



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

ANDRESSA MARIA SOUSA FREITAS

**AVALIAÇÃO HIDROQUÍMICA E GEOFÍSICA DO AQUÍFERO ALTER DO CHÃO
DE ÁREAS DE LAVA-JATOS DE SANTARÉM, PARÁ.**

**SANTARÉM, PARÁ
2023**

ANDRESSA MARIA SOUSA FREITAS

**AVALIAÇÃO HIDROQUÍMICA E GEOFÍSICA DO AQUÍFERO ALTER DO CHÃO
DE ÁREAS DE LAVA-JATOS DE SANTARÉM, PARÁ.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Engenharia e Geociências da Universidade Federal do Oeste do Pará como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Geologia.

Orientador: Professora Dra. rer. nat. Fernanda Souza do Nascimento

**SANTARÉM, PARÁ
2023**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

- F866a Freitas, Andressa Maria Sousa
Avaliação hidroquímica e geofísica do aquífero Alter do Chão de áreas de lava-
jatos de Santarém, Pará./ Andressa Maria Sousa Freitas. – Santarém, 2023.
84 p. : il.
Inclui bibliografias.
- Orientadora: Fernanda Souza do Nascimento.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do
Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Bacharelado em Geologia.
1. Águas subterrâneas. 2. Lava-Jatos. 3. GPR. I. Nascimento, Fernanda Souza do,
orient. II. Título.

CDD: 23 ed. 551.48098115



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO BACHARELADO EM GEOLOGIA

ATA DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ata de aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso do Bacharelado em Geologia, do discente Andressa Maria Sousa Freitas, matrícula 201801564. Aos 27º dia do mês de janeiro de 2023, às 09:00 horas, no formato híbrido - via videoconferência na plataforma Google Meet, link <https://meet.google.com/pkb-fvyn-nfq> e Sala 432 do BMT/Ufopa Tapajós: realizou-se reunião da Comissão Avaliadora do Trabalho de Conclusão de Curso do Bacharelado em Geologia, intitulado "Avaliação Hidroquímica e Geofísica do Aquífero Alter do Chão de Áreas de Lava-jatos de Santarém, Pará", sob orientação da Profa. Dra. Fernanda Souza do Nascimento. Compuseram a banca examinadora a Prof. Dr. Raimundo Nonato Colares Carneiro e o Dr. Bernhard Gregor Peregovich. Após a leitura e ciência dos Pareceres, anexos a esta ATA, decidiram aprovar com média 9,4 o referido TCC.

Profa. Dra. Fernanda Souza do Nascimento

Orientadora

Prof. Dr. Raimundo Nonato Colares Carneiro

Membro I

Dr. Bernhard Gregor Peregovich

Membro II

DEDICATÓRIA

Dedico esta monografia aos meus pais, que tanto apoiaram e incentivaram o meu crescimento pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que iluminou meu caminho durante esses anos de graduação. Sem ele, nada disso seria possível.

Aos meus pais, Maria Vânia e Carlos André, por todo o incentivo, carinho e amor. Aos meus irmãos, Jadean, Andreia, Andrea, e Ana Clara, por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos da minha vida, compartilhando comigo todo amor, alegria e motivação pra que eu não desistisse. Vocês são incríveis!

Gratidão ao meu esposo Akim Thiago, parceiro de vida, por todo amor, cuidado, paciência, ajuda e companheirismo. Obrigada por tudo.

À Universidade Federal do Oeste do Pará, essencial no meu processo de formação profissional, pelo suporte e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso. Sou grata à cada membro do corpo docente, à direção e a administração dessa instituição de ensino.

À minha orientadora professora Fernanda Souza do Nascimento, por todo conhecimento compartilhado, dedicação, carinho, amizade, paciência, compreensão. Muitíssimo obrigada pela orientação.

Ao querido professor Raimundo Nonato Colares, por toda ajuda e apoio na realização das minhas atividades, e por se colocar a disposição sempre que fosse preciso. Obrigada!

A todos os professores do curso de Geologia e colaboradores que foram tão importantes na minha formação acadêmica.

Aos professores José Augusto Corrêa do laboratório de Hidroquímica da UFPA, Jeremie Garnier do laboratório de geoquímica e água da UnB, Reginaldo Peleja e os técnicos Edvaldo Lemos e Flávia (LBA/Ufopa), pelo auxílio nos procedimentos analíticos das amostras.

À minha turma Geologia 2015, pelas muitas histórias e ensinamentos compartilhados durante minha vida acadêmica, em especial aos meus amigos Igor leal, Edson Rocha, Alex Alves, e Paulo Ricardo. E à minha amiga Emanuelle Viel que me ajudou direta e indiretamente, sempre me apoiando, incentivando e proporcionando momentos ótimos. Irei guardar todo esse carinho para sempre!

Aos amigos que foram de extrema importância para realização desse trabalho, Adson, Jessé, Isis e Bruno. Obrigada pelo valioso auxílio durante os trabalhos de campo.

Ao caro Seu Alaércio, vulgo Lala, pelo valioso e fundamental auxílio durante as coletas no campo, onde compartilhou seus conhecimentos de vida dos anos de experiência do trabalho com poços.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a qualidade da água em nove poços de lava-jatos que captam água do aquífero de Alter do Chão, na zona urbana de Santarém - PA. A finalidade desta análise é verificar a influência das águas residuais da lavagem de veículos na água do aquífero mediante análises físico-químicas da água destes poços em conjunto com a análise de GPR da área preferencial de escoamento e infiltração da água de lavagem. O método geofísico utilizado via GPR foi o eletromagnético que permite observar as regiões de interesse em subsuperfície. Para a determinação físico-química da água subterrânea, coletaram-se amostras de água em triplicata durante o período chuvoso de 2019, seguindo-se a metodologia do CETESB. Medidas de temperatura, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, pH e sólidos totais foram realizadas *in situ*, por meio de uma sonda portátil multiparâmetros AKSO-AK88, enquanto que análises físico-químicas de alcalinidade e dureza total, íons, e de metais pesados e arsênio foram realizados, nos laboratórios de Biologia Ambiental/Ufopa, Multianálises/Belém-PA, Hidroquímica/Ufpa e Geoquímica e água/Unb-DF, respectivamente. Os resultados obtidos pelo método GPR mostram que sete dos nove poços estudados apresentam, a partir de 1,5 m de profundidade, zonas atenuadas caracterizadas por baixa reflexão, possivelmente relacionadas com contaminação decorrentes dos fluidos residuais dos processos de lavagem. As águas subterrâneas foram classificadas como sódica-cloretada, ácida (pH médio de $3,73 \pm 0,30$), com temperaturas média de $30,01^{\circ}\text{C}$, brandas e poucas duras (dureza média de $48,00 \text{ mg/L} \pm 12,47 \text{ CaCO}_3$), mineralizadas (CE média de $252,50 \mu\text{S/cm} \pm 49,33 \mu\text{S/cm}$), pouco oxigenadas (OD médio de $3,37 \text{ mg/L} \pm 10,56$), límpida e transparente (STD média de $112,42 \text{ mg/L} \pm 27,47$) dentro do recomendado para água potável. A composição iônica de Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^{+} , K^{+} , e SO_4^{2-} esteve dentro do permitido pela resolução nacional para água potável, bem como as concentrações dos metais Cr, Pb, As, Cu e Zn. Por outro lado, todos os poços apresentaram água com relativa alta concentração de NO_3^{-} e Al, apresentando valores acima do limite estabelecido pela Portaria do Ministério da Saúde N°888/2021. Conclui-se que a água dos poços estudados apresenta riscos à saúde humana, tanto por sua composição iônica e metálica, como pela presença de plumas de contaminação em subsolo.

Palavras – chave: Águas subterrâneas. Lava-Jatos. GPR. Geoquímica. Contaminação. Santarém. Pará.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the water quality in nine car wash wells that collect water from the Alter do Chão aquifer, in the urban area of Santarém - PA. The purpose of this analysis is to verify the influence of wastewater from washing vehicles on the aquifer water through physical-chemical analyzes of the water from these wells in conjunction with the GPR analysis of the preferential area of flow and infiltration of the washing water. The geophysical method used via GPR was the electromagnetic one, which allows observing the regions of interest in the subsurface. For the groundwater physical-chemical technique, the water sample was collected in triplicate during the rainy season of 2019, following the CETESB methodology. Temperature, tolerated oxygen, electrical conductivity, pH and total solids measurements were measured in situ, using a portable multiparameter probe AKSO-AK88, while physical-chemical analyzes of alkalinity and total hardness, ions, and heavy metals and arsenic were carried out in the laboratories of Environmental Biology/Ufopa, Multianalysis/Belém-PA, Hydrochemistry/Ufpa and Geochemistry and Water/Unb-DF, respectively. The results obtained by the GPR show that seven of the nine wells studied had, from a depth of 1.5 m, attenuated zones detected by low reflection methods, possibly related to infection caused by residual fluids from the washing processes. Groundwater was classified as sodium-chlorinated, acidic (average pH of 3.73 ± 0.30), with average temperatures of 30.01°C , soft and a little hard (average hardness of $48.00 \text{ mg/L} \pm 12.47 \text{ CaCO}_3$), mineralized (average EC of $252.50 \mu\text{S/cm} \pm 49.33 \mu\text{S/cm}$), little oxygenated (average OD of $3.37 \text{ mg/L} \pm 10.56$), clear and transparent (average STD of $112, 42 \text{ mg/L} \pm 27.47$) within the recommended range for drinking water. The ionic composition of Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^{+} , K^{+} , and SO_4^{2-} was within the range allowed by the national resolution for drinking water, as well as the concentrations of metals Cr, Pb, As, Cu and Zn. On the other hand, all wells had water with a relatively high concentration of NO_3^{-} and Al, with values above the limit established by Ordinance of the Ministry of Health No. 888/2021. It is concluded that the water from the studied wells poses risks to human health, both because of its ionic and metallic composition, and because of the presence of underground contamination plumes.

Keywords: Groundwater. Car Wash. GPR. Geochemistry. Contamination. Santarém. Pará.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização dos lava - jatos, objetos do presente estudo, do Município de Santarém, Pará.....	17
Figura 2 - Geologia da área urbana de Santarém, Pará, Amazônia, Brasil, domínio na Formação Alter do Chão, Bacia do rio Amazonas	21
Figura 3 - Equipamento GPR do modelo GSSI Utility Scan DF SIR 3000, da UFOPA e seus componentes básicos	29
Figura 4 - Funcionamento da transmissão do GPR.....	29
Figura 5 - Zonas hídricas em subsuperfície.....	33
Figura 6 - Diagrama de Piper	34
Figura 7 - Área esquemática delimitada para a sondagem (10/12/2018), Santarém, Pará, A) Ponto 1, B) Ponto 2, C) Ponto 3	36
Figura 8 - Área esquemática delimitada para a sondagem (11/12/2018), Santarém, Pará, A) Ponto 4, B) Ponto 5, C) Ponto 6	36
Figura 9 - Área esquemática delimitada para a sondagem (12/12/2018), Santarém, Pará, A) Ponto 7, B) Ponto 8, C) Ponto 9	37
Figura 10 - Estrutura física dos poços amostrados em campo no presente estudo. A), B), C), D), E), F) Poços artesianos particulares	38
Figura 11 - Técnicas praticadas durante a coleta de água: A) Coleta de água para a análise de íons em garrafas plásticas de 500 ml; B) Uso de luva e de álcool para limpeza da boca do poço para futura coleta. Zona urbana, Santarém, Pará, período chuvoso, 2019	39
Figura 12 - Exemplo de correção estática, A) dado bruto e B) corrigido da Linha 5 (largura) obtida da sondagem do Lava - jato 1 do presente trabalho (10/12/2018).....	41
Figura 13 - A) Exemplo da etapa header gain da Linha 5 (largura), B) Exemplo da etapa ganho vertical da Linha 5 (largura), obtidos da sondagem do Lava - jato 1 do presente trabalho (10/12/2018)	42
Figura 14 - Exemplo da etapa corrida média da Linha 5 (largura) obtida da sondagem do Lava - jato 1 do presente trabalho (10/12/2018).....	42
Figura 15 - A), B), C) e D) Tratamento das amostras, com filtragem, e acidificação para futuras análises iônicas. Laboratório de Geologia da UFOPA, março e abril de 2019	44
Figura 16 - Radargrama 1 (Linha 8) do Lava-jato 1, 10/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processado interpretado.....	47

Figura 17 - Radargrama 3 (Linha 5) do Lava-jato 3, 10/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processa interpretado.....	47
Figura 18 - Radargrama 5 (Linha 4) do Lava-jato 5, 11/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processa interpretado.....	48
Figura 19 - Radargrama 6 (Linha 5) do Lava-jato 6, 11/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processa interpretado.....	48
Figura 20 - Radargrama 7 (Linha 3) do Lava-jato 7, 12/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processa interpretado.....	49
Figura 21 - Radargrama 8 (Linha 6) do Lava-jato 8, 12/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processa interpretado.....	49
Figura 22 - Radargrama 9 (Linha 2) do Lava-jato 9, 12/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processa interpretado.....	50
Figura 23 - Radargrama 2 (Linha 8) do Lava-jato 2, 10/12/2018, Santarém, Pará.....	50
Figura 24 - Radargrama 4 (Linha 2) do Lava-jato 4, 11/12/2018, Santarém, Pará.....	51
Figura 25 - Temperatura de água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	52
Figura 26 - pH de água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	53
Figura 27 - Concentrações de OD (em mg/L) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	54
Figura 28 - Condutividade elétrica (em $\mu\text{S}/\text{cm}$) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	55
Figura 29 - Alcalinidade (mg/L CaCO_3) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	56
Figura 30 - Dureza Total (mg/L CaCO_3) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	57
Figura 31 - Concentração de sólidos totais dissolvidos (em mg/L) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	58
Figura 32 - Concentração de sódio (em mg/L) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	59
Figura 33 - Concentração de potássio (em mg/L) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	60
Figura 34 - Concentração de cálcio (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	61

Figura 35 - Concentração de magnésio (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	62
Figura 36 - Concentração de nitrato (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	63
Figura 37 - Concentração de sulfato (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	64
Figura 38 - Concentração de cloreto (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	65
Figura 39 - Concentração de cromo (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	68
Figura 40 - Concentração de alumínio (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	69
Figura 41 - Concentração de chumbo (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	70
Figura 42 - Concentração de arsênio (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	71
Figura 43 - Concentração de cobre (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	72
Figura 44 - Concentração de zinco (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019	73
Figura 45 - Classificação hidrogeoquímica, segundo o Diagrama de Piper, da água dos poços tubulares da área urbana de Santarém, Pará, sistema aquífero Alter do Chão, período chuvoso (abril), 2019	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequência central das antenas versus profundidade máxima de penetração.....	30
Tabela 2 - Dados gerais da aquisição geofísica.....	37
Tabela 3 - Características dos poços tubulares de captação de água subterrânea em estudo no presente trabalho. Sistema aquífero Alter do Chão, zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019, no período chuvoso.....	40
Tabela 4 - Dados dos radargramas com maior número de feições melhores definidas, obtidos da sondagem geofísica nos lava-jatos estudados.....	45
Tabela 5 -Características físico-químicas da água subterrânea dos poços da área urbana do município de Santarém, Pará, abril de 2019.....	66
Tabela 6 - Concentração de metais e as (mg/L) da água subterrânea dos poços da área urbana do município de Santarém, Pará, abril de 2019. Período chuvoso.	74
Tabela 7 - Relação de erro permissível em função da soma de cátions e ânions	76
Tabela 8 - Balanço iônico das amostras	76

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	14
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo	15
1.1.1 Específicos	15
1.2 Justificativa	16
1.3 Localização	16
CAPÍTULO 2	18
2 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA	18
2.1 Geologia	18
2.1.1 Bacia do Amazonas	18
2.1.2 Formação Alter do Chão	19
2.2 Geomorfologia	20
2.3 Hidrogeologia	22
2.4 Vegetação	22
2.5 Clima	23
CAPÍTULO 3	23
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1 Lava-Jatos	23
3.2 Principais Produtos	24
3.2.1 Surfactantes	24
3.2.2 Graxa e Óleo lubrificantes	25
3.2.3 Combustíveis fósseis	26
3.3 Ground Penetrating Radar – Gpr	27
3.3.1 Fundamentos do GPR	28
3.3.2 Profundidade de penetração	29
3.3.3 Histórico do GPR em investigações ambientais	30
3.4 Geoquímica de Água	32
3.4.1 Hidroquímica e qualidade das águas	32
3.4.2 Padrão de potabilidade	33
3.4.3 Classificação das Águas	34
CAPÍTULO 4	35
4 METODOLOGIA	35
4.1 Levantamento Pré – Campo	35
4.2 Levantamento de Campo	36
4.2.1 Aquisição dos dados de GPR	36
4.2.2 Coleta De Água	37
4.4 Processamento e Interpretação dos Dados GPR	41

4.5 Tratamento e Análise Química da Água.....	43
CAPÍTULO 5.....	45
5 RESULTADOS E DISCURSÕES.....	45
5.1 Sondagem Geofísica.....	45
5.2 Geoquímica da Água	51
5.2.1 Parâmetros Físico-Químicos	51
5.2.2 Composição Iônica.....	58
5.2.3 Metais e Arsênio	67
5.3 Caracterização Hidrogeoquímica.....	75
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
REFERÊNCIAS	79

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas são um importante constituinte do ecossistema e de sua conservação, sendo um relevante recurso hídrico para abastecimento doméstico, indústria e irrigação, devido à sua boa qualidade natural, além de ser um bem natural abundante (TANCREDI, 1996). O elevando consumo das águas subterrâneas ao longo os anos tornou-a um alvo de contaminação decorrente tanto de atividades socioeconômicas relacionadas ao meio urbano, como da deficiência na abrangência dos serviços de abastecimento público.

Os empreendimentos de lavagem automotiva despejam no ambiente quantidades consideráveis de efluentes contendo resíduos de produtos químicos tanto de detergentes e sabões como de derivados de petróleo, dos quais se destacam as graxas, óleos lubrificantes, combustíveis fósseis (BARBOSA, 2015). Tais efluentes, dado que são frequentes e diários, infiltram-se no solo e alcançam o lençol freático, contaminando os depósitos de água mais superficiais e a longo prazo, os mais profundos do sistema de água subterrânea. Como consequência, tem-se a degradação do sistema aquífero que compromete o serviço abastecimento público, a saúde humana e o ecossistema na totalidade.

Estudos hidroquímicos analisam diferentes parâmetros indicadores da qualidade da águas, como os teores de substâncias dissolvidas nas águas subterrâneas os quais tendem a aumentar à medida que estas se movimentam nas formações geológicas. As variações naturais do material dissolvido das águas subterrâneas normalmente são pequenas, no entanto, anomalias podem ocorrer como produto da lixiviação natural dos corpos de minério, do metamorfismo de rochas e da ação antrópica (CAJAZEIRAS, 2007).

A aquisição de informações acerca das águas subterrâneas, ao longo dos anos, vem sendo realizada de forma pontual e restrita, por meio de medições em poços de monitoramento (PEDROSA, 2004). No entanto, através desse método não é possível se ter, por exemplo, um entendimento da extensão e geometria de zonas de contaminação em subsuperfície. Com isso, há a necessidade de se obter do subsolo imagens contínuas e precisas a partir de outras técnicas.

Entre as diversas técnicas geofísicas, destaca-se o método GPR - *Ground Penetrating Radar* ou Radar de Penetração do solo que é muito utilizado, pois permite o levantamento de perfis contínuos, rapidez no levantamento de campo, e possui caráter não destrutivo, não invasivo e com baixo custo de operação (REYNOLDS, 1997), o que o torna adequado para

mapear estruturas e objetos presentes na subsuperfície, bem como no mapeamento de plumas de contaminação de hidrocarbonetos.

Diante disso, o presente trabalho buscou mapear e/ou diagnosticar pluma de contaminação por resíduos provenientes da lavagem automotiva mediante uso do GPR e da caracterização físico-química da água subterrânea das áreas de lava-jatos da área urbana da cidade de Santarém, Pará. A finalidade é verificar se a água de lavagem alcança o sistema aquífero Alter do Chão afetando a qualidade da água que abastece a população. Contribuir dessa maneira com conhecimento nos estudos de monitoramento de águas subterrâneas, e fornecer bases científicas para a elaboração de políticas públicas que lidam com o uso público dos recursos hídricos.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo utilizar o método geofísico GPR na identificação de fluidos subsuperficiais provenientes dos serviços de lavagem automotiva bem como caracterizar quimicamente a água dos poços desses estabelecimentos privados que são captadas para esse serviço prestado no centro urbano de Santarém, Pará, Amazônia Brasileira.

1.1.1 Específicos

- Detectar, delinear e delimitar eventuais plumas de contaminantes dos fluidos infiltrados no subsolo a profundidade de 3,5 m com uso do GPR;
- Avaliar a qualidade da água quanto a concentração de metais pesados (Cr, Al, Pb, As, Cu e Zn);
- Classificar a água subterrânea segundo a concentração de cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) e ânions (Cl^- , SO_4^{2-} e NO_3^-) utilizando o diagrama de Piper;
- Classificar a qualidade da água subterrânea mediante determinação dos parâmetros físico-químicos de qualidade das águas (CE, pH, T, OD, STD);
- Verificar se o teor de substâncias detectadas está de acordo com a norma brasileira do Ministério da Saúde para água potável (BRASIL, 2021).

1.2 Justificativa

A principal fonte de captação de água para abastecimento público da cidade de Santarém é o aquífero Alter-do-Chão. No entanto, esse sistema está sujeito à degradação dos aquíferos mais superficiais devido a cargas significativas despejadas através dos esgotos domésticos e de serviços envolvendo produtos derivados do petróleo, comprometendo tanto o aquífero como o abastecimento urbano. Dentre os produtos químicos residuais provenientes de serviços de lavagem, troca de peças e óleo de veículos automotores que se destacam tanto pelos efeitos nocivos para a saúde humana como ao ecossistema, encontram-se os derivados do petróleo como a gasolina e o óleo diesel, graxas, óleos e os produtos de limpeza como sabões e detergentes difusores de fragrâncias (SILVA; OLIVEIRA, 2011)

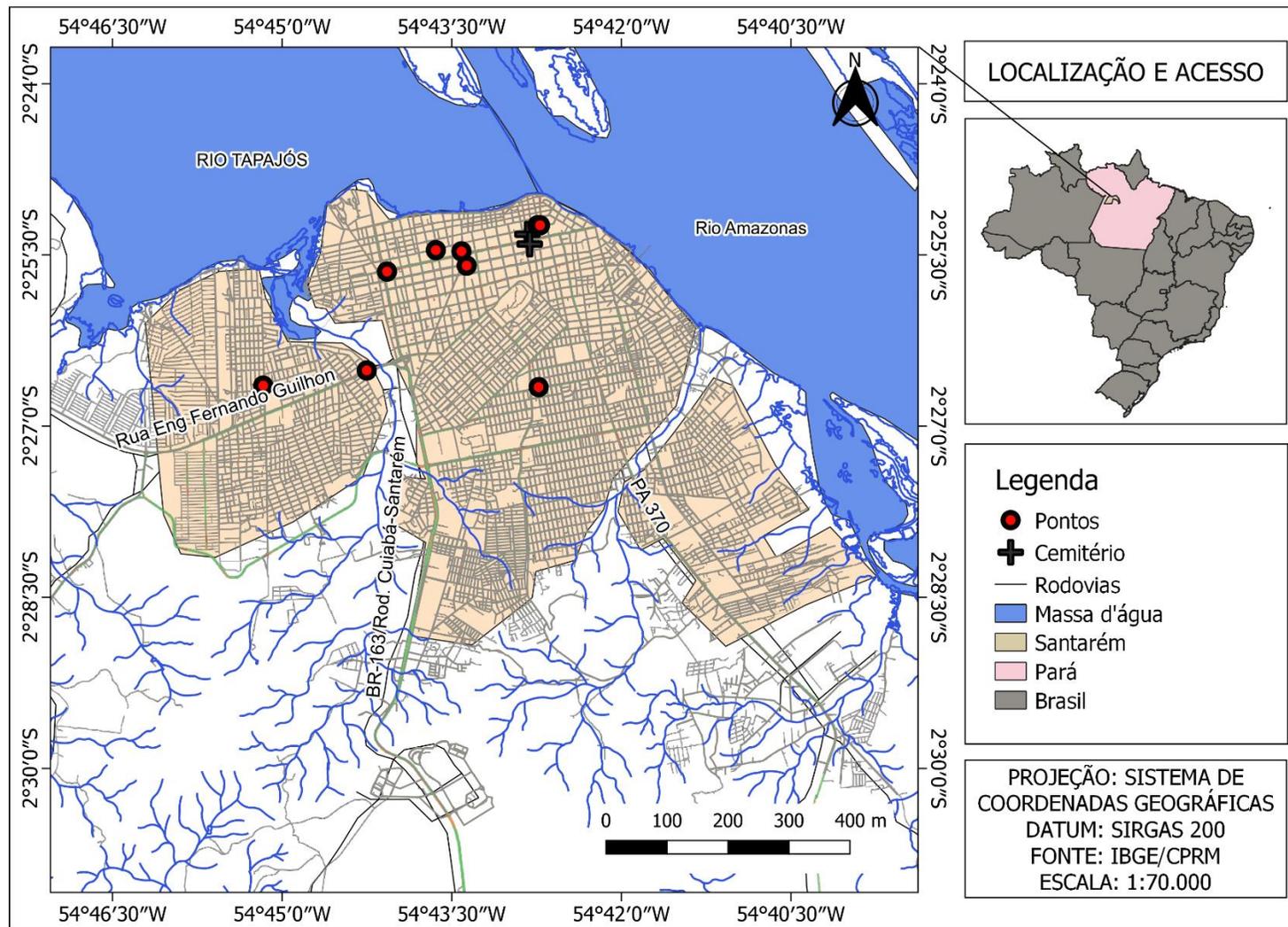
Embora de difícil observação direta, as plumas de contaminação de derivados de hidrocarbonetos, por exemplo, podem ser detectadas com sucesso através do uso do Radar de Penetração do Solo (Ground Penetrating Radar, GPR), pois a permissividade relativa e a condutividade dos hidrocarbonetos são relativamente baixas comparadas às rochas do subsolo e à água subterrânea, por isso são as propriedades físicas contrastantes em que o método se baseia.

