

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM)

**ESTUDOS SOBRE A INSTABILIDADE
DO TERRENO NOS BAIRROS
PINHEIRO, MUTANGE E
BEBEDOURO, MACEIÓ (AL)**

Ação Emergencial no Bairro Pinheiro

Volume I
RELATÓRIO SÍNTESE DOS RESULTADOS Nº 1

Brasília, 29 abril de 2019

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Bento Albuquerque

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Alexandre Vidigal de Oliveira

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM)

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor Presidente

Esteves Pedro Colnago

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial

Antônio Carlos Bacelar Nunes

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

José Leonardo Silva Andriotti

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Fernando Pereira de Carvalho

Diretor de Administração e Finanças

Juliano de Souza Oliveira

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO
MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM)

ESTUDOS SOBRE A INSTABILIDADE
DO TERRENO NOS BAIRROS
PINHEIRO, MUTANGE E
BEBEDOURO, MACEIÓ (AL)

Volume I
RELATÓRIO SÍNTESE DOS RESULTADOS Nº 1

Volume II
RELATÓRIOS TÉCNICOS

Volume III
SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

COORDENAÇÃO INSTITUCIONAL

Antônio Carlos Bacelar Nunes

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial (DHT)

COORDENAÇÃO TÉCNICA-EXECUTIVA

Coordenador-Geral: Thales de Queiroz Sampaio

Coordenação técnica: Maria Adelaide Mansini Maia e Jorge Pimentel - Departamento de Gestão Territorial (DEGET)

Assessoria: Helion França Moreira e Ricardo Moacyr de Vasconcellos

Estudos de geologia aplicada: Sandra Fernandes da Silva - Divisão de Geologia Aplicada (DIGEAP)

Estudos de geomorfológicos e historicidade da ocupação: Marcelo Eduardo Dantas - Divisão de Gestão Territorial (DIGATE)

Estudos hidrogeológicos: Fernando Antônio Carneiro Feitosa – Departamento de Hidrologia (DEHID)

Estudos geofísicos: Luiz Gustavo Rodrigues Pinto e Lucia Maria da Costa e Silva - Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica (DISEGE)

Estudos batimétricos: Hortência Assis - Divisão de Geologia Marinha (DIGEOM)

Estudos cartográficos: Fabio Costa - Divisão de Cartografia (DICART)

Modelagem geológica em ambiente 3D: Ricardo Wosniak e Eduardo Grissolia - Divisão de Economia Mineral e Geologia Exploratória (DIEMGE)

Geoprocessamento: Denilson de Jesus - Divisão de Geoprocessamento (DIGEOP)

EQUIPE TÉCNICA

Alexandre Borba (Geólogo)

Alexandre Lago (Geólogo)

Bruce Fabini Franco Chiba (Geofísico)

Bruno Elldorf (Geólogo)

Cipriano Gomes de Oliveira (Téc. em Geociências)

Denilson de Jesus (Eng. Cartógrafo)

Eduardo Moussalle Grissolia (Geólogo)

Eugênio Pires Frazão (Geólogo)

Fábio Silva da Costa (Eng. Cartógrafo)

Fernando Antônio Carneiro Feitosa (Geólogo)

Fernando Lucio Borges Cunha (Geólogo)

Giana Grupioni Rezende (Eng. Cartógrafo)

Gilmar Pauli Dias (Geólogo)

Heródoto Goes (Geólogo)

Hortência Maria Barboza de Assis (Geóloga)

Ítalo Prata de Menezes (Geólogo)

Ivan Soares dos Santos (Téc. em Geociências)

Jairo Jamerson Correia De Andrade (Geofísico)

João Batista Freitas de Andrade (Geólogo)

Jorge Pimentel (Geólogo)

Jose Antônio da Silva (Geólogo)

Juliana Moraes (Geóloga)

Júlio Cesar Lana (Geólogo)

Larissa Flavia Montandon Silva (Geóloga)

Leandro Galvanese Kuhlmann (Geólogo)

Loury Bastos Mello (Geóloga)

Lucia Maria da Costa e Silva (Geóloga)

Luiz Antônio R. Almendra (Téc. Em Geociências)

Luiz Gustavo Rodrigues Pinto (Geofísico)

Marcelo Ambrosio Ferrassoli (Geólogo)

Marcelo de Queiroz Jorge (Geólogo)

Marcelo Eduardo Dantas (Geógrafo)

Marcio Junger Ribeiro (Téc. em Geociências)

Márcio Martins Valle (Oceanógrafo)

Maria Adelaide Mansini Maia (Geóloga)

Marília de Araújo Costa Rodrigues (Geofísica)

Nilo Costa Pedrosa Júnior (Geólogo)

Pedro Augusto dos S. Pfaltzgraff (Geólogo)

Rafael Correa de Melo (Geólogo)

Ricardo Cavalcanti Santiago (Geofísico)

Ricardo Duarte de Oliveira (Eng. Cartógrafo)

Ricardo Wosniak (Geólogo)

Roberto Gusmão de Oliveira (Geólogo)

Rodrigo Luiz Gallo Fernandes (Geólogo)

Ronaldo Gomes Bezerra (Geólogo)

Rubens Esteves Kenup (Eng. Cartógrafo)

Rubens Pereira Dias (Geólogo)

Sandra Fernandes da Silva (Geóloga)

Thales De Queiroz Sampaio (Geólogo)

Thiago Dutra Dos Santos (Geólogo)

Tiago Antonelli (Geólogo)

Vanildo Almeida Mendes (Geólogo)

Victor Augusto Hilquias Silva Alves (Geólogo)

ASSESSORIA DE COMUNICAÇÃO

Warley Aparecido Pereira (Jornalista)

Letícia de Barros Alves Peixoto (Jornalista)

Pedro Henrique Pereira dos Santos (Comunicador Organizacional)

ASSESSORIA JURÍDICA

Vilmar Medeiros Simões (Consultor Jurídico)

COLABORAÇÃO E AGRADECIMENTOS

Prof. Dr. Aderson Farias do Nascimento – Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Prof. Dr. André Etienne Ferraz – Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. André Ferrari – Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Emanuel Jardim de Sá – Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Guilherme Estrela – Ex-diretor de Exploração e Produção da Petrobras

Prof. Dr. Luiz Antônio Pierantonni Gamboa – Universidade Federal Fluminense - UFF

Ricardo Latgé Milwart de Azevedo – Conselho-Diretor do Clube de Eng. e Conselheiro do CREA-RJ

Prof. M.Sc. Abel Galindo Marques – Universidade Federal de Alagoas - UFAL

Profa. Dra. Regla Toujaguez La Rosa Massahud – Universidade Federal de Alagoas - UFAL

Governo do Estado de Alagoas

Prefeitura de Maceió

Defesa Civil Nacional

Defesa Civil do Estado de Alagoas

Defesa Civil de Maceió

59° Batalhão de Infantaria Motorizada

USGS – U.S. Geological Survey

APOIO CPRM

Coordenação de Eventos e Cerimonial – DIG

Departamento de Gestão Territorial – DEGET

Departamento de Hidrologia – DEHID

Departamento de Administração de Material e Patrimônio – DEAMP

Departamento de Contabilidade, Orçamento e Finanças – DECOF

Departamento de Informações Institucionais – DEINF

Divisão de Editoração Geral – DIEDIG

Divisão de Gestão Territorial – DIGATE

Divisão de Geologia Aplicada – DIGEAP

Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica – DISEGE

Divisão de Geologia Marinha – DIGEOM

Divisão de Economia Mineral e Geologia Exploratória – DIEMGE

Divisão de Geoprocessamento – DIGEOP

Divisão de Cartografia – DICART

Divisão de Informática – DIINFO

Superintendência Regional de Belém

Superintendência Regional de Belo Horizonte

Superintendência Regional de Manaus

Superintendência Regional de Recife

Superintendência Regional de Salvador

Amaro Luiz Ferreira, geólogo (Assimetria de Bacias)

Daniel Moreira, eng. cartógrafo (Análise Interferométrica)

Dario Dias Peixoto, geólogo (Mediação Científica)

Hiran Silva Dias, analista de sistemas (Análise Interferométrica)

Patrícia Durringer Jacques, geóloga (Assimetria de Bacias)

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E HISTÓRICO DAS AÇÕES	9
1.2. O PAPEL DO SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL NO CONTEXTO	9
1.3. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO E DO USO E OCUPAÇÃO	10
1.3.1. ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS.....	10
1.3.2. Uso e ocupação dos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro	11
1.4. HIPÓTESES DE INVESTIGAÇÃO	12
2. ESTUDOS REALIZADOS	12
2.1. MÉTODOS INVESTIGATIVOS.....	13
3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	14
3.1. ATUALIZAÇÃO DO MAPA DE FEIÇÕES DE INSTABILIDADE DO TERRENO.....	14
3.2. ASPECTOS GEOLÓGICOS	16
3.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE A MORFOLOGIA DO SÍTIO URBANO DOS BAIROS PINHEIRO, MUTANGE E BEBEDOURO.....	16
3.4. LEVANTAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	17
3.5. LEVANTAMENTO INTERFEROMÉTRICO.....	18
3.6. MÉTODOS GEOFÍSICOS	22
3.6.1. Radar de penetração no solo ou georradar (GPR)	22
3.6.2. Eletroresistividade	22
3.6.3. Audiomagnetotelúrico	23
3.6.4. Gravimetria	25
3.6.5. Batimetria.....	26
3.7. SISMOLOGIA	28
3.8. HIDROGEOLOGIA.....	31
3.9. ANÁLISE DOS SONARES.....	32
3.10. INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS E DE EXTRAÇÃO DE SAL EM AMBIENTE 3D	33
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
5. CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS.....	40
APÊNDICES.....	41

ESTUDOS SOBRE A INSTABILIDADE DO TERRENO NOS BAIRROS PINHEIRO, MUTANGE E BEBEDOURO, MACEIÓ (AL)

Volume I
RELATÓRIO SÍNTESE DOS RESULTADOS Nº 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do problema e histórico das ações

Historicamente, o bairro do Pinheiro, localizado no município de Maceió (AL), vem apresentando inúmeras rachaduras e afundamentos em moradias e vias públicas. Esses fenômenos se intensificaram após as fortes chuvas de verão, ocorridas em 15 de fevereiro de 2018, e o abalo sísmico de magnitude 2,4mR (escala de magnitude regional para o Brasil), no dia 3 de março de 2018, nessa região.

O evento produziu danos significativos, como fissuras, trincas e rachaduras em edificações, ruas e passeios em uma área expressiva do bairro, inclusive com a interdição de diversas moradias. Em decorrência, foi solicitada, então, por meio dos ofícios nº 044/2018 – CEDEC-AL e nº 34/2018 – PJC/MPE/AL, a presença de técnicos do Serviço Geológico do Brasil-CPRM (SGB-CPRM), com a finalidade de auxiliar nas atividades de pesquisa que possam levar ao entendimento das causas do fenômeno responsável pelos danos gerados a alguns imóveis e vias públicas localizadas inicialmente no Bairro Pinheiro e bairros vizinhos como Mutange e Bebedouro.

1.2. O papel do Serviço Geológico do Brasil no contexto

Considerando o exercício das suas atividades, e em atenção à determinação presidencial e à Portaria Nº 20, de 11 de janeiro de 2019, do Ministério de Minas e Energia (MME), que fixam orientações e diretrizes referentes ao trabalho do Serviço Geológico Brasileiro (CPRM) para a identificação das causas de instabilidade geológica no bairro Pinheiro em Maceió (AL), o presente documento traz os resultados obtidos até a presente data pelos diversos métodos investigativos realizados pela CPRM no período de junho de 2018 a abril de 2019.

