

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE GEOCIÊNCIAS - PPGGEO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS

LUDIMILA SOUZA OLIVEIRA

HIDROQUÍMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA ZONA URBANA DE  
MANACAPURU, AMAZONAS, BRASIL

MANAUS  
2024

LUDIMILA SOUZA OLIVEIRA

HIDROQUÍMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA ZONA URBANA DE  
MANACAPURU, AMAZONAS, BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geociências.

Orientador: Prof. Dr. Ingo Daniel Wahnfried

MANAUS  
2024

#### Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

---

O48h Oliveira, Ludimila Souza  
Hidroquímica da água subterrânea na zona urbana de  
Manacapuru, Amazonas, Brasil / Ludimila Souza Oliveira. - 2024.  
84 f. : il., p&b. ; 31 cm.

Orientador(a): Ingo Daniel Wahnfried.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas,  
Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, 2024.

1. Hidroquímica. 2. Água Subterrânea. 3. Qualidade da água. 4.  
Hidrogeologia. I. Wahnfried, Ingo Daniel. II. Universidade Federal  
do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Geociências. III.  
Título

---

LUDIMILA SOUZA OLIVEIRA

## HIDROQUÍMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA ZONA URBANA DE MANACAPURU, AMAZONAS, BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geociências.

Aprovado em: 30 de dezembro de 2024.

### BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 INGO DANIEL WAHNFRIED  
Data: 19/03/2025 09:03:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ingo Daniel Wahnfried, Presidente.  
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO

Documento assinado digitalmente  
 ALDERLENE PIMENTEL DE BRITO  
Data: 18/03/2025 17:01:10-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Alderlene Pimentel de Brito, Membro.  
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO

Documento assinado digitalmente  
 KEILA CRISTINA PEREIRA ANICETO  
Data: 18/03/2025 21:31:58-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Keila Cristina Pereira Aniceto, Membro.  
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer à minha mãe, Maria Gracilene Franco de Souza por compreender minha jornada acadêmica e profissional e por me apoiar incondicionalmente em todas as minhas escolhas de vida. Por me ensinar o caminho certo e me proporcionar uma vida digna, serei eternamente agradecida.

Ao meu companheiro de vida Marcelo, que sempre me apoiou nas minhas escolhas e me ajudou nos momentos mais difíceis e cansativos, à minha florzinha Maitê que contribuiu com momentos leves para suportar os caminhos e momentos difíceis trilhados na Pós-Graduação.

Deixo meus sinceros agradecimentos aos meus companheiros de Pós-graduação, Willian Barros, Angélica Cristina e Albert Reis por todo o suporte e ajuda durante esse período. A técnica do Laboratório de Geoquímica Ana Ruth por toda ajuda nas análises de águas.

Às instituições que foram fundamentais para obtenção destes resultados – SAAE-Manacapuru, FAPEAM e UFAM – os meus sinceros agradecimentos.

Por fim, externo minha gratidão ao meu orientador Prof. Dr. Ingo Wahnfried, que teve toda paciência para me direcionar conhecimentos que, antes não compreendia. Sua orientação e por sua prestatividade e apoio nas coletas de águas que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Obrigado por toda confiança, pela disponibilidade em explicar os assuntos durante os contratemplos e incertezas que enfrentamos durante ao longo processo da pesquisa.

## RESUMO

As águas subterrâneas desempenham um papel de grande importância para o potencial de recursos hídricos no Brasil e no mundo e, no Estado do Amazonas, se fazem necessários estudos sobre a crescente ameaça de contaminação das águas subterrâneas. Diante desse cenário este estudo tem como objetivo geral caracterizar a hidroquímica das águas subterrâneas do município de Manacapuru – AM, apresentar a distribuição espacial das variáveis físicas e químicas da água, verificar a existência de contaminantes geogênicos ou antrópicos e buscar relacionar as características litológicas com a hidroquímica. Para atingir esses objetivos, foram realizadas duas coletas de amostras de água em períodos distintos. A primeira foi executada em novembro de 2021, com coletas feitas em poços tubulares profundos, totalizando 23 poços da empresa de Serviço de Abastecimento de Água e Esgoto - SAAE do município de Manacapuru. A segunda coleta foi realizada em cinco piezômetros rasos, em junho de 2022. Em ambas foram medidos, *in-situ*, os parâmetros pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, salinidade e temperatura. A alcalinidade foi determinada por titulação. Análises de cátions, ânions foram realizadas pela cromatografia de íons, no laboratório de Geoquímica da Universidade Federal do Amazonas. As águas da região são bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, com alta concentração de carbonato e bicarbonato, principalmente nos poços de grande profundidade. As concentrações dos parâmetros em profundidades superiores a 200 metros apresentam hidroquímica diferentes das águas de região mais rasa, sendo as profundas caracterizadas por maior mineralização, contendo maiores concentrações de íons como cálcio (34,34 mg/L) e bicarbonatos (134,00 mg/L), devido o maior tempo de residência nos aquíferos, enquanto as águas rasas apresentam menores concentrações de íons, sendo águas de rápida circulação. As características dessas águas em diferentes profundidades podem ser influenciadas pela formação geológica e litológica, ressaltando que não foram encontrados presença de contaminantes nas águas subterrâneas de Manacapuru.

**Palavras Chaves:** Hidroquímica; Água Subterrânea; Qualidade da água; Hidrogeologia.

## ABSTRACT

Groundwater plays a very important role in the potential of water resources in Brazil and in the world and, in the State of Amazonas, studies are needed on the growing threat of groundwater contamination. In view of this scenario, this study aims to characterize the hydrochemistry of groundwater in the municipality of Manacapuru – AM, to present the spatial distribution of the physical and chemical variables of the water, to verify the existence of geogenic or anthropogenic contaminants and to seek to relate the lithological characteristics with the hydrochemistry. To achieve these objectives, two water samples were collected at different times. The first was carried out in November 2021, with collections made in deep tubular wells, totaling twenty wells of the Water Supply and Sewage Service company - SAAE in the municipality of Manacapuru. The second collection was carried out in five shallow piezometers in June 2022. In both cases, the following parameters were measured in-situ: pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, salinity and temperature. Alkalinity was determined by titration. Analyses of cations, anions and silica were carried out at the Geochemistry Laboratory of the Federal University of Amazonas. The waters of the region are calcium or magnesian bicarbonate, with a high concentration of carbonate and bicarbonate, especially in the deep wells. The concentrations of the parameters at depths greater than 200 meters present different hydrochemistry from the shallower region waters, with the deep waters characterized by greater mineralization, containing higher concentrations of ions such as calcium and bicarbonates, due to the longer residence time in the aquifers, while the shallow waters have lower concentrations of ions, being waters of rapid circulation. The characteristics of these waters at different depths can be influenced by geological and lithological formation, highlighting that no contaminants were found in the groundwater of Manacapuru.

**Key words:** Hydrochemistry; Groundwater; Water Quality; Hydrogeology.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> Mapa de localização e dos pontos de coleta de água na área urbana do município de Manacapuru. Fonte: autoria própria. ....	16
<b>Figura 2:</b> Funcionamento dos diferentes tipos de aquífero. Fonte: (ANA, 2022.....	20
<b>Figura 3:</b> Mapa geológico de localização da bacia do Amazonas. Fonte: Gonçalves et. al (2017). ....	27
<b>Figura 4:</b> Localização das formações Solimões, Alter do Chão e Iça, nas bacias sedimentares do Solimões e Amazonas. Fonte: SOUZA et al., (2013). ....	28
<b>Figura 5:</b> Representação das unidades geológicas e dos principais aquíferos favoráveis a exploração dos recursos hídricos na Amazônia. Fonte: WAHNFRIED & SOARES, 2012). ....	31
<b>Figura 6:</b> Processo de Limpeza dos tubos (a) e materiais utilizados e (b) para confecção dos piezômetros. ....	35
<b>Figura 7:</b> Confecção e instalação dos piezômetros. (a) processo de ranhuras e revestimento com filtro, (b) serra utilizada no processo de ranhuras e (c) piezômetros instalados. ....	36
<b>Figura 8:</b> Funcionamento de limpeza dos piezômetros para coleta de água. ....	37
<b>Figura 9:</b> Procedimentos para coleta de água dos poços profundos no município de Manacapuru – AM. ....	38
<b>Figura 10:</b> Uso da sonda multiparamétrica para as análises dos parâmetros in situ. ....	39
<b>Figura 11:</b> Procedimento utilizado para determinação da alcalinidade. ....	41

<b>Figura 12:</b> Procedimento para preparação das amostras no laboratório, (a) amostras preparadas, (b) medição da água deionizada e (c) amostras que foram analisadas. .....	43
<b>Figura 13:</b> Gráfico da curva padrão para as análises de sílica (SiO <sub>2</sub> ). .....	44
<b>Figura 14:</b> Gráfico de dispersão pH x Eh indicando a correlação entre com profundidade dos poços (vermelho) e piezômetros (azul).....	74
<b>Figura 15:</b> Gráficos de correlação entre os principais íons cátions e sílica e a profundidade para a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas da área urbana de Manacapuru - AM.....	75
<b>Figura 16:</b> Gráficos de correlação entre os principais íons ânions e a profundidade dos poços para a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas da área urbana de Manacapuru - AM.....	76

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Dados de abastecimento de águas subterrâneas e sistemas misto dos municípios da região norte e sua proporção para cada estado.....	30
---	----

## LISTA DE QUADROS

**Quadro 1:** Coordenadas e profundidades dos poços e piezômetros usados para coleta de amostras na zona urbana de Manacapuru.

**Quadro 2:** Localização dos Poços, Piezômetros e sua utilização no município de Manacapuru.

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
2. OBJETIVOS .....	15
<b>2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>15</b>
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO .....	16
<b>3.1. Localização e Acesso .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2. Geomorfologia.....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 Clima.....</b>	<b>18</b>
4. REVISÃO DA LITERATURA .....	19
<b>4.1. Aquíferos.....</b>	<b>19</b>
<b>4.2 Hidroquímica das águas subterrâneas.....</b>	<b>21</b>
4.2.1 Cloreto (Cl <sup>-</sup> ) .....	22
4.2.2 Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) .....	22
4.2.3 Bicarbonato e Carbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> e CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ) .....	23
4.2.4 Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	23
4.2.5 Sódio (Na) .....	23
4.2.6 Potássio (K).....	24

4.2.7 Cálcio (Ca <sup>+</sup> ) .....	24
4.2.8 Magnésio (Mg <sup>2+</sup> ).....	24
<b>4.3 Parâmetros Físico-Químicos.....</b>	<b>24</b>
4.3.1 Potencial Hidrogeniônico (pH).....	25
4.3.2 Temperatura (°C) .....	25
4.3.3 Oxigênio Dissolvido (mg/ L).....	25
4.3.4 Condutividade Elétrica (µS/cm <sup>-1</sup> ).....	26
4.3.5 Potencial de Oxidação - redução (mV).....	26
4.3.6 Alcalinidade (Mg (CaCO <sub>3</sub> ) /L) .....	26
<b>4.4 Contexto Geológico .....</b>	<b>27</b>
4.4.1. Águas Subterrâneas na Amazônia.....	29
<b>5. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1. Seleção de poços para amostragem .....</b>	<b>34</b>
<b>5.2. Localização dos Piezômetros e Materiais Utilizados e Construção dos Piezômetros .....</b>	<b>35</b>
5.2.1. Limpeza dos Piezômetros .....	37
<b>5.3. Coletas de amostras de água nos poços tubulares profundos e Piezômetros .....</b>	<b>37</b>
<b>5.7. ANÁLISES QUÍMICAS DA ÁGUA .....</b>	<b>40</b>
5.7.1. Alcalinidade.....	40

<b>5.8. Determinação da Sílica na Água .....</b>	<b>41</b>
<b>5.9. Avaliação dos resultados de análises químicas .....</b>	<b>45</b>
<b>5.10. Construção dos Mapas de Concentração dos Parâmetros Físicos Químicos .....</b>	<b>46</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>47</b>
<b>Localização dos poços de coleta para amostragem .....</b>	<b>50</b>
<b>Amostragem de água subterrânea .....</b>	<b>52</b>
<b>Análise dos cátions e ânions .....</b>	<b>54</b>
<b>Determinação da Alcalinidade e Sílica .....</b>	<b>55</b>
<b>Avaliação dos resultados: balanço iônico .....</b>	<b>57</b>
<b>Construção dos Mapas de Concentração .....</b>	<b>57</b>
<b>Parâmetros Físico-químicos .....</b>	<b>58</b>
<b>Balanço iônico .....</b>	<b>60</b>
<b>Hidroquímica .....</b>	<b>62</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>77</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas desempenham um papel de grande importância para o potencial de recursos hídricos no Brasil e no mundo. O crescimento da população, da produção industrial e agrícola aumentam a demanda por água potável, tornando cada vez mais necessários estudos sobre contaminação das águas subterrâneas (ANA, 2021). Além da contaminação antrópica, as águas subterrâneas podem sofrer processos naturais ou geogênicos que podem alterar a qualidade das águas e consequentemente afetar a saúde humana.

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, e 66% usam tanto estes quanto cursos superficiais de água (ANA, 2021). A boa qualidade intrínseca 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, em que a população tem dificuldade cada vez maior em acessar água de fontes superficiais.

A interação da água subterrânea com o meio geológico pode influenciar sua composição, definindo as características químicas que possui. Por conta disso, dependendo do contexto geológico as águas subterrâneas podem conter elementos potencialmente prejudiciais à saúde. Cercla (2017) destaca os principais elementos citados na lista *Priority List of Hazardous Substances* dos quais merecem destaque; o arsênio, mercúrio, chumbo, cádmio, bário, cobre, flúor, cromo e zinco como os poluentes inorgânicos mais estudado no mundo e os mais frequentes na água subterrânea.

No Brasil, para que a água possa ser utilizada para consumo humano, os solutos presentes em sua composição devem estar abaixo dos valores máximos permitidos (VMPs) definidos pela portaria de consolidação 888/2021 do Ministério da Saúde. Caso a contaminação da água tenha causas humanas, essa contaminação é denominada de contaminação antrópica. Se ela não tiver origem em ação humana, é considerada uma contaminação geogênica (FUNASA, 2012).

Na região amazônica, trabalhos como de Martins (2017), Fernandes (2018), Ribeiro (2019) e de Meyer et al. (2023) detectaram a presença de alumínio, ferro, manganês e arsênio em água subterrânea de poços tubulares no município de Novo Airão e ao longo do Rio Solimões. Há risco de que essas contaminações ocorram em áreas mais amplas, devido à existência das características descritas por Winkel et al. (2008). Elementos como o Al, Fe e Mn presentes em grande quantidade nas águas não representa risco a saúde humana, mas afetam suas características organolépticas. Essa alteração é caracterizada por provocar estímulos sensoriais que afetam a aceitação para consumo humano, mas que não necessariamente implicam risco à saúde. De acordo com a portaria 888/2021 do Ministério da saúde os valores máximos permitidos para esses elementos são: Al (0,2 mg/ L), Fe (0,3 mg/L) e Mn (0,1 mg/L).

Além disso, no município de Manacapuru, trabalhos como de Pita et al. (2018) e Frazão & Narvai (2017) buscaram caracterizar a hidrogeologia e hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Alter do Chão e identificaram a presença de concentrações de cloreto, nitrato e flúor em poços que abastecem o município. O flúor é um elemento de grande importância nos estudos de águas subterrâneas. esse elemento é essencialmente importante para processos biológicos. Ele é frequentemente encontrado no ambiente na forma de fluoretos, incorporando-se às águas do planeta através da lixiviação dos solos e minerais presentes na hidrosfera. Ele pode ser lançado à atmosfera através de erupções vulcânicas e tempestades de areia (ELLWOOD et al. 2011).

Dessa forma, a avaliação dos níveis dos íons e as possíveis contaminações, sejam elas antrópica ou geogênica, gera interesse particular, ao tentar determinar as possíveis causas desta presença, pois na maioria dos municípios das cidades brasileiras o abastecimento é realizado por meio da exploração de aquíferos freáticos. Verificar a correlação entre geoquímica e hidroquímica, observando em especial a ocorrência de contaminantes geogênicos na água subterrânea, torna-se extremamente relevante.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo principal caracterizar a hidroquímica das águas subterrâneas da zona urbana do município de Manacapuru – AM.