Diante do exposto, bem como da escassez, ou até mesmo da ausência, de investigação em Santarém com enfoque na qualidade da água subterrânea de poços das áreas de lavagem automotiva (lava-jatos) que, atualmente, somam cerca de 36 unidades só no centro urbano, considera-se a região promissora para o desenvolvimento do estudo aqui proposto, que envolve a integração de ferramenta geofísica (GPR) e geoquímica no estudo da qualidade da água subterrânea.

1.3 Localização

Os empreendimentos de lavagem automotiva (lava-jatos), objeto de estudo do presente trabalho, são localizados no município de Santarém, Estado do Pará na Mesorregião do Baixo Amazonas (Figura 1). Foram selecionados nove (09) lava-jatos da área urbana de Santarém, de acordo com os critérios que incluem desde o ano de início de funcionamento, facilidades operacionais para a obtenção dos perfis GPR e a acessibilidade ao local pelo proprietário

Figura 1 - Localização dos lava - jatos, objetos do presente estudo, do Município de Santarém, Pará.



Fonte: Base cartográfica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade - SEMAS (2017), modificado por Autor (2022)

CAPÍTULO 2

2 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA

2.1 Geologia

O registro sedimentar da Cidade de Santarém, onde estão localizados os poços dos lava-jatos, objetos do presente estudo, é de parte da Formação Alter do Chão, a segunda mais jovem formação geológica da Bacia do rio Amazonas.

2.1.1 Bacia do Amazonas

A Bacia sedimentar do Amazonas é classificada como uma bacia paleozoica intracratônica, que abrange uma área de aproximadamente 500.000 km². Seus extratos sedimentares recobrem as províncias pré-cambrianas dos escudos das Guianas e do Brasil central (CUNHA *et al.*, 1994). A Bacia é alongada com tendência elipsoidal WSW – ENE, e limita-se a oeste com a Bacia do Solimões pelo Arco de Perus e, a leste, com o arco de Gurupá que separa da Bacia do Marajó.

O pacote sedimentar paleozoico depositou-se sob o substrato granítico – metamórfico da Bacia, proveniente das variações do nível do mar e dos eventos tectônicos que ocorreram na placa gondwânica, de cerca de 7 km de espessura e predominantemente constituído por rochas siliciclásticas intrudidas por diques e soleiras de diabásio (CORDANI *et al.*, 1984; 2000; CUNHA *et al.*, 2007).

As rochas sedimentares da bacia do Amazonas estão inseridas em duas megassequências de primeira ordem, uma de idade paleozoica, intrudida por diques e soleiras de diabásio e outra Mesozoico – Cenozoica completamente sedimentar. A megassequência Paleozoica ainda está subdividida em quatro sequências de segunda ordem, intituladas como: Sequência Ordovício-Devoniana, Sequência Devono-Tournaisiana, Sequência Neoviseana e Sequência Pensilvaniano-Permiana (CUNHA *et al.*, 2007).

A Sequência Ordovício – Devoniana registra sedimentos glaciais e marinhos do Grupo Trombetas (Formações Autás-Mirim, Nhamundá, Pitinga, Manacapuru e Jatapu), decorrentes do estágio inicial de deposição na sinéclise, associados a um ciclo transgressivo – regressivo, de caráter pulsante. A sequência Devono-Tournaisiana aponta uma sedimentação marinha com incursões glaciais de Grupo Urupadi (Formações Maecuru e Ererê) e o Grupo

Curuá (Formações Barreirinha, Curiri e Oriximiná), originados de um novo ciclo sedimentar transgressivo – regressivo (CUNHA, 2000, CUNHA *et al.*, 2007, MATSUDA *et al.*, 2010).

A sequência Neoviseana passou por um estágio de soerguimento e erosão decorrente da Orogenia Acadiana, onde ocorreu intensa atividade tectônica atuante nas margens da Placa Sul-Americana, sendo responsável pela discordância que a separa da unidade sobreposta, a Formação Faro (MATSUDA *et al.*, 2010). Na sequência Pensilvaniano – Perminiana um novo ciclo deposicional de natureza transgressivo – regressiva ocorreu na Sinéclise do Amazonas, após um hiato temporal de cerca de 15 Ma. Esta sequência é constituída pelo Grupo Tapajós, o qual contempla as formações Monte Alegre, Itaituba, Nova Olinda e Andirá (CUNHA *et al.*, 2007).

A Megassequência Meso – Cenozóica compreende a Sequência Cretácea – Terciária re-presentada pelo Grupo Javari (Formação Alter do Chão e Solimões), decorrente de um sistema fluvial de alta energia. A Megassequência Meso – Cenozóica corresponde a novos ciclos de posicionais na Bacia do Amazonas, através de relaxamento tectônico, após a atuação dos esforços compressivos relacionados ao Diastrofismo Juruá (CUNHA, 2000; CUNHA *et al.*, 2007).

2.1.2 Formação Alter do Chão

A Formação Alter do Chão, datada do Cretáceo Inferior ao Cretáceo Superior, está assentada sobre a discordância do topo paleozóico e possui aproximadamente 400.000 km² de superfície aflorante da Bacia do rio Amazonas (BARATA; CAPUTO, 2007). A Alter do Chão é constituída por arenitos avermelhados, argilitos, conglomerados e brechas intraformacionais, decorrente de sistemas fluviais e lacustre/deltaico (KISTLER, 1954; CUNHA *et al.*, 1994; TANCREDI, 1996). Ainda, tais rochas são descritas como friáveis e pouco coesas, intercaladas por crosta lateríticas, de coloração avermelhada intensa, responsáveis pela preservação tubular do relevo (ANDRETTA, 2014).

As rochas siliciclásticas da Formação Alter do Chão, estão abaixo dos depósitos aluviais quaternários, apresentando localmente espessura de 600 m. Tais depósitos são construídos por seixos e areias de tonalidades claras, e apresentam localmente espessura de 20 m, nos baixos curso dos igarapés da região, e mais espessas na planície aluvial do rio Amazonas (TANCREDI, 1996).

Estudos geoquímicos em arenitos vermelhos dessa unidade geológica, indicam que fatores como, as variações da composição da rocha fonte, intensidade do intemperismo, taxa de disposição, seleção granulométrica durante o transporte e deposição, pedogênese pós deposi-

cional e a diagênese, bem como as condições climáticas, são os grandes responsáveis pela diversificação litológica da Formação Alter do Chão (HORBE *et al.*, 2006).

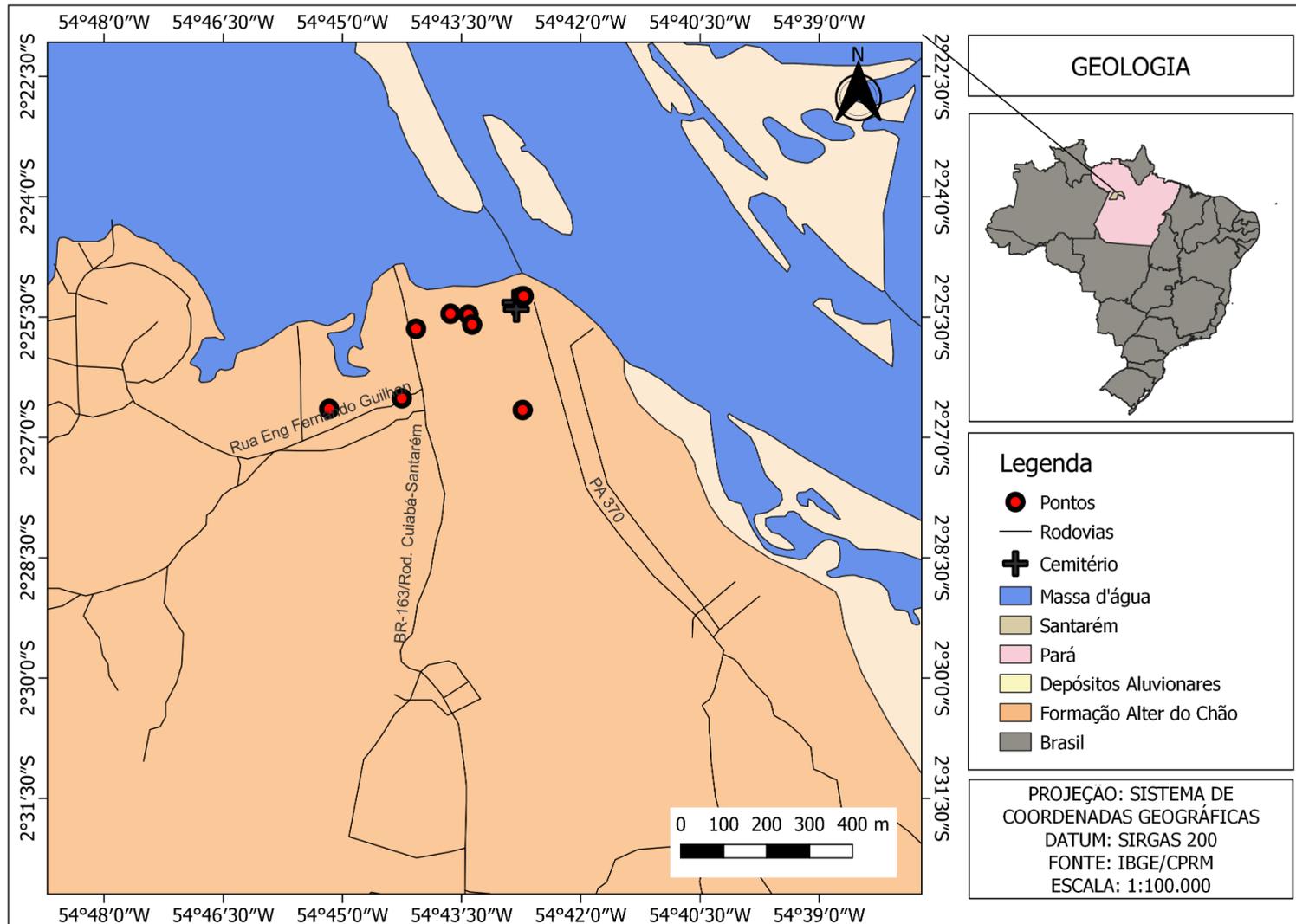
Na Formação Alter do Chão encontra-se o depósito subterrâneo de água do sistema aquífero homônimo, dividido em dois tipos de aquíferos. O aquífero livre, mais superficial, e o confinado, mais espesso e mais profundo, constituídos principalmente por areias, argilitos e arenitos de granulação de fina a grossa, controlando os fenômenos relacionados à interação água/rocha da região (CUNHA *et al.*, 2007; TANCREDI, 1996).

2.2 Geomorfologia

A unidades geomorfológicas caracterizadas a partir dos estudos do Projeto RADAMBRASIL (BRASIL, 1976), para o município de Santarém, são divididas em três domínios: Planície Amazônica, Planalto Rebaixado da Amazônia e o Planalto Tapajós-Xingu. A origem da paisagem geomorfológica do Pará está relacionada ao evento de fragmentação do Cráton Amazônico, de idade paleozóica, e à individualização dos escudos das Guianas e Sul-Amazônico (JOÃO *et al.*, 2013).

Na unidade Planície Amazônica encontram-se destacadas as planícies de inundação que ocorrem na calha do rio Amazonas e diversas formas de relevo como bancos, cordões e barras de deposição. O Planalto Rebaixado da Amazônia, localizado no centro norte do município de Santarém, consiste na unidade de transição da planície inundável com o Planalto Tapajós – Xingu, situado entre 50 e 100 m de altitude. Quanto ao Planalto Tapajós – Xingu, unidade características do centro sul do município, este apresenta extensas superfícies tabulares recobertas por matas de “terra firme”, com cotas que variam entre 100 e 250 m (JOÃO *et al.*, 2013; BRASIL, 1976).

Figura 2 - Geologia da área urbana de Santarém, Pará, Amazônia, Brasil, domínio na Formação Alter do Chão, Bacia do rio Amazonas



Fonte: Adaptado da Base cartográfica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2017) e do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2008).

2.3 Hidrogeologia

O município de Santarém, assim como outros municípios dos estados do Pará, Amazonas e Amapá, está localizado na região hidrogeologicamente mais rica do planeta, na bacia hidrográfica do rio Amazonas e sobre o sistema aquífero Alter do Chão, da Formação sedimentar geológica homônima, o qual possui área de ocorrência de 410.000 km², espessura média de 400 m, podendo alcançar 1.250 m na bacia do Amazonas, e está incluindo na Região Hidrográfica Dominante do Amazonas (BARATA; CAPUTO, 2007; SOUZA *et al.*, 2011; ANA, 2005). Em Santarém, esse reservatório é formado por dois tipos de aquíferos, o aquífero livre, na parte superior, com aproximadamente 50 m e na porção inferior, com cerca de 400 m, encontram-se os aquíferos com características de confinado (TANCREDI, 1996).

Nessa região destacam-se basicamente duas feições geomorfológicas que desempenham importante papel sobre o sistema aquífero. O chamado planalto santareno com cotas de 200 m, na porção sul da cidade, destaca-se como a zona de recarga do aquífero e a região de planície, em direção ao norte e suas áreas inundáveis, que constituem a zona de descarga do aquífero, identificada pelas direções principais dos fluxos da água subterrânea para fontes, igarapés e para o canal dos rios Tapajós e Amazonas (TANCREDI, 1996).

2.4 Vegetação

A cobertura vegetal presente na região do município de Santarém abrange cerca de 18.000 km², configurando 69% do espaço total do Município. A região apresenta quatro categorias de formações florestais, que são: em “terra firme”, a floresta equatorial subperenifólia e cerrado equatorial subperenifólio, e em áreas sujeitas a inundação observa-se floresta equatorial higrófila de “várzea” e campos equatoriais higrófilos de “várzeas”. Essa variação é decorrente dos tipos de solos e drenagem hídrica (RODRIGUES *et al.*, 2001; ANDRADE, 2015).

Na região norte, o grupo de floresta equatorial subperenifólia de “terra firme” é considerado as maiores formações florestais devido ao clima quente associado à elevada pluviosidade, propiciando o surgimento da floresta densa. A cobertura “terra firme” é representada principalmente por tipos florístico em que predominam espécies sempre – verde, no entanto, com folhagens pouco reduzidas, em razão da perda de folhas no período de estiagem (RODRIGUES *et al.*, 2001; ANDRADE, 2015).

2.5 Clima

O clima da região é predominantemente quente e úmido, apresentando temperaturas médias entre 24 °C e 25 °C e máximas oscilando entre 30 °C e 31 °C, com umidade relativa média do ar de 69%. Assim como a outras áreas do mundo próximas ao equador, a região não está sujeita a mudanças significativas de temperatura. A precipitação pluvial média anual é de 1.800 mm, com maior intensidade nos meses entre dezembro e abril, caracterizando-os como o período relativamente mais chuvoso que nos meses de maio a novembro, que compreendem o período menos chuvoso (RODRIGUES *et al.*, 2001; ANDRADE, 2015).

CAPÍTULO 3

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Lava-Jatos

Os lava-jatos são empreendimentos de pequeno porte que colaboram para o desenvolvimento e distribuição de renda das cidades, empregando pessoas e se estabelecendo cada vez mais como parte básica do setor de serviços privados automotivos na economia (SEBRAE, 2012). Porém, assim como a maioria dos empreendimentos relacionados com a atividade automotiva, os lava-jatos precisam se adequar a sustentabilidade ambiental, tratando seus efluentes e reutilizando a águas residuárias.

As lavagens automotivas, além de ser um meio de elevado desperdício de água, geram também grandes quantidades de resíduos, pois a água proveniente dessas lavagens transporta para o solo e aquíferos surfactantes de vários tipos, biodegradáveis ou não, restos de poeira, graxa, óleo lubrificante, combustíveis e todo tipo de resíduo produzido pelos auto-motores.

Sérios riscos de contaminação provenientes desses estabelecimentos são causados principalmente devido à percolação da água com a presença de resíduos proveniente das lavagens, que não sempre são detectados imediatamente. Geralmente, a evidência de contaminação ocorre quando esses produtos afloram em galerias de esgotos, redes de drenagem pluviais, poços de abastecimento de água, dentre outros.

De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em sua resolução 362/2005, ficam proibidos quaisquer descartes de óleos usados ou contaminados em solos, subsolos, nos corpos da água e nos sistemas de esgoto ou evacuação de águas residuais

(BRASIL, 2005). Nesse contexto, as lavagens automotivas são classificadas como potenciais fonte de poluição.

Com o objetivo de minimizar impactos negativos causados por empreendimento com potenciais degradadores, a Política Nacional do Meio Ambiente instituída pela Lei 6.938/81 deixa claro que:

Art. 10º - (...) a construção, instalação, ampliação e funcionamento de estabelecimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, considerados efetiva ou potencialmente poluidores, bem como os capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, dependerão de prévio licenciamento por órgão estadual competente, integrante do SISNAMA, sem prejuízo de outras licenças exigíveis (BRASIL, 1981).

Diante disso, os lava-jatos são empreendimentos que não devem ser implantados em lugares com solo permeável, sendo necessário possuir em suas instalações caixas de areia para reter o material mais pesado resultante da lavagem dos automóveis, como também caixas separadoras de água e óleo e um plano de gerenciamento de resíduos sólidos (BARBOSA, 2015).

Segundo a Resolução COEMA Nº 162/2021, a atividade de lava-jatos é considerada como potencial poluidor/degradador de porte grande. Já são bastante significativos os impactos causados por esta atividade e, portanto, esse setor de serviços precisa se adequar às leis ambientais (BARBOSA, 2015). Além disso a resolução CONAMA Nº 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, deixa claro que:

Art. 3º - Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis (BRASIL, 2011).

3.2 Principais Produtos

3.2.1 Surfactantes

Os detergentes são constituídos por agentes umedecedores ou tensoativos, agente complexante e uma base para neutralizar ácidos presentes na solução. Os tensoativos são os chamados surfactantes, que possuem porções hidrofóbicas ou apolar e hidrofílica ou polar.

Comumente, a porção apolar é constituída por hidrocarbonetos de cadeias alifáticas grupos policíclicos ou aromáticos, enquanto a porção polar pode ser iônica (catiônica ou aniônica), não-iônica ou anfótera (NITSCHKE; PASTORE, 2002).

Os surfactantes são compostos orgânicos que promovem a limpeza de superfícies diversas e também emulsionam óleos formando suspensões, a partir da diminuição da tensão superficial da água. Esses compostos são utilizados em diversos setores da indústria, sobretudo no setor de detergente, mas também são utilizados na indústria têxtil, indústria alimentar, tinturarias, cosmética, manufatura de papel, mineração, dentre outros (COSTA, 2006).

A utilização excessiva dos surfactantes causa danos ao meio ambiente, tais como: alteração na conduta do oxigênio, por meio das membranas dos organismos aquáticos; eutrofização dos lagos devido à presença de fosfatos combinados com tensoativos; gosto adstringente para as águas que tenham uma concentração de tensoativos superior a formação de espuma. Alguns detergentes utilizam perborato sódico em sua formulação, ocasionando o aumento progressivamente da quantidade de boro nos solos, águas superficiais e profundas, tornando-se tóxicos para algumas espécies de plantas, comprometendo o mecanismo de absorção das raízes, e o consumo humano de doses relativamente altas de boro afeta o sistema nervoso central. (COSTA, 2006; WHO, 1998; ACCIOLY; NEVES, 1976).

3.2.2 Graxa e Óleo lubrificantes

A graxa e óleo lubrificante são substâncias orgânicas de origem vegetal, animal e mineral. Tais substâncias são solúveis em n-hexano, também identificadas como materiais solúveis em hexano (hidrocarbonetos alcanos), que incluem gorduras, ácidos graxos, graxas livres, óleo mineral, ésteres, e outras matérias graxas, determinados em ensaios padronizados (SOLEIRO, 2014).

Os contaminantes químicos contendo óleos e graxas são divididos em compostos orgânicos e inorgânicos. O presente estudo dará ênfase apenas ao grupo de contaminantes orgânicos derivados do petróleo, os hidrocarbonetos, que possui como principal fonte os combustíveis fósseis, petróleo e carvão (BARBOSA, 2015).

Os óleos e graxas derivados de petróleo apresentam longas cadeias de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, alta viscosidade e, que quando descartados no ambiente, são deteriorados parcialmente formando compostos oxigenados como os ácidos orgânicos e cetonas, compostos aromáticos polinucleares como resinas e lacas, as quais são potencialmente

carcinogênicas, além dos metais pesados provenientes do desgaste dos motores (SILVA; OLIVEIRA, 2011).

O teor de óleos lubrificantes e graxas (TOG) é um importante parâmetro para caracterização de um efluente. O TOG é função de todas as substâncias solúveis em hexano, sendo que nos efluentes provenientes das lavagens automotivas, os contaminantes contidos em óleo e graxas são de origem mineral e, conseqüentemente, são de difícil remoção e biodegradabilidade (SOLEIRA, 2014). Esses contaminantes são menos densos que água, tendem a migrar através da zona saturada em um fluxo descendente até atingir o nível freático e, a partir disso o contaminante tende a migrar de forma lateral até atingir os diferentes compartimentos de água (TAPAJÓS, 2008).

Desta forma, a resolução CONAMA 430/2011, estabelece o parâmetro de lançamento de efluentes de óleo e graxa de origem mineral de até 20 mg/L, e os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento. Com relação à poluição do solo, a resolução CONAMA 362/2005 enfatiza a proibição de qualquer descarte de óleos usados ou contaminados em solos, subsolos, nas águas interiores, no mar territorial, na zona econômica exclusiva e nos sistemas de esgoto ou evacuação de águas residuais (BARBOSA, 2015).

3.2.3 Combustíveis fósseis

Os hidrocarbonetos são compostos orgânicos formados por átomos de carbono e hidrogênio, contendo ainda oxigênio, nitrogênio e enxofre em sua composição. A cada ano o consumo de derivados do petróleo aumenta, entre os quais estão os derivados do petróleo bruto, como a gasolina, óleo diesel e o etanol (álcool combustível) (ISSA, 2014).

A gasolina é um combustível fóssil de densidade 0,7221, composto na sua maioria por componentes alifáticos (41 a 62%) e aromáticos (10 a 59%), substâncias essas que servem para minimizar o seu efeito no meio ambiente, além de aumentar o seu desempenho (BEZERRA, 2011). Nos componentes alifáticos estão inclusos o butano (C₄), penteno (C₅) e o octano (C₈), enquanto que os aromáticos englobam o benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, conhecidos como BTEX (PENNER, 2000; BRITO *et al.*, 2005; SILVA, 2010).

Os BTEXs (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) estão entre os principais contaminantes dos solos e águas subterrâneas. São gerados durante o processo de destilação e são relacionados aos produtos de petróleo refinados, como a gasolina, o querosene e o óleo diesel. Representam os constituintes mais solúveis em água e mais móveis da fração dos

combustíveis, por isso são os primeiros a chegar ao nível freático, causando graves problemas contaminação por possuírem alta toxicidade (PENNER, 2000).

O óleo diesel é um derivado da destilação do petróleo bruto composto principalmente por hidrocarbonetos de cadeias simples e não ramificadas, formadas por 8 a 16 carbonos e, em baixas concentrações, por enxofre, nitrogênio e oxigênio (PETROBRAS, 2021). Os componentes desse combustível devido ao seu peso molecular são menos voláteis, causando menor solubilidade em água e exibem menor mobilidade que os componentes da gasolina, além de serem isentos de material em suspensão e com odor forte e característico (SILVA, 2010).

As substâncias da classe dos aromáticos policíclicos como naftaleno, são as mais impactantes encontradas no óleo diesel, uma vez que apresentam grande mobilidade. Tais produtos são altamente tóxicos e provocam o desenvolvimento de problemas de saúde, podendo causar leucemia e até mesmo levar a morte (FINOTTI *et al.*, 2001).

O etanol é produto da fermentação de açúcares, é possui fórmula molecular C_2H_6O . Este produto além de ser utilizado como etanol anidro, pode formar a gasolina tipo C quando misturado com a gasolina tipo A, bem como etanol hidratado, comercializado em todo país, e é indicado como combustível em motores de combustão interna de ignição por centelha, conforme a Resolução nº 36/05 da ANP (ANP, 2005).

O etanol pode interferir na solubilidade dos hidrocarbonetos em sistemas subsuperficiais, por meio da cossolvência, com isso, compostos como benzeno, tolueno, o-xileno, naftaleno, antraceno e pireno são crescentemente solubilizados na presença de etanol superiores a 10%, tal como a gasolina C, caso atinjam as águas subterrâneas (CORSEUIL; FERNANDES, 1999).

Portanto, os BTEXs são reconhecidos como poluentes prioritários pela U.S Environmental Protection Agency - USEPA (USEPA, 1996). Logo, é fundamental o monitoramento das águas subterrâneas visando à identificação desses compostos BTEX, a partir de estudos realizados nos estabelecimentos de lavagem automotiva, por serem potenciais causadores desse tipo de contaminação.

3.3 Ground Penetrating Radar – Gpr

O método geofísico Radar de Penetração do Solo – GPR é muito utilizado em investigações da área ambiental, pois através da emissão de radiação eletromagnética de alta frequência é possível detectar as sucessivas reflexões produzidas do subsolo. O método também se baseia nas diferentes propriedades eletromagnéticas do solo, permitindo-se estimar as

profundidades das interfaces de reflexão, conhecendo-se a velocidade de propagação das ondas (SILVA, 2013).

3.3.1 Fundamentos do GPR

O GPR utiliza ondas eletromagnéticas (EM) de alta frequência (entre 10 e 2.500 MHz), similares a ondas de rádio, nas sondagens do subsolo para o mapeamento estruturas e feições rasas geológicas ou não, da subsuperfície. O método apresenta um formato gráfico contínuo, permitindo rapidez na verificação das anomalias encontradas em subsolo (MARQUES, 2007).

O equipamento *GPR* é formado por duas antenas, uma transmissora que emite ondas eletromagnéticas para o subsolo, e outra receptora que faz a captação das ondas refletidas após atingir as estruturas internas presentes. O equipamento ainda é constituído por uma fonte de energia (acoplada ao computador), sistema de armazenamento digital, computador de monitorização e um carrinho de transporte de antenas (Figura 3). A forma com que as ondas eletromagnéticas são emitidas e como elas se propagarão no subsolo dependerão da frequência gerada pela antena e das propriedades elétricas (condutividade elétrica e constante dielétrica) e magnéticas dos materiais (permeabilidade magnética) do subsolo (ORTEGA, 2006; MARQUES, 2007).