Foi estabelecido um cronograma de trabalho com aplicação de metodologias voltadas para a elucidação do caso. Os resultados do trabalho estão organizados em três volumes:

Volume I - Relatório Síntese dos Resultados Nº 1;

Volume II - Relatórios Técnicos;

Volume III - Sistema de Informações Geográficas.

É importante ressaltar que este Relatório de Resultados e demais produtos técnicos poderão ser substituídos por subsequentes, a partir da conclusão e incorporação de novos estudos necessários ao entendimento dos fatores desencadeadores dos processos geológicos na região do bairro Pinheiro. Este relatório foi escrito com pormenores sobre a metodologia utilizada, para responder à portaria MME n° 20, de 2019, no que se refere à designação ao Serviço Geológico do Brasil a fim de elucidar as causas do fenômeno.

1.3. Caracterização do meio físico e do uso e ocupação

1.3.1. Aspectos geológicos e geomorfológicos

Do ponto de vista geológico a área está inserida dentro do contexto das bacias sedimentares da margem continental brasileira, mais especificamente na Bacia Sergipe-Alagoas (Sub-bacia Alagoas), originada há 150 milhões de anos, em decorrência da separação entre os atuais continentes africano e sul-americano e consequente formação do oceano Atlântico.

De modo geral, a Bacia Sergipe-Alagoas subdivide-se em blocos ou compartimentos tectônicos, limitados por grandes falhas. O rifte da bacia, em escala regional, está localizado sob grandes blocos antitéticos basculados e limitados por falhas sintéticas normais, compatível com modelos evolutivos que assumem movimentos predominantemente distensivos durante a gênese do rifteamento, que afetou esta entidade tectônica (Van der Vem, 1987; Lana, 1990 *apud* Mendes *et al.* 2017).

Segundo Feijó (1994), a deposição da Bacia Alagoas sobre o embasamento iniciou-se no período Neopaleozóico, quando foram depositadas as formações Batinga e Aracaré do Grupo Igreja Nova. Sobrepostas a estas, foram depositadas as rochas clásticas flúvio-lacustres neojurássicas e eocretáceas pertencentes ao Grupo Perucaba, composto pelas formações Candeeiro, Bananeiras e Serraria.

No período Cretáceo foram depositados os sedimentos clásticos e evaporíticos do Grupo Coruripe (Formações Barra de Itiúba, Penedo, Coqueiro Seco, Poção, Ponta Verde e Maceió), caracterizados pelas rápidas variações de fácies, correspondentes aproximadamente às fases rift e transicional das bacias de Sergipe e Alagoas. Sobrepostas a estas, foram depositadas as rochas carbonáticas de origem marinha do Grupo Sergipe, compostas pelas formações Riachuelo e Cotinguiba no período albiano-cenomaniano. Durante os períodos neocretáceo e terciário foram depositados os sedimentos clásticos e carbonáticos de origem marinha do Grupo Piaçabuçu,

composto pelas formações Calumbi, Mosqueiro e Marituba. No período neocenoico foram depositados os sedimentos clásticos continentais finos e grossos do Grupo Barreiras.

Na região metropolitana de Maceió afloram apenas rochas do Grupo Barreiras, compostas por clásticos continentais finos e grossos, de coloração variada e grau de compactação insignificante (Schaller, 1969). Em Maceió afloram arenitos quartzosos com intercalações de argilas arenosas e conglomeráticos.

Do ponto de vista geomorfológico, o bairro do Pinheiro ocupa a superfície aplainada do topo do tabuleiro, em cotas que variam entre 42 e 55 metros de altitude, à exceção de áreas abaciadas naturalmente suscetíveis à inundação. O Mutange localiza-se na superfície de alta declividade da falésia que se estende paralelamente à borda da lagoa e em parte da planície fluviolagunar situada entre o pé da escarpa e a borda da lagoa. O Bebedouro assenta-se na região situada a noroeste do Pinheiro e do Mutange, entre o tabuleiro e a planície fluviolagunar revestida por manguezais, margeando a lagoa Mundaú, estando suscetível à ocorrência de inundações, em especial, durante a combinação de chuvas intensas na bacia do rio Mundaú com períodos de maré alta.

1.3.2. Uso e ocupação dos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro

O município de Maceió abrange uma área de 509,5km² e uma população que atingiu recentemente a marca de 1 milhão de habitantes (IBGE, 2018). Maceió é a capital de Alagoas, o segundo menor estado da Federação Brasileira e representa o 32º maior PIB municipal do país (IBGE, 2015).

Atualmente, Maceió é subdividido em 50 bairros, sendo o Pinheiro o 17º mais populoso (19.062 habitantes), Bebedouro o 29º (10.103hab.) e Mutange o 46º (2.632hab.) (IBGE -2010). O bairro do Pinheiro é predominantemente residencial com uma população diversificada e uma clara tendência a um padrão de renda mais elevado. Este bairro oferece comércio e serviços mais variados, em especial, na Avenida Fernandes Lima, um dos mais importantes eixos viários de Maceió. Os bairros do Bebedouro e do Mutange, por sua vez, apresentam predomínio de uma população com baixo poder aquisitivo e um comércio simples voltado para as necessidades básicas da comunidade local.

A economia é voltada principalmente para o comércio e o setor de serviços, no qual o turismo se destaca como uma importante fonte de renda. No setor industrial, Maceió conta com uma planta de cloro-soda e seus derivados, fábricas de alimentos, equipamentos eletromecânicos, além da indústria de açúcar e álcool, responsável por grande parte da movimentação do Porto de Maceió, atingindo 2,7 milhões de toneladas em 2002, dos quais 2 milhões para exportação (Porto de Maceió, 2002). No setor mineral se destacam a extração de sal-gema, água mineral, produção de petróleo e gás, como também, unidades de beneficiamento de rochas ornamentais.

1.4. Hipóteses de investigação

Considerando o contexto geológico e geomorfológico da região, associado à ocupação desordenada e a presença de aproveitamento mineral em área urbana, estabeleceu-se as seguintes hipóteses de investigação:

Hipótese 1: Características geotécnicas dos solos da região e forma de ocupação do bairro;

Hipótese 2: Presença de vazios (cavidades, cavernas) no solo e subsolo da região decorrente de causas naturais ou de ações antrópicas;

Hipótese 3: Estruturas/feições tectônicas ativas na região (falhas, descontinuidades, por exemplo);

Hipótese 4: Exploração de água subterrânea.

2. ESTUDOS REALIZADOS

A fase de caracterização do fenômeno em campo ocorreu em junho de 2018, com a elaboração do mapa de feições de instabilidade do terreno, que foi atualizado em setembro de 2018 e março de 2019. Ainda em 2018 foram realizadas ações de apoio técnico à Defesa Civil de Maceió e participação em reuniões nos mais diversos órgãos municipais, estaduais e federais.

Os trabalhos de investigação geológica-geotécnica, geofísica e hidrogeológica, ocorreram após a liberação de recursos, em outubro de 2018, o que possibilitou a adoção de medidas administrativas necessárias para compra de equipamentos e contratações de serviços (APÊNDICE A).

Em 2019 os trabalhos foram reiniciados em 7 de janeiro de 2019. Na presente data todas atividades de campo foram concluídas à exceção da instalação da rede de monitoramento de água subterrânea, com previsão de término em agosto deste ano.

O cronograma das atividades está disponibilizado no seguinte endereço: <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Prevencao-de-Desastres-Naturais/Cronograma-de-Estudos-do-Servico-Geologico-do-Brasil---CPRM-no-Bairro-Pinheiro-5504.html>.

2.1.Métodos investigativos

Para cada hipótese formulada foram propostos métodos investigativos diretos e indiretos, considerando a urgência nas respostas com vistas a salvaguardar a população, a fragilidade do terreno e os aspectos socioeconômicos (Quadro 1). Os resultados sintetizados são apresentados no capítulo 3 deste volume, enquanto a descrição dos métodos utilizados e análise detalhada dos dados serão apresentados no Volume II - Relatórios Técnicos. A localização dos levantamentos realizados no bairro pode ser consultada no Apêndice A deste volume.

Quadro 1 – Métodos investigativos utilizados no estudo.

Método (profundidade de investigação)	Caracterização do problema / Apoio	Hipóteses			
		1 ^a	2 ^b	3 ^c	4 ^d
Leitura bibliográfica, levantamento dos dados preexistentes e organização em SIG	x				
Elaboração e Atualização do Mapa de Feições de Instabilidade do Terreno (superficial)	x				
Levantamento interferométrico (superficial)	x				
Levantamento cartográfico (superficial)	x				
Levantamento geológico e estrutural (superficial)			x	x	
Levantamento geomorfológico e do histórico de ocupação do bairro (superficial)	x	x			
Levantamento geológico - geotécnico (até 20 m)	x	x	x	x	
Geofísica – método GPR: dentro de residências e em vias públicas (até 6 m)	x	x			
Geofísica – batimetria na Lagoa Mundaú (até 10 m)				x	
Geofísica – método da eletrorresistividade (até 150 m)			x	x	
Geofísica – método gravimétrico (até 1.200 m)			x	x	
Geofísica – método audiomagnetotelúrico (até 1.500 m)			x	x	
Geofísica – sismologia (até 1.000 m)				x	

Análise dos perfis estratigráficos e sísmicos (até 1300 m)			X	X	
Análise dos sonares (em torno de 1.000 m)			X		
Monitoramento de aquíferos (até 130 m)					X
Modelagem 3 D	X				

a Hipótese 1: Características geotécnicas dos solos da região e forma de ocupação do bairro.

b Hipótese 2: Presença de vazios (cavidades, cavernas) no solo e subsolo da região decorrente de causas naturais ou de ações antrópicas.

c Hipótese 3: Estruturas/feições tectônicas ativas na região (falhas, descontinuidades, por exemplo).

d Hipótese 4: Exploração de água subterrânea.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Atualização do mapa de feições de instabilidade do terreno

Estudo voltado para a identificação, caracterização e cartografia das principais feições produzidas pelo processo de instabilidade do terreno. Importante destacar que não se trata de um mapa de risco e nem um documento voltado para a análise da condição estrutural das residências.

O mapa tem o intuito de embasar a continuidade dos estudos que busquem a identificação das causas desse fenômeno e também de nortear os trabalhos de Defesa Civil, tais como, campanhas de esclarecimento, monitoramento e até interdições. Objetiva ainda apontar as áreas prioritárias para avaliação da equipe de engenharia sobre as condições estruturais das edificações (APÊNDICE B).

Os levantamentos efetuados em campo e a integração dos dados em escritório destacaram o seguinte:

- a. presença de três zonas distintas na área afetada de acordo com a intensidade de atingimento, dado pela quantidade, abertura e persistência das trincas e rachaduras mapeadas;
- b. as três zonas foram distinguidas em alto, médio e baixo grau de intensidade e estão representadas no mapa de feições de instabilidade do terreno (APÊNDICE B), com as devidas atualizações provenientes da terceira etapa de campo – fevereiro e março de 2019;
- c. áreas com alto grau de intensidade de feições de instabilização: direção N-S predominantemente, direção que coincide com a fenda que surgiu em 2010 no condomínio Jardim Acácia. Há ainda várias trincas secundárias com direção NE-SW;
- d. médio grau de intensidade de feições de instabilização do terreno: fissuras e trincas com direção principal NNW-SSE e direção N-S. De maneira subordinada à direção principal ocorre também a direção NE-SW. As fissuras e

- trincas estão presentes nas paredes e muros, apresentam persistência de mais de 1 metro de comprimento e abertura milimétrica;
- e. baixo grau de intensidade de feições de instabilização do terreno: fissuras e trincas com direção principal NNW-SSE. As fissuras e trincas verticais presentes nos muros e paredes, normalmente são coincidentes nos dois lados da rua e se repetem em faixa de aproximadamente 50 metros ao longo dos quarteirões. Apresentam persistência maior que 1 metro e abertura milimétrica;
- f. em comparação ao mapeamento realizado em setembro de 2018, foram observadas novas áreas com sinais de instabilidade do terreno (deformações em imóveis);
- g. conforme depoimentos colhidos dos moradores locais e relatos da própria Defesa Civil Municipal, a existência de instabilidade no terreno do bairro Pinheiro é muito anterior ao abalo sísmico ocorrido no dia 3 de março de 2018, com relatos de ocorrência de trincas nas edificações há mais de 10 anos, o que aponta para deformação ativa (figura 1).

