

DIAGNÓSTICO AMBIENTAL EM CAMPO DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO: ESTUDO HIDROGEOLÓGICO DO CAMPO RABO BRANCO EM SERGIPE, BRASIL

ENVIRONMENTAL DIAGNOSIS IN AN OIL PRODUCTION FIELD: HYDROGEOLOGICAL STUDY OF THE RABO BRANCO FIELD IN SERGIPE, BRAZIL

Vinicius Tunes Romanha¹; Clívia Santana Maia Santos²; Jéssica Alves Góes¹;
Joel Marques da Silva²; Roger Dias Gonçalves²

Artigo recebido em: 02/03/2026 e aceito para publicação em: 14/05/2026.

DOI: <https://doi.org/10.14295/holos.v26i1.12544>

Resumo: Considerando que as atividades de exploração de petróleo apresentam alto potencial poluidor de recursos hídricos e solo, as atividades exercidas no seu entorno também podem causar impactos negativos. Nesse contexto, este trabalho realiza um diagnóstico ambiental na região da Estação Coletora (EC) no Campo Petrolífero Rabo Branco, em Santo Amaro das Brotas, Sergipe (SE). Foram avaliados cinco poços de água subterrânea, dos quais três de monitoramento, um do tipo tubular e outro do tipo cacimba, além de cinco lagoas e 15 amostras de solo no entorno da EC. A caracterização das águas superficiais e subterrâneas incluiu análises físico-químicas e microbiológicas, além de caracterização textural do solo. O aquífero local é poroso, raso e areno-argiloso, com recarga na área da EC e descarga nas lagoas. A condutividade elétrica das águas subterrâneas variou de 191 a 1360 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto as superficiais ficaram entre 219 e 591 $\mu\text{S}/\text{cm}$. As análises microbiológicas indicaram contaminação por coliformes totais e termotolerantes em quatro dos cinco poços e em todas as lagoas. O nitrato foi o composto inorgânico com maior concentração nas águas subterrâneas e em uma lagoa. Apesar da ocorrência de concentrações acima dos valores recomendados, os resultados obtidos não permitiram atribuir as não conformidades observadas diretamente à atividade da EC. O padrão espacial e hidroquímico identificado sugere maior influência de fontes antrópicas difusas, especialmente associadas à criação de animais, à agricultura e ao saneamento inadequado. Além do monitoramento constante, recomenda-se a análise de hidrocarbonetos nos períodos chuvosos e secos, a fim de complementar os resultados físico-químicos e microbiológicos obtidos e avaliar com maior segurança a possível influência da atividade petrolífera sobre os solos e recursos hídricos locais.

Palavras-chave: Coliformes. Condutividade. Nitrato. Consumo humano. Potabilidade.

Abstract: Considering that oil exploration activities have a high potential to pollute water resources and soils, activities carried out in their surrounding areas may also cause negative environmental impacts. In this context, this study presents an environmental diagnosis of the Collection Station (CS) area in the Rabo Branco Oil Field, located in Santo Amaro das Brotas, Sergipe State, Brazil. Five groundwater wells were evaluated, including three monitoring wells, one tubular well, and one dug well, in addition to five ponds and 15 soil samples collected around the CS. The characterization of surface water and groundwater included physicochemical and microbiological analyses, as well as textural characterization of the soil. The local aquifer is porous, shallow, and sandy-clayey, with recharge occurring in the CS area and discharge toward the ponds. Electrical conductivity ranged from 191 to 1360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in groundwater and from 219 to 591 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in surface water. Microbiological analyses indicated contamination by total and thermotolerant coliforms in four of the five wells and in all ponds. Nitrate was the inorganic compound with the highest concentration in groundwater and in one pond. Although some parameters showed concentrations above the recommended guideline values, the results did not allow the observed non-compliances to be directly

¹ Grupo de Pesquisas Hidrogeológicas e Ambientais (GPHIDRA), Universidade Federal de Sergipe - UFS, Campus São Cristóvão, Sergipe, Brasil. E-mails: viniciustunes1442@gmail.com; jessicalvesgoes@gmail.com

² Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe - UFS, São Cristóvão - Sergipe, Brasil. E-mails: luciansomerhale@gmail.com; marquesengpetro@gmail.com; rdgon@hotmail.com

attributed to CS activities. The identified spatial and hydrochemical pattern suggests a stronger influence of diffuse anthropogenic sources, especially those associated with animal husbandry, agriculture, and inadequate sanitation. In addition to continuous monitoring, hydrocarbon analyses are recommended during both rainy and dry seasons to complement the physicochemical and microbiological results and to more reliably assess the possible influence of oil production activities on local soils and water resources.

Keywords: Coliforms. Conductivity. Nitrate. Human consumption. Potability.

1 INTRODUÇÃO

A liberação acidental de hidrocarbonetos é uma das principais causas de contaminação das águas subterrâneas e do desequilíbrio dos ecossistemas. Os contaminantes derivados do petróleo atingem as águas subterrâneas devido à sua persistência e alta mobilidade. O transporte desses contaminantes na forma de fase livre, infiltra-se através do solo, atingindo rapidamente sistemas de águas profundas e rasas, ocasionando impactos ambientais e sociais a eles relacionados (Vasseghian *et al.*, 2021; Teramoto *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2020).

A contaminação por petróleo *onshore* não tem recebido a atenção necessária, apesar de ocorrer com frequência. Embora em menor escala, as contaminações *onshore* podem ocorrer durante a produção de petróleo, causando danos substanciais aos ecossistemas e impactos na saúde das populações que vivem próximas aos campos de petróleo, que acabam por receber menos atenção (Mariano *et al.*, 2024; Johnston *et al.*, 2019). Estima-se que 51% dos vazamentos de óleo combustível bruto ocorram através do transporte, rupturas de oleodutos, em poços, plataformas, refinarias terrestres e tanques de armazenamento (Chilvers *et al.*, 2021).

No Brasil, a história dos vazamentos de petróleo coincide com o desenvolvimento industrial do país. Nas décadas de 1980 e 1990, os principais motivos dos vazamentos foram falhas em oleodutos e infraestrutura industrial. No início do século XXI, a infraestrutura petrolífera passou por rápido crescimento privado e melhoria tecnológica, e as causas dos vazamentos passaram a ocorrer devido a falhas humanas/operacionais (Zacharias, 2024). Atualmente, os principais desafios nas áreas brasileiras produtoras de petróleo terrestre surgem de vazamentos de oleodutos, poços, instalações de processamento e durante a distribuição, muitas vezes de água produzida (Montealegre *et al.*, 2021).

Além disso, os impactos das emissões de refinarias na saúde de trabalhadores e moradores próximos a complexos petroquímicos e de extração de petróleo incluem: câncer de próstata, bexiga, esôfago, cólo, reto pâncreas (Onyije *et al.*, 2021).

Gerenciar um campo produtor de petróleo é difícil, sendo assim, monitorar os locais de armazenamento e o ambiente do entorno é essencial. Em um campo de

petróleo, a estação coletora (EC) armazena o óleo produzido no campo. Esse óleo chega às estações por dutos ou caminhões. Essas áreas de armazenamento estão sujeitas a possíveis vazamentos de óleo, portanto, monitorar os recursos hídricos nestes locais é essencial, a fim de identificar possíveis fontes de contaminação provenientes do campo ou de atividades antropogênicas no entorno, prevenindo impactos nos ecossistemas aquáticos, na qualidade da água e na saúde humana e animal.

A urbanização, a agricultura, a industrialização e outras atividades antropogênicas elevam os níveis de poluição das águas superficiais e subterrâneas, especialmente em países em desenvolvimento (Wang *et al.*, 2023; Dash & Kalamdhad, 2021).

Sistemas sépticos são considerados importantes fontes de contaminação (Servadio *et al.*, 2021). A presença de bactérias indicadoras fecais é provocada por descargas de águas residuais não tratadas, vazamentos sépticos, escoamento agrícola e urbano e excrementos de gado (Bisimwa *et al.*, 2022; Kubera, 2021).

Segundo Holcomb e Stewart (2020), a presença de bactérias como a *Escherichia coli* continua sendo uma ferramenta valiosa para indicar contaminação fecal e avaliar a qualidade da água.