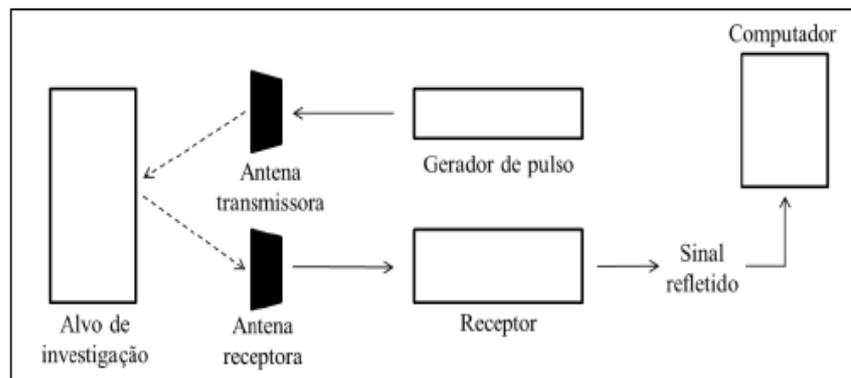
O gerador de energia eletromagnética presente no equipamento emite sinal para o solo por meio de antena transmissora, esse sinal sofre refração e/ou reflexão ao atingir as estruturas internas presentes. O pulso eletromagnético do *GPR* é refletido devido aos contrastes nas propriedades elétricas dos materiais (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética). A radiação refletida é captada pela antena receptora, e o sinal obtido é amplificado, digitalizado e armazenado para um processamento posterior (Figura 4) (ORTEGA, 2006; MARQUES, 2007).

Figura 3 - Equipamento GPR do modelo GSSI Utility Scan DF SIR 3000, da UFOPA e seus componentes básicos



Fonte: Autor (2022)

Figura 4 - Funcionamento da transmissão do GPR



Fonte: BUENO *et al.*, 2015

O método GPR é sensível a meios onde possuem alta condutividade elétrica, promovendo forte atenuação do sinal e, assim limitando a profundidade de penetração da onda eletromagnética. A quantidade de água e ar nos poros do solo; a salinidade (aumento do sal na água eleva a condutividade); presença de argila; assim como contaminantes inorgânicos ou orgânicos em processos de biodegradação, geram atenuação do sinal, pois modificam a condutividade elétrica do meio (SANTOS, 2005; ORTEGA, 2006).

3.3.2 Profundidade de penetração

A resolução e profundidade de investigação do GPR irá variar de acordo com a frequência da antena. O alto valor da frequência emitida gera uma boa resolução de estruturas

localizadas próximas à superfície, isto é, quanto maior o sinal da frequência emitida melhor será a resolução, no entanto menor será a profundidade de penetração no subsolo. A escolha da antena depende do objetivo do levantamento, das dimensões e profundidade do alvo, bem como das condições geológicas locais (LOURENÇO, 2012; SILVA, 2013).

A propriedade elétrica dos materiais (condutividade, permissividade e permeabilidade) também influencia na profundidade de penetração, ocasionando atenuação na onda eletromagnética. A profundidade de penetração das ondas será reduzida ao encontrar materiais altamente condutivos, como a argila, devido à energia eletromagnética ser rapidamente dissipada, causando perda de sinal de profundidade (ORTEGA, 2006; MARQUEZ, 2007).

Tabela 1 - Frequência central das antenas versus profundidade máxima de penetração

Frequência central (MHz)	Profundidade máxima de penetração (m)
100	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Fonte: Porsani (1999)

3.3.3 Histórico do GPR em investigações ambientais

O método GPR começou a ser utilizado na exploração geofísica a partir de avanços tecnológicos ocorridos na década dos anos de 1980, dessa forma, fez com que vários tipos de GPR fossem fabricados, e possibilitou o aumento dos números de publicação a respeito da utilização do método (ORTEGA, 2006). Diversos trabalhos foram realizados utilizando o Radar de Penetração do Solo (GPR) em estudo de contaminação.

Brewster e Annam (1994) utilizaram o equipamento GPR para demonstrar que a presença de contaminantes do tipo DNAPLs (*Dense non aqueous phase liquids*), causam acréscimo de velocidade da onda eletromagnética em até 30%.

Sauck *et al.* (1998) apresentaram diferentes usos de métodos geofísicos, dentre eles o *GPR*, no mapeamento de áreas contaminadas por vazamento de óleo cru e gasolina de uma refinaria. Verificaram nas seções de geofísicas de *GPR* regiões anômalas, caracterizadas por zonas de sombras, demonstrando que os métodos geofísicos possuem grande aplicabilidade na identificação de áreas contaminadas.

Castro e Branco (2002) avaliaram o desenvolvimento de uma pluma de contaminação por hidrocarboneto através do método *GPR* ao longo de um período de 15 meses em um posto de gasolina na cidade de Fortaleza – CE. Esse trabalho foi aplicado com a justificativa de que o *GPR* é uma grande ferramenta na delimitação e no estudo da evolução da pluma de contaminação ao longo de um período de tempo.

Almeida *et al.* (2007) utilizaram o equipamento *GPR* no estudo para a verificação de vazamento provenientes de derivados de petróleo em postos de serviços na região de Abaetetuba, Pará. Nas seções geofísicas dos postos analisados, verificaram zonas de baixa reflexão, caracterizando zonas de contaminação. Para os autores, o *GPR* se mostrou eficaz na análise da contaminação de derivados de hidrocarbonetos em postos de combustível.

Silva (2013) abordou a investigação de áreas contaminadas nas adjacências de um posto de combustíveis em Belém, Pará, com o auxílio do *GPR* e dos métodos elétricos da Polarização induzida (IP). As seções de *GPR* mostraram zonas extensas atenuadas indicativas das presenças de hidrocarbonetos.

Cruz (2015) realizou uma compilação de informações acerca do *GPR*, incluindo os princípios, histórico, evolução e aplicação do método em posto de combustível. O objetivo do estudo foi o fornecimento de princípios físicos e matemáticos do *GPR*, apresentando a sua potencialidade em estudos ambientais.

Moraes e Oliva (2019) utilizou o método *GPR* para identificação de contaminação por hidrocarbonetos na subsuperfície de postos de combustíveis no município de Baião, no Estado do Pará. Para complementar os dados obtidos pelo equipamento geofísico, o autor realizou análises de amostras de águas dos poços de abastecimento próximos dos postos, com a finalidade de verificar o alcance dessa contaminação.

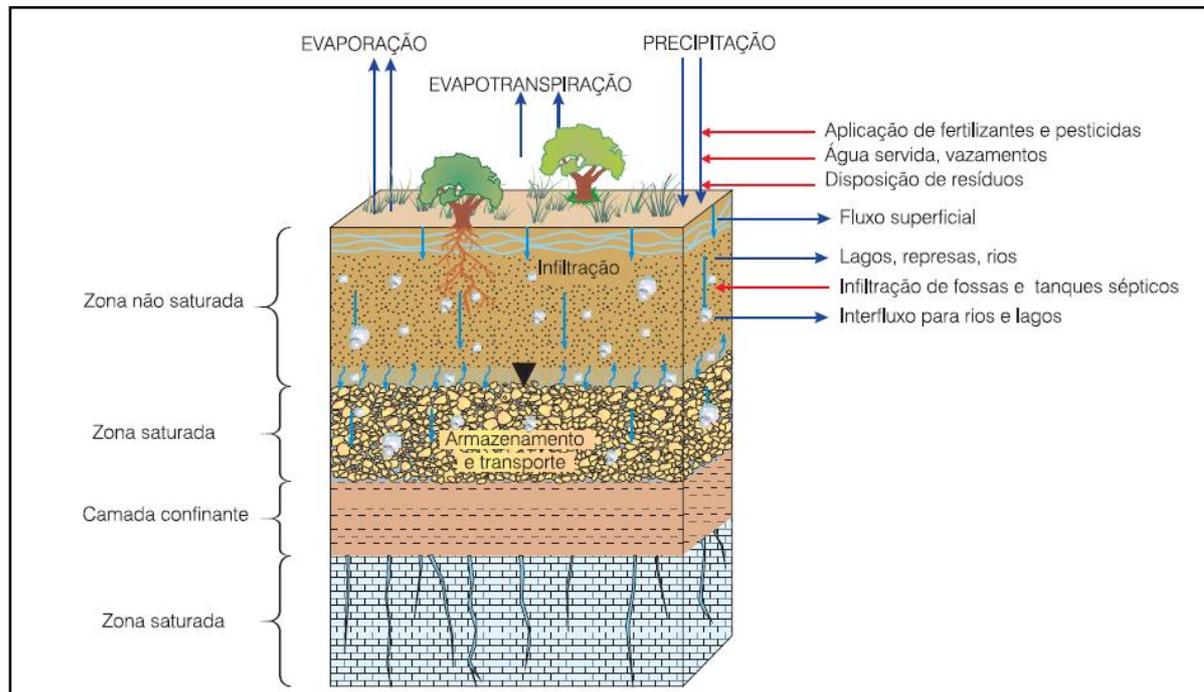
3.4 Geoquímica de Água

3.4.1 Hidroquímica e qualidade das águas

A hidroquímica das águas subterrâneas está relacionada aos componentes do ciclo hidrológico natural e às ações antrópicas, que alteram as características físicas, químicas e biológicas da água, podendo gerar consequências indesejadas para a saúde humana e do ecossistema. A qualidade da água, dentre outros, é afetada por mudanças em teores de nutrientes, sedimentos, metais pesados, toxinas, agrotóxicos, mudanças no pH e temperatura (ANA, 2011).

A porosidade, permeabilidade e espessura das zonas em subsuperfície, são características do substrato rochoso que determinam a comunicação com o ambiente superficial e o transporte de substâncias dissolvidas. Tais fatores influenciam a natureza das reações químicas e qualidade da água. Diante disso, a composição físico-química depende, primeiramente, da composição das águas de recarga (pluviometria, águas superficiais) e, posteriormente de suas evoluções químicas, que são influenciadas diretamente pela interação água-rocha decorrente da percolação da água através dos poros e fraturas das camadas geológicas (REBOUÇAS, 2013; CAJAZEIRAS, 2007).

A umidade do ar proveniente da evaporação e da evapotranspiração, gera nuvens, proporcionando precipitações. O volume precipitado pode sofrer dilúvio ou infiltração. O deflúvio, ou escoamento superficial da água, depende da intensidade da chuva, permeabilidade do solo e do tipo de vegetação que é responsável pela interceptação, onde parte da água precipitada fica retida pelas folhagens e volta a ser evaporada. A infiltração é a capacidade do solo em absorver a precipitação. Na zona não saturada a água preenche os vazios existentes, juntamente com o ar, podendo chegar até o nível freático e à zona saturada, recarregando os aquíferos e o fluxo de base dos leitos de rios (Figura 5) (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

Figura 5 - Zonas hídricas em subsuperfície

Fonte: MESTRINHO (2006) apud FEITOSA; MANOEL FILHO (2008)

3.4.2 Padrão de potabilidade

A potabilidade da água está relacionada aos padrões de aptidão de consumo por seres vivos, e compreende critérios essenciais e critérios complementares. Os primeiros estão relacionados à proteção contra contaminação por microrganismos patogênicos e por substâncias tóxicas ou venenosas. Os critérios complementares apontam o controle da água de acordo com os aspectos estéticos, organolépticos e econômicos que, embora desejáveis, não são essenciais à proteção da saúde pública (cor, sabor, odor, turbidez, dureza, temperatura e pH). Assim, as águas serão consideradas potáveis quando podem ser consumidas pelo homem sem ocasionar prejuízos à sua saúde (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

A portaria GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021, do ministério da Saúde, dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e indica imediata ação mitigadora em áreas que apresentem situações de riscos à saúde humana, em função das variações dos parâmetros acima citados (BRASIL, 2021).

CAPÍTULO 4

4 METODOLOGIA

4.1 Levantamento Pré – Campo

Nessa etapa foi feita uma ampla pesquisa, reunindo-se informações a respeito dos recursos hídricos subterrâneos, sobre o uso e aplicação do GPR, bem como das técnicas de coleta, tratamento e análise de amostras de água e solo e de processamento de dados. Foram consultados os acervos da produção científica disponível (artigos, teses, relatórios etc) nos periódicos Capes e outros afins e no acervo de dados sobre legislação ambiental da Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Santarém. Informações complementares necessárias ao estudo também foram compiladas, tais como a geologia, geomorfologia, hidrogeologia, temperatura, precipitação, dentre outros, do Município de Santarém e da região que se insere.

Durante essa etapa foi feito o mapeamento dos lava-jatos do centro urbano do município de Santarém. Em seguida, foi realizado o pré-campo para o levantamento de informações detalhadas sobre os lava-jatos mediante reunião com os proprietários e ou gerentes. De posse dos dados, compilados numa planilha Excel, do trabalho de Tancredi (1996), pioneiro relativo ao estudo de águas subterrâneas do município, da viabilidade local e do consentimento do proprietário para o estudo, foi feita a seleção inicial dos lava-jatos para o presente trabalho. Assim, nove (09) lava-jatos foram escolhidos para o presente estudo, com base nas facilidades de acesso e o espaço disponível para execução da sondagem geofísica.

Com o auxílio do software *Qgis 3.16*, dados vetoriais (*shapefile*) foram adquiridos de forma gratuita através do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), onde também se teve acesso aos limites territoriais (estados), rodovias, municípios e localidades do Pará. Complementaram-se as informações da área com os dados vetores de litologia e geomorfologia obtidos a partir do banco de dados GEOBANK da CPRM (Serviço Geológico do Brasil), do ano de 2008. A partir desses procedimentos tornou-se possível a visualização espacial em mapa dos lava-jatos do município de Santarém.

4.2 Levantamento de Campo

4.2.1 Aquisição dos dados de GPR

As séries de sessões GPR nos nove lava-jatos (09) foram realizadas nos dias 10, 11 e 12 de dezembro de 2018, nas áreas adequadas influenciadas pela água de lavagem dos veículos. As aquisições foram levantadas em modo contínuo, com a antena blindada no interior do carrinho de GPR que foi levado sem interrupções do início ao final das linhas transversais e longitudinais das áreas delimitadas, previamente demarcadas com pontos equidistantes a cada 0,5 (meio) metro, e janela temporal de 100 ns (Tabela 2) (Figuras 7 a 9). A abertura da janela temporal indica o tempo em que se deve deixar a janela aberta para que o sinal seja transmitido.

Para o levantamento dos dados geofísicos foi utilizado o equipamento GPR multifrequencial do sistema GSSI Utility Scan DF SIR 3000 da Universidade Federal do Oeste do Pará (Ufopa), adotando-se o princípio monoestático com antena de 270 MHz, com o intuito de fornecer uma boa penetração a partir da frequência central. O arranjo monoestático é baseado em um sistema onde a antena transmissora e receptora estão unidas, logo, não há a separação entre elas como no arranjo biestático (ORTEGA, 2006; SILVA, 2013).

Figura 7 - Área esquemática delimitada para a sondagem (10/12/2018), Santarém, Pará, A) Ponto 1, B) Ponto 2, C) Ponto 3



Fonte: Autor (2018)

Figura 8 - Área esquemática delimitada para a sondagem (11/12/2018), Santarém, Pará, A) Ponto 4, B) Ponto 5, C) Ponto 6



Fonte: Autor (2018)

Figura 9 - Área esquemática delimitada para a sondagem (12/12/2018), Santarém, Pará, A) Ponto 7, B) Ponto 8, C) Ponto 9



Fonte: Autor (2018)

Tabela 2 - Dados gerais da aquisição geofísica

Sondagem Geofísica Configuração da antena 270 MHz					
Lava-jatos	Dimensão da área de Sondagem		Número de linhas (0,5 m)		
	Comprimento (m)	Largura (m)	Comprimento	Largura	Nº de Aquisições
P1	8	4	17 L	9 L	26
P2	8	4	17 L	9 L	26
P3	8	4	17 L	9 L	26
P4	8	4	17 L	9 L	26
P5	8	4	17 L	9 L	26
P6	8	4	17 L	9 L	26
P7	8	4	17 L	9 L	26
P8	8	4	17 L	9 L	26
P9	8	4	17 L	9 L	26
Nº Total dos radagramas	-	-	-	-	234

Fonte: Autor (2022)

4.2.2 Coleta De Água

A coleta de amostra de água subterrânea de poços foi realizada na estação chuvosa no dia 12 de abril de 2019. As amostras da água subterrânea foram coletadas diretamente de cinco poços e de apenas dois poços (P1 e P6) coletou-se a água de forma indireta (Figura 10). Não foi coletado água dos pontos 4 e 8, pois os mesmos não possuem poço particular e utilizam

água oriunda da rede pública municipal de abastecimento. Na tabela 3 apresenta-se à descrição e informações coletadas em campo.

Para a coleta de amostras foram utilizados materiais como, luvas, caixa térmica, recipientes de plástico e fita para identificação. A amostragem de água seguiu as normas da CETESB (2011), com todos os cuidados básicos para que não ocorresse contaminação das amostras (Figura 11). Dessa forma, as amostras foram coletadas, em triplicata, em recipientes plásticos de 500 ml devidamente limpos. Logo em seguida, todas as amostras foram acondicionadas e armazenadas em caixa térmica com gelo até o destino dos laboratórios, para tratamento e análises previstos.

Figura 10 - Estrutura física dos poços amostrados em campo no presente estudo. A), B), C), D), E), F) Poços artesanais particulares



Fonte: Autor (2019)

Figura 11 - Técnicas praticadas durante a coleta de água: A) Coleta de água para a análise de íons em garrafas plásticas de 500 ml; B) Uso se luva e de álcool para limpeza da boca do poço para futura coleta. Zona urbana, Santarém, Pará, período chuvoso, 2019



Fonte: Autor (2019)

Ainda no campo foram determinados alguns parâmetros, como temperatura, pH, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido, através do uso do equipamento Medidor Multiparâmetro e de pH portáteis, da Ufopa.

Tabela 3 - Características dos poços tubulares de captação de água subterrânea em estudo no presente trabalho. Sistema aquífero Alter do Chão, zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019, no período chuvoso

Poço	Localização Lat./Long.	Altitude em relação ao nível do mar (m)	Ano de Construção	Profundidade (m)	Descrição Sucinta
P1	02° 25' 35,53" S 054° 43' 22,10" W	37	2000	32	Poço artesiano particular, utilizado para abastecimento residencial e do lava-jato. Amostra coletada indiretamente, na saída da tubulação para a caixa d'água. Água transparente, límpida, sem odor.
P2	02° 25' 28,01" S 054°43' 24,50" W	28	2010	35	Poço artesiano particular, utilizado somente para o lava-jato. Coleta de água diretamente do poço. Água transparente, límpida, sem odor.
P3	02° 25' 14,47" S 054° 42' 43,35" W	20	2011	35	Poço artesiano particular, utilizado para o abastecimento do lava-jato, possui bomba submersa. Coleta de água diretamente do poço. Água turva, com a presença de areia fina, sem odor.
P5	02° 26' 30,78" S 054° 44' 15,11" W	22	1996	28	Poço artesiano particular mais antigo, construído há cerca de 26 anos, utilizado para o abastecimento residencial e do lava-jato. Encontra-se 20 m da fossa séptica. Coleta de água diretamente do poço. Água transparente, límpida, sem odor.
P6	02° 26' 38,70" S 054° 45' 09,62" W	50	2012	34	Poço artesiano particular, lacrado com cimento. A coleta da água foi realizada indiretamente, na saída da água da mangueira para a caixa d'água. Água transparente, límpida, sem odor.
P7	02° 25' 14,54" S 054° 42' 44,39" W	20	2015	35	Poço artesiano particular, utilizado somente para o abastecimento do lava-jato. A coleta foi realizada diretamente do poço. Água transparente, límpida, sem odor.
P9	02° 25' 27,28" S 054° 43' 38,44" W	24	2005	40	Poço artesiano particular, com maior profundidade, utilizado para o abastecimento residencial (3 casas) e do lava-jato. Encontra-se a 8 m da fossa séptica. Coleta de água diretamente do poço. Água transparente, límpida, sem odor.

Fonte: Autor (2022)

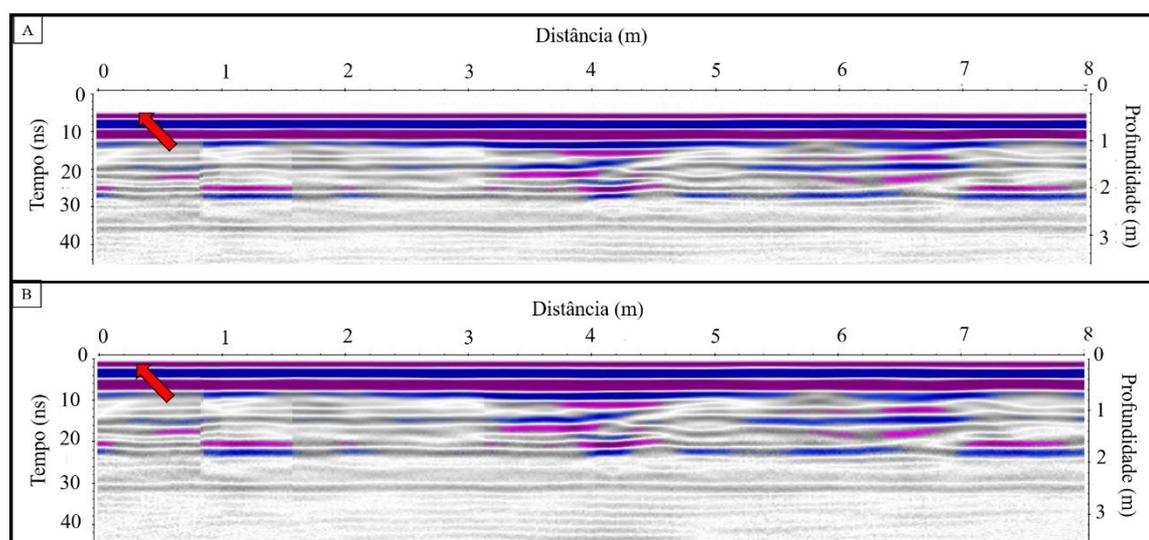
4.4 Processamento e Interpretação dos Dados GPR

Para o processamento dos dados foi utilizado o software *Refex Win* versão 4. 5. 5., com o intuito de melhorar a razão sinal/ruído das imagens obtidas pelas antenas e para gerar melhorias na visualização das anomalias de interesse. Segundo Ortega (2006), o tratamento dessas imagens possibilita a visualização das anomalias de interesse, exaltando feições através da diminuição dos ruídos, gerados por fontes artificiais ou naturais, ocorrentes durante a propagação do pulso do radar no subsolo.

O processamento das imagens foi dividido em sete (7) etapas: (1) importação dos dados brutos, (2) correção estática (*set time zero*), (3) remoção do ganho de cabeçalho (*header gain*), (4) ganho vertical, (5) remoção do *background*, (6) corrida média (*running average*) e (7) conversão do tempo em profundidade.

A primeira etapa consistiu na importação dos dados brutos para o software *Refex Win*. Na segunda etapa foi realizada a correção estatística da chegada da primeira onda eletromagnética ao tempo igualada a zero (Figura 12). Esse procedimento consiste em remover o espaço vazio resultante do tempo que a onda leva para ir da antena transmissora até a antena receptora, visto na parte superior dos radargramas. A correção faz com que o primeiro registro da chegada da onda eletromagnética coincida com a topografia do local.

Figura 12 - Exemplo de correção estática, A) dado bruto e B) corrigido da Linha 5 (largura) obtida da sondagem do Lava - jato 1 do presente trabalho (10/12/2018)

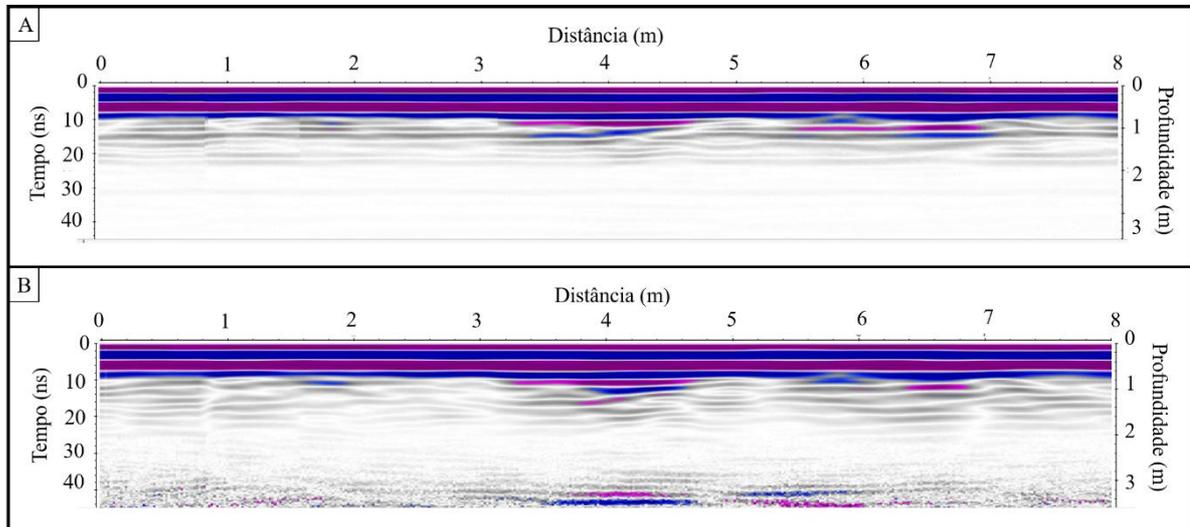


Fonte: Autor (2022)

A terceira etapa, denominada *remove header gain*, é aquela onde se elimina o ganho inserido pelo equipamento GPR durante a aquisição de imagens em campo (Figura 13 A). Em

seguida, a quarta etapa, foi feito o ganho vertical para compensar os efeitos da atenuação do sinal *GPR*, e melhorar a visualização de feições estruturadas no subsolo (Figura 13 B).

