

Caracterização Geológica e Hidroquímica de Nascentes Visando sua Proteção Ambiental em Analândia, São Paulo - Brasil

Springs Geological and Hydrochemical Characterization aiming at their Environmental Protection in Analândia, São Paulo – Brazil

Ana Elisa Silva de Abreu¹ , Jorge Lucas Braz Mesquita¹ 
& Luis Fernando Murillo Bermudez² 

¹Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, SP, Brasil

²Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, Brasil

E-mails: anaelisa@ige.unicamp.br; jlbmesquita@gmail.com; luismurillo@fec.unicamp.br

Resumo

Em uma área de 4 km² em Analândia, SP, foram realizados trabalhos de campo e análises hidroquímicas para caracterização das nascentes e identificação de suas áreas de contribuição, visando sua proteção. A maioria das nascentes estudadas é fixa, tem vazão inferior a 100ml/s e encontra-se degradada. A nascente N2 tem maior vazão (1,9 l/s) e, portanto, maior valor para formação das vazões dos rios locais. É uma nascente secundária e sequer aparece nos mapas oficiais. A hidroquímica de íon maiores não permitiu inferências sobre a diferenciação das nascentes, porém as concentrações de elementos traço, especialmente os elementos terras raras, claramente diferencia a nascente N2 das demais e sugere que se trata de um afloramento de águas de circulação mais profunda, como revelam as anomalias de cério. Para esta nascente a área de recarga não corresponde necessariamente à bacia hidrográfica de montante, como ocorre com as demais nascentes da área de estudo. Estes resultados evidenciam a importância do trabalho de campo e da hidroquímica para a tomada de decisões visando a proteção de nascentes, entendimento das áreas de recarga e a garantia da disponibilidade hídrica no longo prazo.

Palavras-chave: Valoração de Nascentes; Bacia de Contribuição; Elementos Terras Raras

Abstract

Fieldwork and hydro chemical analyses were conducted to identify spring locations and their recharge areas to ensure their conservation in a 4 km² area in Analândia, São Paulo State, Brazil. Most of the studied springs are fixed, degraded and with a net discharge of less than 100 ml/s. Spring N2, which provides the largest discharge in the area (1,9 l/s) is a secondary spring. This spring should be considered the most valuable in the area for base flow formation of local rivers, but it is not indicated in official drainage maps. Major ion hydrochemistry analyses did not allow differentiation among springs, but the trace ions' hydrochemistry, namely the concentrations of rare earth elements, clearly distinguish the aforementioned spring from the others. Combined evidence suggests that the outcropping water in spring N2 belongs to a deeper groundwater circulation cell, as evidenced by a distinctive cerium anomaly. Unlike the other springs in the area, the topographic divides do not necessarily correspond to the groundwater divide for spring N2. These results highlight the importance of fieldwork and hydrochemistry for decisions to be made regarding spring protection and water availability over long periods of time.

Keywords: Springs Valuation; Fountainhead Recharge Areas; Rare Earth Elements

1 Introdução

Dentre os objetivos para o desenvolvimento sustentável destaca-se o objetivo 6: assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todas as pessoas. Para se atingir este objetivo uma das metas é, até 2030, enfrentar a escassez de água e reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água, garantindo assim a segurança hídrica.

No Brasil, parte das ações de garantia da segurança hídrica está relacionada à proteção das nascentes, que podem ser entendidas como o local na superfície onde a água subterrânea é descarregada do aquífero, criando um fluxo visível (Kresic, 2010). Souza *et al.* (2019) discutem a legislação federal de proteção às nascentes, destacando que essa protege atualmente o entorno de qualquer afloramento de água subterrânea, seja ele perene ou intermitente. Quanto à abrangência da área de proteção, os autores reúnem as alterações da legislação ao longo do tempo, evidenciando que em versões ultrapassadas dos dispositivos legais houve proteção formal a toda a bacia hidrográfica localizada à montante da nascente, apesar de hoje em dia a área de proteção se restringir a 50 metros do seu entorno.

Pinto *et al.* (2004) destacam que a caracterização do meio físico das bacias hidrográficas, em especial as áreas de recarga das nascentes, são condições básicas para o sucesso do planejamento da conservação e produção de água. Ou seja, além da área do entorno da nascente, que é protegida por lei atualmente, é preciso também entender qual é a área de contribuição para formação da quantidade e da qualidade do fluxo subterrâneo que originará a nascente.

O entendimento dos controles geológicos para formação das nascentes é fundamental para que se faça a delimitação da bacia de contribuição para sua recarga. Além dos mapeamentos, outro dado que pode ser utilizado para o entendimento dos controles geológicos para formação da nascente é a hidroquímica das águas aflorantes. As águas subterrâneas classificam-se segundo a predominância dos ânions mais abundantes (também chamados de ânions maiores) em bicarbonatadas, sulfatadas ou cloretadas e segundo a predominância dos cátions mais abundantes em cálcicas, magnesianas, sódicas ou potássicas. Quando não há predominância de um destes íons são denominadas águas mistas. Neste trabalho esta classificação será também aplicada às águas de nascentes, considerando-se o exposto por Kresic (2010), que afirma que as nascentes são pontos de acesso às águas do aquífero, permitindo uma avaliação de sua qualidade.

A área de estudo compreende uma área rural do município de Analândia, SP, onde foram realizadas

visitas de campo, análises hidroquímicas e mapeamento geológico em escala 1:10.000, com o objetivo de se obter uma melhor compreensão dos processos geológicos que levam à formação das nascentes na área, partindo-se do princípio de que não é possível proteger o que não se conhece. Em trabalho anterior realizados em região contígua, com exposição das mesmas formações geológicas, Failache (2018) realizou a caracterização das nascentes utilizando a hidroquímica de íons maiores. Os resultados da hidroquímica não permitiram a identificação de diferenças significativas entre as diversas nascentes da sua área de estudos.

