SDEC, p. 664. 2017.

PERRONI, J. C. A.; WENDLAND, E. C. Avaliação das condições de ocorrência e exploração do sistema aquífero Guarani em São Carlos - SP. **Águas Subterrâneas**, v. 22, n. 1, p. 13-24, 2008. DOI: 10.14295/ras.v22i1.8571.

PLACZEK, D. Methods for the calculation of settlements due to ground-water lowering. *In: Congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations*. 12, 1989, p. 1813-1818.

POLAND, J. F.; LOFGREN, B. E.; RILEY, F. S. **Glossary of selected terms useful in studies of the mechanics of aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal**. p. 9. 1972. (2025). DOI: 10.3133/wsp2025.

POLAND, J. Land subsidence stopped by artesian-head recovery, Santa Clara valley, California. *In: Proceedings of the Anaheim Symposium*, 1977, p. 124-132.

POLAND, J. F. **Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal**. Paris: UNESCO, 1984. 340 p. ISBN: 92-3-102213-X.

POPE, A.; REES, W. G.; FOX, A. J.; FLEMING, A. Open Access Data in Polar and Cryospheric Remote Sensing. **Remote Sensing**, v. 6, n. 7, 2014. DOI: 10.3390/rs6076183.

PORTO DO RECIFE S.A. **O porto e a cidade**, 2009. Disponível em: <[http://www.portodorecife.pe.gov.br/porto\\_cidade.php](http://www.portodorecife.pe.gov.br/porto_cidade.php)>. Acesso em: 03 jun. 2019.

POSCOLIERI, M.; PARCHARIDIS, I.; FOUMELIS, M.; RAFANELLI, C. Ground deformation monitoring in the greater Cairo metropolitan region (Egypt) by SAR

interferometry. **Journal of Environmental Semeiotics**, v. 4, n. 3, p. 17-45, 2011. DOI: 10.3383/es.4.3.1.

PRATI, C.; ROCCA, F.; GUARNIERI, A. M.; DAMONTI, E. Seismic migration for SAR focusing: Interferometrical applications. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 4, p. 627-640, 1990.

PRINZL, F.; NUTALAYA, P. Land subsidence in the Bangkok region: Reasons, effects and results of recent measurements. *In: European conference on soil mechanics and foundation engineering*. v. 9, 1987, p. 323-326.

PROKOPOVICH, N. P. Genetic classification of land subsidence. *In: Evaluation and Prediction of Subsidence*, 1979, ASCE, p. 389-399.

QUIN, G.; LOREAUX, P. Submillimeter Accuracy of Multipass Corner Reflector Monitoring by PS Technique. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, n. 3, p. 1775-1783, 2013. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2206600.

REALE, D.; NITTI, D. O.; PEDUTO, D.; NUTRICATO, R.; BOVENGA, F.; FORNARO, G. Postseismic Deformation Monitoring With the COSMO/SKYMED Constellation. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 8, n. 4, p. 696-700, 2011. DOI: 10.1109/LGRS.2010.2100364.

REIS FILHO, N. G. **Imagens de Vilas e Cidades do Brasil Colonial**. São Paulo: Edusp, 2001. 414 p. ISBN: 8531405491.

RESOLUÇÃO, CRH. Resolução nº 04/2003 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Governo do Estado de Pernambuco**, 2003.

RICCERI, G.; BUTTERFIELD, R. An analysis of compressibility data from a deep borehole in Venice. **Géotechnique**, v. 24, n. 2, p. 175-191, 1974. DOI: 10.1680/geot.1974.24.2.175.

RICCERI, G.; FAVARETTI, M. National contributions by TC12 land subsidence committee members Italy. *In: Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.*, Rio de Janeiro, 1992, v. 5. p. 13-18.

RIGHINI, G.; PANCIOLI, V.; CASAGLI, N. Updating landslide inventory maps using Persistent Scatterer Interferometry (PSI). **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 7, p. 2068-2096, 2012. DOI: 10.1080/01431161.2011.605087.

ROCCEGGIANI, M.; PIACENTINI, D.; TIRINCANTI, E.; PERISSIN, D.; MENICHETTI, M. Detection and Monitoring of Tunneling Induced Ground Movements Using Sentinel-1 SAR Interferometry. **Remote Sensing**, v. 11, n. 6, 2019. DOI: 10.3390/rs11060639.

ROCHA, F. **Dolinas engolem parte de avenida em Vazante e deixam moradores amedrontados**, 2018. Disponível em: <<https://www.patoshoje.com.br/noticia/dolinas-engolem-parte-de-avenida-em-vazante-e-deixam-moradores-amedrontados-39313.html>>. Acesso em: 19 jan. 2020.

ROMÃO, V. M. C.; SILVA, A. S.; SILVA, T. F.; SANTOS, S. M.; SEIXAS, A.; SANTOS, A. A. Metodologia para Determinação de Subsidência de Solo na Região Metropolitana do Recife. *In: III COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS*, 2003, Curitiba,

Brasil. **1. Anais [...]**. 2003, p. 1-12.

ROSI, A.; VANNOCCI, P.; TOFANI, V.; GIGLI, G.; CASAGLI, N. Landslide Characterization Using Satellite Interferometry (PSI), Geotechnical Investigations and Numerical Modelling: The Case Study of Ricasoli Village (Italy). **International Journal of Geosciences**, v. 4, n. 5, p. 15, 2013. DOI: 10.4236/ijg.2013.45085.

