

AVALIAÇÃO QUÍMICA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO MUNICÍPIO DE ANANINDEUA (PA) COM ÊNFASE NA DETERMINAÇÃO DE METAIS POR ICP-OES

Carlos Silva de Oliveira*

Profa. Dra. Vanessa Nunes Alves*

Resumo: Este trabalho, orientado pela Profa. Dra. Vanessa Nunes Alves, tem como objetivo a avaliação química de águas subterrâneas do município de Ananindeua, no estado do Pará, com ênfase na determinação de metais potencialmente relevantes à qualidade da água: silício (Si), titânio (Ti), manganês (Mn), e chumbo (Pb). A pesquisa justifica-se pela crescente utilização das águas subterrâneas como fonte de abastecimento urbano e pela necessidade de monitoramento de elementos que podem comprometer a potabilidade e a segurança ambiental. As determinações das concentrações metálicas foram quantificadas por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Essa técnica instrumental destaca-se pela elevada sensibilidade, precisão e capacidade de determinação simultânea de múltiplos elementos em solução, sendo recomendada por organismos nacionais e internacionais para o controle da qualidade da água. O delineamento do estudo envolveu a coleta de amostras em diferentes pontos do município, sua preservação adequada e posterior análise laboratorial, com aplicação de procedimentos de validação analítica e controle de qualidade. Espera-se que os resultados obtidos possam subsidiar a gestão dos recursos hídricos locais, bem como permitir a comparação com os padrões de potabilidade vigentes.

Palavras-chave: águas subterrâneas; ICP-OES; metais traço; qualidade da água; Ananindeua-PA.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a expansão urbana observados nas regiões metropolitanas brasileiras têm intensificado a demanda por recursos hídricos de qualidade. Nesse contexto, as águas subterrâneas assumem papel estratégico no abastecimento humano, especialmente em áreas onde os mananciais superficiais encontram-se sujeitos à contaminação ou apresentam limitações quantitativas. No município de Ananindeua, integrante da Região Metropolitana de Belém (Figura 1), o

* Instituto de Química – UFCAT: carlos_vinhas@yahoo.com.br

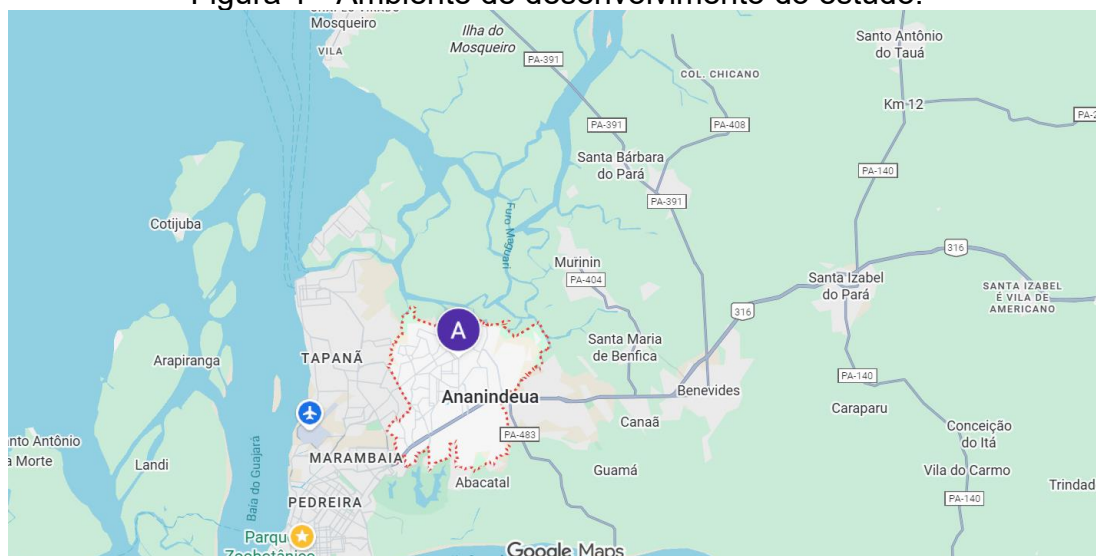
* Instituto de Química – UFCAT: vanessa.nunes@ufcat.edu.br

uso de poços tubulares é amplamente difundido, tanto para fins domésticos quanto comerciais, o que reforça a necessidade de estudos sistemáticos sobre a qualidade dessas águas.