No presente trabalho, além da hidroquímica dos elementos maiores, foi utilizada a hidroquímica dos elementos traço denominados elementos terras raras (ETR) para avaliar as possíveis origens das águas aflorantes. A utilização desses elementos no estudo de nascentes não é convencional, entretanto, como destacam Tweed *et al.* (2006), as assinaturas dos ETR podem fornecer informações diferentes e complementares às informações fornecidas pelas concentrações dos íons mais abundantes, revelando proveniências distintas das águas subterrâneas.

Assim sendo, este artigo apresenta os resultados dessas investigações, evidenciando algumas das dificuldades práticas para aplicação da legislação vigente e para a delimitação das bacias de contribuição, além de discutir critérios para valoração das nascentes existentes na área de estudo.

Esta pesquisa também teve como objetivo fornecer apoio técnico às decisões tomadas na Unidade Gestora do Projeto Nascentes Analândia. Trata-se de um dos projetos dos Comitês de Bacias Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ) para promover a recuperação, conservação e proteção ambiental em áreas de mananciais e faz parte da política de mananciais PCJ (Comitês PCJ, 2018), que inclui ações de cadastramento e de planejamento para o reflorestamento das áreas protegidas legalmente no entorno das nascentes.

2 Área de Estudo

A área estudada tem cerca de 4 km² e está localizada no município de Analândia, próximo à região central do estado de São Paulo, como indicado na Figura 1. O uso do solo na área de estudo é rural e ela está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 5, na região de cabeceira do rio Corumbataí, afluente do rio Piracicaba pela margem direita. Os rios mais importantes na área são o próprio Corumbataí, situado no seu extremo sul, e o córrego do Cavalheiro, afluente do rio Corumbataí pela margem esquerda, que atravessa a área de noroeste para sudeste.

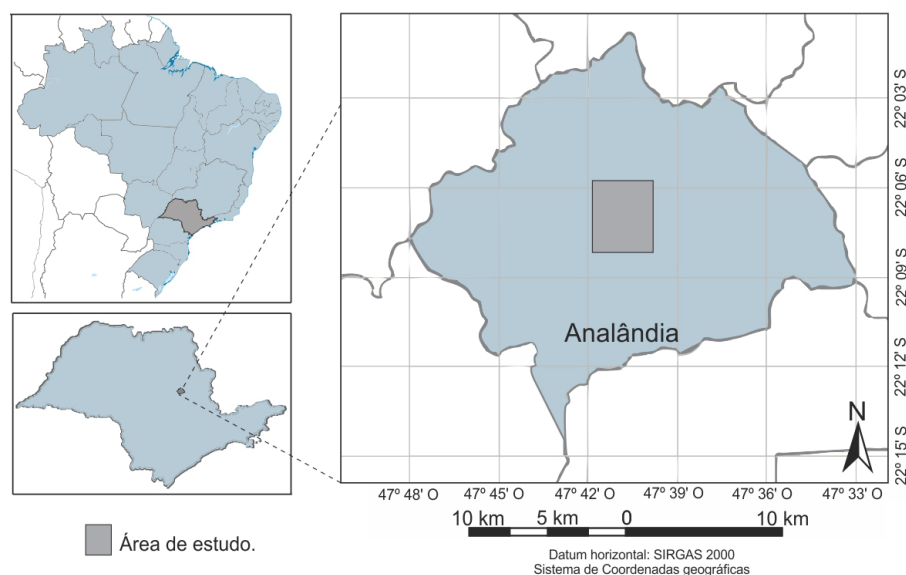


Figura 1 Localização da área de estudo.

Nesta área afloram as formações Pirambóia, Botucatu, Serra Geral, Itaqueri e Santa Rita do Passa Quatro. A área de estudo está totalmente inserida no compartimento geomorfológico denominado Serra Geral.

O clima, segundo Alvares *et al.* (2013) é predominantemente do tipo Cwa, ou seja, subtropical úmido com inverno seco e verão quente. A temperatura média mensal mais elevada é de 22,1°C, em fevereiro, e a mínima média mensal ocorre em julho com 15,8°C. As chuvas são em média 1.366mm por ano, sendo que o período chuvoso ocorre nos meses de outubro a março e o período seco nos meses de abril a setembro.

Os aquíferos que ocorrem na área de estudo são o Guarani, que na região é um aquífero livre e ocorre em cotas inferiores a 975m, o aquífero Bauru, representado pelas rochas da formação Itaqueri, e que aflora acima da cota 975m. Os aquíferos Serra Geral e Diabásio, representados pelos derrames e soleiras de diabásio, respectivamente, afloram em cotas variadas, intercalados ao aquífero Guarani ou sobrepostos a ele (Abreu & Augusto Filho, 2012; Failache, 2018).

3 Materiais e Método

Os trabalhos de campo, visando o mapeamento geológico e a localização e caracterização das nascentes, foram realizados em janeiro e dezembro de 2018 (estação chuvosa) e em junho e setembro de 2019 (estação seca), com a descrição de 35 afloramentos e de 21 nascentes.

Para a localização das nascentes em campo utilizaram-se informações colhidas junto aos proprietários

e funcionários das fazendas ou sítios e quatro mapas topográficos em escala 1:10.000, folhas 057/088, 058/088, 057/089 e 058/089 do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo, publicadas pelo Governo do Estado de São Paulo em 1979. Doravante estes mapas serão denominados apenas “mapas de 1979”.

As coordenadas do ponto de exfiltração foram marcadas em campo com equipamentos de GPS portátil e foram posteriormente lançadas sobre as bases cartográficas utilizando-se o programa ArcGis® da Esri. Nos trabalhos de campo também foi possível observar os usos do solo no entorno da nascente, com ênfase para a existência de vegetação e de cercas no seu entorno ou não, o que permitiu a classificação das nascentes quanto ao seu grau de proteção, conforme proposto por Pinto *et al.* (2004), que as classifica como preservadas, quando apresentam pelo menos 50 metros de vegetação natural no seu entorno; perturbadas, quando não apresentam 50 metros de vegetação natural no seu entorno, estão ocupadas em parte por pastagem e/ou agricultura, mas apresentavam um bom estado de conservação; e degradadas, quando se encontram com alto grau de perturbação, muito pouco vegetadas, solo compactado, presença de gado e de erosões ou voçorocas.