ROUYET, L.; LAUKNES, T. R.; HOGDA, K.-A. **Spaceborne radar interferometry (InSAR) for natural hazards, landslides and infrastructure: limitations and potential**. p. 76. 2015.

RUIZ-ARMENTEROS, A. M.; LAZECKY, M.; RUIZ-CONSTÁN, A.; BAKOŇ, M.; DELGADO, J. M.; SOUSA, J. J.; GALINDO-ZALDÍVAR, J.; DE GALDEANO, C. S.; CARO-CUENCA, M.; MARTOS-ROSILLO, S.; JIMÉNEZ-GAVILÁN, P.; PERISSIN, D. Monitoring continuous subsidence in the Costa del Sol (Málaga province, southern Spanish coast) using ERS-1/2, Envisat, and Sentinel-1A/B SAR interferometry. **Procedia Computer Science**, v. 138, p. 354-361, 2018. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.050.

RUIZ-CONSTÁN, A.; RUIZ-ARMENTEROS, A. M.; MARTOS-ROSILLO, S.; GALINDO-ZALDÍVAR, J.; LAZECKY, M.; GARCÍA, M.; SOUSA, J. J.; SANZ DE GALDEANO, C.; DELGADO-BLASCO, J. M.; JIMÉNEZ-GAVILÁN, P.; CARO-CUENCA, M.; LUQUE-ESPINAR, J. A. SAR interferometry monitoring of subsidence in a detritic basin related to water depletion in the underlying confined carbonate aquifer (Torremolinos, southern Spain). **Science of The Total Environment**, v. 636, p. 670-687, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.280.

SAMIEI-ESFAHANY, S.; MARTINS, J. E.; LEIJEN, F. V.; HANSEN, R. F. Phase Estimation for Distributed Scatterers in InSAR Stacks Using Integer Least Squares Estimation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 54, n. 10, p. 5671-5687, 2016. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2566604.

SAMIEI-ESFAHANY, S. **Exploitation of distributed scatterers in synthetic aperture radar interferometry**. 2017. 225 f. Thesis (PhD) – Faculty Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, The Netherlands, 2017.

SANTOS, A. R. **Terrenos Calcários: Áreas de risco geológico para a Engenharia e para o Meio Ambiente**, 2008. Disponível em: <<https://noticias.ambientebrasil.com.br/artigos/2008/05/05/37974-terrenos-calcarios-areas-de-risco-geologico-para-a-engenharia-e-para-o-meio-ambiente.html>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

SANTOS, R. A.; MANOEL, J. M.; NASCIMENTO, S. A. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Cadernos de Geociências**, v. 7, n. 1, p. 54-62, 2010.

SANTOS, S. M. **Investigações metodológicas sobre o monitoramento da subsidência do solo devido à extração de água subterrânea - caso da Região Metropolitana do Recife**. 2005. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SANTOS, S. M.; ROMÃO, V. M. C.; SEEBER, G. G.; CABRAL, J. J. S. P. Detecção de deslocamentos verticais usando GPS em áreas costeiras. **Revista Brasileira de Cartografia**,

v. 62, n. 2, p. 137-144, 2010.

SANTOS, S. M.; CABRAL, J. J. S. P. Groundwater Exploitation Sustainability Indicators. *In*: BILIBIO, C.; HENSEL, O.; SELBACH, J. F. (org.). **Sustainable water management in the tropics and subtropics - and case studies**. 1 ed. Jaguarão/RS: Fundação Universidade Federal do Pampa, 2011, p. 1007-1030.

SANTOS, S. M. D.; CABRAL, J. J. D. S. P.; PONTES FILHO, I. D. D. S. Monitoring of soil subsidence in urban and coastal areas due to groundwater overexploitation using GPS. **Natural Hazards**, v. 64, n. 1, p. 421-439, 2012. DOI: 10.1007/s11069-012-0247-9.

SARPROZ. **Software Manual**, 2019. Disponível em: <<https://www.sarproz.com/software-manual/>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

SATO, H. P.; ABE, K.; OOTAKI, O. GPS-measured land subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan. **Engineering Geology**, v. 67, n. 3, p. 379-390, 2003. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00221-1.

SCHMIDT, D. A.; BÜRGMANN, R. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 108, n. B9, 2003. DOI: 10.1029/2002JB002267.

SCOTT, R. F. Subsidence – a review. *In*: Evaluation and prediction of subsidence, 1978, ASCE, p. 1-25.

SIDDIQUE, M. A.; WEGMÜLLER, U.; HAJNSEK, I.; FREY, O. Single-Look SAR Tomography as an Add-On to PSI for Improved Deformation Analysis in Urban Areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 54, n. 10, p. 6119-6137, 2016. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2581261.

SILVA, A. C.; SILVA, O. G.; SILVA, D. N. F.; BARROS CORRÊA, A. C. Mudanças do uso e ocupação da terra a partir da expansão urbana e as influências climáticas sobre a morfodinâmica no município do Recife/PE entre 1975 e 2015. **Revista Cerrados (Unimontes)**, v. 13, n. 1, p. 33-49, 2015. ISSN: 1678-8346

SILVA, L. R.; LOURENÇO, E. S.; VIEIRA, L. M.; SOUZA, E. E. S. Subsidência do solo: o reflexo da extração de petróleo na superfície. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE. v. 3: 95-106 p. 2016.