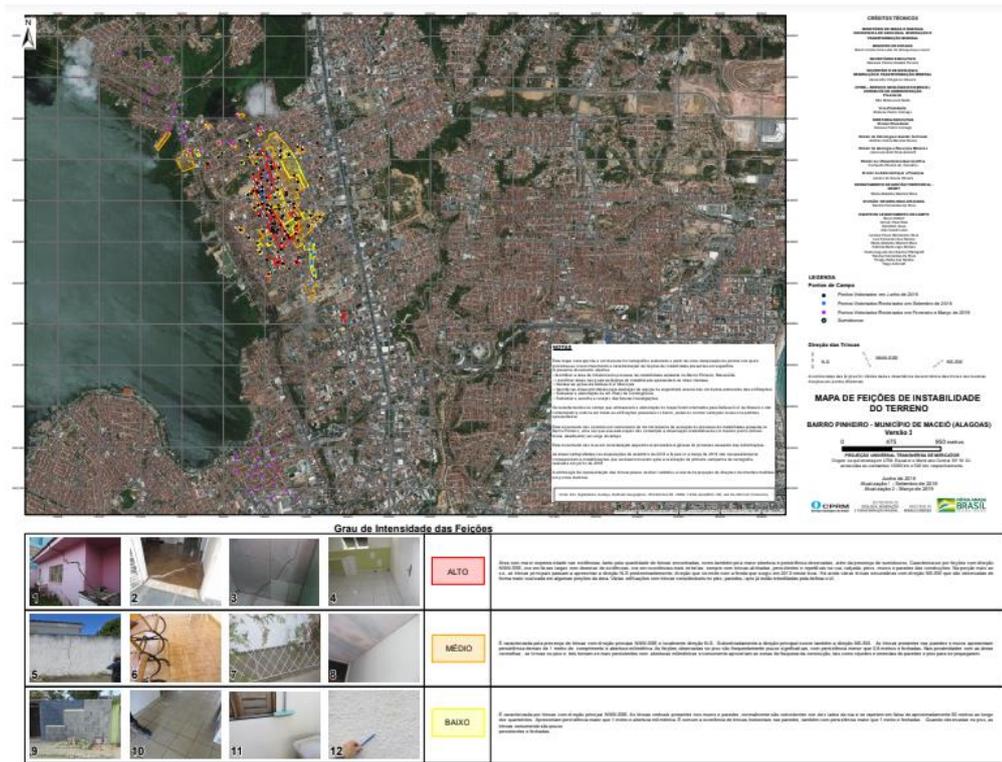


Figura 1: Mapa de Feições de Instabilidade do Terreno (terceira atualização).

3.2. Aspectos geológicos

Quanto à caracterização do bairro do Pinheiro foi construído sobre rochas pouco consolidadas do Grupo Barreiras, constituídas basicamente de silte, areia e argila, tendo níveis de concreções de ferro e conglomeráticos, com a disposição das camadas de forma irregular, sendo, muitas vezes, lenticulares, com diversas feições deposicionais. As litologias do Grupo Barreiras são cortadas por diversas estruturas geológicas representadas por falhas, fraturas e outras descontinuidades de direções NW, NE e NS, e mergulhos verticalizados coincidentes com as atitudes estruturais regionais.

3.3. Considerações sobre a morfologia do sítio urbano dos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro

O bairro Pinheiro possui três zonas de abaciamento (nas imediações da Igreja Menino Jesus de Praga, Conjunto Jardim das Acácias e Instituto Educacional do CEPA) que no passado retinham água de chuva por cerca de 15 dias. Com a urbanização essas bacias foram aterradas, cedendo lugar a habitações com rede de drenagem ineficiente e ausência de rede coletora de esgotos.

Atualmente, em decorrência dos processos de deformação rúptil, existe um aumento da permeabilidade que promove a infiltração da água da chuva no terreno em menos de 20 minutos.

Este processo, devido aos seus efeitos erosivos, provoca a aceleração da instabilidade do terreno (Figura 2).

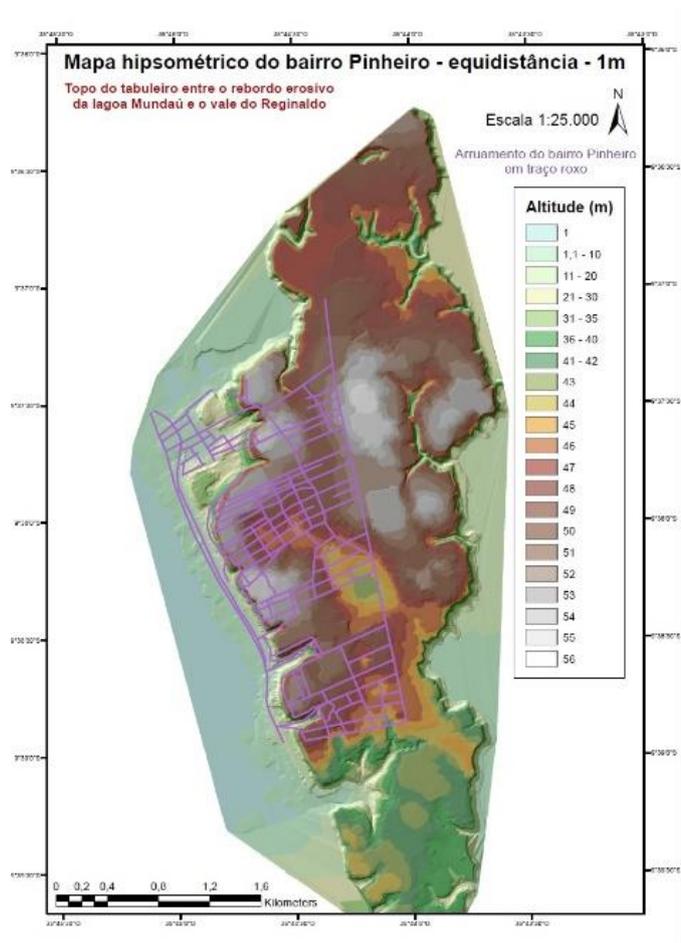


Figura 2: Mapa hipsométrico do topo do tabuleiro onde se assenta o bairro Pinheiro, com destaque para as áreas abaciadas, abaixo da cota 46 metros, em colorações verde, amarelo e laranja.

3.4. Levantamento geológico-geotécnico

Os estudos foram desenvolvidos com o objetivo de identificar as características das camadas de solo e sedimentos que compõem o terreno em profundidade até 20m. Para isso, houve a identificação tátil-visual das amostras e três análises complementares em laboratórios, as quais indicaram limite de liquidez, limite de plasticidade e a difração de raio X.

As análises de caracterização geotécnica efetuadas em oito pontos do bairro Pinheiro indicam que até cerca de 20 metros de profundidade, associado ao mapeamento das feições geológicas em superfícies permitiram as seguintes afirmações:

- a. o solo é constituído por camadas de sedimentos detríticos siliciclásticos, de granulometria silto-arenosa, compostos principalmente por caulinita, goethita e quartzo. Esses sedimentos apresentam mediana plasticidade e compressibilidade e são medianamente compactos até cerca de 6,5 metros de profundidade, a partir de onde se tornam compactos. É possível que existam variações pontuais nas características geotécnicas do terreno que não foram identificadas nesse estudo;
- b. análise geotécnica das estruturas: análises estruturais em afloramentos mostram direção preferencial para NW e, secundariamente, para NE, com predomínio de mergulho subvertical a vertical; destaca-se ainda a ocorrência do N-S, onde se observa uma maior ocorrência de erosão superficial, como o que ocorreu no condomínio Acácia em 2010 e atualmente nas proximidades do condomínio Divaldo Suruagy. Essas direções coincidem com a orientação de estruturas rúpteis mapeadas no bairro Pinheiro e adjacências;
- c. essa concordância entre as medidas estruturais nos maciços rochosos com as medidas em trincas e rachaduras identificadas no mapa de feições sugere um controle estrutural do substrato onde está assentado não somente o bairro Pinheiro, mas o município de Maceió. Esse controle estrutural também é observado nas redes de drenagem e tem importante papel na circulação das águas subterrâneas;
- d. a ocorrência de fraturamentos nas rochas do Grupo Barreiras evidencia eventos neotectônicos. No entanto, nos afloramentos visitados não ficaram evidenciados sinais de movimentação recente, ou seja, foi notada uma ausência de tectônica ativa ou reativação de falhamentos. O cruzamento entre planos de fraturamentos confere ao maciço, que naturalmente apresenta alta

erodibilidade, um eficiente caminho para infiltração das águas superficiais, com lixiviação e carreamento de material, principalmente nos planos de fraturas mais abertas, onde processos erosivos já se encontram atuantes. Esses processos podem ser destrutivos, e evoluir, significativamente, em apenas um evento chuvoso com precipitações elevadas, dentro de um curto intervalo de tempo (Figura 3).

a



b



c

Figura 3: a) exemplo do faturamento intenso em camadas mais argilosa; b) ravinamentos devido à infiltração de água superficial nos planos de fratura; c) desenvolvimento erosivo de trinca N-S no entorno do condomínio Divaldo Suruagy.

Todos os afloramentos visitados possuem características geológico-geotécnicas típicas do Grupo Barreiras, ressaltando a presença de fraturamento e sua fragilidade à erosão. Tal característica, por terem uma abrangência regional, também presentes em outros bairros de Maceió, não poderia por si só explicar o fenômeno na região do Pinheiro, Mutange e Bebedouro.

3.5. Levantamento interferométrico

Estudo baseado em imagens de satélite (radar via satélite) com o objetivo de apontar as áreas com deformação do terreno e sua velocidade de deformação com alta precisão de resultado. Este método é bastante utilizado para detectar movimentação

milimétrica de terrenos, principalmente em problemas de subsidência relacionados com a elevada exploração de água subterrânea.

Contratou-se, para tanto, a empresa TELESPAZIO, altamente especializada nesse tipo de mapeamento, cuja análise dos dados permite afirmar que:

- a. as imagens de satélite obtidas de abril de 2016 a dezembro de 2018 permitiram delimitar novas áreas instáveis, impossíveis de serem detectadas em levantamento de campo tradicionais;
- b. os dados interpretados em março de 2019 mostram que houve subsidência contínua e em aceleração até o fim do período amostrado;
- c. é possível observar deformação radial se espalhando do centro da área, onde atinge 40 cm de subsidência (afundamento) a partir das cavidades de extração de sal-gema localizadas à margem da Lagoa Mundaú (Figuras 4 e 5);

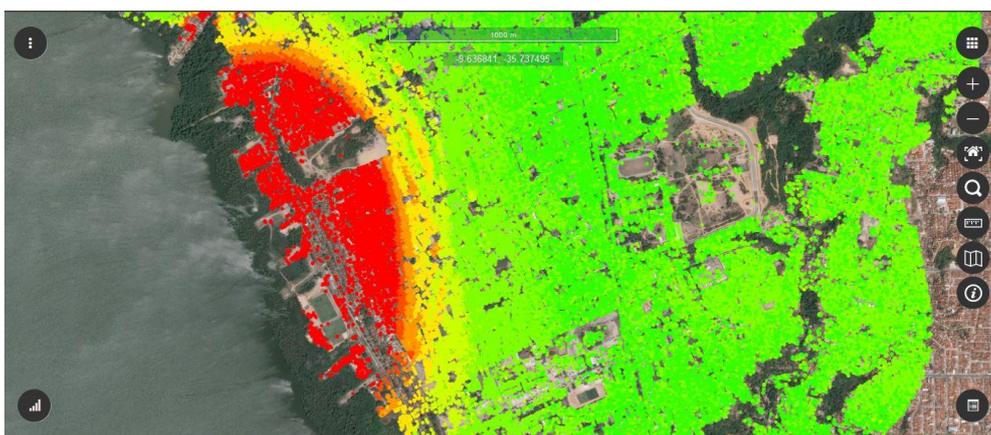


Figura 4: Mapa interferométrico.

