

Artigo de Pesquisa**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA E DE QUALIDADE DA
ÁGUA DE POÇOS TUBULARES EM ALDEIAS INDÍGENAS NA
REGIÃO DA AMAZÔNIA CENTRAL****Hydrogeochemical and water quality characterization of tube wells in
indigenous villages in the Central Amazon Region**

Consuelo Andrade Simões Clebsch¹, Keila Cristina Pereira Aniceto², Ingo Daniel Wahnfried³, Rodrigo Tokuda Castro⁴, Leylane Araujo Correa Lima⁵, Rita Mileni de Souza Lima⁶, Tereza Cristina Souza de Oliveira⁷

¹ Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, Brasil.

E-mail: consueloclebsch@yahoo.com.br

 <https://orcid.org/0009-0003-8450-3966>

² Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, Brasil.

E-mail: keilaniceto@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-8258-1328>

³ Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, Brasil.

E-mail: iwahnfried@ufam.edu.br

 <https://orcid.org/0000-0002-3427-9447>

⁴ Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, Brasil. E-mail: castrortokuta@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5698-9178>

⁵ Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geociências, Manaus, Brasil.

E-mail: leylaneanraujo@ufam.edu.br

 <https://orcid.org/0009-0000-7451-4328>

⁶ Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Ciências Agrárias, Manaus, Brasil.

E-mail: ritamileni@ufam.edu.br

 <https://orcid.org/0009-0002-7053-8642>

⁷ Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Química, Manaus, Brasil.

E-mail: terezacristina@ufam.edu.br

 <https://orcid.org/0000-0001-6103-5192>

Recebido em 23/03/2023 e aceito em 06/01/2024

RESUMO: Apesar da abundância de água superficial na região amazônica, sua população utiliza predominantemente o recurso subterrâneo. No Amazonas, as águas subterrâneas são única fonte de

água em 71% das sedes municipais. Das 276 aldeias cadastradas no Distrito Sanitário Especial Indígena de Manaus (DSEI-MAO) até 2022, 7,6% possuem sistemas de abastecimento de água provenientes de poços profundos. Com o objetivo de avaliar os padrões de qualidade de água preconizados pela legislação brasileira vigente, este estudo apresenta resultados obtidos a partir das águas de três poços tubulares localizados em áreas rurais autodenominadas como indígenas. Foram realizadas análises de pH, Condutividade Elétrica (CE), Sólidos Totais Dissolvidos (STD), elementos maiores Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} e SO_4^{2-} e traços Al, As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Ni e Zn e coliformes totais e *Escherichia coli*. Os valores de pH (5,4-6,6) e CE (18,1-106 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) encontrados estão dentro das faixas observadas em estudos anteriores. Os resultados analíticos dos períodos sazonais são típicos de águas fracamente mineralizadas, com variação na classificação química de potássica sulfetada para cálcica cloretada em um dos poços. A sequência de abundância dos cátions é $\text{K} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg}$, com o K^+ apresentando concentrações maiores que os demais cátions (até 5,1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), o que é incomum devido à sua baixa mobilidade geoquímica. Por outro lado, as concentrações de SO_4^{2-} são mais elevadas do que em estudos anteriores (até 9,8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). De modo geral, as águas mostram-se próprias para o consumo humano e não apresentam indícios de contaminantes.

Palavras-chave: Água subterrânea; Potabilidade; Bacia do Rio Negro.

ABSTRACT: Despite the abundance of surface water in the Amazon region, the population predominantly relies on underground resources. In Amazonas, groundwater is the sole water source in 71% of municipal headquarters. Among the 276 registered villages in the Special Indigenous Health District of Manaus (DSEI-MAO) until 2022, 7.6% have water supply systems sourced from deep wells. With the aim of assessing water quality standards prescribed by current Brazilian legislation, this study presents results obtained from three tubular wells located in self-designated indigenous rural areas. Analyses included pH, Electrical Conductivity (EC), Total Dissolved Solids (TDS), major elements Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , and SO_4^{2-} , as well as trace elements Al, As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Ni, and Zn, and total coliforms and *Escherichia coli*. The pH (5.4-6.6) and EC (18.1-106 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) values found fall within the ranges observed in previous studies. Analytical results from seasonal periods indicate water with low mineralization, with a shift in chemical classification from sodium sulfide to calcium chloride in one of the wells. The cation abundance sequence is $\text{K} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg}$, with K^+ concentrations higher than other cations (up to 5.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), an uncommon occurrence due to its low geochemical mobility. Conversely, SO_4^{2-} concentrations are higher than in previous studies (up to 9.9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Overall, the water appears suitable for human consumption and shows no signs of contaminants.

Keywords: Groundwater; Potability; Rio Negro Basin.

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país privilegiado no que se refere a recursos hídricos. De acordo com os estudos da Agência Nacional de Águas (OCDE, 2015), possui 12% das reservas mundiais de água doce e 53% das reservas da América do Sul. Dados mais atuais estimam que a disponibilidade hídrica superficial no Brasil está em torno de 78.600 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, sendo que 83% correspondem à contribuição da Bacia Amazônica (ANA, 2018).

Apesar da grande disponibilidade de água superficial, a população da região utiliza predominantemente o recurso subterrâneo. Levantamento realizado pela ANA (2021) demonstra que 57% sedes e 27% da população urbana da região norte são abastecidas exclusivamente por manancial subterrâneo. No Amazonas, as águas subterrâneas são a fonte exclusiva de água em 71% das sedes municipais do estado

(ANA, 2021). Entre as principais razões para o intenso uso do manancial subterrâneo, estão a forte sazonalidade e ocorrência de eventos extremos (PITA et al., 2018), pois trazem consequências graves para os ribeirinhos, como perda de casas, animais e plantações, além de problemas com abastecimento de água potável (WAHNFRIED & SOARES, 2012). Poços podem ser fontes mais econômicas de água, uma vez que sendo construídos de forma adequada permitem o acesso a água de qualidade durante todo o ano, evitando o abastecimento de água de outras fontes.

Diversos fatores estão intrinsecamente relacionados à alteração da qualidade da água subterrânea por ação antrópica. A ausência de saneamento básico é a principal responsável, uma vez que o vazamento em redes de esgoto, deposição inadequada de resíduos oriundos de fontes diversas, estão entre as formas recorrentes de poluição bacteriológica e físico-química de nitratos, metais e outros compostos (TUCCI & CABRAL, 2013). Além da falta de tratamento de efluentes domésticos e industriais, a disposição inadequada de resíduos sólidos (urbanos e industriais), os postos de combustíveis e o uso de defensivos agrícolas representam fontes de contaminação das águas subterrâneas por bactérias e vírus patogênicos, parasitas e substâncias orgânicas e inorgânicas. Outro fator importante é a perfuração de poços tubulares fora das normas construtivas. As obras devem seguir as normativas brasileiras NBR 12212/06 e NBR 12244/06 para evitar a contaminação dos meios aquíferos.

O cadastro do Distrito Sanitário Especial Indígena de Manaus (DSEI-MAO), mostra a existência de 276 aldeias, das quais apenas 48 (17,40%) possuem sistemas de abastecimento de água composto por captação de poços profundos, reservatórios e redes hidráulicas, das quais apenas 28 possuíam tratamento com adição de cloro, efetuado por um agente indígena de saneamento (AISAN), sob orientação da equipe de saneamento distrital. Porém, das 228 aldeias restantes, duas (0,72%) possuem Sistema de Abastecimento de Água Superficial, oito (2,90%) possuem Solução Alternativa Coletiva de Abastecimento de água para Consumo Humano - Superficial e 21 aldeias (7,60%) possuem Solução Alternativa Coletiva de Abastecimento de água para Consumo Humano - Subterrânea. Os Sistemas Alternativos Coletivos (SAC) geralmente são por captação direta do rio principal, igarapés e/ou lago da aldeia com bomba submersa ou ainda são abastecidas por meio SAI (Sistemas Alternativos Individuais), como cacimbas e tratadas por cada família indígena com solução de hipoclorito de sódio (SESAI/MS, 2022). Esta abordagem é inédita em aldeias indígenas da região da Amazônia Central, visto que não havia sido realizado nenhum estudo ou controle até ser implantado o programa de monitoramento da qualidade da água efetivo para estes povos, que consiste em análises químicas, físico-químicas e bacteriológicas.