SILVA, S. R.; MONTEIRO, A. B.; CABRAL, J. J. S. P.; BORBA, A. L. S.; FREIRE, P. K. C.; COSTA, W. D.; BARBOSA, G. F. A gestão de águas subterrâneas no Aquífero Barreiras–Jordão, Jardim Jordão e Ibura–Recife Pernambuco. *In*: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2008. **Anais [...]**. 2008.

SIMONS, M.; ROSEN, P. A. Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy. *In*: SCHUBERT, G. (Ed.). **Treatise on Geophysics**. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 391-446.

SOUSA, J. J.; RUIZ-ARMENTEROS, A. M.; BAKOŇ, M.; LAZECKY, M.; HLAVÁČOVÁ, I.; PATRÍCIO, G.; DELGADO, J. M.; PERISSIN, D. Potential of C-Band SAR Interferometry for Dam Monitoring. **Procedia Computer Science**, v. 100, p. 1103-

1114, 2016. DOI: 10.1016/j.procs.2016.09.258.

SOUSA, J.; BASTOS, L. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13, n. 3, p. 659-667, 2013. DOI: 10.5194/nhess-13-659-2013.

SRH-PE. **Plano hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Capibaribe: Tomo I - diagnóstico hidroambiental**. Recife, p. 389. 2010. Disponível em: <<http://www.sirh.srh.pe.gov.br/hidroambiental/files/capibaribe/TOMO%20I%20-%20VOL.%201%20-%20Diagnostico-21.07.11.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2019

SRTM. Shuttle Radar Topography Mission. **Altitude**, 2011. Disponível em: <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

STANLEY, D. J. Subsidence in the Northeastern Nile Delta: Rapid Rates, Possible Causes, and Consequences. **Science**, v. 240, n. 4851, p. 497-500, 1988. DOI: 10.1126/science.240.4851.497.

STANLEY, D. J. Recent subsidence and northeast tilting of the Nile delta, Egypt. **Marine Geology**, v. 94, n. 1, p. 147-154, 1990. DOI: 10.1016/0025-3227(90)90108-V.

STROZZI, T.; WEGMULLER, U. Land subsidence in Mexico City mapped by ERS differential SAR interferometry. *In: IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99*, 1999, v. 4. p. 1940-1942. DOI: 10.1109/IGARSS.1999.774993.

STROZZI, T.; TEATINI, P.; TOSI, L. TerraSAR-X reveals the impact of the mobile barrier works on Venice coastland stability. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 12, p. 2682-2688, 2009. DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.001.

SUDENE. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Cartas Topográficas do Nordeste do Brasil**. Escala 1:25.000. Folhas: Recife, Olinda, Jaboatão, Ponte dos Carvalhos, São Lourenço da Mata, Paulista. 1984.

TARBUCK, E. J.; LUTGENS, F. **Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física**. Madrid, España: Prentice Hall, 2005. 736 p. ISBN: 8420544000.

TARIGHAT, F.; FOROUGHNIA, F.; PERISSIN, D. Monitoring of Power Towers' Movement Using Persistent Scatterer SAR Interferometry in South West of Tehran. **Remote Sensing**, v. 13, n. 3, 2021. DOI: 10.3390/rs13030407,

TAYLOR, S. C.; ARMOUR, B.; HUGHES, W. H.; KULT, A.; NIZMAN, C. Operational Interferometric SAR data processing for RADARSAT using distributed computing environment. *In: Proceedings of the IV International Conference on GeoComputation* Fredericksburg, VA, USA, 1999.

TEATINI, P.; CASTELLETTO, N.; FERRONATO, M.; GAMBOLATI, G.; JANNA, C.; CAIRO, E.; MARZORATI, D.; COLOMBO, D.; FERRETTI, A.; BAGLIANI, A.; BOTTAZZI, F. Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 116, n. F2, 2011. DOI: 10.1029/2010JF001793.

TEATINI, P.; TOSI, L.; STROZZI, T.; CARBOGNIN, L.; CECCONI, G.; ROSSELLI, R.; LIBARDO, S. Resolving land subsidence within the Venice Lagoon by persistent scatterer SAR interferometry. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 40-41, p. 72-79, 2012. DOI: 10.1016/j.pce.2010.01.002.

TEIXEIRA, W. (org.); TOLEDO, M. (org.); FAIRCHILD, T. (org.); TAIOLI, F. (org.). **Decifrando a Terra**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568 p. ISBN: 85-86238-14-7.

TEIXEIRA, W. (org.); TOLEDO, M. (org.); FAIRCHILD, T. (org.); TAIOLI, F. (org.). **Decifrando a Terra**. 2 ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. 624 p. ISBN: 8504014398.

TOFANI, V.; RASPINI, F.; CATANI, F.; CASAGLI, N. Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique for Landslide Characterization and Monitoring. **Remote Sensing**, v. 5, n. 3, 2013. DOI: 10.3390/rs5031045.

