

Hidroquímica da água subterrânea na zona urbana de Manacapuru, Amazonas, Brasil

Hydrochemistry of groundwater in the urban area of Manacapuru, Amazonas, Brazil

Ludmila Souza Oliveira¹; Willian Barros²; Ingo Wahnfried³

¹Universidade Federal do Amazonas, Amazonas - Brasil, lud18oliveira@gmail.com

²Universidade Federal do Amazonas, Amazonas - Brasil, willianbarros18@gmail.com

³Universidade Federal do Amazonas, Amazonas - Brasil, iwahnfried@ufam.edu.br

Recebido:

24 de dezembro de 2024

Recebido no formato de revisão:

16 de março de 2025

Aceito:

17 de março de 2025

Disponível online:

02 de junho de 2025

Seção:

Artigos

Palavras-chave:

Hidroquímica.
Águas subterrâneas.
Hidrogeologia.
Manacapuru.
Amazonas.
Brasil.

Keywords:

Hydrochemistry.
Groundwater.
Hydrogeology.
Manacapuru.
Amazonas.
Brazil.

<https://doi.org/10.14295/ras.v39i1.30296>



RESUMO

As águas subterrâneas desempenham um papel de grande importância na Amazônia, com quase 60% dos municípios utilizando esta fonte para o sistema de abastecimento público. Apesar da boa qualidade geral da água subterrânea, é necessário conhecer as características hidroquímicas da água subterrânea. Este estudo tem como objetivo geral caracterizar a hidroquímica das águas subterrâneas do município de Manacapuru – AM. As amostras de água foram coletadas em pontos distribuídos na sede urbana do município, ao longo de toda a extensão vertical do Aquífero Alter do Chão, em piezômetros rasos e poços profundos da empresa de Serviço de Abastecimento de Água e Esgoto – SAAE. Foram medidos os parâmetros físico-químicos da água em campo, e em laboratório foram determinados os cátions e ânions maiores, a alcalinidade e a concentração de sílica. O balanço iônico indicou que os resultados de 11 análises estavam adequados, todas elas de poços tubulares. Estas amostras foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas. As amostras coletadas em poços com profundidades superiores a 200 metros apresentam maiores concentrações de íons como cálcio e bicarbonatos, devido ao maior tempo de residência no aquífero. Todas as amostras estão dentro dos padrões de potabilidade do Ministério da Saúde, considerando os parâmetros avaliados. Duas amostras estão com os valores de nitrato acima do valor de prevenção recomendado pela CETESB, de 5 mg/L, o que mostra a importância de haver monitoramento periódico.

ABSTRACT

Groundwater plays a very important role in the Amazon region, with almost 60% of the municipalities using this source for their public water supply systems. Despite the good general quality of groundwater, it is necessary to understand its hydrochemical characteristics. The general objective of this study is to characterize the hydrochemistry of groundwater in the municipality of Manacapuru, State of Amazonas, Brazil. Water samples were collected at points distributed throughout the urban center of the municipality, along the entire vertical extension of the Alter do Chão Aquifer, in shallow piezometers and deep wells of the Water Supply and Sewage Service Company (SAAE). The physical and chemical parameters of the water were measured in the field, and the major cations and anions, alkalinity and silica concentration were determined in the laboratory. The ionic balance indicated that the results of 11 analyses were adequate, all of them from tubular wells. These water samples were classified as calcium bicarbonate. Samples collected from wells deeper than 200 meters show higher concentrations of ions such as calcium and bicarbonates, due to the longer time spent in the aquifer. All samples are within the potability standards of the Ministry of Health, considering the parameters evaluated. Two samples have nitrate levels above the prevention value recommended by the São Paulo State Environmental Agency (CETESB), of 5 mg/L, which shows the importance of periodic monitoring.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas desempenham um papel fundamental para o abastecimento público. Com o crescimento da população e da produção industrial e agrícola, se fazem necessários estudos para compreender melhor as suas vulnerabilidades e os riscos aos quais estão expostas (ANA, 2021). A boa qualidade química e bacteriológica que em geral possui faz com que a água subterrânea seja uma importante fonte de abastecimento, principalmente em um contexto de aumento de eventos de secas extremas. O estado do Amazonas tem uma população de 3.941.613 de habitantes (IBGE, 2022), que vivem predominantemente nas margens dos mais de 25 mil quilômetros de rios navegáveis. Na região amazônica, mesmo com a grande quantidade de corpos superficiais de água, cerca de 59% dos municípios usam aquíferos como a única fonte de abastecimento de suas sedes (ANA, 2021). A interação da água subterrânea com o meio define as características químicas que possui. Em situações específicas, podem ocorrer contaminações naturais ou geogênicas. No Brasil, os parâmetros de potabilidade de água são definidos pelo Ministério da Saúde, através de valores máximos permitidos (VMPs) para elementos compostos químicos e definidos pela portaria de consolidação 888/2021. Valores acima de VMP são prejudiciais à saúde. Na região amazônica, trabalhos como de Matheus (2017), de Meyer et al. (2023), Fernandes Neto e Wahnfried (2024) e Ribeiro et al. (2024) detectaram a presença de alumínio, ferro, manganês e arsênio naturais acima de VMP em água subterrânea de poços tubulares no município de Novo Airão e ao longo dos rios Solimões e Madeira. Há risco de que essas contaminações ocorram em áreas mais amplas, devido à existência das características descritas por Winkel et al. (2008). Os três primeiros elementos não representam risco à saúde humana, mas afetam as características organolépticas da água, ao causar estímulos sensoriais que afetam a aceitação para consumo humano. Já o arsênio pode gerar problemas sérios, como câncer. Além disso, os trabalhos de Fernandes Neto e Wahnfried (2024) e Ribeiro et al. (2024) encontraram a presença de nitrato acima de valores de referência de prevenção (CETESB, 2022, p. 203), indicando que também ocorrem contaminações antrópicas da água subterrânea em algumas áreas. Para investigar estas questões, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar a hidroquímica das águas subterrâneas da zona urbana do Município de Manacapuru – AM.

MATERIAIS E MÉTODOS

Localização dos poços de coleta para amostragem

A área de estudo está localizada no perímetro urbano do município de Manacapuru (Figura 1). Este possui uma população estimada em 101.883 habitantes de acordo com dados do Censo IBGE (2022). Situado na região do médio rio Amazonas, compõe a região metropolitana de Manaus. A seleção dos poços tubulares foi feita utilizando dados de relatórios técnicos dos poços tubulares profundos disponibilizados pela empresa de Serviço de Abastecimento de Água e Esgoto-SAAE do município de Manacapuru e plataforma SIAGAS-Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SGB, 2020). Os critérios utilizados foram os poços localizados na zona urbana do município de Manacapuru e que estavam em funcionamento. Foram realizadas duas coletas de amostras de água em períodos distintos. A primeira foi executada em novembro de 2021, em 21 poços tubulares profundos e a segunda etapa de coleta foi feita em junho de 2022, em 5 piezômetros totalizando 26 pontos de coleta.