### **2.2 Objetivos Específicos**

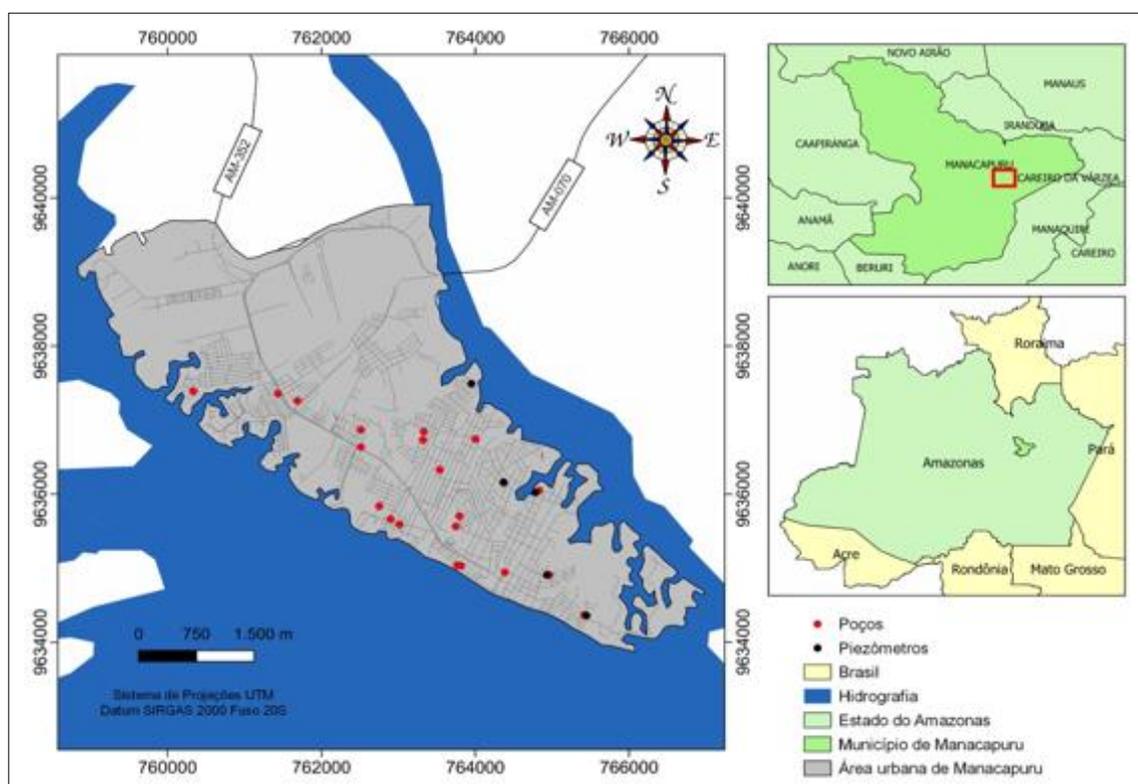
Os objetivos específicos do presente projeto são:

1. Apresentar a distribuição espacial das variáveis físicas e químicas da água subterrânea;
2. Definir a classificação química da água subterrânea;
3. Buscar correlacionar as características litológicas com a hidroquímica dos íons maiores.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO

#### 3.1. Localização e Acesso

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. No quadro 1 são apresentados os nomes e as profundidades dos poços e piezômetros distribuídos por toda zona urbana do município.



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

O município possui uma área territorial de 7.330 km<sup>2</sup>, com sede localizada na margem esquerda do rio Solimões na Latitude 3°17'39" Sul, Longitude 60°38'04" Oeste. Faz fronteira com os municípios Novo Airão e Iranduba a norte, Beruri a sul, Manaquiri e Careiro da Várzea a leste, Anamá e Caapiranga a oeste. O acesso ao

município, a partir de Manaus, pode ser feito pelas rodovias AM-070 (Manaus/Manacapuru) ou por via fluvial, através do Rio Solimões.

**Quadro 1:** Coordenadas e profundidades dos poços e piezômetros usados para coleta de amostras na zona urbana de Manacapuru.

Poços	Profundidade (m)	(Latitude)	(Longitude)	Utilização
Correnteza	220 m	3°18'18,2"S	60°36'41,5"W	abastecimento
Padres	220 m	3°17'59,6"S	60°37'14,9"W	abastecimento
Terra Preta I	220 m	3°17'36,3"S	60°38'03,0"W	Abastecimento
Terra Preta II	120 m	3°17'38,7"S	60°37'59,28"W	abastecimento
Terra Preta III	108 m	3°17'30,67"S	60°38'7,82"W	abastecimento
Morada do Sol I	224 m	3°16'57,2"S	60°38'15,6"W	Abastecimento
Morada do Sol II	104 m	3°17'4,70"S	60°38'15,58"W	abastecimento
Átila Lins	220 m	3°17'20,2"S	60°37'15,4"W	abastecimento
São José	220 m	3°17'14,6"S	60°37'42,4"W	Abastecimento
Novo Manacá	232 m	3°16'41,3"S	60°38'50,5"W	abastecimento
Palinha I	220 m	3°17'01,1"S	60°37'27,4"W	abastecimento
União I	220 m	3°16'57,8"S	60°37'49,2"W	Abastecimento
União II	120 m	3°17'1,49"S	60°37'49,52"W	abastecimento
São Francisco	120 m	3°17'23,6"S	60°37'00,5"W	Abastecimento
Lago Azul II	150 m	3°16'44,4"S	60°38'42,3"W	abastecimento
Biri Biri	226 m	3°18'00,7"S	60°36'56,2"W	Abastecimento
Figueirinha I	110 m	3°17'35,0"S	60°37'34,1"W	abastecimento
Figueirinha II	110 m	3°17'39,45"S	60°37'35,59"W	abastecimento
IDAM I	100 m	3°17'56,7"S	60°37'33,4"W	abastecimento
IDAM II	220 m	3°17'56,6"S	60°37'34,89"W	abastecimento
Vale Verde	60 m	3°16'40,3"S	60°39'26,2"W	abastecimento
PI* Correnteza	7 m	3°18'18,53"S	60°36'40,43"W	Pesquisa
PI São Francisco	4 m	3°17'24,48"S	60°37'2,11"W	Pesquisa
PI Atila Lins	6 m	3°17'19,93"S	60°37'15,56"W	Pesquisa
PI Lago do Limão	4 m	3°16'36,69"S	60°37'29,16"W	Pesquisa
PI Biribiri	6 m	3°18'0,67"S	60°36'57,21"W	Pesquisa

\*PI: Piezômetros construídos no âmbito da presente pesquisa.

### 3.2. Geomorfologia

A região apresenta duas unidades geomorfológicas: a primeira constituída por platôs dissecados, e a segunda composta pelas planícies fluviais. Os platôs dissecados formam superfícies tabulares e colinosas, separadas pela ruptura de vertentes em diferentes níveis topográficos, com cotas variando entre 50 a 100 metros acima do nível do mar. São áreas de terra firme, compostas por rochas sedimentares da Formação Alter do Chão, em geral, intemperizadas e lateritizadas (D'ANTONA et al., 2007). As planícies fluviais são formadas por terrenos aplanados, aptos ao acúmulo de sedimentos fluviais. Estas áreas são sazonalmente inundadas, e constituem planícies aluvionares ou várzeas. São característicos dessas planícies os diques marginais, os canais anastomosados, lagos, paranás, igarapés, igapós e ilhas (D'ANTONA et al., 2007). As áreas de várzeas são formadas pela deposição de sedimentos recentes transportados pelos rios, o que ocorre durante o período de enchentes.

### 3.3 Clima

O município de Manacapuru está inserido na zona climática pertencente ao grupo Am (Equatorial Quente e Úmido) segundo a classificação Köppen, com estação seca classificado como AW (A = Clima tropicais chuvosos e W = verão). As temperaturas médias anuais variam entre 22,0 a 31,7°C, e uma umidade relativa do ar variando em torno de 77 e 84% (OLIVEIRA, 2016).

O município possui elevado índice pluviométrico. Segundo dados da estação pluviométrica de Manacapuru, a média de precipitação anual é de 2.190 mm, com o período de maior intensidade ocorrendo de janeiro a maio, quando se têm o inverno regional, e o mínimo no verão amazônico, de julho a outubro. De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA, 2022) o mês mais chuvoso é janeiro e o de menor pluviosidade é julho.

## 4. REVISÃO DA LITERATURA

### 4.1. Aquíferos

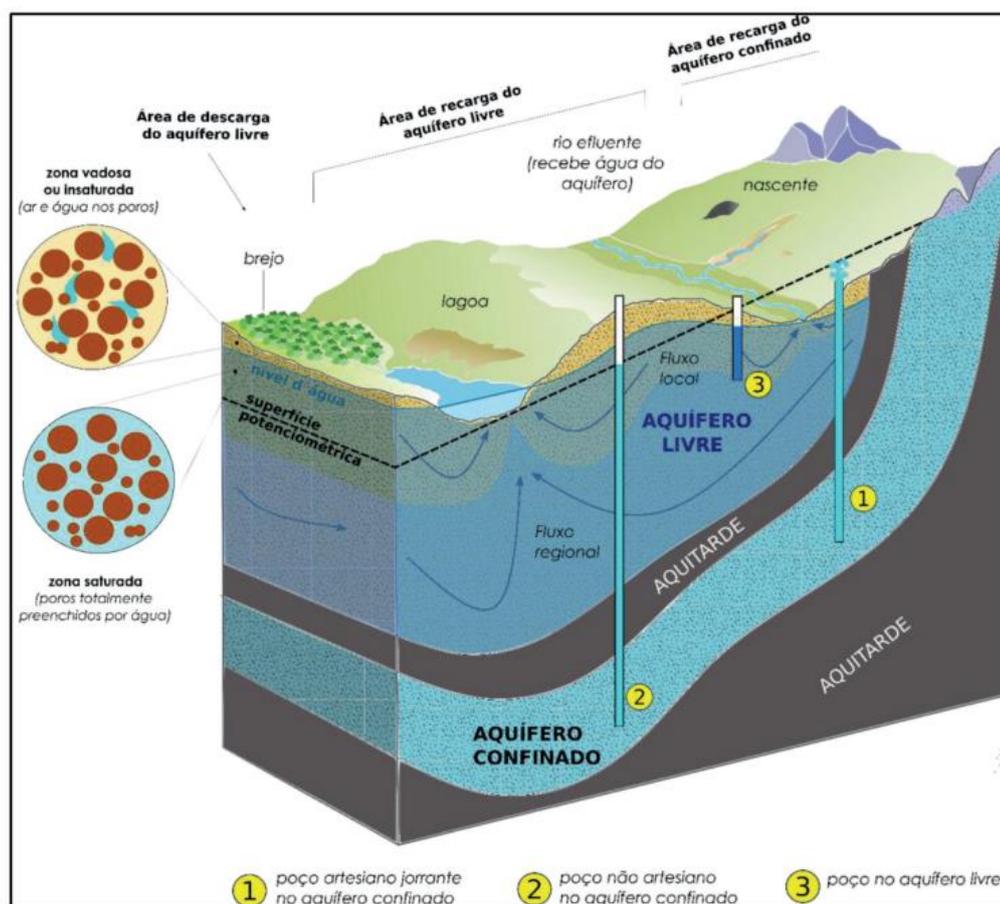
Segundo Freeze & Cherry (1979), o aquífero é o estrato ou formação geológica que permite armazenamento e circulação da água através de seus poros ou/e fissuras. Essa capacidade é própria de cada tipo litológico, e nem todas as formações geológicas, ou rochas em geral, têm a mesma facilidade de transmitir e fornecer água em quantidades economicamente aproveitáveis. De acordo com Silva (2018), os aquíferos mais comuns são constituídos de areias não consolidadas, cascalho, rochas sedimentares permeáveis como arenitos e calcários, e rochas ígneas e metamórficas fraturadas.

Estudos geológicos sobre os tipos de rocha distribuídos no território e suas características influenciam o fluxo das águas subterrâneas e auxiliam a reconhecer os principais aquíferos do país, ou seja, aqueles com maiores capacidades de armazenamento e transmissão de água. A relevância da rocha como aquífero é definida por meio de suas características físicas, com destaque para a porosidade, a permeabilidade e as condições de ocorrência como extensão, espessura e estrutura além da viabilidade técnica e econômica de captação. ANA (2022) apresenta os dados gerais dos aquíferos no Brasil. Segundo a compilação, os sistemas aquíferos sedimentares afloram em 53,8% do território nacional, os fraturados em 44,7% e os cársticos representam apenas 1,5% do total.

Os aquíferos podem ser classificados como livres, confinados e semiconfinados. São chamados aquíferos livres, ou freáticos, aqueles em que o nível de água está exposto à pressão atmosférica, sem camada impermeável sobreposta que impeça a chegada direta de água de recarga da superfície, portanto normalmente estando próximo a ela (Figura 2). Isso facilita a entrada de água de recarga, mas também os deixa mais expostos a contaminações que possam vir a partir da superfície. Já o aquífero confinado se encontra entre dois aquíferos ou aquícludes, ou seja, entre duas camadas de baixa permeabilidade, que impedem a passagem da água de recarga.

Por conta de necessidade de estarem sotopostos a uma camada confinante, eles costumam ocorrer em profundidade superior àquela dos aquíferos livres. Isso faz com que a recarga só ocorra em locais onde não há confinamento, ou seja onde a unidade geológica aflora ou está sotoposta a unidades permeáveis. Aquíferos confinados são inerentemente mais protegidos de contaminações antrópicas por conta destas características. A água contida em aquíferos confinados normalmente possui pressão superior à atmosférica e ocupa todos os poros ou vazios da formação geológica que o contém, saturando-o completamente (FREEZE & CHERRY, 1979; CUSTODIO & LLAMAS, 1983).

A situação intermediária entre um aquífero livre e um confinado é o semiconfinado, que está sotoposto a uma camada que permite a passagem de água de forma muito lenta a partir da superfície ou do estrato superior.



**Figura 2:** Funcionamento dos diferentes tipos de aquífero. Fonte: (ANA, 2022)

Existe uma diferença fundamental de velocidade de fluxo quando comparamos água subterrânea e superficial. Enquanto a água superficial pode se deslocar quilômetros em poucos dias, o fluxo subterrâneo avança por milímetros ou centímetros por dia. A movimentação das águas subterrâneas se dá pelo preenchimento dos espaços vazios que são conectados pelas rochas e do lento deslocamento na zona saturada. Essa diferença permite que as águas que infiltraram há centenas ou até dezenas de milhares de anos ainda estejam em movimento no ambiente subterrâneo (ANA, 2022).

#### 4.2 Hidroquímica das águas subterrâneas

A maioria das substâncias dissolvidas nas águas subterrâneas são encontradas em estado iônico. Elementos como a sílica ocorre principalmente em forma de partículas coloidais ( $\text{SiO}_4$ ). Os elementos químicos mais utilizados para caracterização hidroquímica são os cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  e os ânions  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  (MANASSES, 2009).

Os minerais de rocha que compõe o aquífero são determinantes para definição de suas características hidroquímica, principalmente os processos atuantes entre zona de recarga e descarga do aquífero. Muitos elementos ocorrem de maneira natural nas águas subterrâneas, principalmente pelos processos de intemperismo, no qual pode ocorrer a dissolução de minerais como os carbonatos e silicatos (MANASSES, 2009).

O silício não ocorre livre na natureza, mas sim como sílica livre ( $\text{SiO}_2$ ) na forma cristalina ou amorfa, o principal componente de areia e arenito. O silício é encontrado geralmente como sílica ( $\text{SiO}_2$ ) quando rochas, sedimentos, solos e água são analisados. A maior parte da sílica dissolvida observada na água natural resulta originalmente da quebra química de minerais de silicato em processos de intemperismo. Esses processos são irreversíveis, e a sílica retida em solução provavelmente é controlada por fatores cinéticos (HEM, 1989). No processo de dissolução, adsorção em minerais ou outras superfícies, ou por precipitação de uma espécie mineral secundária, como uma das formas menos organizadas de sílica.

A abundância média de sílica em diferentes tipos de rochas é de 7 a 80%. Nos solos variam de 50 a 80% e em águas superficiais e subterrâneas pode chegar a 14 mg/L. As formas aquosas comuns de sílica são  $H_4SiO_4$  e  $H_3SiO_4$ . Na presença de magnésio, pode formar incrustações depósitos em caldeiras e turbinas a vapor. É considerado um oligoelemento não essencial para a maioria das plantas, mas essencial para a maioria animais (HEM, 1989).

Em águas subterrâneas naturais, a maior parte das substâncias dissolvidas está no estado iônico. Alguns desses íons estão quase sempre presentes, e sua soma representa a quase totalidade dos íons dissolvidos em águas naturais (FILGUEIRAS, 2016). Estes são os íons fundamentais, e é sobre eles que repousará a maioria dos aspectos dos elementos químicos e hidroggeoquímicos que ocorrem na água subterrânea. Hem (1989) e Custodio e Llamas (1983) descrevem os principais cátions e ânions na água subterrânea, e todas as informações que seguem foram obtidas destes trabalhos de referência:

#### 4.2.1 Cloreto ( $Cl^-$ )

Os cloretos são sais considerados muito solúveis. Muito estável em solução e muito difícil de precipitar. Não oxida nem reduz em águas naturais. Em geral está associado ao íon  $Na^+$ , especialmente em águas muito salinas. Os cloretos estão presentes tanto em águas superficiais quanto em águas subterrâneas. Sua origem pode ser natural, principalmente pela decomposição da matéria orgânica, solos ricos em sais minerais e processos de mistura de doce com água salgada em áreas litorâneas.

#### 4.2.2 Sulfato ( $SO_4^{2-}$ )

O sulfato é um ânion muito comum na natureza, sendo introduzido nas águas subterrâneas pela dissolução de solos e rochas, como o gesso ( $CaSO_4$ ) e o sulfato de magnésio ( $MgSO_4$ ). De acordo com Vasconcelos e Oliveira (2016), parte da concentração de sulfato nas águas subterrâneas ocorre devido à origem geológica, resultado do intemperismo das rochas dos aquíferos por onde percolam estudos mostram que a maioria das águas subterrâneas que apresentam elevadas concentrações de sulfatos estão relacionadas principalmente com poluição antrópica, através de uso de fertilizantes, indústrias de mineração, pó de gesso, dentre outras.

Elevados níveis de sulfato nas águas de abastecimento público podem dar um gosto amargo ou adstringente à água, provocando rejeição por parte do consumidor, e podem provocar efeitos laxativos, causando muitas vezes diarreia e desidratação.