TOMÁS, R.; CANO, M.; GARCÍA-BARBA, J.; VICENTE, F.; HERRERA, G.; LOPEZ-SANCHEZ, J. M.; MALLORQUÍ, J. J. Monitoring an earthfill dam using differential SAR interferometry: La Pedrera dam, Alicante, Spain. **Engineering Geology**, v. 157, p. 21-32, 2013. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.01.022.

TOMÁS-JOVER, R. **Estudio de la subsidencia de la ciudad de murcia mediante interferometría sar diferencial avanzada**. 2008. 236 f. Tese (PhD). Escuela Politécnica Superior – Universidad de Alicante, 2008.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; DO AMARAL, R (orgs.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1 ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 196 p. ISBN: 978-85-87235-09-1.

TORGE, W.; MÜLLER, J. **Geodesy**. 4th ed. Walter de Gruyter, 2012. 444 p. ISBN: 3110207184.

TRATA BRASIL. **Demanda futura por água tratada nas cidades brasileiras 2017 a 2040, 2020**. Disponível em: <[http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/Demanda\\_futura\\_por\\_%C3%A1gua\\_-\\_Instituto\\_Trata\\_Brasil\\_-\\_26-08-2020a.pdf](http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/Demanda_futura_por_%C3%A1gua_-_Instituto_Trata_Brasil_-_26-08-2020a.pdf)>. Acesso em: 23 jul. 2021.

TURCOTTE, D.; SCHUBERT, G. **Geodynamics**. 3rd revised. Cambridge University Press, 2014. 560 p. ISBN: 521186234.

UNESCO. **UNESCO Land Subsidence International Initiative**, 2019. Disponível em: <<https://www.landsubsidence-unesco.org/lasii/>>. Acesso em: 14 abr. 2019

USGS. United States Geological Survey. **Earth Explorer**. Imagem de satélite. Sentinel-2. Resolução espacial 10 m. Composição RGB. Cena de 10 de set. de 2019. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 10 out. 2019.

VALLONE, P.; GIAMMARINARO, M. S.; CROSETTO, M.; AGUDO, M.; BIESCAS, E. Ground motion phenomena in Caltanissetta (Italy) investigated by InSAR and geological data integration. **Engineering Geology**, v. 98, n. 3, p. 144-155, 2008. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.02.004.

VAN CAMP, M.; DE VIRON, O. La mesure de la Terre est une des bases de son étude physique. **Journal de la Société Royale Belge d'Astronomie, de Météorologie et de Physique du Globe**, v. 121, n. 3, p. 67-78, 2005.

VAN LEIJEN, F. J. **Persistent scatterer interferometry based on geodetic estimation theory**. 2014. 220 f. Thesis (PhD) – Faculty Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, The Netherlands, 2014.

VASCO, D. W.; FERRETTI, A.; NOVALI, F. Reservoir monitoring and characterization using satellite geodetic data: Interferometric synthetic aperture radar observations from the Krechba field, Algeria. **Geophysics**, v. 73, n. 6, p. WA113-WA122, 2008. DOI: 10.1190/1.2981184.

VASCO, D. W.; RUCCI, A.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; BISSELL, R. C.; RINGROSE, P. S.; MATHIESON, A. S.; WRIGHT, I. W. Satellite-based measurements of surface deformation reveal fluid flow associated with the geological storage of carbon dioxide. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 3, 2010. DOI: 10.1029/2009GL041544.

VASCONCELOS, R. F. A.; BEZERRA, O. G. (org). **Atlas ambiental da cidade do Recife**. Recife: Prefeitura da Cidade do Recife/Secretária de planejamento, urbanismo e meio ambiente, 2000. 151 p.

VÁZQUEZ, J. N. **Cálculo de la subsidencia unidimensional debida a los descensos del nivel piezométrico. Aplicación al casco urbano de Murcia ya los efectos sobre sus edificios**. 2001. 485 f. Thesis (PhD) – Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2001.

VÁZQUEZ, J. N.; DE JUSTO, J. L. **La subsidencia en Murcia. Implicaciones y consecuencias en la edificación**. Murcia: COPOT, 2002. 262 p. ISBN: 84-87138-36-5.

VEGA, G. E. F. Subsidence of the city of Mexico: a historical review. *In: Proceedings of the Anaheim Symposium, 1976, 121. p. 35-38.*

VIAJA NET. **10 lugares para conhecer em Recife**, 2018. Disponível em: <<https://www.viajanet.com.br/blog/lugares-para-conhecer-em-recife/#>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

VISIT RECIFE. **Experiências**, 2019. Disponível em: <<https://visit.recife.br/>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

WANG, N. **Estudio de subsidencia por extracción de fluido**, 2017. 33 f. Dissertation (Master) – Escuela Técnica Superior, Universidad Politécnica de Madrid, 2017.

WANG, T.; PERISSIN, D.; ROCCA, F.; LIAO, M.-S. Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis. **Science China Earth Sciences**, v. 54, n. 5, p. 720-732, 2011. DOI: 10.1007/s11430-010-4101-1.

WATSON, K. M.; BOCK, Y.; SANDWELL, D. T. Satellite interferometric observations of displacements associated with seasonal groundwater in the Los Angeles basin. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 107, n. B4, p. ETG 8-1-ETG 8-15, 2002. DOI: 10.1029/2001JB000470.