Durante os trabalhos de campo as nascentes foram inspecionadas visando sua classificação de acordo com a proposta de Faria (1997) em fixas ou móveis, pontuais ou difusas e pseudonascentes, conforme o caso, e de acordo com a proposta de Jones & Crane (1984) em primárias ou secundárias.

As nascentes foram também classificadas de acordo com Fetter (1994), que propõe que se observe o contexto

geológico da nascente, ou seja: nascentes de depressão, formadas por uma mudança na topografia, permitindo que o nível d'água alcance a superfície; nascentes de contato, que ocorrem quando unidades rochosas ou solos permeáveis sobrepõem rochas de permeabilidades menores; nascentes de falha ou de junta, criadas por uma fratura localizada em uma rocha impermeável sobrepondo um aquífero, cuja classificação varia de acordo com o movimento destas rochas; nascentes cársticas, localizadas em terrenos cársticos onde o nível d'água nos sumidouros podem subir ou descer rapidamente de acordo com a precipitação.

Com relação ao mapeamento geológico, foi realizada fotointerpretação da área de estudo através de imagens da empresa BASE, sobrevôo de 2006, com escala 1:30.000, além de imagens obtidas pelo Google Earth e dos mapas de 1979, em que se procuraram quebras no relevo e diferentes alinhamentos que poderiam ter causa geológica.

Nas nascentes foram determinados *in situ* os parâmetros temperatura da água e condutividade elétrica, utilizando uma sonda Multiparâmetros da marca YSI®, modelo 556 MPS. A vazão foi medida com recipiente graduado e cronômetro, sempre que o fluxo era concentrado o suficiente para se realizar a medida. Na maioria das vezes realizou-se determinação de um número aproximado, inferior ao valor real da vazão, pois parte do fluxo não era interceptado pelo recipiente de coleta. Essas medidas permitiram a classificação das nascentes de acordo com Meinzer (1927).

Cinco nascentes foram escolhidas para amostragem hidroquímica na estação chuvosa, pois representam situações e condicionantes geológicos e geomorfológicos diferentes entre si. Procurou-se repetir a amostragem na estação seca, tendo sido amostradas apenas três das nascentes nesta época devido à diminuição das vazões.

Todas as amostras de águas foram coletadas em recipientes plásticos, filtradas com auxílio de seringas em filtros de acetato de celulose abertura 0,22 µm de diâmetro, novamente armazenadas em recipientes plásticos pré-esterilizados, mantidas refrigeradas em temperatura de 4°C e acidificadas (para análise de cátions), observando-se os tempos máximos de armazenamento antes da realização dos ensaios. Todos os recipientes e filtros utilizados para amostragem foram ambientados três vezes com água da nascente antes da realização da amostragem.

A alcalinidade foi determinada por titulação acidimétrica (ácido clorídrico diluído) utilizando-se pipetas eletrônicas nas 24 horas seguintes à coleta das amostras. Os ânions maiores (cloreto, sulfato, nitrato) foram determinados por Cromatografia de Íons (equipamento Dionex ICS 2500) e os cátions (incluindo os ETR) foram determinados por Espectrometria de Massas com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS).

Os ETR, aos quais se dará maior destaque nesse artigo, correspondem ao grupo 3 da tabela periódica e incluem os lantanídeos com números atômicos entre 57 (lantânio) até 71 (lutécio). Estes elementos apresentam propriedades físicas e químicas similares constituindo um grupo de comportamento químico coerente. Os ETR cério e európio podem ocorrer em mais de um estado de oxidação, resultando no seu desacoplamento dos demais elementos da série e na formação de anomalias que revelam condições específicas de trânsito das águas subterrâneas. As anomalias positivas de európio são comumente associadas à interação com rochas onde abundam plagioclásios ou com solos derivados deste tipo de rocha. As anomalias negativas de cério podem revelar condições de Eh-pH diferenciadas em subsuperfície, pois em condições mais oxidantes e mais básicas forma-se o CeO_2 , que pode ser filtrado/retirado da solução como fase sólida, ou podem revelar a interação das águas com rochas de origem marinha, onde ainda predomina a assinatura da água do mar, que se caracteriza por acentuada anomalia negativa de cério (Tweed *et al.*, 2006; Salinas-Reyes & Ortega-Guerrero, 2019).

Para tratamento dos dados relativos aos ETR foi utilizado procedimento convencional para amostras de águas, com a normalização das concentrações pelo Folhelho Australiano Pós-Arqueano (PAAS) (McLennan, 1989). Para o cálculo da anomalia de Ce utilizou-se a Equação 1 apresentada por Lawrence *et al.* (2006):

$$\frac{Ce}{Ce^*} = \frac{Ce_N}{[Pr_N^* (Pr_N / Nd_N)]} \quad (1)$$

Em que: Ce/Ce^* = anomalia de cério; Ce_N = concentração de cério normalizada pelo PAAS, Pr_N = concentração de praseodímio normalizada pelo PAAS; Nd_N = concentração de neodímio normalizada pelo PAAS. As anomalias positivas resultam maiores que 1 e as anomalias negativas resultam menores que 1.

E a Equação 2 dos mesmos autores para cálculo da anomalia de Eu:

$$\frac{Eu}{Eu^*} = \frac{Eu_N}{(Sm_N^2 * Tb_N)^{1/3}} \quad (2)$$

Em que: Eu/Eu^* = anomalia de európio; Eu_N = concentração de európio normalizada pelo PAAS, Sm_N = concentração de samário normalizada pelo PAAS; Tb_N = concentração de térbio normalizada pelo PAAS. As anomalias positivas resultam maiores que 1 e as anomalias negativas resultam menores que 1.