A qualidade da água é uma necessidade global, sobretudo quando relacionada ao consumo humano. E isso exige um cuidado especial por parte das autoridades sanitárias e consumidores (BRUZANELLO et al., 2008). Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal a caracterização hidrogeoquímica e qualidade natural das águas de poços tubulares em três áreas indígenas da etnia Sateré-Mawé/Cambéba para verificar se são próprias para o consumo humano.

MATERIAIS E MÉTODOS

Acesso, aspectos geológicos, hidrogeológicos e climáticos

A área de estudo situa-se a 62 Km em linha reta de Manaus, cujo acesso é realizado pelo rio Negro de duas formas: 1) Barco regional com duração de 5h, as saídas são diárias às 11h e chegada 18h; 2) Lancha do DSEI Manaus com motor 115 hp, aproximadamente 2h30” até a aldeia Nova esperança. As distâncias entre as aldeias são de aproximadamente 30 minutos. A área de estudo localiza-se na Amazônia Central, que está inserida na Bacia Sedimentar do Amazonas (Figura 1), onde ocorrem as Formações geológicas Alter do Chão (Cretáceo) e Novo Remanso (Neógeno). Ambas formações são recobertas por depósitos fluviais quaternários distribuídos predominantemente ao longo das calhas dos rios, áreas lacustres e planícies aluviais (ROSSETTI et al., 2005; CPRM, 2006; SOARES, 2007; SOARES et al., 2010). A Formação Novo Remanso refere-se aos depósitos siliciclásticos sobrepostos discordantemente de forma irregular às rochas cretáceas da Formação Alter do Chão nas proximidades de Manaus (ROZO et al., 2005, SOARES et al., 2016). Esta unidade possui uma espessura média de 30 m, e é constituída principalmente por camadas de arenitos ferruginosos grossos e arenitos finos a médios, moderadamente selecionados, com estratificação cruzada tabular, em ciclos granodecrescentes ascendentes capeados por argilitos maciços, laminados e mosqueados (SOARES et al., 2016). A sucessão foi interpretada como depósitos arenosos de canal e sedimentos de planície de inundação ou de canal abandonado, relacionados a sistema fluvial meandrante (ROZO et al., 2005; SOARES, 2007; DINO et al., 2012). Já a Formação Alter do Chão apresenta espessura variando de 50 a 600 m (HOORN et al., 2010), sendo composta por arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados (CAPUTO, 1984). Distribuídos ao longo de sua espessura ocorrem níveis silicificados, denominados de “Arenitos Manaós” por ALBUQUERQUE (1922), mas que podem ser compostos por granulometria argilosa a arenosa. A existência de barras conglomeráticas, de acreção lateral e formas de leito arenosas levaram vários autores a determinar a origem da Formação Alter do Chão como sendo fluvio-lacustre (CAPUTO et al., 1971; DINO et al., 1999; NOGUEIRA et al., 1999; CUNHA et al., 2007), mas a presença de Fácies de preenchimento de canal e de depósitos externos ao canal (planície de inundação, canal de crevasse e diques marginais), levaram MENDES et al. (2012) a associar os depósitos a um sistema fluvial meandrante.

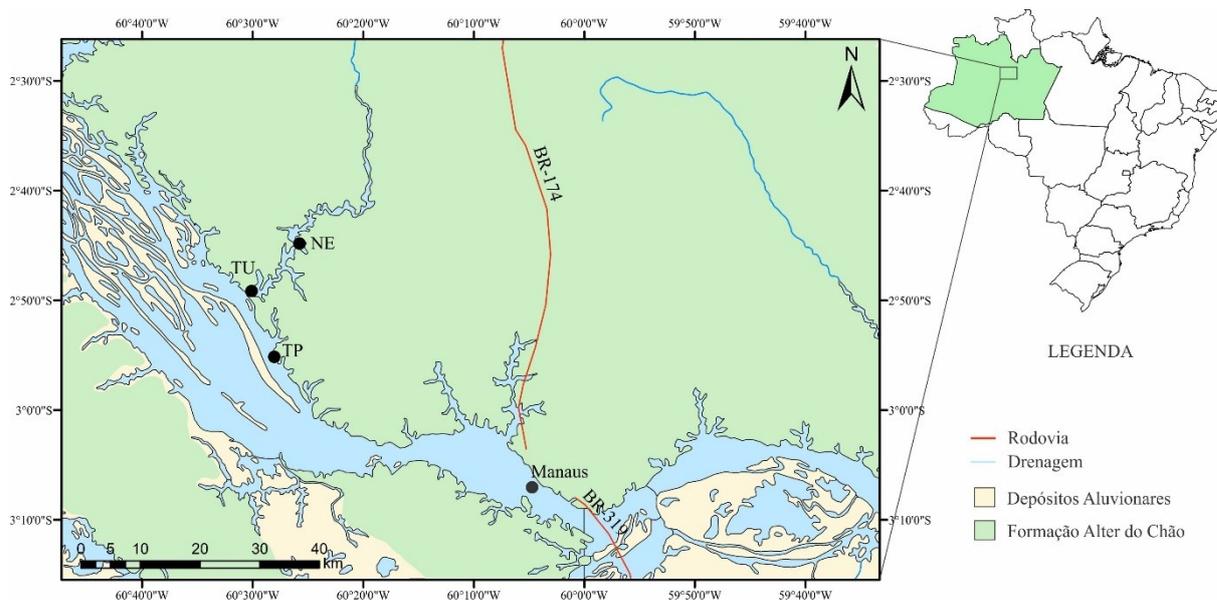


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e pontos amostrados. **Fonte:** Modificado do CPRM (2006).

Sob o aspecto hidrogeológico, a área de estudo está inserida no Sistema de Aquífero Alter do Chão (AAC), que é do tipo livre a confinado com um volume de água estimado em 33.000 km^3 , representado por intercalações de arenitos, argilitos, siltitos e subordinadamente conglomerados; com valores de transmissividade (T) variando de $1,5 \times 10^{-3}$ e $9,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, condutividade hidráulica (K) de $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ e armazenamento (S) de 5×10^{-4} (SOUZA et al., 2013).

Pita et al (2018) separam o AAC em dois estratos distintos na região de Manacapuru/AM. A água situada nas camadas aquíferas superiores, em um sistema livre, com recarga local, é pouco mineralizada e possui origem meteórica, e a água presente nas camadas mais profundas, em um sistema provavelmente confinado, origem remota, mais mineralizadas, com maior tempo de residência no aquífero, armazenadas nas camadas mais profundas em um sistema provavelmente confinado.

Segundo a classificação climática de KÖPPEN (1948), a área de estudo apresenta tipo climático Am (Tropical úmido), com alta variabilidade climática. Esta variabilidade pode ser traduzida na distribuição espacial das precipitações anuais. A partir dos registros da série histórica (1975-2019) para Manaus (INMET, 2020) (Figura 2). A precipitação média mensal apresenta um período chuvoso de dezembro a abril (entre 240 e 306 mm mês^{-1}) e menos chuvas de junho a outubro (entre 53 e 118 mm mês^{-1}).

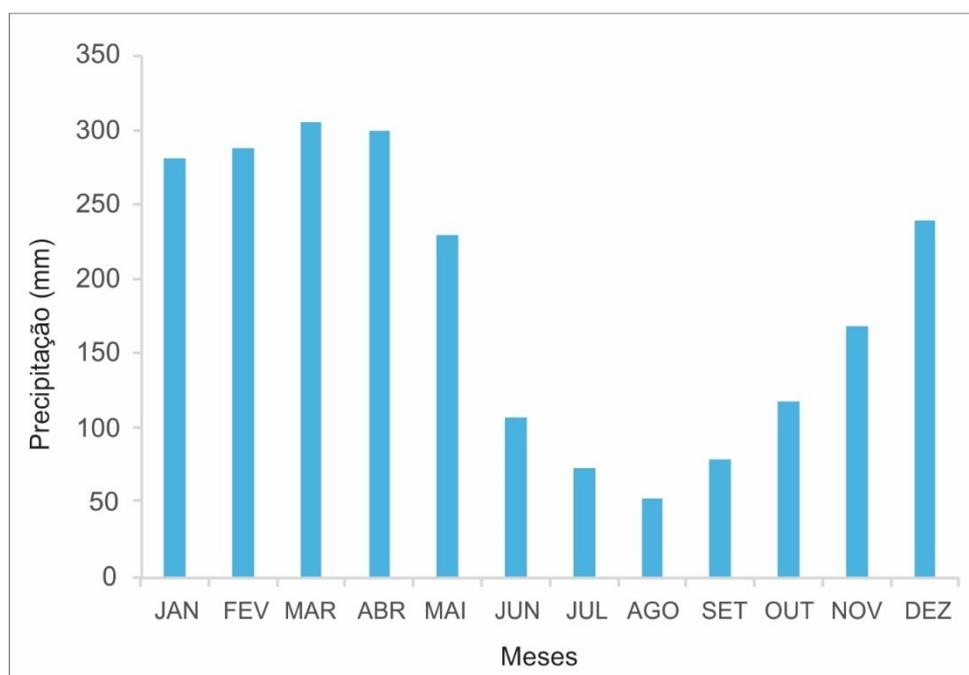


Figura 2. Precipitação média anual em Manaus a partir da série histórica (1975-2019).