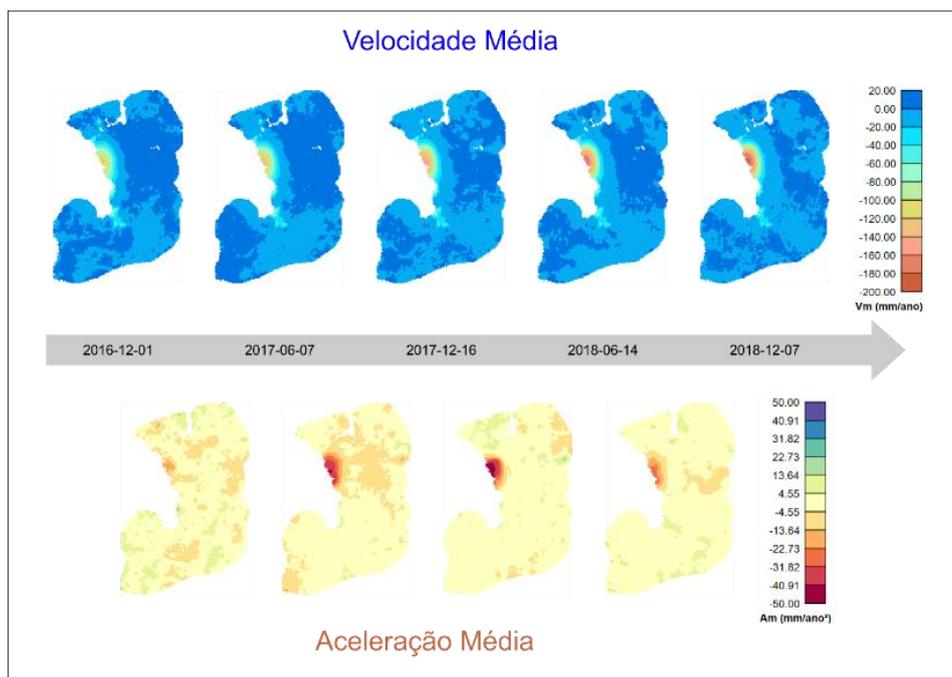


Figura 5: Evolução de velocidade e aceleração com intervalo semestral (aproximadamente).

- d. os dados de interferometria, associados às feições vistas no terreno, corroboram com o modelo para a área do bairro do Pinheiro e adjacências, no qual o foco catalizador dos processos de abatimento é provocado por alívio de pressão litostática, localizado em profundidade e sobre o qual estão concentrados os trechos de maior subsidência do terreno, às margens leste da Lagoa Mundaú. A hipótese está relacionada à presença de camadas de rocha sub-horizontais próximas (Grupo Barreiras) a este “núcleo” que são abatidas por gravidade, provocando tração em outros pontos da superfície e conseqüentemente, o rompimento da mesma (Figura 6). Isto explicaria o fato dos trechos mais afetados por rachaduras não estarem localizados nos pontos de maior movimentação registrados na interferometria;
- e. a deformação mais significativa atingiu os seguintes bairros: Pinheiro, Mutante, Bebedouro, Bom Parto e Levada. Entretanto, a origem do processo é distinta entre as zonas A (parte do bairro Bebedouro), B (parte do bairro Levada e Bom Parto) e C (bairro Pinheiro, Mutante e Bebedouro);
- f. no núcleo central da zona C foram observados no terreno afundamentos expressivos, como é o caso do Hospital Psiquiátrico Miguel Couto, localizado no bairro do Bebedouro e cujo terreno foi parcialmente invadido pela água da lagoa (atualmente coberto por uma lâmina d’água de mais de 20cm) (Figura 6).

Este e outros edifícios próximos, bem como residências localizadas na quebra de relevo (encosta da borda do platô) apresentam trincas e rachaduras que indicam recalque diferencial do terreno, igualmente abertura das trincas por afastamento, tanto nas paredes quanto em pisos;

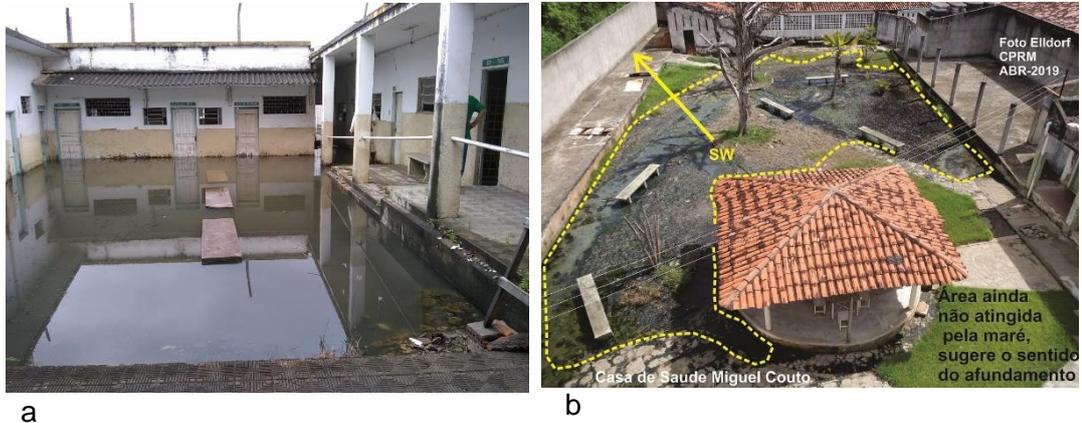


Figura 6 a e b: Fundos do Hospital Miguel Couto inundado há 3 anos.

- g. é notável que a área mais afetada por rachaduras e outros danos a estruturas está localizada na região leste do bairro Pinheiro (rua Augusto Calheiros com Professor Mario Marroquim e rua Tereza de Azevedo com Euclides José Leite), marcando uma zona transicional entre a região de maior subsidência e a região estável (próximo à avenida Fernandes Lima). São pontos de percolação preferencial das águas pluviais. Neste ponto do terreno, as fraturas provocadas pela movimentação do terreno podem ter seguido zonas de fraqueza (estruturas geológicas naturais), de direção NW-SE, mas que não seriam capazes de, por si só, gerar qualquer tipo de dano ao terreno (Figura 7).

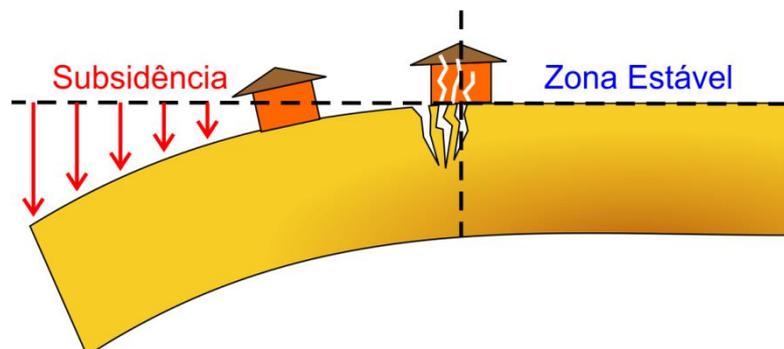


Figura 7: Esquema ilustrativo do processo de subsidência e danos causados na superfície do terreno.

3.6.Métodos geofísicos

3.6.1.Radarm de penetração no solo ou georradar (GPR)

Com a finalidade de verificar a ocorrência de zonas resistivas de alta amplitude eletromagnética, possivelmente relacionadas a vazios no subsolo (cavernas), foram realizados perfis de GPR ao longo de ruas pavimentadas, casas e prédios no bairro Pinheiro na cidade de Maceió (AL).

Os dados GPR indicam que no substrato até cerca de 6,0m ocorre um grande número de descontinuidades, comprovando a movimentação do terreno.

3.6.2.Eletrorresistividade

Possui por objetivo investigar o subsolo em busca de fraturas e vazios a uma profundidade rasa (60 a 150m) por meio da introdução de corrente elétrica no terreno, que permitirá medir a resistência dos materiais à sua passagem. Os principais resultados são:

- a. constata-se importantes descontinuidades geoeletricas verticais e horizontais no substrato das linhas estudadas (Figura 8);
- b. o estudo indica que pode estar havendo percolação de material fluido superficial por zonas preferenciais da parte superior do solo para o aquífero. Estas zonas preferenciais estão associadas a falhas e/ou a fraturas;
- c. o fluxo deste material, em grande volume e localizado em pontos específicos, acelera o processo de erosão e lubrificação das fraturas e/ou das falhas, deixando o solo friável, descompactado e instável.

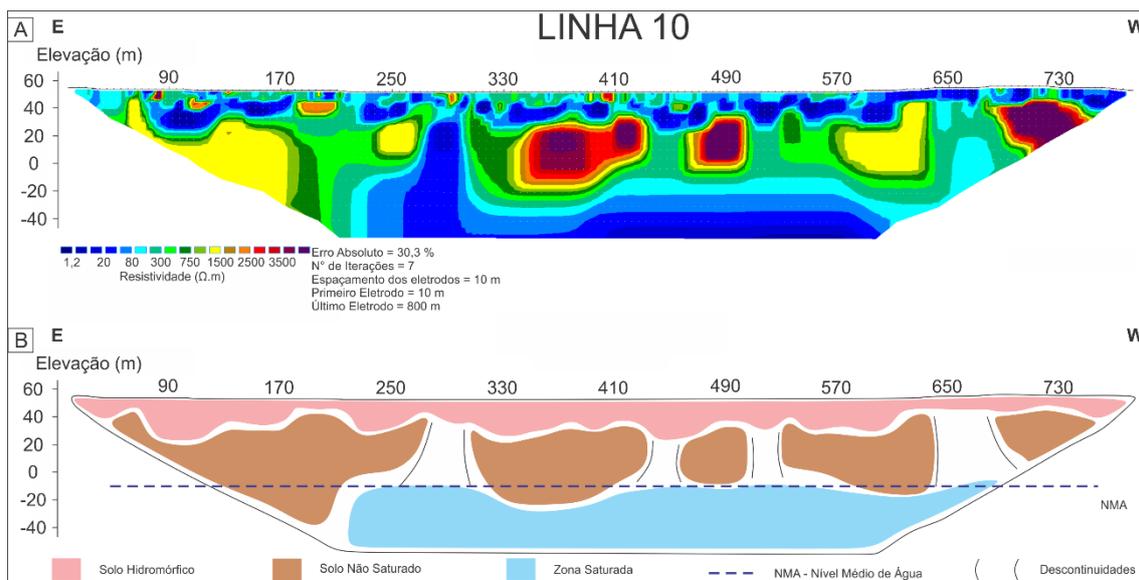


Figura 8: Seção do Caminhamento Elétrico representativa da área do bairro Pinheiro (Al. Cavalcanti de Oliveira).

