

Geociências

Razões iônicas como marcadores de interações entre água superficial e aquífero no Igarapé do Quarenta, em Manaus-AM

Ionic ratios as markers of interactions between surface water and aquifer in the Quarenta Stream, in Manaus-AM

Anderson da Silva Lages¹, Angélica Chrystina Cruz Matias¹,
Sebastião Átila Fonseca Miranda¹, Paulo Renan Gomes Ferreira¹,
Sávio José Filgueiras Ferreira¹, Márcio Luiz da Silva¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM, Brasil

RESUMO

A cidade de Manaus apresenta inúmeros corpos de água chamados igarapés (*caminho de canoa – do tupi*), e isso se deve à proximidade do lençol freático à superfície, às condições climatológicas e à geomorfologia da região. Sabe-se que a cidade de Manaus passou por um intenso e vertiginoso processo de urbanização, associado a uma grande pressão poluidora sobre os recursos hídricos, não só os corpos de água superficiais, mas também o aquífero. As razões iônicas são formas de se estabelecer similaridades em ambientes geológicos e mostram como podem existir ambientes distintos com geoquímica semelhantes. Contudo, aspectos químicos similares nem sempre caracterizam condições de naturalidade e podem representar influência antropogênica. Diante disso, esse estudo teve por objetivo avaliar as razões iônicas de Mg/Na - Ca/Na, HCO₃/Na - Ca/Na e Na/Cl x condutividade elétrica, a partir de um monitoramento destas variáveis, que se estendeu de junho de 2021 a maio de 2022, na Bacia Hidrográfica do Educandos, em Manaus, associando o estudo entre águas superficiais e águas subterrâneas. Os resultados sugeriram que há semelhança entre o aquífero e o igarapé em 2/3 das amostras de água subterrânea, o que pode ser um forte indício de uma interação entre aquífero e água superficial, possivelmente, em uma infiltração no sentido igarapé – aquífero.

Palavras-chave: Assinatura geoquímica; Igarapé do Quarenta; IETÉ

ABSTRACT

The city of Manaus has numerous bodies of water called igarapés (canoe path – from Tupi) and this is due to the proximity of the water table to the surface, the climatological conditions and the geomorphology of the region. It is known that the city of Manaus underwent an intense and vertiginous process of urbanization, associated with a great polluting pressure on water resources, not only surface water bodies, but also the aquifer. Ionic ratios are ways of establishing similarities in geological environments

and show how distinct environments with similar geochemistry can exist. However, similar chemical aspects do not always characterize natural conditions and may represent anthropogenic influence. Therefore, this study aimed to evaluate the ionic ratios of Mg/Na - Ca/Na, HCO₃/Na - Ca/Na and Na/Cl x electrical conductivity, based on a monitoring of these variables, which lasted from June 2021 to May 2022, in the Educandos Watershed, in Manaus, associating the study between surface water and groundwater. The results suggested that there is similarity between the aquifer and the igarapé in 2/3 of the groundwater samples, which may be a strong indication of an interaction between the aquifer and surface water, possibly in an infiltration in the igarapé - aquifer sense.

Keywords: Geochemical signature; Quarenta Stream; IETÉ

1 INTRODUÇÃO

A cidade de Manaus está assentada sobre a Formação Alter do Chão, caracterizada pelo intenso intemperismo que a tornou pobre em íons. Nesta Formação está localizado o maior aquífero de água doce do mundo – de nome homônimo da Formação – o aquífero Alter do Chão, nomeado pela UNESCO de Sistema Aquífero Grande Amazônia – SAGA. Apesar da quantidade de precipitação na região Amazônica, o efeito do ciclo hidrológico nas propriedades físicas e químicas das águas no SAGA é baixo (Barata; Caputo, 2007). As águas do SAGA, na Formação Alter do Chão, se caracterizam por valores de pH entre 4,1 e 5,4, com a condutividade elétrica variando de 15,1 a 82,9 $\mu\text{S cm}^{-1}$, sendo essas águas classificadas como cloretadas sódicas ou potássicas, já com algumas evidências de contaminação antrópica. Gaillardet *et al.* (1997) elaboraram razões geoquímicas para regiões do Estado do Amazonas. Nesse estudo, apresentaram as razões iônicas ou razões geoquímicas como marcadores de ambientes. Atualmente, sabe-se que os centros urbanos da Amazônia estão passando por severas modificações antropogênicas, sobretudo, os corpos de água. Kim *et al.* (2015) apresentaram trabalhos semelhantes quanto à água subterrânea, sugerindo que a partir de correlações entre íons seria possível estabelecer a fonte de contaminantes. Em um cenário como a cidade de Manaus, cortada por inúmeros corpos de água chamados igarapés (*caminho de canoa* – do tupi), as razões iônicas poderiam inferir sobre a influência que a pressão urbana está exercendo sobre o aquífero.

As razões iônicas, associadas à estatística multivariada, são técnicas complementares de análises que auxiliam na interpretação de interações entre água superficial e subterrânea. Elumalai *et al.* (2023) combinaram as técnicas citadas na África do sul e concluiu que a água subterrânea estava exposta à fatores antropogênicos e geogênicos de contaminação. Sunkari *et al.* (2021) também utilizaram razões iônicas associadas à estatística multivariada para mitigar a salinização da água subterrânea em regiões costeiras em Gana. No Brasil, Bertrand *et al.* (2022), realizaram estudo similar na cidade de Recife, em Pernambuco, alinhando os resultados geoquímicos à caracteres socioambientais. Na ásia, Lee e Song (2007) utilizaram razões iônicas para determinar fenômenos de intrusão das águas costeiras nos poços de uma região da Coréia do sul. Nesse trabalho, os autores associaram a presença de nitrato à fatores antropogênicos devido à efluentes sépticos.

O aquífero Alter do Chão – SAGA está sob forte pressão urbana, ocasionada principalmente pela rápida expansão da cidade Manaus e centros circunvizinhos, como detalhado por Lages (2016), e o principal contaminante identificado para esse aquífero é o íon nitrato. Entretanto, devido à proximidade com o lençol freático, em Manaus, o aquífero pode estar mais sujeito a outros contaminantes originários de atividades antropogênicas, que comprometeria a baixa salinidade natural das águas deste aquífero. Um exemplo desses corpos de água que podem estar influenciando o aquífero em Manaus é o igarapé do Quarenta, corpo de água já bem conhecido pela comunidade científica (Bringel, 1986; Silva *et al.*, 1996; Pio *et al.*, 2013; Torrezani *et al.*, 2016; Calvo; Oliveira, 2020 e Lages *et al.*, 2022) e que carrega uma grande quantidade de esgotos de origem doméstica e industrial.