A composição físico-química das águas subterrâneas é influenciada por diversos fatores, incluindo a litologia dos aquíferos, o tempo de residência da água, os processos geoquímicos naturais e as atividades antrópicas. Entre os constituintes de interesse, os metais podem estar presentes em diferentes concentrações, sendo alguns essenciais em baixas quantidades, enquanto outros representam riscos à saúde humana quando presentes acima dos limites recomendados. Elementos como manganês e chumbo são frequentemente associados a impactos adversos à saúde, enquanto silício e titânio, embora geralmente menos tóxicos, fornecem importantes informações sobre a interação água-rocha e a origem geogênica das águas subterrâneas.

Diante desse cenário, técnicas analíticas avançadas têm sido amplamente empregadas para o monitoramento da qualidade da água. A Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) destaca-se por permitir a determinação simultânea de múltiplos elementos, com baixos limites de detecção e elevada confiabilidade metrológica. Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade das águas subterrâneas do município de Ananindeua (PA), com ênfase na determinação de metais por ICP-OES, fornecendo subsídios técnicos para a gestão ambiental e a proteção da saúde pública.

Figura 1 - Ambiente de desenvolvimento do estudo.



Fonte: elaborado pelo autor(a) com base no Google Maps

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As águas subterrâneas constituem uma importante reserva hídrica, sendo responsáveis por parcela significativa do abastecimento humano em diversas regiões do mundo, especialmente em áreas onde os recursos hídricos superficiais são escassos ou apresentam comprometimento qualitativo (FOSTER; HIRATA, 1988; APHA, 2017). De acordo com estudos hidrogeológicos, a qualidade dessas águas resulta do equilíbrio entre processos naturais de dissolução mineral e possíveis fontes de contaminação antrópica, como efluentes domésticos, atividades industriais e o uso inadequado do solo (HIRATA; FOSTER; OLIVEIRA, 2010).

A presença de metais em águas subterrâneas pode ter origem natural, associada à composição mineralógica das formações geológicas, ou antrópica, decorrente de atividades humanas, como disposição inadequada de resíduos, mineração e processos industriais (ALLOWAY, 2013). O manganês, por exemplo, é comumente encontrado em aquíferos associados a minerais ferromagnesianos e óxidos de ferro e manganês, enquanto o chumbo está frequentemente relacionado a fontes de poluição urbana e industrial, como combustíveis, baterias e efluentes industriais (WHO, 2017). A ingestão prolongada de água contendo concentrações elevadas desses elementos pode ocasionar efeitos adversos à saúde humana, afetando principalmente os sistemas neurológico, renal e cardiovascular, o que justifica o estabelecimento de limites máximos permissíveis por órgãos reguladores (WHO, 2017).

No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, estabelece os padrões de potabilidade da água para consumo humano, definindo valores máximos permitidos para diversos parâmetros químicos e metais, incluindo manganês e chumbo (BRASIL, 2021). O monitoramento desses parâmetros exige métodos analíticos confiáveis, sensíveis e devidamente validados, capazes de atender às exigências legais e garantir a rastreabilidade e a confiabilidade dos resultados analíticos (INMETRO, 2020).

Nesse contexto, o uso da espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) tem se consolidado como uma das principais técnicas para a análise multielementar em matrizes aquosas. Diversos estudos relatam sua aplicação bem-sucedida na determinação de metais em águas