4 Resultados e Discussões

Na área de estudo predominam nascentes de sétima ordem (10-100 ml/s) quanto à vazão (Meinzer, 1927), com pequena alteração entre a estação seca e a chuvosa, e a maioria das nascentes é primária e fixa. A Tabela 1 aponta a unidade geológica na qual a nascente se insere e a Figura 2 apresenta sua localização. Como destacado na Figura 3, verifica-se que a maioria das nascentes se localiza na prática em posição diferente daquela indicada nos mapas de 1979, que formam a base cartográfica das Figuras 2 e 3 e que são utilizados rotineiramente para extração da posição das nascentes e aplicação dos dispositivos legais.

Identificaram-se dois principais controles geológicos para a ocorrência de nascentes na área de estudo. O primeiro deles é a incisão de vales na paisagem, seja por evolução do próprio relevo, seja pela ocorrência de erosão antrópica. Este processo é responsável pela formação das nascentes N5, N10, N11, N12, N13, N14 e 15, todas de depressão.

Ressalta-se que nas nascentes N13 e N15 estão expostos arenitos alterados, com a estrutura da rocha preservada, e em ambos os casos a exsudação de água

ocorre principalmente por juntas. Entretanto a formação da nascente deve-se à incisão do relevo por conta de erosão antrópica, que atingiu e expôs o solo de alteração de arenito.

O segundo controle geológico é a ocorrência de materiais pouco permeáveis sotopostos a camadas permeáveis, normalmente inconsolidadas (solos transportados ou residuais). Na área estudada acredita-se que a ocorrência de arenitos cozidos e de rochas básicas sãs, ambos pouco permeáveis, seja a responsável pela formação das nascentes N8, N9, N16, N17, N18, N19, N20, N21 na Serra do Cuscuzeiro.

Em ambos os casos a área de contribuição para a recarga da nascente pode ser delimitada a partir da topografia do terreno, traçando-se os divisores de água da região situada à montante da mesma, pois essas nascentes representam afloramentos de aquíferos livres, cuja potenciometria geralmente acompanha a topografia.

A nascente N2 configura-se como uma exceção na área de estudo, tanto pela sua vazão de 1,9l/s, ou seja, quinta ordem segundo Meinzer (1927), muito superior às demais, quanto pelo seu condicionamento geológico. Nesta nascente a água aflora na intersecção de duas fraturas do arenito, uma

Tabela 1 Caracterização das nascentes estudadas.

Nascente	Geologia local / Formação
N1	Areias finas inconsolidadas / SRPQ
N2	Arenito com estratificações cruzadas. A água brota no encontro de duas juntas com atitude N14/60 e N357/65 / P-B
N3	Areias finas inconsolidadas. Parece ser antiga erosão estabilizada por vegetação / SRPQ
N4	Solo arenoso sobre arenito alterado fino, além da presença de uma junta sub-horizontal / P-B
N5	Areias finas inconsolidadas. Trata-se de uma erosão / SRPQ
N6	Grande área tomada por vegetação típica de região úmida, com exsudação de água difusa. Blocos de rocha básica e solo argiloso a montante da área de exudação / SG(?)
N7	Corpo de tálus com matriz areno-argilosa e blocos de arenito, sobreposto a arenito fino/ Tálus recente sobre P-B
N8	Solo de alteração de rocha básica sobre arenitos metamorfozados pelos derrames, ditos "cozidos" / SG
N9	Estação chuvosa: solo argiloso arroxeadado Estação seca: colúvio recente sobre SG
N10	Solo arenoso. Vários blocos de arenito fino. Erosão / P-B
N11	Solo arenoso sobre arenito alterado fino / P-B
N12	Grande área tomada por vegetação típica de área úmida, com exsudação de água difusa / SRPQ (?)
N13	Arenito fino com estratificação cruzada alterado. Erosão. / P-B
N14	Camada de arenito alterado sobre camada de argilito alterado. Erosão / P-B
N15	Arenito de granulometria média a fina, estratificado. Erosão / P-B
N16	Área tomada por vegetação típica de região úmida, com exsudação difusa de água. Logo a jusante aflora rocha básica sã / P-B
N17	Colúvio areno-argiloso / Colúvio recente ND
N18	Colúvio areno-argiloso sobre rocha básica sã / Colúvio sobre SG
N19	Solo residual. Erosão / IT
N20	Solo residual com camada de cerca de 10 centímetros de arenito com cimentação limonítica. Erosão / IT
N21	Área com exsudação difusa de água / IT

Legenda: **SRPQ** = Fm. Santa Rita do Passa Quatro; **P/B** = Formações Pirambóia/Botucatu; **SG** = Fm. Serra Geral; **IT** = Fm. Itaqueri; **ND** = Não determinada.