#### 4.2.3 Bicarbonato e Carbonato ( $\text{HCO}_3^-$ e $\text{CO}_3^{2-}$ )

Existe uma relação entre  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  dissolvido,  $\text{CO}_3^{2-}$  e pH. Esses íons conferem alcalinidade à água, dando capacidade de consumo de ácido ao criar uma solução tampão. Eles não são oxidáveis nem redutíveis em águas naturais e podem ser precipitados muito facilmente como  $\text{CaCO}_3$ . O íon bicarbonato varia entre 50 e 350 ppm em água doce, às vezes atingindo até 800 ppm. Em águas alcalinas com pH > 8,3 pode haver quantidades significativas.

#### 4.2.4 Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )

O nitrato é um íon altamente solúvel e, portanto, muito difícil de precipitar. Embora tenha tendência a ser estável, mesmo em meios redutores, pode passar para  $\text{N}_2$ , ou  $\text{NH}_4^+$  e excepcionalmente para  $\text{NO}_2^-$ . A maioria dos compostos nitrogenados tornam-se  $\text{NO}_3^-$  em um meio oxidante, embora o  $\text{NH}_4^+$  possa ser perdido em parte como  $\text{N}_2$ . O  $\text{NO}_3^-$  pode ser fixado no solo, por pequenos grupos de bactérias do gênero rhizobium, que são as bactérias fixadoras ou nitrificantes. Concentrações ultrapassando os 10 ppm de nitrato como nitrogênio ( $\text{N-NO}_3^-$ ) em água são consideradas impróprias para o consumo humano. Em águas poluídas pode chegar a 200 ppm e em alguns casos até 1000 ppm. A água do mar tem cerca de 1 ppm ou menos. Altas concentrações de nitrato em água potável pode causar cianose em bebês e crianças pequenas, e pode ser cancerígeno em adultos (Vernier, 2019).

#### 4.2.5 Sódio (Na)

As concentrações geralmente variam entre 1 e 150 ppm em água doce, mas não é incomum encontrar conteúdos muito maiores, até vários milhares de ppm. A água do mar tem cerca de 10.000 ppm, salmouras naturais podem ter 100.000 ppm, sendo um limite raramente ultrapassado 500 meq/1.110.000 ppm). Águas com altas concentrações de sódio são prejudiciais às plantas por reduzirem a permeabilidade do solo, especialmente se as concentrações de Ca e Mg forem baixas.

#### 4.2.6 Potássio (K)

O cátion potássio é caracterizado pela fraca atração de ânions e moléculas. A maioria de seus sais são solúveis em água. Facilmente afetado pela mudança de bases, havendo uma tendência de águas naturais terem menos K do que o Na, apesar da maior abundância de K em muitas rochas. As concentrações variam entre de 0,1 e 10 ppm em água doce. A água do mar tem cerca de 400 ppm. No corpo humano, grande parte do potássio está localizada nos músculos e no esqueleto, mas também no sistema nervoso central, intestinos, fígado, pulmões e pele. O potássio extracelular desempenha um papel fundamental na regulação do potencial da membrana celular e, portanto, na regulação das atividades nervosas e musculares (D'ELIA, 2024).

#### 4.2.7 Cálcio (Ca<sup>+</sup>)

A química do Ca está intimamente associada à dos íons  $\text{CO}_3\text{H}^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  em muitas águas naturais, podendo precipitar e dissolver facilmente alterando o pH ou a pressão parcial de  $\text{CO}_2$ . As concentrações podem chegar de 10 e 250 ppm em águas doces, a água do mar contém cerca de 400 ppm e pode chegar até 50.000 ppm em salmouras de  $\text{Cl}_2\text{Ca}$ . Para os seres humanos o cálcio é essencial para a mineralização de ossos e dentes e para a regulação de eventos intracelulares em diversos tecidos (BRASIL, 2009).

#### 4.2.8 Magnésio (Mg<sup>2+</sup>)

Com propriedades semelhantes às do íon cálcio, mas mais solúvel e um pouco mais difícil de precipitar. Entre 1 e 100 ppm em água doce, às vezes atingindo alguns milhares de ppm na água salgada ou salmoura. A água do mar contém 1.200 ppm. Tem propriedades laxativas e confere gosto amargo à água potável se houver algumas centenas de ppm. Contribui para a dureza da água, e valores elevados de pH podem gerar precipitação de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ .

### 4.3 Parâmetros Físico-Químicos

Os parâmetros físico-químicos das águas são de grande importância para analisar e reconhecer as condições e padrões de qualidade dos recursos hídricos, seja para potabilidade, desenvolvimento de espécies aquáticas (criação de peixes) ou estudos de pesquisas (UCKER et al., 2014). Existem parâmetros físicos – químicos

que devem ser feitas in situ, como oxigênio dissolvido, pH, alcalinidade. Isso se deve ao fato de a água entrar em contato com o ar, o que pode ocasionar oxidação. Já analitos como ânions e sílica têm suas concentrações mantidas com a refrigeração das amostras. A caracterização dos principais parâmetros físico-químicos está descrita abaixo.

#### 4.3.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

A medição do pH é um dos mais importantes e frequentes testes usados em química da água. Praticamente todas as fases de abastecimento de água e tratamento de águas residuais é dependente do pH. O pH é expresso em mols por litro e utilizada para quantificar a concentração do íon hidrogênio ( $H^+$ ) numa determinada solução, seguindo a notação:

$$pH = -\log [H^+] \quad \text{Eq. (1)}$$

Os valores de pH variam de 1 a 14. Quando o valor do pH for igual a 7, a solução é considerada neutra. Valores menores que 7 são classificados como ácidos e maiores que 7 são alcalinos. As águas naturais costumam ter valores de pH entre 4 a 9, e a maioria é um pouco básica devido à presença de bicarbonatos e carbonatos dos metais alcalinos e alcalino-terrosos (BAIRD *et al.*, 2017; TELES, 2010).

#### 4.3.2 Temperatura (°C)

As variações de temperatura ocorrem devido a diferentes fatores como estação do ano, período do dia, profundidade da água, latitude e altitude. O aumento da temperatura pode ocorrer de forma natural, a partir da radiação solar, ou de forma antropogênica (BARBOSA, 2015). A temperatura pode ser medida por diversos dispositivos, os mais utilizados são os termômetros e sensores (BAIRD *et al.*, 2017).

#### 4.3.3 Oxigênio Dissolvido (mg/ L)

Os níveis de oxigênio dissolvido (OD) em águas naturais e residuais dependem das atividades físicas, químicas e bioquímicas de um corpo d'água. As águas subterrâneas apresentam concentrações muito baixas, pois ocorre a depleção do oxigênio, visto que não existe contato com o ar na atmosfera e o  $O_2$  é consumido na decomposição de material biológico abundante. Sua medição pode auxiliar na

compreensão do comportamento das espécies presentes, por isso a concentração de oxigênio dissolvido em água subterrânea não pode e não deve ser usado como um indicador de poluição orgânica. Nem seria significativo na avaliação da usabilidade da água para fins comuns (GONCALVES et al., 2009). A determinação requer equipamento e cuidados especiais de amostragem e normalmente precisam ser concluídos imediatamente após a amostragem (HEM, 1985).

#### 4.3.4 Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ )

A condutividade elétrica é a medida da capacidade de uma solução aquosa de transportar uma corrente elétrica. Essa habilidade depende da presença de íons em sua concentração total, mobilidade e valência e na temperatura de medição. A maioria dos compostos inorgânicos são relativamente bons condutores, por outro lado, moléculas de compostos orgânicos que não se dissociam em solução aquosa conduzem mal corrente elétrica. A condutividade elétrica em água é induzida principalmente pela presença de sólidos dissolvidos, dos quais se destacam os compostos iônicos (BAIRD et al., 2017).

#### 4.3.5 Potencial de Oxidação - redução (mV)

O potencial de oxidação-redução fornece uma indicação das condições em que a água subterrânea se encontra no que diz respeito à capacidade do meio ser oxidante ou redutor. Junto com o pH, apresenta a habilidade de definir a distribuição das espécies químicas do meio, que normalmente é realizada através de diagramas de potencial de oxidação/redução (Eh) e pH (BARELLA, 2011).

#### 4.3.6 Alcalinidade (Mg ( $\text{CaCO}_3$ ) /L)

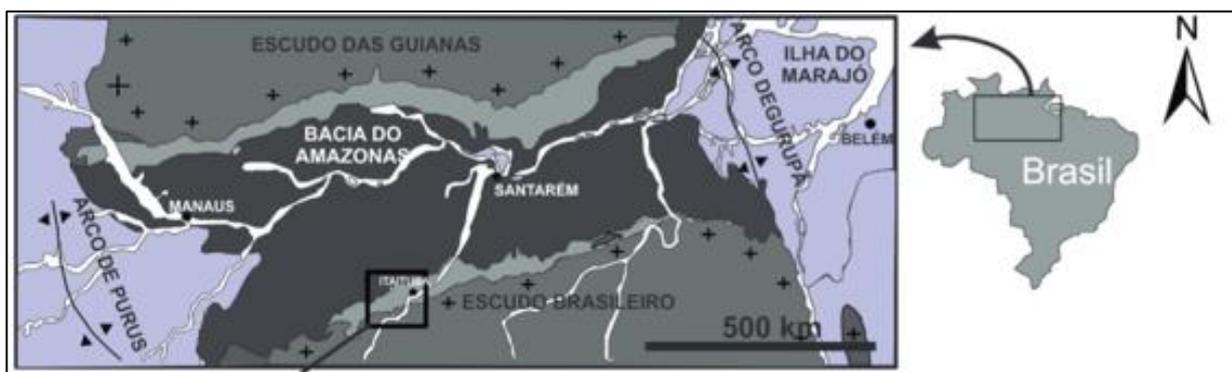
Segundo Baird et al., (2017), a alcalinidade é a capacidade da água de neutralização os ácidos, sendo a soma de todas as bases tituláveis. O valor medido pode variar significativamente como pH. Segundo os autores, ela uma propriedade agregada da água, e somente pode ser interpretada em termos de substâncias específicas quando a composição química da amostra é conhecida. A alcalinidade de muitas águas é constituída principalmente em função de carbonato, bicarbonato e teor de hidróxido, por isso sendo considerado como uma indicação da concentração desses constituintes. Sua concentração é significativa em muitos usos e tratamentos

de águas e efluentes. Baird *et al.* (2017) indicam que os valores medidos também podem incluir contribuições de boratos, fosfatos, silicatos ou outras bases.

#### 4.4 Contexto Geológico

O Cráton Amazônico engloba os estados do Pará, Amazonas, Amapá, Acre, Roraima e Rondônia. Nele, estão situadas as bacias sedimentares do Acre, Solimões, Amazonas e Marajó (CUNHA *et al.*, 2007). Essas bacias sedimentares, com origem no Paleozoico, se desenvolveram sobre o Cráton Amazônico, composto pelo Escudo das Guianas ao norte e pelo Escudo Brasileiro ao sul, com complexa evolução cambriana (NOGUEIRA, 2019).

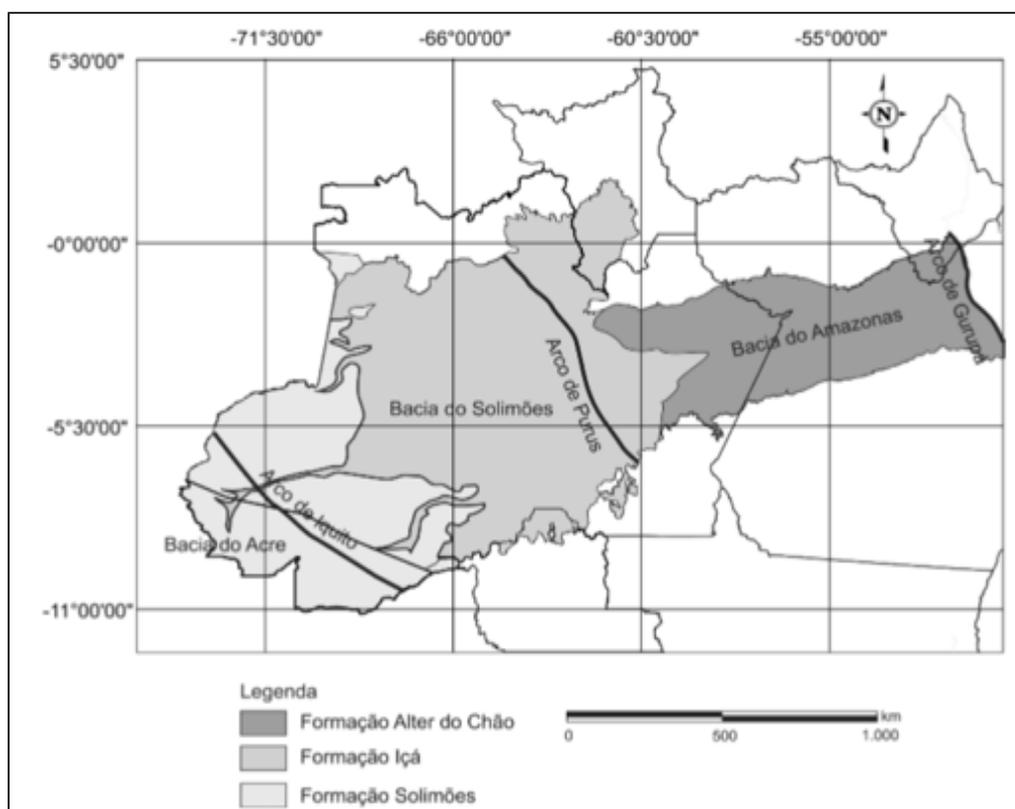
A Bacia Sedimentar do Amazonas (BSA, figura 3) ocupa uma superfície de aproximadamente 500.000 km<sup>2</sup>. Ela é preenchida em grande parte por rochas siliciclásticas, predominantemente de idade Paleozoica, intrudidas no Mesozoico por diques e soleiras de diabásio (MENDES *et al.*, 2012). Seu limite é definido pelo Arco do Purus a oeste, separando da Bacia Sedimentar do Solimões, a leste pela bacia do Marajó através do Arco de Gurupá, possuindo aproximadamente 5.000 m de preenchimento sedimentar (CAPUTO, 1984; CUNHA *et al.*, 2007).



**Figura 3:** Mapa geológico de localização da bacia do Amazonas. Fonte: Gonçalves *et al.* (2017).

A BSA é formada por duas megassequências deposicionais de idade, Paleozóica e Mesozóica-Cenozóica. A primeira megassequências, composta por rochas sedimentares associadas a intrusões de diques e soleiras de diabásio. A segunda de idade, Mesozóico-Cenozóico, formada por rochas sedimentares das

Formações Içá e Solimões (ANP, 2021). A segunda megassequências divide-se em duas sequências continentais: a cretácea superior (Formação Alter do Chão) e a cenozoica (Formações Içá e Solimões), depositadas por sistemas fluviais e flúvio-lacustres, sendo reunidas no Grupo Javari (SILVA et al., 2003). A Formação Alter do Chão, de idade Cretácea Superior, é constituída principalmente por arenitos quartzo-arenitos, arenitos feldspáticos/cauliníticos, e conglomerados com estratificações cruzadas, acanaladas e tabulares, que foram interpretadas como depósitos de canais fluviais com fácies subordinadas de siltitos, folhelhos e argilitos relacionados a ambiente lacustre (CAPUTO, 1984; VIEIRA, 1999; NOGUEIRA et al. 1999; SILVA, 2005; CUNHA et al. 2007).



**Figura 4:** Localização das formações Solimões, Alter do Chão e Içá, nas bacias sedimentares do Solimões e Amazonas. Fonte: SOUZA et al., (2013).

A Formação Solimões é sobreposta à Formação Alter Chão em toda a Bacia do Solimões e em algumas partes da Bacia do Amazonas. Ela consiste de uma sucessão de pelitos maciços e laminados, com linhetos intercalados e arenitos finos a

grossos. Essa formação se desenvolveu em rochas cristalinas e sedimentares, na base predominam as camadas argilosas maciças, ricas em fósseis. No topo, predominam os arenitos finos a grossos subangulares a subarredondados.

Na Bacia do Amazonas, a Formação Solimões ocorre somente no extremo oeste, nas proximidades do Arco de Purus, e é pouco espessa, enquanto na Bacia do Solimões pode atingir em média 300 metros (SOUZA et al., 2013; GALVÃO, 2011). Por outro lado, a Bacia do Solimões tem extensão de 400.000 km<sup>2</sup> e apresenta evolução geológica distinta da bacia do Amazonas. Limita-se a leste pelo arco do Purus e a oeste pelo Arco de Iquitos. Os sedimentos da bacia do Solimões apresentam uma espessura máxima de 3500 m, incluindo rochas paleozoicas, mesozoicas e cenozoicas (CAPUTO, 1984; LEITE, 2006).

A Formação Içá é constituída por intercalações de arenito fino à médio e conglomerados argilosos, sobrepondo-se discordantemente à Formação Solimões, que é composta por pelitos maciços e/ou laminados de cor cinza com intercalações de linhito e arenitos finos a grossos, o que sugere um ambiente fluvial meandrante de deposição (MOTTA, 2008).

#### 4.4.1. Águas Subterrâneas na Amazônia

Apesar da região Amazônica possuir recursos hídricos superficiais em grande quantidade, a maior parte dos municípios são abastecidos por águas subterrâneas ou sistemas mistos (TABELA 1), captando água subterrânea e superficial. Na região Amazônica, 57% dos municípios fazem uso exclusivo dos recursos hídricos subterrâneos e 13% utilizam sistemas mistos, o que mostra a relevância e importância de estudos para conservação desse recurso (ANA, 2021).