Amostragem de água subterrânea

Na Tabela 1, são apresentados os nomes e as profundidades dos poços, piezômetros e os dados dos parâmetros físicos – químicos distribuídos por toda zona urbana do município. Os procedimentos de coleta foram realizados seguindo os protocolos sugerido pela Agência Norte Americana de Proteção Ambiental (*US Environmental Protection Agency – EPA*) (USEPA, 2015). Foram utilizadas mangueiras para desviar parte da água bombeada do poço profundo até um recipiente aberto, de modo que a vazão pudesse ser controlada (Figura 2). Neste recipiente foram medidos os parâmetros físico-químicos pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, sólidos totais dissolvidos e temperatura com uma sonda da marca YSI, modelo Professional Plus. A ponta da mangueira de amostragem foi posicionada no fundo do recipiente, gerando fluxo ascendente, que garantiu que a água passasse pelos sensores da sonda antes de ter o contato com o ar. O bombeamento do poço foi mantido até que os parâmetros ficassem estáveis, indicando que a partir daquele momento a água que estava saindo era originada do aquífero, e não mais a água que estava estagnada no poço. Todas as amostras foram filtradas com filtros de 0,45 µm de acetato de celulose (PES). Para preservar as amostras de cátions, foram adicionadas seis gotas de ácido nítrico bidestilado. As amostras foram acondicionadas em caixa térmica com gelo e transportadas para o Laboratório de Geoquímica da Universidade Federal do Amazonas em Manaus, sendo armazenadas em geladeira.

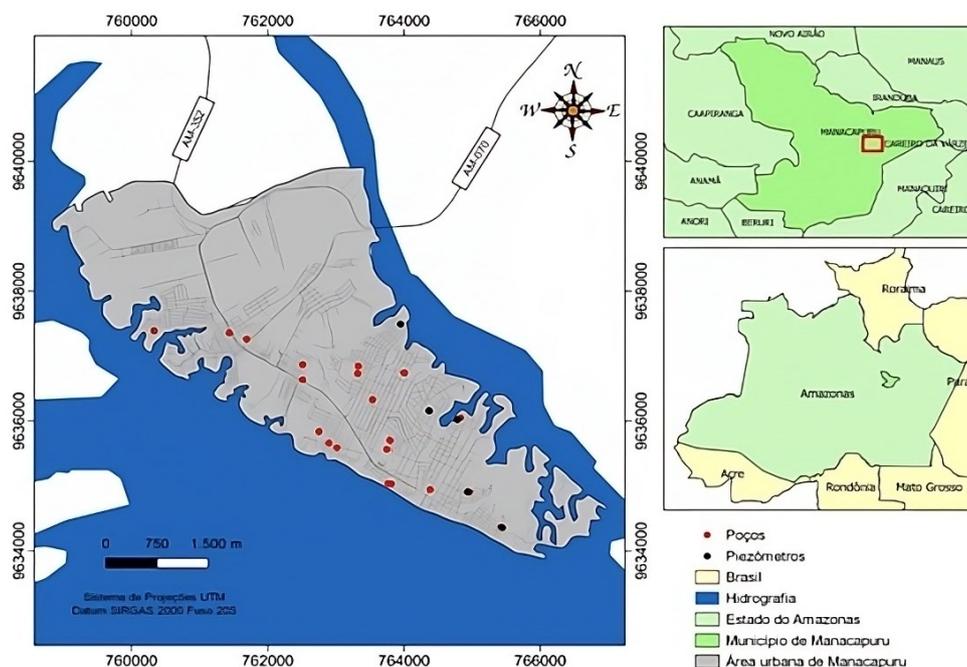


Figura 1. Mapa de localização e dos pontos de coleta de água na área urbana do município de Manacapuru. Fonte: autoria própria.

Tabela 1. Dados dos 26 pontos de coleta e sua localização, com os parâmetros físico-químicos medidos em campo.

Poços	Prof. (m)	Lat	Long	pH	Eh (mV)	CE (µS/cm)	Temp. (°C)
Correnteza	220	3°18'18,2"S	60°36'41,5"W	6,7	64,6	395,6	30,8
Padres	220	3°17'59,6"S	60°37'14,9"W	6,5	21,7	306,4	30,9
Terra Preta I	220	3°17'36,3"S	60°38'03,0"W	6,5	33,8	299,9	30,8
Terra Preta II	120	3°17'38,7"S	60°37'59,28"W	6,5	27,9	307,5	31
Terra Preta III	108	3°17'30,67"S	60°38'7,82"W	5,8	124,7	267,5	29,5
Morada do Sol I	224	3°16'57,2"S	60°38'15,6"W	6,6	59,2	350,2	30,9
Morada do Sol II	104	3°17'4,70"S	60°38'15,58"W	5,3	148,2	66,1	27,5
Átila Lins	220	3°17'20,2"S	60°37'15,4"W	6,4	31,9	351,5	30,6
São José	220	3°17'14,6"S	60°37'42,4"W	6,5	19,7	308,2	30,6
Novo Manacá	232	3°16'41,3"S	60°38'50,5"W	6,5	40,7	316,7	30,6
Palinha I	220	3°17'01,1"S	60°37'27,4"W	6,5	48,1	357,8	30,5
União I	220	3°16'57,8"S	60°37'49,2"W	6,3	50,6	311	30,3
União II	120	3°17'1,49"S	60°37'49,52"W	4,6	207,3	187,4	29
São Francisco	120	3°17'23,6"S	60°37'00,5"W	6,1	105,3	160,9	28,8
Lago Azul II	150	3°16'44,4"S	60°38'42,3"W	5,8	168,5	100,1	28,2
Biri Biri	226	3°18'00,7"S	60°36'56,2"W	6,6	-41,9	367,5	30,9
Figueirinha I	110	3°17'35,0"S	60°37'34,1"W	5,7	167	100,1	28,2
Figueirinha II	110	3°17'39,45"S	60°37'35,59"W	5,6	125,4	108,7	27,8
IDAM I	100	3°17'56,7"S	60°37'33,4"W	5,7	298,1	225,6	29,5
IDAM II	220	3°17'56,6"S	60°37'34,89"W	6,5	53,8	301,1	31,7
Vale Verde	60	3°16'40,3"S	60°39'26,2"W	4,2	287,2	79,1	28,2
PI Correnteza	7	3°18'18,53"S	60°36'40,43"W	5,5	74,2	221,1	28,5
PI São Francisco	4	3°17'24,48"S	60°37'2,11"W	5,2	88,9	209,7	26,6
PI Atila Lins	6	3°17'19,93"S	60°37'15,56"W	5,2	131,9	217,4	28,1
PI Lago do Limão	4	3°16'36,69"S	60°37'29,16"W	5	55,2	62	26,2
PI Biri Biri	6	3°18'0,67"S	60°36'57,21"W	5,4	20,7	262,6	28,3
Mínimo	*	*	*	4,2	-41,9	62	26,2
Máximo	*	*	*	6,7	298,1	395,6	31,7
Mediana	*	*	*	5,95	61,9	265,05	29,5

pH da água; Eh: potencial de oxidação/redução; CE: condutividade elétrica temp.: temperatura da água.

Para a coleta de água nos piezômetros foram utilizados amostradores descartáveis de água subterrânea (bailers) de polietileno. Antes da coleta foi necessário remover a água estagnada de dentro dos piezômetros, para garantir uma amostra representativa do aquífero, removendo três volumes de água do piezômetro, ou fazendo seu secamento completo quando a taxa de reposição de água era inferior à taxa de retirada com o bailer. Para amostragem, a água foi transferida dos bailers diretamente para uma seringa de 10 mL, a qual foi acoplada a filtro de PES de 0,45 μm . A água foi acondicionada em frascos de 60 mL de polietileno (PET). Os demais procedimentos de conservação e transporte foram iguais àqueles utilizados para as amostras dos poços.