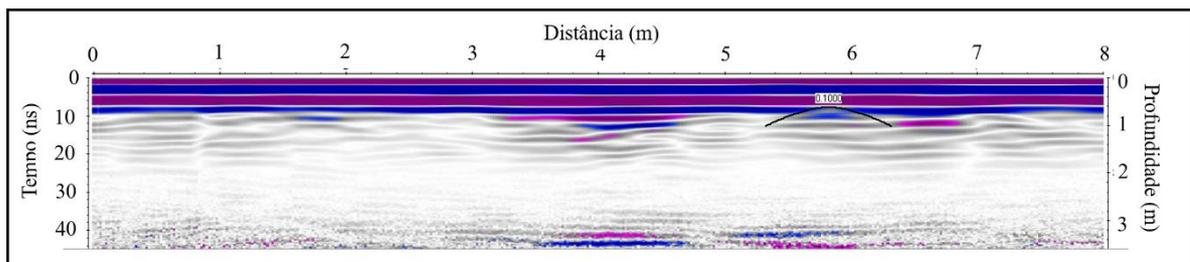
Figura 13 - A) Exemplo da etapa header gain da Linha 5 (largura), B) Exemplo da etapa ganho vertical da Linha 5 (largura), obtidos da sondagem do Lava - jato 1 do presente trabalho (10/12/2018)



Fonte: Autor (2022)

Na quinta etapa foi realizado a remoção de *Background* e utilizou-se um filtro do tipo passa – alta, capaz de remover os sinais de baixa frequência e realçar os refletores pontuais e inclinados. Quanto a corrida média, a sexta etapa, foi empregada para destacar os refletores e a continuidade lateral dos perfis horizontais, partindo-se de uma média móvel realizado pelo *software*. Por fim, a conversão do tempo (t) em profundidade (h) utilizada quando se obtém a velocidade da onda eletromagnética (v) do meio em que se faz a aquisição. Na interpretação das seções assumiu-se uma velocidade de 0,10 m/ns, para a conversão de tempo em profundidade (Figura 14).

Figura 14 - Exemplo da etapa corrida média da Linha 5 (largura) obtida da sondagem do Lava - jato 1 do presente trabalho (10/12/2018)



Fonte: Autor (2022)

A interpretação dos radargramas foi realizada com o auxílio das informações provenientes do levantamento bibliográfico, relacionadas aos padrões de reflexão das ondas eletromagnéticas ao passar por objetos como tampas, zonas de atenuação e dentre outras estruturas visíveis em superfície.

Para a identificação dos diferentes materiais presentes do subsolo utilizou-se o contraste de suas características físicas, tais como resistividade, condutividade elétrica, permissividade dielétrica. Os derivados do petróleo no subsolo, por exemplo, são relativamente altamente condutivos e menos resistivos e, conseqüentemente, geram ondas de pequena amplitude e grande comprimento, resultando numa atenuação alta. Isto ocorre por que tais materiais absorvem totalmente a energia da onda eletromagnética emitida pelo *GPR*, restando somente ruídos ou espaços vazios nos perfis obtidos. Diante disso, é possível identificar e determinar a geometria espacial de eventuais plumas.

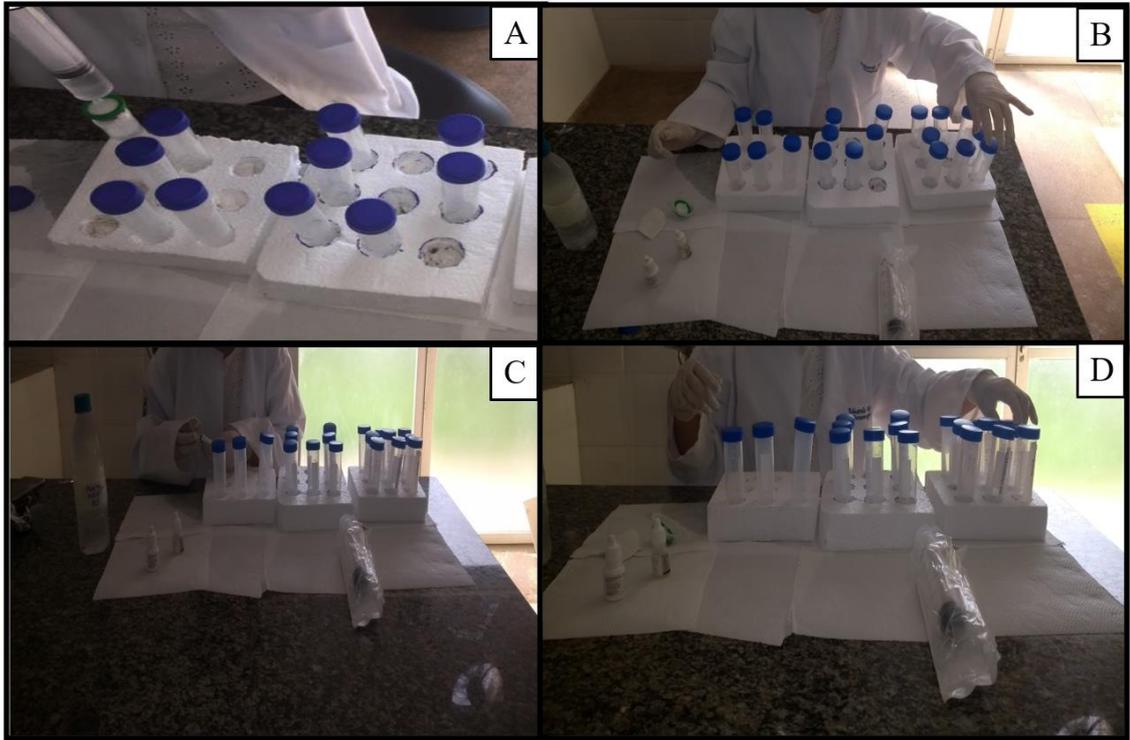
4.5 Tratamento e Análise Química da Água

No Laboratório de Biologia Ambiental da Ufopa e no Laboratório Multianálises em Belém/PA, além dos parâmetros já medidos *in situ* para controle, nas amostras brutas foram determinadas a dureza total (2340 C) e alcalinidade (2320 B). A primeira, pelo método de Titulação de complexação e a segunda, por Titulação volumétrica de alcalimetria, respectivamente (*Standard Methods*).

As análises iônicas foram realizadas no Laboratório de Hidroquímica da Universidade Federal do Pará, em Belém, Pará. Para essas análises as amostras foram filtradas em filtro *millipore* de 0,45 μm , acondicionadas em tubos Falcon de 50 ml. Para a determinação dos íons cátions sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), foram adicionadas três gotas de ácido clorídrico (HCl), enquanto para os íons ânions cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) e nitrato (NO_3^-) houve apenas a filtragem (Figura 15 A). Utilizou-se o método de Cromatografia iônica líquida com uso do equipamento *Dionex Dx-120*.

As análises de metais pesados foram realizadas no Laboratório de Geoquímica e Água (LAGEQ) da Universidade Federal de Brasília, em Brasília/DF. Para essa análises as amostras também foram filtradas em filtro *millipore* de 0,45 μm , acondicionadas em tubos Falcon de 50 ml e foram adicionadas três gotas de ácido clorídrico (HCl) (Figura 15). Fora, determinados os elementos Cr, Pb, Al, As, Cu e Zn, através do método de Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado (ICP-OES).

Figura 15 - A), B), C) e D) Tratamento das amostras, com filtragem, e acidificação para futuras análises iônicas.
Laboratório de Geologia da UFOPA, março e abril de 2019



Fonte: Autor (2022)

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS E DISCURSÕES

5.1 Sondagem Geofísica

De um total obtido de 234 radargramas, 26 radargramas por lava-jato, foi escolhido de cada lava-jato o melhor radargrama que apresentou feições melhores definidas (Tabela 4). Resultando, assim, em nove (09) radargramas (Figuras 16 a 24).

Tabela 4 - Dados dos radargramas com maior número de feições melhores definidas, obtidos da sondagem geofísica nos lava-jatos estudados

Lava-jatos	Sondagem Geofísica	
	Configuração da antena 270 MHz	
	Radargrama (R)	Linha (L)
Lava-jato 1	R1	L8
Lava-jato 2	R2	L8
Lava-jato 3	R3	L5
Lava-jato 4	R4	L2
Lava-jato 5	R5	L3
Lava-jato 6	R6	L5
Lava-jato 7	R7	L3
Lava-jato 8	R8	L6
Lava-jato 9	R9	L2

Fonte: Autor (2022)

Na análise dos radargramas obtidos em cada um dos perfis, procurou-se localizar contrastes de zonas condutivas com o background da região. Para cada perfil são apresentados dois radargramas: o superior é o radargrama construídos com os dados processados, e o inferior, o radargrama interpretado. Nos radargramas aparece no eixo vertical, tanto tempo da chegada das ondas, com a profundidade, e no eixo horizontal tem-se a distância percorrida pelo equipamento.

Em todos os radargramas (R1 a R9) foram observadas zonas de excelente reflexão no intervalo de 0,0 m a 0,5 m, representadas por fortes cores azul e rósea. Essas zonas são decorrentes da camada de ar presente no pequeno espaço entre a antena do GPR e a superfície do terreno, visto que na camada de ar a velocidade de propagação das ondas são muito elevadas, assim quando as ondas são emitidas, rapidamente refletem para a antena receptora do equipamento, resultando nos radargramas cores fortes nos primeiros 50 cm de profundidade e contínuos ao longo de toda a distância percorrida pelo GPR (Figura 16 a 24).

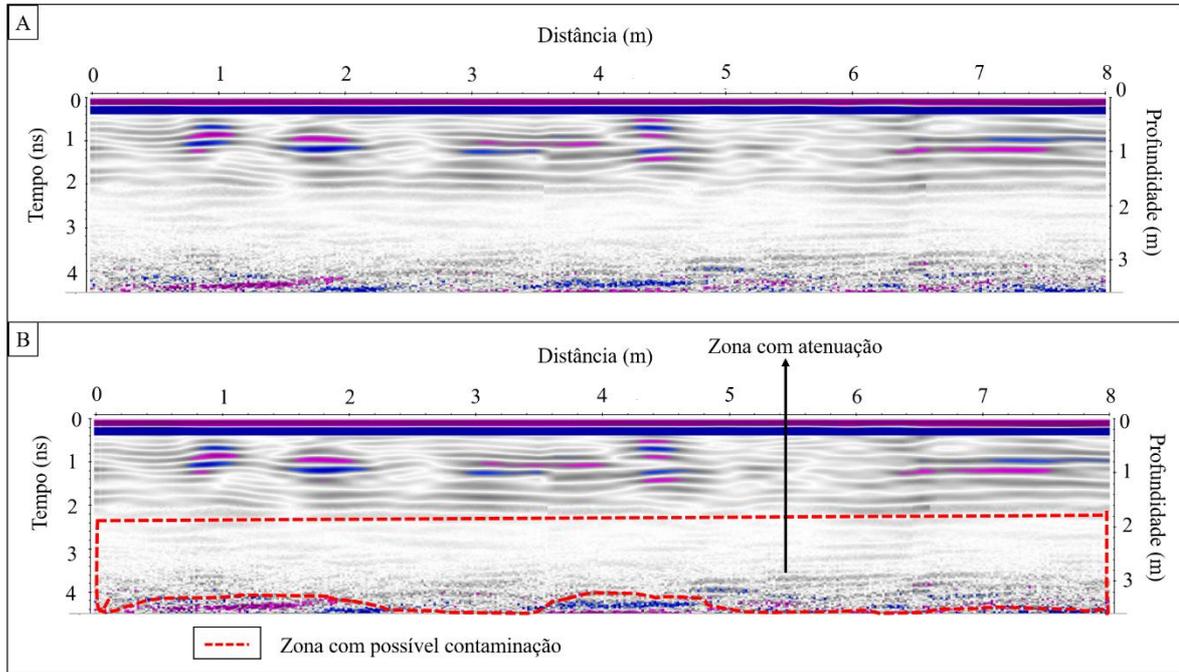
Nas profundidades de 0,5 m a 1,5 m nos radargramas R1, R3, R5, R6, R7, R8, e R9 foram observados refletores com boa reflexão, observando-se o contraste entre os refletores de baixa reflexão (cor branca), localizado logo abaixo desta e que se estendem até a profundidade de 3,5 m. Dessa forma, os refletores fortes são relacionados à geologia do subsolo, representada ou como rochas sedimentares e sedimentos e/ou outros materiais correlatos comumente usados em aterramento (Figura 16B a 22B).

Ainda, nos radargramas R1, R3, R5, R6, R7, R8, e R9 foi observado um tipo específico e diferente de refletores (zona abaixo do pontilhado vermelho) nas profundidades a partir de 1,5 m e em toda distância percorrida pelo equipamento (Figura 16B a 22B). Esses refletores são caracterizados por baixa reflexão, indicando uma zona atenuada que pode estar relacionada com uma possível contaminação, decorrente dos fluidos residuais dos processos de lavagem. Segundo Cruz (2015), o material que pode responder ao sinal *GPR* com essa atenuação, no subsolo, pode ser os hidrocarbonetos derivados de combustíveis fósseis (graxas e óleo lubrificante), devido à sua elevada condutividade elétrica que resulta em espaços esbranquiçados, ruídos e atenuações nos radargramas.

Segundo Reis Júnior (2009), um vazamento de combustível, no primeiro instante é possível de se observar valores elevados de resistividade. No entanto, a pluma contaminante tanto na fase residual como dissolvida pode sofrer processos bioquímicos ocasionando aumento na condutividade da zona afetada. Isso pode ser especialmente o caso nos lava-jatos, devido à quantidade de água que pode adentrar ao solo uma vez que, segundo informações dos proprietários dos lava-jatos, diariamente utiliza-se em média cerca de 8.000 L de água, durante o período médio de oito horas de prestação do serviço.

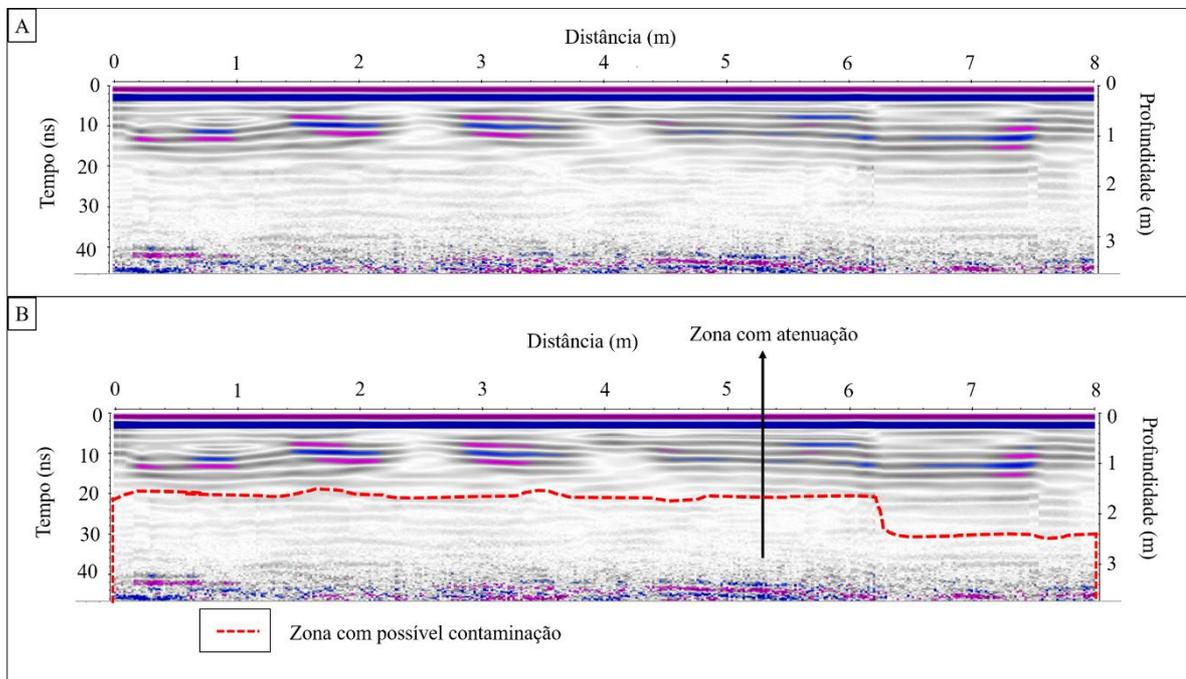
No radograma R6, do lava-jato 6 (Figura 19), foi possível observar um refletor hiperbólico, com reflexão forte de pequena amplitude visto nas cores azul e rósea, correspondendo possivelmente a encanação de abastecimento de água ou da rede esgoto doméstico

Figura 16 - Radargrama 1 (Linha 8) do Lava-jato 1, 10/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processado interpretado



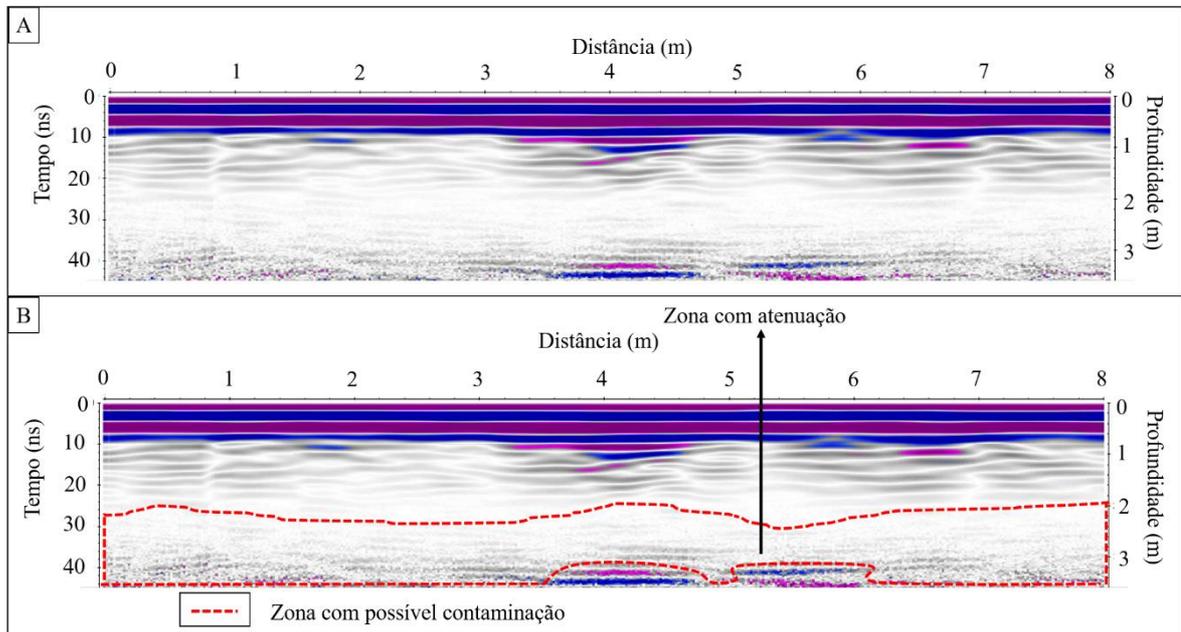
Fonte: Autor (2022)

Figura 17 - Radargrama 3 (Linha 5) do Lava-jato 3, 10/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processado interpretado



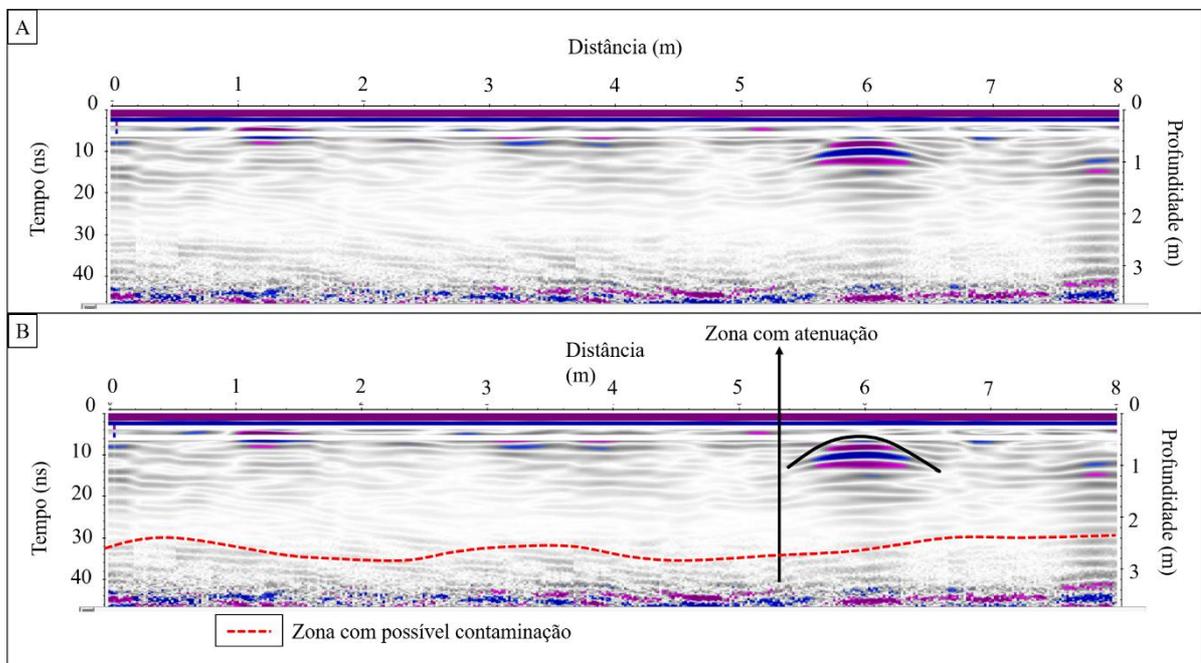
Fonte: Autor (2022)

Figura 18 - Radargrama 5 (Linha 4) do Lava-jato 5, 11/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processa interpretado



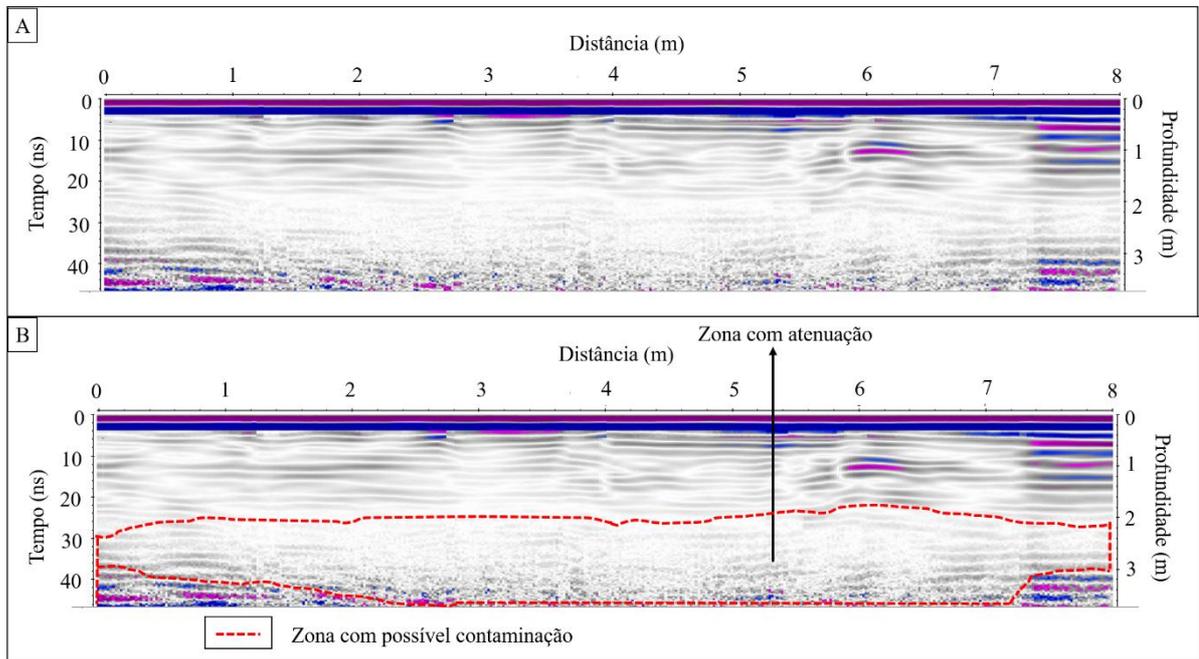
Fonte: Autor (2022)

Figura 19 - Radargrama 6 (Linha 5) do Lava-jato 6, 11/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processa interpretado



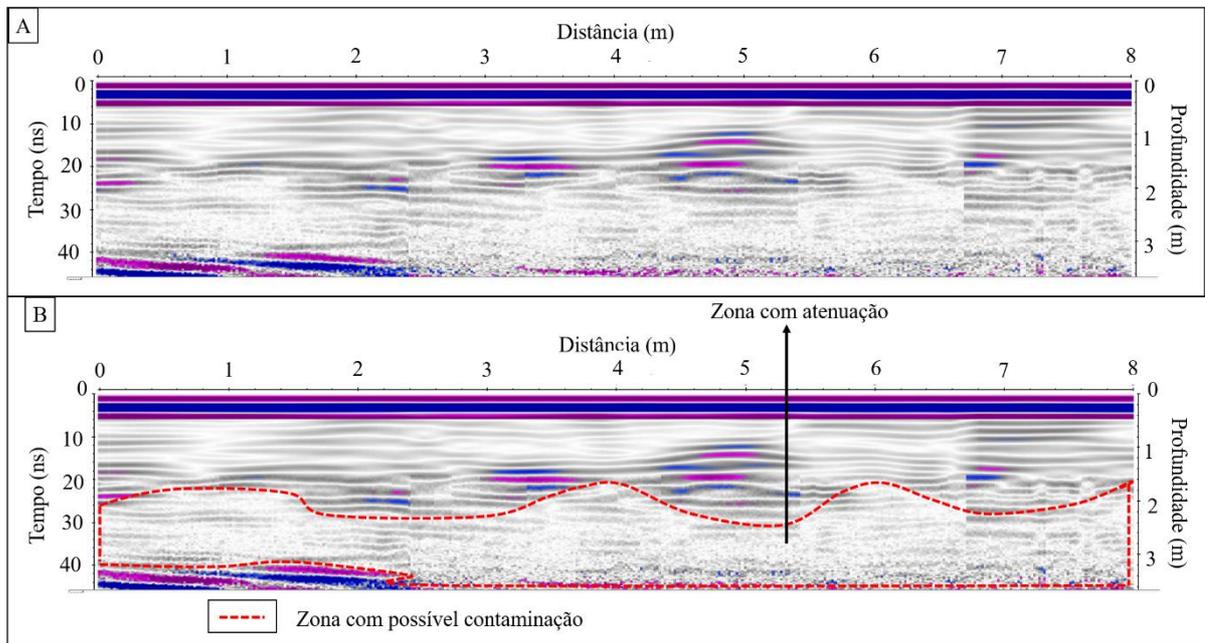
Fonte: Autor (2022)