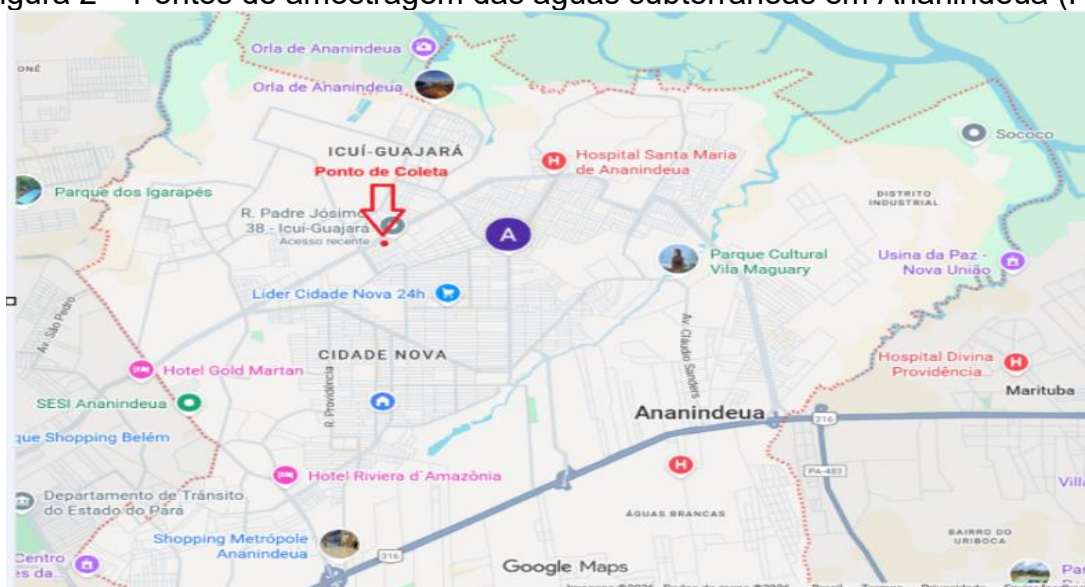
subterrâneas, em razão de sua robustez analítica, ampla faixa linear de trabalho, baixos limites de detecção e capacidade de análise simultânea de múltiplos elementos, tornando-se uma ferramenta indispensável em programas de monitoramento e controle da qualidade ambiental (APHA, 2017; BOSS; FREDEEN, 2004).

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e amostragem

O estudo foi conduzido no município de Ananindeua, localizado na Região Metropolitana de Belém, estado do Pará. As amostras de águas subterrâneas foram coletadas em diferentes pontos representativos do município, a partir de poços tubulares em operação. A seleção dos pontos de amostragem considerou a distribuição espacial e os diferentes usos da água, com o objetivo de obter um panorama representativo da qualidade das águas subterrâneas locais. Os pontos de coleta foram identificados como: Ponto de Coleta Central, Ponto de Coleta 01, Ponto de Coleta 02, Ponto de Coleta 03, Ponto de Coleta 04 e Ponto de Coleta 05.

Figura 2 – Pontos de amostragem das águas subterrâneas em Ananindeua (PA)

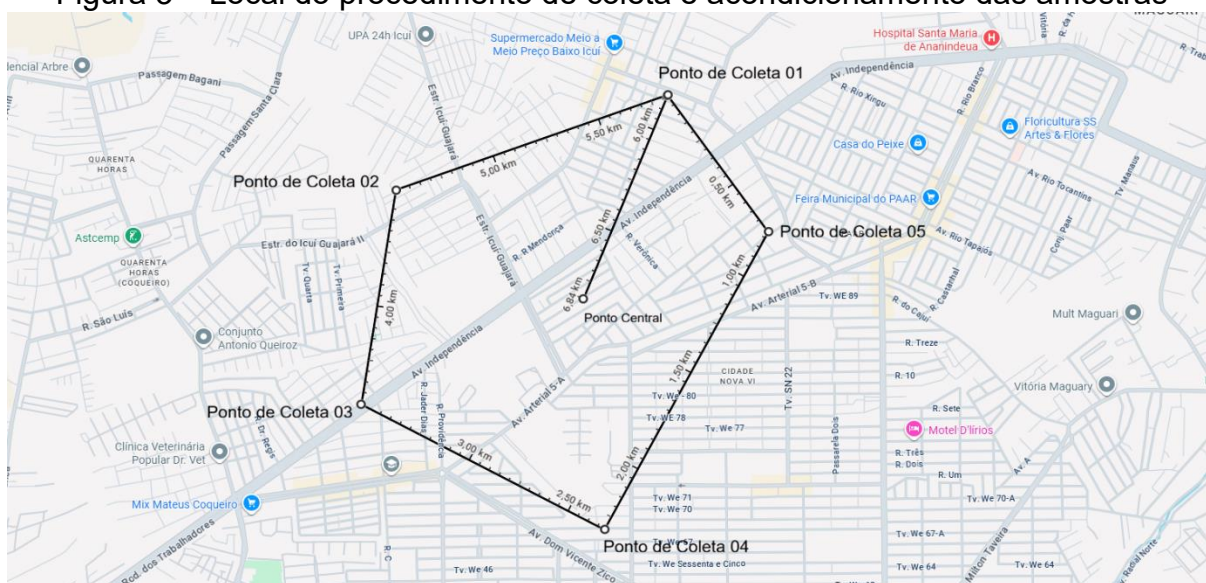


Fonte: elaborado pelo autor(a) com base no Google Maps

Coleta e preservação das amostras

As amostras foram coletadas em frascos de polietileno previamente lavados e descontaminados, seguindo procedimentos padronizados para amostragem de águas subterrâneas. Após a coleta, as amostras destinadas à análise de metais foram acidificadas com ácido nítrico de grau analítico, mantendo pH inferior a 2, conforme recomendações normativas. Em seguida, as amostras foram armazenadas sob refrigeração até a realização das análises laboratoriais.