Figura 2. Procedimentos para coleta de água dos poços profundos no município de Manacapuru - AM.

Análise dos cátions e ânions

As análises de cátions e ânions foram feitas no laboratório de Geoquímica da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, utilizando o Cromatógrafo Thermo Scientific - CI Dionex ICS-Aquion. Foram feitos os padrões para cada amostra destinada à análise dos cátions Na^+ , Ca^+ , K^+ e Mg^{2+} . Todas as amostras foram diluídas com água deionizada (Milli-Q), até que os valores de condutividade elétrica chegassem a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Uma vez analisados os cátions em todas as amostras, foi feita a mudança de coluna do cromatógrafo para ânions, repetindo o processo de diluição. Foram analisados Cl^- , NO_3^- e SO_4^{2-} . Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Determinação da alcalinidade e sílica

As análises de alcalinidade foram feitas no máximo 24 horas (Figura 3) após a coleta da amostra, pelo método de titulação com indicador ácido-base alaranjado de metila ($\text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_2$) Foram utilizados sempre 50 mL de amostra, aos quais foram adicionados ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 0,02 N, ou ácido clorídrico (HCl) a 0,01 N (Figura 3). Para a determinação da concentração de sílica nas amostras foi utilizada a técnica que se baseia na formação do ácido molibdosilícico amarelo, pela reação da sílica com o íon molibdato. O produto formado é reduzido ao azul de molibdênio pelo ácido l-amino-2-naftol-sulfônico (Zenaro, 1989). Para o preparo da curva padrão de concentração de Si foi utilizada a solução padrão de sílica com concentração de 1000 mg/L, diluída de modo a obter as concentrações 0,5 mg/L, 0,75 mg/L, 1,0 mg/L, 1,5 mg/L e 2,0 mg/L. As amostras dos poços tubulares profundos foram diluídas em água deionizada para que os resultados sempre estivessem dentro dos valores mínimo e máximo dos padrões de referência utilizados. As amostras coletadas dos piezômetros não foram diluídas, uma vez que águas mais rasas tendem a ter valores de sílica menores.

Sabendo o volume de ácido adicionado (V_a), a molaridade do ácido (M), a massa molar do elemento em que a alcalinidade (MM) é expressa e o volume da amostra (V_{amostra}), é possível obter a alcalinidade da amostra através da Equação 3.

$$\text{Alcalinidade} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{V_a \cdot M \cdot MM}{V_{\text{amostra}}} \quad (1)$$

em que:	V_a	volume do ácido (L)
	M	molaridade do ácido (mol/L)
	MM	massa molar do elemento (g/mol)
	V_{amostra}	volume da amostra (L)

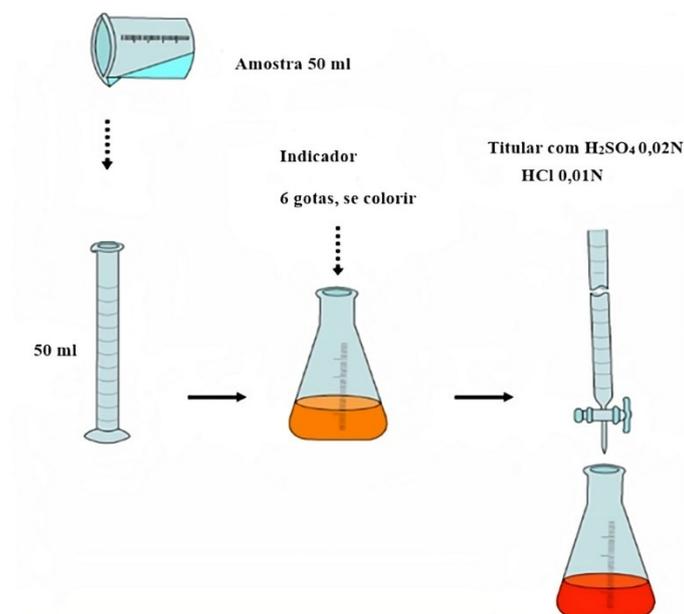


Figura 3. Procedimento utilizado para determinação da alcalinidade. Fonte: os autores.

Avaliação dos resultados: balanço iônico

As reações químicas que ocorrem na água subterrânea geram equilíbrio entre ânions e cátions. Para avaliar a qualidade dos resultados das análises, foi realizado o cálculo do balanço iônico, seguindo as diretrizes de Custódio e Llamas (1983), que relaciona o erro prático (E_p) máximo permitido com a condutividade elétrica (CE) (equações 2 e 3 de Logan, 1965, apud Custódio & Llamas, 1983) com erro aceitável de 10%.

$$E_p(\%) = \frac{[\sum \text{ânions} - \sum \text{cátions}]}{[\sum \text{ânions} + \sum \text{cátions}]} * 200 \quad (2)$$

$$E_p(\%) = \frac{[\sum \text{ânions} - \sum \text{cátions}]}{[\sum \text{ânions} + \sum \text{cátions}]} * 100 \quad (3)$$

Construção dos mapas de concentração

Os resultados referentes aos parâmetros dos mapas de concentração foram importados para o software QGIS, versão 3.16 (QGIS.org, 2022), para gerar mapas de iso-valores, através de interpolação. O método utilizado foi o Inverso do Quadrado da Distância (IDW) com o expoente de ponderação 2. A ferramenta para esse procedimento é denominada Interpolação IDW e encontra-se disponível na caixa de ferramentas do QGIS, sendo apresentado na Equação 4.

$$Z = (\sum_{i=1}^n \frac{1}{(di)^p} Zi) / (\sum_{i=1}^n \frac{1}{(di)^p}) \quad (4)$$

O Z refere-se ao valor do ponto a ser estimado; Z_i é o valor do ponto conhecido; d_i é a distância euclidiana entre o ponto conhecido e o ponto a ser estimado; p é o expoente adotado; n são os números de pontos conhecidos. O método IDW é baseado no fato que cada ponto medido vai influenciar diretamente em um ponto previsto, sendo que o algoritmo fornece os maiores pesos aos pontos que se localizam mais próximo daqueles que serão previstos, ou seja, quanto maior a distância, menor será a influência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parâmetros físico-químicos

Os valores dos parâmetros físico-químicos temperatura (T), condutividade elétrica (CE), pH e potencial de oxidação/redução (Eh) das 26 amostras coletadas são apresentados na Tabela 1 e Figura 4. Nesta última, os valores são apresentados em relação à profundidade do ponto de coleta, seja piezômetro ou poço. Cabe ressaltar que os poços possuem vários filtros de vários metros de comprimento, distribuídos ao longo de sua extensão vertical,

permitindo que a água de várias profundidades entre durante o bombeamento. Como não há informação da posição e extensão dos filtros, não é possível determinar quanto cada profundidade contribui com o aporte de água. Ainda assim, poços mais profundos sempre terão algum grau de influência de águas mais profundas.