O fluxo de resíduos agrícolas e domésticos geralmente contém altas concentrações de amônia e nitrato, resultando em um teor de nitrogênio (N) que excede os padrões para água potável (Fu *et al.*, 2022). O excesso de compostos nitrogenados pode alcançar as águas superficiais e subterrâneas, visto que esses compostos são bastante solúveis e possuem alta mobilidade. Um alto teor de nitrato na água reduz significativamente sua qualidade, podendo causar problemas de saúde, incluindo câncer (Zhao *et al.*, 2022; Essien *et al.*, 2022; Ashitha *et al.*, 2021).

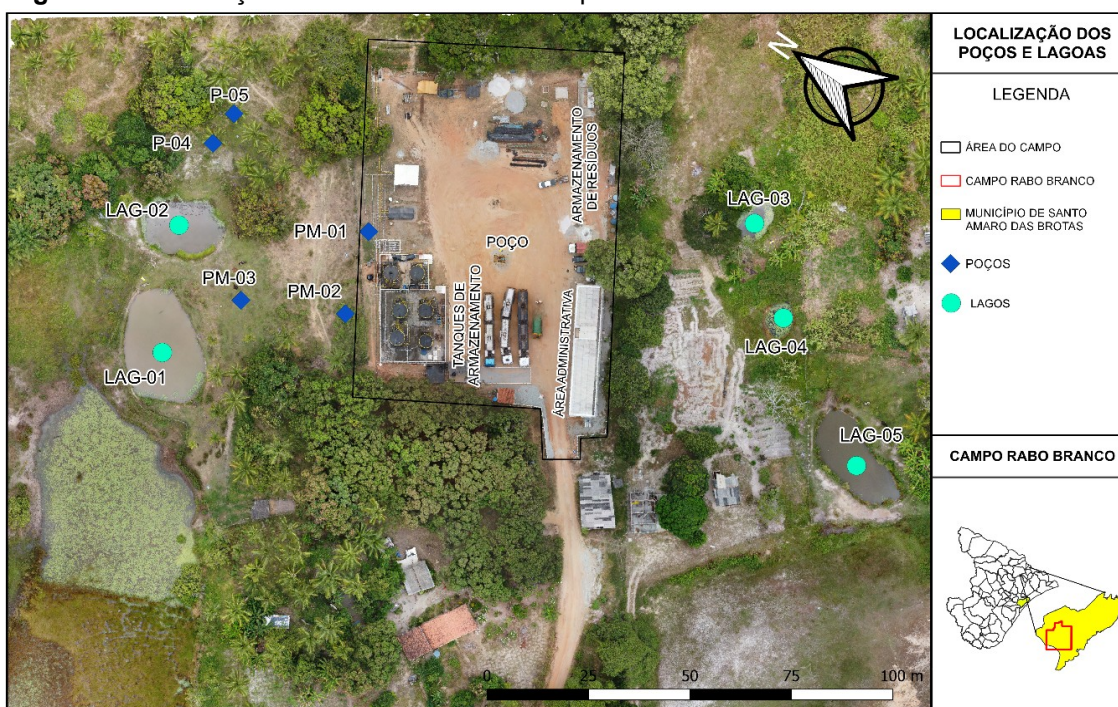
Foram observadas, na área de estudo, atividades que podem causar impactos negativos nos recursos hídricos, tais como a presença de atividades agrícolas, criação de animais e falta de saneamento básico. Considerando essa problemática, o objetivo deste trabalho é realizar um diagnóstico ambiental em um campo de produção de petróleo localizado no município de Santo Amaro das Brotas no estado de Sergipe (SE). O estudo irá caracterizar eventuais contaminações e impactos ambientais nos recursos hídricos, a partir da integração de dados provenientes de técnicas tradicionais de investigação em poços de monitoramento, águas superficiais e solo, produzindo um diagnóstico ambiental atualizado.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO

A maior parte da área de estudo está situada no município de Santo Amaro das Brotas, enquanto uma pequena fração se localiza no município de Nossa Senhora do

Socorro, na porção sudoeste da região. O Campo Rabo Branco (CRB) está inserido na porção terrestre da Bacia Sedimentar de Sergipe/Alagoas (SEAL), localizado na porção sul, na zona rural do município de Santo Amaro das Brotas, a uma distância aproximada de 43 km da capital, Aracaju (Figura 1).

Figura 1 - Localização da área de estudo e dos pontos amostrados



Fonte: autor.

O campo possui aproximadamente 44.861 m² de área total. A EC, objeto do estudo, localiza-se no interior do Bloco SEAL-T-429. Foram observados elementos antrópicos capazes de impactar a qualidade das águas dos poços e lagoas próximas à EC, como riscos associados aos tanques de armazenamento, atividades agrícolas, falta de saneamento básico e criação de animais.

Grande parte do quadrante sudoeste do bloco é ocupada pelo rio Sergipe, no trecho a montante, e por áreas urbanizadas no município de Nossa Senhora do Socorro e a noroeste, pela sede municipal de Santo Amaro das Brotas.

O regime climático da região é o tropical úmido, correspondente à faixa litorânea do estado, com temperatura média de 26 °C, precipitação anual média de 1.600 mm, com período chuvoso concentrado entre os meses de março e agosto.

Os principais tipos de solos predominantes na área são classificados, segundo SiBCS (Embrapa, 2018), como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, que possui maior abrangência na área do campo, ocorrendo desde a sede municipal até a EC. Esses solos são bem desenvolvidos, muito profundos e bem drenados. O Gleissolo Sálco Sódico ocorre predominantemente na porção oeste e se estende até a região centro-sul do

campo, próximo à EC. É encontrado em terrenos alagadiços e mal drenados, com o lençol freático próximo à superfície, o que o torna propenso a inundações.

O município de Santo Amaro das Brotas está inserido entre a bacia do rio Japaratuba, ao nordeste, e a do rio Sergipe, ao noroeste e sul-sudoeste. Essas bacias são caracterizadas pela ocorrência de um sistema aquífero sedimentar, representado por coberturas cenozoicas contendo sedimentos e depósitos das Formações Superficiais Continentais. Na região da bacia costeira predominam os sistemas aquíferos granular e cárstico, nos quais destacam-se dois domínios hidrogeológicos: Bacias Sedimentares e Formações Superficiais Cenozóicas.

As Bacias Sedimentares são constituídas por rochas sedimentares diversificadas e representam importantes reservatórios de água subterrânea, formando um aquífero do tipo granular presente na área do CRB. Esse aquífero possui alto potencial devido à grande espessura de sedimentos e à alta permeabilidade de suas litologias, o que permite a exploração de vazões significativas.

As Formações Superficiais Cenozóicas compõem pacotes de rochas sedimentares que sobrepõem rochas mais antigas. Apresentam comportamento de aquífero granular, com porosidade primária e elevada permeabilidade nos terrenos arenosos, o que lhes confere excelentes condições de armazenamento e fornecimento de água, segundo Santos e Araújo (2013).

O aquífero local é alimentado pela infiltração direta das águas pluviais, particularmente nas áreas não impermeabilizadas pela ocupação urbana. Sua composição é predominantemente areno-argilosa e, portanto, de caráter livre a semiconfinado, com porosidade primária e recarga por infiltração da precipitação. As unidades presentes na área são aluviões, coluviões e os sedimentos do Grupo Barreiras (GB) (Fontes *et al.*, 2008).

Os aluviões e coluviões constituem-se litologicamente de areias, siltes e argilas, depositando-se comumente nas calhas dos rios e em algumas dezenas de metros além das margens, formando numerosos terraços. Esses aquíferos são alimentados diretamente pelas chuvas e inundações fluviais e, indiretamente, pela restituição lateral dos rios e por unidades litológicas topograficamente mais elevadas.

Devido ao fato de o aquífero granular ser do tipo livre e aflorante, com composição arenosa e areno-argilosa e níveis irregulares de cascalho, formando terraços aluvionares de pouca espessura e com lençol freático raso, pode-se considerá-lo um aquífero de alto grau de vulnerabilidade (Fontes *et al.*, 2008).