**Tabela 1:** Dados de abastecimento de águas subterrâneas e sistemas misto dos municípios da região norte e sua proporção para cada estado.

<b>Estados</b>	<b>Municípios</b>	<b>Água subterrânea</b>	<b>Proporção</b>	<b>Sistema Misto</b>	<b>Proporção</b>
Acre	22	4	18%	3	13%
Amapá	16	3	19 %	2	13%
Amazonas	62	44	71 %	10	16 %
Pará	144	106	73 %	13	9 %
Rondônia	52	10	19 %	5	10 %
Roraima	15	5	33 %	8	53 %
Tocantins	139	85	61 %	18	13 %
<b>Total</b>	<b>450</b>	<b>257</b>	<b>57 %</b>	<b>59</b>	<b>13 %</b>

Fonte: (ANA, 2021).

Segundo ANA (2021), no Estado do Amazonas, 71% dos 62 municípios faz uso das águas subterrâneas. Somados os sistemas mistos (água subterrânea e superficial), são 54 sedes urbanas utilizando poços para o abastecimento público de água, chegando a uma proporção de 87%. Os aquíferos Alter do Chão, Içá, Aluvial, Solimões-Repouso, Barreiras, Pirabas, Tucunaré, e as coberturas cenozoicas de Porto Velho e Rio Branco são os principais aquíferos do ponto de vista de abastecimento de água para a população, e os que em maiores informações e pesquisas (ANA, 2015). Na região amazônica, os maiores aquíferos ocupam áreas de rochas sedimentares localizados nas bacias do Marajó, Amazonas, Solimões e Acre (Figura 5). Os aquíferos que possuem maior potencial para exploração desse recurso são os aquíferos do Grupo Barreiras, Formação Alter do Chão, Formação Içá e a Formação Solimões (ANA, 2015).



**Figura 5:** Representação das unidades geológicas e dos principais aquíferos favoráveis a exploração dos recursos hídricos na Amazônia. Fonte: WAHNFRIED & SOARES, 2012).

O aquífero Alter do Chão é o de maior abrangência na região, principalmente nos estados do Amazonas e Pará. Estudos desenvolvidos por Aguiar e Mourão (2012) identificaram que o Aquífero Alter do Chão (AAC) possui espessura média de aproximadamente 160 m na cidade de Manaus, com profundidade média do nível d'água é de aproximadamente 30 m. Utilizando dados de poços na cidade de Santarém, Tancredi (1996) determinou a profundidade da Formação Alter do Chão em 258 m. Sondagens de empresas petrolíferas feitas na mesma região atravessaram toda a Formação Alter do Chão com espessuras de 527 m, em Alter do Chão, e 603 m em Belterra, no estado do Pará. A espessura total da Formação Alter do Chão é de próximo de 600 m em média. Já a parte saturada da unidade, que forma os aquíferos, atinge espessuras totais de 480 m e são constituídos por várias camadas arenosas,

com permeabilidade e espessura variáveis, intercaladas com aquícludes e aquítardees de pequena espessura (AGUIAR & MOURÃO, 2012). A condutividade hidráulica varia entre 4,6 a 18,8 m/dia, e a transmissividade varia entre 132 e 790 m<sup>2</sup>/dia, demonstrando grande variabilidade, dependendo das características geológicas de cada local (ANA, 2015).

Silva e Bonotto (2000), em estudos em poços da formação Alter do Chão na cidade de Manaus, afirmam que elementos químicos como o cálcio, magnésio, potássio, dureza e o bicarbonato tiveram aumento em suas quantidades conforme a mudança de direção do fluxo subterrâneo e com o aumento da profundidade dentro do aquífero. As águas foram classificadas como potássicas ou sódicas, ocorrendo duas delas com caráter misto (calco-potássica), em poços com profundidade que variaram de 41 a 203 metros de profundidade. Em relação às amostras de ânions o cloreto (1,000 mg/L) foi o elemento químico encontrado em maior concentração, sendo classificada como águas bicarbonatada.

Pita *et al.* (2018), em estudos no aquífero Alter do Chão na região de Manacapuru, identificaram mudanças de características químicas e isotópicas com o aumento da profundidade. Nas partes mais profundas na faixa de 150 a 236 metros, condutividade elétrica é superior a 250  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , sendo classificadas como bicarbonatadas-cálcicas e magnesianas. Essas águas são mais salinas, com valor médio de sólidos totais dissolvidos (TDS) de 185 mg/ L em poços profundos. De acordo com o autor, as águas da área de estudos foram classificadas como ligeiramente ácidas, com pH entre 4,3 a 5,5, sólidos totais dissolvidos com valores máximos de 30 mg/L, sendo pouco salinizada, o que caracteriza quimicamente como águas sódicas, predominantemente sulfatadas a cloretadas.

Outro aquífero de grande importância para a região amazônica é o Aquífero Içá, classificado como livre a semi-confinado, ocorre principalmente na região central do Estado do Amazonas, onde ocupa mais da metade de seu território. Também ocupa o sudoeste de Roraima, norte de Rondônia e há um pequeno fragmento no noroeste do Acre, totalizando uma área aproximada de 932.700 km e espessura

máxima de 143 metros. Em algumas cidades da região, como Coari, Fonte Boa e Barcelos, esse aquífero é a principal fonte de abastecimento de água (ANA, 2015).

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir o objetivo proposto nesse trabalho foram realizadas duas coletas de amostras de água em períodos distintos. A primeira foi executada em novembro de 2021, com coletas feitas em poços tubulares profundos da empresa de Serviço de Abastecimento de Água e Esgoto – SAAE do município de Manacapuru. A segunda etapa de coleta foi feita em junho de 2022, nos piezômetros rasos instalados na zona urbana do município no âmbito deste projeto. Os detalhes destas amostragens, assim como dos pontos amostrado, são apresentados a seguir.

### 5.1. Seleção de poços para amostragem

O maior número de amostras coletadas para este trabalho teve origem na rede de poços da Companhia de Água e Esgoto (SAEE) do município de Manacapuru. Para a escolhas dos poços foram levados em consideração o seu funcionamento, a área de abrangência e o acesso a cada um deles, além dos dados levantados em outros trabalhos de relevância. A avaliação prévia para seleção dos poços tubulares foi feita utilizando dados de relatórios técnicos e documentos de poços tubulares profundos disponibilizados pela empresa de Serviço de Abastecimento de Água e Esgoto-SAAE do município de Manacapuru e também pela plataforma SIAGAS-Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, disponíveis no banco de dados online do Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2020) sobre informações referentes aos dados de localização, construtivos dos poços, litológicos, hidrodinâmicos, hidroquímicos e outros disponíveis.

Também foram utilizados como referência para seleção dois trabalhos realizados na região acerca das águas subterrâneas. O levantamento executado pela Rede Brasileira de Vigilância da Fluoretação da Água (Rede Vigiflúor), realizado entre os anos de 2010 e 2015, acerca da fluoretação das águas de abastecimento público da região Norte em municípios com mais de 50.000 habitantes (VIGIFLÚOR, 2015). Manacapuru foi o município amazonense no qual foram encontrados poços com concentrações de flúor em níveis aceitáveis para consumo humano (VIGIFLÚOR, 2015). O outro trabalho usado como critério de seleção foi o de Pita *et al.* (2018), sobre

geoquímica das águas de Manacapuru-AM, onde foram utilizadas informações sobre a hidroquímica das águas do município e os poços que foram investigados. As campanhas de amostragem foram executadas durante os meses de novembro a dezembro de 2021, totalizando 105 amostras de água coletadas em 23 poços.

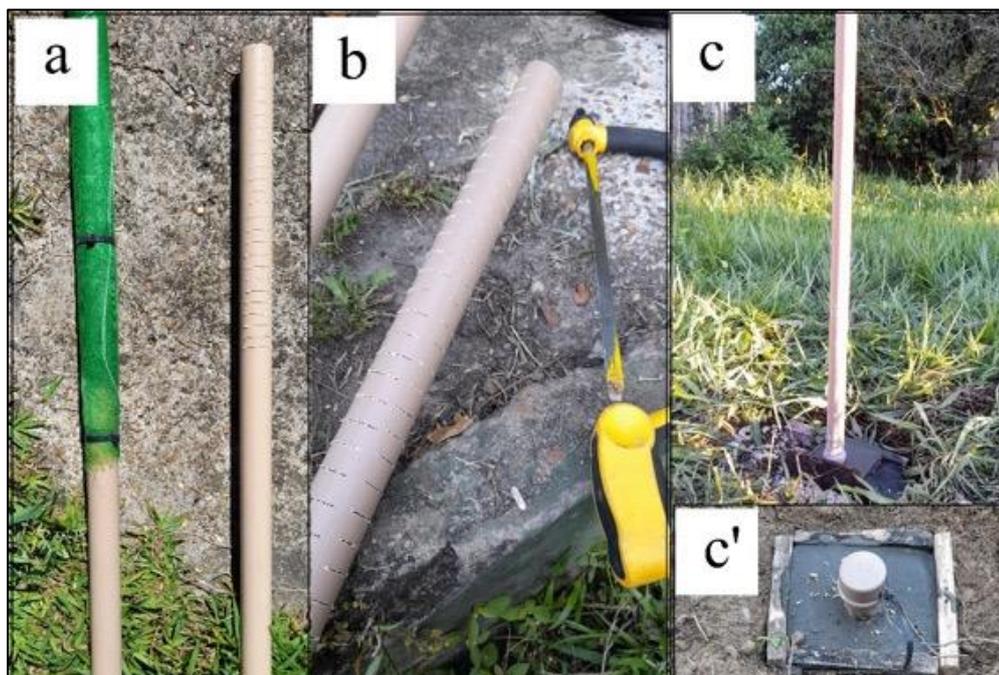
## 5.2. Localização dos Piezômetros e Materiais Utilizados e Construção dos Piezômetros

Para a instalação dos piezômetros foi levada em consideração a localização dos poços tubulares e a proximidade com os rios, córregos e nascentes existentes no município. A amostragem nos piezômetros foi realizada no mês de junho de 2022, com total de 25 amostras, localizados na área urbana do município de Manacapuru - AM. Os materiais utilizados na confecção dos piezômetros foram lavados com água sem cloro, e detergente líquido, a fim de impedir qualquer contaminação na coleta das amostras (Figura 6).



**Figura 6:** Processo de Limpeza dos tubos (a) e materiais utilizados e (b) para confecção dos piezômetros.

A confecção dos piezômetros consistiu na abertura de ranhuras feitas em volta do tubo de PVC em aproximadamente 0,5 metros de seu comprimento total (Figura 7). Foram abertas duas fileiras de ranhuras, utilizando um arco de serra. As fileiras foram recobertas com uma tela de náilon, com o intuito de impedir que partículas de areia do pré-filtro e do solo entrem para dentro do poço piezômetro.



**Figura 7:** Confecção e instalação dos piezômetros. (a) processo de ranhuras e revestimento com filtro, (b) serra utilizada no processo de ranhuras e (c) piezômetros instalados.

Para a fazer os furos de sondagem nos quais os tubos de PVC foram instalados foi utilizado um trado manual. Os pontos de escolha para a instalação dos piezômetros foram próximo a cinco poços que abastecem a cidade de Manacapuru, dos quais foi coletada água para análise na etapa anterior, realizada em novembro de 2021. Os pontos escolhidos foram os bairros São Francisco, Correnteza, Comunidade do Lago do Limão, Átila Lins e Biribiri (Quadro 1). O piezômetro localizado na Comunidade do Divino Lago do Limão foi o único que não ficava próximo de poço de abastecimento da cidade.

### 5.2.1. Limpeza dos Piezômetros

A limpeza dos piezômetros é feita após sua instalação, e consiste no bombeamento de água para a retirada de sedimentos acumulados em seu interior. Foi utilizado uma válvula de retorno acoplada a uma mangueira flexível, inseridas até o fundo do tubo de PVC (Figura 8).



**Figura 8:** Funcionamento de limpeza dos piezômetros para coleta de água.

### 5.3. Coletas de amostras de água nos poços tubulares profundos e Piezômetros

Todos os procedimentos de coleta de água seguiram os protocolos propostos pela Agência Norte Americana de Proteção Ambiental (*US Environmental Protection Agency* – EPA) (USEPA, 2013). De acordo com estes protocolos, o ponto de captação da água deve estar o mais próximo possível da boca do poço, quanto mais próximos estiver do ponto de coleta, menores são riscos de contaminação na tubulação e

oxidação, precipitação dos íons, e de alterações das concentrações dos constituintes originais presente na água. Na amostragem da água foram utilizadas mangueiras e conexões para desviar água do poço até um recipiente aberto, de modo que a vazão pudesse ser controlada (Figura 9). A água desviada pela mangueira até o fundo do recipiente gera um tipo de fluxo ascendente, que faz com que água passe pelos sensores da sonda antes de ter o contato com o ar atmosférico, garantido que os parâmetros medidos não fossem alterados.

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. Assim, pode-se garantir que a água coletada é representativa do aquífero. Para coleta e análises dos parâmetros *in situ* como pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, salinidade e temperatura, foi utilizado uma sonda multiparamétrica da marca YSI, modelo Professional Plus, inserida em célula de fluxo ou balde. Todas essas medições, citadas acima, foram feitas no local e na hora da coleta, uma vez que sofrem alteração com o tempo e exposição às condições superficiais.



**Figura 9:** Procedimentos para coleta de água dos poços profundos no município de Manacapuru – AM.

Para a coleta de água de dentro dos piezômetros foram utilizados amostradores descartável de água subterrânea (bailers) de polietileno com diâmetro de 21 mm e capacidade de 600 mL de água. Antes de coletar cada amostra, foi necessário

remover a água estagnada de dentro do piezômetro, de modo a se garantir uma amostra representativa do aquífero, que não estivesse alterada pelo contato com o ar atmosférico. Neste caso não é possível utilizar a técnica da estabilização de parâmetros físico-químicos, como em poços, porque não se tem um fluxo contínuo de água. Assim, foram removidos três volumes de água contida dentro dos piezômetros. Para determinar a quantidade de água que foi retirado de cada piezômetro foi utilizada a fórmula matemática do volume (equação 2).

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad \text{Eq. (2)}$$

Os parâmetros de condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais, pH, temperatura foram feitas *in situ*, utilizando a sonda multiparamétrica da marca YSI, modelo Professional Plus inserida em um recipiente (figura 10). Para amostragem, a água foi transferida dos bailers diretamente para uma seringa de 10 mL, a qual foi acoplada filtro de acetato de celulose de 0,45 micrômetros, fazendo a transferência para os frascos de 60 mL de polietileno tereftalato (PET). Para conservar as amostras para análise dos cátions foram adicionadas seis gotas de ácido nítrico para reduzir o pH até 2, evitando assim que água sofra o processo de oxidação e precipitação dos elementos presente conservando-os em solução.



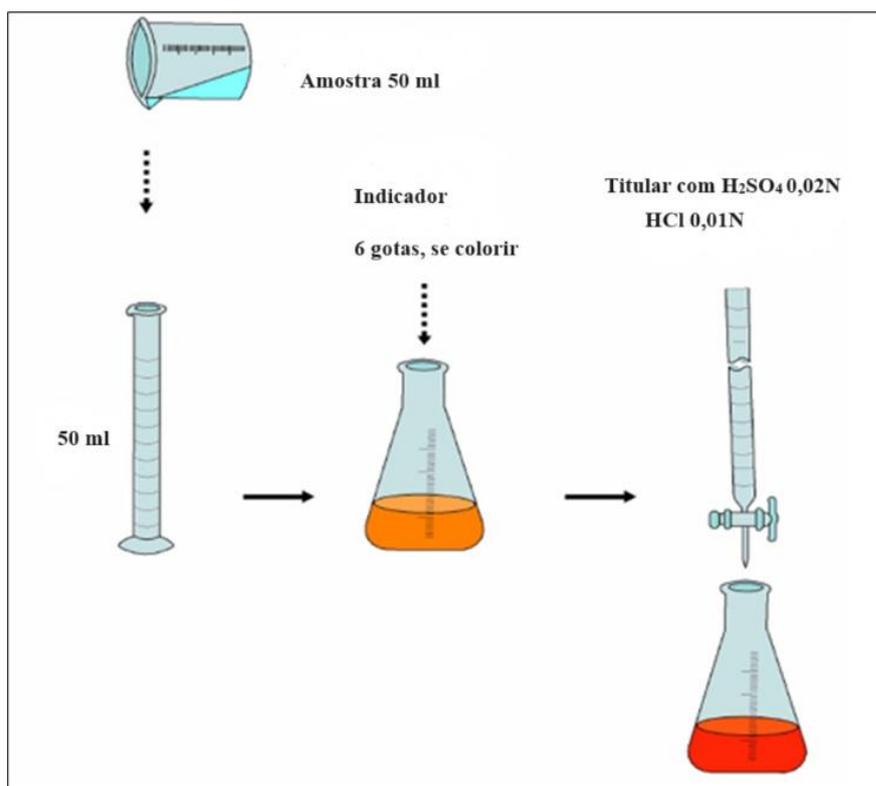
**Figura 10:** Uso da sonda multiparamétrica para as análises dos parâmetros *in situ*.

Os frascos foram devidamente identificados com o nome do local, dia e hora da coleta, e acondicionados em caixa térmica com gelo. Foram também coletados 120 mL de água não filtrada para a determinação de alcalinidade. Os recipientes utilizados na coleta foram previamente descontaminados em solução de ácido nítrico a 10% por um período de 24 horas. No laboratório as amostras foram armazenadas das amostras na geladeira.