A temperatura, como esperado, apresenta aumento em função de profundidade ($R^2 = 0,720$), o que é explicado pelo gradiente geotérmico. Este parâmetro variou entre 26,2 a 31,7 °C. A menor temperatura foi registrada no piezômetro Lago do Limão, com 4 m de profundidade (26,2°C), e a maior foi registrada no poço Idam II, com 220 m de profundidade (31,7°C), uma diferença de 5,5°C em 216 m, o que gera um gradiente de 2,5°C a cada 100 m, dentro do esperado. As amostras dos piezômetros foram coletadas em junho, coincidindo com o período de cheia do rio Solimões, e ainda durante o período de chuvas, o que pode reduzir a temperatura da água subterrânea em aquíferos freáticos rasos. Utilizando a temperatura de todos os poços, o gradiente geotérmico médio é de 1,4°C a cada 100 m. A diferença em relação ao valor comparativo entre piezômetro e poço apresentado anteriormente pode ser explicado pela distribuição ampla dos filtros dos poços.

O pH variou entre 4,2 a 6,7. Os poços com profundidades de 120 m a 232 m foram os que apresentaram maiores valores de pH, enquanto os piezômetros apresentaram os menores valores. A figura 4 mostra a correlação da profundidade com o pH, que indica claramente a existência de uma correlação positiva destas variáveis, com $R^2 = 0,649$. Os poços Correnteza (220 m), Biribiri (226 m), Morada do Sol (120 m), Padres (220 m) e Átila Lins (220) foram os que apresentaram maiores valores, variando entre 6,7 e 6,4. Nos piezômetros, o menor valor de pH foi no Lago do Limão (4 m), com valor de 5. Pita *et al.* (2018) encontrou pH próximos à neutralidade nos poços Correnteza, Novo Manacá, Padres, São José e Biribiri, todos com profundidade superior a 150 metros.

As condutividades elétricas dos poços apresentaram variação entre 62 a 395,6 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Há clara tendência de aumento de CE com a profundidade, à exceção de alguns piezômetros, que possuem CE superior a 200 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Isso provavelmente gera um baixo coeficiente de correlação entre CE e profundidade ($R^2 = 0,423$). Dentre os poços profundos os que apresentaram as menores condutividades foram Vale Verde (60 m) com 79,1 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, Figueirinha I (110 m) com 110,1 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, Figueirinha II (110 m) com 108,7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e Morada do Sol (104 m) com 66,1 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Em relação aos piezômetros os valores de condutividades foram; Lago do Limão (4 m) com 62 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, São Francisco (4 m) com 209,4 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, Átila Lins (6 m) com 217,6 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, Correnteza (7 m) com 221 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e Biribiri (6 m) com 262,6 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Pita *et al.* (2018), registrou dados de condutividade entre 18 a 884 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ nas águas subterrâneas, com média de 416 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. No geral, a água do AAC apresenta baixa condutividade elétrica (até 100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) (Pacheco, 2017). Elevadas condutividades na região de Manacapuru podem ser explicadas pela profundidade dos poços, que vão desde 60 até 226 metros, com maior tempo de residência no aquífero ocorre maior interação de água-rocha (Rosário, 2016).

Balanço iônico

Apenas nove amostras das vinte cinco coletadas apresentaram erro de balanço iônico dentro dos limites aceitáveis de 10% (Tabela 2). Nenhuma amostra coletada em piezômetros ficou dentro do limite.

Hidroquímica

As concentrações de cátions e ânions com valores aprovados na avaliação do balanço iônico são apresentadas na Tabela 3, assim como os dados de sílica. Todas as amostras são classificadas como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas pelo diagrama de Piper (Figura 7). Mas a concentração de cálcio é superior à de magnésio (Tabela 3), o que permite classificar as amostras como cálcicas. Amostras de poços com profundidade entre 150 a 232 m apresentaram maiores concentrações de cátions, com a ordem de concentração ficando $\text{Ca}^{+2} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2}$ quando relacionado à profundidade. As maiores concentrações de bicarbonatos foram observadas nas amostras de águas mais rasas.

Na Figura 5 é mostrada a distribuição das concentrações dos cátions cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+) e potássio (K^+) nos poços com profundidades de até 120 metros (coluna da esquerda), e com profundidades variando de 150 a 232 m (coluna da direita). O cálcio é o cátion com maiores concentrações nas águas dessa região, apresentando valores mínimo de 10,88 mg/L no poço São Francisco, máximo de 29,66 mg/L no

poço Palinha e a mediana de 24,39 mg/L. É possível observar através das tonalidades das cores no mapa que a distribuição do cálcio se concentra nos poços localizados nas porções norte e leste.

Tabela 2 – Balanço iônico das amostras das águas subterrâneas do município de Manacapuru

Poços	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻ +HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	ΣCátions	ΣÂnions	B.I.1	B.I.1
	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	%	%
Correnteza	1,74	0,93	0,67	0,13	1,41	0,71	3,35	2,24	39,64	19,82
Padres	1,25	0,71	0,61	0,05	1,51	0,39	2,55	1,95	26,73	13,37
Terra Preta I	1,01	0,73	0,81	0,08	1,63	0,06	2,55	1,77	35,84	17,92
Terra Preta II	1,26	0,76	0,64	0,06	1,71	0,45	2,66	2,22	17,80	8,90
Terra Preta III	1,22	0,75	0,64	0,05	1,72	0,41	2,61	2,19	17,43	8,72
Morada do Sol	1,64	0,93	0,68	0,08	1,41	0,81	3,26	2,28	35,16	17,58
Morada do Sol II	0,14	0,11	0,31	0,03	1,61	0,01	0,55	1,66	100,03	50,02
Atila Lins	1,74	0,96	0,79	0,09	1,61	0,45	3,49	2,16	47,38	23,69
São José	1,27	0,72	0,59	0,07	2,2	0,54	2,58	2,81	8,45	4,22
Novo Manacá	1,29	0,81	0,64	0,04	1,53	0,69	2,74	2,27	18,72	9,36
Palinha	1,48	0,83	0,65	0,06	1,73	0,81	2,96	2,59	13,16	6,58
União I	1,16	0,66	0,57	0,05	1,39	0,61	2,39	2,05	15,07	7,53
União II	0,22	0,11	0,91	0,37	1,22	0,11	1,23	1,71	32,49	16,24
São Francisco	0,54	0,33	0,39	0,03	1,19	0,05	1,27	1,27	0,09	0,05
Lago Azul	0,28	0,09	0,13	0,03	1,23	0,02	0,51	1,31	87,09	43,54
Biribiri	1,67	0,91	0,71	0,14	0,66	0,65	3,25	1,45	77,13	38,57
Figueirinha I	0,27	0,18	0,36	0,04	1,35	0,02	0,82	1,42	53,58	26,79
Figueirinha II	0,26	0,18	0,45	0,11	1,18	0,01	0,91	1,31	36,49	18,25
Idam I	0,71	0,46	0,78	0,18	1,44	0,05	1,96	1,67	15,79	7,9
Idam II	0,8	0,46	0,41	0,05	1,29	0,37	1,67	1,71	2,53	1,27
Vale Verde	0,01	0,09	0,45	0,13	0,95	0,02	0,47	1,11	79,19	39,6
PI Correnteza	0,06	0,01	0,02	0,04	2,29	0,02	0,11	2,36	183,63	91,81
PI São Francisco	0,12	0,01	0,13	0,07	2,47	0,14	0,27	2,69	163,11	81,55
PI Átila Lins	0,39	0,04	2,91	2,87	3,17	0,11	3,34	6,16	59,32	29,66
PI Lago do Limão	0,09	0,04	0,03	0,02	1,99	0,03	0,13	2,06	175,46	87,73
PI Biribiri	0,12	0,01	0,07	0,03	2,57	0,03	0,21	2,64	169,81	84,91
Mínimo	0,54	0,33	0,39	0,03	1,19	0,05	1,27	1,27	0,09	0,05
Máximo	1,74	0,96	0,79	0,18	2,2	0,81	3,49	2,81	47,38	23,69
Mediana	1,25	0,72	0,64	0,05	1,53	0,45	2,58	2,16	15,79	7,9

Ca²⁺: cálcio, Mg²⁺: magnésio, Na⁺ + K⁺: sódio e potássio; Cl⁻: cloro, NO₃⁻: nitrato; SO₄²⁻: sulfato. Os valores mínimos, máximo e mediana foram apenas das amostras que passaram no erro prático aceitável de balanço iônico de 10%.