O Grupo Barreiras é litologicamente constituído por sedimentos siltico-argilosos de coloração avermelhada. A recarga do aquífero ocorre diretamente por meio de

precipitação e por filtração vertical ascendente das formações subjacentes. A descarga ocorre para os níveis de base regionais, para o mar e por evapotranspiração. A pequena espessura confere ao domínio condições desfavoráveis para alimentação, armazenamento e transmissão de água subterrânea, sendo considerada de vulnerabilidade média.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a caracterização do solo, foram realizadas coletas no entorno da EC, visando à criação de uma malha de pontos que abrangesse os quatro lados do terreno, garantindo uma boa representatividade. As amostragens tanto de solo quanto de água superficial e subterrânea ocorreram em setembro de 2024, destacando que o estudo se baseou em uma campanha amostral no período de transição ao final da estação chuvosa. Portanto, os resultados representam uma condição ambiental pontual e não permitem avaliar a variabilidade sazonal dos parâmetros físico-químicos, microbiológicos e hidroquímicos analisados.

No total, foram realizadas quinze coletas superficiais de solo com uma cavadeira articulada metálica, a uma profundidade de 0 a 40 cm. As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Tecnologia e Monitoramento Ambiental (LTMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), para posterior descrição realizada com o auxílio de uma lupa digital, modelo *Microscope*, pelos autores.

As amostragens de águas subterrâneas seguiram a Norma Técnica ABNT/NBR 15847/2010 (Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento – Método de purga) e o Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostra CETESB/ANA (CETESB, 2011). Foram utilizados frascos esterilizados e preparados no LTMA da UFS.

A água subterrânea foi coletada com auxílio de *bailers*, enquanto as águas das lagoas foram coletadas superficialmente com frascos previamente higienizados. Os parâmetros pH, condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD) e oxigênio dissolvido (OD) foram aferidos utilizando uma sonda multiparâmetro modelo EXO1 YSI, conforme preconiza o Manual de Procedimentos de Amostragem e Análise Físico-Química de Água (EMBRAPA, 2011). Posteriormente, as amostras foram refrigeradas e encaminhadas para análise laboratorial dos íons (NO_3^- , NO_2^- e NH_3), determinados por cromatografia iônica (METROHM, modelo 882 Compact IC Plus), e de coliformes totais e termotolerantes, pelo método dos tubos múltiplos do *Standard Methods*.

Os valores dos parâmetros físico-químicos, microbiológicos e íons foram comparados com os valores-guia da Portaria GM/MS nº 888/2021, Resolução CONAMA, nº 357/2005 e Resolução CONAMA nº 396/2008. Os limites para nitrato foram

comparados com os valores orientadores da CETESB para solo e água subterrânea (Decisão de Diretoria nº125/2021).

Ressalta-se que o escopo analítico deste estudo não incluiu a determinação de hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH) nem de compostos BTX, como benzeno, tolueno e xilenos, nas amostras de água subterrânea, água superficial e solo. O presente diagnóstico possui um caráter hidroquímico e microbiológico preliminar, focado na identificação de vetores de contaminação no entorno da Estação Coletora. Embora os parâmetros avaliados forneçam indicadores consistentes sobre a qualidade dos recursos hídricos, os resultados obtidos não permitem excluir definitivamente a existência de impactos ambientais específicos ou sazonais decorrentes de hidrocarbonetos na área de estudo.

Durante a campanha de campo, também foi realizado registro observacional do uso aparente dos pontos amostrados. Não foi identificado uso direto das águas dos poços e lagoas para consumo humano no momento da vistoria; entretanto, observou-se o acesso de animais às lagoas, caracterizando uso potencial para dessedentação animal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização superficial do solo indicou a presença de dois tipos principais: argilo-siltoso, representando 10 das 15 amostras coletadas. Esse tipo de solo ocorre nas cotas mais elevadas do terreno, principalmente ao norte e nordeste da área, no depósito de tálus e nas proximidades da EC. Por estar localizado na área dos tanques de armazenamento, é mais suscetível à contaminação por possíveis vazamentos de óleo.

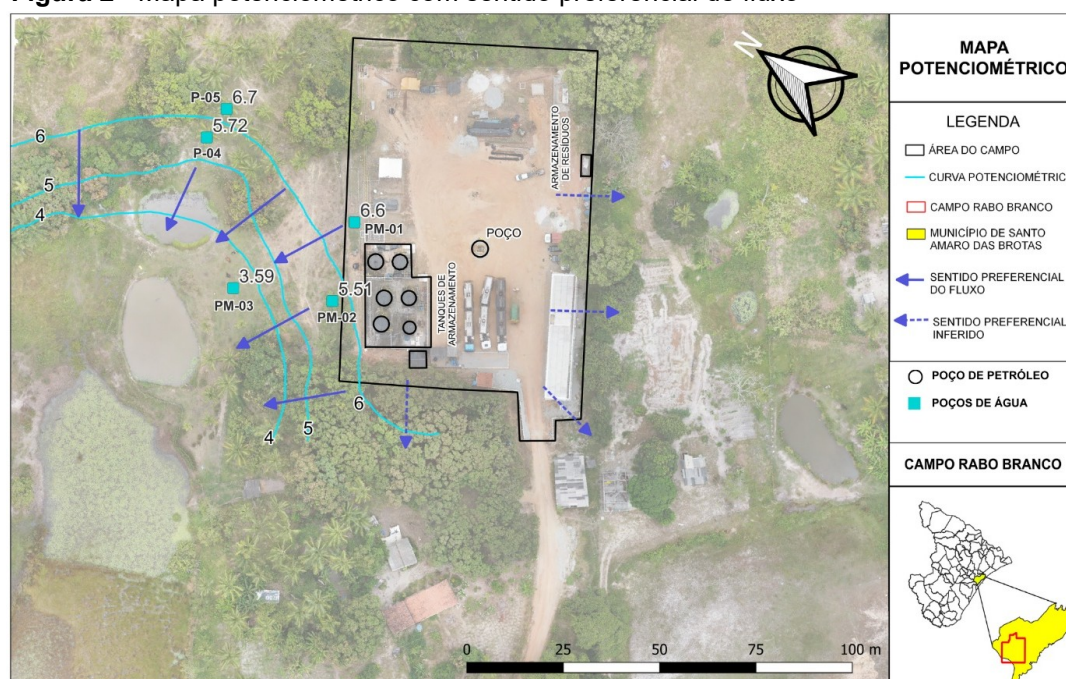
As demais amostras caracterizam-se como argilo silto-arenosas, sendo coletadas nas cotas mais baixas do terreno, especialmente ao sul e sudeste da área, próximas às lagoas. Devido à sua porosidade e permeabilidade, esse solo favorece a absorção e retenção de possíveis contaminantes, em função da interação entre uma matriz composta por argila, silte e areia. Além disso, por estar próximo às lagoas, é mais suscetível à contaminação por coliformes provenientes dos animais que utilizam as lagoas para dessedentação.

Embora a caracterização textural visual contribua para contextualizar a permeabilidade e a suscetibilidade do solo à contaminação, essa abordagem possui caráter preliminar e não substitui análises granulométricas quantitativas, necessárias para uma avaliação ambiental mais consistente. Além disso, não foram realizadas análises químicas específicas do solo, como pH, matéria orgânica e hidrocarbonetos totais de petróleo, de modo que os resultados devem ser interpretados como uma

caracterização textural preliminar, e não como diagnóstico químico de contaminação do solo.

A partir das cargas hidráulicas dos cinco poços no entorno, foi possível confeccionar o mapa potenciométrico. Com esses dados, foi possível determinar a direção preferencial do fluxo da água subterrânea e inferir o fluxo do entorno que não contam com poços de monitoramento (Figura 2).