Fonte: INMET 2020.

Amostragens e Procedimentos de Análises

Foram selecionados três poços tubulares das aldeias indígenas no município de Manaus. Estas aldeias são das etnias Sateré-Mawé/Cambeba, denominadas Terra Preta (TP - 02°55'08,4"/ 60°28'02,7") com 94 habitantes, Três Unidos (TU - 02°49'09,5"/ 60°30'06,80") com 58 habitantes e Nova Esperança (NE - 02°44'48,5"/ 60°25'46,6") com 161 habitantes (Figura 2). As coletas de amostras de águas subterrâneas foram realizadas nos meses de julho e agosto de 2016 (estiagem); em outubro e novembro de 2016 (transição para chuvoso); fevereiro e março de 2017 (chuvoso) e maio e junho de 2017 (transição para estiagem) (Figura 2).

Antes da coleta, cada poço foi bombeado por 30 minutos para garantir que as amostras fossem representativas da água do aquífero. Em todas as coletas foram utilizados frascos esterilizados e ambientados com a água amostrada e cheios até sua capacidade máxima. A temperatura da água foi medida com termômetro digital multifuncional, coletou-se 1 L de amostra para parâmetros físico-químicos, 1 L para parâmetros químicos e 500 mL para parâmetros microbiológicos. Após coleta, as amostras foram levadas para os laboratórios: Central do Amazonas – Fundação de Vigilância em Saúde (LACEN/AM-FVS) para a realização das de metais por ICP-OES (plasma indutivamente acoplado), análises físico-químicas e microbiológicas (Coliformes totais e *Escherichia coli*); Laboratório de Análises de Água e Qualidade Ambiental do Centro de Apoio Multidisciplinar (LAQUA/CAM) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) para determinação de SiO₂; Laboratório de Limnologia da Faculdade de Ciências Agrárias (FCA/UFAM) para as análise dos cátions Na⁺, K⁺ por fotometria de chama e Ca²⁺ e Mg²⁺ por titulação complexométrica EDTA; Laboratório

de Análises Minerais da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (LAMIN-CPRM-Manaus) para a determinação dos ânions F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} e SO_4^{2-} por cromatografia iônica. Os parâmetros e metodologias selecionados foram descritos em APHA (2005).

Em cada etapa de coleta foram verificados o nível estático e o dinâmico de água com um medidor elétrico manual portátil Eletrom com fita medidora de 200 metros.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Parâmetros hidrogeológicos

Dos três poços estudados, o TP possui o nível estático (NE) mais profundo, para todas as estações do ano. O mesmo ocorre para o nível dinâmico (ND), durante bombeamento. O nível de água mais profundo, no poço mais profundo (84 m), indica que a potencimetria é mais elevada em porções rasas do aquífero, o que é um indício de fluxo natural descendente (Tabela 1). Os poços mais rasos (NE e TU) possuem profundidade de 46,0 e 50,0 metros apresentaram os menores e melhores valores de *NE* e *ND*, estando estes mais próximos da superfície e constituição mais arenosa, quando comparados ao TP que é o mais profundo e com característica mais argilosa.

Tabela 1. Profundidade (m), nível estático (m), dinâmico (m) e altitude (m) poços tubulares da área de estudo.

Aldeia	Data da amostragem	Prof. do poço (m)	Nível estático (m)	Nível dinâmico (m)	Altitude (m)
Estiagem					
Três Unidos (TU)	12.07.16	50	15	18	47
Nova Esperança (NE)	12.07.16	46	13	16	46
Terra Preta (TP)	12.07.16	84	18	24	85
Transição Chuvoso					
Três Unidos (TU)	05.11.16	50	12,5	14,5	47
Nova Esperança (NE)	04.11.16	46	15	16	46
Terra Preta (TP)	04.11.16	84	30	32,5	85
Chuvoso					
Três Unidos (TU)	14.03.17	50	7,5	9,5	47
Nova Esperança (NE)	14.03.17	46	10	14,5	46
Terra Preta (TP)	14.03.17	84	26	28	85
Transição Estiagem					
Três Unidos (TU)	20.06.17	50	5,5	8,2	47
Nova Esperança (NE)	20.06.17	46	7,7	12	46

Aldeia	Data da amostragem	Prof. do poço (m)	Nível estático (m)	Nível dinâmico (m)	Altitude (m)
Terra Preta (TP)	20.06.17	84	22,5	24	85

Fonte: Autores (2023).

O nível estático da água nos poços é sempre mais raso nos poços de menor profundidade, independentemente da estação do ano. Isto é um indício de que a potenciométrica em camadas rasas do aquífero seja mais alta do que em camadas mais profundas, denotando potencial de fluxo de água descendente durante todo o ano no Aquífero Alter do Chão da região.

Somente um poço da área de estudo (TU) possui perfil geológico, apresentado na Figura 3. A profundidade dos filtros é de 25 a 45 metros. O poço TP, que possui 84 m de profundidade, certamente possui filtros mais profundos.

Os valores das concentrações das substâncias obtidos nos períodos sazonais foram comparados aos valores máximos permitidos (VMP) de potabilidade, estabelecidos pela Portaria n° 888/21 do Ministério da Saúde – MS para consumo humano (Tabela 2).

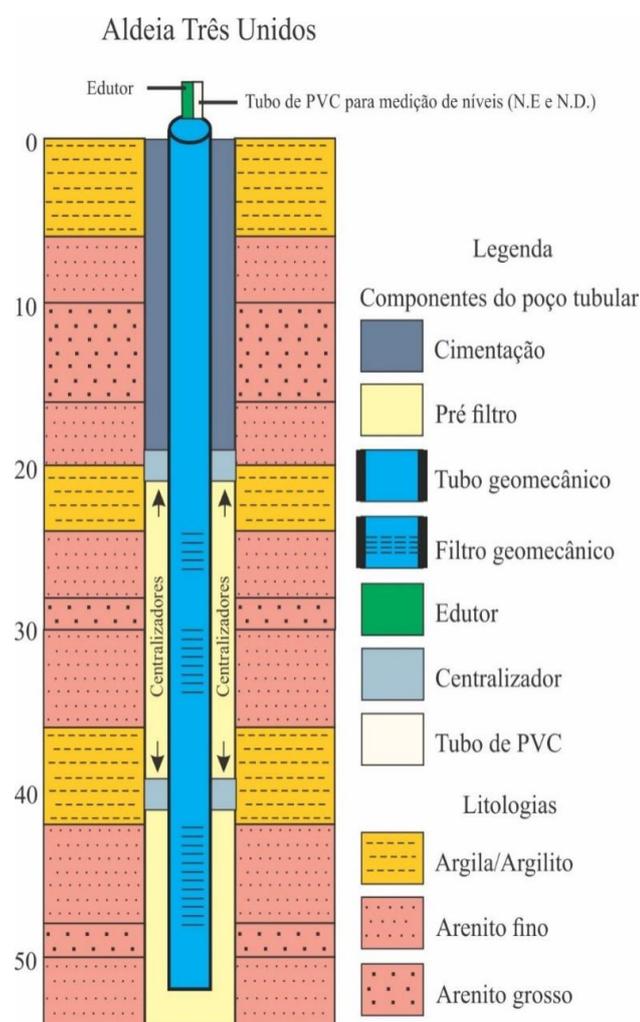


Figura 3. Perfil geológico e construtivo do poço tubular da aldeia Três Unidos. **Fonte:** SESAI, 2022.