## **5.7. ANÁLISES QUÍMICAS DA ÁGUA**

### **5.7.1. Alcalinidade**

As análises de alcalinidade foram feitas em período máximo de 24 h após a coleta, para que não houvesse influências neste parâmetro pelo contato com o ar atmosférico. A alcalinidade foi determinada pelo método de titulação com indicador ácido-base vermelho de metila ( $C_{15}H_{15}N_3O_2$ ), indicando um pH entre 4,4 e 6,2 na mudança de coloração. A titulação consiste com a adição de seis gotas do indicador de pH alaranjado de metila em 50 mL de amostra, seguido da adição lenta do ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$  a 0,02 N) nos poços profundos e ácido clorídrico (HCl a 0,01 N) nas amostras dos piezômetros, feita com o auxílio de uma bureta graduada até que a cor do indicador mudasse, passando de um tom alaranjado para vermelho (figura 11).



**Figura 11:** Procedimento utilizado para determinação da alcalinidade.

Sabendo o volume de ácido adicionado (Volume do ácido), a normalidade do ácido (N) e o volume da amostra (V amostra), é possível obter a alcalinidade da amostra através da equação 3 e 4.

$$\text{Alcalinidade} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{V_{H_2SO_4} \cdot N_{H_2SO_4} \cdot 50000}{V_{amostra}} \quad \text{Eq. (3)}$$

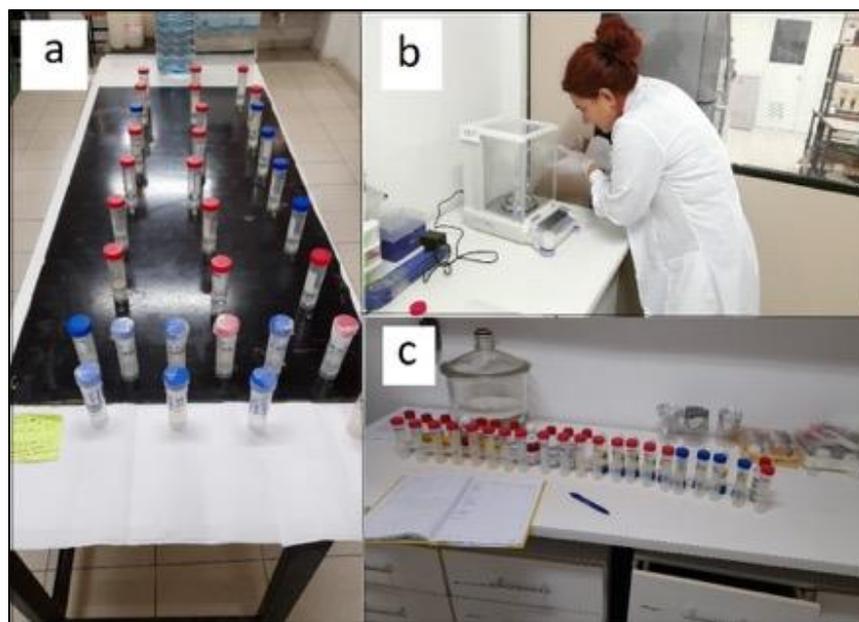
$$\text{Alcalinidade} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{V_{HCl} \cdot N_{HCl} \cdot 50000}{V_{amostra}} \quad \text{Eq. (4)}$$

### 5.8. Determinação da Sílica na Água

As análises de sílica foram realizadas nas 26 amostras (21 dos poços profundos e 5 dos piezômetros). Foi aplicado o método clássico da espectrofotometria do azul de molibdênio. Essa técnica 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). As análises das amostras de sílica foram realizadas no Laboratório de Geoquímica no Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

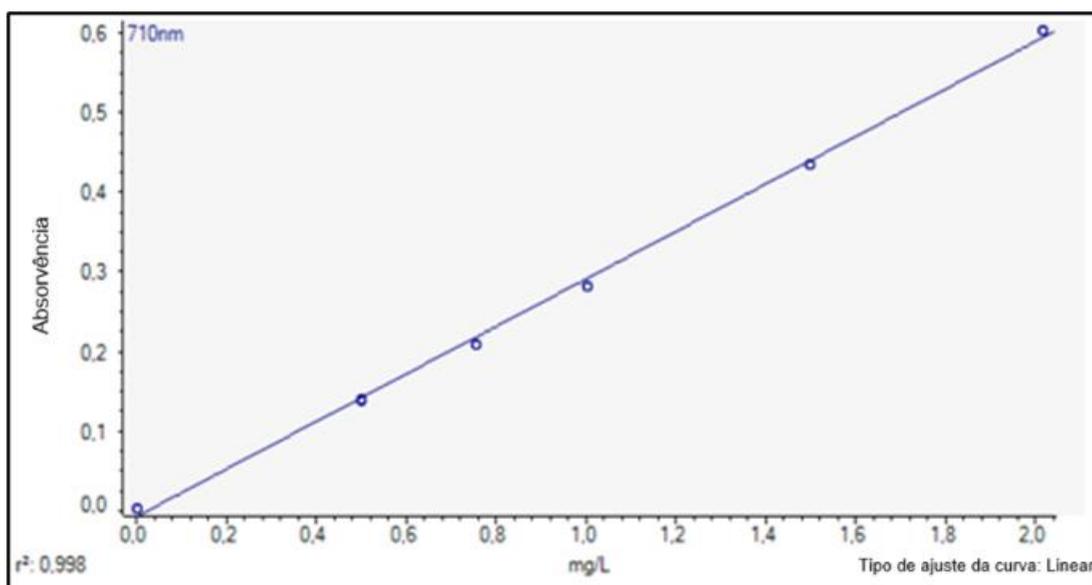
Para o preparo da curva padrão de concentração de Si foi utilizada a solução padrão de Si com concentração de 1000 mg/L. Foram feitas várias diluições de modo que se chegasse às concentrações 0,5 mg/L, 0,75 mg/L, 1,0 mg/L, 1,5 mg/L e 2,0 mg/L. Para a diluição, foi utilizada água deionizada que combina sistemas de filtração, osmose reversa, adsorção, deionização, oxidação ultravioleta e ultrafiltração, sendo considerada uma água ultrapura do tipo 1 (Lorenzo et al, 2018).

As amostras dos poços tubulares profundos foram diluídas em água Milli-Q. As amostras coletadas dos piezômetros não foram diluídas, uma vez que águas mais rasas tendem a ter valores de sílica menores, dispensando a diluição com água deionizada. Os reagentes utilizados foram o molibdato de amônia 5g/50mL, ácido clorídrico 1:1, ácido oxálico 5g/50mL e o ácido ascórbico P.A. Para o procedimento, todas as amostras dos poços profundos foram diluídas com água deionizada (todas as amostras dos poços profundos tinham 12,5 mL de água) foi adicionado 0,5 mL de molibdato de amônia, com agitação. Em seguida, foram acrescentados 0,25 mL de ácido clorídrico e a amostra foi novamente agitada, deixando o ácido agir por 5 minutos. A seguir, foram acrescentados 0,375 mL de ácido oxálico, com agitação, e deixando agir por 2 minutos. Por último foram acrescentados 0,018 mg de ácido ascórbico (figura 12). Para a leitura das amostras foi utilizado o Espectrofotômetro da marca Thermo Scientific 220 UV/ visível.



**Figura 12:** Procedimento para preparação das amostras no laboratório, (a) amostras preparadas, (b) medição da água deionizada e (c) amostras que foram analisadas.

Com o espectrofotômetro ligado, foi aberto o software Thermo INSIGHT no computador e feitas as configurações como a padronização de unidades no sistema internacional (SI) e indicado o número de leituras, sendo três leituras para cada amostra iniciando assim o processo de análises das amostras. Primeiro foram feitas as leituras das análises das soluções padrão (figura 13), onde se obteve um  $r^2 = 0,998$  conferindo assim a confiabilidade do método. Em seguida foram feitas as análises das 26 amostras.



**Figura 13:** Gráfico da curva padrão para as análises de sílica (SiO<sub>2</sub>).

Com os dados obtidos foi construída uma tabela os valores referentes ao fator de diluição, volume da amostra total e o valor da amostra inicial que foram utilizados para o cálculo (equação 4 e 5) da sílica.

$$\frac{SI}{L} = \text{concentração UV} * \text{Fator de diluição} \quad \text{Eq. (4)}$$

A concentração UV é obtida pelas análises das amostras no espectrofotômetro. O fator de diluição é calculado pela expressão matemática;

$$C1 * V1 = C2 * V2 \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde;

C1= concentração antes da diluição (solução estoque)

V1= volume antes da diluição

C2= concentração após a diluição

V2= volume após a diluição

## 5.9. Avaliação dos resultados de análises químicas

As reações químicas que ocorrem na água entre ânions e cátions estão normalmente em equilíbrio. Para garantir que todos os íons sejam detectados durante a análise, será feito o cálculo de balanço iônico dos elementos. O balanço iônico foi feito de acordo com Custódio & Llamas (1983), que relaciona o erro prático máximo permitido com a condutividade elétrica (CE) equação 6 e equação 7 de Logan (1965), que considera para os cálculos os valores dos íons com limites aceitáveis para B.I.1 e B.I.2.

$$Ep(\%) = \frac{[\sum \text{ânions} - \sum \text{cátions}]}{[\sum \text{ânions} + \sum \text{cátions}]} * 200 \quad \text{Eq. (6)}$$

$$Ep(\%) = \frac{[\sum \text{ânions} - \sum \text{cátions}]}{[\sum \text{ânions} + \sum \text{cátions}]} * 100 \quad \text{Eq. (7)}$$

Para determinação das análises de cátions e ânions foram utilizadas as 26 amostras. Todos os procedimentos foram realizados no laboratório de Geoquímica da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, utilizando o Cromatógrafo Thermo Scientific. Foram feitos os padrões para cada amostra destinada à análise de cátions. As amostras foram preparadas e diluídas em água deionizada. Devido à alta condutividade acima de  $60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , foram feitas duplicatas de cada amostra, com o intuito de evitar danos aos aparelhos. Finalizado o procedimento das amostras de cátions, foi feita a troca de coluna de cátions para ânions e passado por todo o processo novamente de calibração e teste com água deionizada. Com o equipamento estabilizado foram analisados os íons ânions cloro ( $\text{Cl}^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e íons cátions sódio ( $\text{Na}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Para as condutividades acima de  $60,0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  foram adotadas as seguintes diluições :  $60,0$  a  $50,0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} > 1$  :1 fator de diluição 2 ;  $151,0$  a  $250,0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} > 1$  :2 fator de diluição 3 ;  $251,0$  a  $350,0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} > 1$  :3 fator de diluição 4 e  $351,0$  a  $450,0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} > 1$  :4 fator de diluição 5. É importante atentar-se que as amostras foram diluídas. Neste caso, faz-se necessária a correção pelo fator de diluição. Por exemplo, uma amostra que apresentou resultado de  $1\text{mg/L}$  de concentração, e foi diluída 2 vezes, multiplica-se por 3, logo o valor real de concentração dessa amostra é  $3\text{mg/L}$ .

A partir dos resultados obtidos das análises de ânions e cátions foram elaborados gráficos e tabela para comparação com os limites de potabilidade, determinados pela portaria de consolidação nº 888/2021 do Ministério da Saúde. Para classificação química das águas, foram utilizados os diagramas de Piper e Stiff.

O Diagrama de Piper permite a análise de qualidade e a classificação de distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes. O diagrama de Piper, extraído da plotagem de dois diagramas triangulares de cátions e ânions maiores (Na<sup>+</sup>; K<sup>+</sup>; Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; Cl<sup>-</sup> respectivamente) que, combinados, permitem classificar as amostras.

O diagrama de Stiff apresenta de maneira distinta as principais características hidroquímicas de uma amostra água. Para a sua elaboração, são utilizados quatro eixos horizontais paralelos, que se estendem em duas direções a partir de um eixo central vertical. A construção de diagramas de Stiff permitem visualizar a distribuição espacial das fácies hidroquímica das águas subterrâneas. Ele é aplicável especificamente quando se deseja fazer comparações entre várias amostras de água. Ele permite visualizar diferenças de concentrações de cátions e ânions maiores, o que auxilia em diversos tipos de análises e comparações entre as amostras. Para o tratamento dos dados foi utilizado o software Qualigraf, disponibilizado gratuitamente pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos-FUNCEME.

#### 5.10. Construção dos Mapas de Concentração dos Parâmetros Físicos Químicos

Os resultados referentes a cada parâmetro 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 8.

$$Z = (\sum_{i=1}^n \frac{1}{(di)^p} Zi) / (\sum_{i=1}^n \frac{1}{(di)^p}) \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde  $Z$  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. Por outro lado, parâmetros de potência menores enfatizam pontos mais distantes, tornando o resultado mais suave, porém menos preciso (MARCUSO *et al.*, 2011; LONGLEY *et al.*, 2015).

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões referente a este trabalho serão apresentados na forma de artigo, submetido em periódico científico.

### HIDROQUÍMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA ZONA URBANA DE MANACAPURU, AMAZONAS, BRASIL

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

<sup>1</sup> Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, Brasil, E-mail: [ludimila.sasaki@gmail.com](mailto:ludimila.sasaki@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0001-6981-2419>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, Brasil, E-mail: [willianbarros18@gmail.com](mailto:willianbarros18@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-8164-6246>

<sup>3</sup> Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geociências, Manaus, Brasil. E-mail: [iwahnfried@ufam.edu.br](mailto:iwahnfried@ufam.edu.br); <https://orcid.org/0000-0002-3427-9447>

**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, sendo vinte poços profundos e cinco piezômetros, 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 em relação ao balanço iônico, sendo 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.

**Palavras-chave:** Hidroquímica, Águas subterrâneas, Hidrogeologia, Manacapuru,

**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 by the São Paulo State Environmental Agency (CETESB), of 5 mg/L, which shows the importance of periodic monitoring.

**Keywords:** Hydrochemistry, Groundwater, Hydrogeology, Manacapuru, Amazonas, Brazil

## 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

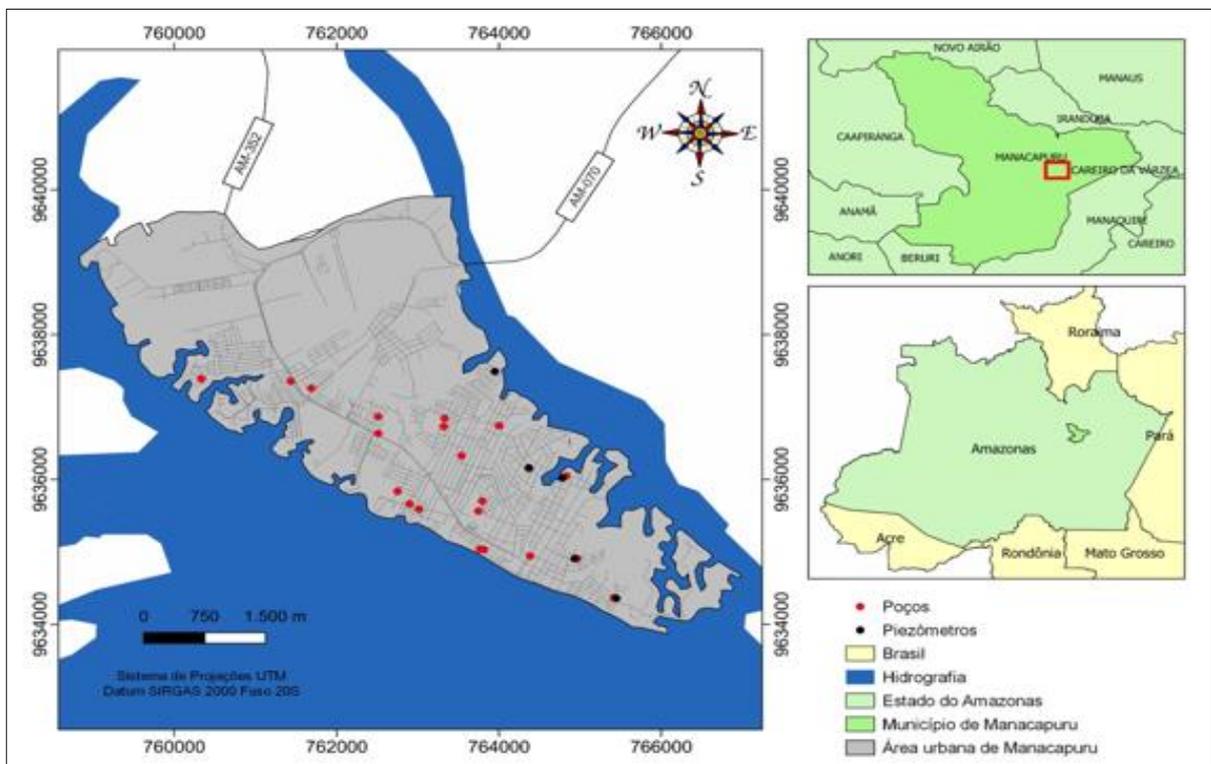
acima de VMP são prejudiciais à saúde. Na região amazônica, trabalhos como de Matheus (2017), de Meyer et al. (2023), Fernandes Neto e Wahnfried (2024) e Ribeiro et al. (2024) detectaram a presença de alumínio, ferro, manganês e arsênio naturais acima de VMP em água subterrânea de poços tubulares no município de Novo Airão e ao longo dos rio 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 23 poços tubulares profundos e a segunda etapa de coleta foi feita em junho de 2022, em 5 piezômetros totalizando 28 pontos de coleta.