Figura 3 – Local do procedimento de coleta e acondicionamento das amostras



Fonte: elaborado pelo autor(a) com base no Google Maps

Determinação de metais por ICP-OES

As concentrações de silício (Si), titânio (Ti), manganês (Mn) e chumbo (Pb) foram determinadas por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), utilizando equipamento operando em modo axial. Foram preparadas soluções padrão para construção das curvas de calibração, além de brancos analíticos e amostras fortificadas para avaliação do desempenho do método. O controle de qualidade analítica incluiu a verificação de linearidade, repetibilidade e estimativa dos limites de detecção, assegurando a confiabilidade e a validade dos resultados obtidos.

RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir das análises por ICP-OES demonstraram desempenho analítico adequado do método empregado, tanto em termos de linearidade quanto de exatidão, conforme evidenciado pelas curvas analíticas, testes de adição e recuperação e análise das amostras reais.

A Tabela 1 apresenta os dados da curva analítica construída para elementos manganês (Mn), chumbo (Pb), silício (Si) e titânio (Ti). Observa-se que os valores medidos pelo equipamento apresentaram excelente concordância com as concentrações teóricas dos padrões preparados, ao longo da faixa de 0,1 a 2,0 ppm. Esse comportamento indica adequada linearidade do método, condição essencial para a quantificação confiável dos elementos analisados nas amostras de águas subterrâneas.

Tabela 1- Curva analítica para os elementos Mn, Pb, Si e Ti determinada por ICP-OES

	Concentração (ppm)	Mn 257.610 (Axial) [ppm]	Pb 182.205 (Axial) [ppm]	Si 185.067 (Axial) [ppm]	Ti 334.941 (Axial) [ppm]
Ponto 01 - Branco	0,00	-0,01	-0,02	-0,01	-0,01
Ponto 02 - 0,1 ppm	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10
Ponto 03 - 0,25 ppm	0,25	0,25	0,26	0,25	0,26
Ponto 04 - 0,50 ppm	0,50	0,51	0,51	0,51	0,51
Ponto 05 - 1,0 ppm	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00
Ponto 06 - 2,0 ppm	2,00	2,00	1,99	2,00	2,00

Fonte: elaborado pelo(a) autor(a)

A exatidão do método analítico foi avaliada por meio dos ensaios de adição e recuperação, cujos resultados encontram-se apresentados na Tabela 2. Para as adições realizadas nas concentrações de 0,15 mgL⁻¹ e 1,5 mgL⁻¹, os valores determinados para manganês, chumbo, silício e titânio apresentaram boa concordância com as concentrações adicionadas. Essa proximidade entre os valores teóricos e experimentais evidencia a adequada resposta do método e sua capacidade de quantificação confiável para os elementos avaliados.

Tabela 2- Resultados do ensaio de adição e recuperação para os elementos Mn, Pb, Si e Ti

	Concentração (ppm)	Mn 257.610 (Axial) [ppm]	Pb 182.205 (Axial) [ppm]	Si 185.067 (Axial) [ppm]	Ti 334.941 (Axial) [ppm]
Adição Recuperação Branco 0,15 ppm	0,00	-0,009	-0,004	0,055	-0,007
Adição Recuperação 0,15 ppm	0,15	0,142	0,142	0,205	0,147
Adição Recuperação Branco 1,50 ppm	0,00	-0,009	-0,003	0,056	-0,007
Adição Recuperação 1,50 ppm	1,50	1,486	1,502	1,562	1,489

Fonte: elaborado pelo(a) autor(a)

A partir dos dados apresentados na Tabela 2, foram calculados os percentuais de recuperação, os quais estão sintetizados no Quadro 1. Para a concentração adicionada de 0,15 mgL⁻¹, os percentuais de recuperação variaram entre 94,67% e 100%, enquanto para a concentração de 1,5 mgL⁻¹ os valores situaram-se entre 99% e 100% para todos os elementos analisados. Esses resultados indicam elevada exatidão do método, com recuperações dentro da faixa considerada aceitável para métodos analíticos aplicados à análise de águas.