Tabela 2. Padrões para águas destinadas ao consumo humano Portaria n° 888/21 do Ministério da Saúde – MS

Padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde		Padrão organolépticos de potabilidade		Padrão microbiológico	
Parâmetro	VMP	Parâmetro	VMP	Parâmetro	VMP
Arsênio (mg.L ⁻¹)	0,01	Alumínio (mg.L ⁻¹)	0,2	Coliformes totais	Ausência em 100 ml
Bário (mg.L ⁻¹)	0,7	Cloreto (mg.L ⁻¹)	250	Escherichia coli	Ausência em 100 ml
Cádmio (mg.L ⁻¹)	0,005	Gosto e sabor	Não objetável		
Cobre (mg.L ⁻¹)	2	Sódio (mg.L ⁻¹)	200		
Cromo (mg.L ⁻¹)	0,005	STD (mg.L ⁻¹)	1000		
Fluoreto (mg.L ⁻¹)	1,5	Sulfato (mg.L ⁻¹)	250		
Níquel (mg.L ⁻¹)	0,07	Turbidez UTN	5		
Nitrato (mg.L ⁻¹)	10	Zinco (mg.L ⁻¹)	5		
Nitrito (mg.L ⁻¹)	1				

Fonte: Autores (2023).

Parâmetros físico-químicos, qualidade da água e íons maiores

Os resultados dos parâmetros obtidos nos quatro períodos sazonais das águas estudadas estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados obtidos durante os quatro períodos: A) Estiagem; B) Transição chuvoso; C) Chuvoso e D) Transição estiagem

Poço	Data da amostragem	T _{ar} (°C)	T _{água} (°C)	Alcalinidade (mg.L ⁻¹ CaCO ₃)	STD (mg.L ⁻¹)	Turbidez (UTN)	pH	CE (µS.cm ⁻¹)	Sabor e Odor
Estiagem (2016)									
TP ¹	12.07.2016	30,0	27,0	5,25	14,2	0,8	6,0	19,2	NO
TU ²	12.07.2016	30,0	27,0	7,78	12,6	2,39	5,8	24,3	NO
NE ³	12.07.2016	30,0	28,0	28,7	44,1	0,82	6,1	89,9	NO
Transição chuvoso (2016)									
TP ¹	05.11.2016	26,0	27,7	3,9	15,76	0,64	5,6	22,3	NO
TU ²	05.11.2016	26,0	27,1	2,94	13,54	1,25	5,8	18,1	NO
NE ³	05.11.2016	26,3	27,8	21,63	35,26	1,4	6,1	64,6	NO
Chuvoso (2017)									
TP ¹	14.03.2017	24,7	27,4	9,46	10,6	0,65	6,2	22,2	NO
TU ²	14.03.2017	24,0	27,0	9,67	19,7	1,10	6,6	20,1	NO
NE ³	14.03.2017	24,0	27,6	14,3	47,0	1,08	6,1	95,6	NO
Transição estiagem (2018)									
TP ¹	20.06.2017	28,7	26,6	10,9	11,6	0,72	5,4	21,9	NO
TU ²	20.06.2017	29,9	28,8	10,9	11,1	1,04	5,6	41,8	NO
NE ³	20.06.2017	31,1	28,5	24,2	53,2	1,10	6,0	106	NO

¹TP: Terra Preta; ²TU: Três Unidos; ³NE: Nova Esperança; ⁴NO (Não objetável). **Fonte:** Autores (2023).

Temperaturas do ar e da água

Os valores de temperaturas da água apresentaram pouca variação durante o período hidrológico estudado, com exceção dos poços TU e NE durante o período transição para estiagem (28,8 e 28,5 °C, respectivamente) (Tabela 3). As temperaturas da água obtidas neste estudo para os períodos de estiagem e chuvoso se mostram dentro dos limites encontrados por ANA (2015), PITA et al. (2018), SILVA & BONOTTO (2000) e SILVA & SILVA (2007) (Tabela 4). Segundo Corcóvia e Celligoi (2012), a partir de 20 m de profundidade, a temperatura do solo é influenciada pelo grau geotérmico local e independe das variações da temperatura atmosférica, o que explicaria a pouca variação de temperatura na água entre os períodos analisados. As temperaturas do ar mais elevadas foram medidas nos períodos de transição para estiagem e estiagem (31,1 °C e 30°C, respectivamente) e menores nos períodos de transição para chuvoso e chuvoso (26 °C e 24 °C, respectivamente). As temperaturas do ar foram mais elevadas períodos de transição para estiagem e estiagem, provavelmente reflexo da migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que durante inverno no hemisfério sul, migra para o hemisfério norte, ocasionando a redução nas chuvas sobre a região Amazônica e o aumento da temperatura do ar local.

Tabela 4. Comparação dos valores de Temperatura do ar, Temperatura da água pH e condutividade elétrica no Sistema de Aquífero Alter do Chão na cidade de Manaus

T Ar (°C)	T Água (°C)	pH	CE (µS/cm)	Referência
Mín- Máx	Mín- Máx	Mín- Máx	Mín- Máx	
28-35	27-29	4,1-5,4	15,1-82,9	Silva & Bonotto, 2000
28,5-32	27-30	4,2-5,7	11,1-116,7	Silva & Silva, 2007
-	-	4,5-5,5	-	CPRM, 2012
-	26-33	3,1-8,2	8,7-142	ANA, 2015
-	27,5	4,5	29	Pita et al., 2018
-	-	4,5-5,9	9,4-22,4	Gonçales & Miranda, 2014

Fonte: Autores (2023).

pH

O pH das águas dos poços amostrados apresenta caráter levemente ácido, variando de 5,4 no período de transição para estiagem a próximo da neutralidade 6,6 no período chuvoso (Tabela 3). O mesmo caráter ácido foi observado em águas subterrâneas por outros autores (CPRM, 2012; GONÇALES & MIRANDA, 2014; PITA et al., 2018; ROCHA & HORBE, 2006; SILVA & BONOTTO, 2000; SILVA & SILVA, 2007) em diferentes períodos sazonais (Tabela 4). O poço TP apresentou pH em conformidade com a legislação nos períodos de estiagem e chuvoso e TU somente no período chuvoso. Os valores obtidos de pH no poço NE são os únicos que estão em acordo com a legislação vigente (6,0 a 9,5) em todos os períodos estudados (Tabela 3). Apesar de estarem em desacordo com a legislação, isto não descaracteriza sua potabilidade, uma vez que pH está relacionado às características geológicas da

região, a cobertura vegetal, infiltração rápida e baixo tempo de residência, à interação entre a água, a rocha e o solo (PITA et al., 2018; SILVA & SILVA, 2007).

Condutividade elétrica (CE), Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e Alcalinidade

Os valores de condutividade elétrica (CE) obtidos para o poço TP apresentaram pouca variação entre os períodos sazonais; no TU, estes valores são muito semelhantes ao TP tendo um aumento relevante ($41,75 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) no período chuvoso (Tabela 3). O poço NE apresentou os maiores valores quando comparados aos demais poços deste estudo, com o valor mais elevado durante o período de transição para estiagem ($106,30 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e o menor no período de transição para chuvoso ($64,56 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Estes resultados indicam que as águas são fracamente mineralizadas, o que está em acordo com os resultados descritos na literatura (ANA, 2015; GONÇALES & MIRANDA, 2014; PITA et al., 2018; SILVA & SILVA, 2007).

Embora não exista um valor de referência de qualidade (VRQ) para alcalinidade, observou-se que os valores obtidos são relativamente baixos. Os poços TP e TU apresentam valores muito semelhantes, enquanto que em NE são mais elevados quando comparados aos demais em todos os períodos estudados (Tabela 3), no entanto dentro dos valores citados na literatura (ANA, 2015; PITA et al., 2018; SILVA & SILVA, 2007). O menor valor obtido para este poço foi de $14,3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ no período chuvoso e mais elevado no período de estiagem com $28,67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ (Tabela 3). Os valores encontrados para as águas subterrâneas na região de Manaus para o período chuvoso, ficaram entre 6 e $237 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ (ANA, 2015); transição para estiagem entre 2,25 e $39,65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ HCO}_3^-$ (SILVA & SILVA, 2007); para a estiagem entre 4,9 e $14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ (ANA, 2015). Os valores obtidos para sólidos totais dissolvidos (STD) são muito baixos em relação ao VMP pela legislação vigente ($1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) e não excedem os valores encontrados por ANA, (2015), GONÇALVES & MIRANDA (2014) e PITA et al. (2018) entre 5 e $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Porém, os valores numéricos de condutividade elétrica costumam acompanhar aqueles de (STD), uma vez que a quantidade de ânions presentes na água define a facilidade com que uma corrente elétrica vai atravessar a água. Os resultados não demonstram relação entre estes parâmetros, o que pode ser causado por erros de medição gravimétrica utilizada na quantificação dos STD.