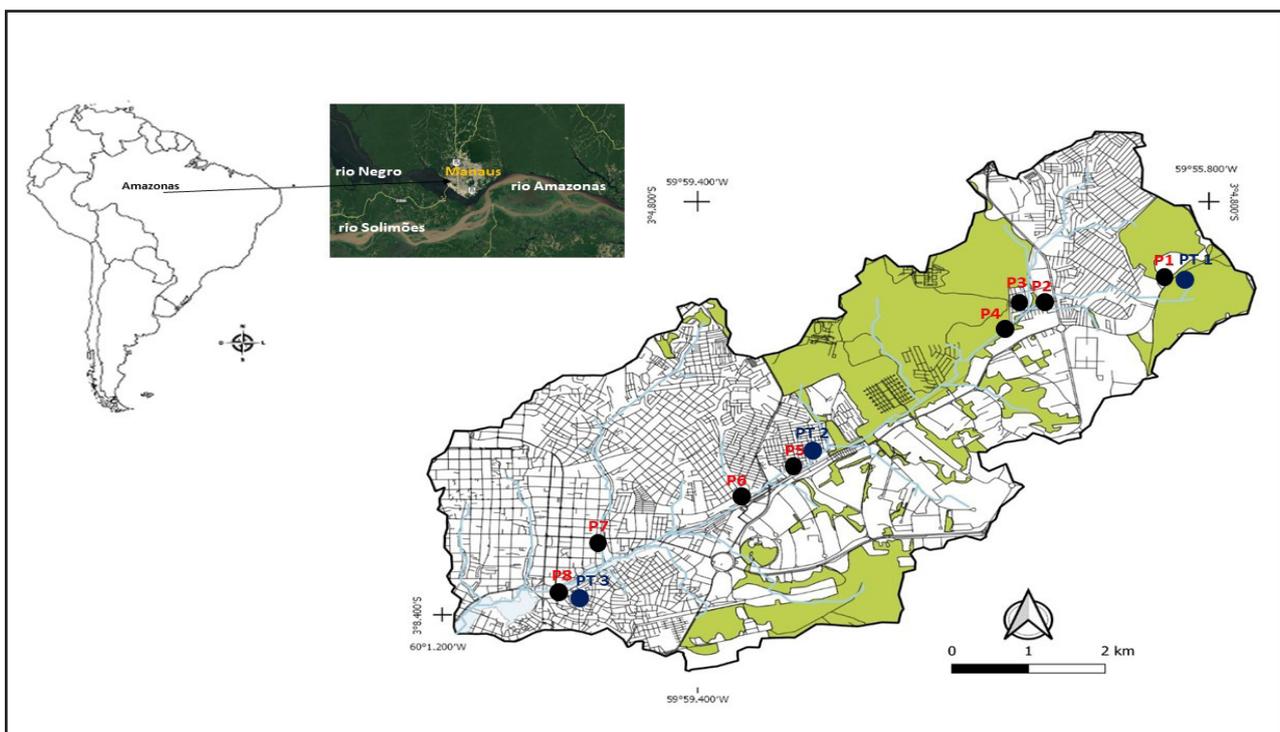
Dessa forma, ciente que o aquífero Alter do Chão em Manaus, naturalmente apresenta baixos indicadores para os íons sódio, cálcio, magnésio, cloreto e nitrato, associados à baixa acidez e à baixa condutividade elétrica dessas, esse estudo teve por objetivo traçar a assinatura iônica de poços próximos ao maior igarapé da bacia hidrográfica do Educandos, em Manaus-AM, visando investigar possíveis infiltrações deste corpo de água já degradado sobre o aquífero Alter do Chão – o SAGA.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área

O Sistema Aquífero Grande Amazônia – SAGA, está situado entre as bacias sedimentares do Marajó e Acre, recebe influências das seguintes formações: Nova Olinda, Itaituba, Monte Alegre, Curiri, Barreirinha, Irerê, Maecuru, Alter do Chão, Solimões e Içá. Em Itacoatiara e Manacapuru, a composição química da água do SAGA recebe influência das Formações Alter do Chão e Içá-Solimões (Souza *et al.*, 2013). Em Manaus, onde a Formação Alter do chão é predominante, os locais escolhidos para avaliar as possíveis interferências antropogênicas no aquífero foram próximos ao igarapé do Quarenta. Este igarapé é reconhecidamente um corpo de água que recebe esgotos de procedência doméstica e industrial (Calvo; Oliveira, 2020).

Figura 1 – Mapa de localização dos pontos de coleta de água superficial e água subterrânea na Bacia Hidrográfica do Educandos, em Manaus – AM



Fonte: Autores (2023)

Foram escolhidos aleatoriamente 9 pontos de coleta ao longo do igarapé do Quarenta na Bacia Hidrográfica do Educandos. Paralelo a esses nove pontos, foram selecionados três poços adjacentes a esses locais, como se cada poço estivesse associado a 3 pontos de coletas de águas superficiais, conforme figura 1. Os nove locais de coleta para águas superficiais foram identificados como P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 e P9, enquanto que os poços foram identificados como PT 1, PT 2 e PT3 (Poço Tubular).