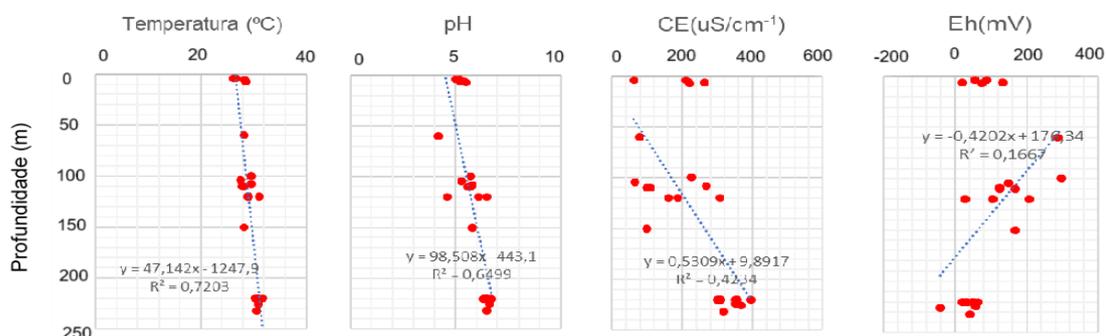


Figura 4. Gráficos de Temperatura, Condutividade Elétrica (CE), pH e potencial de oxidação/redução (Eh) em função da profundidade nos piezômetros e poços de águas subterrâneas da zona urbana do município de Manacapuru – AM.

O sódio apresentou valor mínimo de 1,37 mg/L no poço São Francisco, máximo de 8,05 mg/L no Idam I e mediana de 3,07 no poço Terra Preta III. Minerais ricos em sódio como a albita podem liberar o cátion por reações de hidrólise, gerando assim um novo produto como a caulinita, que está presente em análise de sedimentos dos poços na região de Manacapuru (Nascimento *et al.*, no prelo). As regiões norte, leste e oeste tiveram as maiores concentrações de sódio.

Os dados de potássio das profundidades menores (Figura 5, coluna da esquerda) tiveram concentrações abaixo de 2 mg/L, enquanto as profundidades maiores tiveram uma variação de 12,12 a 22,09 mg/L e apresentaram valores mínimo de 12,19 mg/L no poço Idam II, máximo de 22,46 mg/L no Atila Lins e mediana de 8,77 mg/L no poço São José. As regiões norte e sul do município de Manacapuru apresentam as maiores concentrações. Embora o potássio seja um elemento abundante, raramente ocorre em altas concentrações em águas naturais porque os minerais alumino-silicáticos contendo potássio são estáveis e sofrem pouca dissolução. Os íons com concentrações de potássio podem ser lixiviados ou permanecer adsorvidos na superfície dos argilominerais onde estarão sujeitos aos processos de trocas catiônicas ou serem absorvidos pelas raízes das plantas (Sousa *et al.*, 2022).

Tabela 3. Dados referentes às análises de cátions, ânions, alcalinidade e sílica nos poços e piezômetros da zona urbana do município de Manacapuru. Todas as análises foram feitas em mg/L.

Poços	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CaCO ₃	Si
Terra Preta II	25,24	9,22	3,35	19,21	2,13	2,29	21,65	104,50	8,45
Terra Preta III	24,39	9,13	3,07	19,63	1,89	1,67	19,87	105,00	8,95
PT São José	25,34	8,77	2,84	18,27	2,58	1,39	25,86	134,00	8,22
Novo Manacá	25,75	9,87	2,88	20,01	1,49	4,26	33,31	93,50	8,42
Palinha	29,66	10,04	3,85	18,87	2,19	3,18	38,56	105,50	5,84
União I	23,17	8,04	3,41	16,41	1,85	6,72	29,21	85,00	3,53
São Francisco	10,88	4,05	1,37	12,97	1,22	2,71	2,31	72,50	11,94
Idam I	14,24	5,65	8,05	16,96	6,37	16,52	2,51	88,00	6,39
Idam II	16,03	5,55	2,21	12,19	1,84	1,94	17,81	78,50	7,00
VMP (mg/L)	**	**	200	**	250	44	250	**	**
Mínimo	10,88	4,05	1,37	12,19	1,22	1,39	2,31	72,50	3,53
Máximo	29,66	10,04	8,05	20,01	6,37	16,52	38,56	134,00	11,94
Mediana	24,39	8,77	3,07	18,27	1,89	2,71	21,65	93,50	8,22

Ca²⁺: cálcio, Mg²⁺: magnésio, Na⁺: sódio, K⁺: potássio; Cl⁻: cloro, NO₃⁻: nitrato; SO₄²⁻: sulfato, CaCO₃: carbonatos, Si: sílica, VMP: valores máximos permitidos pela portaria do MS/ 888/21. ** não estão incluídos na portaria.

As distribuições das concentrações dos principais ânions (Cl⁻; NO₃⁻; SO₄²⁻) dos poços com profundidade até 120 metros, podem ser observados na figura 6, coluna da esquerda. Em relação ao cloreto (Cl⁻), todas as amostras ficaram dentro dos valores máximos permitidos de 250 mg/L para potabilidade de acordo com a Portaria do Ministério da Saúde (MS) 888/21 e apresentaram valores mínimo de 1,22, máximo de 6,37 e mediana de 1,89. A região leste apresentou a maior concentração de cloreto.

O nitrato (NO₃⁻) aparece em baixas concentrações nos poços de até 120 metros (Tabela 2). A portaria MS 888/21 estabelece o valor máximo permitido (VMP) para potabilidade de nitrato para consumo humano 45 mg/L, como nitrato (NO₃⁻). Já como valor de prevenção, a CETESB indica a concentração de 5 mg/L como nitrato. O menor valor encontrado nessa região foi 1,39 mg/L no poço São José, e o máximo foi de 16,52 mg/L no Idam I, e a mediana de 2,71 mg/L no poço São Francisco sendo a região central com as maiores concentrações. As concentrações de sulfato (SO₄²⁻) nas águas subterrâneas de Manacapuru são consideradas baixas apresentando valores mínimo de 2,31 mg/L no poço São Francisco, máximo de 38,56 mg/L no Palinha e mediana de 21,65 mg/L no poço Terra Preta II. Assim, todos os poços apresentaram valores abaixo do VMP, de 250 mg/L. A região norte e leste apresentaram as maiores concentrações, nos poços Atila Lins (com 41,93 mg/L) e Morada do Sol I (38,59 mg/L), com profundidade entre 150 a 232 metros. Origens possíveis para este íon são a oxidação da pirita e dissolução de rochas evaporíticas formadas por anidrita e gipsita. Para que esse íon seja dominante nas zonas centrais das bacias sedimentares, onde o fluxo é mais lento, é necessário que a água subterrânea percorra distâncias de dezenas de quilômetros em sistema de fluxo regional (Sousa *et al.*, 2022).