Turbidez e Sabor/Odor

Todos os valores de turbidez estão muito abaixo do VMP (5 UTN) para todos os períodos estudados, variando de 0,8 a 2,39 UTN, o que é reflexo dos valores muito baixos de sólidos totais suspensos (Tabela 3). A água subterrânea é praticamente isenta de turbidez e valores elevados em águas subterrâneas coletadas por bombeamento, geralmente relacionados à má construção dos poços e deve-se ao carreamento de partículas finas da formação geológica através dos filtros (ANA, 2015). Os valores encontrados por outros estudos para o AAC variaram entre 0,09 e 12,6 (ANA, 2015; GONÇALES & MIRANDA, 2014; SILVA & SILVA, 2007).

Os resultados de sabor e odor para todos os períodos estão de acordo com a Portaria nº 888/21 do Ministério da Saúde – MS, que é de ausência de sabor e odor.

Íons Maiores

Cátions (Cálcio, Potássio, Magnésio e Sódio)

Os valores médios das concentrações dos cátions aumentaram entre o período de estiagem e o chuvoso. No entanto, no poço TU, as concentrações de Na⁺ e K⁺ reduziram no período chuvoso (Tabela 5). A menor concentração determinada para o K⁺ foi de 0,5 mg.L⁻¹ em TP na estiagem e 5,1 mg.L⁻¹ em NE no período chuvoso. A média das concentrações de K⁺ obtidas para o período de estiagem foi de 2 mg.L⁻¹ e para o período chuvoso foi de 2,73 mg.L⁻¹. Os teores de K⁺ encontrados neste estudo foram mais elevados que dos demais cátions, esse comportamento também foi observado em outros estudos (ANA, 2015; GONÇALES & MIRANDA, 2014; SILVA & SILVA, 2007). No entanto, estão dentro do esperado, uma vez que em águas subterrâneas normalmente apresentam teores abaixo de 10 mg L⁻¹, (PARRON et al., 2011). O menor valor determinado neste estudo para o Ca²⁺ foi de 0,40 mg.L⁻¹ em TU na estiagem) e 2,9 mg.L⁻¹ em TP no período chuvoso., As concentrações de Mg²⁺ variaram entre 0,002 mg.L⁻¹ em TU na estiagem e 0,75 mg.L⁻¹ em TP no período chuvoso. De modo geral, os valores médios de concentração encontrados por esse estudo para Ca²⁺ e Mg²⁺ estão dentro das faixas encontradas por ANA (2015), Silva & Silva (2007), Pita et al., (2018) e Gonçalves & Miranda (2015). O Mg²⁺ tem propriedades similares às do Ca²⁺, porém, devido à sua solubilidade, é geralmente encontrado em águas naturais em concentrações menores. Os teores encontrados para o Na⁺ também não divergem dos valores encontrados pelos mesmos autores, no entanto, estão um pouco abaixo e variam entre 0,30 mg.L⁻¹ e 1,10 mg.L⁻¹ em TP, entre estiagem e chuvoso respectivamente.

Tabela 5. Resultados de íons maiores (cátions e ânions) em mg.L⁻¹.

Poço	Data	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	F ⁻	Cl ⁻	Br	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂
Estiagem (2016)											
TP ¹	12.07	2,81	0,27	0,30	0,50	<0,01	0,31	0,01	ND	0,50	4,23
TU ²	12.07	0,40	0,002	0,60	1,40	0,20	0,31	ND	ND	0,10	3,57
NE ³	12.07.	0,50	0,15	0,50	4,10	0,05	0,46	ND	ND	9,83	9,93
Média		1,24	0,14	0,47	2	-	0,36	-	-	3,48	5,91
Chuvoso (2017)											
TP ¹	14.03	2,90	0,75	1,10	2,70	<0,01	0,50	ND	ND	0,14	6,46
TU ²	14.03	0,80	0,025	0,40	0,40	0,02	0,27	ND	ND	0,10	1,58
NE ³	14.03	1,54	0,225	0,60	5,10	0,04	0,44	ND	ND	7,81	8,94
Média		1,75	0,33	0,7	2,73	-	0,4	-	-	2,68	5,66

Fonte: Autores (2023).

Ânions (Fluoreto, Cloreto, Brometo, Fosfato e Sulfato)

De modo geral, a maioria dos ânions analisados apresentou baixas concentrações nos poços estudados. Os ânions Br⁻ e PO₄³⁻ estiveram abaixo do limite de detecção para os poços TU e NE (Tabela 5). O Br⁻ foi detectado apenas no poço TP no período

de estiagem, com concentração de $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$. Os teores de F^- e Cl^- foram baixos, porém com valores muito próximos entre os períodos de estiagem e chuvoso, o que está de acordo com o estudo de Gonçalves & Miranda (2014), no entanto menores que os valores encontrados por Silva & Silva (2007). O F^- variou entre $0,20 \text{ mg.L}^{-1}$ durante o período de estiagem para $0,02 \text{ mg.L}^{-1}$ no chuvoso em TU; enquanto o variou entre $0,27 \text{ mg.L}^{-1}$ em TU para $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ em TP no período chuvoso. Em águas subterrâneas, o Cl^- normalmente está presente em baixas concentrações ($<10 \text{ mg/L}$), concentrações mais elevadas podem indicar poluição antrópica (CELLIGOI, 1999). As concentrações de SO_4^{2-} foram maiores no período de estiagem e variaram entre $0,10 \text{ mg.L}^{-1}$ em TU e $9,83 \text{ mg.L}^{-1}$ em NE. Comportamento semelhante foi observado para o SO_4^{2-} em ANA (2015). O sulfato SO_4^{2-} é um dos íons mais abundantes na natureza, quantidades significativas são adicionadas ao ciclo hidrológico com as precipitações atmosféricas, apesar disso nas águas subterrâneas a concentração de sulfato é baixa ($< 30 \text{ mg/L}$) (ANA, 2015).

SiO_2

Os valores de SiO_2 referentes ao período de estiagem variam de $3,57$ a $9,93 \text{ mg/L}$, enquanto que os valores obtidos no período chuvoso variam de $1,58$ a $8,94 \text{ mg/L}$ (Tabela 5). Não foram encontradas, na literatura, dados de SiO_2 para água subterrânea na região em período de estiagem. Já para o final do período chuvoso (junho), Rocha & Horbe (2006) obtiveram valores de SiO_2 para cidade de Manaus variando de $1,14$ a $4,98 \text{ mg.L}^{-1}$, os quais são menores que os obtidos neste estudo para o mesmo período. Silva & Silva (2007) encontraram valores entre $0,78$ e $9,23 \text{ mg.L}^{-1}$ para o período de cheia (maio a julho) e Pita et al (2018) determinou a concentração de $8,9 \text{ mg.L}^{-1}$ para Manaus durante o período de transição para chuvoso. Apesar da abundância do silício na crosta terrestre, suas concentrações são baixas em águas subterrâneas. Neste estudo, os valores também são baixos, o que é característico de água subterrânea de circulação rasa em aquíferos sedimentares livres.

Substâncias que representam risco à saúde

Os resultados das substâncias que representam risco à saúde e os valores máximos permitidos (VMP) estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 6. Substâncias que representam risco à saúde em mg.L^{-1} obtidos durante os períodos: A) Estiagem, B) Chuvoso.

A)	ESTIAGEM			VMP (mg.L^{-1})
	TP	TU	N.E	
Poço				
Data da coleta	12.07.16	12.07.16	12.07.16	
Alumínio	NR	NR	NR	0,2
Arsênio	NR	NR	NR	0,01
Bário	NR	NR	NR	0,7
Cádmio	NR	NR	NR	0,005
Cobre	NR	NR	NR	2,0
Cromo	NR	NR	NR	0,0005

Fluoreto	<0,01	0,20	0,05	1,5
Nitrato	4,29	0,5	0,25	10,0
Nitrito	<0,01	<0,01	0,04	1,0
Níquel	NR	NR	NR	0,07
Zinco	NR	NR	NR	5,0
B) CHUVOSO				
Poço	TP	TU	N.E	VMP (mg.L⁻¹)
Data da coleta	14.03.17	14.03.17	14.03.17	
Alumínio	ND	ND	ND	0,2
Arsênio	ND	ND	ND	0,01
Bário	0,0034	ND	ND	0,7
Cádmio	0,0006	ND	ND	0,005
Cobre	0,0156	ND	ND	2,0
Cromo	ND	ND	ND	0,0005
Fluoreto	<0,01	0,02	0,04	1,5
Nitrato	3,24	0,22	0,67	10,0
Nitrito	ND	ND	ND	1,0
Níquel	<0,01	ND	ND	0,07
Zinco	0,001	ND	ND	5,0

NR (Não realizado); ND (Não detectável); VMP (Valor máximo permitido) em mg/L (Portaria MS 888/2021). **Fonte:** Autores (2023).