Quadro 1 – Percentuais de recuperação obtidos nos ensaios de adição para Mn, Pb, Si e Ti

Concentração (ppm)	Mn 257 nm	Pb 182 nm	Si 185 nm	Ti 308 nm
0,00	0,00	0,00	0,055	0,00
0,15	0,142	0,142	0,205	0,147
Recuperação (%)	94,67	94,67	100,00	98,00
0,00	0,00	0,00	0,056	0,00
1,50	1,486	1,502	1,562	1,489
Recuperação (%)	99	100	100	99

Fonte: elaborado pelo(a) autor(a)

Os percentuais de recuperação obtidos confirmam a adequação do procedimento analítico empregado, bem como a confiabilidade dos resultados gerados pelo método de ICP-OES nas condições experimentais adotadas. Dessa forma, os ensaios de adição e recuperação demonstram que o método apresenta desempenho satisfatório para a determinação dos elementos avaliados em amostras de águas subterrâneas.

Os resultados das concentrações determinadas nas amostras reais de águas

subterrâneas estão apresentados na Tabela 3. Observa-se que os elementos manganês e chumbo apresentaram concentrações inferiores ao limite de detecção do método na maioria dos pontos de coleta. Pequenas concentrações desses metais foram detectadas apenas nos Pontos de Coleta 04 e 05, ainda assim em níveis muito baixos, indicando ausência de contaminação significativa por esses elementos nas áreas avaliadas.

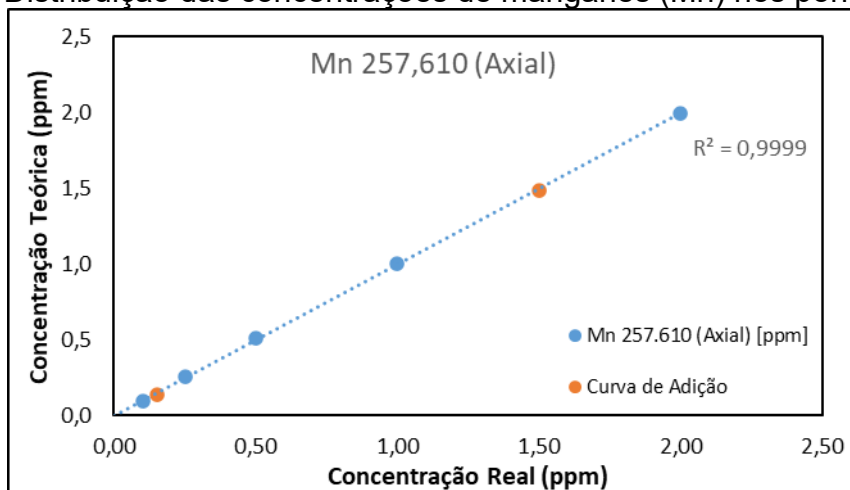
Tabela 3- Concentrações dos elementos Mn, Pb, Si e Ti nas amostras de águas subterrâneas analisadas

	Mn 257.610 (Axial) [ppm]	Pb 182.205 (Axial) [ppm]	Si 185.067 (Axial) [ppm]	Ti 334.941 (Axial) [ppm]
Branco da amostra	-0,002	-0,007	0,002	-0,005
Ponto de Coleta Central	< LOD	< LOD	1,943	< LOD
Ponto de Coleta 01	< LOD	< LOD	1,731	< LOD
Ponto de Coleta 02	< LOD	< LOD	1,813	< LOD
Ponto de Coleta 03	< LOD	< LOD	1,895	< LOD
Ponto de Coleta 04	0,005	0,002	1,977	0,005
Ponto de Coleta 05	0,011	0,010	1,059	0,013

Fonte: elaborado pelo(a) autor(a)