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

## **Amostragem de água subterrânea**

Na tabela 1 são apresentados os 28 poços e as suas profundidades, 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). Foram separadas alíquotas para análises de cátions, ânions, sílica e alcalinidade. 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.

**Tabela 1:** Dados dos 28 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  $\mu\text{m}$ . 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.

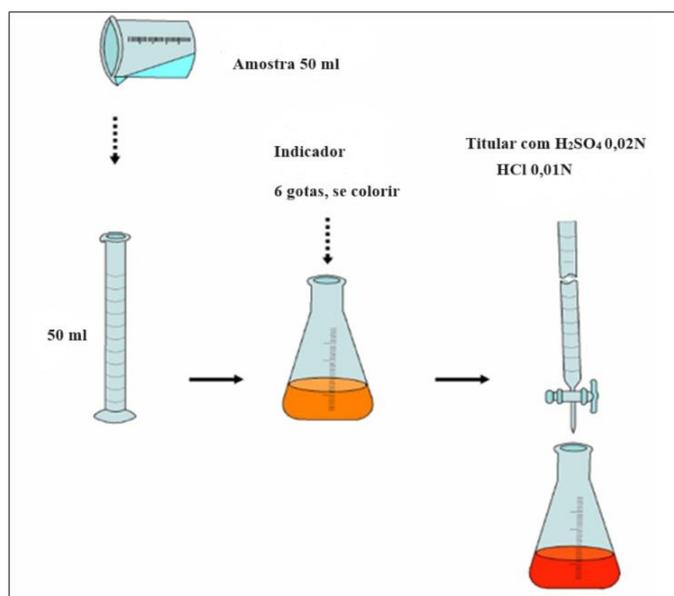
### **Análise dos cátions e ânions**

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  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Mg}^{2+}$ . 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  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ . Os resultados são apresentados na tabela 2.

### **Determinação da Alcalinidade e Sílica**

As análises de alcalinidade foram feitas no máximo 24 h 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 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) a 0,02 N, ou ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ) a 0,01 N. 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.



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

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.

$$\text{Alcalinidade} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{V_a \cdot M \cdot MM}{V_{amostra}} \quad \text{equação (3)}$$

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)

## 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 & Llamas (1983), que relaciona o erro prático máximo permitido com a condutividade elétrica (CE) (equações 2 e 3 de Logan, 1965, apud Custódio & Llamas, 1983) com erro aceitável de 30%.

$$Ep(\%) = \frac{[\Sigma\hat{a}nions - \Sigma\hat{c}at ions]}{[\Sigma\hat{a}nions + \Sigma\hat{c}at ions]} * 200 \quad \text{equação (2)}$$

$$Ep(\%) = \frac{[\Sigma\hat{a}nions - \Sigma\hat{c}at ions]}{[\Sigma\hat{a}nions + \Sigma\hat{c}at ions]} * 100 \quad \text{equação (3)}$$

## 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.

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

O Z refere-se ao valor do ponto a ser estimado; Zi é o valor do ponto conhecido; di 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 DISCUSSÕES**

### **Parâmetros Físico-químicos**

Os valores dos parâmetros físico-químicos temperatura (T), condutividade elétrica (C.E.), 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.

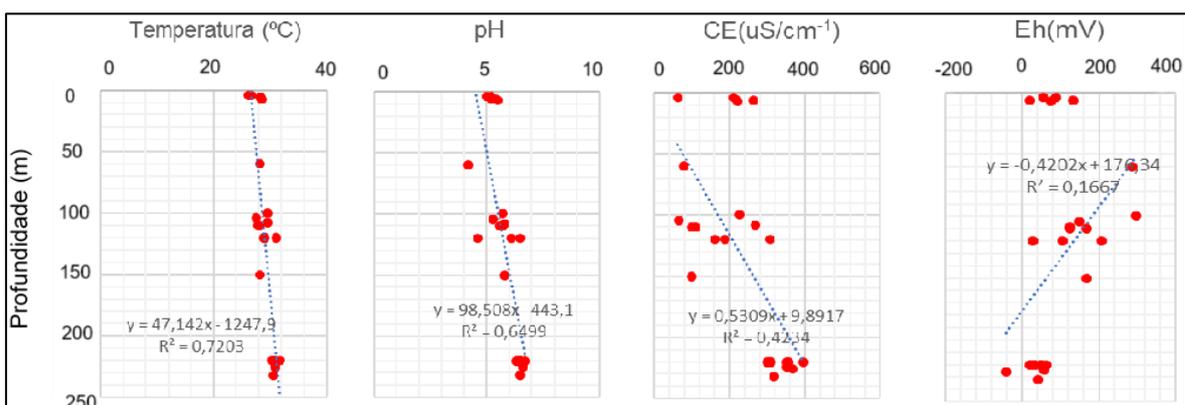
A temperatura, como esperado, apresenta aumento em função de profundidade ( $R^2= 0,720$ ), o que é explicado pelo gradiente geotérmico. Este parâmetro variou entre 26,2 a 31,7 °C. A menor temperatura foi registrada no piezômetro Lago do Limão, com 4 m de profundidade (26,2 °C), e a maior foi registrada 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 Jose 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).



**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.

## Balanco iônico

Apenas onze amostras das vinte cinco coletadas apresentaram erro de balanço iônico dentro dos limites aceitáveis de 30% (Tabela 2). Nenhuma amostra coletada em piezômetros ficou dentro deste limite e, portanto, não foram utilizadas nas interpretações.

**Tabela 2:** Balanço iônico das amostras das águas subterrânea do município de Manacapuru.

Poços	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ΣCátions	ΣÂnions	B.I. 1	B.I. 2
	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 Jose	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
<b>Mínimo</b>	0,54	0,33	0,39	0,03	1,19	0,05	1,27	1,27	0,09	0,05
<b>Máximo</b>	1,74	0,96	0,79	0,18	2,2	0,81	3,49	2,81	47,38	23,69
<b>Mediana</b>	1,25	0,72	0,64	0,05	1,53	0,45	2,58	2,16	15,79	7,9

Ca<sup>2+</sup>: cálcio, Mg<sup>2+</sup>: magnésio, Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>: sódio e potássio; Cl<sup>-</sup>: cloro, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: nitrato; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: sulfato. Os valores mínimos, máximo e mediana foram apenas das amostras que passaram no balanço iônico.

## Hidroquímica

Na Tabela 3 e Figura 5 são mostradas as distribuições das concentrações dos cátions cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ) nos poços com profundidades de até 120 metros (coluna da esquerda), e com profundidades variando de 150 a 232 m (coluna da direita). 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. 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 34,84 mg/L no poço Átila Lins e a mediana de 25,02 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. 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 aluminosilicáticos 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).

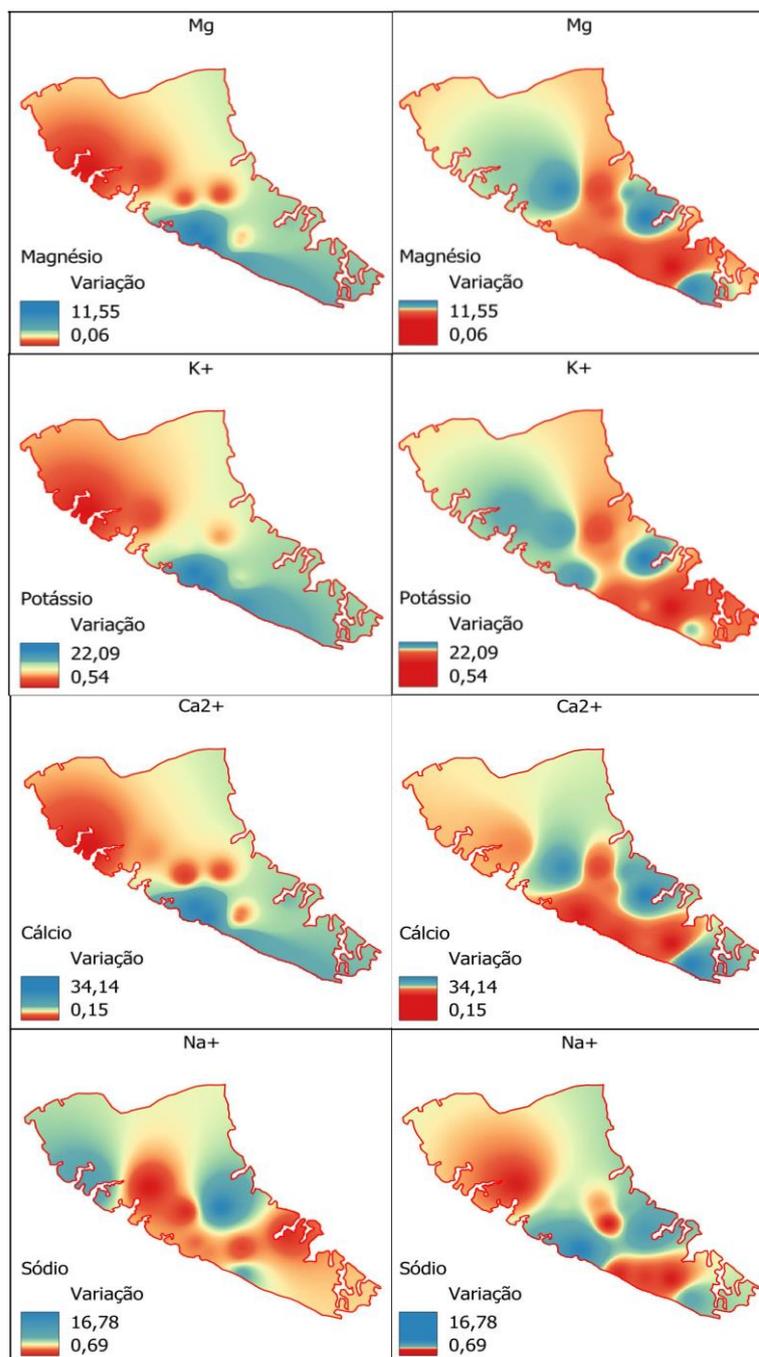
**Tabela 3:** Dados referentes às análises de cátions, ânions, alcalinidade e sílica nos poços e piezômetros da zona urbana do município de Manacapuru. Todas as análises foram feitas em mg/L.

Poços	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CaCO <sub>3</sub>	Si
Padres	25,02	8,56	3,04	18,23	1,75	3,03	18,92	92,00	8,07
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
Atila Lins	34,84	11,68	4,97	22,46	3,31	3,31	41,93	98,50	7,08
PT São Jose	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
<b>VMP (mg/L)</b>	<b>**</b>	<b>**</b>	<b>200</b>	<b>**</b>	<b>250</b>	<b>44</b>	<b>250</b>	<b>**</b>	<b>**</b>
Mínimo	10,88	4,05	1,37	12,19	1,22	1,39	2,31	72,50	3,53
Máximo	34,84	11,68	8,05	22,46	6,37	16,52	41,93	134,00	11,94
Mediana	25,02	8,77	3,07	18,27	1,87	3,03	21,65	93,50	8,07

Ca<sup>2+</sup>: cálcio, Mg<sup>2+</sup>: magnésio, Na<sup>+</sup>: sódio, K<sup>+</sup>: potássio; Cl<sup>-</sup>: cloro, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: nitrato; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: sulfato, CaCO<sub>3</sub>: carbonatos, Si: sílica, VMP: valores máximos permitidos pela portaria do MS/ 888/21. \*\* não estão incluídos na portaria.

Análises de sedimentos de amostras dos poços de Manacapuru indicaram que os principais minerais encontrados na região de Manacapuru foram: quartzo (SiO<sub>2</sub>), Caulinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>(OH)<sub>4</sub>), Gipsita (Al(OH)<sub>3</sub>), Hematita (α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Goethita (α-FeO(OH)), minerais em menores abundância como o Rutilo (TiO), Microclínio (K(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)) e Nontronita (Ca<sub>0,5</sub> + Na<sub>0,5</sub>)<sub>0,3</sub> Fe<sup>3+2</sup>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>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).



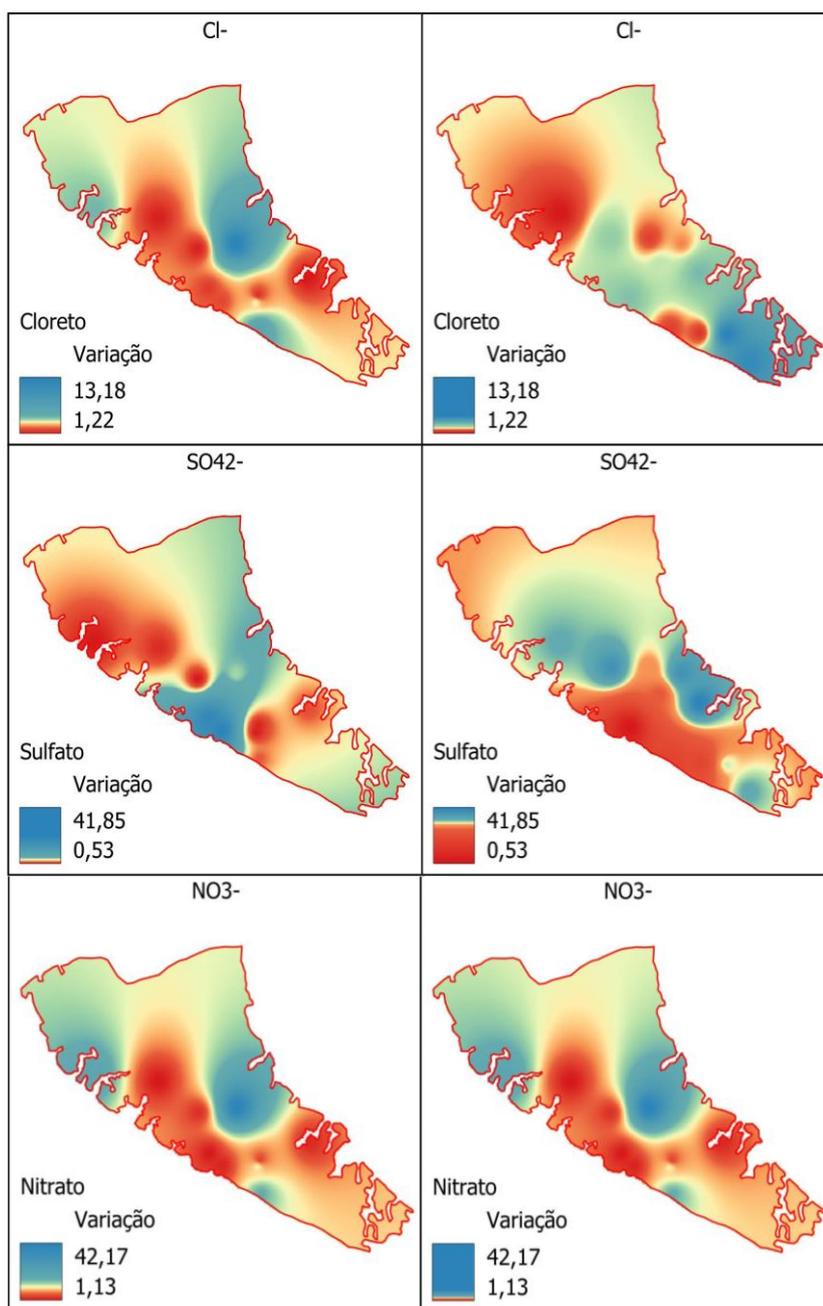
**Figura 5:** Mapa de concentração dos principais cátions  $\text{Ca}^+$  (mg/L),  $\text{Mg}^{2+}$  (mg/L),  $\text{Na}^+$ ;  $\text{K}^+$  (mg/L) nos poços com profundidade até 120 metros na esquerda e nos poços de 150 a 232 m na direita, na área urbana de Manacapuru – AM.

As distribuições das concentrações dos principais ânions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) dos poços com profundidade até 120 metros, podem ser observados na Figura 6, coluna da esquerda. Em relação ao cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), 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 0,96 mg/L, máximo de 102,06 mg/L e mediana de 2,16 mg/L. A região leste apresentou a maior concentração de cloreto.

O nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) 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 ( $\text{NO}_3^-$ ). 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 3,03 mg/L no poço Padres, sendo a região central com as maiores concentrações. As concentrações de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) nas águas subterrâneas de Manacapuru são consideradas baixas apresentando valores mínimo de 2,31 mg/L no poço São Francisco, máximo de 41,93 mg/L no Átila Lins 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).