As análises realizadas para substâncias que representam risco à saúde foram obtidas integralmente durante o período chuvoso. Apenas bário, cádmio, cobre e zinco foram detectados no poço TP, no entanto estão dentro dos limites impostos pela legislação. Existem metais que são essenciais aos seres vivos, porém, quando ultrapassam determinadas concentrações tornam-se tóxicos. O acúmulo de metais pesados no organismo pode causar sérios danos à saúde humana, como doenças relacionadas aos sistemas respiratório, nervoso, circulatório e até mesmo causar câncer e doenças renais crônicas (DE PAULA, 2006). Por isso é importante que as águas destinadas ao consumo humano estejam dentro do que preconiza a legislação vigente.

Os resultados de NO_3^- e NO_2^- foram obtidos nos períodos de estiagem e chuvoso e não sugerem risco à saúde por estarem abaixo do VMP pela legislação vigente, e dentro dos valores encontrados em ambientes naturais. O estudos realizados em poços tubulares na área de Manaus apontam valores entre 0,01 e 6,31 mg.L^{-1} para o período chuvoso (ANA, 2015; PITA et al., 2018; SILVA & SILVA, 2007) e entre 0,01 e 2,98 mg.L^{-1} no período de estiagem (ANA, 2015). No período transição para chuvoso Gonçalves & Miranda (2014) e Silva & Bonoto (2000) encontraram valores entre 0,03 e 5,4 mg.L^{-1} . Os teores de NO_2^- ficaram em torno de 0,01 mg.L^{-1} no período de transição para chuvoso (GONÇALES & MIRANDA, 2014).

Os compostos nitrogenados como o nitrito e o nitrato estão segundo Alaburda (1998), associados a dois efeitos adversos à saúde: a indução à metemoglobinemia e a formação potencial de nitrosaminas e nitrosamidas carcinogênicas. A Agência Internacional de Pesquisas em Câncer (IARC) classifica o nitrato e o nitrito ingeridos sob condições que resultem na geração endógena de nitrosaminas como prováveis cancerígenos para os seres humanos Grupo2A (CETESB, 2022).

Parâmetros microbiológicos

Em nenhum dos períodos avaliados foi detectada a presença de coliformes termotolerantes, indicando a inexistência de contaminação da água (Tabela 6). Durante o estudo, as únicas manifestações de doenças de veiculação hídrica presumíveis foram os poucos casos de alteração das fezes em todas as aldeias estudadas, cujas causas, portanto, podem ter outra origem.

Tabela 6. Resultados microbiológicos durante os períodos de estiagem, transição para chuvoso e chuvoso e transição para chuvoso.

Poço	Nº de hab.	Nº de casos (DVH*)	Período sazonal	Coliformes totais (Presença/Ausência)	Escherichia coli	População acometida (%)
TP	54	0	Estiagem	Ausência	Ausência	0
		1**	T. Chuvoso	Ausência	Ausência	1,9
		3**	Chuvoso	Ausência	Ausência	5,6
		2**	T. Estiagem	Ausência	Ausência	3,7
TU	194	0	Estiagem	Presença	Ausência	0
		1**	T. Chuvoso	Ausência	Ausência	0,5
		1**	Chuvoso	Ausência	Ausência	0,5
		3**	T. Estiagem	Presença	Ausência	1,4
NE	161	1**	Estiagem	Ausência	Ausência	0,6
		6**	T. Chuvoso	Ausência	Ausência	3,7
		0	Chuvoso	Ausência	Ausência	0
		1**	T. Estiagem	Presença	Ausência	0,6

(*) Doenças causadas por veiculação hídrica presumível; (**) Fezes diarreicas (***) Dados do Sistema de Informação da Atenção à Saúde Indígenas (SIASI).

Caracterização hidrogeoquímica

Apesar de o Aquífero Alter do Chão (AAC) ser o manancial de maior importância para a Amazônica Oriental e responsável por boa parte do abastecimento de grandes centros urbanos e diversos municípios e povoados menores (PITA et al., 2018), os estudos sobre a qualidade dessas águas, ainda são poucos (ANA, 2015; AGUIAR, 2012; GONÇALES & MIRANDA, 2014; PITA et al., 2018; SOUZA, 2005; SILVA & BONOTTO, 2006; SILVA e SILVA, 2007).

Os valores de pH e CE encontrados por este estudo, estão dentro das faixas encontradas pelos estudos realizados por ANA (2015), Gonçalves & Miranda (2014), Pita et al. (2018) e Silva & Silva (2007) para as águas do AAC em Manaus, que caracterizaram os valores de pH entre 3,2 e 8,2 e CE entre 19,2 a 117 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Os valores de CE (18,1-106 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) apresentam-se semelhantes aos valores encontrados por Silva & Bonotto (2000) e Silva & Silva (2007), enquanto os valores de pH (5,4-6,6) estão mais próximos dos limites máximos encontrados por Gonçalves & Miranda (2014), CPRM (2012), Silva & Bonotto (2000) e Silva & Silva (2007) (Tabela 3). De modo geral, as concentrações encontradas para os íons Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e

Cl⁻ são mais baixas que as encontradas por ANA (2015), Silva & Bonotto (2000) e Silva & Silva (2007) e mais elevadas que aquelas encontradas por Gonçalves & Miranda (2014) e bem abaixo das faixas de valores normalmente encontrados em águas subterrâneas (PARRON et al., 2011). Entre os cátions, o íon com maior concentração foi o K⁺ e menor o Mg²⁺, resultado também observado por outros estudos (ANA, 2015; GONÇALES & MIRANDA, 2014; SILVA & BONOTO, 2000; SILVA & SILVA, 2007). A partir dos valores médios observados na Tabela 5, obteve-se a abundância dos cátions na sequência K>Ca>>Na>Mg, semelhante a sequência obtida por Silva & Silva (2007). As maiores concentrações de K são pouco comuns, porque trata-se de um elemento de pouca mobilidade geoquímica nas águas doces e é raramente encontrado em concentrações iguais ou maiores que o Na (CELLOGOI, 1999). O K⁺, quando liberado pelo intemperismo, tende a fixar-se por adsorção aos minerais de argila, em contrapartida o Na costuma ser mais abundante devido à grande solubilidade de seus compostos (SILVA & BONOTO, 2000). Os teores de Ca²⁺ > Mg²⁺, a exemplo do que foi observado por ANA (2015), Gonçalves & Miranda (2014), Pita et al. (2018) e Silva & Silva (2007). Quanto aos ânions dissolvidos, as concentrações de SO₄²⁻ apresentam valores mais elevados que aqueles encontrados pelos mesmos autores, mas ainda assim dentro das faixas esperadas para águas subterrâneas (< 30 mg/L) (ANA, 2015). O sulfato SO₄²⁻ é um dos íons mais abundantes na natureza, quantidades significativas são adicionadas ao ciclo hidrológico com as precipitações atmosféricas, apesar disso nas águas subterrâneas a concentração de sulfato é baixa (ANA, 2015). No diagrama de Piper pôde-se observar as variações entre os períodos de estiagem e chuvoso, o que implica numa classificação química das águas em função da sazonalidade (Figura 4). O poço da aldeia Nova Esperança (NE) manteve a classificação de potássica sulfetada em ambos os períodos sazonais. Por outro lado, um leve aumento nas concentrações de Ca²⁺ nas águas do poço da aldeia TU, causou mudança na classificação de potássica cloretada para cálcica cloretada durante o período chuvoso. No geral, nota-se a presença significativa dos íons sulfato e cloreto, cálcio e potássio, caracterizando estas águas como cálcicas ou potássicas, sulfatadas ou cloretadas. Os estudos realizados em poços na região de Manaus, obtiveram classificação como potássica ou sódica (SILVA & BONOTO, 2000) ou bicarbonatada cálcica e cloretada cálcica (GONÇALES & MIRANDA, 2014).