2.2 Procedimentos Analíticos

Os locais estudados representam uma área de monitoramento de um projeto integrado chamado IETÉ. O monitoramento dessas águas, superficiais e subterrâneas, ocorre desde junho de 2021, com coletas semanais. Os dados que serão apresentados a seguir são resultados médios obtidos entre junho de 2021 e maio de 2022. As amostras de água de poços foram coletadas *in loco* em frascos de polietileno e transportadas imediatamente ao laboratório de Química ambiental do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA. As amostras de águas superficiais foram coletadas há aproximadamente 30 cm da superfície com auxílio de um dispositivo de teflon agarrado ao frasco de polietileno. As variáveis analisadas foram pH, condutividade elétrica, os íons sódio, potássio, magnésio, cálcio, bicarbonato, cloreto e nitrato para a produção das razões iônicas e estabelecer o tipo de procedência das águas drenadas pelo igarapé do Quarenta. Os íons sódio e potássio foram determinados por fotometria de chama; cálcio e magnésio foram determinados por volumetria de complexação, com Etileno Diamino Tetra Acético - EDTA- 0,04 N; o íon bicarbonato foi analisado por volumetria de neutralização usando H_2SO_4 0,01 N; e os íons cloreto e nitrato foram determinados por espectrofotometria - com o auxílio do Sistema de Injeção de Fluxo - FIA (*Flow Injection Analysis*).

2.3 Elaboração das Razões Iônicas

As razões iônicas foram calculadas levando-se em conta as concentrações em micromol de cada íon analisado, conforme trabalhos de Gaillardet *et al.* (1997) e

Elumalai *et al.* (2023). As razões iônicas fazem parte desse estudo com o objetivo de determinar a fonte de constituintes químicos e seus componentes hidrogeoquímico que influenciam a química da água na Bacia Hidrográfica do Educandos – BHE. O uso das razões iônicas também servirá o impacto do intemperismo de silicatos, de carbonatos (que não é o caso de Manaus) ou até identificar fontes geogênicas, antropogênicas ou processos de nitrificação nesses corpos de água. As razões iônicas utilizadas nesse estudo foram $Mg/Na \times Ca/Na$, $HCO_3/Ca \times Ca/Na$ e $Na/Cl \times$ Condutividade Elétrica, para mensurar a influência da evaporação nesses ambientes.

2.4 Estatística Multivariada

A estatística multivariada foi executada com o software gratuito R versão 4,01. O estudo exploratório se baseou na Análise da Componente Principal e buscou traçar dendogramas com as duas primeiras componentes, de modo que se apresentasse ao menos 75% das informações do conjunto de dados. Por fim, se investigou os maiores valores de *PC loadings* com o objetivo de discriminar a variável mais importante no conjunto de dados e quais os padrões comportamentais observados para as razões iônicas das águas superficiais e subterrâneas da BHE.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Normalmente, usam-se alguns testes químicos e geoquímicos para avaliar corpos de água subterrâneo, como razões iônicas ou correlações entre íons. uma importante correlação é a estabelecida entre os íons cloreto e nitrato. Nesse estudo, a correlação para cloreto x nitrato foi da ordem de 0,94, o que, conforme os estudos de Kim *et al.* (2015), denotam circunstâncias de infiltração de material antropogênicos para o aquífero, como resíduos de fossas sépticas. Isso fica ainda mais evidente porque o aquífero Alter do Chão em Manaus é pobre em cloreto e as taxas de nitrato não são oriundas de intemperismo de rochas. Os dados organizados, em médias, para o período avaliado, seguem na tabela 1.

Tabela 1 – Médias dos resultados de pH, Condutividade Elétrica – EC, sódio, potássio, magnésio, cálcio, bicarbonato, cloreto e nitrato nas águas monitoradas neste estudo (unidades em miligramas por litro)

	pH	CE*	Na	K	Mg	Ca	HCO₃	Cl	NO₃
P1	5,1	13,54	1,02	0,12	0,19	1,66	4,36	1,18	0,02
P2	6,96	208,33	14,06	5,17	1,2	15,67	44,43	14,1	0,39
P3	6,83	358,25	24,59	4,67	1,49	33,42	76,7	24,88	0,39
P4	6,91	280,03	19,79	5,05	1,36	26,25	60,5	20,15	0,69
P5	6,82	276,51	21,36	5,3	1,27	22,8	62,22	17,65	0,46
P6	6,83	269,13	21,78	4,95	1,28	21,44	61,36	18	0,16
P7	7,12	355,75	24,15	4,54	1,14	14,72	71,31	25,39	0,31
P8	6,96	264,57	26,37	5,19	1,23	17,33	55,16	21,63	0,19
P9	7,09	319,96	28,05	5,22	1,18	15,83	59,58	27,09	0,33
PT1	4,56	15,05	3,47	0,55	0,05	0,24	3,2	1,62	0,54
PT2	5,56	264	27,12	5,3	2,24	14,29	12,7	17,96	11,44
PT3	6,1	110,1	8,18	12,56	2,32	7,21	30,6	4,41	1,42