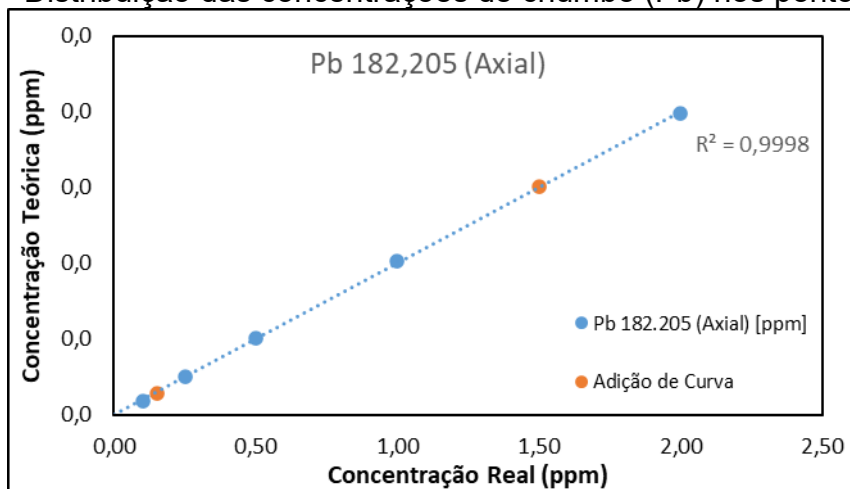
Os Gráficos 1 e 2 ilustram, respectivamente, a distribuição das concentrações de manganês e chumbo nos pontos de coleta, evidenciando que ambos os elementos permanecem em níveis muito baixos ou não detectáveis ao longo da área estudada. Esses resultados corroboram os dados apresentados na Tabela 3 e reforçam a ausência de contaminação significativa por esses metais nas águas subterrâneas analisadas.

Gráfico 1 – Distribuição das concentrações de manganês (Mn) nos pontos de coleta



Fonte: elaborado pelo(a) autor(a)

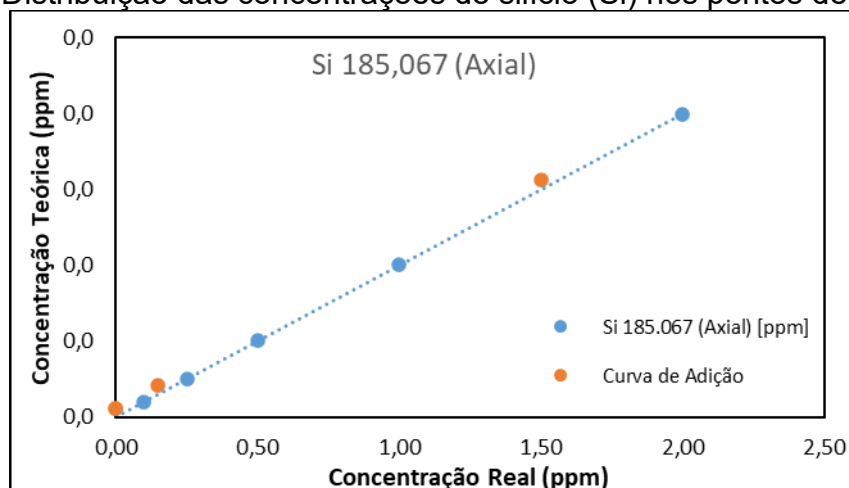
Gráfico 2 – Distribuição das concentrações de chumbo (Pb) nos pontos de coleta



Fonte: elaborado pelo(a) autor(a)

O silício foi detectado em todas as amostras analisadas, com concentrações variando entre 1,059 e 1,977 mgL⁻¹. Esses valores são coerentes com a natureza geológica da região de Ananindeua, caracterizada pela presença de minerais silicatados, refletindo a interação entre a água subterrânea e o material geológico do aquífero. O comportamento relativamente homogêneo das concentrações de silício entre os diferentes pontos sugere predominância de controle geogênico sobre esse elemento, conforme visualizado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Distribuição das concentrações de silício (Si) nos pontos de coleta