Figura 20 - Radargrama 7 (Linha 3) do Lava-jato 7, 12/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processa interpretado



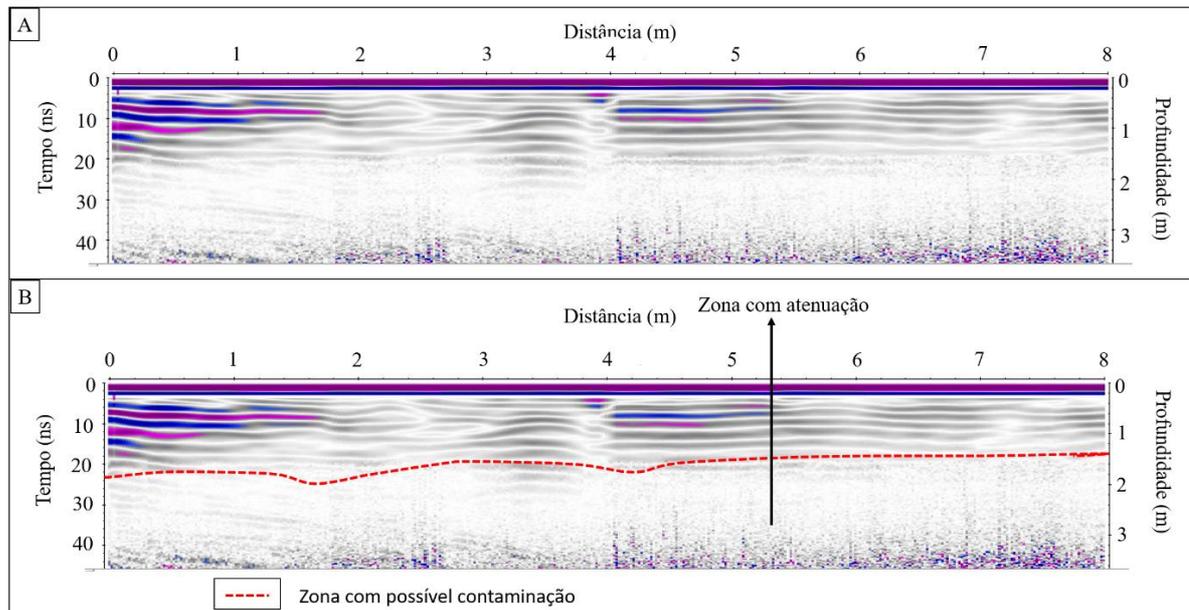
Fonte: Autor (2022)

Figura 21 - Radargrama 8 (Linha 6) do Lava-jato 8, 12/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processa interpretado



Fonte: Autor (2022)

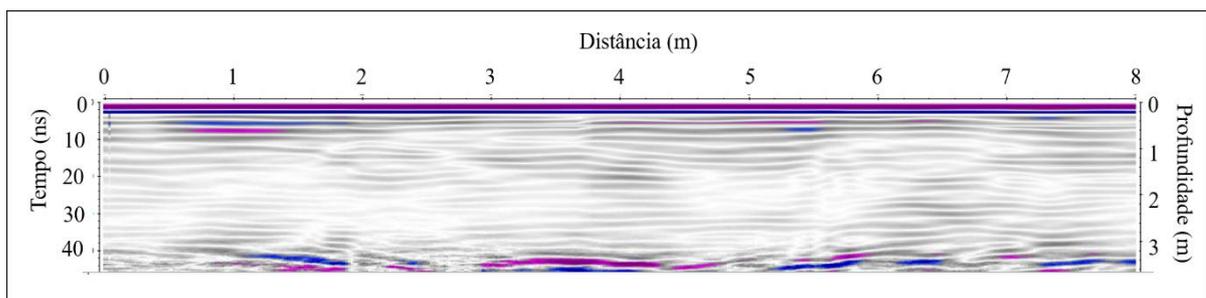
Figura 22 - Radargrama 9 (Linha 2) do Lava-jato 9, 12/12/2018, Santarém, Pará: A) processado sem interpretação; B) processa interpretado



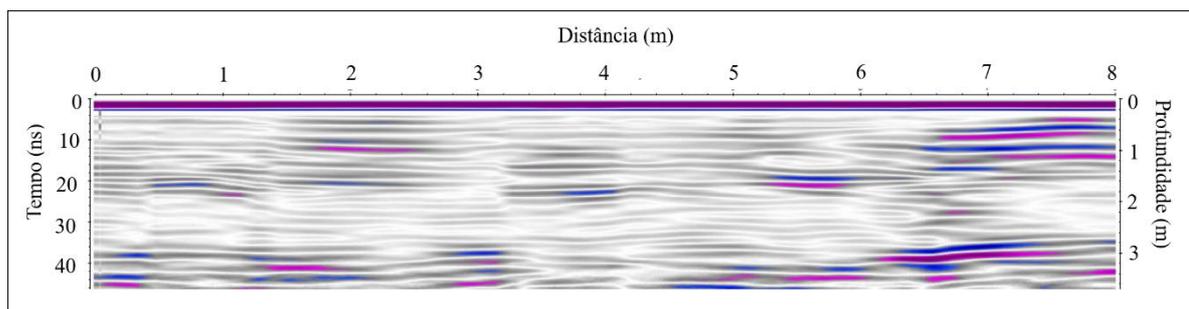
Fonte: Autor (2022)

Nos radargramas R8 e R4 foram observados refletores com boa reflexão em todo radargrama, que são relacionados à geologia do subsolo, representada ou como rochas sedimentares e sedimentos e/ou outros materiais correlatos comumente usados em aterramento (Figura 23 e 24). Não foram observadas feições ou zonas de atenuação, semelhantes àquelas vistas nos demais lava-jatos. O Lava-jato 2, até o momento da coleta, não estava em funcionamento há aproximadamente seis (06) meses. Logo, possivelmente, ser esse o motivo da ausência de zonas de atenuação nos radargramas, entendidas como serem de possível contaminação (Figura 23). No lava-jato 4 há o sistema que canaliza a água de lavagem que tem o destino final uma caixa sumidora, onde é feita a separação dos óleos e graxas nela despejada. Diante disso, possivelmente, por conta da presença dessa caixa sumidora o lava-jato 4 em todos os seus radagramas não apresenta zona de atenuação (Figura 24).

Figura 23 - Radargrama 2 (Linha 8) do Lava-jato 2, 10/12/2018, Santarém, Pará



Fonte: Autor (2022)

Figura 24 - Radargrama 4 (Linha 2) do Lava-jato 4, 11/12/2018, Santarém, Pará

Fonte: Autor (2022)

5.2 Geoquímica da Água

A caracterização físico-química da água e de soluções aquosas em geral possibilita a identificação e quantificação dos elementos e espécies iônicas nelas dissolvidas, e ainda permite associar os efeitos de suas propriedades às questões ambientais, auxiliando na compreensão dos processos naturais e alterações no meio ambiente, naturais ou antrópicas (PARRON *et al.*, 2011).

Os resultados das análises físico-químicas foram sistematizados em planilha Excel versão 2211/2016, com o intuito de fornecer elementos para a construção de gráficos. Desse modo, tornou-se possível analisar e estabelecer uma fácil visualização dos parâmetros analisados. Os teores determinados nas amostras foram analisados e comparados ao padrão de potabilidade estabelecido pela legislação referente à Portaria GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021, do Ministério da Saúde, indicado como valor máximo permitido, ou VMP.

5.2.1 Parâmetros Físico-Químicos

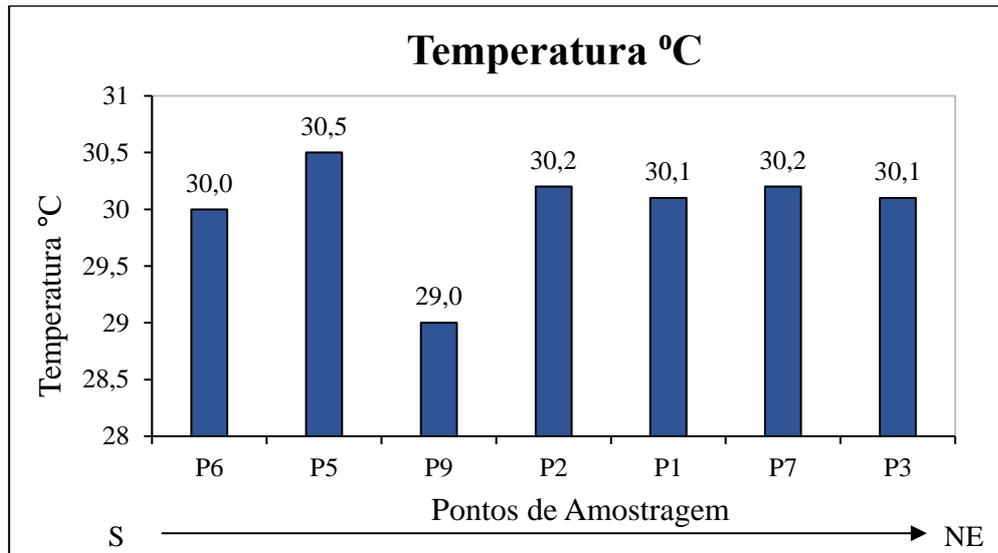
5.2.1.1 Temperatura (T)

A temperatura da água é considerada um dos parâmetros mais importantes, devido à sua influência sobre outras propriedades, tais como acelerar reações químicas, reduzir a solubilidade dos gases, acentuar a sensação de sabor e odor (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2002). Para Mestrinho (2006), nas águas subterrâneas a amplitude térmica é baixa (1 °C a 2 °C) e independente da temperatura atmosférica, a não ser nos aquíferos freáticos poucos profundos.

As águas subterrâneas da área urbana do município de Santarém, Pará, apresentaram temperatura mínima de 29 °C (P9), e máxima de 30,5 °C (P5), com média de 30,01 °C ± 0,44 (Figura 25), possuindo assim, uma amplitude térmica muito baixa. Variações

relativamente mais amplas foram encontradas por Junior e Junior (2012) e por Tancredi (1996), de 25,0 °C a 29,6 °C, e consideraram que água meteórica, em seu trajeto, desde a zona não saturada até a saturada, tende a entrar em equilíbrio térmico com as rochas do aquífero. A legislação brasileira, pela Portaria N° 888/2021, não estipula valores quanto à temperatura da água para consumo humano.

Figura 25 - Temperatura de água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022)

5.2.1.2 Potencial Hidrogeniônico (pH)

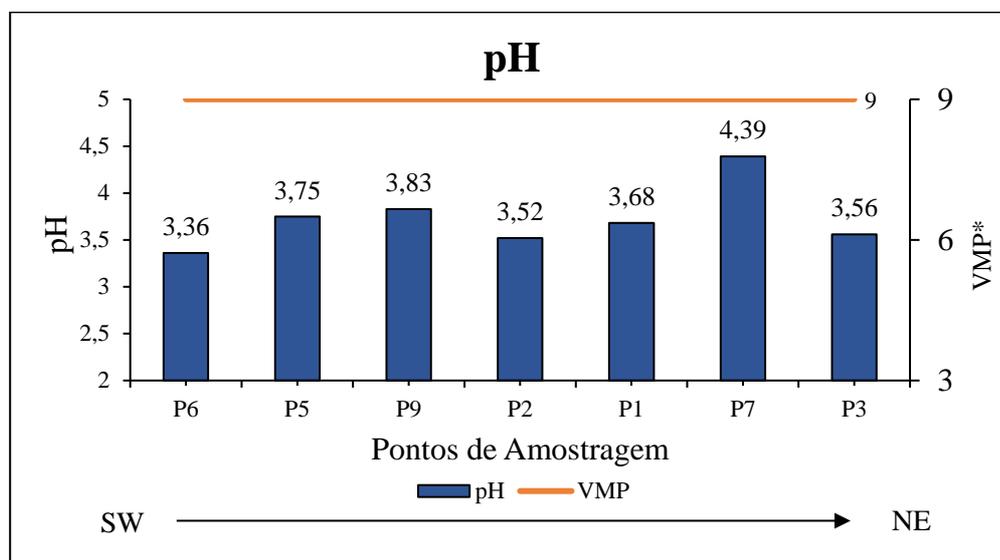
O pH é a medida da concentração hidrogeniônica da água ou solução, sendo essencialmente uma função do gás carbônico e da alcalinidade da água, e controlado pelas reações químicas e pelo equilíbrio entre os íons presentes (FREDDO FILHO, 2018). Os valores variam entre 1 a 14, sendo neutro o valor (7), ácido valores inferiores a 7 e alcalino ou básico valores superiores a 7.

Os valores do pH das águas coletadas, apresentou variação de 3,39 (P6) a 4,39 (P7), e uma média de $3,73 \pm 0,30$ (Figura 26). Logo, tais valores indicam águas ácidas, ficando bem abaixo do valor aceitável para os padrões de potabilidade, que devem estar entre 6 e 9, de acordo com a Portaria GM/MS. N° 888/2021 do Ministério da Saúde.

No entanto, o caráter ácido das águas subterrâneas na região Santarena, pode ser explicado em função da composição mineralógica das rochas siliciclásticas (areia e argila) que compõe a litologia do Aquífero Alter do chão, bem como em função da intensa pluviosidade da região ao longo do tempo, que promoveu a formação de soluções ricas em ácido carbônico através da dissolução de gás carbônico atmosférico em águas pluviométricas, e ao se infiltrar

nos solos, assimilam os ácidos orgânicos da densa vegetação da Amazônia. Valores semelhantes do pH no Alter do Chão foram encontrados nos trabalhos de Tancredi (1996), ANA (2002) e Junior e Junior (2012).

Figura 26 - pH de água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

5.2.1.3 Oxigênio Dissolvido (OD)

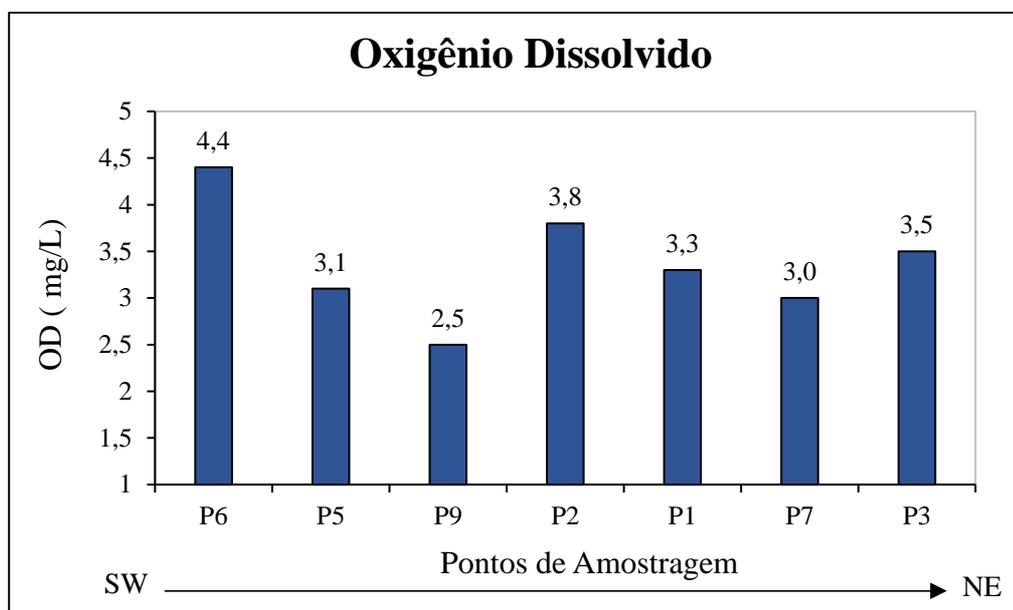
O oxigênio dissolvido é muito importante, pois expressa a saúde de um ambiente aquático. Segundo Fiorucci e Filho (2005), nas águas subterrâneas, visto que não existe contato com a atmosfera, os valores de OD são relativamente baixos. As baixas concentrações do OD pode ser resultado também de outros fenômenos naturais, como respiração ou degradação da matéria orgânica pelos organismos naturalmente presente no ambiente aquático.

O gás oxigênio (O_2) é pouco solúvel em água, e sua solubilidade depende das condições de temperatura e pressão, bem como dos sais dissolvidos presentes na água. A maioria das águas subterrâneas tem concentrações de O_2 abaixo de 5 mg/L. O OD corrói o ferro, aço e o latão, e com aumento de temperatura a corrosão tende a se acelerar e a quantidade de oxigênio dissolvido a diminuir (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

Os valores de OD encontrados nos poços da zona urbana de Santarém, apresentaram variação de 2,5 mg/L (P9) a 4,4 mg/L (P6), com média de $3,73 \text{ mg/L} \pm 0,56$ (Figura 27). Valores semelhantes foram encontrados por Junior e Junior (2012) no aquífero Alter do Chão, com variação de 2,86 mg/L a 6,75 mg/L de OD. Os valores de oxigênio dissolvido não foram

comparados com a Portaria 888/2021 do MS, pois esta não estabelece um valor médio permitido para água potável.

Figura 27 - Concentrações de OD (em mg/L) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022)

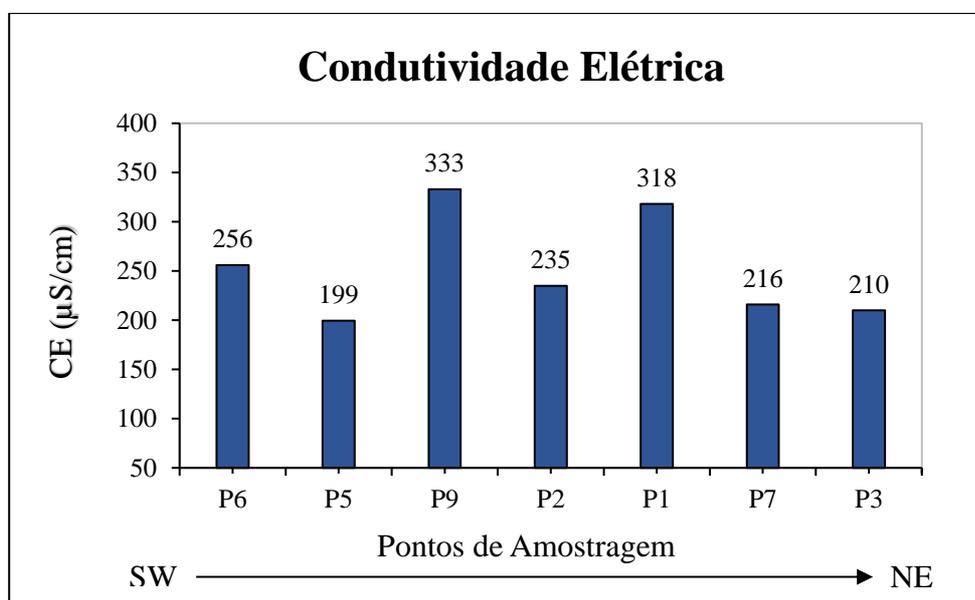
5.2.1.4 Condutividade (CE)

A condutividade elétrica (CE) refere-se à capacidade de uma solução aquosa em conduzir corrente elétrica, refletindo a facilidade da água na transmissão da corrente elétrica. A CE está relacionada à presença de cátions e ânions provenientes de sais diversos que se encontram dissolvidos na água, que se acumulam no corpo hídrico, em função da movimentação e transporte de material de solos (FREDDO FILHO, 2018). Neste trabalho, a unidade de medida utilizada para condutividade elétrica foi o micro-siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) do sistema internacional de unidades e, embora a portaria n°888/2021 do Ministério da Saúde não estabeleça um valor máximo permitido, a CE é importante para avaliação geral da qualidade de água, uma vez que através dela pode-se estimar a salinidade da água.

Os resultados obtidos da condutividade elétrica das águas tiveram valores mínimo de $199 \mu\text{S}/\text{cm}$ (P5) e máximo de $333,0 \mu\text{S}/\text{cm}$ (P9), com média de $252,4 \mu\text{S}/\text{cm} \pm 49,3$ (Figura 28). Segundo do Ministério da Saúde, nas fontes de águas naturais são encontrados teores de condutividade na faixa de $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ a $100 \mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto que em ambientes poluídos por esgotos domésticos ou industriais os valores podem chegar até $1.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (BRASIL, 2006).

Os valores altos de CE nos poços estudados podem ser interpretados através da percolação das águas residuais das lavagens automotivas, e de águas pluviométricas no solo do local, lixiviando os elementos químicos dos minerais e de poluentes presentes nas camadas até as águas subterrâneas, que poderia acarretar no aumento dos sólidos totais dissolvidos nestas águas. A análise desse parâmetro é de fundamental importância para águas subterrâneas, pois a condutividade mede o grau de mineralização iônica das águas que por sua vez está associada diretamente a potabilidade para consumo humano, e que a salinidade das águas superficiais reflete os valores da condutividade elétrica nas águas subterrâneas (MATTA, 2002).

Figura 28 - Condutividade elétrica (em $\mu\text{S}/\text{cm}$) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022)

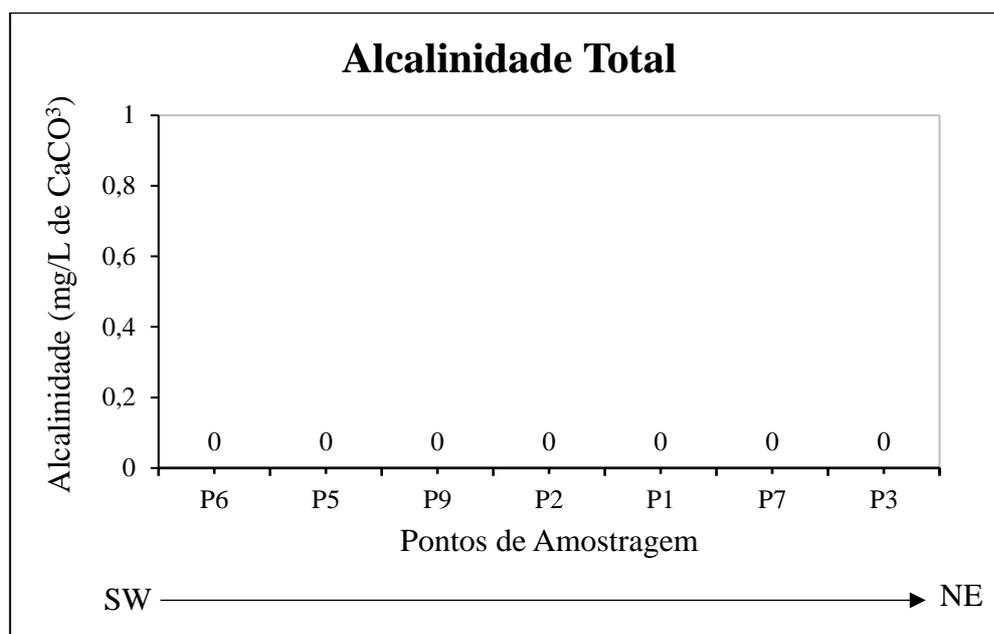
5.2.1.5 Alcalinidade Total (AC)

A alcalinidade das águas está relacionada com a presença de bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) ou hidróxidos (OH^-), assim quanto maior a concentração de tais íons na água, maior será sua alcalinidade. A determinação desse parâmetro é uma das mais importantes no controle da água, por estar relacionada com a coagulação, redução de dureza e prevenção de corrosão nas canalizações de ferro fundido da rede de distribuição (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2002).

A alcalinidade pode ser definida em função do pH, apresentando os seguintes tipos de alcalinidade: pH 3,0 - 4,6 (ácidos minerais); pH 4,6 - 8,3 (somente bicarbonatos); pH 8,3 - 9,4 (carbonatos e bicarbonatos) e pH 9,4 - 11,0 (alcalinidade e hidróxidos e carbonatos) (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2002).

Na área de estudo não se detectou alcalinidade total (AT) de CaCO_3 na água, e isso pode ser em função dos ácidos minerais segundo o pH dessas águas, de acordo com Richter e Azevedo Netto (2002) acima citados (Figura 29). Não há VMP para alcalinidade total na legislação brasileira.

Figura 29 - Alcalinidade (mg/L CaCO_3) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022)

5.2.1.6 Dureza Total

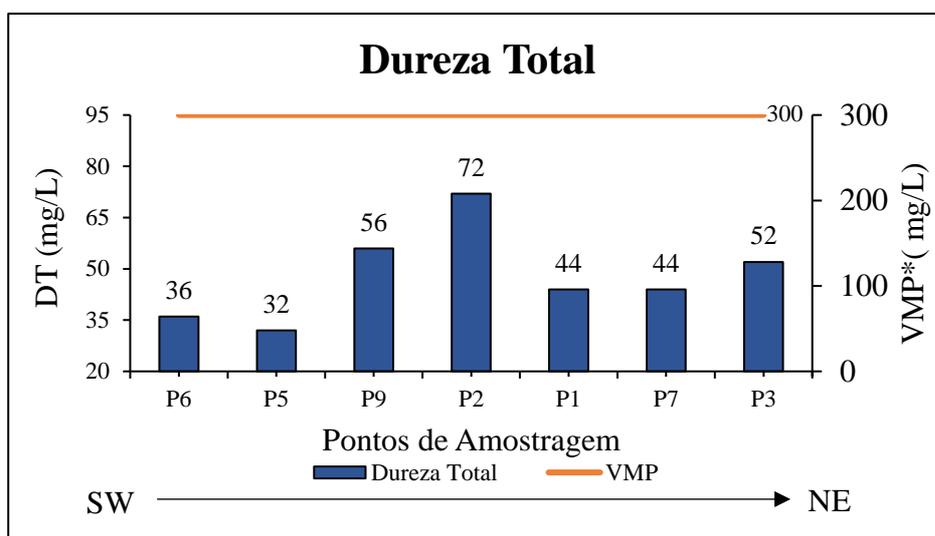
A dureza total é representada pela presença de alguns íons metálicos, principalmente os de (Ca^{2+}) e (Mg^{2+}) e, em menor grau os íons ferrosos (Fe^{2+}) e de estrôncio (S^{2+}). Dissolvidos na água (RICHTER; AZEVEDO NETTO (2002). Segundo Custódio e Llamas (1983), a dureza é definida como poder de consumo de sabão por determinada água ou a capacidade da água neutralizar o sabão pelo efeito do cálcio, magnésio e outros elementos.