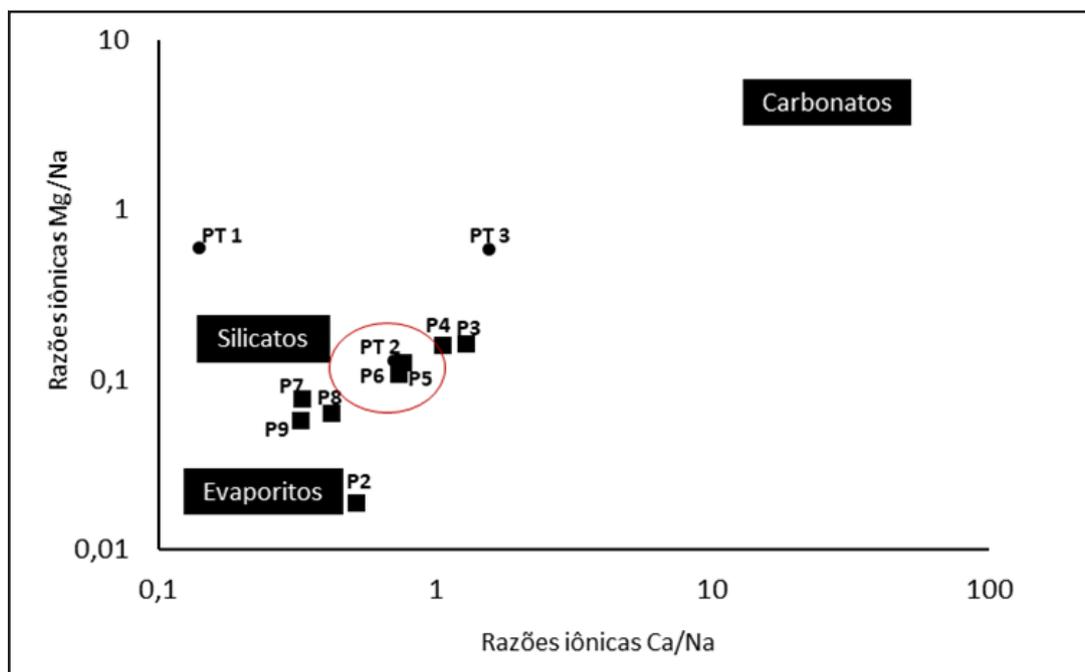
μS cm⁻¹

Se considerar que as águas do aquífero apresentam historicamente valores de pH entre 4,1 e 5,4, os valores apresentados estão dentro da faixa considerada normal (BARATA e CAPUTO, 2007). Contudo, o valor de pH observado para o PT3 é anômalo e sugere influência antropogênica. Para as águas superficiais, os trabalhos clássicos de Sioli (1958) informam que essas águas não podem ter valores de pH acima de 5,0. No entanto, os resultados de pH para as águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Educandos – BHE sugerem que a carga de esgotos lançada nesse corpo de água transformou totalmente as características naturais dessas águas. É uma diminuição na escala de acidez que pode chegar a cem vezes (P9, por exemplo). A condutividade elétrica dos corpos de água superficiais apresenta esses valores já há umas duas décadas, resultado da intensa pressão poluidora que Manaus exerce sobre os recursos hídricos. Ainda segundo Sioli (1958), as águas de Manaus deveriam ter condutividade elétrica inferior a 20 μS cm⁻¹, enquanto que as águas subterrâneas não apresentariam valores superiores 83 μS cm⁻¹ (Barata; Caputo, 2007). Os valores de condutividade no

PT2 mostram o quão sujeito à contaminação está esse poço ($264,0 \mu\text{S cm}^{-1}$).

Os íons se mostraram enriquecidos, sobretudo para o íon sódio e bicarbonato, seguido pelo cálcio e cloreto. São concentrações anômalas, conforme os dados do Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2012) para o aquífero Alter do Chão. Para as águas superficiais, os teores também são resultantes de atividades antropogênicas e não geogênicas. Os resultados de nitrato se apresentaram dentro da faixa observada por Calvo e Oliveira (2020). Entretanto, os dados de nitrato para o PT 2 apontam para uma severa contaminação de nitrato, cujo resultado viola até mesmo os dados da Portaria 888/2021 do Ministério da saúde (limite de 10 mg L^{-1}). Embora os teores sejam considerados baixos no geral, a correlação entre nitrato e cloreto geram uma correlação acima de 0,9, de onde se deduz que esse ambiente recebe infiltração de meios externos.

Figura 2 – Razões iônicas de Mg/Na em função das Razões iônicas Ca/Na (resultados em $\mu\text{mol L}^{-1}$)

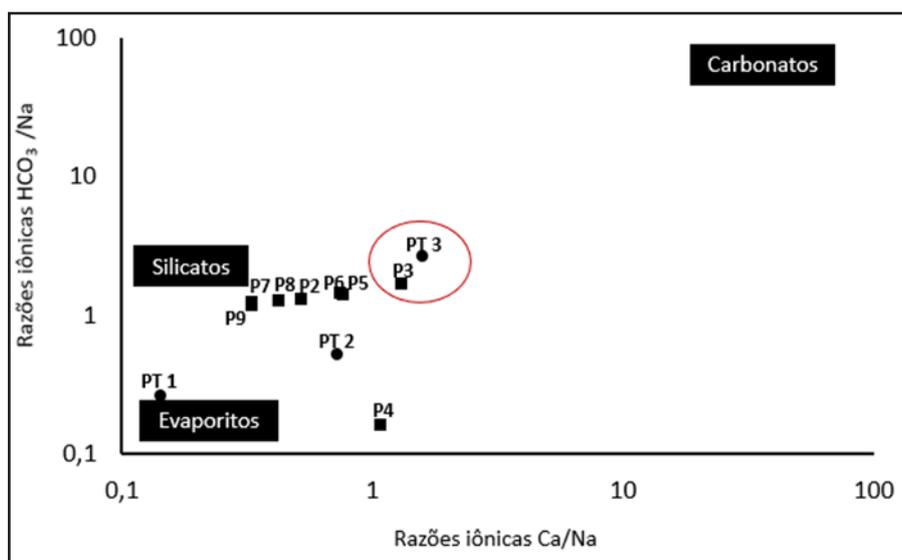


Fonte: Autores (2023)

Quanto às razões iônicas, os resultados sugerem que as águas trazem, na sua maioria, uma assinatura iônica de silicatos, o que condiz com a geologia da região. A exceção é o ponto P2 no campo dos evaporitos. Os altos teores de cloreto nesse local podem ter favorecido esse resultado. Entretanto, a similaridade observada para o poço PT 2 com os pontos P5 e P6 chama atenção. Esse poço traz a mesma assinatura iônica dos pontos monitorados no igarapé. Isso sugere que as águas têm a mesma natureza ou a mesma procedência. Pela variação sazonal observada nos resultados, pode-se sugerir que o fluxo desta água está no sentido igarapé do Quarenta – poços (Figura 2).

Testou-se ainda as razões $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ em função das razões $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ (Figura 3). A acidez das águas subterrâneas pode ter influenciado nesses resultados. Embora não se note assinaturas iônicas semelhantes, há uma proximidade entre as águas do PT 3 com pontos adjacentes. O detalhe é que os valores de pH e condutividade elétrica desse poço é totalmente anômalo às condições naturais do aquífero, o que sugere fatores antropogênicos de alteração, como infiltração de álcalis que provocam as mudanças na acidez dessas águas, e, conseqüentemente, na disposição dos íons.