WEGMULLER, U.; WALTER, D.; SPRECKELS, V.; WERNER, C. L. Nonuniform Ground Motion Monitoring With TerraSAR-X Persistent Scatterer Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, n. 2, p. 895-904, 2010. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2030792.

WERNER, C.; WEGMULLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. Interferometric point target analysis for deformation mapping. *In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings*, 2003, **7**. p. 4362-4364. DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1295516.

WILLIAMS, P.; FONG, Y. T. **World map of carbonate rock outcrops v3.0**, 2010. Disponível em: <[https://www.fos.auckland.ac.nz/our\\_research/karst/index.html#karst6](https://www.fos.auckland.ac.nz/our_research/karst/index.html#karst6)>. Acesso em: 07 jan. 2021.

WINLKKA, C. C.; WOLD, F. D. Laid subsidence in central Arizona. *In: Proceedings of the Anaheim Symposium*, 1976, p. 95-103.

XIA, Y.; KAUFMANN, H.; GUO, X. Differential SAR interferometry using corner reflectors. *In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002, v. **2**. p. 1243-1246 vol.1242. DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1025902.

YAMAMOTO, S. Recent trend of land subsidence in Japan. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, v. 7, n. 33, p. 297A, 1996.

ZEBKER, H. A.; VILLASENOR, J. Decorrelation in interferometric radar echoes. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 30, n. 5, p. 950-959, 1992.

ZHAO, Q.; LIN, H.; JIANG, L.; CHEN, F.; CHENG, S. A Study of Ground Deformation in the Guangzhou Urban Area with Persistent Scatterer Interferometry. **Sensors**, v. 9, n. 1, p. 503-518, 2009. DOI: 10.3390/s90100503.

**APÊNDICE A – IMAGENS SAR DO SATÉLITE SENTINEL-1**

Tabela – Dados SAR do Sentinel-1

(continua)

<b>Data</b>	<b>Informação</b>
25/09/2016	S1A_IW_SLC__1SDV_20160925T080127_20160925T080155_013206_015029_4BFF
07/10/2016	S1A_IW_SLC__1SDV_20161007T080127_20161007T080155_013381_0155A2_6C58
19/10/2016	S1A_IW_SLC__1SDV_20161019T080127_20161019T080155_013556_015B39_B1CE
31/10/2016	S1A_IW_SLC__1SDV_20161031T080127_20161031T080155_013731_016091_A56C
12/11/2016	S1A_IW_SLC__1SDV_20161112T080127_20161112T080155_013906_016622_587D
24/11/2016	S1A_IW_SLC__1SDV_20161124T080127_20161124T080154_014081_016B6C_E324
06/12/2016	S1A_IW_SLC__1SDV_20161206T080126_20161206T080154_014256_0170ED_B269
18/12/2016	S1A_IW_SLC__1SDV_20161218T080126_20161218T080154_014431_01766F_43C7
30/12/2016	S1A_IW_SLC__1SDV_20161230T080125_20161230T080153_014606_017BE7_6F22
11/01/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170111T080124_20170111T080152_014781_018126_61CD
23/01/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170123T080123_20170123T080151_014956_0186A0_1D65
04/02/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170204T080138_20170204T080205_015131_018BED_626D
16/02/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170216T080138_20170216T080205_015306_019173_9C2A
28/02/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170228T080137_20170228T080204_015481_0196CC_B8B4
12/03/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170312T080126_20170312T080154_015656_019C15_5D26
24/03/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170324T080138_20170324T080205_015831_01A147_AABB
05/04/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170405T080126_20170405T080154_016006_01A678_F6A4.
17/04/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170417T080127_20170417T080155_016181_01ABD6_8455
29/04/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170429T080139_20170429T080206_016356_01B126_7562
11/05/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170511T080140_20170511T080207_016531_01B66D_AD5D
23/05/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170523T080141_20170523T080208_016706_01BBD7_F775
04/06/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170604T080142_20170604T080208_016881_01C141_935B
16/06/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170616T080142_20170616T080209_017056_01C6A6_4780
28/06/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170628T080143_20170628T080210_017231_01CBF6_62F7
10/07/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170710T080143_20170710T080210_017406_01D13E_7D0B
22/07/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170722T080144_20170722T080211_017581_01D690_C020
03/08/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170803T080145_20170803T080212_017756_01DBE8_838E
15/08/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170815T080146_20170815T080212_017931_01E13D_4EE9
27/08/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170827T080146_20170827T080213_018106_01E688_5759
08/09/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170908T080147_20170908T080213_018281_01EBDF_7D40
20/09/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20170920T080147_20170920T080214_018456_01F141_CCDD
02/10/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20171002T080147_20171002T080214_018631_01F6A5_7908
14/10/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20171014T080147_20171014T080214_018806_01FBF5_D552
26/10/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20171026T080148_20171026T080214_018981_020144_6BF9
07/11/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20171107T080147_20171107T080214_019156_0206B1_4998
19/11/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20171119T080147_20171119T080214_019331_020C2E_4EEF
01/12/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20171201T080147_20171201T080214_019506_0211A6_578E
13/12/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20171213T080146_20171213T080213_019681_021722_D65D
25/12/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20171225T080146_20171225T080213_019856_021C82_5366
06/01/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180106T080145_20180106T080212_020031_02220E_8C87
18/01/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180118T080145_20180118T080212_020206_02279A_E015
30/01/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180130T080145_20180130T080211_020381_022D2A_226E
11/02/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180211T080144_20180211T080211_020556_0232C6_243F
23/02/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180223T080144_20180223T080211_020731_023858_C2B0
07/03/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180307T080144_20180307T080211_020906_023DE4_E618
19/03/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180319T080144_20180319T080211_021081_024369_1193
31/03/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180331T080145_20180331T080212_021256_0248F8_812C