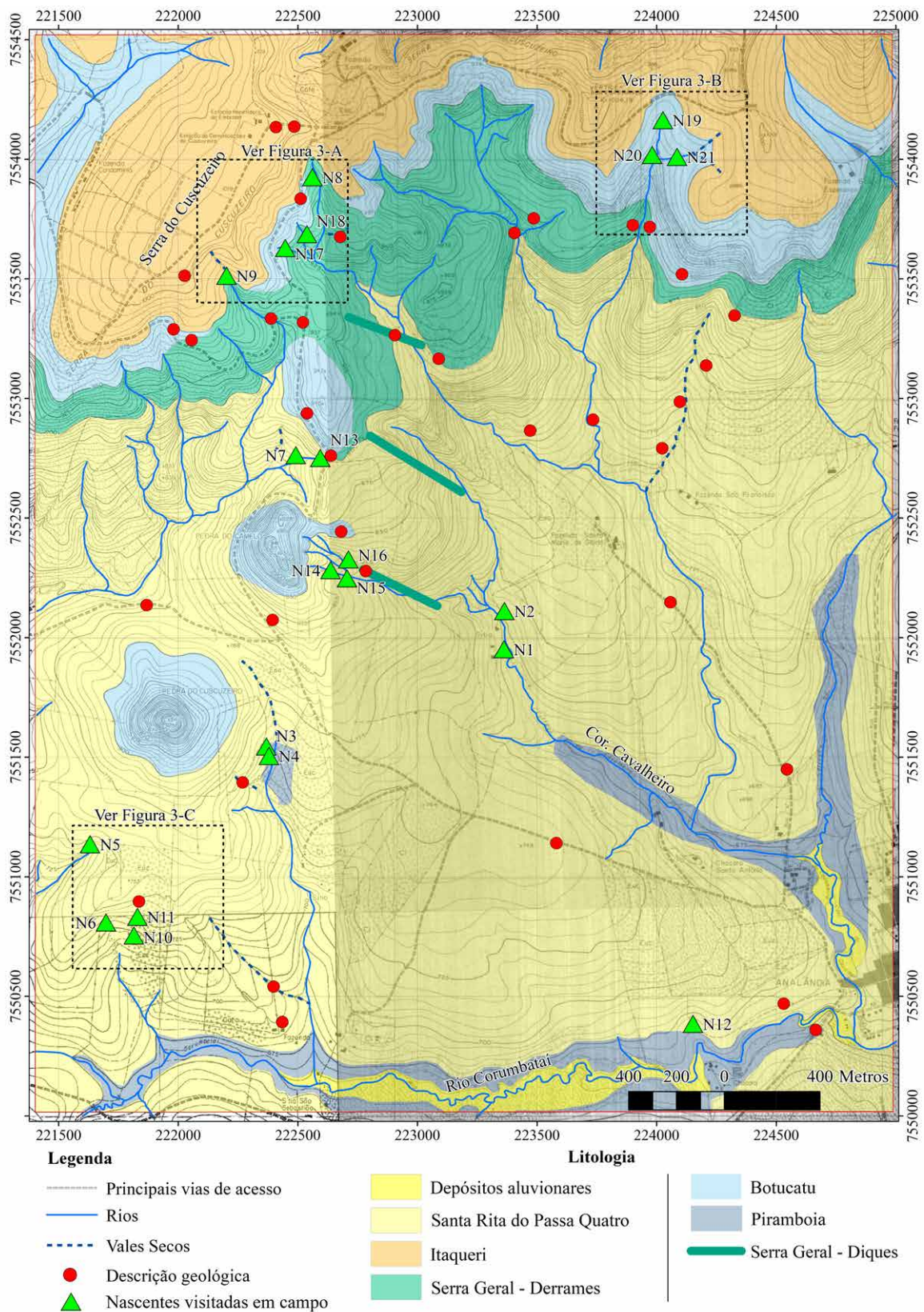


Figura 2 Mapa geológico da área de estudo, com a localização das nascentes estudadas e dos afloramentos visitados em campo.

inclinada e outra sub-horizontal. Esta nascente está próxima a diques de rocha básica. Considera-se que os diques possam funcionar como barreiras ao fluxo da água subterrânea, que acaba ascendendo pelas fraturas. Destaca-se o fato de que a sua vazão, tomada individualmente, é superior à soma das vazões de todas as demais nascentes visitadas neste estudo e que se trata de uma nascente secundária, fixa, situada na margem esquerda do córrego do Cavalheiro, cerca de 850 metros a jusante da nascente primária deste córrego.

As características físico-químicas das águas das nascentes visitadas revelaram que se trata de águas pouco mineralizadas, com condutividades elétricas entre 9,8 e 98 µS/cm. Na realidade, no entorno da nascente N1, com condutividade elétrica de 98 µS/cm, havia pequena quantidade de resíduos sólidos urbanos lançados, o que deve explicar este valor mais elevado. Os valores que representam condições não antropizadas limitam-se a 43,1 µS/cm, o que indica que o tempo de residência das águas no aquífero é pequeno. A temperatura das águas variou entre 20,3 e 23,2°C.

As nascentes amostradas nesse trabalho foram as nascentes N2 e N3, que afloram no domínio das formações arenosas, a nascente N8, situada em solos de alteração de basalto, condicionada pelo contato com os arenitos ditos “cozidos” devido ao metamorfismo de contato, a nascente N9, situada em colúvios, na área de afloramento da Fm. Itaqueri e a nascente N7, situada no contato de um corpo de tálus com arenitos.

Os resultados das análises hidroquímicas para os íons maiores estão apresentados na Figura 4. O balanço iônico das análises resultou em erros de 0,08%, 3%, 21%, 7% e 26% para as nascentes N2, N3, N7, N8 e N9,

respectivamente, na estação chuvosa, e erros de 7%, 0,6% e 39% para as nascentes N2, N3 e N8, respectivamente, na estação seca. Para águas pouco mineralizadas, com condutividade elétrica inferior a 50 µS/cm, são admissíveis erros de até 30%, portanto, com exceção da nascente N8 na estação seca, todos os resultados das análises têm confiança analítica. Na estação chuvosa as nascentes N2, N3, N8 e N9 têm assinaturas semelhantes, sendo classificadas como águas bicarbonatadas mistas. A nascente N7 tem característica diferente das demais, sendo bicarbonatada cálcica com teor de ferro e manganês mais elevado, o que corrobora as observações de campo de iridescência e formação de película alaranjada.

Como se depreende da Figura 4, na estação seca a hidroquímica de íons maiores da nascente N2 não sofre alteração significativa em relação à estação chuvosa. Nas demais nascentes observa-se um efeito de sazonalidade nas concentrações dos íons maiores: na nascente N3 a concentração de cátions e cloreto aumenta na estação seca, enquanto a concentração de ferro e manganês diminui. Na nascente N8 alteram-se apenas as concentrações de manganês e ferro, sendo que o primeiro diminui e o segundo aumenta na estação seca.