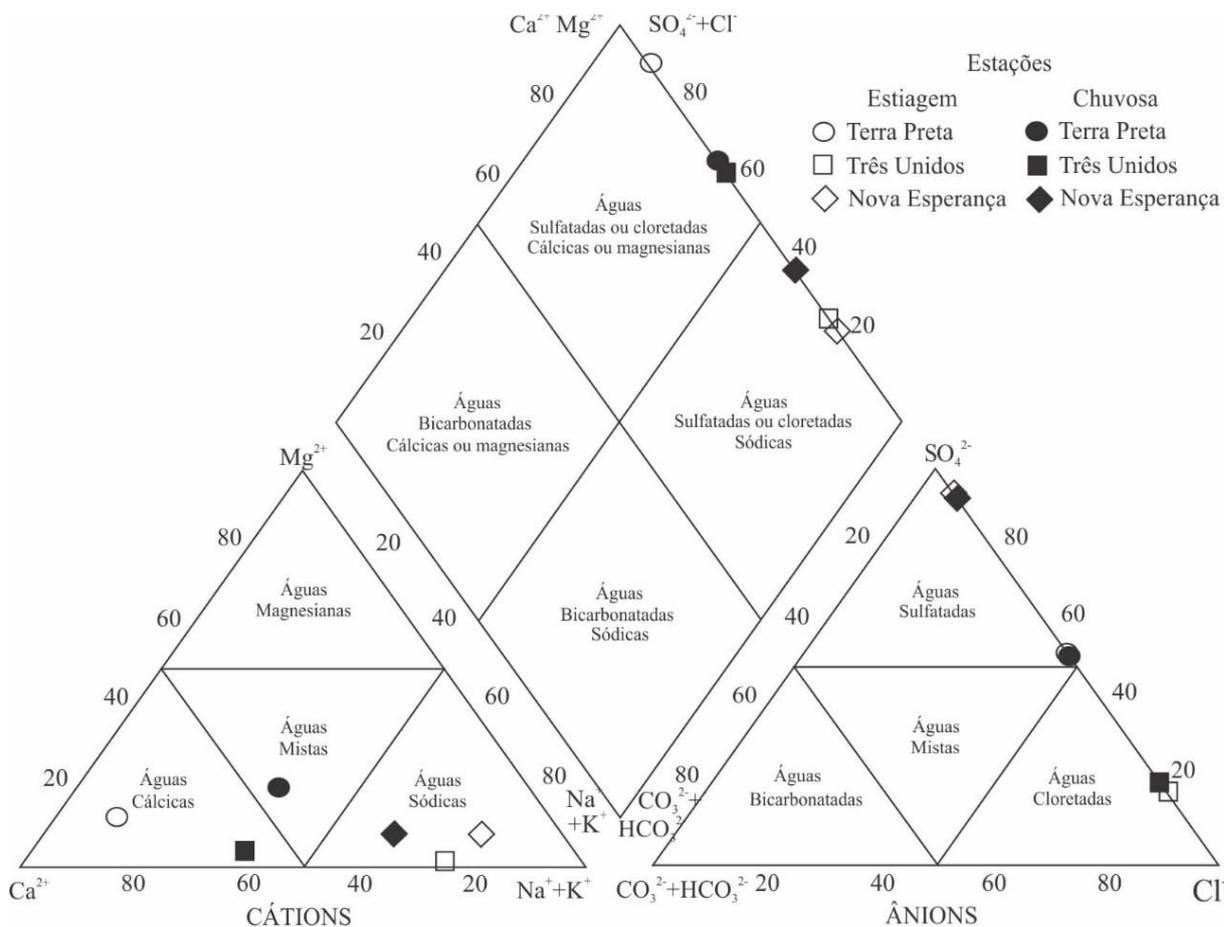


Figura 4. Diagrama de Piper para classificação das águas subterrâneas estudadas no período de estiagem e chuvoso. **Fonte:** Autores (2023).

O estudo hidroquímico executado por ANA (2015) verificou que a concentração de cátions e ânions na água do AAC é sempre baixa, com exceção de locais com provável contaminação antrópica, como no trabalho realizado por Rocha & Horbe (2006). Por outro lado, Pita et al (2018) separam o AAC em dois estratos distintos na região de Manacapuru/AM, e atribuem às camadas aquíferas superiores (até 120 a 130 m de profundidade), em um sistema livre e com recarga local, uma água pouco mineralizada. Nesse contexto, a origem desses elementos para as águas subterrâneas, pouco se deve ao processo de intemperismo, mas à precipitação meteórica (ANA, 2015; PITTA et al., 2018).

CONCLUSÃO

Para a realização deste trabalho, foram monitorados o nível de água e coletadas amostras para análise química ao longo de um ano em três poços localizados em comunidades do rio Cuieiras: Terra Preta, Nova Esperança e Três Unidos. Foram

medidos o nível de água, e coletadas amostras para análise química e avaliação de potabilidade.

Os resultados analíticos obtidos para as águas subterrâneas, foram observados nos períodos sazonais e transicionais dentro do período de um ciclo hidrológico. Quando confrontados aos padrões de qualidade da legislação vigente (Portaria MS nº888/21), os resultados encontram-se em conformidade nos aspectos de potabilidade selecionados (microbiológico, organoléptico e de substâncias que oferecem riscos à saúde), classificando-as como potáveis e próprias para o consumo humano. A exceção foram os valores de pH, onde apenas no poço NE, os valores permaneceram dentro dos padrões recomendados pela legislação em todos os períodos estudados. O que não classifica as demais águas como inapropriadas, uma vez que refletem as características geológicas da região com o processo de interação água/rocha, cobertura vegetal e a recarga rápida inerente. Os resultados obtidos para as propriedades físicas e químicas das águas dos poços, em sua maioria, são semelhantes aos encontrados nas revisões de literaturas para as águas subterrâneas do Aquífero Alter do Chão na cidade de Manaus.

A variação sazonal dos parâmetros, indica conexão direta com a superfície do terreno. Neste contexto, é fundamental estabelecer um perímetro de proteção dos poços, para que atividades ou obras potencialmente contaminantes não sejam executadas em área de contribuição de modo que possa afetar a potabilidade da água.

AGRADECIMENTOS

Agradeço(emos) à FAPEAM – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas, projeto: **Mudanças Paleoclimáticas e acumulação de carbono no Baixo Rio Negro** e à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, projeto: **Rio Negro TAR**.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Concepção: Consuelo Andrade Simões Clebsch, Keila Cristina Pereira Aniceto e Ingo Daniel Wahnfried. Metodologia: Consuelo Andrade Simões Clebsch e Keila Cristina Pereira Aniceto. Análise formal: Consuelo Andrade Simões Clebsch, Keila Cristina Pereira Aniceto e Ingo Daniel Wahnfried. Pesquisa: Consuelo Andrade Simões Clebsch, Keila Cristina Pereira Aniceto, Ingo Daniel Wahnfried e Rodrigo Tokuda Castro. Recursos: Consuelo Andrade Simões Clebsch, Keila Cristina Pereira Aniceto, Rita Milene de Souza Lima, Tereza Cristina Souza de Oliveira. Preparação de dados: Consuelo Andrade Simões Clebsch, Rodrigo Tokuda Castro. Escrita do artigo: Consuelo Andrade Simões Clebsch, Keila Cristina Pereira Aniceto, Ingo Daniel Wahnfried, Rita Milene de Souza Lima e Rodrigo Tokuda Castro. Revisão: Consuelo Andrade Simões Clebsch, Keila Cristina Pereira Aniceto e Ingo Daniel Wahnfried. Supervisão: Keila Cristina Pereira Aniceto e Ingo Daniel Wahnfried. Aquisição de financiamento: Consuelo Andrade Simões Clebsch e Keila Cristina Pereira Aniceto. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, O. R. Reconhecimento geológico no vale do Amazonas (Campanhas de 1918 e 1919). **Boletim 3 Serviço Geológico do Brasil**. Rio de Janeiro: Serviço Geológico e Mineralógico/Divisão de Geologia e Mineralogia. 84 p, 1922.
- ANA (Agência Nacional de Águas). Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000). Volume IV – Hidrogeoquímica da PHA. Tomo II - Aquífero Alter do Chão, Coberturas Cenozóicas de Porto Velho, Barreiras, Pirabas, Monte Alegre, Itaituba e Inominado (Cruzeiro do Sul). Brasília, DF. 597 p. 2015.
- ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2018**. Informe anual. Brasília, DF. 72 p. 2018.
- ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). **Atlas Águas Segurança Hídrica do Abastecimento Urbano**. Brasília, DF. 332 p. 2021. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2021/10/ANA_ATLAS_Aguas_AbastecimentoUrbano2021_compressed.pdf . Acesso em: 10 dez. 2023
- APHA, (American Public Health Association), **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st edn, American Wastewater Association and Water Environment Federation Washington, D.C,2005.
- BRUZANELLO, E. B.; MARTINHAGO, M. W.; ALMEDA, M. M.; PINTO, F. G S. Determinação de coliformes totais e termotolerantes na água do lago Municipal de Cascavel, Paraná – Nota científica, **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 6, 2008. Disponível em: <<https://www.seer.ufrgs.br/index.php/rbrasbioci/article/view/114989>>
- CAPUTO, M. V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D. N. N. **Litoestratigrafia da Bacia do Amazonas**. Relatório Interno. Belém: Petrobrás, DIREX/RENOR,1971.
- CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. 1984. Tese (Doutorado em Geologia). Santa Bárbara: Universidade da Califórnia,1984.
- CELLIGOI, A. Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas. **Revista Geografia**, Londrina, vol. 8, n. 1, p. 91-97, 1999.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental, 2022. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/12/Nitrato-e-Nitrito.pdf>. Acesso em: 12 novembro. 2023
- CPRM (Serviço Geológico do Brasil). **Carta Geológica Do Brasil Ao Milionésimo**. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas, Programa Geologia Do Brasil. Brasília: Ministério De Minas E Energia/CPRM/Serviço Geológico Do Brasil. 2006.