Tabela – Dados SAR do Sentinel-1

(continuação)

<b>Data</b>	<b>Informação</b>
12/04/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180412T080145_20180412T080212_021431_024E6B_8E0F
24/04/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180424T080146_20180424T080213_021606_0253E0_1D24
06/05/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180506T080146_20180506T080213_021781_02596D_51AB
18/05/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180518T080147_20180518T080214_021956_025EFD_A533
30/05/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180530T080147_20180530T080214_022131_02649D_6FED
11/06/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180611T080148_20180611T080215_022306_026A11_17E0
23/06/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180623T080149_20180623T080216_022481_026F51_D8E1
05/07/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180705T080149_20180705T080216_022656_027470_19AE
17/07/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180717T080150_20180717T080217_022831_0279BD_451A
29/07/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180729T080151_20180729T080218_023006_027F45_0857
10/08/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180810T080152_20180810T080219_023181_0284BE_0E41
22/08/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180822T080152_20180822T080219_023356_028A67_894B
03/09/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180903T080153_20180903T080220_023531_028FF6_85BF
15/09/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180915T080153_20180915T080220_023706_029591_231F
27/09/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20180927T080154_20180927T080221_023881_029B3C_BB3C
09/10/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20181009T080154_20181009T080221_024056_02A101_DEC0
21/10/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20181021T080154_20181021T080221_024231_02A6B3_47B9
02/11/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20181102T080154_20181102T080221_024406_02AC77_BD56
14/11/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20181114T080154_20181114T080221_024581_02B2E2_9054
26/11/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20181126T080153_20181126T080220_024756_02B951_18C8
08/12/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20181208T080153_20181208T080220_024931_02BF29_A3A1
20/12/2018	S1A_IW_SLC__1SDV_20181220T080153_20181220T080220_025106_02C57E_AC44
01/01/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190101T080152_20190101T080219_025281_02CBD4_F788
13/01/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190113T080152_20190113T080219_025456_02D21C_F448
25/01/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190125T080151_20190125T080218_025631_02D881_F89A
06/02/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190206T080151_20190206T080218_025806_02DEC7_8C43
18/02/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190218T080151_20190218T080218_025981_02E507_452F
02/03/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190302T080151_20190302T080218_026156_02EB4F_21AF
14/03/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190314T080151_20190314T080218_026331_02F1B2_7ED5
26/03/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190326T080151_20190326T080218_026506_02F820_BAE9
07/04/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190407T080151_20190407T080218_026681_02FE93_C691
19/04/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190419T080152_20190419T080219_026856_0304ED_A0B4
01/05/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190501T080152_20190501T080219_027031_030B4A_EA31
13/05/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190513T080153_20190513T080220_027206_03112B_9EB7
06/06/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190606T080154_20190606T080221_027556_031C09_6A34
18/06/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190618T080154_20190618T080221_027731_032150_DF22
12/07/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190712T080156_20190712T080223_028081_032BD7_8DBF
24/07/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190724T080157_20190724T080224_028256_033120_5351
05/08/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190805T080158_20190805T080225_028431_03367A_BB1E
17/08/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190817T080158_20190817T080225_028606_033C61_C1D2
29/08/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190829T080159_20190829T080226_028781_034285_6B4F
10/09/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20190910T080159_20190910T080226_028956_03489C_447E
22/09/2017	S1A_IW_SLC__1SDV_20190922T080200_20190922T080227_029131_034E91_4949
04/10/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20191004T080200_20191004T080227_029306_035497_68C2
16/10/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20191016T080200_20191016T080227_029481_035AA2_9FBB
28/10/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20191028T080200_20191028T080227_029656_0360A7_828D
21/11/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20191121T080200_20191121T080227_030006_036CE3_EAF9

Tabela – Dados SAR do Sentinel-1

(conclusão)