As duas nascentes situadas na região de afloramento de materiais arenosos (nascentes N2 e N3) exibem concentrações mais elevadas de N-Nitrato, tanto na estação seca (1,04 e 3,04mg/l respectivamente), quanto na estação chuvosa (1,01 e 1,99mg/l respectivamente). Isso fica evidente na Figura 5, onde se apresenta o diagrama de Piper modificado, com a incorporação do íon nitrato. Este fato sugere que o aquífero Guarani, ali aflorante, pode estar poluído.

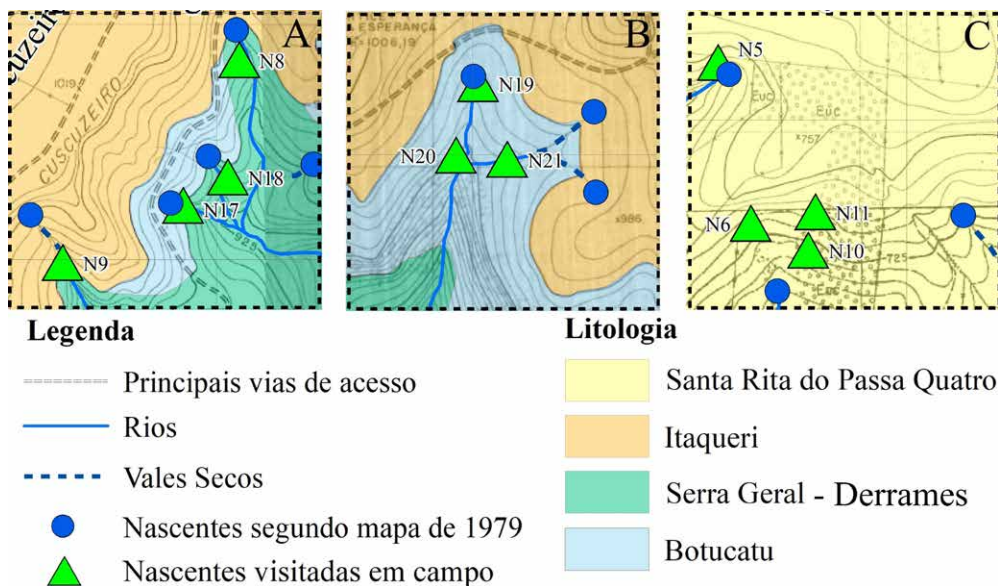


Figura 3 Comparação entre a localização real das nascentes e a localização segundo os mapas de 1979.

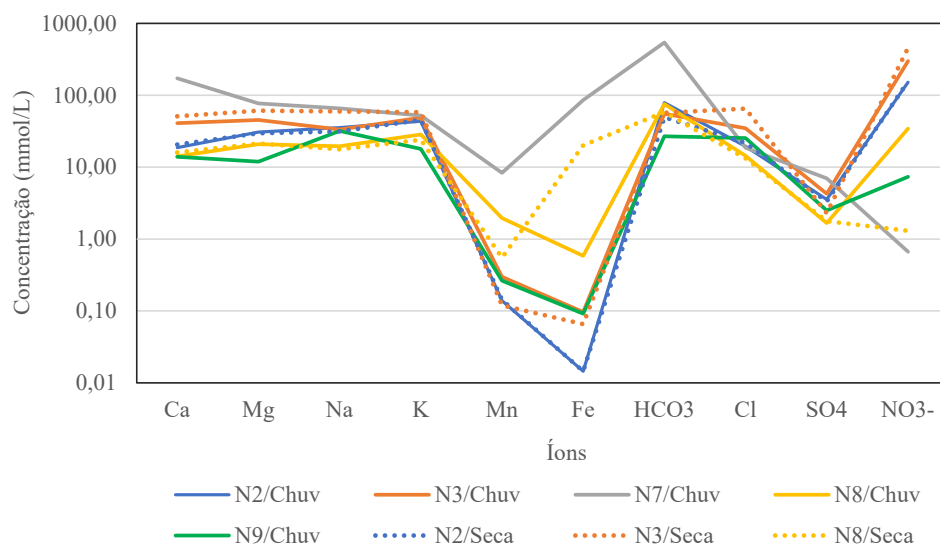


Figura 4 Concentrações de íons maiores (cátions e ânions) nas nascentes estudadas. “Chuv.” representa a estação chuvosa e “Seca” a estação seca.

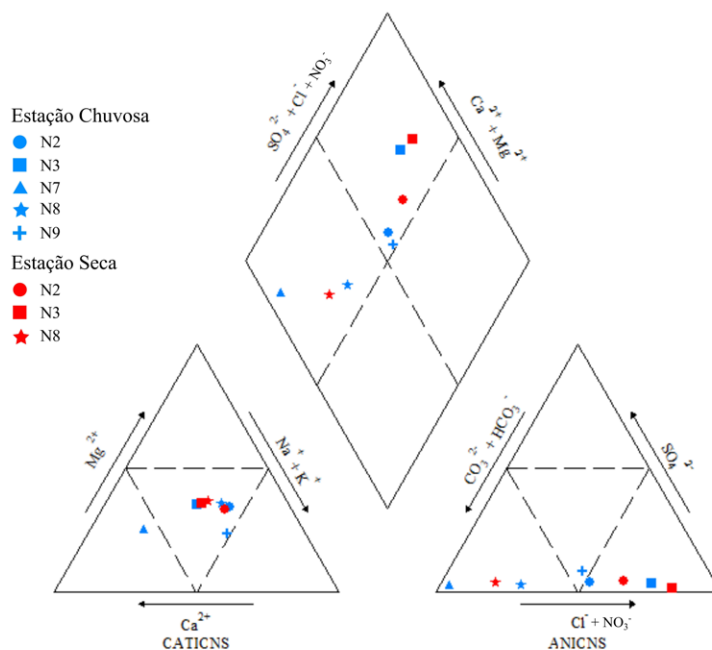


Figura 5 Diagrama de Piper modificado com a representação das águas estudadas.