Pita *et al.* (2018) indicaram que a predominância do bicarbonato e os consequentes valores mais altos de HCO₃⁻ se devem à atuação dos processos de recarga, com a dissolução de CO₂ do solo, que ocorre nos horizontes mais rasos do aquífero, podendo indicar a presença de águas originadas na recarga recente. As razões entre os bicarbonatos e cálcio nos poços profundos de Manacapuru foram de 2,5 para 1. Já Pita *et al.* (2018) chegaram a uma relação com variação entre 1,5 e 1 para 1, sugerindo que a dissolução de carbonatos teria importância secundária

no aquífero na região de Manacapuru. A dissolução desses carbonatos é influenciada pela temperatura, o que favorece a solubilidade do CO_2 (Freeze; Cherry, 1979). O pH também exerce uma influência na dissolução do ácido carbônico. Em aquíferos com pH menores que 6,5 prevalece a espécie de ácido carbônico na espécie de (H_2CO_3) que forma pequenas quantidade quando o dióxido de carbono se dissolve na água, em intervalos entre 6,5 a 10 ocorre preferencialmente os bicarbonatos (HCO_3^-), e por fim na faixa de pH acima de 10 pode ocorrer a espécie em forma de íons carbonatos (CO_3^{2-}) (Vieira, 2018). Na região de Manacapuru prevalece pH com concentrações entre 4,2 a 6,7 o que pode explicar a importância secundária na dissolução dos carbonatos nas águas do aquíferos dessa região.

Análises de sedimentos de amostras dos poços de Manacapuru indicaram que os principais minerais encontrados na região de Manacapuru foram: quartzo (SiO_2), Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_3(\text{OH})_4$), Gipsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), Goethita ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$), minerais em menores abundância como o Rutilo (TiO), Microclínio ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$) e Nontronita ($\text{Ca}_{0,5} + \text{Na}_{0,5})_{0,3} \text{Fe}^{3+2}(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) também foram encontrados (Nascimento, no prelo). Em minerais de rochas/sedimentos pouco reativos pode ocorrer hidrólise parcial ou total dos aluminossilicatos, gerando assim caulinita e possivelmente a gipsita (Bertolo, 2007).

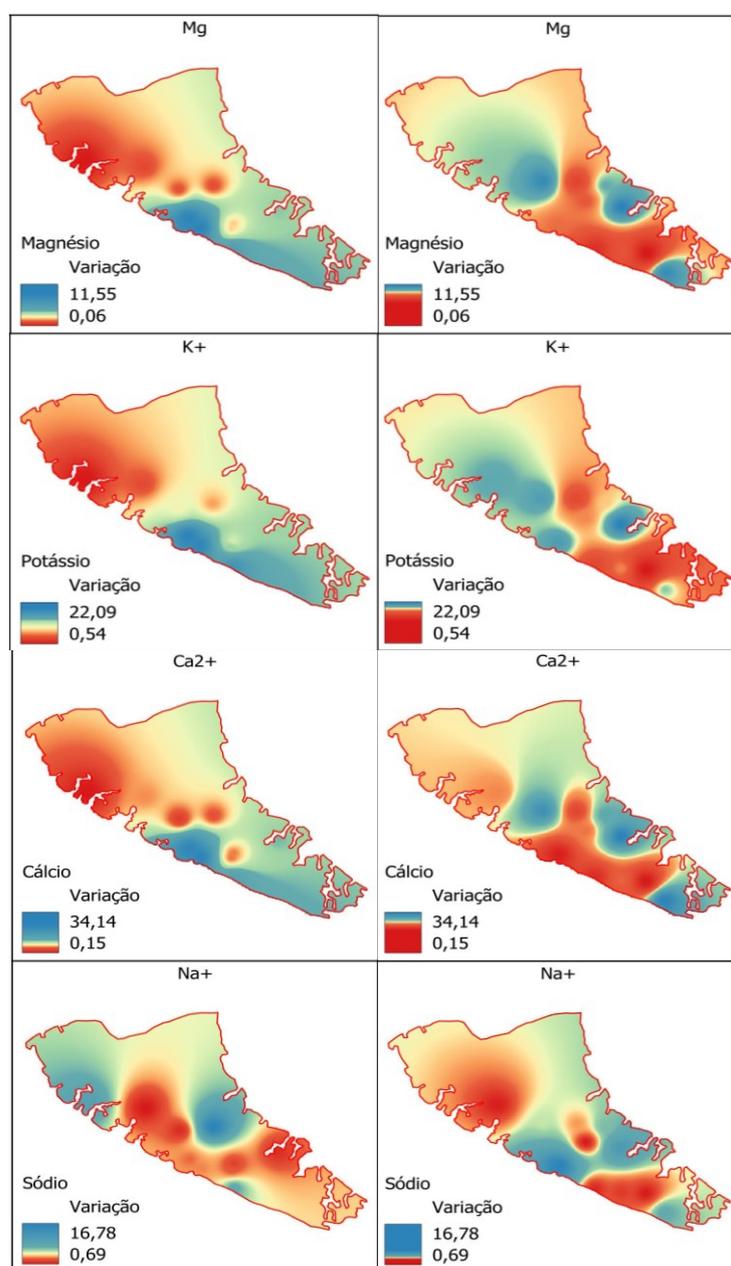


Figura 5. Mapa de concentração dos principais cátions (Ca^+ ; Mg^{2+} ; Na^+ ; K^+) nos poços com profundidade até 120 metros na esquerda e nos poços de 150 a 232 m na direita, na área urbana de Manacapuru – AM.