A dureza das águas é expressa em termos de CaCO_3 , e podem ser classificadas em: águas muito duras aquelas com valores superiores a 200 mg/L CaCO_3 , águas duras com valores de 100 mg/L a 200 mg/L CaCO_3 , pouco duras de 50 mg/L a 100 mg/L CaCO_3 , e brandas com valores menores que 50 mg/L CaCO_3 (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983).

Os resultados da dureza das águas do presente estudo, variaram de 32 mg/L (P2) a 72 mg/L CaCO_3 (P5), com média de 48 mg/L $\text{CaCO}_3 \pm 12,47$ (Figura 30). De acordo com classificação de Custódio e Llamas (1983), as águas dos poços P6, P5, P5, P1 e P7 são consideradas

brandas e as dos poços P9, P2, e P3 são pouco duras, e com valores abaixo do valor máximo permitido pela legislação (300 mg/L), portanto, dentro do padrão de potabilidade para o consumo humano, de acordo com a Portaria nº 8878/2021 do Ministério da Saúde.

Figura 30 - Dureza Total (mg/L CaCO₃) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



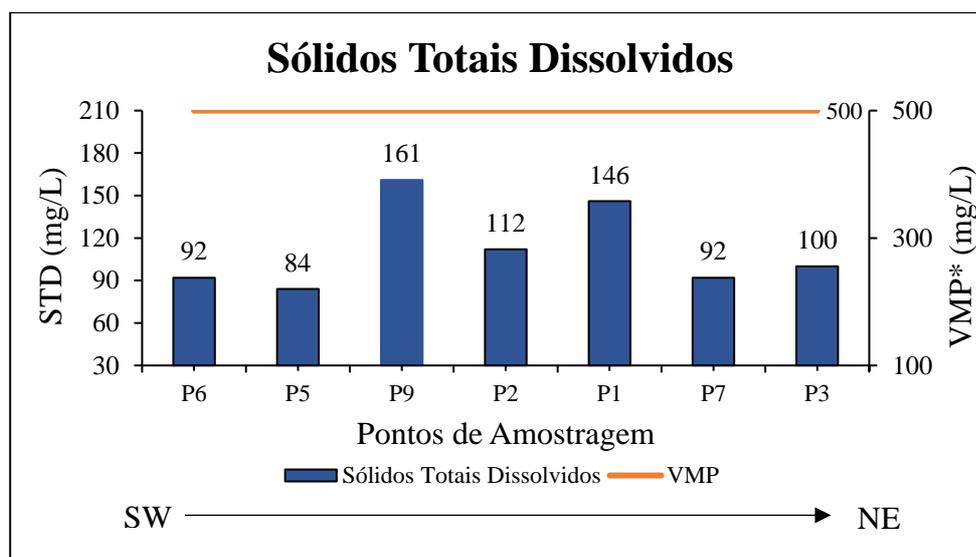
Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

5.2.1.7 Sólidos Totais Dissolvidos (STD)

Os sólidos totais dissolvidos (STD) correspondem a soma de todos os constituintes químicos dissolvidos na água. A aplicação da determinação dos STD é principalmente quanto a qualidade estética da água potável, e como um indicador agregado da presença de produto químicos contaminantes. O teor de sólidos dissolvidos possui relação direta com a composição mineralógica da rocha reservatório e com o tempo de percolação das águas subterrâneas no interior de um aquífero (PARRON, 2011).

O STD das águas coletadas no presente estudo apresentou variação de 84 mg/L (P5) a 161 mg/L (P9), com média de 112,43 mg/L \pm 27,47 (Figura 31). Considerando que o valor máximo permitido de STD é de 500 mg/L, de acordo com a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde, a água subterrânea dos poços estudados encontra-se dentro dos padrões de potabilidade e apta para consumo humano.

Figura 31 - Concentração de sólidos totais dissolvidos (em mg/L) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

5.2.2 Composição Iônica

Os íons determinados na água subterrânea em estudo foram os cátions sódio, potássio, magnésio, cálcio, e ânions nitrato, sulfato e cloreto.

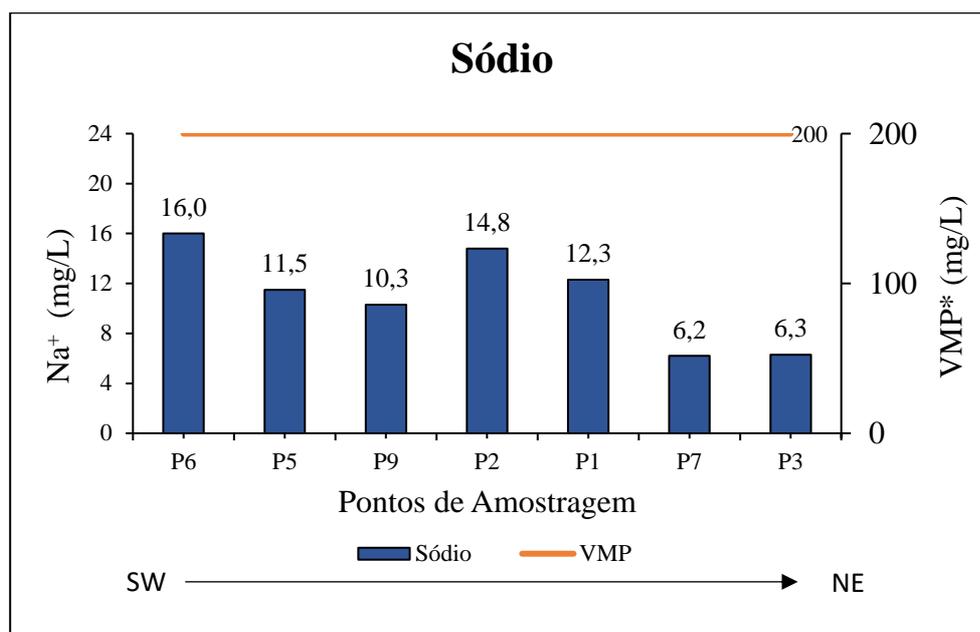
5.2.2.1 Sódio (Na⁺)

O Sódio é um dos metais alcalinos mais abundantes e importantes nas águas subterrâneas, e o principal responsável pela salinização de águas naturais. Esta abundância está associada com a ampla distribuição nos minerais fontes, baixa estabilidade química dos minerais que o contêm, solubilidade elevada e difícil precipitação da maioria dos seus compostos químicos em solução (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983).

O sódio ocorre principalmente sob forma de cloretos, sendo derivado dos principais minerais silicáticos como os feldspatos plagioclásio, feldspatóides e piroxênios. Elevadas concentrações de sódio podem diminuir a permeabilidade do solo prejudicando a formação e crescimento de plantas, além de ser um bom indicador de contaminação antrópica, através de efluentes domésticos, uma vez que valores anômalos de sódio podem ser indicativos de contaminação por efluentes residuais domésticos, pois este é encontrado comumente nas excreções humanas (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983; FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000, FREDDO FILHO, 2018).

As concentrações de sódio encontradas na área de estudo variaram de 6,2 mg/L (P7) a 16,0 mg/L (P6), com média de 11,06 mg/L \pm 3,52 (Figura 32). Logo, a água de todos os poços está bem abaixo do valor máximo permitido (250 mg/L) de sódio para água potável, de acordo com a Portaria MS N° 888 de 04/05/2021.

Figura 32 - Concentração de sódio (em mg/L) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



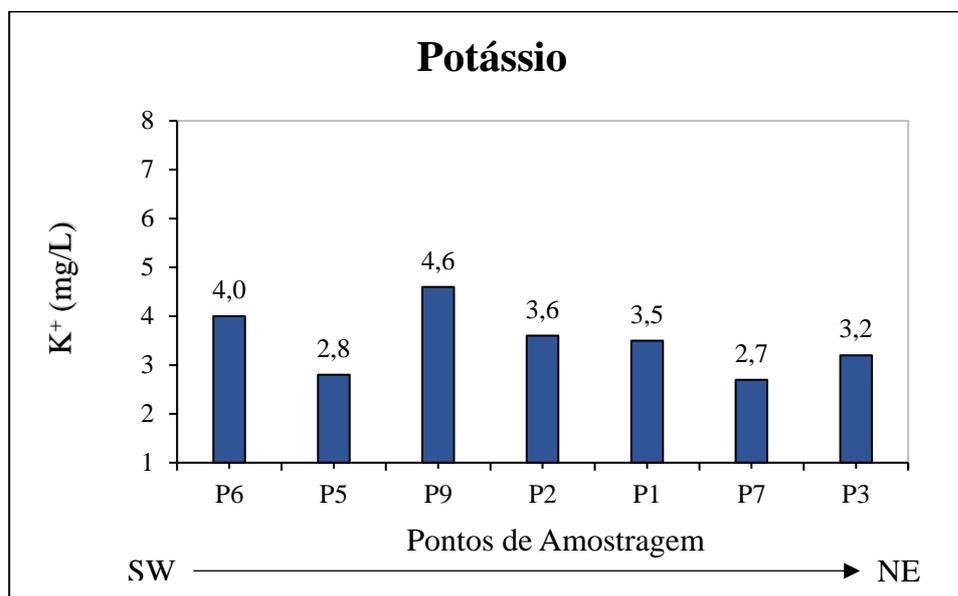
Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria n° 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

5.2.2.2 Potássio (K⁺)

O potássio é um metal alcalino que nas águas subterrâneas ocorre em baixas concentrações ou está ausente, pois possui intensa participação nos processos de troca iônica e facilidade de ser adsorvido pelos minerais de argila. Este elemento ocorre principalmente em minerais como feldspatos potássicos, micas e leucitas, em rochas ígneas e metamórficas (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983).

O teor de potássio das águas coletadas dos poços do presente estudo variou de 2,7 mg/L (P7) a 4,6 mg/L (P9), com média de 3,49 mg/L \pm 0,62 (Figura 33). Geralmente as águas superficiais possuem teores de potássio entre 1 mg/L e 3 mg/L e, nas águas subterrâneas os valores são normalmente inferiores a 10 mg/L, sendo mais frequente teores de K⁺ entre 0,5 mg/L a 5 mg/L (PARRON, 2011). Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do limite de K⁺ para ambiente natural de água subterrânea. A legislação brasileira pela Portaria MS N° 888/2021 não estipula o valor máximo permitido para o teor de potássio na água potável.

Figura 33 - Concentração de potássio (em mg/L) na água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022)

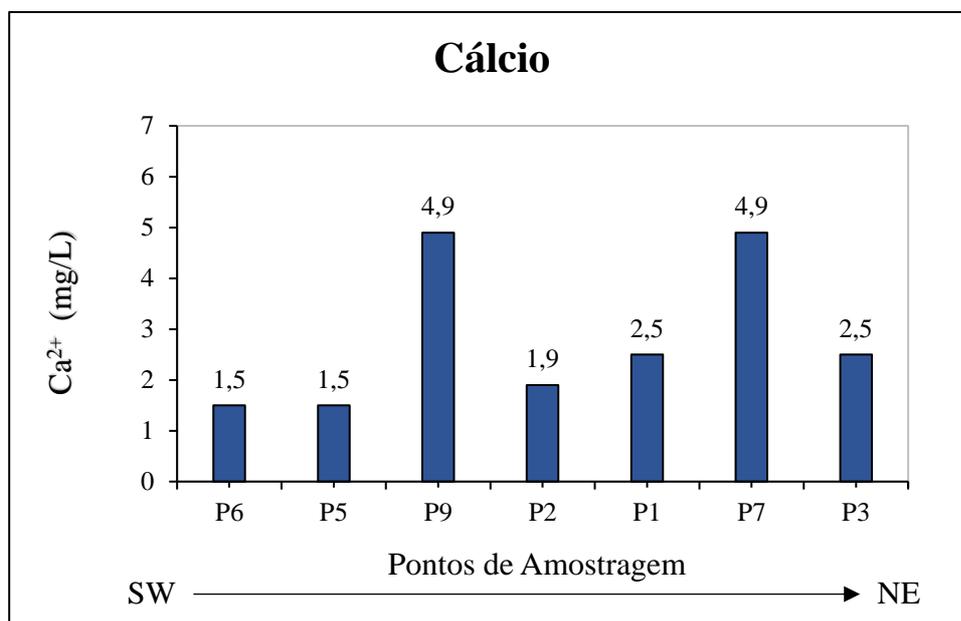
5.2.2.3 Cálcio (Ca²⁺)

O cálcio é um dos principais constituintes da maioria das águas, solos e rocha. Em águas subterrâneas, o cálcio provém de minerais como calcita (CaCO₃), dolomita (CaMg(CO₃)₂), Aragonita (CaCO₃), plagioclásio – anortita (CaAl₂Si₂O₈) e apatita (Ca₅(F,Cl,OH)(PO₄)₃), sendo o principal responsável pela dureza, apresentando-se, em geral, sob a forma de bicarbonato e, excepcionalmente, como carbonato (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983).

No corpo humano o cálcio é essencial para o fortalecimento do sistema ósseo e funções enzimáticas que auxiliam no crescimento. No entanto, em concentrações excessivamente altas o Ca pode prejudicar à saúde humana e causar danos aos rins, desidratação e dores musculares, enquanto sua carência pode causar raquitismo e osteoporose (MENDES; OLIVEIRA, 2004; RAMAGE, 2005)

O valor de cálcio das águas coletadas, apresentou variação de 1,5 mg/L (P5, P6) a 4,9 mg/L (P7, P9), e uma média de 2,81 mg/L ± 1,37 (Figura 34). A legislação brasileira não estipula valores quanto ao teor de cálcio pela Portaria N° 888/2021, mas sabe-se que cálcio pode ser encontrado em corpos d'água em concentrações em torno de 15 mg/L e, em águas subterrâneas, em concentrações que variam de 10 mg/L a 100 mg/L (PARRON, 2011). Portanto, todas as águas analisadas estão dentro de limite comumente encontrado na natureza.

Figura 34 - Concentração de cálcio (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022)

5.2.2.4 Magnésio (Mg^{2+})

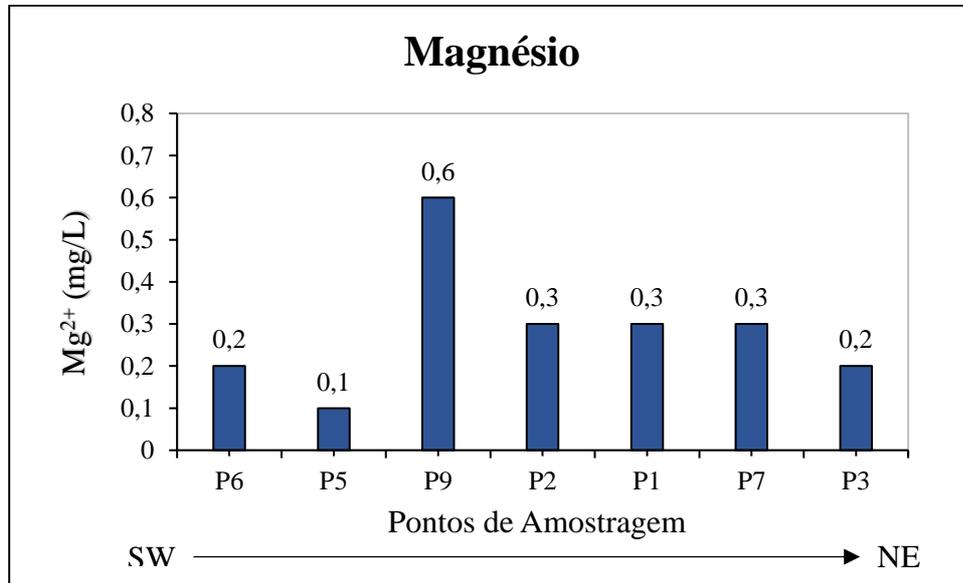
O magnésio é um elemento de comportamento geoquímico similar ao do cálcio, sendo, porém, mais solúvel e mais difícil de precipitar, ocorrendo, em geral, sob a forma de bicarbonato. Ocorre geralmente em minerais como a magnesita (MgCO_3) e dolomita (CaMgCO_3) e, juntamente com o cálcio, é o cátion que mais contribui para a dureza total da água (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000; PARRON, 2011).

O magnésio em quantidades normais no corpo humano converte o açúcar em energia e é importante para o equilíbrio de nervos e músculos. Por outro lado, a deficiência em magnésio causa nervosismo e tremores, enquanto o excesso pode provocar distúrbios intestinais, sendo um dos principais princípios ativos de medicamentos laxativos (RAMAGE, 2005).

Para a água em estudo, os valores obtidos oscilaram entre 0,1 mg/L (P5) e 0,6 mg/L (P9), apresentando média de $0,29 \text{ mg/L} \pm 0,15$ (Figura 35). Tais concentrações são idênticas às encontradas por Tancredi (1966), que foram de 0,1 mg/L a 0,5 mg/L, na água do Alter do Chão na região de Santarém. Em comparação com as concentrações de Mg comumente determinadas nas águas naturais, em concentrações próximas de 4 mg/L e, em águas subterrâneas, em concentrações próximas de 5 mg/L, a água dos poços em estudo possui teores

muito baixos de Mg (PARRON, 2011). A Portaria nº 888/2021 não estipula valor quanto ao teor permitido de magnésio na água potável.

Figura 35 - Concentração de magnésio (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022)

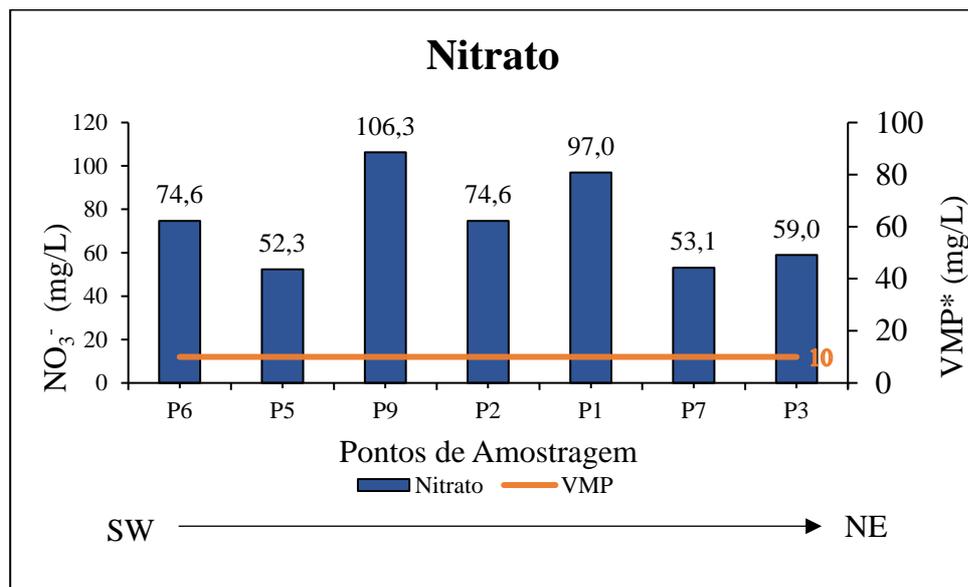
5.2.2.5 Nitrato (NO₃⁻)

O nitrato é solúvel na maioria dos solos que possuem colóides com carga negativa (por exemplo, argilas), assim o nitrogênio na forma de nitrato (NO₃⁻) lixivia-se mais facilmente no solo do que na forma de amônio (NH₄⁺) (BOWER, 1978). Nas águas naturais o nitrato ocorre, na maioria das vezes, em baixas concentrações, representando os estágios finais da oxidação da matéria orgânica, assim, valores acima de 5 mg/L podem ser indicativos de contaminação (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

Na água dos poços amostrados, os teores de nitrato variaram de 52,3 mg/L (P5) a 106,3 mg/L (P9), com média de 73,84 mg/L ± 19,66 (Figura 36). Os resultados das análises químicas nas amostras de água indicaram contaminação por nitrato em todos os poços estudados com valores acima do limite estabelecido pela Portaria Ministério da Saúde N°888/2021 (10 mg/L NO₃⁻). Essa contaminação provavelmente pode estar relacionada à presença dos agentes poluidores como, as fossas sépticas e os esgotos domésticos das residências próximas, e as águas residuais das lavagens automotivas, que contém surfactantes e resíduos de derivados do petróleo (óleo lubrificantes e combustíveis fósseis), acarretando matéria orgânica para as águas subterrâneas, e elevando os teores de nitrato.

Nas águas utilizadas para consumo humano, a contaminação por nitrato pode trazer graves consequências à saúde, como intoxicação a bebês, causando a chamada Tetralogia de Fallot ou síndrome do bebê azul, e no intestino pode se reduzir a nitrito e reagir com aminas secundárias ocasionando substâncias carcinogênicas (MENDES; OLIVEIRA, 2004; VARNIER; HIRATA, 2002).

Figura 36 - Concentração de nitrato (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

5.2.2.6 Sulfato (SO_4^{2-})

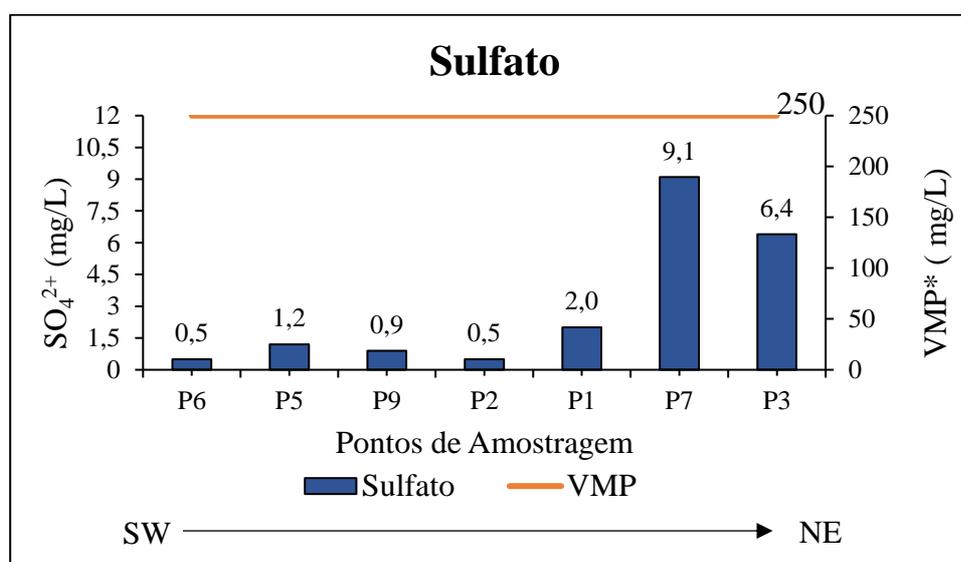
Os sulfatos podem ser dissolvidos dos minerais gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anidrita (CaSO_4), barita (BaSO_4), entre outros. Altas concentrações de sulfato (SO_4^{2-}) em águas naturais são mais comuns associadas à presença desses minerais (PARRON, 2011).

O sulfato pode ocorrer naturalmente em águas subterrâneas, pois é encontrado sob a forma de enxofre, nas plantas, no solo, nas rochas e em águas pluviais.

As principais origens antrópicas dos sulfatos no meio ambiente são os setores da economia e produtos que usam o ácido sulfúrico, como as baterias de carro, as siderurgias, refinarias de petróleo e os serviços de tratamento de águas residuais. As descargas diretas ou indiretas de águas residuais contendo sulfato em aquíferos, vindas de esgotos domésticos e efluentes industriais, podem prejudicar a qualidade das águas e interferir no ciclo natural do enxofre (RIOS, 2015; SANTOS, 2008; FREDDO FILHO, 2018).

O teor de sulfato da água dos poços em estudo apresentou variação de 0,5 mg/L (P6 e P2) a 9,1 mg/L (P7), e uma média de 2,94 mg/L \pm 3,16 (Figura 37). De uma forma geral, esses resultados mostram valores baixos para concentração de sulfato em águas naturais. Logo, a água de todos esses poços está dentro dos padrões de aceitação para o consumo humano, uma vez que a Portaria nº 888/2021, do Ministério Brasileiro de Saúde, estabelece um VMP de sulfato de 250 mg/L para água potável.

Figura 37 - Concentração de sulfato (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

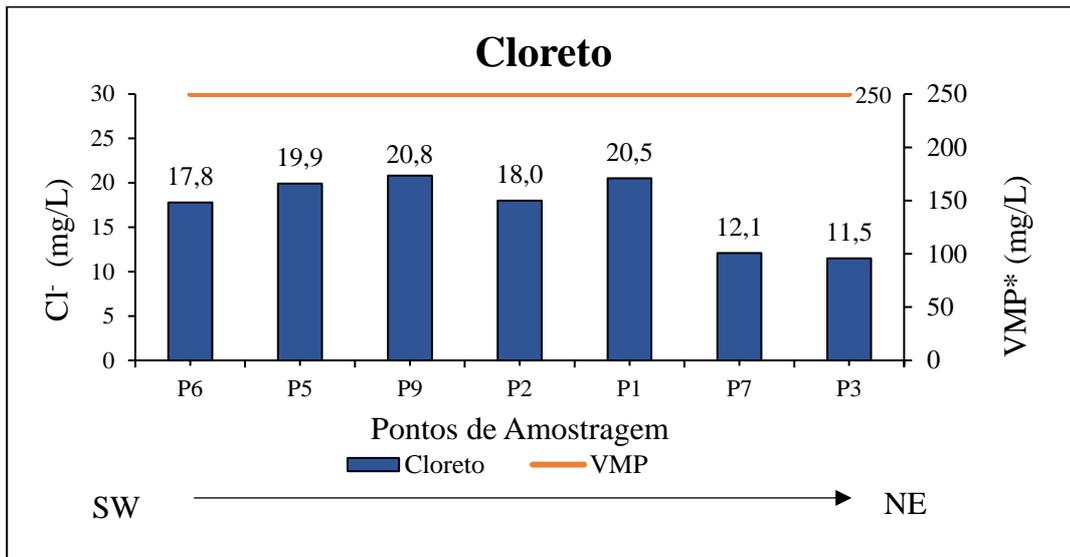
5.2.2.7 Cloreto (Cl⁻)

O cloreto está presente em todas as águas naturais, com valores situados entre 10 mg/L e 250 mg/L nas águas doces e valores entre 18.000 mg/L e 21.000 mg/L em águas marinhas (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008). O cloreto, juntamente com metais, forma um dos sais mais abundante da natureza, é muito solúvel e apresenta alta estabilidade em solução e por isso a sua precipitação é dificultada. Portanto, a tendência do Cl⁻ é não ser oxidado e nem ser reduzido em águas naturais (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

As águas subterrâneas geralmente apresentam valores de cloreto inferior a 100 mg/L, e as diversas interações experimentadas por essas águas, em sua maioria não influenciam no aumento da concentração desse íon. Assim, o aumento do teor desse ânion nas águas subterrâneas pode ser de origem antrópica, especialmente nas águas residuais (resíduos industriais e esgotos sanitários) e lixões e aterros (SANTOS, 2011).