Os resultados das análises de ETR estão apresentados na Figura 6. A nascente N2 tem concentração de ETR uma ordem de grandeza mais elevada que as demais e não sofre efeito de sazonalidade, pois as concentrações e a assinatura de ETR não se alteram na estação seca e na estação chuvosa,

exceto por uma pequena diminuição da anomalia de cério. As nascentes N3 e N8 apresentam efeitos de sazonalidade nas suas concentrações de ETR. Com relação às anomalias, todas as águas analisadas exibem anomalias positivas de európio, como apresentado na Tabela 2. As anomalias de

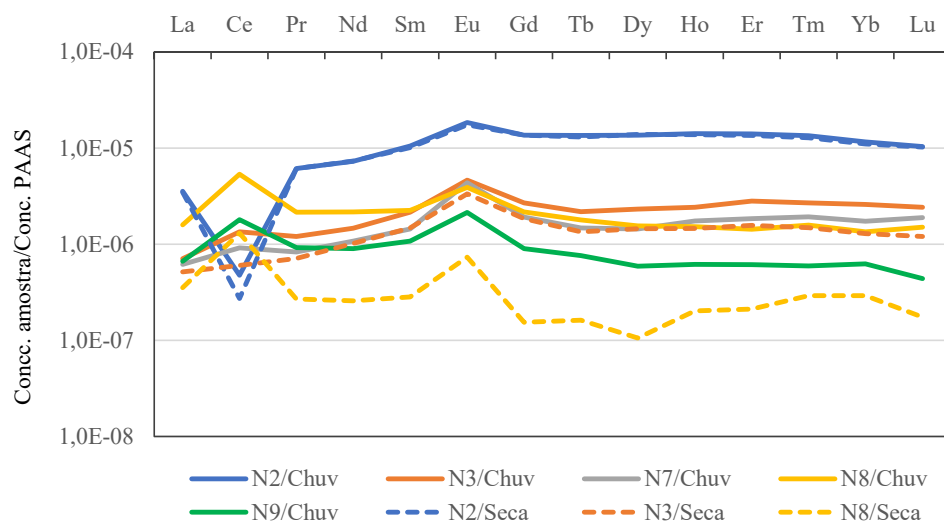


Figura 6 Diagrama multi-elementar para ETR normalizado com relação ao PAAS - estações chuvosa e seca.

Tabela 2 Anomalias de ETR calculadas para as águas de nascentes.

Nascente/Estação	Ce/Ce*	Eu/Eu*
N2/Chuvosa	0,09	1,62
N3/Chuvosa	1,37	2,15
N7/Chuvosa	1,45	3,01
N8/Chuvosa	2,49	1,87
N9/Chuvosa	1,91	2,23
N2/Seca	0,55	1,59
N3/Seca	1,22	2,34
N8/Seca	4,67	3,12

cério são positivas nas nascentes estudadas, exceto na nascente N2, que exhibe forte anomalia negativa de cério, distinguindo-se claramente das demais.

Todas as características de campo da nascente N2, aliadas à ausência de sazonalidade em suas características hidroquímicas e à forte anomalia de cério evidenciam que as águas ali aflorantes circularam por condições de subsuperfície diferentes das demais, atingindo provavelmente maiores profundidades. Sua área de recarga não está completamente identificada e não corresponde à delimitação da bacia hidrográfica de montante, como ocorre nas demais nascentes.

Considerando-se a classificação quanto ao estado de preservação das nascentes verifica-se que 47,7% delas se encontram degradadas e 33,3% perturbadas, o que reforça a importância de investimentos para cercamento e reflorestamento do seu entorno.

Como subsídio para as decisões a serem tomadas na Unidade Gestora do Projeto (UGP) Nascentes Analândia e

outras ações visando à preservação das nascentes constatou-se, como ilustrado na Figura 3, que na área estudada a localização da maioria das nascentes em campo não coincide com a localização nos mapas de 1979. Isto se aplica tanto para a nascente móvel (N9), quanto para as demais nascentes, que são fixas.

Além disso, 14,3% das nascentes visitadas eram nascentes secundárias, ou seja, sequer poderiam ser extraídas a partir dos mapas de 1979. Em relação a este aspecto destaca-se que a nascente de maior vazão na área estudada (nascente N2) é uma nascente secundária e não pode ser localizada pela simples observação dos mapas de 1979. Neste aspecto, Felipe & Magalhães Junior (2014) afirmam que, apesar de a legislação brasileira não distinguir a proteção que deve ser dispensada a cada tipo de nascente, os autores entendem que nascentes de tipos diferentes demandam manejos distintos para a manutenção de sua qualidade. Estes resultados evidenciam a importância de se realizarem trabalhos de campo para o correto cadastramento

e localização das nascentes, por exemplo, como está previsto na política de mananciais dos Comitês PCJ.

Outro aspecto a ser considerado é que para a maioria das nascentes estudadas é adequado admitir que a área de recarga pode ser delimitada em superfície como sendo a área situada topograficamente à montante da mesma e, portanto, controlar o uso do solo nesta área preserva a qualidade da água na nascente.

Por outro lado, para a nascente de maior vazão dentre aquelas estudadas em campo, a área de recarga não pôde ser delimitada, pois não está clara qual é a origem das águas que afloram naquela posição.