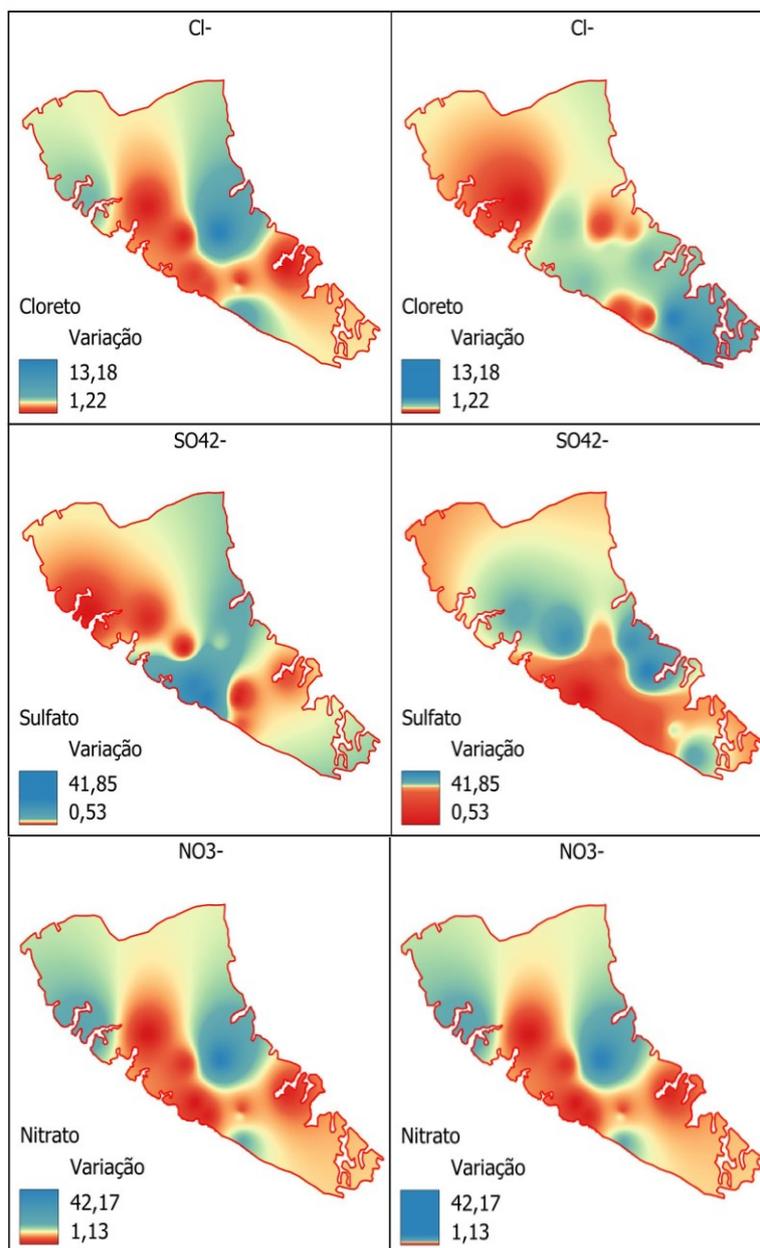


Figura 6. Mapa de concentração dos principais ânions (Cl⁻; NO₃⁻; SO₄²⁻) nos poços com profundidade de 120 metros e nos poços de 150 a 232 metros, na área urbana de Manacapuru - AM.

Para a visualização da distribuição dos tipos de águas subterrâneas na área urbana de Manacapuru, foi elaborado um mapa com diagramas de Stiff (Figura 8). Para a construção desse diagrama foram utilizados os íons Na⁺, K⁺, Cl⁻, Ca²⁺, CO₃²⁻, HCO₃⁻, Mg²⁺ e SO₄²⁻. O cálcio (Ca⁺) foi o cátion predominante em sete das nove amostras, sendo elas; Terra Preta II, PT Terra Preta, São José, Novo Manacá, Palinha, União I e Idam II. Nas amostras dos poços São Francisco e Idam I os cátions predominantes foram o sódio e potássio (Na + K), apresentando características químicas homogêneas.

A presença do cálcio em concentrações significativas nas águas depende da mineralogia dos aquíferos. Nas análises de sedimentos realizadas na região foram encontrados minerais como a gipsita, que pode liberar cálcio nas águas subterrâneas pelo processo de dissolução (Nascimento *et al.*, no prelo). Outros aspectos que podem influenciar a concentração de cálcio nas águas estão relacionados às profundidades dos poços. Os poços dessa região com as maiores concentrações de cálcio ultrapassaram os 150 m. Pita *et al.* (2018) sugerem que nestas profundidades (200 m), a água do Aquífero Alter do Chão tem circulação mais lenta, e com isso possui maior mineralização, o que corrobora com os dados de águas analisados nessa região. Os autores relatam que não encontraram influência química da formação Nova Olinda, sotoposta à Alter do Chão.

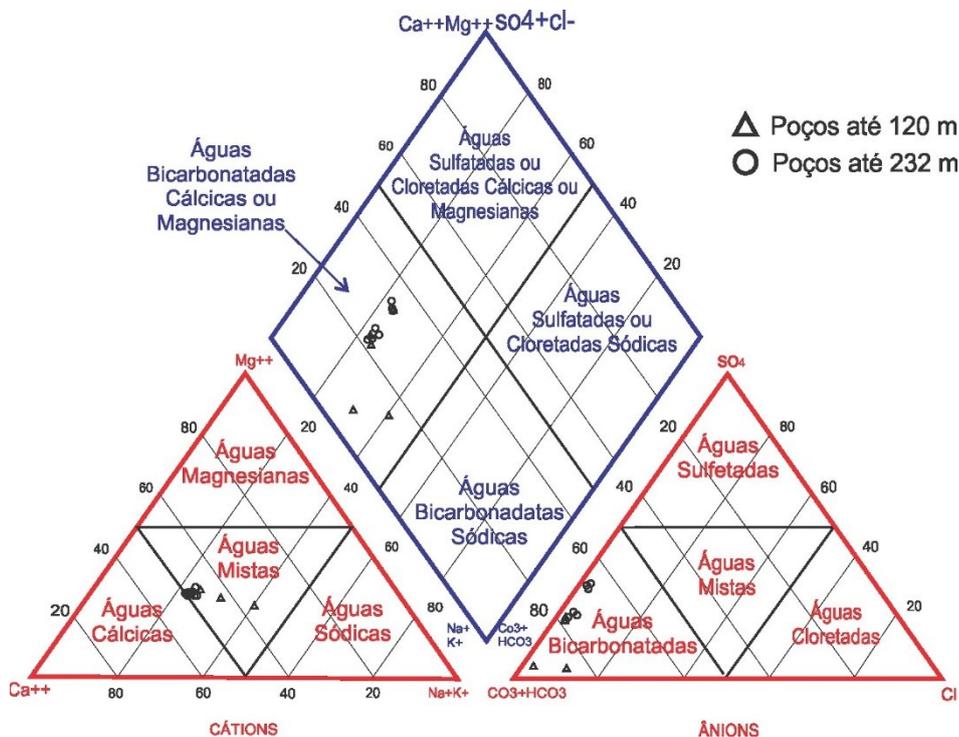


Figura 7. Diagrama de Piper para a classificação das águas subterrâneas de acordo com as profundidades dos poços de 60 a 120 metros e de 150 a 232 metros na zona urbana do município de Manacapuru.