O valor máximo de cloreto encontrado nos poços pesquisados foi de 20,8 mg/L (P9) e o valor mínimo de 11,5 mg/L (P3), com média de 17,23 mg/L \pm 3,60 (Figura 38). Os resultados obtidos mostram que todas as amostras analisadas estão dentro dos padrões de aceitação para o consumo humano. A Portaria nº 888/2021, do Ministério Brasileiro de Saúde, estabelece como padrão de potabilidade para o cloreto o VMP de 250 mg/L.

Figura 38 - Concentração de cloreto (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

Tabela 5 -Características físico-químicas da água subterrânea dos poços da área urbana do município de Santarém, Pará, abril de 2019

Parâmetros	Unidade de Medida	Amostras											*VMP
		P1	P2	P3	P5	P6	P7	P9	Média	*DP	Máximo	Mínimo	
Profundidade	m	32	35	35	28	34	35	40	34,14	3,63	40	28	-
Temperatura	°C	30,1	30,2	30,1	30,5	30,0	30,2	29,0	30,01	0,44	30,5	29	-
pH	-	3,68	3,52	3,56	3,75	3,39	4,39	3,83	3,73	0,30	4,39	3,39	6 a 9
Oxigênio Dissolvido	mg/L	3,3	3,8	3,5	3,1	4,4	3,0	2,5	3,37	0,56	4,4	2,5	-
Condutividade Elétrica	µS/cm	318	235	210	199	256	216	333	252,43	49,41	333	199	-
Alcalinidade Total	mg/L de CaCO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
Dureza Total	mg/L	44	72	52	32	36	44	56	48	12,47	72	32	300
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	146	112	100	84	92	92	161	112,43	27,47	161	84	500
Cloreto	mg/L	20,5	18,0	11,5	19,9	17,8	12,1	20,8	17,23	3,60	20,8	11,5	250
Nitrato	mg/L	97,0	74,6	59,0	52,3	74,6	53,1	106,3	73,84	19,66	106,3	52,3	10
Sulfato	mg/L	2,0	0,5	6,4	1,2	0,5	9,1	0,9	2,94	3,16	9,1	0,5	-
Sódio	mg/L	12,3	14,8	6,3	11,5	16,0	6,2	10,3	11,06	3,52	16,0	6,2	200
Potássio	mg/L	3,5	3,6	3,2	2,8	4,0	2,7	4,6	3,49	0,62	4,6	2,7	-
Magnésio	mg/L	0,3	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,6	0,29	0,15	0,6	0,1	-
Cálcio	mg/L	2,5	1,9	2,5	1,5	1,5	4,9	4,9	2,81	1,37	4,9	1,5	-

Legenda: DP: Desvio Padrão; VMP: Valor Máximo Permitido – Pela Portaria do Ministério da Saúde nº 888/2021 (BRASIL, 2021). Fonte: BRASIL (2021); Autor (2022). :

5.2.3 Metais e Arsênio

Os metais determinados foram Cr, Al, Pb, As, Cu e Zn. Em altas concentrações, esses elementos podem causar dano à saúde humana, devido ao efeito tóxico característico reconhecido de muitas dessas substâncias. Alguns metais podem ocorrer naturalmente de forma dissolvida na água, como resultado do ambiente que ela percola, como do tipo litológico, sistema de fluxo, aspectos climáticos e geofisiográficos. Mas também, podem ser provenientes de fontes poluidoras não naturais, como o lançamento de efluentes domésticos e industriais (líquidos e gasosos), de fertilizantes da lixiviação de áreas de agricultura e de lixiviação da ganga de áreas de mineração (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

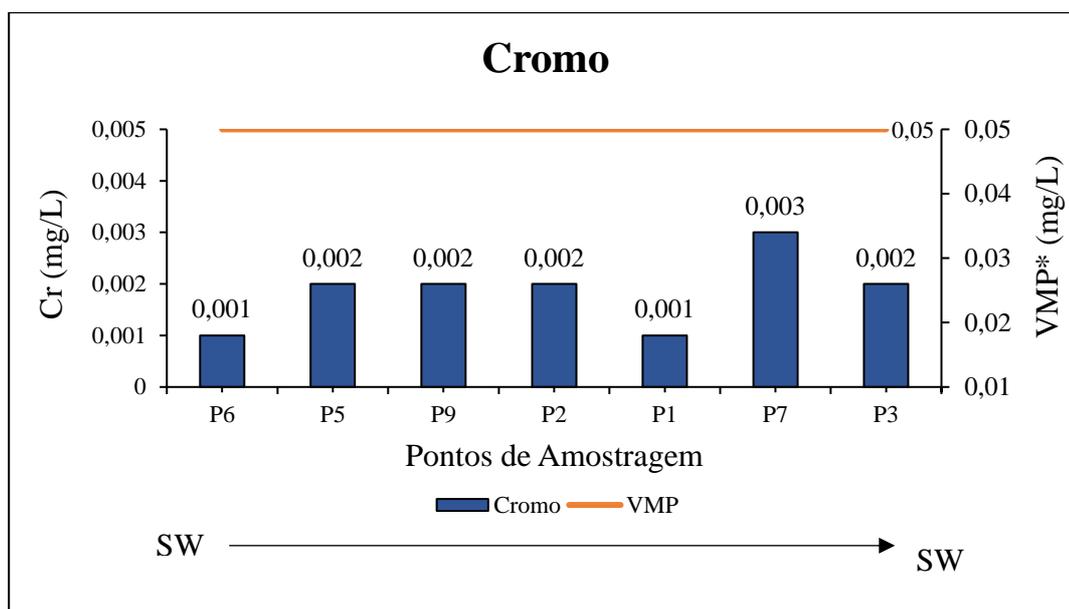
5.2.3.1 Cromo (Cr)

O cromo nas águas naturais ocorre em pequenas concentrações e encontra-se amplamente distribuído no ambiente. De acordo com Santos (2011), o cromo é um elemento que em ambiente natural possui dois estados de oxidação: hexavalente (VI) e trivalente (III). O Cr trivalente nas águas subterrâneas é pouco móvel e apresenta baixa toxicidade para o ser humano se ingerido por via oral, devido ser um nutriente essencial, enquanto o Cr hexavalente é altamente móvel e possui elevada toxicidade por ser cancerígeno.

O cromo em águas subterrâneas pode ser gerado através de processos naturais, estando associado aos minerais da rocha matriz do aquífero. A presença de Cr também pode estar associada a processos antrópicos ligados a atividades socioeconômicas como indústrias de manufaturas de pigmentos, de filmes fotográficos e de inibidores de corrosão (FREDDO FILHO, 2018).

No presente trabalho, os valores encontrados para Cr situaram-se entre 0,001 mg/L (P1 e P6) e 0,003 mg/L (P7), com média de 0,002 mg/L \pm 0,001 (Figura 39). De acordo com a Portaria N° 888/2021, o limite de potabilidade para o cromo é de 0,05 mg/L. Logo, para esse metal todas as águas analisadas estão dentro do valor máximo permitido para consumo.

Figura 39 - Concentração de cromo (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

5.2.3.2 Alumínio (Al)

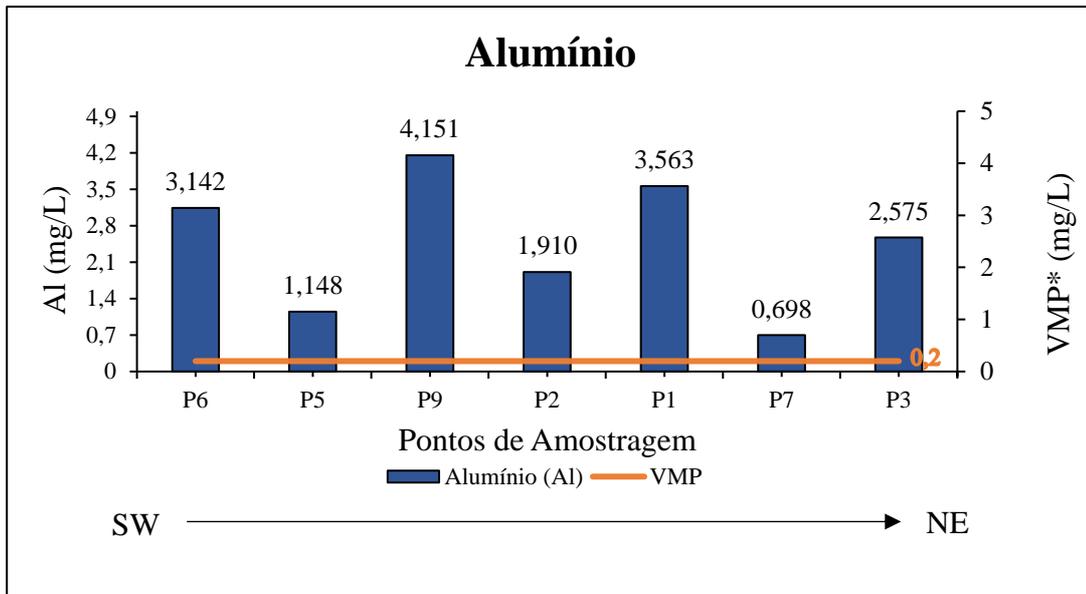
O alumínio ocorre naturalmente no solo, na água e no ar, sendo redistribuído ou movido, através de atividades naturais ou humanas. As concentrações de alumínio variam bastante nas águas subterrâneas, dependendo diretamente de fatores geológicos e físico-químico. A solubilidade do Al é controlada pela estabilidade de diferentes complexos com íons de hidroxila e pela solubilidade dos argilominerais (caulinita, por exemplo) em equilíbrio com a solução (PARRON, 2011; ALBARÉDE, 2011).

Os valores para Al variaram de 0,698 mg/L (P7) a 4,151 mg/L (P9) e a média foi de 2,455 mg/L \pm 1,176 (Figura 40). De acordo com a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde, para águas destinadas ao consumo humano o VMP de alumínio é de 0,200 mg/L. Portanto, a água de todos os poços em estudo está imprópria para consumo, pois apresentam concentrações de Al acima do permitido pela legislação. Estas concentrações podem estar relacionadas com o processo de intemperismo natural da crosta laterítica intercalada com as rochas silicilásticas presente na formação Alter do Chão (ANDRETTA, 2014).

O alto teor de alumínio nas águas subterrâneas é preocupante, devido à evidências deste ser um elemento neurotóxico e doenças como osteomalácias é característica em humanos expostos a elevadas quantidades de alumínio. Estudos recentes associam o acúmulo de alumínio no homem ao aumento de casos de demência senil do tipo Alzheimer (CLETO, 2008). O

excesso de alumínio também pode causar problemas renais e distúrbios orgânicos, alterações das propriedades organolépticas da água (sabor desagradável e coloração turva), além de incrustações em tubulações e obstruções nas canalizações (FREDDO FILHO, 2018).

Figura 40 - Concentração de alumínio (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



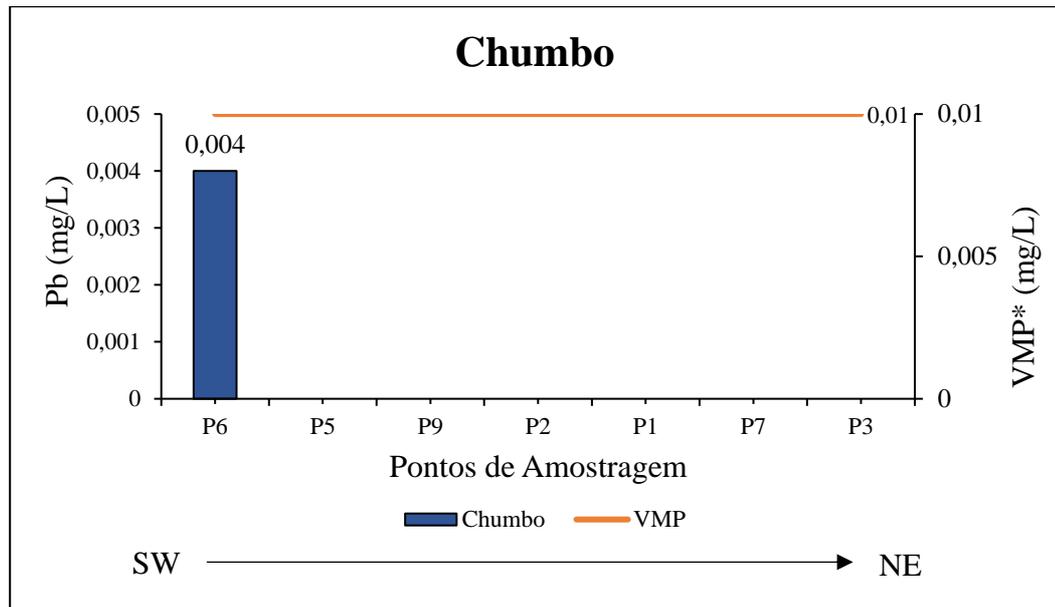
Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

5.2.3.3 Chumbo (Pb)

O chumbo está inserido no grupo de metais pesados, em conjunto com o mercúrio e o cádmio. O Pb ocorre numa variedade de minérios, dentre os quais se destaca a galena (PbS), a mais importante fonte primária de chumbo e a principal fonte comercial. O Pb encontra-se associado a outros metais nos sulfetos, tais como zinco (Esfalerita – ((Zn,Fe)S)) e o ferro (Pirita – (FeS₂)), além está presente numa variedade de ligas e seus compostos são preparados e usados em grande escala em muitas indústrias.

Apenas na água do poço 6 (P6) foi detectado Pb, cuja concentração foi de 0,004 mg/L (Figura 41), bem abaixo do VMP para as águas destinadas ao consumo humano, que é de até 0,01 mg/L de acordo com a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde. Diante disso, para este metal, a água de todos os poços não apresenta perigo de consumo.

Figura 41 - Concentração de chumbo (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



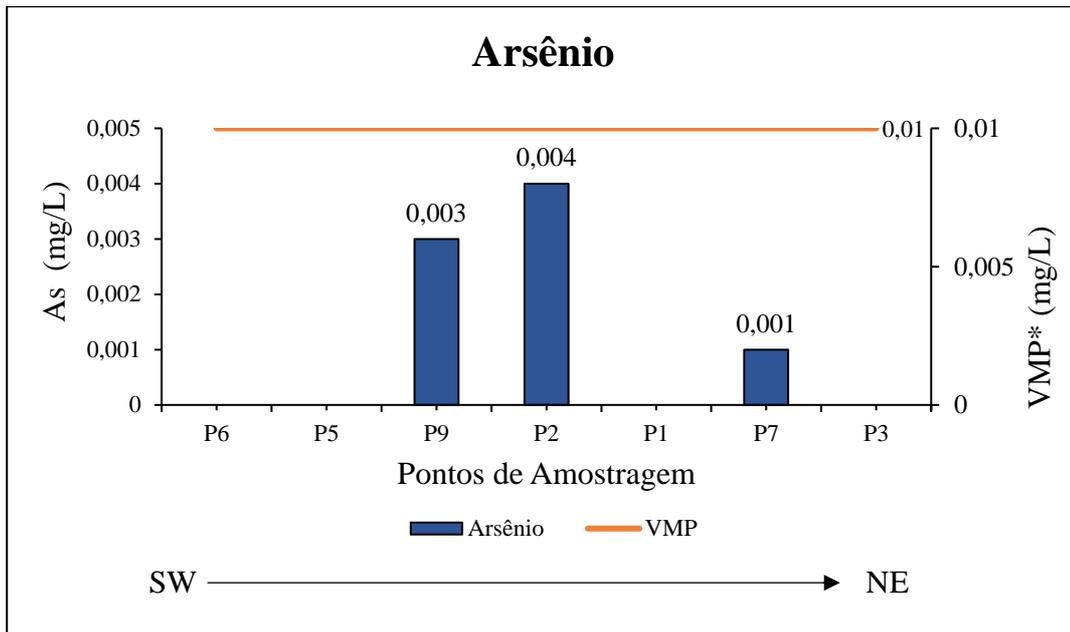
Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

5.2.3.4 Arsênio (As)

O arsênio está presente em quase todos os sulfetos metálicos, na matéria orgânica e dissolvido na água. As jazidas de metais são as principais fontes naturais de arsênio, onde o elemento é encontrado na forma de arsenita. Quanto às fontes antrópicas, o arsênio pode ser proveniente do uso de inseticidas e herbicidas, bem como de resíduos industriais à base de arsênio (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983).

No presente trabalho, os resultados para As variaram de 0,004 mg/L (poço 02) a 0,001 mg/L (poço 07), com média de $0,003 \text{ mg/L} \pm 0,001 \text{ mg/L}$ (Figura 42). De acordo com a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o As é de até 0,01 mg/l, para as águas destinadas ao consumo humano. Diante disso, todos os poços possuem água cujos valores de As estão dentro do permitido pela legislação.

Figura 42 - Concentração de arsênio (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



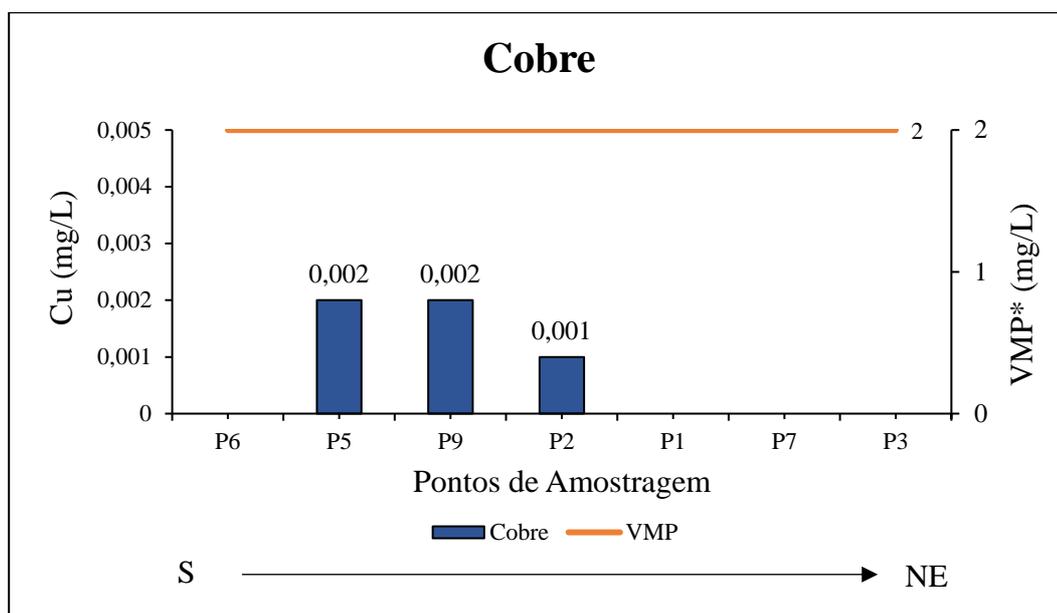
Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

5.2.3.5 Cobre (Cu)

O cobre ocorre em águas subterrâneas através da solubilidade de minerais, tais como calcopirita (CuFeS_2), calcosita (Cu_2S), covelita (CuS) e a malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$). A disponibilidade do cobre no sistema aquático é decorrente de vários processos, tais como a complexação a ligantes orgânicos e inorgânicos, adsorção a óxidos metálicos, argilas e material particulado em suspensão, bioacumulação e trocas entre sedimentos e água (ATSDR, 2004; WHO, 1998).

O teor de Cu das águas coletadas, apresentou variação de 0,002 mg/L (P5, P9) a 0,001 mg/L (P2), e uma média de 0,002 mg/L \pm 0,000 (Figura 43). De acordo com a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o cobre é de até 2 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

Figura 43 - Concentração de cobre (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



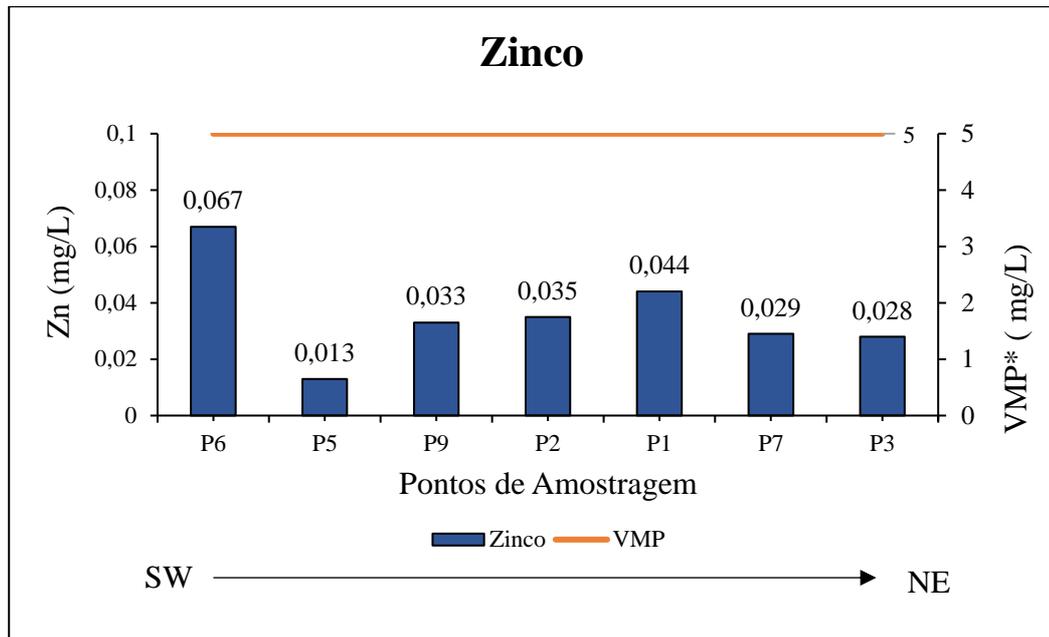
Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

5.2.3.6 Zinco (Zn)

O zinco é caracterizado por sua mobilidade, sendo encontrado amplamente disperso no ambiente, e entre os metais pesados é o mais solúvel e os seus sais são altamente persistentes na água. A sua concentração é, na maioria das vezes, inferior a 10 mg/L nas águas subterrâneas (MATHESS, 1973). Devido a sua propriedade anticorrosiva, o zinco tem vasta aplicação na construção civil e atividade automobilística e de eletrodomésticos. As principais fontes antrópicas de Zn para o solo são as atividades de mineração, o uso agrícola de lodo de esgoto, de resíduos e subprodutos de processos industriais, e o uso de agroquímicos como os fertilizantes (HSDB, 2006).

O teor de Zn das águas coletadas, apresentou variação de 0,013 mg/L (poço 5) a 0,067 mg/L (poço 6), e uma média de $0,036 \text{ mg/L} \pm 0,015$ (Figura 44). De acordo com a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o zinco é de até 5 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

Figura 44 - Concentração de zinco (mg/L) da água subterrânea de poços da zona urbana de Santarém, Pará, em abril de 2019



Fonte: Autor (2022). VMP*: Valor Máximo Permitido de Acordo com a Portaria nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021)

Tabela 6 - Concentração de metais e as (mg/L) da água subterrânea dos poços da área urbana do município de Santarém, Pará, abril de 2019. Período chuvoso.