Figura 2 - Mapa potenciométrico com sentido preferencial de fluxo



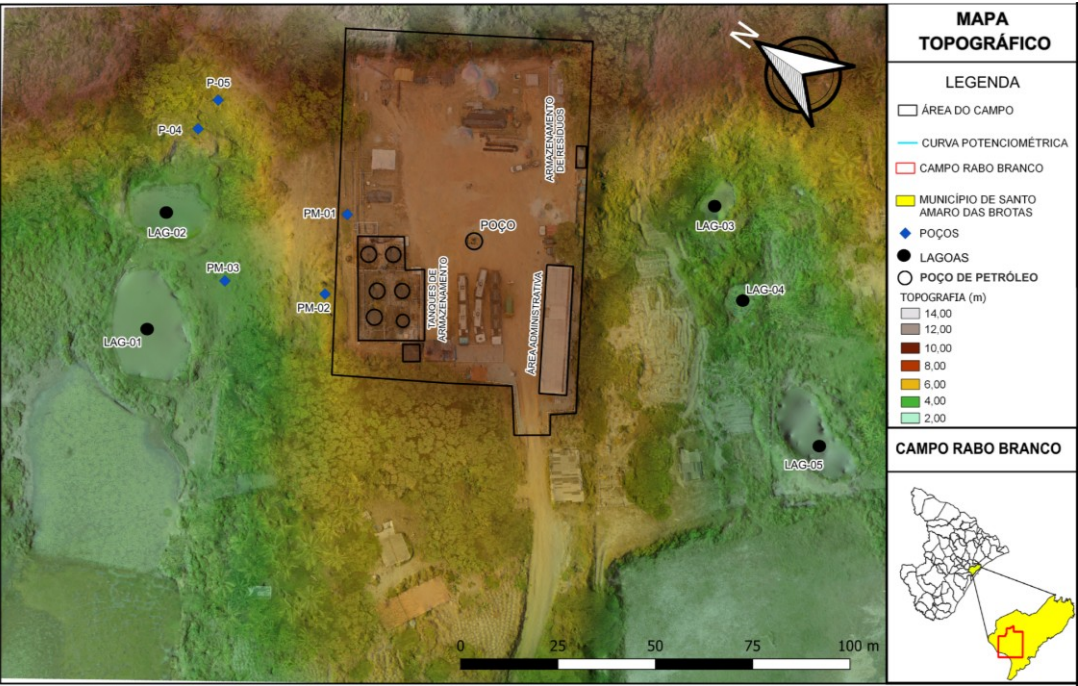
Fonte: autor.

As principais direções de fluxo ocorrem a partir do PM-01, a montante, em direção ao PM-03 e, posteriormente, até a lagoa; do PM-2, a montante, em direção às lagoas a jusante; e do P-05 (cacimba), no sentido do P-04, ambos a montante, em direção às lagoas a jusante. Observando a topografia, também é possível definir os sentidos de fluxo inferidos, pelos quais a água subterrânea poderia fluir, como o indicado nas setas tracejadas.

Além disso, a topografia do terreno (Figura 3), em conjunto com os sentidos preferenciais de fluxo e a posição dos poços de água em relação à EC, indica que o PM-02, por estar próximo aos tanques de armazenamento, é o mais suscetível à contaminação por possíveis vazamentos de óleo.

O PM-01, apesar de estar fora da direção dos tanques, requer monitoramento contínuo devido à proximidade com o empreendimento. Os poços PM-03, P-04 e P-05 estão mais vulneráveis a contaminações provenientes do entorno, especialmente por coliformes proveniente de animais que circulam na área. Contudo, independentemente das posições, todos estão suscetíveis às condições antrópicas do entorno.

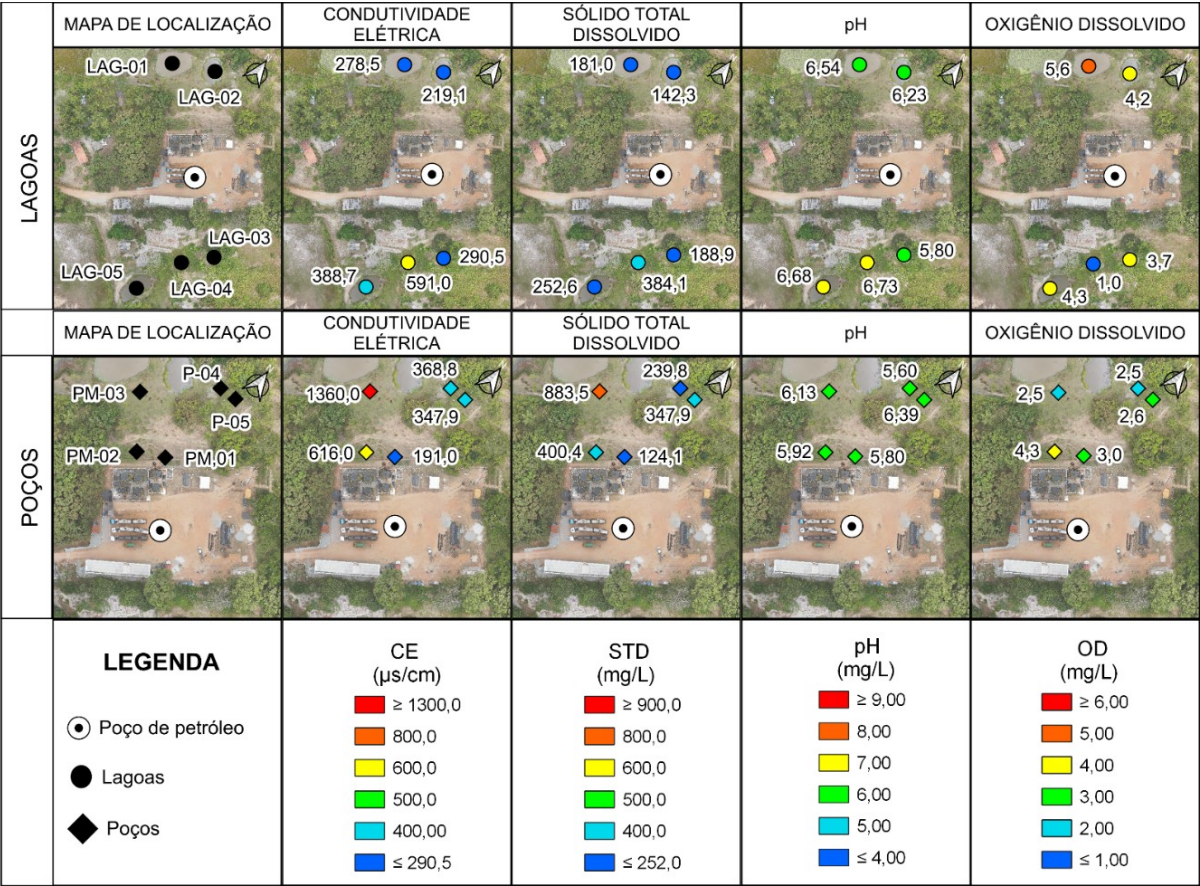
Figura 3 - Mapa topográfico com localização dos pontos de coleta



Fonte: autor.

Os resultados das análises físico-químicas dos parâmetros pH, OD, CE e STD da água das cinco lagoas e dos cinco poços ao redor da área de estudo estão representados na Figura 4.

Figura 4 - Mapas de pontos com a distribuição espacial dos parâmetros físico-químicos das lagoas e poços



Fonte: autor.

O teor de pH pode resultar de fatores antrópicos e naturais (Libânio et al., 2005). Os valores de pH nos poços variaram entre 6,39 a 5,60, nos P-05 e P-04. Observa-se um pequeno aumento gradativo entre os poços PM-01, a montante, e PM-03, a jusante. Segundo a Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da saúde e da Resolução CONAMA nº 357/2005, os valores de pH devem variar entre 6,0 e 9,0. Assim, os poços PM-02, PM-03 e P-05 estão dentro dos limites estabelecidos, enquanto os poços PM-01 e P-04 apresentam valores ligeiramente abaixo do limite.

Segundo Stein *et al.* (2012), as águas do aquífero Barreiras tendem a ser ligeiramente ácidas, com um pH médio de 6,18. Além disso, o pH das águas subterrâneas varia geralmente entre 5,5 e 8,5 (Martins *et al.*, 2002). Dessa forma, pode-se inferir que os valores de pH das amostras dos cinco poços estudados encontram-se próximos da neutralidade.

Os valores de pH das lagoas variaram entre 6,73 e 5,80, nas LAG-04 e LAG-03. De acordo com os resultados, as lagoas LAG-01, LAG-02, LAG-04 e LAG-05 estão dentro dos limites estabelecidos. A lagoa LAG-03 apresentou um valor de 5,80, um pouco abaixo do limite estabelecido pela portaria. Assim, considera-se que o pH se apresenta levemente ácido nos poços de água e lagoas.