5 Conclusão

Este artigo apresenta a caracterização das nascentes situadas em área de cerca de 4 km² localizada no município de Analândia, SP, que é atualmente objeto de investimentos por parte dos Comitês PCJ para recuperação de mananciais. O trabalho de caracterização visou identificar as bacias de contribuição para as nascentes e apoiar as decisões tomadas no âmbito da UGP Nascentes Analândia, fórum de participação popular que discute estes investimentos. De forma inovadora no Brasil, nesta pesquisa as concentrações de ETR foram utilizadas para diferenciar as origens das águas aflorantes em nascentes.

A maioria das nascentes visitadas é fixa, com vazões inferiores a 100ml/s, havendo sempre redução das vazões na época de seca. Uma das nascentes, denominada neste trabalho de N2, destaca-se em relação às outras, pois fornece isoladamente maior volume de água que todas as demais nascentes somadas. Trata-se, portanto, de uma nascente que deve ser valorizada para fins de preservação ambiental. Entretanto, como ela é uma nascente secundária, sua existência não pode ser inferida a partir dos mapas topográficos oficiais disponíveis para a área (mapas de 1979), que permitem apenas a identificação de nascentes primárias.

Os resultados da hidroquímica dos ETR evidenciam que as águas da nascente N2 têm um trânsito diferente das águas das demais nascentes. As concentrações iônicas nesta nascente não apresentam efeitos de sazonalidade climática e ela apresenta forte anomalia negativa de cálcio, ao contrário das demais. Considera-se que as águas desta nascente sejam de circulação mais profunda e que a ocorrência de diques de diabásio nas proximidades da nascente contribua para a surgência de água pelas fraturas do arenito.

Para a maioria das nascentes na área estudada a bacia hidrográfica definida pelos divisores de águas superficiais situados à montante do local de exsudação de água é uma boa aproximação da área de contribuição/recarga. Exceção novamente feita à nascente N2, para a

qual o modelo conceitual de origem das águas não está completamente esclarecido.

Sugere-se a realização de análises isotópicas e datação da idade das águas, para melhoria do modelo conceitual local.

6 Agradecimentos

Aos proprietários das fazendas e sítios da área abrangida pelo Projeto Nascentes Analândia, por permitirem nosso acesso às propriedades.

7 Referências

- Abreu, A.E.S. & Augusto Filho, O. 2012. Engineering Geological Mapping in the Basaltic Cuestas, São Paulo State, Brazil. *Soils and Rocks*, 35(2): 189-198.
- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M. & Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6): 711-728.
- Comitês PCJ. 2018. Comitês das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH-PCJ e PCJ FEDERAL) e Comitê da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba e Jaguari (CBH-PJ1). 2018. Deliberação dos Comitês PCJ nº. 307/2018 de 14/12/2018. *Aprova a revisão da Política de Recuperação, Conservação e Proteção dos Mananciais no âmbito da área de atuação dos Comitês PCJ – Política de Mananciais PCJ e dá outras providências*. 59p. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1-i_twdFLNjht11-UB6hLlLqOY1HT4D9_/view. Acesso em: 13 fev. 2019.
- Failache, M.F. 2018. *Proposta de procedimentos para a estimativa da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial baseada em dados geológico, geotécnicos, de uso e ocupação e eventos de chuva*. Pós-graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 330p.
- Faria, A.P. 1997. A dinâmica de nascentes e a influência sobre os fluxos nos canais. *A água em Revista*, 8: 74-80.
- Felippe, M.F. & Magalhães Junior, A.P. 2014. Desenvolvimento de uma tipologia hidrogeomorfológica de nascentes baseada em estatística nebulosa multivariada. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(3): 393-409.
- Fetter, C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. New Jersey, Prentice Hall, 598p.
- Jones, J.A.A. & Crane, F.G. 1984. Pipeflow and pipe erosion in the Maesnant experimental catchment. In: Burt, T.P. & Walling, D.E. (Eds.) *Field experiments in fluvial geomorphology*. GeoBooks, Norwich, p. 55-72.
- Kresic, N. 2010. Types and classifications of springs. In: Kresic N. & Stevanovic, Z. (Eds.). *Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability*. Burlington: Butterworth-Heinemann, p. 31-63.
- Lawrence, M.G.; Greig, A.; Collerson, K.D. & Kamber, B.S. 2006. Rare Earth Element and Yttrium Variability in South East Queensland Waterways. *Aquatic Geochemistry*, 12: 39-72.

- McLennan, S.M. 1989. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Processes. *Reviews in Mineralogy*, 21(1): 169-200.
- Meinzer, O.E. 1927. *Large springs in the United States*. Washington D.C.: U.S. Geological Survey. Water-Supply Paper 557.
- Pinto, L.V.A.; Botelho, S.A.; Davide, A.C. & Ferreira, E. 2004. Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. *Scientia Forestalis*, 65: 197-206.
- Salinas-Reyes, T. & Ortega-Guerrero, M.A. 2019. Elementos de tierras raras disueltos en agua subterránea y su relación con los sistemas de flujo en rocas marinas y volcánicas en el Bajío de Guanajuato, Centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(1): 125-145.
- Souza, K.I.S.; Chaffe, P.L.B.; Pinto, C.R.S.C. & Nogueira, T.M.P. 2019. Proteção ambiental de nascentes e afloramentos de água subterrânea no Brasil: histórico e lacunas técnicas atuais. *Águas Subterrâneas*, 33(1): 76-86.
- Tweed, S.O.; Weaver, T.R.; Cartwright, I. & Schaefer, B. 2006. Behavior of rare earth elements in groundwater during flow and mixing in fractured rock aquifers: An example from the Dandenong Ranges, southeast Australia. *Chemical Geology*, 234: 291-307.

Recebido em: 17/07/2020

Aprovado em: 26/01/2021

Como citar:

Abreu, A.E.S.; Mesquita, J.L.B. & Murillo-Bermúdez, L. F. 2021. Caracterização Geológica e Hidroquímica de Nascentes Visando sua Proteção Ambiental em Analândia, São Paulo - Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44: 36479. DOI 1982-3908_2021_44_36479