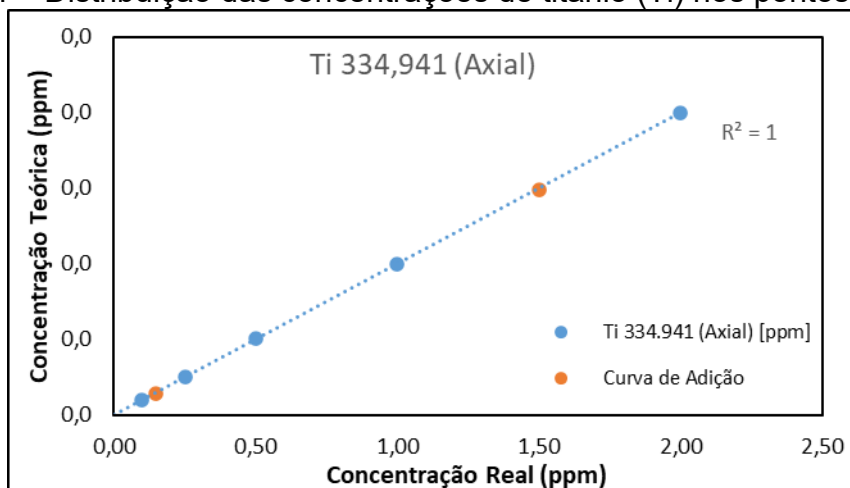


Fonte: elaborado pelo(a) autor(a)

O titânio apresentou concentrações próximas ou inferiores ao limite de detecção na maioria dos pontos de coleta, com valores ligeiramente mensuráveis apenas em alguns locais específicos. Esse comportamento é consistente com a baixa solubilidade e mobilidade do titânio em ambientes aquosos, especialmente em águas

subterrâneas com características físico-químicas semelhantes às observadas neste estudo, conforme ilustrado no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Distribuição das concentrações de titânio (Ti) nos pontos de coleta



Fonte: elaborado pelo(a) autor(a)

A comparação dos resultados obtidos com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 indica que, para os parâmetros metálicos avaliados, as águas subterrâneas analisadas encontram-se em conformidade com os limites recomendados para consumo humano. No entanto, ressalta-se a importância da continuidade do monitoramento da qualidade dessas águas, considerando o crescimento urbano do município e as possíveis alterações decorrentes do uso e ocupação do solo.

CONCLUSÕES

A avaliação química das águas subterrâneas do município de Ananindeua (PA) permitiu a caracterização consistente da qualidade dessas águas quanto aos elementos metálicos analisados, com ênfase na determinação de metais por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). A aplicação da técnica demonstrou-se adequada e eficiente, apresentando boa sensibilidade, precisão, exatidão e capacidade multielementar, atendendo plenamente às exigências analíticas para o monitoramento de metais em águas subterrâneas.

Os resultados obtidos indicaram que as concentrações de manganês (Mn), chumbo (Pb) e titânio (Ti) encontraram-se, na maioria das amostras analisadas,

abaixo dos limites de detecção do método ou em níveis muito baixos. Esses valores não representam risco à saúde humana quando comparados aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação brasileira vigente. O silício (Si), por sua vez, apresentou concentrações mensuráveis em todos os pontos de coleta, compatíveis com a geologia local e associadas aos processos naturais de interação água-rocha, não apresentando implicações negativas para o uso da água.

De modo geral, as águas subterrâneas avaliadas apresentaram qualidade satisfatória para consumo humano no que se refere aos parâmetros metálicos analisados. Contudo, considerando o processo contínuo de urbanização do município e o uso intensivo dos aquíferos, recomenda-se a manutenção de programas de monitoramento sistemático da qualidade das águas subterrâneas, visando à identificação precoce de possíveis alterações decorrentes do uso e ocupação do solo. Dessa forma, o presente estudo contribui com informações técnicas relevantes para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos de Ananindeua (PA) e para o fortalecimento das ações de vigilância da qualidade da água.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Vanessa Nunes Alves, pela orientação, apoio técnico e valiosas contribuições científicas ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Agradece-se, também, às instituições e aos laboratórios que disponibilizaram infraestrutura e suporte analítico para a realização das análises, bem como a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALLOWAY, Brian J. **Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability**. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2013.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington, DC: APHA, AWWA, WEF, 2017.

BOSS, Chris B.; FREDEEN, Ken J. **Concepts, instrumentation and techniques in inductively coupled plasma optical emission spectrometry**. 3. ed. PerkinElmer Life and Analytical Sciences, 2004.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 maio 2021.

FOSTER, Stephen; HIRATA, Ricardo. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima: Pan American Health Organization / World Health Organization, 1988.

HIRATA, Ricardo; FOSTER, Stephen; OLIVEIRA, Flávio R. **Águas subterrâneas: conceitos e aplicações**. São Paulo: Instituto de Geociências – USP, 2010.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Orientação sobre validação de métodos analíticos**. Rio de Janeiro: INMETRO, 2020.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality**. 4. ed. Geneva: WHO, 2017.