<b>Data</b>	<b>Informação</b>
03/12/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20191203T080200_20191203T080227_030181_0372F5_C416
15/12/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20191215T080159_20191215T080226_030356_037902_BD8D
27/12/2019	S1A_IW_SLC__1SDV_20191227T080159_20191227T080226_030531_037F0B_2135
08/01/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200108T080158_20200108T080225_030706_03851A_A4FA
20/01/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200120T080158_20200120T080225_030881_038B3F_A7CC
01/02/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200201T080157_20200201T080224_031056_03915B_8BE5
13/02/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200213T080157_20200213T080224_031231_03976E_CB1B
25/02/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200225T080157_20200225T080224_031406_039D78_ED0F
08/03/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200308T080157_20200308T080224_031581_03A383_0DF9
20/03/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200320T080157_20200320T080224_031756_03A9A4_9998
01/04/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200401T080157_20200401T080224_031931_03AFCE_4D82
13/04/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200413T080158_20200413T080225_032106_03B5F9_664E
25/04/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200425T080158_20200425T080225_032281_03BC1C_A1D4
07/05/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200507T080159_20200507T080226_032456_03C22F_8E51
31/05/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200531T080200_20200531T080227_032806_03CCC9_9E39
12/06/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200612T080201_20200612T080228_032981_03D1F6_D3E3
24/06/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200624T080202_20200624T080229_033156_03D74B_5D7C
06/07/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200706T080202_20200706T080229_033331_03DC95_1C40
18/07/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200718T080203_20200718T080230_033506_03E1F0_C648
30/07/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200730T080204_20200730T080231_033681_03E74E_CD9C
11/08/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200811T080205_20200811T080231_033856_03ED0C_904C
23/08/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200823T080205_20200823T080232_034031_03F334_ACCD
04/09/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200904T080206_20200904T080233_034206_03F95B_75DC
16/09/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200916T080206_20200916T080233_034381_03FF84_819D
28/09/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20200928T080207_20200928T080234_034556_0405B5_9F98
10/10/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20201010T080207_20201010T080234_034731_040BD5_F3EF
22/10/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20201022T080207_20201022T080234_034906_0411E7_5158
03/11/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20201103T080207_20201103T080234_035081_0417F0_ADAC
15/11/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20201115T080207_20201115T080234_035256_041E0C_5FB5
27/11/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20201127T080206_20201127T080233_035431_042415_4607
09/12/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20201209T080206_20201209T080233_035606_042A23_D07B
21/12/2020	S1A_IW_SLC__1SDV_20201221T080205_20201221T080232_035781_043024_8084
02/01/2021	S1A_IW_SLC__1SDV_20210102T080205_20210102T080232_035956_043638_OCAB
14/01/2021	S1A_IW_SLC__1SDV_20210114T080204_20210114T080231_036131_043C63_AA6F
26/01/2021	S1A_IW_SLC__1SDV_20210126T080204_20210126T080231_036306_044276_F097
07/02/2021	S1A_IW_SLC__1SDV_20210207T080203_20210207T080230_036481_044884_4040
19/02/2021	S1A_IW_SLC__1SDV_20210219T080203_20210219T080230_036656_044EA3_19CB
03/03/2021	S1A_IW_SLC__1SDV_20210303T080203_20210303T080230_036831_0454B0_06D6
15/03/2021	S1A_IW_SLC__1SDV_20210315T080203_20210315T080230_037006_045ACB_4103
27/03/2021	S1A_IW_SLC__1SDV_20210327T080203_20210327T080230_037181_0460D9_6177
08/04/2021	S1A_IW_SLC__1SDV_20210408T080204_20210408T080230_037356_0466E0_3DC4

Fonte: ESA.

**APÊNDICE B – IMAGENS SAR DO SATÉLITE COSMO-SKYMED**

Tabela – Dados SAR do COSMO-SkyMed

(continua)

<b>Data</b>	<b>Informação</b>
06/07/2011	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20110706082848_20110706082855
19/08/2011	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20110819082822_20110819082830
16/09/2011	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20110916082805_20110916082813
18/10/2011	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20111018082747_20111018082755
19/11/2011	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20111119082729_20111119082736
21/12/2011	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20111221082713_20111221082720
14/01/2012	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20120114082700_20120114082707
15/02/2012	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20120215082641_20120215082648
11/03/2012	CSKS3_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20120311082628_20120311082635
19/04/2012	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20120419082608_20120419082616
17/05/2012	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20120517082553_20120517082601
18/06/2012	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20120618082536_20120618082543
17/07/2012	CSKS3_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20120717082517_20120717082525
17/08/2012	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20120817082503_20120817082510
18/09/2012	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20120918082449_20120918082456
20/10/2012	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20121020082435_20121020082442
13/11/2012	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20121113082424_20121113082432
23/12/2012	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20121223082402_20121223082410
12/01/2013	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20130112082353_20130112082400
17/02/2013	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20130217082338_20130217082345
17/03/2013	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20130317082323_20130317082330
18/04/2013	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20130418082311_20130418082319
17/05/2013	CSKS3_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20130517082259_20130517082306
17/06/2013	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20130617082245_20130617082253
19/07/2013	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20130719082232_20130719082240
20/08/2013	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20130820082221_20130820082229
09/09/2013	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20130909082214_20130909082222
15/10/2013	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20131015082202_20131015082210
16/11/2013	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20131116082148_20131116082156
18/12/2013	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20131218082137_20131218082145
19/01/2014	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20140119082128_20140119082136
16/02/2014	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20140216082117_20140216082124
16/03/2014	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20140316082109_20140316082117
17/04/2014	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20140417082102_20140417082109
19/05/2014	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20140519082053_20140519082101
12/06/2014	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20140612082048_20140612082056
14/07/2014	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20140714082036_20140714082044
15/08/2014	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20140815082029_20140815082036
16/09/2014	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20140916082022_20140916082030
10/10/2014	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20141010082017_20141010082024
15/11/2014	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20141115082009_20141115082016
17/12/2014	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20141217082003_20141217082011
14/01/2015	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20150114082000_20150114082008
15/02/2015	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20150215081952_20150215082000
19/03/2015	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20150319081950_20150319081958
12/04/2015	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20150412081944_20150412081952
14/05/2015	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20150514081944_20150514081951

Tabela – Dados SAR do COSMO-SkyMed

(continuação)