3.6.3. Audiomagnetotelúrico

O método contempla o processamento e interpretação de dados eletromagnéticos com fonte de sinal natural Audiomagnetotelúrico (AMT) em 100 estações de medida, para obtenção de um modelo de resistividade do solo em subsuperfície. O AMT estudou uma profundidade de investigação de até 1.500m de profundidade.

O método Audiomagnetotelúrico (AMT) é uma das variantes do método Magnetotelúrico (MT). Essa família de métodos utiliza campos elétrico e magnético naturais. No caso do AMT, esses campos estão associados aos raios das tempestades que percorrem o globo terrestre pela atmosfera, estando, portanto, disponíveis para uso em toda a Terra. O levantamento de 100 estações e a inversão bidimensional de 12 linhas construídas com a confecção tridimensional para a área tiveram por objetivo identificar as camadas mais profundas do substrato em busca de estruturas ou vazios. Os principais resultados são:

- a. na profundidade de 100 metros, o terreno investigado mostra feições muito parecidas com aquelas observadas na superfície, ou seja, elevada condutividade provocada pela presença de argila e silte dos sedimentos mais recentes. Nessa profundidade já é possível observar a compartimentação estrutural do terreno (blocos, falhas) em que se destaca o alinhamento de pequenas anomalias de elevada resistividade Norte/Noroeste-Sul/Sudoeste que corresponde ao falhamento do Mutange. Esse falhamento foi encontrado

- em toda a profundidade investigada (1.500 metros) e, portanto, deve-se estender a profundidades ainda maiores (Figura 9);
- na profundidade de 500 metros, observa-se a presença de anomalias de elevadíssima resistividade;
 - a presença de anomalias de elevadíssima resistividade na profundidade de 900m, coincidentes com zonas de extração do sal-gema. **Este é um resultado inesperado para cavernas preenchidas com salmoura que gerariam, em tese, anomalias condutivas.** Essas feições estão ascendendo para a superfície e espalhando-se na horizontal, modificando vigorosamente a distribuição de resistividade que teria sido impressa pela natureza (Figura 10);
 - zonas de falha com direção NNW-SSE coincidentes com os resultados da gravimetria.

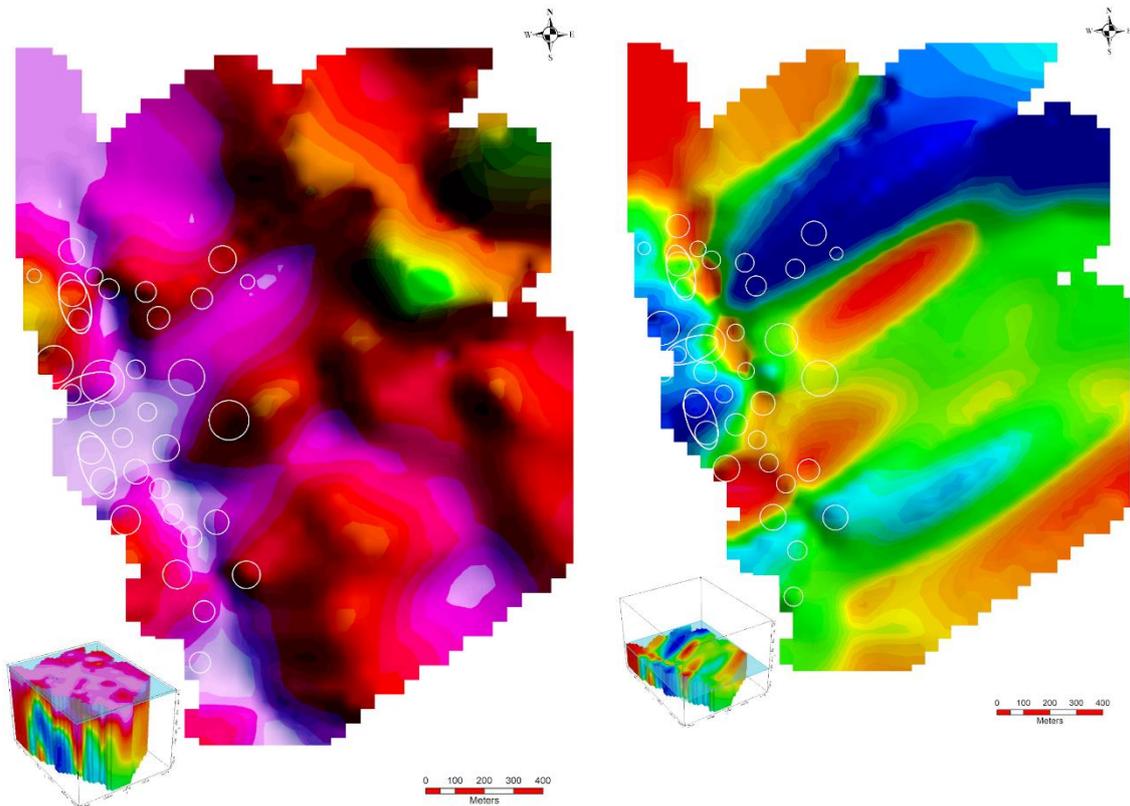


Figura 9 - Seção horizontal a 100 metros de profundidade. Canto esquerdo inferior: modelo 3D indicando a profundidade da seção. Círculos brancos: poços de extração de sal-gema.

Figura 10 - Seção horizontal a 900 metros de profundidade. Canto esquerdo inferior: modelo 3D indicando a profundidade da seção. Círculos brancos: poços de extração de sal-gema.

3.6.4. Gravimetria

Gravimetria é um método não invasivo, que estuda as variações da aceleração de gravidade ponto a ponto sobre a superfície terrestre. A aplicação deste método está relacionada, fundamentalmente, à diferença entre a densidade das rochas ou alvos de interesse. Um corpo (alvo) com densidade mais elevada do que as rochas ao seu entorno produz um aumento de massa, essa massa “extra” é conhecida como anomalia positiva. O contrário, quando um corpo tem densidade mais baixa do que as rochas ao entorno, é chamada de anomalia negativa.

A observação, interpretação e modelagem dos dados gravimétricos no bairro do Pinheiro permitem as seguintes conclusões:

- a. não há evidências da existência de uma falha lístrica;
- b. não há evidências de anomalias de massa que indiquem a existência de grandes vazios em profundidades rasas que favoreçam a formação de estruturas de abatimento com grande intensidade ou mesmo formação de dolinas;
- c. a maioria das trincas mapeadas são estruturas paralelas às falhas com direção NNW-SSE que ocorrem nos bairros de Mutange e Bebedouro;
- d. os dados confirmaram o aumento da espessura da camada de sal no sentido oeste e a formação de um pequeno domo (ou almofada) salino na região onde ocorre a extração de sal-gema;
- e. a correlação entre zonas de falha com direção NNW-SSE que ocorrem nos bairros do Mutange e Bebedouro e a localização das minas de sal indicam que o processo de extração interferiu diretamente na trama estrutural da região e favoreceu a reativação neotectônica dessas estruturas produzindo a subsidência observada nos dados de interferometria;
- f. os modelos gravimétricos demonstram que algumas trajetórias das perfurações interceptam o plano de falha com direção NNW-SSE, sugerindo que deformações nas tubulações estão relacionadas com a reativação desta falha (Figura 11).

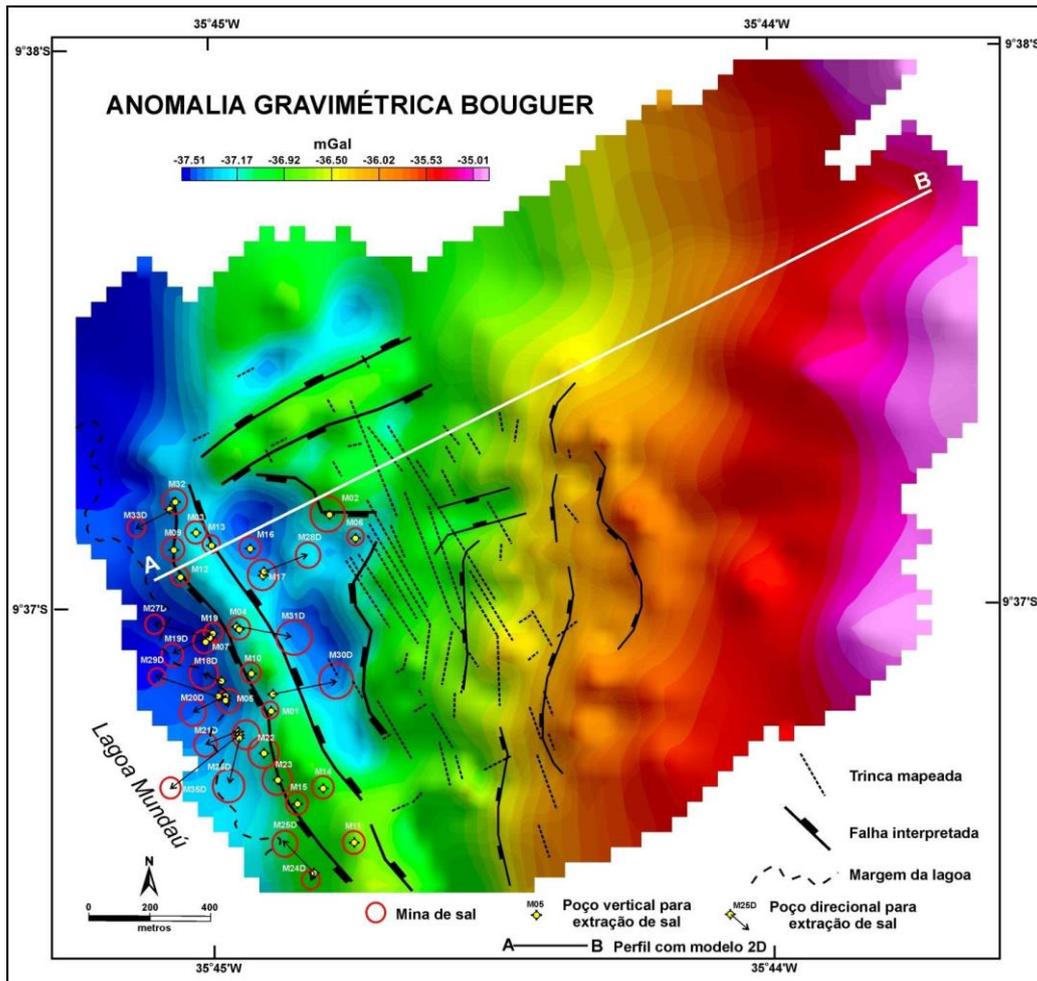


Figura 11: Anomalia gravimétrica Bouguer com interpretações de falhas e sobreposição da localização em planta das minas de sal (projetadas em superfície), dos poços usados para a extração de sal e das trinças mapeadas.

3.6.5. Batimetria

Estudo realizado com o objetivo de identificar o relevo e estruturas geológicas/descontinuidades do fundo da Lagoa Mundaú, em busca de sinais de subsidência ou alterações morfológicas anômalas. Foram percorridos 317km de levantamento batimétrico, com perfis equidistantes a cada 50 metros, cujos principais resultados são:

- profundidades variando em torno de 0,17 a 10,67 metros (Figura 12);
- grande acumulação de sedimento adjacente à foz do Riacho do Silva com cota batimétrica variando de 0 a 1,5 metros de profundidade, além da região de canais e meandros da Laguna de Mundaú onde ocorrem grandes manchas de

- manguezal associado, assim como a formação de bancos de areia alongados controlados pela influência do fluxo de maré;
- c. o assoreamento na lagoa de Mundaú pode estar sendo provocado por sedimentos provenientes do rio Mundaú, Riacho do Silva e Riacho do Reginaldo, os quais transportam grandes quantidades de sedimento para dentro da lagoa de Mundaú, durante as ocorrências de chuvas moderadas a fortes na região, como a ocorrida no dia 27 janeiro 2019;
 - d. maior soerguimento da margem esquerda da lagoa de Mundaú (Coqueiro Seco) em relação à margem direita (bairro do Pinheiro), ocorre a presença de afloramentos da Formação Maceió;
 - e. devido à pouca lâmina d'água não foi possível realizar os levantamentos sísmicos em profundidades de até 200m com a finalidade de determinar a espessura do pacote sedimentar, assim como mapear os sistemas de falhas e fraturas abaixo do leito da lagoa.