Segundo Costa *et al.* (2006), baixos valores de OD e pH em corpos d'água estão relacionados ao processo de decomposição de matéria orgânica. Consideram-se poluídas as águas que apresentam baixa concentração de OD.

Os valores de OD nos poços variaram entre 4,3 e 2,5 mg/L, nos PM-02 e P-04. A portaria GM/MS nº 888/2021 não estabelece valor limite para OD. Contudo, Feitosa *et al.* (2008) observaram que os valores de OD em águas subterrâneas variam entre 0 a 5 mg/L. Assim, todos os poços apresentaram valores de OD dentro desse intervalo. Para fins comparativos, considerando a ausência de enquadramento formal específico das lagoas quanto à salinidade, os valores de OD foram discutidos de forma descritiva, sem atribuição definitiva de classe segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005.

Os valores elevados de STD em águas superficiais e subterrâneas estão relacionados à elevada concentração de íons dissolvidos na água e matéria orgânica. Nos poços, os valores variaram entre 124,18 e 883,58 mg/L, nos PM-01 e PM-03, com aumento gradativo no sentido montante-jusante. Apenas o PM-03 apresentou valor acima do limite estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021, que é de 500 mg/L.

Nas lagoas, os valores de STD variaram entre 142 e 384 mg/L, nas LAG-02 e LAG-04. Os valores obtidos nas cinco lagoas estão dentro do limite de 500 mg/L.

Stein *et al.* (2012) verificaram que a condutividade elétrica (CE) das águas do aquífero Barreiras apresenta média de 71,70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, variando entre 45,90 a 113,00

$\mu\text{S/cm}$. Segundo os autores, esses valores indicam que, em seu estado natural, as águas do aquífero são pouco mineralizadas, apresentando baixos níveis de salinidade. Elevados valores de CE relatados na literatura estão frequentemente associados à contaminação das águas por nitrato. No presente estudo, constatou-se a presença desse íon em todos os poços e lagoas analisados.

Nos poços, os valores de CE variaram entre 191 $\mu\text{S/cm}$ e 1360 $\mu\text{S/cm}$, nos PM-01 e PM-3, com aumento gradativo a montante-jusante. Em razão da ausência de valores de referência para esse parâmetro, não foi possível realizar enquadramento segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005 nem a comparação com a portaria GM/MS nº 888/2021. No entanto, os valores observados estão todos acima das condições naturais do aquífero.

Em geral, ambientes contaminados por esgoto doméstico ou industrial podem apresentar valores de CE de 1000 $\mu\text{S/cm}$ (Von Sperling, 2007). Embora alguns ambientes apresentem naturalmente valores elevados de CE, como regiões sob influência salina, litologias ricas em minerais solúveis ou sob intensa evapotranspiração, tais condições não observadas na área de estudo. Nas lagoas, os valores de CE variaram entre 219 $\mu\text{S/cm}$ e 591 $\mu\text{S/cm}$ nas lagoas LAG-02 e LAG-04. Ainda que não tenham sido identificados lançamentos diretos de esgoto nas lagoas, foi constatado a presença de criação de animais no entorno das lagoas e dos poços estudados. Além disso, as análises microbiológicas indicaram resultados positivos para coliformes totais e termotolerantes, sugerindo influência antrópica na qualidade da água subterrânea e superficial local. Os fatores citados anteriormente corroboram com as suspeitas de que ações antrópicas podem estar afetando negativamente na qualidade da água subterrânea e superficial local.

Tabela 2 - Resultados das análises microbiológicas dos poços e lagoas

Ponto de Amostragem	Coliformes Totais	GM/MS 888/2021 POTABILIDADE	Coliformes Termotolerantes	CONAMA 396/2008 CONSUMO HUMANO	CONAMA 396/2008 DESSEDENTAÇÃO
PM-01	<1,8 UFC/ml	Ausência	<1,8 UFC/mL	Dentro do limite	-
PM-02	110 UFC/ml	Presença	46 UFC/mL	Moderado	-
PM-03	22 UFC/ml	Presença	22 UFC/mL	Moderado	-
P-04	49000 UFC/ml	Presença	2100 UFC/mL	Muito alto	-
P-05	6,8 UFC/ml	Presença	4,0 UFC/mL	Baixo	-
LAG 01	44 UFC/ml	Presença	23 UFC/mL	Moderado	Dentro do limite
LAG 02	490 UFC/ml	Presença	490 UFC/mL	Alto	alto
LAG 03	330 UFC/ml	Presença	23 UFC/mL	Moderado	Dentro do limite
LAG 04	1100 UFC/ml	Presença	790 UFC/mL	Alto	alto
LAG 05	700 UFC/ml	Presença	49 UFC/mL	Moderado	Dentro do limite

Fonte: autor.

As amostras coletadas em setembro de 2024 apresentaram resultados positivos para Coliformes Totais e Coliformes Termotolerantes tanto nos poços quanto nas lagoas, com valores acima dos limites permitidos (Tabela 1).

Para o parâmetro referente a Coliformes Totais, utilizou-se a Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde, que estabelece o limite de 3,0 UFC/mL para potabilidade, determinando a presença de coliformes quando esse valor é ultrapassado. Essa portaria foi utilizada para comparar os resultados de coliformes das lagoas e dos poços e estipular o limite máximo permitido. Os valores nos poços PM-01 e P-04 variaram entre <1,8 UFC/mL e 49000 UFC/mL. O PM-01 indicou ausência de coliformes, enquanto os demais poços apresentaram presença.

Os resultados das análises de água das lagoas variaram entre 44 e 1.100 UFC/ml, nas LAG-01 e LAG-04. Todas as lagoas indicaram a presença de coliformes, o que pode estar relacionado à presença constante de animais ao redor.

Para o parâmetro referente aos Coliformes Termotolerantes, utilizou-se a Resolução CONAMA nº 396/2008 como base para avaliação do uso para dessedentação animal e consumo humano, apenas nas lagoas, tendo em vista a identificação de animais consumindo a água das lagoas e a possibilidade de captação de água para esses fins. Enquanto que foi utilizado (-) para indicar que este parâmetro não se aplica aos poços, uma vez que foi identificado em campo que os animais do local não têm acesso à água destes poços, seja por bombeamento, encanamentos e outras formas de captação ou direto da boca dos poços ou do poço cacimba.

Os resultados das análises de água dos poços variaram entre <1,8 e 2100 UFC/ml, nos PM-01 e P-04. O PM-01 foi o único poço dentro do limite para consumo humano, apresentando um valor abaixo de 3,0 UFC/mL. Os demais poços apresentaram valores acima do limite, sendo classificados como baixos no P-05, moderados nos PM-02 e PM-03 e muito altos no P-04. A água das lagoas apresentou valores variando de moderados, nas LAG-01, LAG-03 e LAG-05, a alto, nas LAG-02 e LAG-04.

Para dessedentação animal, foram utilizados os mesmos resultados, e observou-se que os valores nas LAG-01, LAG-03 e LAG-05 se encontram dentro do limite com valores abaixo de 200 UFC/mL, enquanto as LAG-02 e LAG-04 ultrapassaram duas vezes mais o limite estabelecido.

A presença de coliformes totais e coliformes termotolerantes era esperada nas amostras de água, em função do alto risco de contaminação das lagoas pela criação de animais, bem como as possíveis irregularidades devido à falta de um sistema de esgotamento sanitário adequado, o que pode provocar a contaminação do aquífero, provavelmente a partir de fossas e sumidouros pela comunidade local.

Além disso, a grande variação entre os teores de coliformes nos poços está relacionada à facilidade de acesso e à permanência dos animais nestes locais. O PM-01 encontra-se em um terreno acidentado, em uma cota superior aos demais poços, enquanto o P-04 está localizado em uma área de fácil acesso, em terreno menos acidentado e arborizado. Os PM-02 e PM-03 encontram-se a jusante do PM-01, em terreno mais plano, de fácil acesso e próximo às lagoas, e o P-05 localiza-se a montante do P-04.