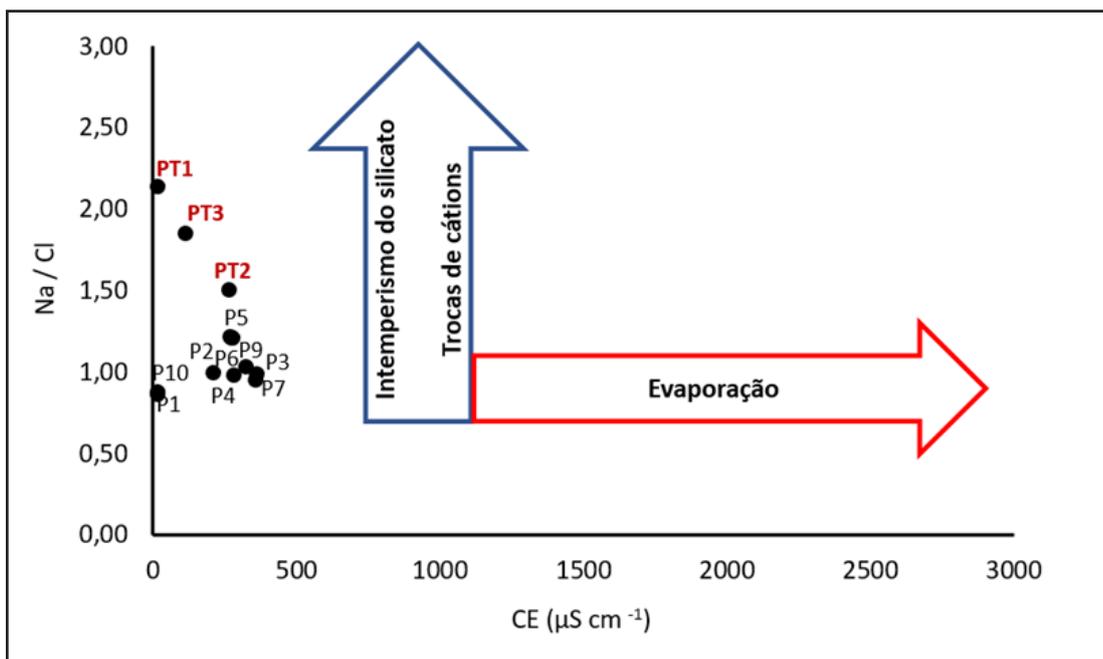
Figura 3 – Razões iônicas $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ em função das razões iônicas Ca/Na (valores em $\mu\text{mol L}^{-1}$)



Fonte: Autores (2023)

Dessa forma, ficou evidente que os poços PT2 e PT3 estão vulneráveis à contaminação. O PT 1 se mostrou um local ainda sob preservação da pressão urbana. Lages (2016) demonstrou que o SAGA é sensível às flutuações pluviométricas. Isso implica em quanto mais chuvas, maior a diluição das espécies químicas no aquífero; quanto menor o índice pluviométrico, maior a concentração dos íons nas águas subterrâneas. Vale ressaltar que essas observações foram feitas em poços de 100 e 120 m, respectivamente, nos arredores de Manaus.

Figura 4 – Taxas de intemperismo/troca catiônica e evaporação nas águas amostradas da Bacia Hidrográfica do Educandos – BHE



Fonte: Autores (2023)

Na Figura 4, tem-se os 12 pontos monitorados nesse estudo, com as razões Na/Cl em função da condutividade elétrica, onde se percebe a salinidade maior dos poços (P1, P2 e PT3) em detrimento dos locais amostrados nos igarapés. Isso denota que, apesar da alta taxa de eletrólitos lançados nos igarapés, a quantidade de sódio e cloro ainda é muito baixa, o que caracteriza esses corpos de água como sujeitos ao intemperismo das rochas silicáticas e propícias às reações de trocas catiônicas. Essa

última tendência, por exemplo, é mais nítida nas amostras de água subterrânea. Os resultados representaram bem um ambiente continental e não costeiro (Elumalai *et al.*, 2023 e Lee; Song, 2007), apesar da alta pluviosidade e da alta umidade presente na Amazônia, que poderia influenciar nas taxas de evaporação dessas amostras.

A razão Na/Cl em função da condutividade elétrica expressa que o fator evaporação não atua nessas águas, e que, apesar dos valores de sódio e cloreto, os valores de condutividade elétrica são baixos, se comparados com outros ambientes, resultado da intensa lixiviação promovida na Amazônia. Essa lixiviação, aliás, é muito influenciada pelo intemperismo das rochas silicáticas (Gaillardet *et al.*, 1997) Contudo, a proximidade com os igarapés e a alta pressão urbana poluidora que a expansão da cidade de Manaus provocou nos últimos anos, coloca essas águas do aquífero sob risco de contaminação, principalmente por compostos cloretados e nitrogenados, como o já mencionado íon nitrato.

2.1 Estatística Multivariada

A técnica estatística multivariada empregada nesse trabalho foi a Análise da Coordenada Principal – ACP, com o objetivo de identificar padrões entre os locais de coleta de amostras de água e avaliar se haveria similaridades entre os igarapés e os poços estudados. Para isso, se buscou estabelecer as 5 principais componentes da análise e traçar um dendrograma com as duas primeiras coordenadas (com pelo menos 60 – 75% das informações do conjunto de dados). A ACP utilizada nesse trabalho versou pela análise das razões iônicas $Mg/Na \times Ca/Na$ e $HCO_3/Na \times Ca/Na$.

A primeira ACP elaborada nesse estudo foi para as reações iônicas $Mg/Na \times Ca/Na$. Os autovalores gerados na construção dessa ACP estão na tabela 2. Como se nota, apesar de serem 12 pontos de análise, a ACP gerou somente duas coordenadas, as chamadas *PC loadings*, em virtude das duas razões usadas na análise.