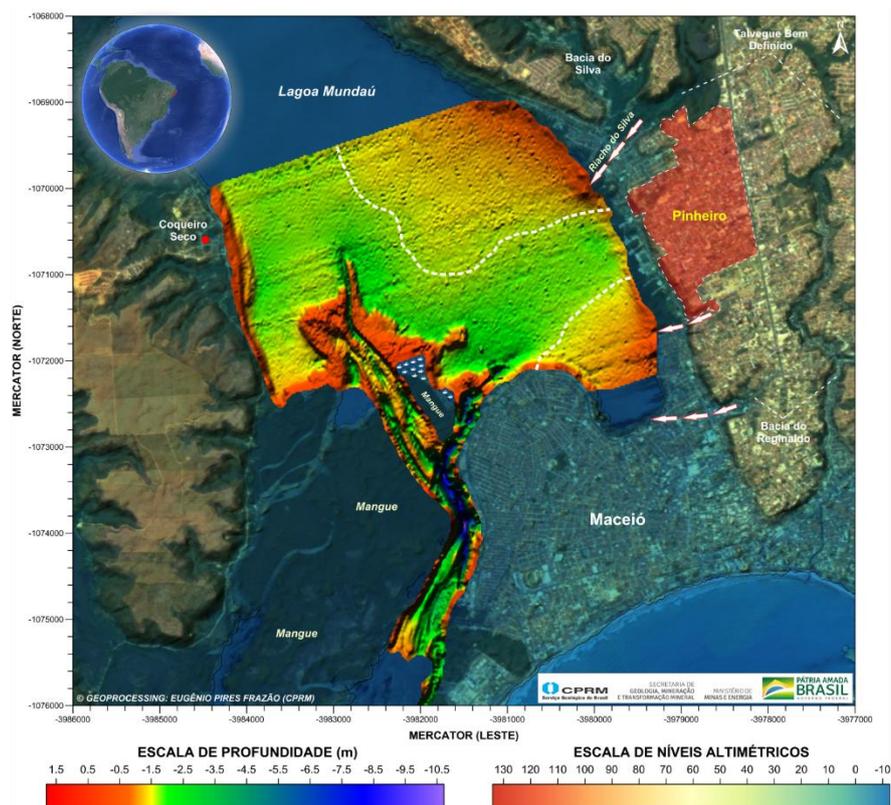


Figura 12: Mapa batimétrico de detalhe, mostrando o acúmulo de sedimento na saída do Riacho do Silva e bancos de areia alongados controlados pelo fluxo de maré ao longo do canal de acesso à lagoa de Mundaú.

3.7.Sismologia

A Rede Sismográfica Brasileira (RSBR), por intermédio da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), responsável pelas estações sismográficas no Nordeste do Brasil, instalou seis estações sismográficas no bairro do Pinheiro, Maceió – AL. A partir de 1 de fevereiro de 2019 a rede entrou em funcionamento. Sua instalação tem por objetivo monitorar a sismicidade da região em torno do bairro do Pinheiro e gerar informações que apoiem as investigações do substrato rochoso.

A figura 13 mostra um exemplo de registros de eventos sísmicos que ocorreram na região nos dias 6 (08h15min UTC) e 10 (18h23min UTC) de fevereiro de 2019.

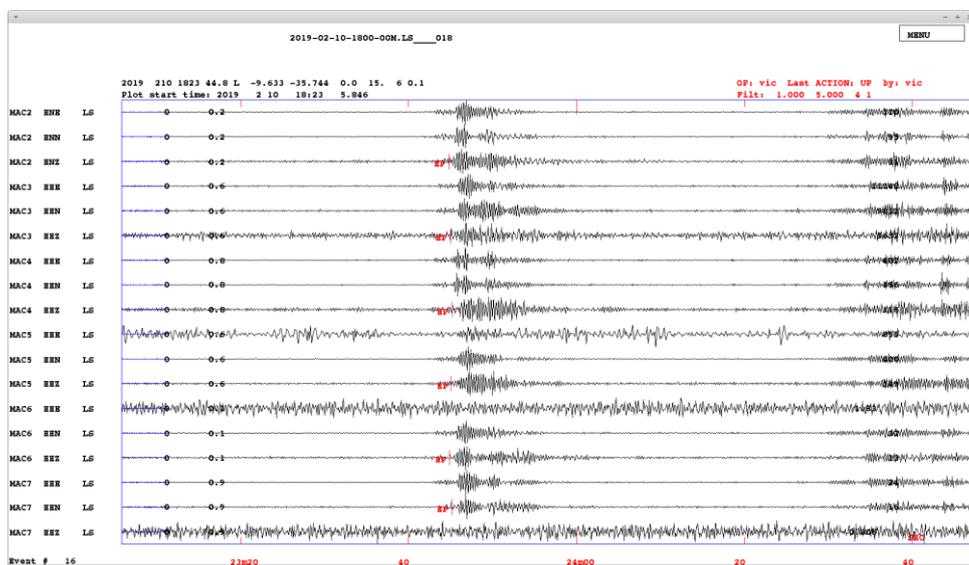


Figura 13: Eventos sísmicos às 18h23 (UTC) do dia 10 de fevereiro de 2019.

A figura 14 mostra o mapa epicentral preliminar de seis eventos localizados abaixo da Lagoa Mundaú e também e sob o Bairro do Pinheiro, com profundidade inferior a 1.000m.

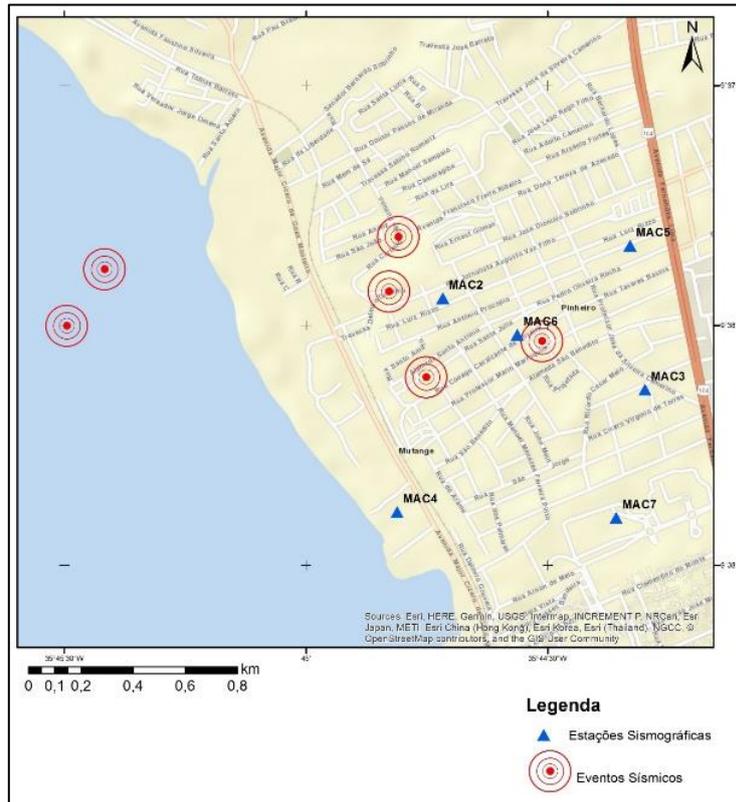


Figura 14: Mapa epicentral preliminar com os eventos identificados como círculos vermelhos e a localização das estações representadas por triângulos azuis.

Na elaboração desta análise o Serviço Geológico do Brasil contou com a colaboração dentre outros do professor Dr. Aderson Farias do Nascimento da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) que tece as seguintes considerações: “A Rede Sismográfica Brasileira (RSBR), por intermédio de estações sismográficas da Rede Sismográfica do Nordeste do Brasil (RSISNE, sub-rede da RSBR), operada pela UFRN detectou um evento de 2,4mR (magnitude regional) na cidade de Maceió no dia 3 de março de 2018 às 17h30 UTC (14h30, hora local). A estação mais próxima do epicentro está no município de Anadia (AL), a aproximadamente 60km de distância do epicentro. Para se ter um comparativo da energia sísmica irradiada neste evento no bairro Pinheiro, Maceió (AL), os colapsos de cada uma das Torres Gêmeas do World Trade Center, em 11 de setembro de 2001, provocaram magnitudes comparáveis de 2,1 e 2,3ML, magnitude local (Kim et al., 2001)”.

Na figura 15 é apresentado o registro da estação NBAN (componente vertical do movimento) filtrado entre 1 e 5Hz. Nesta figura estão marcadas as chegadas das ondas P, S e de superfície (Rg). A diferença de tempo entre a P e S é de aproximadamente 7s, o que dá uma distância epicentral de 57km, considerando uma velocidade média das ondas P e S na crosta de 6,0km/s e 3,5km/s, respectivamente

(Shihadeh, 2015). A onda de superfície, segundo 8 marcações na figura 15, chega 4,7s após a onda S e viaja a velocidade de aproximadamente 2,7km/s e é consistente com valores de tomografia obtidos independentemente por Dias et al. (2015).

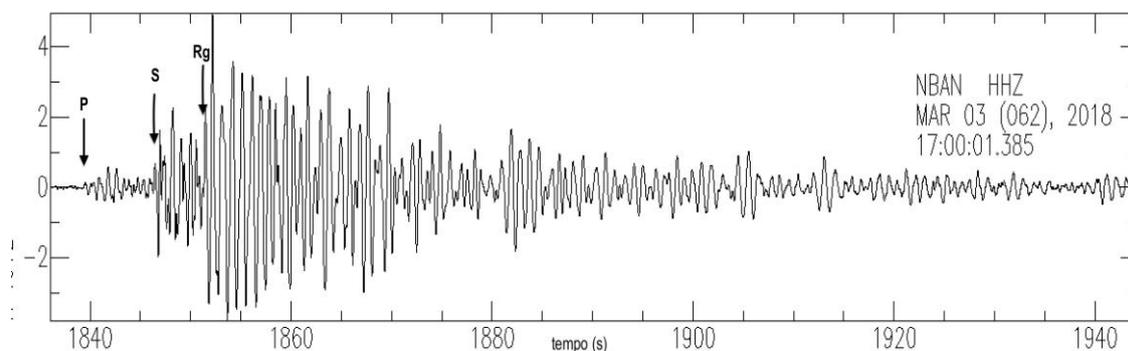


Figura 15: Sismograma (componente vertical) do evento ocorrido no bairro Pinheiro, em 03/03/2018, às 17h30 (UTC), 14h30 (hora local). A amplitude medida no eixo y é proporcional à velocidade do solo.

Pela presença majoritária de energia sísmica em forma de ondas de superfície, percebe-se claramente que a fonte sísmica está próxima à superfície e não se trata de um evento tectônico causado por uma falha no embasamento, por exemplo. Sismogramas com este tipo de características são mais característicos de energia sísmica gerada por explosões próximas à superfície (detonação em pedreiras, por exemplo), colapsos de edificações (Kim et al., 2001) ou colapso de estruturas rasas (até 1km) (e.g.: Teyssoneyre et al., 2002).