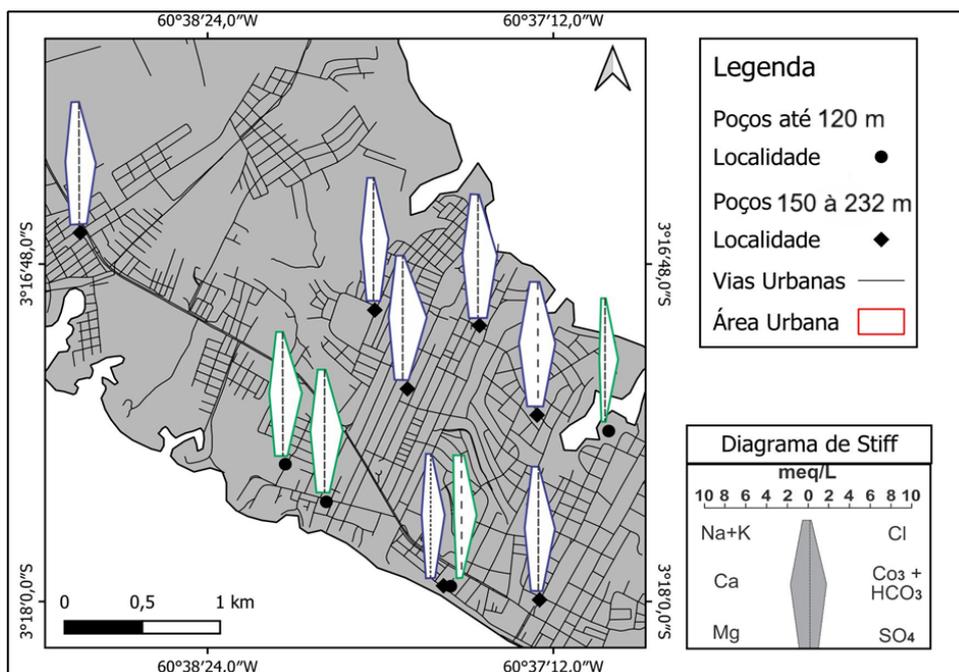


Figura 8. Diagrama de Stiff em relação a profundidade dos poços entre 100 a 120 metros que são: Terra Preta II, Terra Preta III, São Francisco e Idam I e de 150 a 232 metros que são: São José, Novo Manacá, Palinha, União I e Idam II na zona urbana do município de Manacapuru – AM.

CONCLUSÃO

Os dados obtidos nas análises de águas dos poços profundos, de 150 a 232 m, do Aquífero Alter do Chão em Manacapuru, foram os que apresentaram maiores concentrações tanto de cátions como de ânions, quando comparados com os poços de até 120 m de profundidade. Em termos hidroquímicos e hidrogeológicos podem, estão relacionados à circulação mais profunda de água e, portanto, de água mais antiga. Com isso, há mais tempo para a atuação das reações químicas, contribuindo para a maior dissolução dos minerais. As amostras são classificadas como bicarbonatadas cálcicas.

O cálcio, potássio e o sulfato foram os íons que apresentaram maiores concentrações com o aumento das profundidades dos poços, novamente indicando que a circulação mais longa e o maior tempo de residência da água favorecem o aumento de suas concentrações. As regiões com as maiores concentrações desses íons foram nas porções norte, leste e sul. No grupo dos ânions, os bicarbonatos foram predominantes nas análises de água dos poços mais rasos, o que provavelmente é causado pela dissolução de CO₂ do solo e nos horizontes mais rasos do aquífero durante o processo de recarga, indicando a presença de águas recentes nesta porção do aquífero.

Pelos mapas de concentrações apresentados neste trabalho é possível direcionar estudos futuros que visem determinar potenciais áreas com contaminações da água subterrânea por nitrato. Foram encontradas concentrações acima do valor de prevenção da CETESB (5 mg/L) nos poços União I, com 6,72 mg/L, e Idam I, com 16,52 mg/L. É necessário investigar qual é a origem do nitrato nestes pontos, já que a ausência de sistema de coleta e tratamento de efluentes líquidos no município faz com a fonte mais provável seja fossas sépticas. Também é importante que seja feito o monitoramento e acompanhamento contínuo da qualidade das águas destes pontos, com análise bacteriológica, para que eventuais aumentos de concentração de nitrato sejam identificados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o fundamental apoio da Empresa de Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Manacapuru, pelo suporte e disponibilização de recursos para a coleta de dados. Também agradecem pelo fundamental apoio das técnicas do Laboratório de Geoquímica da UFAM, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pela bolsa de mestrado concedida à primeira autora deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO. *Atlas águas e segurança hídrica do abastecimento urbano*. Brasília, 2021.

APHA. *American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation*. Washington DC, 1999.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. *Hidrología subterránea*. Barcelona: Omega, 1983.

FERNANDES NETO, L. A.; WAHNFRIED, I. Hydrochemistry and Contamination in Sedimentary and Fractured-Rock Aquifers of The Upper Rio Negro Basin – Amazonas/Brazil *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 47, 2024. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2024_47_57965

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. *Manual de fluoretação da água para consumo humano*. Brasília: Funasa, 2012.

IBGE. *População estimada*: Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente com data de referência 1 de julho de 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. <https://doi.org/10.71256/19847203.8.1.113.2008>

MATHEUS, J. G. M. *Análise de contaminações em águas subterrâneas nas regiões de Manaus e Humaitá/AM*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia)- Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017. <https://doi.org/10.24873/j.rpemd.2020.01.691>

NASCIMENTO, W. B.; SILVA, J. H. R.; WAHNFRIED, I. D.; ANICETO, K.; CAMPOS, M. C. C. Mineralogia e geoquímica de sedimentos e solos no perímetro urbano de Manacapuru – Amazonas. *Revista Geociências USP – Série Científica*. No prelo.

PACHECO, P. R. C. et al. *Avaliação da qualidade de água do sistema de aproveitamento de água da chuva instalado no Campus de Belém da Universidade Federal do Pará*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017. <https://doi.org/10.14393/19834071.2013.17846>

PITA, R. C.; SILVA JÚNIOR, G. C.; DO ROSÁRIO, F. F., & DA SILVA, M. L. Sistema aquífero Alter do Chão a oeste da cidade de Manaus (AM): processos hidrogeoquímicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. *Geologia USP, Série Científica*, v. 18, n. 1, p. 273-296, 2018. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-134253>

RIBEIRO, A. O. *Análise de contaminações geogênicas em águas subterrâneas na região de Novo Airão - AM*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado)-Departamento de Geociências, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019. <https://doi.org/10.21170/geonorte.2024.v.15.n.48.99.124>

RIBEIRO, A.; WAHNFRIED, I.; NETO FERNANDES, L. A. Levantamento de contaminações geogênicas e antrópicas em águas subterrâneas na cidade de novo airão. *Revista Geonorte*, v. 15, n. 48, 2024.

<https://doi.org/10.21170/geonorte.2024.v.15.n.48.99.124>

SOUZA, E. L. D.; GALVÃO, P. H. F.; PINHEIRO, C. D. S. D. S.; BAESSA, M. P. M.; DEMÉTRIO, J. G. A.; BRITO, W. R. R. Síntese da hidrogeologia nas bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões: Sistemas Aquíferos Içá-Solimões e Alter do Chão.

Geologia USP. Série Científica, v. 13, n. 1, p. 107-117, 2013. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.5327/Z1519-874X2013000100007>

STRADIOTO, M. R.; TERAMOTO, E. H.; CHANG, H. K. Nitrato em águas subterrâneas do estado de São Paulo. *Revista do Instituto Geológico*, v. 40, n. 3, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.33958/revig.v40i3.672>

VIEIRA, L. C. M. *Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG*. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização)-Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2018.

<https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i04.13788>

WINKEL, L. *et al.* Hydrogeological survey assessing arsenic and other groundwater contaminants in the lowlands of Sumatra, Indonesia. *Applied Geochemistry*, v. 23, n. 11, p. 3019-3028, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.06.021>

ZENARO, R. *Contribuição ao estudo da migração de urânio e alguns elementos traço em solução na mina de urânio de Poços de Caldas*. 1989. 52 p. Dissertação (Mestrado)- PUC, Rio de Janeiro, 1989. <https://doi.org/10.47749/t/unicamp.2017.991519>