Atualmente, na área da EC, há um sistema de tratamento de esgoto a partir de biodigestores, que têm como função o armazenamento seguro dos dejetos, evitando o vazamento e a contaminação do solo e do aquífero local.

Os resultados das amostras coletadas em setembro de 2024 apresentaram resultados positivos para amônia, nitrato e nitrito. As amostras de água coletadas nos cinco poços (Tabela 3), assim como em uma das cinco lagoas (Tabela 2), indicaram valores acima do limite permitido para nitrato. Os valores de nitrato acima do limite encontram-se marcados em negrito.

Tabela 2 - Resultados dos compostos nitrogenados das lagoas

ELEMENTO	UNIDADE	LD	RESULTADOS					CONAMA 396/2008 DESSEDENTAÇÃO
			LAG-01	LAG-02	LAG-03	LAG-04	LAG-05	
Amônia	mg/L NH ₃	0,10	1,21	2,66	1,98	0,89	4,32	-
Nitrato	mg/L NO ₃ -	0,10	13,81	12,91	5,16	14,97	110,74	90 mg/L
Nitrito	mg/L NO ₂ -	0,10	0,38	< LD	< LD	0,34	0,58	10 mg/L

Fonte: autor.

Tabela 3 - Resultados dos compostos nitrogenados dos poços

ELEMENTO	UNIDADE	LD	RESULTADOS					CETESB 125/2021 INTERVENÇÃO
			PM-01	PM-02	PM-03	P-04	P-05	
Amônia	mg/L NH ₃	0,10	3,33	2,88	< LD	1,69	3,66	-
Nitrato	mg/L NO ₃ -	0,10	44,37	48,68	30,04	26,94	37,20	10 mg/L
Nitrito	mg/L NO ₂ -	0,10	< LD	< LD	0,68	0,29	< LD	-

Fonte: autor.

Para os parâmetros observados nas lagoas referente a nitrato e nitrito, utilizou-se a Resolução CONAMA n° 396/2008, que estabelece limites para dessedentação de 90 mg/L para o nitrato e 10 mg/L para nitrito. Quanto à amônia, a resolução não estabelece um valor de referência para esse uso.

Nos poços, adotou-se o valor orientador da CETESB n° 125/2021 para solo e água subterrânea, que define valor de intervenção para nitrato quando o limite ultrapassar 10

mg/L. Entretanto, a CETESB não estabelece valores de intervenção para amônia e nitrito.

Nitrato, nitrito e amônia são considerados nutrientes em ambientes aquáticos naturais e, em altas concentrações, podem contribuir para processo de eutrofização. A amônia é tóxica aos peixes, além de consumir o oxigênio dissolvido na água durante sua oxidação biológica (CETESB, 2008).

A amônia foi detectada nas amostras das lagoas, com concentrações entre 0,89 e 4,32 mg/L, nas LAG-04 e LAG-05. Em relação à Resolução CONAMA nº 396/2008, não foi possível realizar comparação devido à ausência de valores de referência para esse parâmetro. Nos poços, a amônia variou entre 1,69 e 3,66 mg/L, nos P-04 e P-05. Ressalta-se ainda que, no PM-03, não foi detectado amônia ou os valores estão abaixo do limite de detecção.

Pinto Filho *et al.* (2018), ao avaliarem a qualidade da água de poços para consumo humano em comunidades rurais em um campo petrolífero no Rio Grande do Norte, encontraram concentrações de amônia entre 0,24 e 0,70 mg/L. Dessa forma, com exceção do PM-03, os demais poços apresentaram resultados superiores, indicando possível contaminação hídrica por amônia nos poços: PM-01, PM-02, P-04 e P-05. Além disso, considera-se a hipótese de que a amônia presente nos poços e lagoas seja proveniente da decomposição da matéria orgânica. A presença de coliformes nas análises corrobora essa hipótese, uma vez que esses microrganismos estão associados à atividade de animais que utilizam a área e as lagoas para dessedentação.

Os íons nitrito podem ocorrer naturalmente e representam um estágio intermediário do ciclo do nitrogênio, formado a partir da oxidação do amônio, bem como da redução do nitrato (Parron *et al.*, 2011). Ações antrópicas podem alterar esse ciclo, ocasionando contaminação por nitrato e nitrito. As principais fontes de contaminação por nitrito são o excesso de matéria orgânica, esgoto, efluentes industriais, produtos agrícolas e, em casos específicos, por nitrocompostos presentes em hidrocarbonetos utilizados no processo de refino do petróleo.

O nitrito foi detectado em três das cinco lagoas, com teores entre 0,34 e 0,58 mg/L, nas LAG-04 e LAG-05. Nenhuma lagoa apresentou valores superiores a 10,0 mg/L. Nas amostras LAG-02 e LAG-03, o nitrito não foi detectado, estando abaixo do limite de detecção.

Nos poços, o nitrito foi detectado em apenas dois dos cinco poços, com valores de 0,29 mg/L no PM-03 e 0,68 mg/L no P-04. Nos PM-01, PM-02 e P-05, estavam abaixo do limite de detecção. Em relação à CETESB nº 125/2021, não foi possível comparação devido à ausência de valores de referência para esse parâmetro.

Segundo Parron (2011), raramente encontra-se concentrações de nitrito em águas potáveis acima de 0,1 mg/L. Desta forma, com exceção dos PM-01, PM-02 e P-05, os demais poços apresentam valores acima do reportado na literatura, indicando possível comprometimento da qualidade da água.

O nitrito é um parâmetro relevante para avaliação da qualidade da água, sendo um forte indicativo de contaminação recente por matéria orgânica de origem animal ou vegetal. Assim, sua presença nos poços e lagoas pode indicar uma fonte ativa de contaminação.

Os principais vetores de contaminação são a proliferação de microrganismos responsáveis pela nitrificação, provenientes de dejetos animais, além do possível uso de fertilizantes e pesticidas, principalmente nas porções sul e sudeste da área, nas LAG-03 a LAG-05.

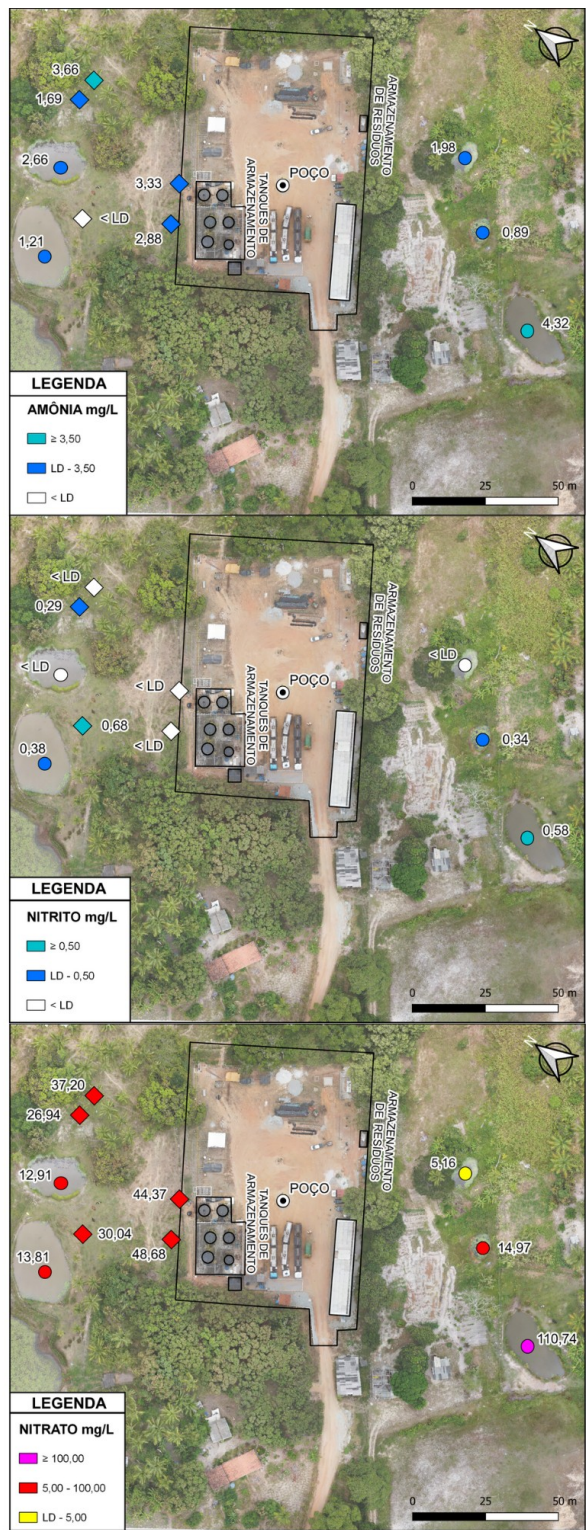
O nitrato ocorre naturalmente no meio ambiente, geralmente em baixas concentrações, representando o estágio final da oxidação da matéria orgânica. Ações antrópicas, podem alterar o ciclo natural do nitrogênio ocasionando contaminação por nitrato e nitrito. Concentrações de nitrato acima de 5 mg/L podem indicar contaminação por esgotos, fossas sépticas, lixões, aterros sanitários, cemitérios e adubos, entre outros. Em águas subterrâneas não poluídas, os teores variam entre 0,1 e 10 mg/L (Feitosa *et al.*, 2008).