A estação NBAN (instalada em Caruaru—PE) também da RSISNE registrou o evento, conforme mostra a figura 16. Esta estação está a 151km de distância. Por conta da maior distância, as ondas de superfície são as que melhor aparecem no sismograma.

Nos demais registros das estações que foram analisados (alguns registros foram de estações a 415km de distância), a conclusão é que “as ondas de superfície dominam o sinal”, destacou Aderson.

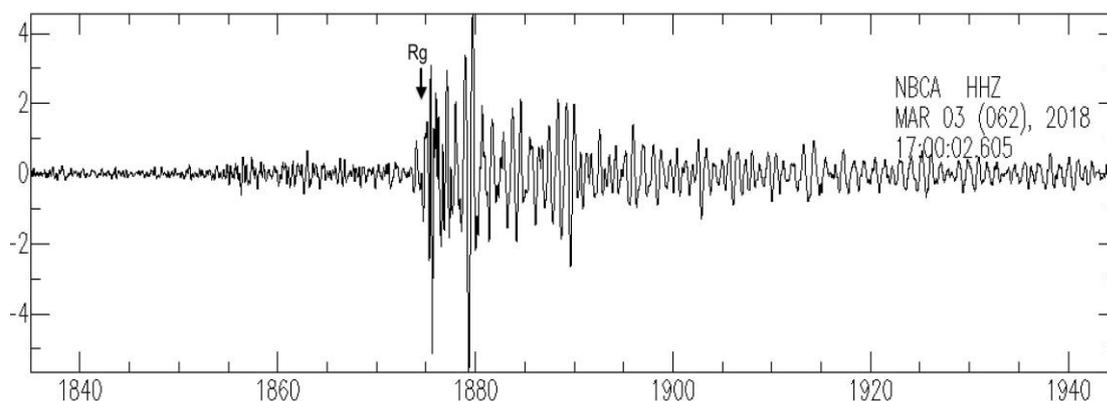


Figura 16: Sismograma (componente vertical) do evento ocorrido no Bairro do Pinheiro, em 03/03/2018, às 17h30 (UTC), 14h30 (hora local). A amplitude medida no eixo y é proporcional à velocidade do solo. O eixo x está em segundos. A clara chegada da onda de superfície é mostrada (Rg).

3.8.Hidrogeologia

Foram realizados estudos envolvendo o levantamento bibliográfico, organização e sistematização de dados preexistentes, envolvendo a visita e recolhimento das informações disponíveis (fichas técnicas de poços, perfis construtivos e litológicos, testes de bombeamento, perfilagens geofísicas, monitoramento de níveis e vazões, estudos realizados, mapas temáticos relacionados ao tema etc.) nos órgãos e instituições estaduais, municipais, federais estabelecidos em Maceió e empresas privadas que estejam relacionadas com o tema. Fez parte ainda a organização e alimentação de banco de dados Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS).

A análise e interpretação dos dados hidrogeológicos existentes na região metropolitana de Maceió, assim como os dados de exploração d'água permitem afirmar que:

- a. não existe evidência de rebaixamentos progressivos ou excessivos na região de Bebedouro, Mutange e Pinheiro que possa indicar possibilidades de superexploração;
- b. os níveis potenciométricos nesta região, tanto nos poços que captam exclusivamente o aquífero Barreiras quanto nos que captam o sistema aquífero Barreiras/Marituba, apresentam, claramente, um processo de recuperação,

- reflexo da diminuição da captação de água pelas baterias da CASAL no início dos anos 2000;
- c. o nível freático do aquífero Barreiras, abaixo do bairro do Pinheiro, não foi impactado, mantendo-se desde o início da exploração da água subterrânea na Região Metropolitana de Maceió, no começo da década de 1970, variando entre 40 e 50 metros a depender das variações de cota do terreno;
 - d. não existindo indícios de superexploração e estando, nos últimos 16 anos, os níveis dos aquíferos Barreiras e Marituba em franca recuperação, fica remota a associação da exploração da água subterrânea com o fenômeno de subsidência que ocorre na área do Pinheiro, Mutange e Bebedouro;
 - e. encontra-se em fase de implantação o Sistema de Poços de Monitoramento (RIMAS), através da construção de 8 poços para monitoramento do nível freático do aquífero Barreiras e Marituba no bairro do Pinheiro. Iniciado em 23/04/2019 com previsão de finalização até agosto de 2019. Espera-se que com a instalação dos referidos poços de monitoramento do aquífero Barreiras e Marituba, confirmem-se as análises anteriores.

3.9. Análise dos sonares

Estudo realizado com o objetivo de avaliar os resultados dos 35 sonares adquiridos em 2019, comparativamente aos anos de 2015 e 2018.

Até a presente data apenas foram analisados os sonares das Minas 27D, 7, 19, d, 30D, 31D, 32, 34D e 35D foram disponibilizados para o Serviço Geológico do Brasil. Os resultados da análise encontram-se sintetizados no Quadro 2. Dessa forma, as análises foram concentradas nos sonares destas minas, cujos resultados estão apresentados no quadro abaixo.

Quadro 2: Análise comparativa entre os volumes dos sólidos nas cavidades avaliadas.

Comparativo volumétrico das cavidades			
Furo	Sonar	Vol. m3	Tonelagem (d= 2,17)
Mina 30D	2015	285611.53	619777.02
	2018	442610	960463.70
	Diferença	156998.47	340686.68
	Diferença %	55%	
Mina 31D	2015	424054.45	920198.16
	2018	495503.99	1075243.66
	Diferença	71449.54	155045.50
	Diferença %	17%	

Mina 32D	2017	85823.52	186237.04
	2018	198192.25	430077.18
	Diferença	112368.73	243840.14
	Diferença %	131%	
Mina 07D	1989	194122.49	421245.80
	2019	332552.05	721637.95
	Diferença	138429.56	300392.15
	Diferença %	71%	
Mina 19D	2005	72724.59	157812.36
	2019	5835.8	12663.69
	Diferença	-66888.79	-145148.67
	Diferença %	-92%	
Mina 27D	Sem dados anteriores		
	2019	296058.76	642447.51
	Diferença	-	-
	Diferença %	-	
Mina 35D	Operação 2	23355.06	50680.48
	2014	67131.13	145674.55
	Diferença	43776.07	94994.07
	2019	201787.53	437878.94
	Diferença	178432.47	387198.46
	Diferença %	764%	
Mina 34D	Operação 2	132059.22	286568.51
	2015	195221.85	423631.41
	Diferença	63162.63	137062.91
	2019	356418.32	773427.75
	Diferença	224359.1	486859.25
	Diferença %	170%	

3.10. Integração de dados geológicos e de extração de sal em ambiente 3D

Para modelagem na área de estudo foram utilizados 62 poços, totalizando 52.692,76m de perfuração, sendo 45 poços verticais e 17 poços direcionais. Sendo assim, primeiramente certificamos e inserimos as informações disponíveis para elaboração do modelo geológico tridimensional, contidas na pasta compartilhada: ANP (poços estratigráficos), Braskem (poços de extração salmoura, poços extração de água) e SIAGAS (poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas).

A integração de todos os dados obtidos permite afirmar que:

- a. há indícios de que a atividade de mineração alterou o estado de tensão *in situ* do maciço rochoso;
- b. na região das minas 7 e 19 ocorre a intersecção de um sistema de falhas e/ou fraturas com direções preferenciais NE/SW e NW/SE que possivelmente estão sendo reativadas por movimentos de acomodações gravitacionais locais e/ou pela inflação das camadas salíferas (soerguimentos e afinamentos), ocasionados pela extração de sal, gerando colapso das cavidades e aumentando a instabilidade do maciço rochoso (Figura 17);

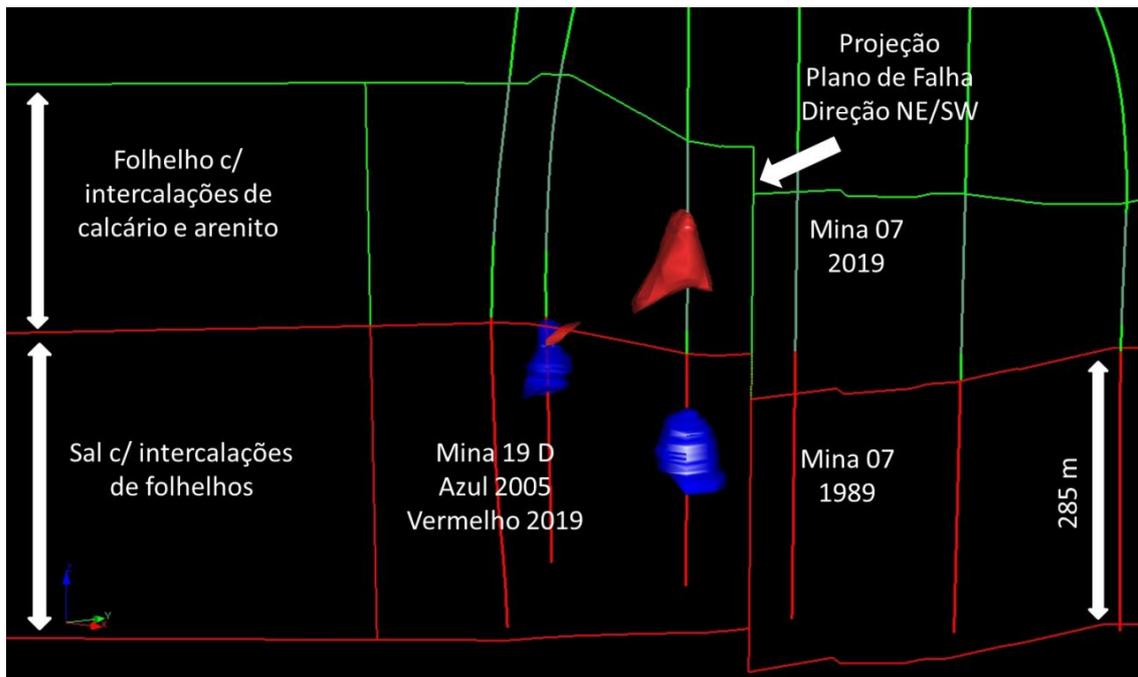


Figura 17: Localização das cavidades em relação ao sistema de falhas e fraturas obtidas (tela software DataMine).