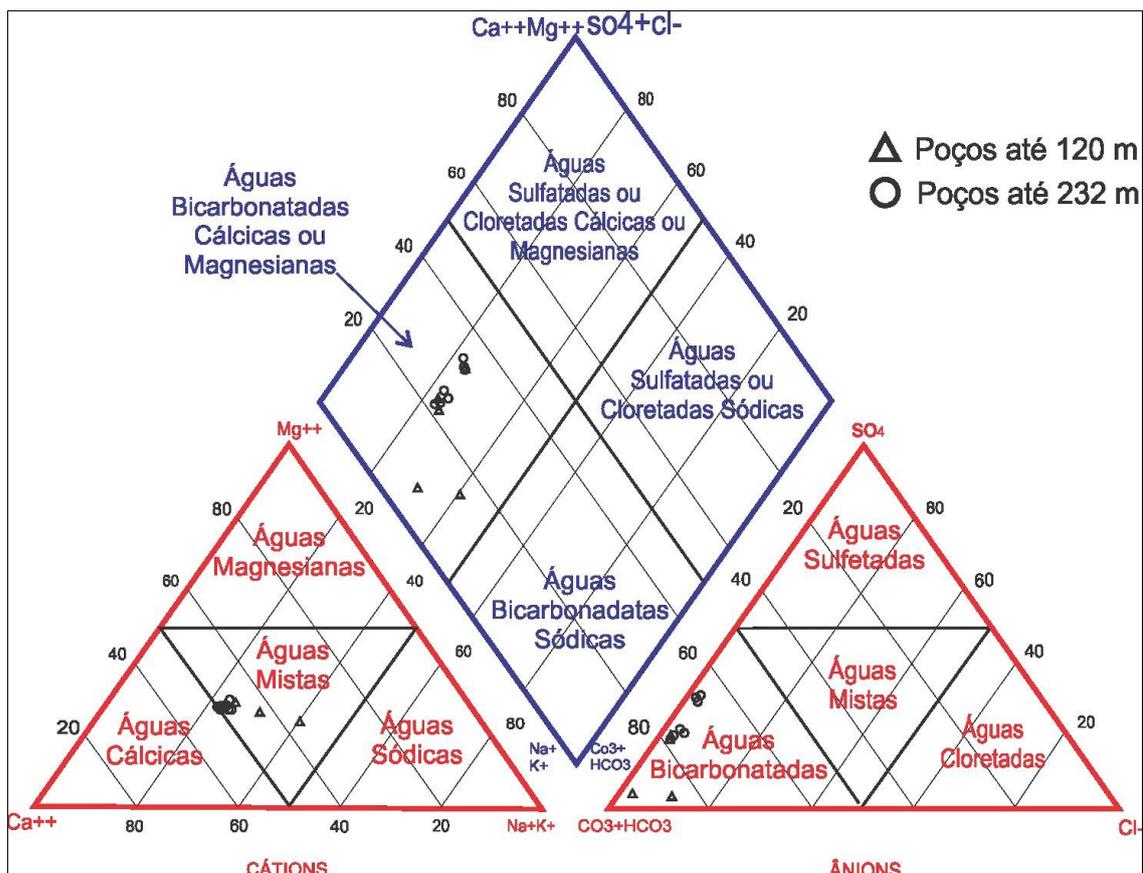
Pita *et al.* (2018) indicaram que a predominância do bicarbonato e os consequentes valores mais altos de  $\text{HCO}_3^-$  se devem à atuação dos processos de recarga, com a dissolução de  $\text{CO}_2$  do solo, que ocorre nos horizontes mais rasos do aquífero, podendo indicar a presença de águas 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  $\text{CO}_2$  (Freeze e 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 ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) que forma pequenas quantidade quando o dióxido de carbono se dissolve na água, em intervalos entre 6,5 a 10 ocorre preferencialmente os bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), e por fim na faixa de pH acima de 10 pode ocorrer a espécie em forma de íons carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (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.



**Figura 6:** Mapa de concentração dos principais ânions Cl<sup>-</sup>(mg/L), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/L) nos poços com profundidade de 120 metros e nos poços de 150 a 232 metros, na área urbana de Manacapuru - AM.

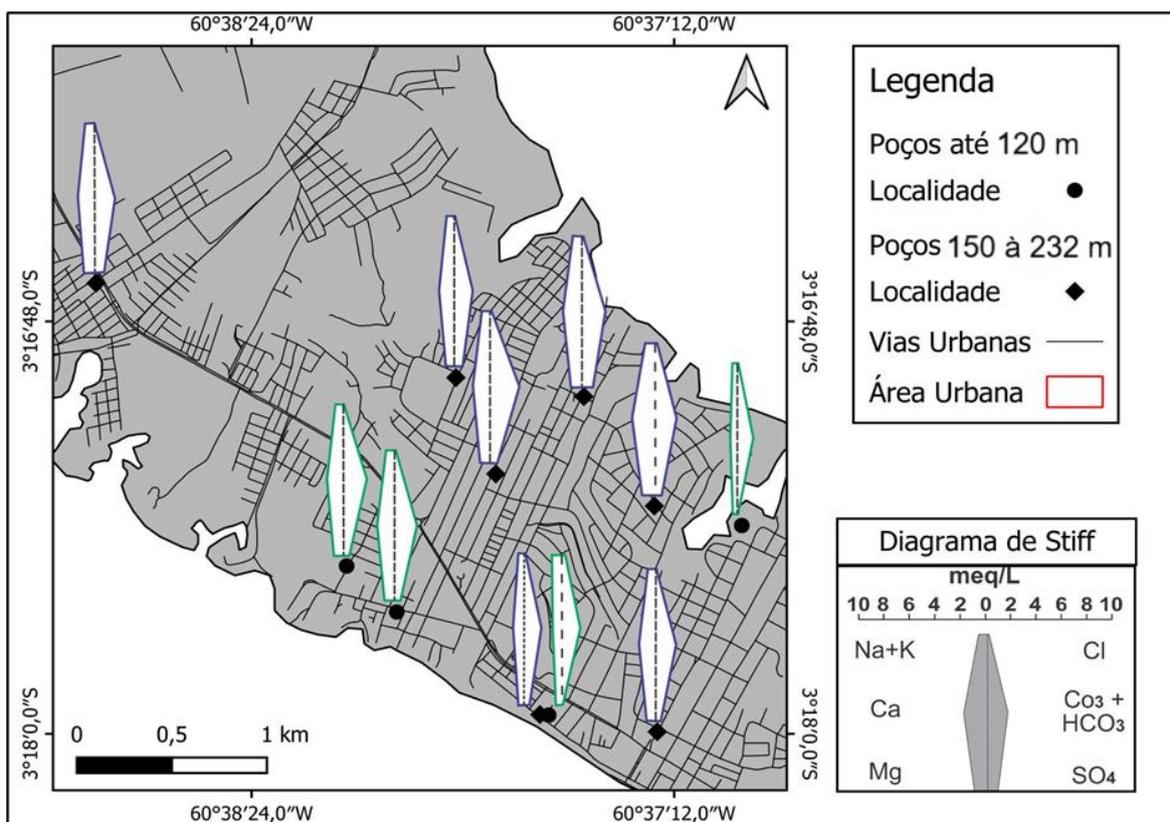
Todas as amostras são classificadas como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas pelo diagrama de Piper (Figura 7). Mas a concentração de cálcio é superior à de magnésio (Tabela 3), o que permite classificar as amostras como cálcicas. Amostras de poços com profundidade entre 150 a 232 m apresentaram maiores 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.

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 cordo com as profundidades dos poços de 60 a 120 metros e de 150 a 232 metros na zona urbana do município de Manacapuru.

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  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ . O cálcio ( $\text{Ca}^+$ ) foi o cátion predominante em nove das onze amostras, sendo elas; Padres, Terra Preta II, PT Terra Preta, Átila Lins, 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 ( $\text{Na} + \text{K}$ ), apresentando características químicas homogêneas.



**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: Padres, Átila Lins, São José, Novo Manacá, Palinha, União I e Idam II na zona urbana do município de Manacapuru – AM.

## CONCLUSÕES

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.

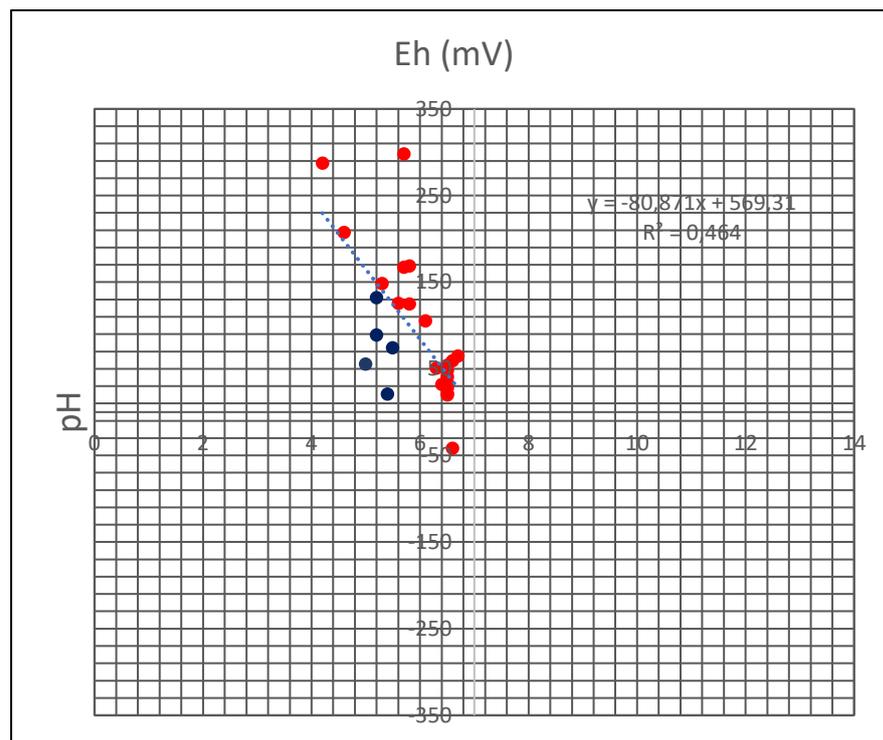
O cálcio, potássio e o sulfato foram os íons que apresentaram maiores concentrações com o aumento das profundidades dos poços, novamente indicando que a circulação mais longa e o maior tempo de residência da água favorecem o aumento de suas concentrações. As regiões com as maiores concentrações desses 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  $\text{CO}_2$  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.

Na figura 14 é possível observar a relação entre o pH e o Eh. A capacidade catalítica das bactérias é conferida pela atividade das enzimas que possuem. Estas

enzimas são substâncias proteicas produzidas por microrganismos vivos que possuem a capacidade de aumentar a taxa das reações redox por reduzirem a energia de ativação das reações. Processos biológicos, envolvendo a ação de ferrobactérias, e concentrações alta de ferro e manganês, são comuns nas regiões de várzea do rio Solimões (Azevedo, 2006).

Os valores de pH nas amostras variaram entre 4,2 a 6,8, ficando próximo a neutralidade. De acordo com Pita et al. (2018), essas diferenças de pH podem indicar um ambiente hidrogeoquímico distinto quando relacionada a composição mineralógica, ocorrendo influência variável das águas meteóricas em cada área de estudo, além disso os processos de interação água, rocha e a rápida recarga do aquífero pode influenciar as características físico-químicas das águas subterrâneas. No entanto os dados de pH e Eh não apresentaram boa correlação ( $r^2= 0,445$ ) quando relacionada a profundidade dos poços, o pH dos piezômetros apresentaram caráter mais ácido, enquanto os de poços acima de sessenta metros apresentaram caráter mais alcalino, o que pode ter influenciado diretamente a correlação das duas variáveis à medida que os poços encontram se em grandes profundidades.



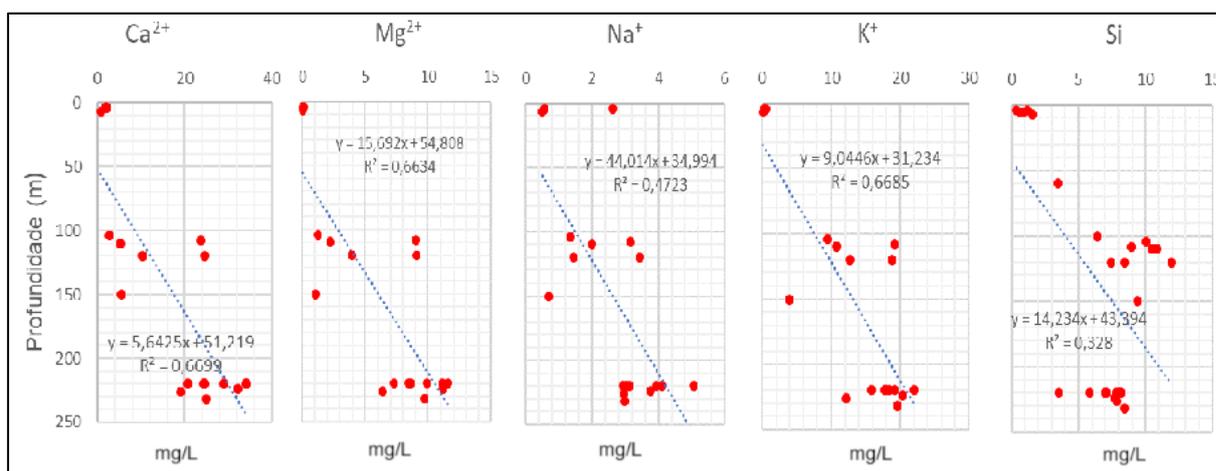
**Figura 14:** Gráfico de dispersão pH x Eh indicando a correlação entre com profundidade dos poços (vermelho) e piezômetros (azul).

A representação hidroquímica dos principais íons cátions e sílica das águas subterrâneas da área urbana do município de Manacapuru estão representados na figura 16. A representação hidroquímica dos principais íons cátions e sílica das águas subterrâneas da área urbana do município de Manacapuru estão representados na figura 19. Os íons  $\text{Ca}^{2+}$  ( $R^2= 0,67$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  ( $R^2= 0,66$ ),  $\text{K}^+$  ( $R^2= 0,66$ ) apresentaram boa correlação com a profundidade dos poços.

O cátion de maior concentração das águas subterrâneas de Manacapuru foi o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), seguido pelo sódio ( $\text{Na}^+$ ), o potássio ( $\text{K}^+$ ) e em menores concentrações o magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Alguns minerais como halita e os feldspatos podem liberar íons de sódio nas águas subterrâneas, que pode ser retido por adsorção em superfícies minerais, especialmente por minerais com alta capacidade de troca catiônica, como as argilas que foram encontradas em análise de sedimentos na região de Manacapuru (Nascimento, no prelo). Pita et. al (2018) mostraram influência química de argilominerais e minerais silicáticos, como caulinita, mica potássica (muscovita) e montmorillonita cálcicas, o que explica as concentrações de cálcio e sódio serem mais

elevadas quando comparadas com os demais cátions analisados. A sílica apresentou boa correlação ( $R^2= 0,817$ ) em função da profundidade (figura 15).

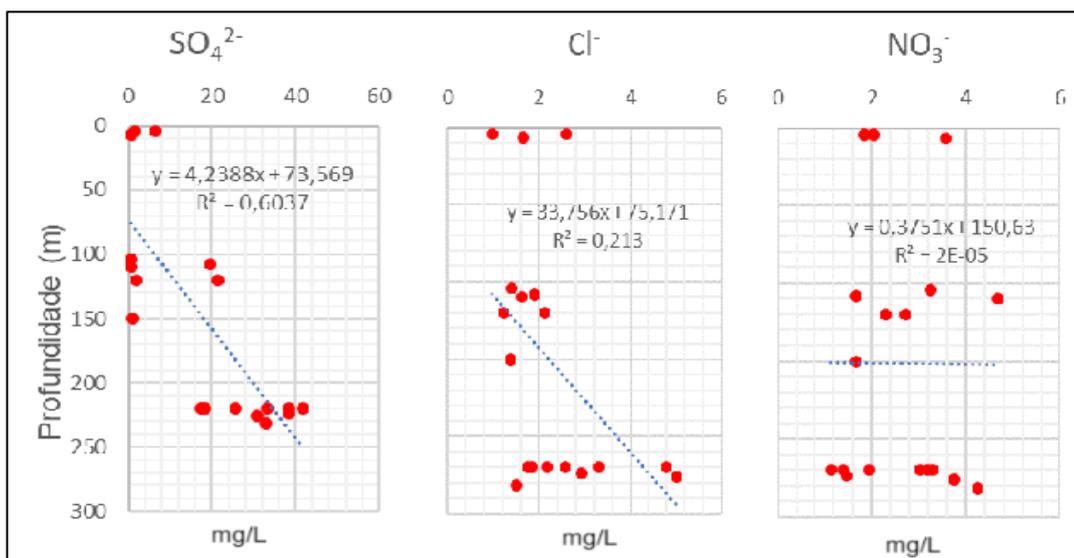
A liberação de sílica nas águas dessa região pode estar relacionada ao intemperismo químico e físico e a interação entre água-rocha/solo dos minerais como o quartzo, a caulinita e gipsita, que foram minerais encontrados nas análises de sedimentos dos poços de Manacapuru (Nascimento, no prelo). O  $\text{CO}_2$  promove a transição da sílica em solução, a presença de minerais que contêm alumínio (caulinita) na água pode causar a desintegração e retenção da sílica solúvel, mesmo que em baixa concentração, o alumínio pode aumentar em quantidade significativa a sílica precipitada sob a forma coloidal (LAZERENNI E BONOTTO; 2014).



**Figura 15:** Gráficos de correlação entre os principais íons cátions e sílica e a profundidade para a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas da área urbana de Manacapuru - AM.

Os principais íons ânions analisado na área urbana de Manacapuru (figura 16) em relação a profundidade foram o  $\text{Cl}^-$  ( $R^2= 0,241$ ),  $\text{NO}_3^-$  ( $R^2= 0,002$ ) e  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $R^2= 0,614$ ). Os dados de cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) não apresentaram boa correlação quando comparada com a profundidade. Portanto, não há diferenças significativas entre águas superficiais e profundas. Se houvesse contaminação por fossa, por exemplo, os valores nas porções rasas do aquíferos tenderiam a ter uma concentração maior destes ânions do que as profundas. Como não é o caso, pode se afirmar que não foram encontrados indícios de contaminação nos pontos estudados.

Em relação ao sulfato apresentou uma boa correlação, a presença de sulfatos na água subterrânea pode ter várias causas, incluindo a geologia local, o tipo de rocha ou depósito em que a água está interagindo e fatores hidrogeológicos, minerais como a gipsita encontrada nas análises de sedimentos na região de Manacapuru podem liberar sulfatos na água, devido sua concentração de sulfato de cálcio hidratado.