O nitrato foi detectado em todas as lagoas, com valores entre 5,16 e 110,74 mg/L, nas LAG-03 e LAG-05. Em relação à Resolução CONAMA nº 396/2008 para dessedentação, apenas a LAG-05 apresentou valor acima de 90 mg/L. No entanto, as LAG-01, LAG-02, LAG-04 apresentaram teores acima de 5,0mg/L, indicando possível contaminação por nitrato.

Esses resultados podem estar associados à presença de compostos nitrogenados e esgoto na água, contribuindo para processos de eutrofização, caracterizados pelo aumento da concentração de nutrientes. Esses compostos nitrogenados são a amônia e o nitrito, que, por meio do processo de nitrificação, são transformados em nitrato.

Além disso, os resultados físico-químicos dos poços indicaram uma elevada CE, variando de 1360 a 191 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A média encontrada por Stein *et al.* (2012) para o aquífero Barreiras é de 71,70 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Segundo Cabral (2007), valores elevados de CE nesse aquífero estão associados à contaminação por íons nitrato. Não foram observados outros indícios evidentes de contaminação, como despejos ou vazamentos superficiais de resíduos industriais ou de petróleo. Os mapas a seguir (Figura 5) apresentam a localização das lagoas e poços e seus respectivos resultados de amônia, nitrito e nitrato.

Figura 5 - Mapas com a distribuição dos compostos nitrogenados nas lagoas e poços



Fonte: autor.

5 CONCLUSÕES

A análise das condições ambientais na área da Estação Coletora, no município de Santo Amaro das Brotas, revelou uma vulnerabilidade significativa dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais à contaminação antrópica. Embora os resultados tenham sido obtidos a partir de uma única campanha amostral e o estudo esteja limitado à

comparação das concentrações identificadas nas análises apenas com as normas vigentes, não levando em consideração a sazonalidade da região, os resultados indicaram a presença de coliformes e compostos nitrogenados nas águas superficiais e subterrâneas, evidenciando influência antrópica na qualidade da água, além de alterações nos parâmetros físico-químicos.

Entre as lagoas amostradas no entorno da Estação Coletora, a concentração mais elevada de amônia (NH_3), de 4,3 mg/L ocorre na LAG-05, que também apresentou elevada concentração de nitrato, de 110,74 mg/L. Os poços de águas subterrâneas, com exceção do PM-03, apresentaram resultados superiores a 1,2 mg/L de amônia, para potabilidade, e aos valores reportados na literatura de entre 0,24 e 0,70 mg/L, indicando possível contaminação hídrica, resultado da presença dos animais do local. Os poços também apresentaram concentrações de nitrato superiores a 10 mg/L. Dentre os poços de monitoramento existentes no entorno, o PM-02 mostrou-se relevante para a detecção de possíveis vazamentos de óleo devido à proximidade com os tanques de armazenamento e fluxo preferencial de águas subterrâneas.

Conforme observado em campo, embora as águas dos poços e das lagoas não estejam atualmente sendo utilizadas para consumo humano, as lagoas são utilizadas para dessedentação animal e apresentaram concentrações elevadas de nitrato e coliformes, podendo representar risco sanitário aos animais. Recomenda-se, portanto, o monitoramento contínuo dos parâmetros físico-químicos, microbiológicos e de compostos nitrogenados, bem como a inclusão de análises específicas de hidrocarbonetos, como TPH e BTX, em campanhas realizadas nos períodos seco e chuvoso. Considerando a ausência desses parâmetros no presente estudo, os resultados não permitem excluir definitivamente impactos associados à atividade petrolífera, mas indicam que as não conformidades observadas estão mais fortemente associadas a fontes antrópicas difusas, como criação de animais, agricultura e saneamento inadequado. Ademais, faz-se importante e necessário conscientizar a comunidade local para que se evite o consumo dessas águas, a fim de prevenir eventuais riscos à saúde da população e dos animais.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 15847: Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento – Método de purga. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 20 p.

ASHITHA, A.; RAKHIMOL, K. R.; MATHEW, J. Fate of the conventional fertilizers in environment. In: LEWU, F. B; VOLOVA, T.; THOMAS, S.; Rakhimol, R. K. Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture, 1. ed. 2021. p. 25-39.

BISIMWA, A. M.; KISUYA, B.; KAZADI, Z. M.; MUHAYA, B. B.; KANKONDA, A. B. Monitoring faecal contamination and relationship of physicochemical variables with faecal indicator bacteria

numbers in Bukavu surface waters, tributaries of Lake Kivu in Democratic Republic of Congo. [Hygiene and Environmental Health Advances](#), v.3, 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 5 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 3 nov. 2024.

CABRAL, N. M. T. Teores de nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺) nas águas do Aquífero Barreiras nos Bairros do Reduto Nazaré e Umarizal – Belém/PA. Química Nova, v.30, p. 1804-1808, 2007.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas. Organização de Carlos Jesus Brandão et al. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011. 67 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 232). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/57612/1/Doc232ultima-versao.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2025.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Referente ao Relatório à Diretoria n.º 19/2021/E, de 03 de dezembro de 2021. Relator: Carlos Roberto dos Santos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/DD-125-2021-E-Atualizacao-dos-Valores-Orientadores-paa-solo-e-aguas-subterraneas.pdf>. Acesso em: 25 out. 2024.

CHILVERS, B. L.; MORGAN, K. J.; WHITE, B. J. Sources and reporting of oil spills and impacts on wildlife 1970–2018. Environ Sci Pollut Res, v. 28, p. 754-762, 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-10538-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10538-0>. Acesso em: 13 jan. 2025.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, 2005. Disponível em: https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747#_ftn1. Acesso em: 15 abr. 2025.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Diário Oficial da União, 2008. Disponível em: <https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/projetos/qualidade-da-agua/legislacao/resolucoes/resolucao-conama-no-396-de-3-de-abril-de-2008/view>. Acesso em: 10 jan. 2025.

COSTA, W.; MARQUES, M. B.; DELEZUK, J. A. M. Avaliação preliminar da qualidade da água do arroio Madureira e afluentes. Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias, v. 12, n. 1, p. 15-22, 2006. DOI: 10.5212/publicatio.v12i01.860. Disponível em: <https://doi.org/10.5212/publicatio.v12i01.860>. Acesso em: 13 abr. 2025.

DASH, S.; KALAMDHAD, A. S. Hydrochemical dynamics of water quality for irrigation use and introducing a new water quality index incorporating multivariate statistics. Environmental Earth Sciences, v. 80, n. 73, 2021. DOI: 10.1007/s12665-020-09360-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09360-1>. Acesso em: 13 abr. 2025.

DE OLIVEIRA, L. M. C.; STEFANO, P. H. P.; VEDANA, L. A.; DE CARREGOSA, J. C.; SANTOS, M. M. N.; WISNIEWSKI, A.; PEREIRA, F. M. C. DA C. A hydrogeological impact survey on the largest onshore oil field in Brazil: physicochemical and total petroleum hydrocarbon (TPH) analyses in the south of Japarutuba River Basin, Sergipe. Environmental Earth Sciences, v. 79, p. 383, 2020. DOI: 10.1007/s12665-020-09121-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09121-0>. Acesso em: 13 abr. 2025.