<b>Data</b>	<b>Informação</b>
15/06/2015	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20150615081941_20150615081948
13/07/2015	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20150713081933_20150713081941
14/08/2015	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20150814081931_20150814081939
15/09/2015	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20150915081929_20150915081937
13/10/2015	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20151013081930_20151013081938
18/11/2015	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20151118081926_20151118081933
16/12/2015	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20151216081921_20151216081928
17/01/2016	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20160117081913_20160117081921
05/03/2016	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20160305081901_20160305081909
10/04/2016	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20160410081855_20160410081903
12/05/2016	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20160512081844_20160512081852
13/06/2016	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20160613081827_20160613081835
15/07/2016	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20160715081817_20160715081824
12/08/2016	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_FF_20160812081804_20160812081811
13/09/2016	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20160913081751_20160913081759
15/10/2016	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20161015081744_20161015081751
16/11/2016	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20161116081736_20161116081744
18/12/2016	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20161218081721_20161218081729
11/01/2017	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20170111081713_20170111081721
12/02/2017	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20170212081704_20170212081711
16/03/2017	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20170316081656_20170316081704
17/04/2017	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20170417081650_20170417081657
15/05/2017	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20170515081644_20170515081652
12/06/2017	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20170612081638_20170612081646
14/07/2017	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20170714081635_20170714081642
15/08/2017	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20170815081633_20170815081641
16/09/2017	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20170916081635_20170916081643
18/10/2017	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20171018081636_20171018081644
19/11/2017	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20171119081640_20171119081648
13/12/2017	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20171213081638_20171213081646
14/01/2018	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20180114081643_20180114081650
15/02/2018	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20180215081644_20180215081652
19/03/2018	CSKS1_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20180319081648_20180319081656
16/04/2018	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20180416081653_20180416081700
18/05/2018	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20180518081656_20180518081703
19/06/2018	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20180619081702_20180619081710
17/07/2018	CSKS2_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20180717081706_20180717081714
22/08/2018	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20180822081703_20180822081711
23/09/2018	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20180923081707_20180923081715
10/11/2018	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20181110081713_20181110081721
12/12/2018	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_FF_20181212081710_20181212081718
13/01/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20190113081711_20190113081718
14/02/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20190214081710_20190214081718
18/03/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20190318081713_20190318081720
03/04/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20190403081715_20190403081723
05/05/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20190505081715_20190505081723
01/06/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_FF_20190601081717_20190601081725

Tabela – Dados SAR do COSMO-SkyMed

(conclusão)

<b>Data</b>	<b>Informação</b>
03/07/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20190703081719_20190703081726
04/08/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20190804081720_20190804081727
05/09/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20190905081724_20190905081731
07/10/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20191007081727_20191007081735
08/11/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_FF_20191108081734_20191108081741
10/12/2019	CSKS4_SCS_B_HI_0A_HH_RA_SF_20191210081733_20191210081741

Fonte: ASI.

**APÊNDICE C – IMAGENS SAR DO SATÉLITE PAZ**

Tabela – Dados SAR do PAZ ascendente

<b>Data</b>	<b>Informação</b>
24/10/2019	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20191024T203758_20191024T203805
26/11/2019	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20191126T203758_20191126T203805
29/12/2019	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20191229T203756_20191229T203803
31/01/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200131T203754_20200131T203802
09/05/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200509T203757_20200509T203804
11/06/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200611T203758_20200611T203805
14/07/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200714T203800_20200714T203807
16/08/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200816T203801_20200816T203808
18/09/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200918T203804_20200918T203811
21/10/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20201021T203805_20201021T203812
23/11/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20201123T203805_20201123T203812
26/12/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20201226T203803_20201226T203810
28/01/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20210128T203802_20210128T203809
02/03/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20210302T203801_20210302T203808
07/05/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20210507T203804_20210507T203811
09/06/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20210609T203806_20210609T203813
16/09/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20210916T203809_20210916T203816
19/10/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20211019T203811_20211019T203818
21/11/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20211121T203810_20211121T203817

Fonte: INTA.

Tabela – Dados SAR do PAZ descendente

<b>Data</b>	<b>Informação</b>
21/10/2019	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20191021T080757_20191021T080804
23/11/2019	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20191123T080756_20191123T080803
26/12/2019	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20191226T080755_20191226T080802
28/01/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200128T080754_20200128T080801
01/03/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200301T080753_20200301T080800
03/04/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200403T080755_20200403T080802
06/05/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200506T080756_20200506T080803
08/06/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200608T080758_20200608T080805
11/07/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200711T080759_20200711T080806
13/08/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200813T080800_20200813T080807
15/09/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20200915T080802_20200915T080810
18/10/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20201018T080804_20201018T080811
20/11/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20201120T080804_20201120T080811
23/12/2020	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20201223T080802_20201223T080809
25/01/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20210125T080801_20210125T080808
27/02/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20210227T080800_20210227T080807
01/04/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20210401T080802_20210401T080809
04/05/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20210504T080803_20210504T080810
06/06/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20210606T080805_20210606T080812
13/09/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20210913T080808_20210913T080815
16/10/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20211016T080809_20211016T080816
18/11/2021	PAZ1_SAR_SSC_____SM_S_SRA_20211118T080809_20211118T080816

Fonte: INTA.