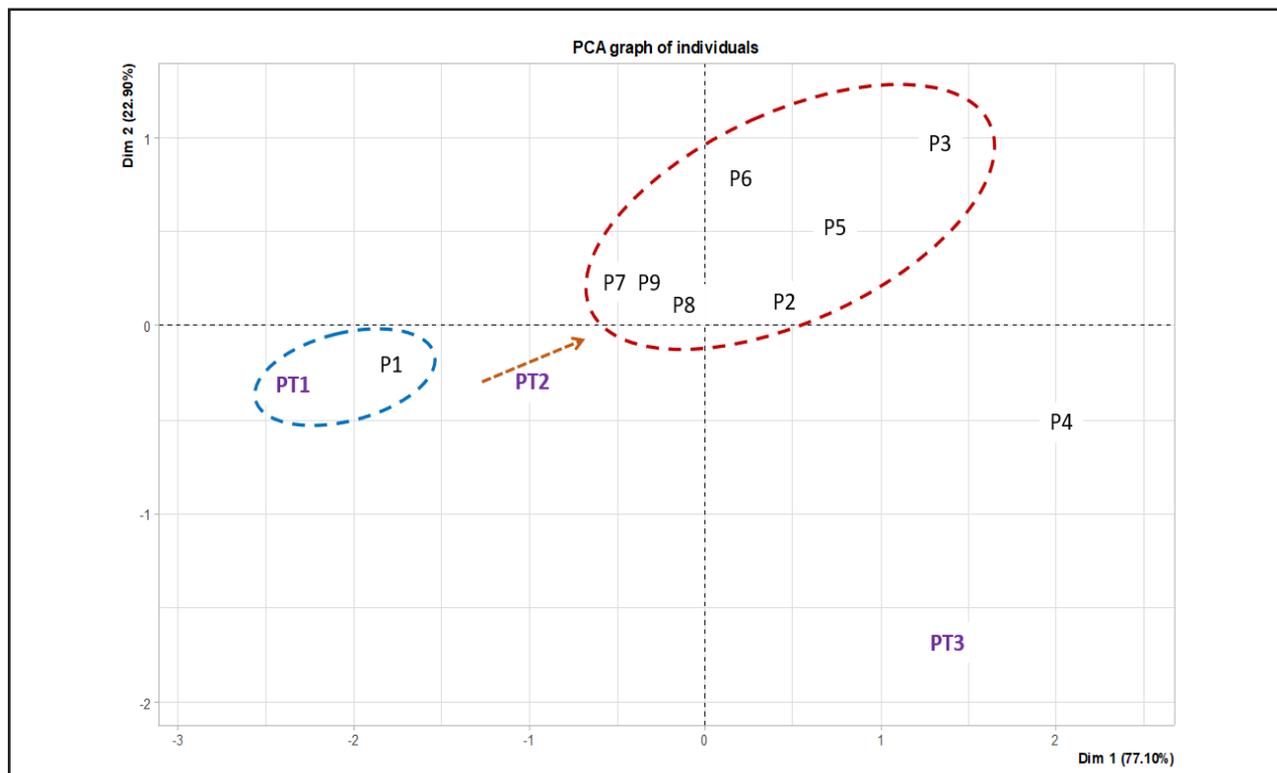
A PC1 traz mais de 77% das informações dos dados. De acordo com essas informações cruzadas com a PC2, o PT 1 guarda afinidade com o P1, ou seja, as águas

do igarapé no P1 guardam afinidade com as águas do lençol freático. Em termos geoquímicos, o PT1 e o P1 assimilam a mesma assinatura iônica em Mg/Na x Ca/Na. Outro detalhe que merece ser destacado nessa análise é que os PT1 e P1 podem ser usados como marcadores ambientais de naturalidade para os íons magnésio, sódio e cálcio. Para esses mesmos íons, o P4 e o poço PT3 não parecem ter afinidade iônica.

Tabela 2 – Autovalores gerados para a Análise da Coordenada Principal para as razões iônicas Mg/Na em função das razões iônicas Ca/Na

Eigenvalues	PC1	PC2
Variance	1,542	0,458
% of var.	77,101	22,899
Cumulative % of var.	77,101	100,00

Figura 5 – Análise da Coordenada Principal para os locais monitorados na BHE com base nas razões iônicas Mg/Na x Ca/Na



Fonte: Autores (2023)

Entretanto, os pontos de fozes da bacia hidrográfica e demais igarapés estudados se assemelham entre si, em virtude da carga homogênea de eletrólitos lançados em suas águas, enriquecidos em sódio, magnésio e cálcio. O aporte iônico para esses elementos é maior nas fozes, P7, P8 e P9, e há uma tendência de o PT2 ser influenciado pela dinâmica desses eletrólitos (Figura 5).

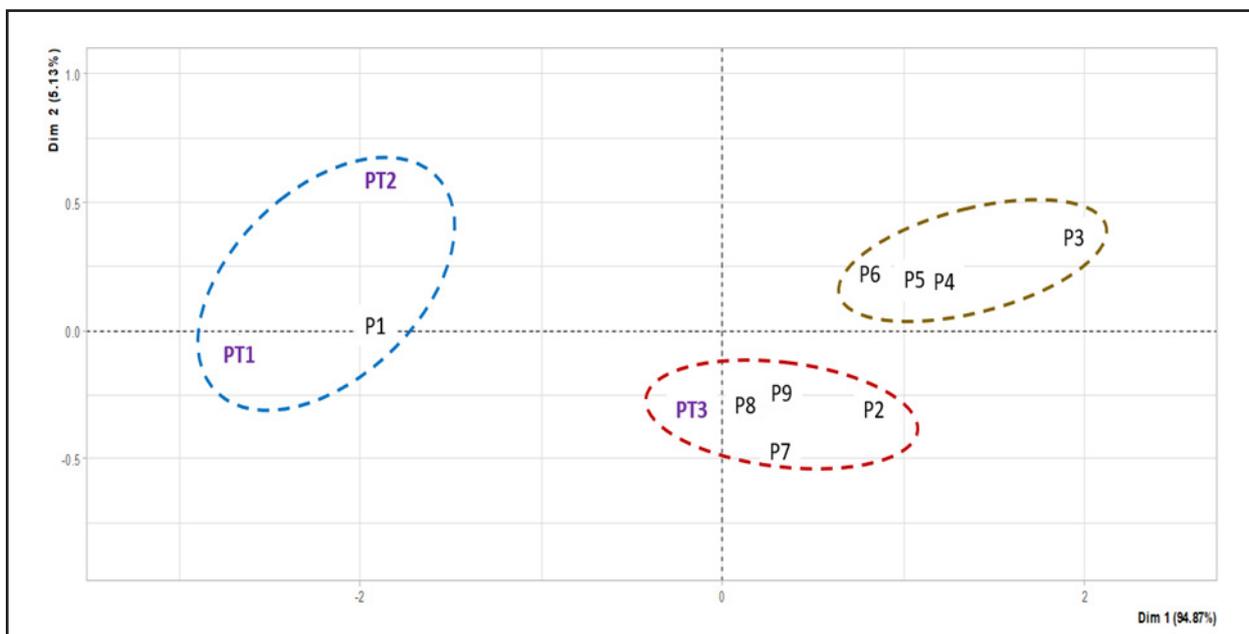
De fato, para $Mg/Na \times Ca/Na$ os pontos P1 e PT1 servem como locais de referência, e os igarapés destacados em vermelho são referências de locais degradados pelo lançamento de esgotos não tratados. O PT2 se apresentou nesta ACP como um local intermediário, ou seja, entre as condições químicas de referência e as condições de degradação dos igarapés contaminados da BHE, numa assinatura geoquímica intermediária para $Mg/Na \times Ca/Na$. A ACP para $HCO_3/Na \times Ca/Na$ também gerou duas componentes e foi possível visualizar padrões afins nos locais de coleta. A seguir, na tabela 3, tem-se os valores das *PCs loadings* para essa análise:

Tabela 3 – Autovalores para as Coordenadas Principais das razões iônicas HCO_3/Na em Função das razões iônicas Ca/Na

Eigenvalue	PC 1	PC 2
Variance	1,897	0,103
% of var.	94,866	5,134
Cumulative % of var	94,866	100

Nesta ACP, somente a PC1 trouxe 94,886% das informações dos dados. Confrontados com a PC2, as razões $HCO_3/Na \times Ca/Na$ destacaram os pontos de fozes da BHE junto com o poço PT3, o que sugere que esse poço tem a mesma assinatura geoquímica das fozes desta bacia hidrográfica, para HCO_3/Na e Ca/Na (Figura 6). Novamente, os pontos PT1 e P1 formam um grupo, associados ao PT2, o que demonstra que, para essas razões iônicas, o PT2 apresenta indícios que o tendem para um ponto de naturalidade, do ponto de vista desta assinatura geoquímica, apesar dos valores anômalos de outras variáveis.

Figura 6 – Análise da Coordenada Principal das razões iônicas HCO_3/Na em função das razões iônicas Ca/Na



Fonte: Autores (2023)

Por fim, os pontos intermediários da Bacia Hidrográfica do Educandos P3, P4, P5 e P6 formaram um segundo grupo, o que pode ser explicado pela proximidade desses locais e pela similaridade dos tipos de efluentes que neles são lançados. Essa concordância das razões $\text{HCO}_3/\text{Na} \times \text{Ca}/\text{Na}$ nesses locais pode ser atribuída à presença de resíduos industriais, que, nesses locais, é mais sensível que nos demais pontos.

Entretanto, além do PT3 apresentar afinidade geoquímica com as águas contaminadas das fozes da bacia hidrográfica, o P2 é o ponto mais próximo do P1, o local referência deste estudo, mas se observou o quanto a pressão poluidora de Manaus já está próxima da cabeceira desta bacia hidrográfica, pelos valores anômalos apresentados neste local e pela precoce afinidade geoquímica com as fozes, já altamente degradadas pelo lançamento de esgotos não tratados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os valores de pH e condutividade elétrica nas águas estudadas foram

considerados anômalos para a região. Nas águas superficiais, a diferença chega a ser de até duzentas vezes na escala de acidez. O mesmo vale para os resultados de condutividade elétrica. Valores de acidez anômalos, ocasionados por fatores antropogênicos e não geogênicos (PT3 acima de 6,0). Todos os locais de água superficial estão com pH alterados. Idem para a condutividade elétrica. O P1 foi o único ambiente que se mostrou um bom marcador de naturalidade, tanto para os dados de pH como de condutividade elétrica;

Todos os íons analisados apresentaram concentrações acima dos valores normais para a região, exceto o nitrato. O nitrato só foi alto no poço PT2, que, pela relação $\text{NO}_3 \times \text{Cl}$, sugere-se que a contaminação seja por infiltração de dejetos orgânicos, provavelmente resíduos de fossas sépticas ($R^2 > 0,9$);

As razões iônicas $\text{Mg}/\text{Na} \times \text{Ca}/\text{Na}$ revelaram predomínio de amostras de ambientes silicáticos, em que os igarapés guardaram assinatura geoquímica semelhante com o PT2; as razões iônicas $\text{HCO}_3/\text{Na} \times \text{Ca}/\text{Na}$ confirmaram o ambiente silicático apresentado nas razões $\text{Mg}/\text{Na} \times \text{Ca}/\text{Na}$, e o PT3 apresentou a mesma assinatura geoquímica do P3, na bacia hidrográfica do Educandos;

As razões $\text{Na}/\text{Cl} \times$ condutividade elétrica sugeriram que as amostras estão sob o intemperismo das rochas silicáticas e que há o domínio das trocas de cátions nesse meio, sobretudo, para sódio, potássio, cálcio e magnésio, e, a baixa influência que o fenômeno de evaporação traz para esse sistema.

A estatística multivariada para as razões $\text{Mg}/\text{Na} \times \text{Ca}/\text{Na}$ mostrou que o P1 guarda afinidade com o PT1, poço localizado próximo ao P1. Esse dado confirma o quão grande é a influência do aquífero em Manaus nos corpos de água superficiais. O ponto PT2 se mostrou um ponto intermediário entre os ambientes antropizados e os pontos de referência do estudo;

A Análise da Componente Principal, que descreveu as razões $\text{HCO}_3/\text{Na} \times \text{Ca}/\text{Na}$, revelou que o PT3 guarda afinidade geoquímica com as fozes da bacia hidrográfica, já altamente contaminadas pela pressão poluidora da cidade de Manaus;

Sugere-se, por fim, um trabalho futuro nesses poços que foram monitorados nesse estudo para detalhar se essas assinaturas geoquímicas se deram por infiltração de material de fossas sépticas, por limpezas inadequadas desses poços ou se o material contaminado dos igarapés está fluindo em direção a esses poços, ou ainda, se o aquífero está infiltrando para os igarapés, já que 2/3 dos poços analisados apresentaram algum tipo de afinidade com esses corpos de água.

AGRADECIMENTOS

O presente artigo é decorrente do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&DI) "IETÉ", que conta com financiamento da Samsung, usando recursos da Lei de Informática para a Amazônia Ocidental (Lei Federal nº 8.387/1991), estando sua divulgação de acordo com o previsto no artigo 39.º do Decreto nº 10.521/2020". Sendo este financiamento uma parceria INPA/SAMSUNG."