**Figura 16:** Gráficos de correlação entre os principais íons ânions e a profundidade dos poços para a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas da área urbana de Manacapuru - AM.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 íons cátions como de ânions, quando comparados com os poços de até 120 m de profundidade e piezômetros. Em termos hidroquímicos e hidrogeológicos podem estar relacionados à circulação mais profunda de água, e de água mais antiga. Com isso, há mais tempo para a atuação do intemperismo contribuindo para a maior dissolução dos minerais. As amostras são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, com condutividade elétrica superior a  $200 \text{ uS/cm}^{-1}$ . Além disso a presença do cálcio, sendo os íons cátions predominante nas águas dessa região tem relação direta com os minerais encontrados nos sedimentos como a gipsita e a profundidades dos poços acima de 150 metros, ocorrendo uma maior mineralização. No grupo dos ânions os bicarbonatos foram predominantes nas análises de água dos poços mais rasos, isso correm devido aos processos de recarga, e com a dissolução de  $\text{CO}_2$  do solo, que ocorre nos horizontes mais rasos do aquífero, podendo indicar a presença de águas originadas na recarga recente. Este estudo indica ainda conclusões para efeitos para melhoria da qualidade das águas para consumo, pelos mapas de concentrações é possível direcionar estudos de previsibilidade de possíveis contaminantes, como o próprio nitrato que foram encontradas em concentrações em nível moderado nos poços União II, Vale Verde, Idam e Figueirinha, podendo ser uma estratégia adotada pelo Sistema Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) do município de Manacapuru, para evitar possíveis contaminação dessas águas. Assim, é importante que seja feito o monitoramento e acompanhamento através de novos estudos para pesquisar as possíveis fontes de nitrato, e ficarem atentas à potencial presença de bactérias, não estudadas no presente trabalho.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO (Brasil). Governança das águas subterrâneas: desafios e caminhos / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico / Pilar Carolina Villar Ricardo Hirata; José Luiz Albuquerque ; Ana Maciel de Carvalho. – Brasília: ANA, 2022. 202 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **Atlas águas e segurança hídrica do abastecimento urbano**. Brasília, 2021
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP, (2021). Publicação dos dados de Reserva de Petróleo e Gás Natural do Brasil. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/oferta-permanente/opc/arquivos/sg/amazonas.pdf>>. Acessado em: 21 de abril de 2022.
- AGUIAR, C. J. B.; MOURÃO, M. A. A. Relatório diagnóstico aquífero Alter do Chão no Estado do Amazonas. **Bacia sedimentar do Amazonas, CPRM**, v. 6, 2012.
- ALIEVI, Alan Alves; PINESE, José Paulo P.; CELLIGOI, André. Espacialização de concentrações hidrogeoquímicas na água subterrânea da 17ª regional de saúde de Londrina-PR. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 51, 2021.
- APHA, Awwa. WPCF, Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA, 1999.
- BAIRD, R. B., Eaton, A. D., & Clesceri, L. S. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington, DC: American public health association, 2017.
- BARBOSA, S. I. Análise dos parâmetros físico-químicos e metais presentes nas nascentes do Rio Meia Ponte. 2015. Dissertação de Mestrado, PUC/Góias.
- BARELLA, C. F. **Avaliação de indicadores geoquímicos no processo natural de atenuação da fração orgânica do percolado na região do aterro sanitário de Belo Horizonte—MG**. 2011. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.
- BERTOLO, Reginaldo Antonio; HIRATA, Ricardo; FERNANDES, Amélia. Hidrogeoquímica das águas minerais envasadas no Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 3, p. 515-529, 2007.
- BONOTTO, D. M.; MANCINI, L. H. (1992). Estudo hidroquímico e isotópico dos aquíferos de Rio Claro (SP). *Geochimica Brasiliensis*, v. 6, n. 2, p. 153-167.
- BRASIL, ILSI. FUNÇÕES PLENAMENTE RECONHECIDAS DE NUTRIENTES. 2009.

- BUENO, P. Caracterização e aplicação de catalisadores sólidos a base de titanato de alumínio dopado com érbio na hidrólise de ésteres de fosfato 2014. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- CAMPOS, J. C. (2003). A problemática dos recursos hídricos subterrâneos na Amazônia na visão do Serviço Geológico do Brasil-CPRM. **Águas Subterrâneas**, 2003.
- CAPUTO, Mário Vicente. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. Tese de Doutorado University of California, Santa Barbara, 1984.583 p.
- CÁUPER, G. C. D. B. A influência das atividades de exploração de petróleo e os impactos ambientais e socioeconômicos na cidade de Coari. **Manaus: UA**, 2000.
- COMPREHENSIVE ENVIRONMENTAL RESPONSE, COMPENSATION AND LIABILITY ACT (CERCLA)*. Priority List of Hazardous Substances. U.S. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2017. Disponível em: . Acesso em: 14. Mar. 2018.
- COOK, P. Introduction to isotopes and environmental tracers as indicators of groundwater flow. **The Groundwater Project**, 2020.
- CRAIG, H. 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural Waters. *Science*, 133: 1833-1834.
- DA CRUZ CUNHA, Paulo Roberto; GONÇALVES DE MELO, J. H.; DA SILVA, Osvaldo Braga. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 15, p. 227-251, 2007.
- CUSTODIO, Emilio; LLAMAS, Manuel Ramon. **Hidrología subterránea**. Barcelona: Omega, 1983.
- D'ANTONA, R. J. G.; REIS, N. J.; ARAÚJO, I. B.; MAIA, M. A. M.; ROSA, S. F.; NAVA, D. B. (2007). Projeto materiais de construção da área Manacapuru – Iranduba – Manaus – Careiro: Domínio Baixo Solimões. Informe de Recursos Minerais, Rochas e Minerais Industriais. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Manaus.
- DA PROVÍNCIA HIDROGEOLOGICA, Sedimentares. **Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil** (escala 1: 1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1: 50.000). 2015.
- DA SILVA, M. L., & DA CUNHA BRANDAO, H. Características hidroquímicas das águas subterrâneas da cidade de Manacapuru-Amazonas-Brasil. **Águas Subterrâneas**, 2011.
- DA SILVA, Márcio Luiz; BONOTTO, Daniel Marcos. Caracterização hidrogeoquímica na Formação Alter do Chão, município de Manaus (AM). **Águas Subterrâneas**, 2000.
- DE MEYER, C. M., Wahnfried, I., Rodriguez, J. M. R., Kipfer, R., Avelino, P. A. G., Deza, E. A. C., & Berg, M. Hotspots of geogenic arsenic and manganese contamination in groundwater of the floodplains in lowland Amazonia (South America). **Science of the Total Environment**, v. 860, p. 160407, 2023.

- ELLWOOD, R. et al. (2011). Flúor no controle da cárie. In: Fejerskov, O.; Kidd, E. Cárie Dentária: A doença e seu tratamento clínico. São Paulo: Editora Santos, p. 287-323.
- FERNANDES NETO, L. A. (2018). Avaliação de contaminações geogênicas em aquíferos na Bacia do rio Negro - AM. Trabalho Final de Graduação (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus.
- FILGUEIRAS, Conceição Maria et al. Caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas da Ilha de Boipeba litoral da Bahia, Brasil. 2016.
- FRAZÃO, Paulo; NARVAI, Paulo Capel. Cobertura e vigilância da fluoretação da água no Brasil: municípios com mais de 50 mil habitantes. 2017.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, John A. Água subterrânea. **Instituto Água Sustentável: Sao Paulo, Brazil**, 2017.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. Manual de fluoretação da água para consumo humano. Funasa; (2012). Disponível em: [http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files\\_mf/mnl\\_fluoretacao\\_2.pdf](http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/mnl_fluoretacao_2.pdf). Acesso em: 03 de maio 2020.
- GALVÃO, F.H. P. **Caracterização hidrogeológica dos aquíferos da formação Solimões na base operacional geólogo Pedro de Moura, província petrolífera de Urucu (AM)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2011.
- GONÇALVES, C., CRUZ, L. T. M., & SILVÉRIO, P. F. Soluções rastreáveis e estáveis para determinação de oxigênio dissolvido em águas subterrâneas: Melhoria da qualidade técnica dos resultados de campo. **Águas Subterrâneas**, 2009.
- GONÇALVES, M. A., Soares, J. L., Santos, H. P., & Nogueira, A. C. R. Traços Fósseis dos depósitos marinhos rasos da Formação Pitinga, Siluriano superior da Bacia do Amazonas, rio Tapajós, PA, Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 20, n. 2, p. 179-194, 2017.
- HEM, J. D. **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**. Department of the Interior, US Geological Survey, 1985.
- HIRATA, R. Recursos Hídricos. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (2003). Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos. p. 422-444.
- HIRATA, R., Suhogusoff, A. V., Marcellini, S. S., Villar, P. C., & Marcellini, L. As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. 2019.
- IAEA, USGS, 2013. A Laboratory Information Management System for Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Water Samples by Laser Absorption Spectroscopy: User Manual and Tutorial. Revision v 1.5.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, (2022). *População estimada*: Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente com data de referência 1 de julho de 2022.

Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/manacapuru/panorama>. Acesso em: 23 de agosto de 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am/manacapuru.html>. Acessado em: 31 de julho de 2022.

JUNIOR, Falik Reis Pereira. ANÁLISE DOS ASPECTOS MECÂNICOS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM MANACAPURU-AM: ESTUDO DE CASO.

KIANG, Chang Hung et al. Tipos hidroquímicos do sistema aquífero Bauru no estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v. 30, n. 2, p. 224-245, 2016.

KHOURY ASFORA, Viviane. **Fluorescência de Raios X por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

LEITE, Fátima Praxedes Rabelo. Palinologia da formação Solimões, neógeno da Bacia do Solimões, Estado do Amazonas, Brasil: implicações paleoambientais e bioestratigráficas. 2006.

MANASSES, Fabio. Caracterização hidroquímica da água subterrânea da formação Serra Geral na região sudoeste do Estado do Paraná. 2009.

MATHEUS, J. G. M. (2017). Análise de contaminações em águas subterrâneas nas regiões de Manaus e Humaitá/AM. Trabalho Final de Graduação (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

MATTOS, Jonatas Batista et al. Tipologia hidrogeoquímica e qualidade das águas subterrâneas na área urbana do município de Lençóis, Bahia, Nordeste do Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 3, p. 281-295, 2017.

MENDES, Anderson Conceição; TRUCKENBRODT, Werner Hermann Walter; NOGUEIRA, Afonso César Rodrigues. **Análise faciológica da Formação Alter do Chão (Cretáceo, Bacia do Amazonas), próximo à cidade de Óbidos, Pará, Brasil**. 2012.

MOTTA, Marcelo Batista. Proveniência da Formação Içá e de sedimentos do Rio Solimões, entre os municípios de Tefé e Manacapuru, Amazonas. 2008.

NAKAEMA, W. M. *Espectroscopia de cavidade ressonante tipo ring-down supercontinuum resolvida no tempo para detecção de multicomponentes gasosos*. 2010. 102 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NASCIMENTO, Gerson Flôres. Construção e mapeamento de índice de qualidade de águas subterrâneas em Porto Velho. 2017.

NASCIMENTO, Willian Barros do, *Avaliação da Relação Entre Geoquímica e Hidroquímica de Água Subterrânea na Região de Manacapuru/AM*, Dissertação de Mestrado,

Programa de Pós Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, 76 p + Anexos. No prelo.

- NOGUEIRA, A. C. R.; VIEIRA, L. C.; SUGUIO, K. (1999). Paleossolos da Formação Alter do Chão, Cretáceo-Terciário da Bacia do Amazonas, regiões de Presidente Figueiredo e Manaus. In SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 5, Serra Negra, Resumos. Serra Negra, v. 1, p. 261-266.
- NOGUEIRA, E. H. Gênese do depósito polimetálico Sn (W, Zn, Cu, Pb) Morro Potosi, Rondônia. 2019.
- OLIVEIRA, Raimundo Sergio Alves. Variação estacional e anual da precipitação e da temperatura do ar na cidade de Barreirinhas/MA. 2016.
- PACHECO, Paulo Rodrigo da Costa 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. 2017.
- PAUL, J. B.; SAYKALLY, R. J. Cavity ring down laser absorption spectroscopy. **Analytical Chemistry**, v. 69, n. 9, p. 287A-292A, 1997.
- PAVÃO, Andrea Dutra Moreira et al. Avaliação do índice de vulnerabilidade na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria-RS. 2004.
- PIMENTEL, Elizabeth T.; HAMZA, Valiya M. Gradientes Térmicos Crustais das Bacias Sedimentares na Região Amazônica. In: **IV Simpósio Brasileiro de Geofísica**. European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. p. cp-197-00041.
- PIPER, Arthur M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. **EOS, Transactions American Geophysical Union**, v. 25, n. 6, p. 914-928, 1944.
- PITA, R. C., da 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.
- REIS, REIS, N. J., ALMEIDA, M. E., RIKER, S. L., & FERREIRA, A. L. Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas. 2006.
- RIBEIRO, A. O. (2019). Análise de contaminações geogênicas em águas subterrâneas na região de Novo Airão - AM. Trabalho Final de Graduação (Bacharelado em Geologia) Universidade Federal do Amazonas, Manaus.
- RIOS, Ana Paula de Jesus. **Isótopos de O e H na análise de anomalias de bário na região de Marília-SP**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- SANTOS M. M. C. & SOUZA V. S. (2015). Análise geomorfológica da região entre os municípios de Itacoatiara, Silves e Itapiranga, nordeste do estado do Amazonas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, São Paulo, v. 16, n. 4, (Out-Dez) p.631-640.

- SANTOS, Joelmir. Avaliação e aplicação de metodologia da técnica espectrométrica de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF) na caracterização multielementar em particulados sólidos de amostras ambientais. 2016.
- SCHOELLER, H. (1935). Utilité de la notion des échanges de bases pour la comparasion des eaux souterraines. Société Géologie Comptes Rendus Sommaire et Bulletin Série 5(5): 651-657.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM, (2020). Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Gestao-da-Informacao-Hidrogeologica/Saiba-Mais---Sistema-de-Informacoes-de-Aguas-Subterraneas-SIAGAS-6596.html>. Acessado em: 12 de outubro de 2021.
- SILVA, A. J. P., LOPES, R. C., VASCONCELOS, A. M., BAHIA, R. B. C. (2003). Bacias Sedimentares Paleozoicas e Meso-Cenozoicas Interiores. In: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti, J. H. Gonçalves (Eds.) Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- SILVA, M. L. (2005). Estudo hidroquímico e dos isótopos de urânio nas águas subterrâneas em cidades do estado do Amazonas. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP.
- SILVA, Ricardo Sierpe Vidal. Geotecnologia aplicada à especialização da hidrogeoquímica de aquíferos granulares na bacia sedimentar do Parnaíba no estado do Piauí. 2018.
- SILVA, Jeffer Haad Ruiz da et al. Estudo geoquímico da associação entre fluoreto encontrado na água, no solo e sedimentos de Manacapuru-AM. 2022.
- SOARES, Alice Dutra. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas do município de Osório, RS. 2016.
- 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. 2013.
- SPERLING, M. V. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. 3ª. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. I, 2005.
- STIFF JR, Henry A. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. **Journal of petroleum technology**, v. 3, n. 10, p. 15-3, 1951.
- STRADIOTO, Marcia Regina; TERAMOTO, Elias Hideo; CHANG, Hung Kiang. Nitrato em águas subterrâneas do estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico (Descontinuada)**, v. 40, n. 3, p. 1-12, 2019.
- TELES, Danilo Ribeiro de Sá. Caracterização isotópica de água de formação de um campo de petróleo da bacia do recôncavo. 2010.

- TUNDISI, José Galizia. Recursos hídricos no Brasil: problemas, desafios e estratégias para o futuro. **Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências**, v. 76, 2014.
- UCKER, F. E.; UCKER, A. P. F. B. G.; KEMERICH, P. D. C.; HRAGUICHI, M. T. SANTOS, F. C. V.; BORBA, W. F. Avaliação das alterações de oxigênio dissolvido e temperatura no Arroio Esperança. *Revista Monografias Ambientais*, v. 13, n. 1, p. 2982-2987, 2014.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. Groundwater sampling, (2013). Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/201506/documents/Groundwater-Sampling.pdf>. Acesso em: 11 de outubro de 2021.
- VARNIER, Claudia et al. Nitrato nas águas subterrâneas: desafios frente ao panorama atual. **São Paulo: SIMA/IG**, v. 99, 2019.
- VASCONCELOS, Maiana Azevedo; DE OLIVEIRA, Iara Brandão. Caracterização preliminar da qualidade da água subterrânea no estado da Bahia quanto aos teores de sulfato. *Águas Subterrâneas*, 2016.
- VIEIRA, L.C. (1999). Depósitos fluviais da Formação Alter do Chão, Cretáceo-Terciário da Bacia do Amazonas. Trabalho Final de Graduação (TFG), Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 62 p.
- WAHNFRIED, I.; SOARES, E. A. A. Água subterrânea na Amazônia: Importância, estado atual do conhecimento e estratégias de pesquisa. **Revista Ciência e Ambiente**, v. 44, p. 30-40, 2012.
- WINKEL, Lenny 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.
- ZENARO R. Contribuição ao estudo da migração de urânio e alguns elementos traço em solução na mina de urânio de Poços de Caldas. 1989. Dissertação de Mestrado, PUC/RJ 52p.