DOS SANTOS, Wesley Alves; DE ARAÚJO, Hélio Mário. Geologia e recursos hídricos superficiais e subterrâneos da sub-bacia hidrográfica do rio Cotinguiba-SE. 2013. DOI:

10.4025/bolgeogr.v31i3.17537. Disponível em:
<https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/17537>. Acesso em: 15 mai. 2025.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. 75p. ISBN 978-85-7035-800-4.

ESSIEN, E. E.; ABASSE, K. S.; CÔTÉ, A.; MOHAMED K. S.; BAIG, M. M. F. A.; HABIB, M.; NAVEED, M.; YU, X.; XIE, W.; JINFANG, S.; ABBAS, M. Drinking-water nitrate and cancer risk: a systematic review and meta-analysis. *Arch Environ Occup Health*, v. 77, p. 51-67, 2022. DOI: 10.1080/19338244.2020.1842313. Disponível em:
<https://doi.org/10.1080/19338244.2020.1842313>. Acesso em: 13 abr. 2025.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; e DEMETRIO, J. G. A. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM - LABHID, 2008, p. 812.

FONTES, A. L.; COSTA, J. J. O quaternário costeiro no município de Barra Dos Coqueiros: implicações para a gestão ambiental. *Geonordeste*, São Cristóvão, v. 19, n. 1, 2008. Disponível em: <http://www.seer.ufs.br/index.php/geonordeste/article/view/2484/2149>. Acesso em: 11 mar. 2025.

FU, X.; HOU, R.; YANG, P.; QUIAN, S.; FENG, Z.; CHEN, Z.; WANG, F.; RONGFANG, Y.; CHEN, H.; ZHOU, B. Application of external carbon source in heterotrophic denitrification of domestic sewage: A review. *Science of The Total Environment*, v. 817, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153061. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153061>. Acesso em: 13 abr. 2025.

HOLCOMB, D. A.; STEWART, R. J. Microbial Indicators of Fecal Pollution: Recent Progress and Challenges in Assessing Water Quality. *Current Environmental Health Reports*, p. 311-324, 2020. DOI: 10.1007/s40572-020-00278-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40572-020-00278-1>. Acesso em: 20 jan. 2025.

JOHNSTON, J. E.; LIM, E.; ROH, H. Impact of upstream oil extraction and environmental public health: A review of the evidence. *Science of The Total Environment*, v. 657, p. 187-199, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.483. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.483>. Acesso em: 20 fev. 2025.

KUBERA, L. Spread patterns of antibiotic resistance in faecal indicator bacteria contaminating an urbanized section of the Brda River. *Microbiology of Aquatic Systems*, v. 81, p. 592-600, 2021. DOI 10.1007/s00248-020-01624-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01624-4>. Acesso em: 20 jan. 2025.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 2. ed. Campinas: Editora Átomo, 2005. 444 p.

MARIANO, D. C.; DIAS, G. M.; CASTRO, M. R.; TSCHOEKE, D. A.; DE OLIVEIRA, F. JS.; SÉRVULO, E. F. C.; NEVES, B. C. Exploring the diversity and functional profile of microbial communities of Brazilian soils with high salinity and oil contamination. *Heliyon*, v.10, e34336, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34336. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34336>. Acesso em: 20 jan. 2025.

MARTINS, R. V.; PARAQUETTI, H. H. M.; AYRES, G. A. Alternativa analítica para especiação físico-química de mercúrio em águas costeiras tropicais. *Química Nova*, v. 25, n. 3, p. 372-378, 2002. DOI: 10.1590/S0100-40422002000300007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000300007>. Acesso em: 20 jan. 2025.

MONTEALEGRE, C, M, C.; RODRIGUES, E, M.; MORAIS, D, K.; TÓTOLA, M, R. Prokaryotic community diversity during bioremediation of crude oil contaminated oilfield soil: effects of hydrocarbon concentration and salinity. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 52, p. 787-800, 2021.

doi: 10.1007/s42770-021-00476-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00476-5>. Acesso em: 20 jan. 2025.

Onyije FM, Hosseini B, Togawa K, Schüz J, Olsson A. Cancer Incidence and Mortality among Petroleum Industry Workers and Residents Living in Oil Producing Communities: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 Apr 20;18(8):4343. doi: 10.3390/ijerph18084343. PMID: 33923944; PMCID: PMC8073871.

PARRON, L. M.; MUNIZ, H. DF.; PEREIRA, C. M. Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água. Colombo: Embrapa Florestas, 2011.

PINTO FILHO, J. L. O.; SOUZA, R. F.; PETTA, A. R. Avaliação da água para consumo humano nas comunidades rurais do campo petrolífero Canto do Amaro, RN, Brasil. *Sustentabilidade em Debate*, v. 9, n. 2, 2018. DOI:10.18472/SustDeb.v9n2.2018.27829. Disponível em: <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v9n2.2018.27829>. Acesso em: 23 fev. 2025.

SERVADIO, J. L.; DEERE, J. R.; JANKOWSKI, M.; FERREY, M.; ISAAC, E.; IBRAHIM, Y. C.; PRIMUS, A.; CONVERTINO, M.; PHELPS, N. BD.; STREETS, S.; TRAVIS, D. A.; MOORE, S.; WOLF, T. M. Anthropogenic factors associated with contaminants of emerging concern detected in inland Minnesota lakes (Phase II). *Science of The Total Environment*, v. 772, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146188. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146188>. Acesso em: 17 jan. 2025.

STEIN, P.; DINIZ FILHO, J. B.; LUCENA, L. R. F.; CABRAL, N. M. T. Qualidade das águas do aquífero Barreiras no setor sul de Natal e norte de Parnamirim, Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42 (Supl 1), p. 226-237, 2012.

TERAMOTO, E. H.; VOGT, C.; BAESSA, M. P. M.; POLESE, L.; SORIANO, A. U.; CHANG, H. K.; RICHNOW, H. H. Dynamics of hydrocarbon mineralization characterized by isotopic analysis at a jet-fuel-contaminated site in subtropical climate, v. 234, 2020. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2020.103684. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103684>. Acesso em: 14 mar. 2025.

VASSEGHIAN, Y.; HOSSEINZADEH, S.; KHATAEE, A.; DRAGOI, E. N. The concentration of persistent organic pollutants in water resources: A global systematic review, meta-analysis and probabilistic risk assessment, *Science of The Total Environment*, v. 796, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149000. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149000>. Acesso em: 14 mar. 2025.

VON SPERLING, M. Estudos de modelagem da qualidade da água de rios. Belo Horizonte: UFMG, 2007. Vol. 7, 452 p.

WANG, J.; ZHOU, W.; ZHAO, W.; GUO, X. Water quality assessment and pollution evaluation of surface water sources: The case of Weishan and Luoma Lakes, Xuzhou, Jiangsu Province, China. *Environmental Technology & Innovation*, v. 32, 2023. DOI: 10.1016/j.eti.2023.103397. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103397>. Acesso em: 14 mar. 2025.

ZACHARIAS, D. C.; LEMOS, A. T.; KERAMEA, P.; DANTAS, R. C.; DA ROCHA, R. P.; CRESPO, N. M.; SYLAIOS, G.; JOVANE, L.; SANTOS, I. G. DS., MONTONE, R. C.; SOARES, M. DO.; LOURENÇO, R. A. Offshore oil spills in Brazil: An extensive review and further development. *Marine Pollution Bulletin*, v. 205, 2024. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116663. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116663>. Acesso em: 18 mar. 2025.

ZHAO, Y.; HAN, Y.; LU, H.; DU, Q.; XIA, X.; TENG, Y.; ZUO, R.; WANG, J. Interactions between anthropogenic pollutants (biodegradable organic nitrogen and ammonia) and the primary hydrogeochemical component Mn in groundwater: Evidence from three polluted sites. *Science of The Total Environment*, v. 808, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152162. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152162>. Acesso em: 18 mar. 2025.