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM pela oportunidade na qualificação científica, apoio logístico, material técnico e de consumo para o desenvolvimento das pesquisas.

REFERÊNCIAS

BARATA, C. F.; CAPUTO, M. V.; **Geologia do petróleo da Bacia do Solimões**. O "Estado da Arte", Anais 4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, Campinas, p 1.1.0147 – 1, 2007.

BERTRAND, G.; PRETELET-GIRAUD, E.; CARY, L.; HIRATA, R.; MONTENEGRO, S.; PAIVA, A.; MAHLKNECHT, J.; COELHO, V.; ALMEIDA, C. Delineating groundwater contamination risks in southern coastal metropolises through implementation of geochemical and socio-environmental data in decision-tree and geographical information system. **Water Research**, v. 209, 117877, 2022.

BRINGEL, S. R. B. **Estudos do nível de poluição nos igarapés do Quarenta e do Parque 10 de Novembro**. Manaus, Universidade de Tecnologia do Amazonas/UTAM, 1986. 86p. il. (Relatório Técnico).

CALVO, B. D. R.; OLIVEIRA, T. C. O de. Hydrochemical Analysis of a Basin under Anthropogenic Influence and Effects in Manaus' Shoreline – Central Amazonia. **Caminhos de Geografia**, 2020, pp 209 – 219

ELUMALAI, V.; RAJMOHAN, N.; SITHOLE, B.; LI, P.; UTHANDI, S.; VAN TOL, J. Geochemical evolution and the processes controlling groundwater chemistry using ionic ratios, geochemical modelling and chemometric analysis in uMhlathuze catchment, KwaZulu-Natal, South Africa. **Chemosphere**, v. 312, p. 137179, 2023.

GAILLARDET, J.; DUPRE, B.; ALLEGRE, C. J.; NÉGREL, P. Chemical and Physical Denudation in the Amazon River Basin, **Chemical Geology** v. 142: 141-173, 1997.

KIM, K. W. YUN, S. T. KIM, H. K. KIM, J. W. Determination of natural backgrounds and thresholds of nitrate in South Korean groundwater using model-based statistical approaches. **Journal of Geochemical Exploration** v. 148, 196–205, 2015.

LAGES, A. da S.; MIRANDA, S. Á. F.; FERREIRA, S. J. F.; ALBUQUERQUE, S. D. de; ALBUQUERQUE, A. C. de. Dynamics of heavy metals in the waters of Igarape do Quarenta: The water body that crosses the industrial hub in the Brazilian Amazon. **Open Science Journal**, v. 7, n. 2, 2022.

LAGES, A. da S. **Sistema aquífero grande Amazônia: um estudo sobre a composição química das águas das cidades de Itacoatiara e Manacapuru-AM**. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Amazonas, 2016.

LEE, J. Y.; SONG, S. H. Groundwater chemistry and ionic ratios in a western coastal aquifer of Buan, Korea: implication for seawater intrusion. **Geosciences Journal**, v. 11, p. 259-270, 2007.

PIO, M. C. da S.; SOUZA, K. dos S.; SANTANA, G. P. Capacidade da Lemna aequinoctialis para acumular metais pesados de água contaminada. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 2, p. 203– 210, 2013.

SILVA, M. do S. R. da; RAMOS, J. F.; PINTO, A. G. N. Metais de transição nos sedimentos de Igarapés de Manaus. **Acta Limnológica Brasiliensis**, v. 11, n. 2, p. 89 – 100, 1996.

SIOLI, H. 1958. **Valores de pH de águas da Amazonia**. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, 1: 1-18, Belem/PA.

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**. Revista do Instituto de Geociências, 2013.

SUNKARI, E. D.; ABU, M.; ZANGO, M. S. Geochemical evolution and tracing of groundwater salinization using different ionic ratios, multivariate statistical and geochemical modeling approaches in a typical semi-arid basin. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 236, 103742, 2021.

TORREZANI, L.; SARGENTINI JUNIOR, É.; OLIVEIRA, C. A. de; SANTANA, G. P. Índice de geoacumulação de mercúrio na bacia do Igarapé do Educandos (Manaus/Amazonas). **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 2, n. 3, p. 161-170, 2016.

Contribuição de Autoria

1 – Anderson da Silva Lages

Titulação: Químico, Doutor em Química Analítica

<https://orcid.org/0000-0001-8283-8568>. asl.qmc@gmail.com

Contribuição: Primeiro autor e organizador dos dados

2 – Angélica Chrystina Cruz Matias

Titulação: Bióloga, Especialista e ciências forenses

<https://orcid.org/0000-0002-4235-9797> . angelicachrystina25@gmail.com

Contribuição: Responsável pelas análises dos íons

3 – Sebastião Átila Fonseca Miranda

Titulação: Químico, doutor em Química Analítica

<https://orcid.org/0000-0001-8218-9115> • sebastiaomiranda1958@gmail.com

Contribuição: Escrita – Revisão de dados

4 – Paulo Renan Gomes Ferreira

Titulação: Químico, doutor em Química Analítica

<https://orcid.org/0009-0006-2511-3337> • prferreira29@gmail.com

Contribuição: Escrita – Coleta de amostras e análise de íons.

5 – Sávio José Filgueiras Ferreira

Titulação: Químico, doutor em Ciências da Engenharia Ambiental

<https://orcid.org/0000-0001-9688-1700> • saviojfferreira@gmail.com

Contribuição: Contribuição na escrita e na supervisão de resultados

6 – Márcio Luiz da Silva

Titulação: Geólogo, doutor em Geociências

<https://orcid.org/0000-0002-3775-7133> • marciols44@gmail.com

Contribuição: Coordenador do projeto

Como citar este artigo

LAGES A. S.; MATIAS, A. C. C.; MIRANDA, S. Á. F.; FERREIRA, P. R.; FERREIRA, S. J. F.; SILVA, M. L da. Razões iônicas como marcadores de interações entre água superficial e aquífero no Igarapé do Quarenta, em Manaus – AM. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 45, e37, 2023. DOI 10.5902/2179460X74607. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X74607>.