Parâmetros	Unidade de Medida	Amostras											*VMP
		P1	P2	P3	P5	P6	P7	P9	Média	*DP	Máximo	Mínimo	
Cromo	mg/L	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	0,003	0,002	0,002	0,001	0,003	0,001	0,05
Alumínio	mg/L	3,563	1,910	2,575	1,148	3,142	0,698	4,151	2,455	1,176	4,151	0,698	0,1
Chumbo	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,004	<LQ	<LQ	-	-	-	-	0,01
Arsênio	mg/L	<LQ	0,004	<LQ	<LQ	<LQ	0,001	0,003	0,003	0,001	0,004	0,001	0,01
Cobre	mg/L	<LQ	0,001	<LQ	0,002	<LQ	<LQ	0,002	0,002	0,000	0,002	0,001	0,009
Zinco	mg/L	0,044	0,035	0,028	0,013	0,067	0,029	0,033	0,036	0,015	0,067	0,013	0,18

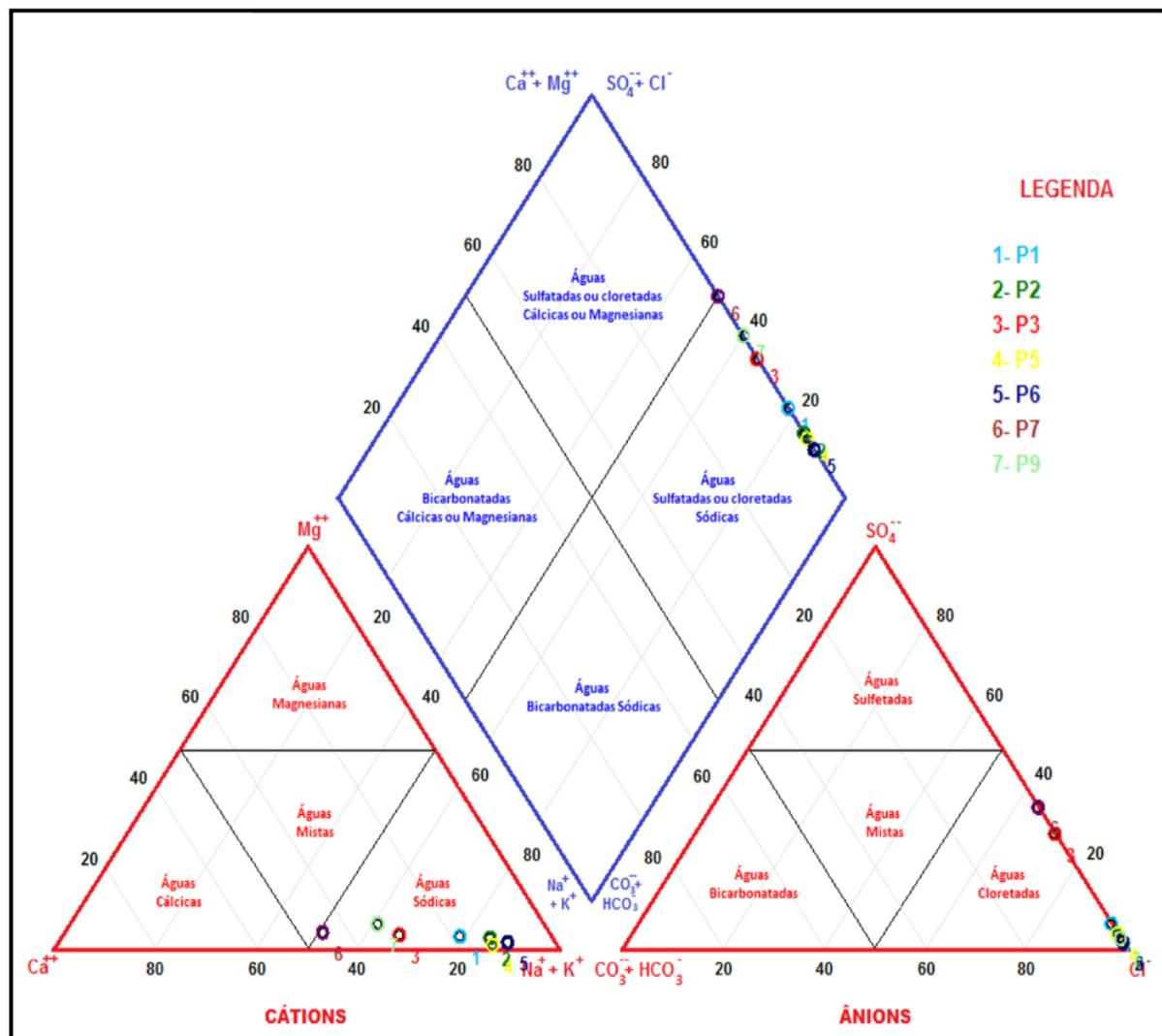
Legenda: DP: Desvio Padrão; <LD: não determinado no aparelho (LD=0,001 mg/L); VMP: Valor Máximo Permitido – Pela Portaria do Ministério da Saúde nº 888/2021 (BRASIL, 2021). Fonte: BRASIL (2021); Autor (2022).

5.3 Caracterização Hidrogeoquímica

As águas subterrâneas dos poços em estudo foram classificadas como águas sulfatadas ou sódicas cloretadas (100%). Em relação aos ânions, houve a predominância do cloreto em todas as amostras ($\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$), enquanto na classificação catiônica, houve predominância de sódio e potássio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$) (Figura 45).

Diante disso, observa-se que nas águas subterrâneas estudadas da zona urbana de predominam os íons de Cl^- , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, idêntico ao encontrados por TANCREDI (1996) nessa região. De acordo com o citado autor, a concentração de sódio e cloreto está relacionada ao tempo e percurso da água (na atmosfera e na pedosfera) resultado do transporte de sais periódicos de origem marinha.

Figura 45 - Classificação hidrogeoquímica, segundo o Diagrama de Piper, da água dos poços tubulares da área urbana de Santarém, Pará, sistema aquífero Alter do Chão, período chuvoso (abril), 2019



Fonte: Autor (2023)

Para atestar a validade dos resultados das concentrações iônicas usados para a classificação da água segundo Piper, utilizou-se o método de Balanço Iônico baseado no Erro Prático (EP), definido por Custórdio e Llamas (1983) com:

$$Ep(\%) = \left[\frac{r \Sigma \text{ânios} - r \Sigma \text{cations}}{r \Sigma \text{ânios} + r \Sigma \text{cations}} \right] \times 100$$

O resultado desse cálculo é dado em porcentagem e deve respeitar as variâncias apresentada na tabela abaixo.

Tabela 7 - Relação de erro permissível em função da soma de cátions e ânions

Cond. Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	50	200	500	2.000	> 2.000
Erro Permitido (%)	30	10	8	4	< 4

Fonte: Custórdio e Llamas (1983)

Para o cálculo do DBI foi utilizado o software livre *Qualigraf*, elaborado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme). De um total de sete análises químico-físicas cujos dados foram introduzidos na planilha do programa, cinco apresentaram resultados aceitáveis para a metodologia (Tabela 8). Assim, 72% das amostras analisadas apresentaram resultados aceitáveis. Em princípio, as principais causas de erro resultam da presença de outros íons não quantificados ou existentes em quantidades apreciáveis na água, como o caso do nitrato (NO_3^-), que apresentou uma média de 73,84 mg/L nas águas estudadas.

Tabela 8 - Balanço iônico das amostras

Nome da Amostra	Na + K (meq/L)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Cl (meq/L)	CO ₃ + HCO ₃ (meq/L)	SO ₄ (meq/L)	C.E. ($\mu\text{S/cm}$)	Σ Cations (meq/L)	Σ Anions (meq/L)	B.I. I (%)	Observações
P1	0,6246	0,1250	0,0247	0,5783	0,0000	0,0416	318	0,7742	0,6199	22,13	OK
P2	0,7359	0,0950	0,0247	0,5078	0,0000	0,0104	235	0,8555	0,5182	49,11	Não atende
P3	0,3559	0,1250	0,0164	0,3244	0,0000	0,1332	210	0,4973	0,4577	8,31	OK
P5	0,5719	0,0750	0,0082	0,5614	0,0000	0,0250	199,5	0,6551	0,5864	11,07	OK
P6	0,7983	0,0750	0,0164	0,5021	0,0000	0,0104	256	0,8898	0,5125	53,80	Não atende
P7	0,3440	0,2450	0,0247	0,3413	0,0000	0,1895	216	0,6136	0,5308	14,47	OK
P9	0,5657	0,2450	0,0493	0,5868	0,0000	0,0187	333	0,8600	0,6055	34,73	OK

Fonte: *Qualigraf*, Autor(2022)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com as interpretações das informações do subsolo impressas em radargramas, obtidas através da configuração de 100 ns (3,5 m), com antena de 270 MHz, foi possível determinar feições e estruturas do subsolo de áreas de serviços de lava-jato, tais como: (1) camada superficial de ar entre o GPR e o terreno; (2) camadas do solo com boa reflexão; (3) e a pluma de hidrocarboneto. As interpretações foram realizadas com base nas características, diferenças e/ou similaridades entre os sinais dos refletores e profundidades alcançadas.

A camada superficial de ar entre o *GPR* e o terreno presente nos radargramas, caracterizada por produzir excelente reflexão dada pelas cores intensas de azul e rósea, na profundidade de 0,0 m a 0,5 m, é resultado da propagação da onda na velocidade da luz, nesse pequeno espaço de ar e, por isso, essa feição está presente em todos os radargramas, considerada como interferência. As prováveis plumas de hidrocarbonetos foram identificadas em sete dos nove lava-jatos, nas profundidades 1,5 m a 3,5 m. Os sinais refletores das áreas restritas a essas profundidades são de típicas áreas atenuadas de baixa reflexão, de coloração esbranquiçada, características de hidrocarbonetos derivados de combustíveis fósseis e/ou das substâncias sulfatadas presentes nos sabões e detergentes graças a sua alta condutividade elétrica.

De modo geral, a água subterrânea dos poços dessas áreas de lava-jato é sódica-clorurada, ácida (pH médio de $3,73 \pm 0,30$), com temperaturas média de $30,01 \text{ }^\circ\text{C}$, brandas e poucas duras (dureza média de $48 \text{ mg/L CaCO}_3 \pm 12,47$), moderadamente mineralizadas (CE média de $252,50 \text{ } \mu\text{S/cm} \pm 49,33$), pouco oxigenadas (OD médio de $3,37 \text{ mg/L} \pm 10,56$) devido basicamente ao não contato direto com a atmosfera, límpida e transparente (STD média de $112,42 \text{ mg/L} \pm 27,47$). Assim, uma ou outra característica físico-química compromete para uso como água potável, como é o caso do pH muito ácido. Contudo, as concentrações de nitrato (NO_3^-) e alumínio (Al) acima do VMP da legislação comprometem o uso seguro dessa água. Geralmente, o nitrato está relacionado à presença dos agentes poluidores como, as fossas sépticas e os esgotos domésticos de residências próximas, bem como às águas residuais das lavagens automotivas, que contém surfactantes e resíduos de derivados do petróleo (óleo lubrificantes e combustíveis fósseis), carreando matéria orgânica para as águas subterrâneas, e elevando os teores de nitrato. Quanto ao alumínio, as concentrações podem estar relacionadas à lixiviação e erosão dos solos e pela emissão de efluentes residuais domésticos.

Por fim, a água subterrânea dos poços amostrados neste trabalho está comprometida para consumo humano, pois apresentou concentrações de NO_3^- e Al acima do padrão de pota-

bilidade estabelecido pela da legislação brasileira. As possíveis plumas de hidrocarbonetos presentes no subsolo, podem atingir o lençol freático e aquífero, contaminado as águas e tornando-as ainda mais nocivas a saúde humana.

O método *GPR* apresentou inúmeras vantagens tais como a identificação indireta, não invasiva, rápida e de baixo custo, de estruturas, materiais e feições do subsolo. No entanto, ele não substitui outros meios de análises diretas e pontuais, como as sondagens de poço, fundamentais para a determinação quantitativa e qualitativa dos componentes dos diferentes materiais soterrados.

Portanto, para se obter resultados mais concretos e conclusivos, torna-se necessário tanto complementar os estudos do meio subterrâneo agregando-se diferentes métodos e ferramentas de investigação como o monitoramento semestral seguindo-se o período sazonal da região. Recomenda-se a abertura maior da janela temporal no método GPR, afim de se obter maior alcance de profundidade, e delinear e dimensionar as eventuais plumas e contaminação e verificar o alcance aolençol freático. Recomenda-se também a realização de análises químicas para compostos BTEX e outros metais nas águas subterrâneas, uma vez que são substâncias tóxicas presentes na gasolina, o combustível predominante usado nos automóveis.

REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, J. C. & NEVES, M. F. S. **Determinação de boro em águas do estado do Piauí, Brasil.** Ciência Agronômica, Piauí, 1976, p. 3-5.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (Brasil). **Cuidando das águas: Soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos.** Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, Brasília, 2011, p. 154.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **A Evolução da Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil.** Brasília, 2002. Caderno de Recursos Hídricos. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2002/AEvolucaoadaGestodosRecursosHidricosnoBrasil.pdf>. Acesso em: 29 de julho de 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil.** Brasília, 2005, p. 80.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Portaria nº Resolução ANP nº 36.** Rio de Janeiro, 2005, p. 16. Disponível em: www.anp.gov.br/SITE/acao/download/?id=34208. Acesso em: 15 de setembro de 2022.
- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY - ATSDR. **Toxicological profile for copper.** Division of Toxicology, Atlanta, 2004, p. 272.
- ALBARÉDE, FRANCIS. **Geoquímica uma Introdução.** Tradução Fábio R. Dias. –, Oficina de Textos, São Paulo, 2011, p. 400.
- ALMEIDA, F. M.; SOUZA, D. M.; LUIZ, J. G. **Contaminação por hidrocarbonetos em postos de serviços de Abaetetuba - PA: um estudo com georadar.** 4º PDPETRO, Campinas – SP, 2007, p. 142.
- ANDRADE, E. C. L. de. **Estudo de caso do abastecimento d'água do município de Santarém-Pará.** 2015. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 215, p. 50.
- ANDRETTA, E. R. **Características intrínsecas dos horizontes de alteração da formação Alter do Chão, como diagnóstico para a erodibilidade.** 2014. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014, p. 105.
- BARATA, C. F.; CAPUTO, M. V. **Geologia do petróleo da Bacia do Solimões.** “O Estado da Arte”. 4º PDPETRO, Campinas, 2007, p. 10.
- BARBOSA, N. M. **Diagnóstico ambiental dos empreendimentos potencialmente poluidores e análise do teor de óleos e graxas na microbacia do igarapé Riachuelo em Ji-Paraná/RO.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Rondônia, Paraná, 2015, p. 24-30.
- BOWER, H. **Groundwater hidrology.** McGraw-Hill Book Company, New York, 1978, p. 480.

BRASIL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Projeto Radambrasil Folha Sa 21-Santarém, Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação, Uso potencial da Terra.** Rio de Janeiro, 1976, p. 507.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02 set. 1981.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria GM/MS nº 888 de 04 de maio de 2021.** Diário Oficial da União. Brasília, 2021, p. 32.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. SECRETARIA DE VIGILÂNCIA EM SAÚDE. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano.** Brasília, 2006, p. 212.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, **Resolução CONAMA no 430/2011,** do Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, 2011.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Resolução Nº 362 de 23 de junho de 2005,** do Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, 2005.

BREWSTER, M. & ANNAN, A. P. **Ground Penetrating Radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200MHz radar.** Geophysics, 1994, p. 1211 – 1221.

BRITO, F. do V.; OLIVEIRA, A. S. de; NVES, H. C.; AZVEDO, J. A. T.; BHRING, D. L.; REIS, S. M. dos; MACHADO, M. C. S.; AZEVEDO, G. C.; CARVALHAES, G. K. **Estudo da Contaminação de Águas subterrâneas por BTEX oriundas de postos de distribuição no Brasil.** 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005, p. 2 - 6.

BUENO, E. V. A.; FERREIRA, E. T. D.; SANTOS, V. C. dos; FERREIRA, T. S.; MORAES, K. K.; FILHO, D. A. M. **Aplicabilidade dos métodos não invasivos na engenharia.** IX EPCC - Encontro Internacional de Produção Científica, UniCesumar, 2015, p. 4 - 8.

CAJAZEIRAS, C.: **Qualidade e uso das águas subterrâneas e a relação com doenças de veiculação hídrica, Região de CRAJUBAR–CE.** Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Crajubar, 2007, p 144.

CASTRO, D.L & BRANCO, R.M.G.C. **4D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history.** Journal of Applied Geophysics, Fortaleza, 2002.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO: **Guia nacional de coleta e preservação das amostras: Água, sedimento e comunidade aquática e efluentes líquidos.** 2ª ed. São Paulo, 2011, 327 p.

CLETO, C. I. T. P. **O alumínio na água de consumo humano.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Química Industrial, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal. 2008.

CORDANI, U. G.; SATO, K.; TEIXEIRA, W.; TASSINARI, C. C. G.; BASEI, M. A. S. Crustal evolution of the South American Platform. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.;

THOMAZ FILHO, A., CAMPOS, D. A. (Ed.). **Tectonic Evolution of South America**. International Geological Congress. Rio de Janeiro, 2000, p. 19-40.

CORDANI, U., NEVES, B. B. B., FUCK R. A., PORTO, R., THOMAS FILHO, A., CUNHA, F. M. B.: **Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com outros eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras**. Série Ciência-Técnica-Petróleo, PETROBRAS, Rio de Janeiro, 1984, v. 14, p. 70.

CORSEUIL, H. X.; FERNANDES, M. **Cosolvency effect in aquifers contaminated with etan-olamended gasoline**. Anais do The Fifth International In Situ and On - Site Bioremediation Symposium. Columbus, San Diego, EUA, 1999, p. 135 – 140.

COSTA, M. J. C. **Tratamento biológico de efluente de lava-jatos**. 2006. Dissertação (Mestrado). PRODEMA, Universidade Federal da Paraíba, 2006, p. 108.

CRUZ, J. C. G. **Investigação geoambiental por meio de georadar - GPR aplicado em posto de combustível**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geofísica) - Universidade Estadual de Goiás, Goiás, 2015.

CUNHA, P. R. C. **Análise estratigráfica dos sedimentos eo/mesodevonianos da porção ocidental da bacia do Amazonas sob a ótica da estratigrafia de sequências no interior cratônico**. 2000. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós - Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000, p. 24.

CUNHA, P. R. C.; GONZAGA, F. G.; COUTINHO, L. F. C. **Bacia do Amazonas**. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, 1997, v. 8, n. 1, p. 47 - 55.

CUNHA, P. R. C.; MELO, J. H. G.; SILVA, O. B. **Bacia do Amazonas**. Boletim de geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, 2007 v. 15, n. 2, p. 227 - 251.

CUSTODIO, E., LLAMAS, M. R.: **Hidrologia subterrânea**. 2ª ed, Ômega Editora, Barcelona, 1983, v. 2, 1224 p.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3ª ed. CPRM, Fortaleza, 2008, 812 p.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 2ª ed. CPRM, Fortaleza, 2000391 p.

FINOTTI, A. R.; CAICEDO, N. O. L.; RODRIGUEZ, M. T. R. **Contaminações Subterrâneas com Combustíveis Derivados de Petróleo: Toxicidade e a Legislação Brasileira**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), Porto Alegre, 2001, v. 6, n. 2, p. 29 - 46.

FIORUCCI, A. R.; F ILHO, E. B. **A importância de Oxigênio Dissolvido em Ecossistemas Aquáticos**. Química Nova na Escola, 2005, v 22, p. 10-16.

FREDDO FILHO, V. J. **Qualidade das Águas Subterrâneas Rasas do Aquífero Barreiras: Estudo de Caso em Benevides – Pa**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós - Graduação em Recursos Hídricos, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

HAZARDOUS SUBSTANCES DATA BANK – HSDB, **Broad scope in human and animal toxicity, safety and handling, environmental fate, and more. N. 604 (Iron)**, Toxnet, 2005.

HORBE, A. M. C.; VIEIRA, L. C.; NOGUEIRA, A. C. R. **Geoquímica de camadas vermelhas bioturbadas da Formação Alter do Chão, Cretáceo da bacia do Amazonas**. Revista Brasileira de Geociências, Manaus, 2006, v. 36, p. 396 – 402.

ISSA, T.de C. **O Papel do Gás de Petróleo na Matriz de Energia Elétrica Brasileira – Presente e Futuro**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá – SP, 2014.

JOÃO, X. da S. J.; TEIXEIRA, S. G.; FONSECA, D. D. F. **Geodiversidade do estado do Pará**. Belém, 2013, 220 p.

JUNIOR, M. I.; JUNIOR, H. R. D. M. **Aquífero Alter do Chão: Análises químicas in loco dos poços construídos pela RIMAS (SGB-CPRM)**. XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Bonito, 2012.

KISTLER, P. **Historical resume of the Amazon Basin**. PETROBRAS - RENOR, Relatório interno. Belém. 1954. 104 p.

LOURENÇO, V. L. **Utilização do Radar de Penetração nos Solos (GPR) na detecção de estruturas no âmbito nas Ciências Forenses**. "Ground Penetrating Radar for Forensic Applications". Universidade de Évora, Portugal, 2012, 44 p.

MARQUES, S. G. **Metodologia geofísica para contaminação por hidrocarbonetos estudos de casos em postos de combustível**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidades de São Paulo, São Paulo, 2007. 98 p.

MATHESS, G. Die **Beschaffenheit des Grundwassers**. Gebrüder Bornträger, Berlin. 1973.

MATSUDA, N. S.; FILHO, J. R. W.; WINTER, W. **O Paleozoico da borda sul da Bacia do Amazonas, Rio Tapajós - Estado do Pará**. Boletim de Geociências da Petrobras, 2010, v. 18, n. 1, p. 123 - 152.

MATTA, M.A.S. **Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil**. 2002. 292 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

MENDES, B., OLIVEIRA, J. F. S. **Qualidade da Água para Consumo Humano**. Lidel Editora. Lisboa. 2004. 640 p.

MESTRINHO, S. S. P. Qualidade das águas. In: GONÇALES, V. G.; GIAMPÁ, C. E. Q. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. Signus, São Paulo, 2006. p. 99-136.

MORAES, Y.G.; OLIVIA, P. C. **Estudo integrado para identificação por hidrocarbonetos na subsuperfície de postos de combustíveis no município de Baião – PA**. Brazilian Journal of Development, Baião – PA, 2019.

NITSCHKE, M.; PASTORE G. M. **Biossurfactante propriedades e aplicações**. Química nova, v.25, n°. 5. 2002. 772-776 p.

ORTEGA, R. A. **Localização e Delineamento de Pluma de Contaminação por Hidrocarbonetos através dos Métodos GPR e Tomografia Elétrica**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006, 114 p.

PARRON, M.P., MUNIZ, D.H.F., PEREIRA, C.M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico - química de água**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958, Colombo – PR, 2011.

PEDROSA, T. R. M. A. M. **Caracterização de Plumas Contaminantes de Hidrocarbonetos em Postos de Abastecimento em Fortaleza, Usando o Método Eletromagnético Radar de Penetração do Solo (GPR)**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004, 135p.

PENNER, G. C. **Estudos Laboratoriais da contaminação do solo por gasolina com o uso de detector de fotoionização**. 2000. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000, 109 p.

PETROBRAS, PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **Óleo Diesel: Informações Técnicas**. Coordenação de Assistência Técnica, São Paulo, 2011. Disponível em: https://petrobras.com.br/data/files/04/93/72/4C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/ManualdeDiesel_2021.pdf. Acesso em: 25 de agosto de 2022.

PORSANI, J. L. **Ground Penetration Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP**. 1999. 145 f. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campos de Rio Claro, 1999.

RAMAGE, L. **Hidrogeoquímica do sistema aquífero granular cenozóico do município de Porto Alegre, RS**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós - Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

REBOUÇAS, A. D. C. **Águas Subterrâneas**. In: GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, V. G. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. 2ª ed. Oficina de Texto, São Paulo, 2013, 56 p.

REIS JÚNIOR, J. A. dos; SILVA, L. M. da C. **Estudo de pluma de contaminação por combustível com o método GPR e desenvolvimento de simulador geofísico para fins educativos**. 2009. Dissertação (Mestrado), Departamento de Geociências, Universidade Federal do Pará, 2009, 172p.

REYNOLDS, J.M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1997, 796 p.

RICHTER, C. A., NETTO, J. M. A. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. Edgard Blucher Editora, São Paulo, 2002, 332 p.

RIOS, D. A. C.: **Hidrogeoquímica das águas subterrâneas do município de Capim Grosso**. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015, 118 p.

RODRIGUES, T. E; SANTOS, P. L. dos; OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; VALENTE, M. A.; SILVA, J. M. L. da; CARDOSO JÚNIOR, E. Q. **Caracterização dos solos da área do planalto de Belterra, município de Santarém, Estado do Pará**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, Belém. 2001. 54 p.

SANTOS, A. C.: Noções de Hidroquímica. In: FEITOSA, A. C., MANOEL FILHO, J.: **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 4ª ed. CPRM, LABHID-UFPE, Fortaleza, 2008, p. 81-102.

SANTOS, F. M. **Aplicação de métodos geofísicos no estudo da contaminação da águas subterrâneas no Lixão da Cuiabá-MT**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós - Graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005, 88 p.

SANTOS, R. A.: **Hidrogeoquímica das águas subterrâneas do município de Iraquara**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011. 144 p.

SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A. and WERKEMA, D.D. **Investigations of geoelectrical at a hydrocarbon contaminated site**. Journal of Applied Geophysics, 1998, vol. 44, p. 167-180.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APAIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS - SEBRAE. **Lava-jatos**. Ideias de negócios sustentáveis, Unidade de capacitação empresarial, Brasília -DF, 2012, 58 p.

SILVA, C. G. **Investigação Ambiental com a Utilização do Equipamento Geofísico. GPR (Ground Penetrating Radar) - Estudo de Caso**. 2010, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geociências, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2010, 97 p.

SILVA, M. A. dos S. **Investigação geofísica da contaminação por derivados de hidrocarbonetos nas redondezas do Posto Cristal (Belém - Pa)**. 2013. Dissertação de Mestrado) - Instituto de Geociências, Programa de Pós - Graduação em Geofísica., Universidade Federal do Pará, Belém, 2013, 89 p.

SILVA, T. A.; OLIVEIRA, K. M. **Descarte de Óleos Lubrificantes e suas Embalagens: Estudo de Caso dos Postos de Gasolina e Oficinas**. Revista Eletrônica de Geografia, Minas Gerais, 2011v.3, n. 7, p. 101-114.

SOEIRO, E. C. **Tratamento de efluentes oleosos de lava a jato via processo oxidativo avançado**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós - graduação em Engenharia de Petróleo e Gás, Universidade Potiguar, Rio Grande do Norte, 2014.

SOUZA, E. L.; GALVÃO, P. H. F.; PINHEIRO, C. do S. da S.; BAESSA, M. P. M.; DEMÉTRIO, J. G. A.; BRITO, W. R. R. **Síntese dos estudos hidrogeológicos nas bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões: base para uso e proteção da água subterrânea nos sistemas aquíferos Içá - Solimões e Alter do Chão.** Revista do Instituto Geológico, Série Científica, São Paulo, 2011, v. 13, n. 1, p. 107 - 117.

TANCREDI, A. C. F. N. S. **Recursos hídricos subterrâneos de Santarém: Fundamentos para uso e proteção.** 1996. 153 f. Tese (Doutorado) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. Belém. 1996.

TAPAJÓS, P. B. A. **Estudo da mobilidade e da biodegradação de um óleo mineral em solos.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2008, 205 p.

U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **How to effectively recover free product at leaking underground storage tanks sites - A guide for state regulators.** Washington, 1996, 165 p.

VARNIER, C., HIRATA, R.: **Contaminação da água subterrânea por nitrato no par-que ecológico do Tietê – São Paulo, Brasil.** Revista águas subterrâneas, São Paulo. 2002, v.16, n.1, p. 97 – 104.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Chromium (Environmental Health Criteria 61).** Geneva, 1988. Disponível em: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc61.htm>. Acesso: 25 de Setembro de 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Environmental Health Criteria 204-Boron.** Geneva, 1998, 201p.