- c. Na mina 19, devido à forma geométrica irregular da cavidade, às vezes parecendo encaixado em zonas de fraquezas, bem como o reduzido volume se comparada ao levantamento do sonar anterior, nos leva a pensar na hipótese de colapso quase total dessa cavidade, que poderiam estar relacionados à intersecção desse sistema de falhas e fraturas com perda da integridade estrutural dos pilares (Figura 18);

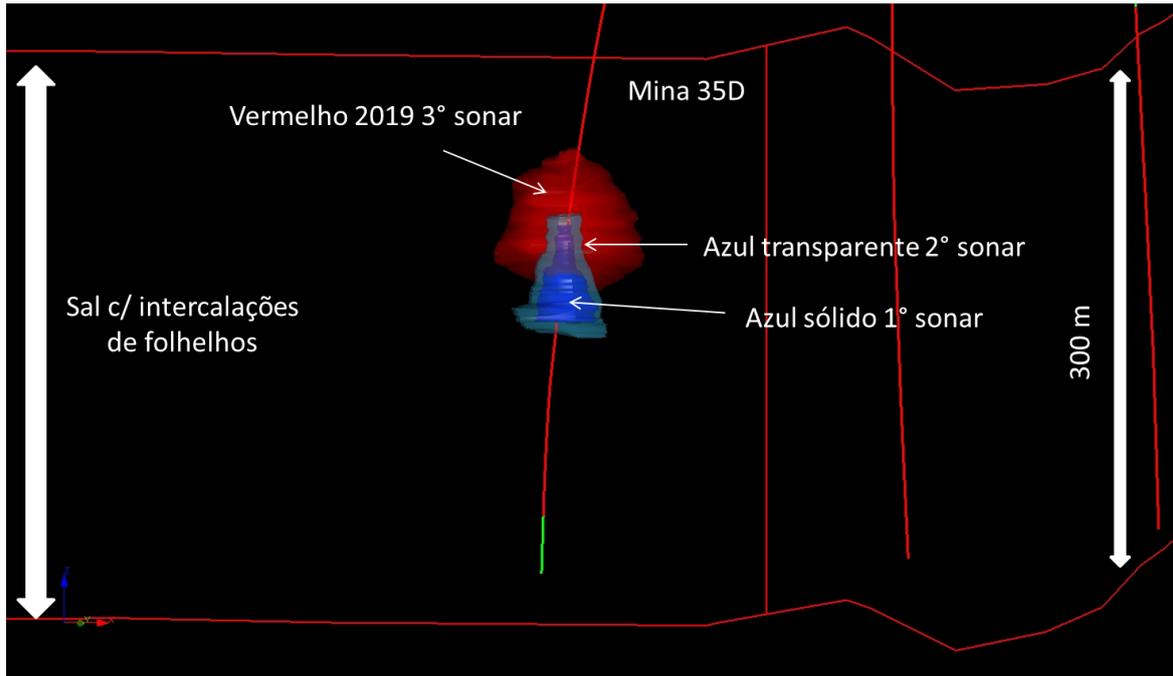


Figura 18: Modelo tridimensional da mina 35D, a cavidade (wireframe) em azul sólido representa o 1° sonar, o azul transparente o 2° sonar e vermelho o levantamento em 2019 (tela software DataMine).

- d. a mina 07, com o fim de operação datada em jun/1997 e comparando os resultados do sonar de 1989 e 2019, observa-se um grande deslocamento do teto com mais de 200m de altura, que também estaria relacionado ao sistema de falhas e/ou fraturas no maciço (Figura 19);

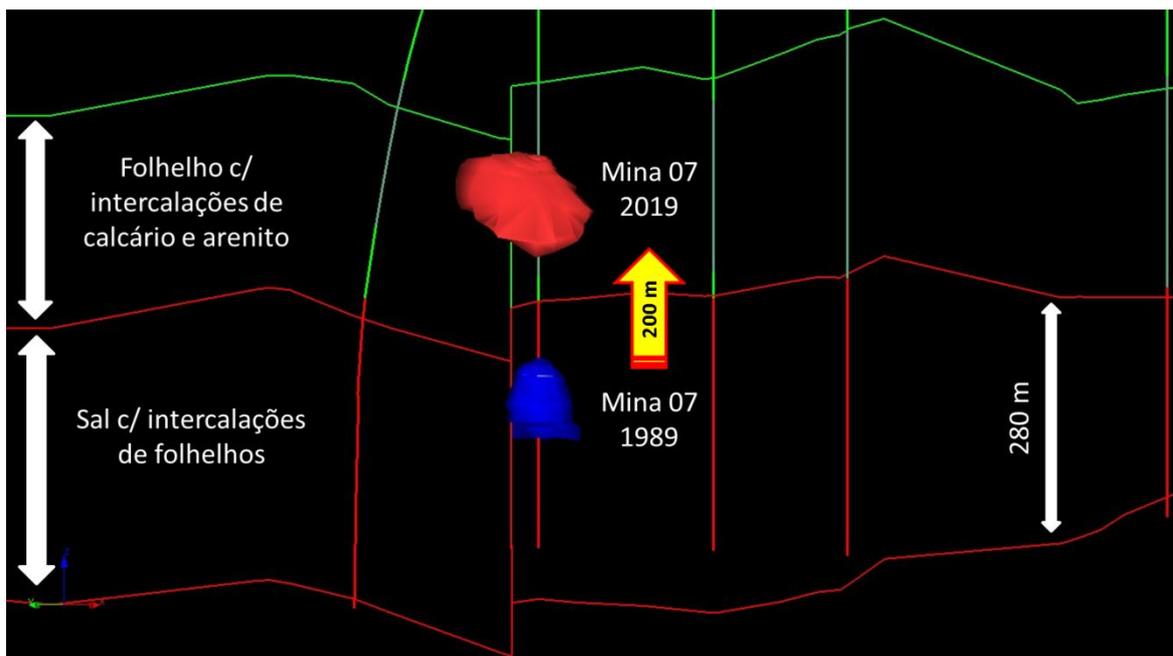


Figura 19. Posição espacial da mina 07, com registro do colapso.

- e. as análises permitem afirmar as atividades de extração de sal-gema, alteraram o estado de tensão *in situ* do maciço rochoso, causando os processos de subsidência no bairro do Pinheiro;
- f. há diferenças significativas nos volumes das cavidades analisadas, principalmente nas que estão próximas às falhas e/ou fraturas evidenciadas no presente estudo (região da escarpa do Mutange). Uma análise mais aprofundada poderá ser realizada a partir da obtenção dos resultados de sonar, das demais 27 cavidades.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos dados adquiridos e repassados a esta instituição até a presente data revela o que segue:

Hipótese 1 - Características geotécnicas dos solos da região e forma de ocupação do bairro.

Premissa: Presença de solos colapsáveis e orgânicos, forma de ocupação e métodos construtivos inadequados.

Desenvolvimento: Os ensaios de geotécnica não demonstraram características que explicassem os danos. O surgimento de rachaduras em imóveis de diversas idades não pode ser explicado por problemas construtivos. Entretanto, processos interligados necessitam de cuidados específicos, tais como estabilização dos processos erosivos, saneamento básico, instalação de rede de drenagem eficiente no bairro e demais obras estruturantes.

Conclusão: O conjunto de estudos invalida esta hipótese. É importante ressaltar que as chuvas intensificam o processo erosivo.

Hipótese 2 - Presença de vazios (cavidades, cavernas) nos solos e subsolos da região decorrentes de causas naturais ou ações antrópicas.

Premissa: ocorrência de cavidades decorrentes da dissolução de rochas em subsuperfície ou desabamento de minas de extração de sal-gema, como as minas 7 e 19.

Desenvolvimento: a sismologia mostrou sismos coincidentes com minas de extração. A gravimetria demonstrou a existência de anomalias negativas de massa associadas com as cavernas produzidas pela extração do sal. O método geofísico audiomagnetotelúrico mostrou a existência de anomalias resistivas em profundidade que seriam geradas por cavidades de mineração em desabamento. A interferometria indicou deformação compatível com subsidência por deformação dúctil da camada de

sal e concêntrica na região de poços de mineração. As observações de campo apontam deformações compatíveis com subsidência. A análise integrada dos dados dos oito sonares em ambiente 3D permite afirmar que as atividades de extração de sal-gema, alterou o estado de tensões resultando no colapso de minas e causando os processos de subsidência no bairro do Pinheiro.

Conclusão: Há evidências que comprovam que a deformação nas cavernas da mineração teve papel predominante na origem dos fenômenos que estão causando danos na região estudada. Este processo está em evolução.

Hipótese 3 - Estruturas/Feições tectônicas ativas na região.

Premissa: Os danos estudados teriam origem em eventos de neotectônica.

Desenvolvimento: A geofísica identificou diversas falhas que já eram esperadas pelo contexto regional. A sismologia identificou padrões de sismos que não são compatíveis com movimentos de tectônica regional. A interferometria indica deformação concêntrica na região de poços de mineração incompatível com eventos de origem tectônica. Os trabalhos de mapeamento estrutural de campo realizado no bairro do Pinheiro e em outras áreas de Maceió confirmaram as direções das descontinuidades nas direções NW/SE, NS e NE/SW que são regionais e coincidentes com as direções das fraturas e trincas que ocorrem nas moradias e ao longo do bairro e delimitadas no mapa de mapa de feições de instabilidade do terreno.

Conclusão: O conjunto de estudos indica que as hipóteses 2 e 3 estão associadas, sendo a hipótese 2 desencadeadora do processo. A correlação entre zonas de falha com direção NNW-SSE que ocorrem nos bairros do Mutange e Bebedouro e a localização das minas de sal indicam que o processo de mineração interferiu diretamente na trama estrutural preexistente da região e favoreceu a reativação dessas estruturas, produzindo a subsidência observada nos dados de interferometria.

Hipótese 4 - Exploração de água subterrânea

Premissa: Os danos estudados teriam origem em subsidência causada por recalque decorrente da extração de água subterrânea.

Desenvolvimento: A análise dos dados de hidrogeologia revelou que os níveis estáticos e dinâmicos dos aquíferos Barreiras e Marituba estão em recuperação, não existindo indícios de superexploração.

Conclusão: O estudo realizado invalida a hipótese.

5. CONCLUSÃO

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) com base em todos os estudos e análises realizadas chegou às seguintes conclusões:

- Está ocorrendo desestabilização das cavidades provenientes da extração de sal-gema, provocando halocinese (movimentação do sal) e criando uma situação dinâmica com reativação de estruturas geológicas preexistentes, subsidência e deformações rúpteis em superfície em parte dos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió-AL
- No bairro Pinheiro, cujo reflexo da subsidência é a formação de uma zona de deformação rúptil (fissuras e rachaduras), a instabilidade do terreno é agravada pelos efeitos erosivos provocados pelo aumento da infiltração da água de chuva em plano de fraturas/falhas preexistentes e presença de solo extremamente erodível, em função do aumento significativo da permeabilidade secundária (quebramentos). Este processo erosivo é acelerado pela existência de pequenas bacias endorreicas, falta de uma rede de drenagem pluvial efetiva e de saneamento básico adequado.

REFERÊNCIAS

FEIJÓ, F.J; VIEIRA, R.A.B. Sequências cretáceas das Bacias de Sergipe e Alagoas. In SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CRETÁCEO, 1, 1990, Rio Claro, UNESP.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). [Censo Demográfico - 2010.](#)

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015). [Produto Interno Bruto dos municípios - 2015.](#)

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018). [Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2018.](#)

Kim, W. Y., Sykes, L. R., Armitage, J. H., Xie, J. K., Jacob, K. H., Richards, P. G., ... & Du, W. X. (2001). Seismic waves generated by aircraft impacts and building collapses at World Trade Center, New York City. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82(47), 565-571.

MENDES, V.A.; FERRER, D.; LIMA, A.B. de; LIRA BRITO, M. de F. Geologia do Estado de Alagoas. CPRM. Recife, abril de 2017.

TEYSSONEYRE, V., FEIGNIER, B., ŠILENY, J., & COUTANT, O. (2002). Moment tensor inversion of regional phases: Application to a mine collapse. In *The Mechanism of Induced Seismicity* (pp. 111-130). Birkhäuser, Basel.

SCHALLER, H. Revisão estratégica da bacia de Sergipe/Alagoas. *Boletim Técnico da Petrobrás*, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 21- 86, 1969

SHIHADDEH, H. L. (2015). Utilização de sismos regionais para a determinação de um modelo 1D de velocidades da onda P na Província Borborema-NE do Brasil (Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).

APÊNDICES

A – LEVANTAMENTOS REALIZADOS PELA CPRM (JANEIRO A ABRIL DE 2019)

B – MAPA DE FEIÇÕES DE INSTABILIDADE DO TERRENO (TERCEIRA ATUALIZAÇÃO)

C – MAPA DE INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS DE INSTABILIDADE DO TERRENO

D – QUADRO RESUMO DAS ANÁLISES SONARES