CPRM (Serviço Geológico do Brasil). **Relatório diagnóstico Aquífero Alter do Chão no Estado do Amazonas**. Belo Horizonte, MG, v. 6, 30 p. 2012. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/22245/1/aquifero_alter_chao_am.pdf . Acesso em: 10 out. 2023.

CUNHA, P. R. C.; MELO, J. H. C.; SILVA, O. B. **Bacia do Amazonas**. Boletim de Geociências da Petrobrás. v.15, p: 227-251, 2007.

DE PAULA, M. **Inimigo invisível: metais pesados e a saúde humana**. Tchê Química, v. 3, n. 6, p. 37-44, 2006. Disponível em: <http://www.deboni.he.com.br/revista6.pdf>. Acesso em: 12 de novembro. 2023.

DINO, R.; SILVA, O. B.; ABRAHÃO, D. Caracterização palinológica e estratigráfica de estratos cretáceos da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas. In: Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, 5. Serra Negra: SBG. 1999.

GONÇALES, S.C.B. & MIRANDA, J.S.N. Caracterização da qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Alter do Chão, estudos de caso das estações da rede de monitoramento de águas subterrâneas (rimas –CPRM) no município de Manaus-AM. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 18, 2014, Belo Horizonte. **Anais [...]**, 2015. Disponível online: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/28381/18476/104485>, Acesso em: 13 dez 2023.

HOORN, C.; RODDAZ, M, DINO, R.; SOARES, S.; UBA, C.; OCHOA-LOZANO, D.; MAPES, R. The Amazonian Craton and its influence on past fluvial systems (Mesozoic-Cenozoic, Amazonia). In: Hoorn, C., Wesselingh, F.P. (Eds.), Amazonia, Landscape and Species Evolution: a look into the past. Oxford: Wiley, 2010. <https://doi.org/10.1002/9781444306408.ch7>

INMET, I. N. D. M.-. Redes de estações automáticas. www.inmet.gov.br, 2018. Disponível em:

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso em: 16 novembro 2023.

KÖPPEN, W. Climatologia: Con um estudio de los climas de la Tierra. México: **Fondo de Cultura Economica**, 1948.

MENDES, A. C.; TRUCKUNBROD, W.; NOGUEIRA, A. C. R. Análise faciológica da Formação Alter do Chão (Cretáceo, Bacia do Amazonas), próximo à cidade de Óbidos, Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42, p: 39-57, 2012. Disponível em <<https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7873/7300>>

Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 14 dez. Seção 1. p.39-46. 2011.

NOGUEIRA, A. C. R.; VIEIRA, L. C.; SUGUIO, K. 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: SBG. 1999.

<https://repositorio.usp.br/directbitstream/d96873a4-a996-4c72-93e6-62e0330faee9/1055442.pdf>

OECD. **Governança dos Recursos Hídricos no Brasil**, OECD Publishing, Paris. 2015. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264238169-pt>

PARRON, L. M.; MUNIZ, D. H. F.; PEREIRA, C. M. Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água. Colombo: EMBRAPA Florestas, 67 p. 2011.

PITA, R.C.S.; SILVA JÚNIOR, G.C.; ROSÁRIO, F.F.DO 2; SILVA, M.L. DA. Sistema aquífero Alter do Chão a oeste da cidade de Manaus (AM): processos hidrogeoquímicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. **Geol. USP, Sér. cient.**, v. 18, n. 1, p. 27-296, 2018. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v18-134253

ROCHA, L. C. R.; HORBE, A. M. C. Contaminação provocada por um depósito de lixo no aquífero Alter do Chão em Manaus - AM. **ACTA Amazônica**, v.36(3), 2006. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000300003>

ROSSETTI DF, TOLEDO PM, GOES AM. New geological framework for Western Amazonia (Brazil) and implications for biogeography and evolution. **Quaternary Research**. v.63, p.68-78, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.10.001>

ROZO, J. M. G.; NOGUEIRA, A. C. R.; CARVALHO, A. S. Análise Multitemporal Do Sistema Fluvial Do Amazonas Entre A Ilha Do Careiro E A Foz Do Rio Madeira. In: In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 12. Goiânia, GO. **Anais [...]**, Inpe. 2005, p. 1875- 188.

SECRETARIA ESPECIAL DE SAÚDE INDÍGENA (SESAI). Ministério da Saúde. Coordenação Setorial de Gestão de Riscos e Integridade. Plataforma Integrada de Ouvidoria e Acesso a Informação. <https://falabr.cgu.gov.br/web/login?tipo=8&redirect=/manifestacao/criar?tipo=8>. Acesso em 17 de outubro 2022.

SILVA, M. L.; BONOTTO, D. M. Caracterização hidrogeoquímica na Formação Alter do Chão, município de Manaus (Am). In: Joint World Congress of Groundwater, 1. 2000.

SILVA, M.L.; SILVA, M.S.R. Perfil da qualidade das águas subterrâneas de Manaus. **HOLOS Environment**. 7(1), p. 01–15, 2007. <https://doi.org/10.14295/holos.v7i1.969>

SOARES, E.A.A. **Depósitos pleistocenos da região de confluência dos rios Negro e Solimões, porção oeste da Bacia do Amazonas**. 2007. Tese (Doutorado em Geologia), Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. 10.11606/T.44.2007.tde-14082008-141522

SOARES, E.A.A.; TATUMI, S.H.; RICCOMINI, C.; OSL Age determinations of Pleistocene fluvial deposits in central Amazonia. *Academia Brasileira de Ciências, Anais [...]*. 82(3), p: 691-699, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652010000300017>

SOARES, E.A.A.; WAHNFRIED, I.D.; DINO, R. Estratigrafia de subsuperfície da sequência sedimentar cretácea-neógena das regiões de Manaus e Itacoatiara, Amazônia Central. **Geol. USP, Sér. cient.**, São Paulo, v. 16, n.1, p. 23-41, março, 2016. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v16i1p23-41>

SOUZA, E.L.; GALVÃO, P.H.F.; PINHEIRO, C.S.S.; BAESSA, M.P.M.; DEMÉTRIO, J.G.A.; BRITO, W.R.R. Síntese da Hidrogeologia nas bacias sedimentares do Amazonas e Solimões: Sistemas de aquíferos Içá-Solimões e Alter do Chão. **Geol. USP, Sér. cient.**, v. 13 n. 1, março, 2013. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2013000100007>

TUCCI, C.E.M.; CABRAL, J.J.S. **Qualidade da Água Subterrânea. Documento Final.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – Recursos Hídricos, Prospecção Tecnológica, p. 53, 2013.

WAHNFRIED, I.D.; SOARES, E.A.A. Água subterrânea na Amazônia: Importância, estado atual do conhecimento e estratégias de pesquisa. **Ciência e ambiente**, v.44, p.36, 2012.



Revista Geonorte, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas. Manaus-Brasil. Obra licenciada sob Creative Commons Atribuição 3.0