

ESTUDO DE ISÓTOPOS ESTÁVEIS PARA CONFIRMAR INTERCONEXÕES ENTRE LAGOAS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, SETE LAGOAS/MG

Paulo Galvão¹, Ricardo Hirata², Todd Halihan³, Rafael Terada⁴

¹ Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto. Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto (MG). hidropaulo@gmail.com

² CEPAS/USP. Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, Universidade de São Paulo. Rua do Lago, 562. São Paulo (SP). hirata@usp.br

³ School of Geology, Oklahoma State University, 105 Noble Research Center, Stillwater, OK 74078, USA. todd.halihan@okstate.edu

⁴ CEPAS/USP. Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, Universidade de São Paulo. Rua do Lago, 562. São Paulo (SP). rafael.terada@usp.br

Palavras-Chave: Isótopos estáveis; aquífero cárstico; Grupo Bambuí.

INTRODUÇÃO

É importante uma melhor compreensão dos processos hidrológicos para o desenvolvimento e gestão dos recursos hídricos em região cárstica urbana. O armazenamento de água subterrânea e seu caminho de fluxo em aquíferos cársticos são extremamente heterogêneos; muitas vezes, essas características são refletidas nos processos de recarga, que são frequentemente caracterizados por elevadas permeabilidades verticais, devido a condutos verticais que permitem um fluxo rápido ao aquífero (Ford e Williams 1989). Devido a isso, caminhos de fluxo em carste podem estar conectando águas superficiais com aquíferos locais, tornando as águas subterrâneas altamente suscetíveis à contaminação (Ryan e Meiman, 1996).

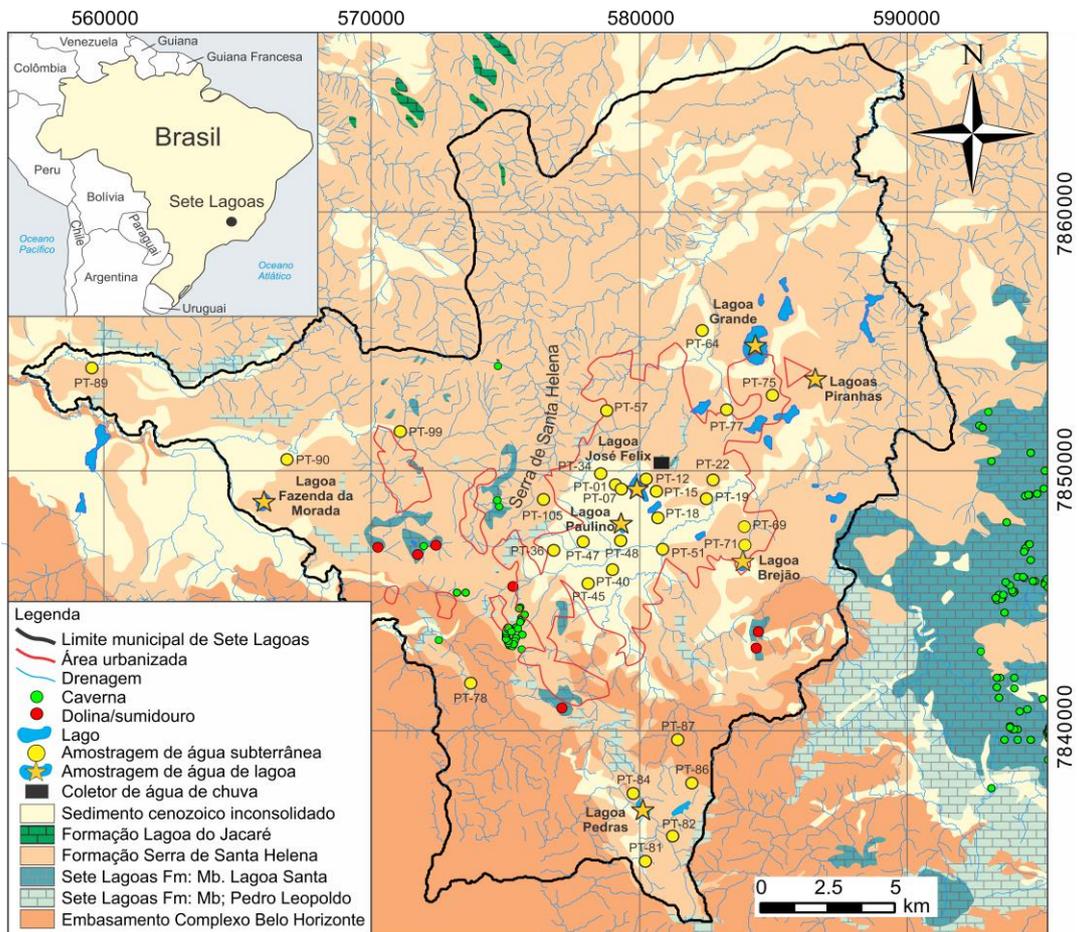
Os isótopos estáveis ¹⁸O, para oxigênio, e ²H (ou Deutério, D), para hidrogênio, têm sido usados em diversas investigações hidrogeológicas. Alguns exemplos podem ser citados: hidrogramas e quimiogramas de rio (Harris et al. 1995, Machavaram et al. 2006) e interações água superficial-subterrânea (O'Driscoll et al. 2005, Lee e Kim 2007, Souza et al. 2015). Os métodos isotópicos têm tido sucesso em identificar a contribuição da água superficial nas águas subterrâneas em ambientes cársticos (Feng et al. 2012, Wong et al. 2013). O uso de isótopos estáveis em hidrogeologia começou nos anos 1950, com os trabalhos pioneiros de Urey et al. e Epstein e Mayeda (em Clark e Fritz, 1997).

O município de Sete Lagoas/MG, cerca de 70 km noroeste de Belo Horizonte, possui uma população acima de 230.000 habitantes (IBGE 2015) que é suprida totalmente por água subterrânea do Aquífero Cárstico Sete Lagoas – ACSL (Pessoa 1996; Galvão et al. 2017), com pequena contribuição do aquífero fraturado localizado ao sul do município, onde o embasamento cristalino aflora (Fig. 1). Essas águas são bombeadas tanto por poços públicos (gerenciadas pelo SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto), quanto por poços privados. Na parte central urbana do município, é comum a ocorrência de lagoas e feições cársticas (e.g. cavernas, dolinas e sumidouros), levantando dúvidas sobre se essas feições podem ser conexões hidráulicas de águas superficiais com o ACSL e, portanto, zonas sensíveis a possíveis contaminações antrópicas. Devido a essas questões, este trabalho teve como objetivo compreender possíveis interações entre águas superficiais e subterrâneas a partir do uso dos isótopos estáveis ¹⁸O e ²H.

MATERIAS E MÉTODOS

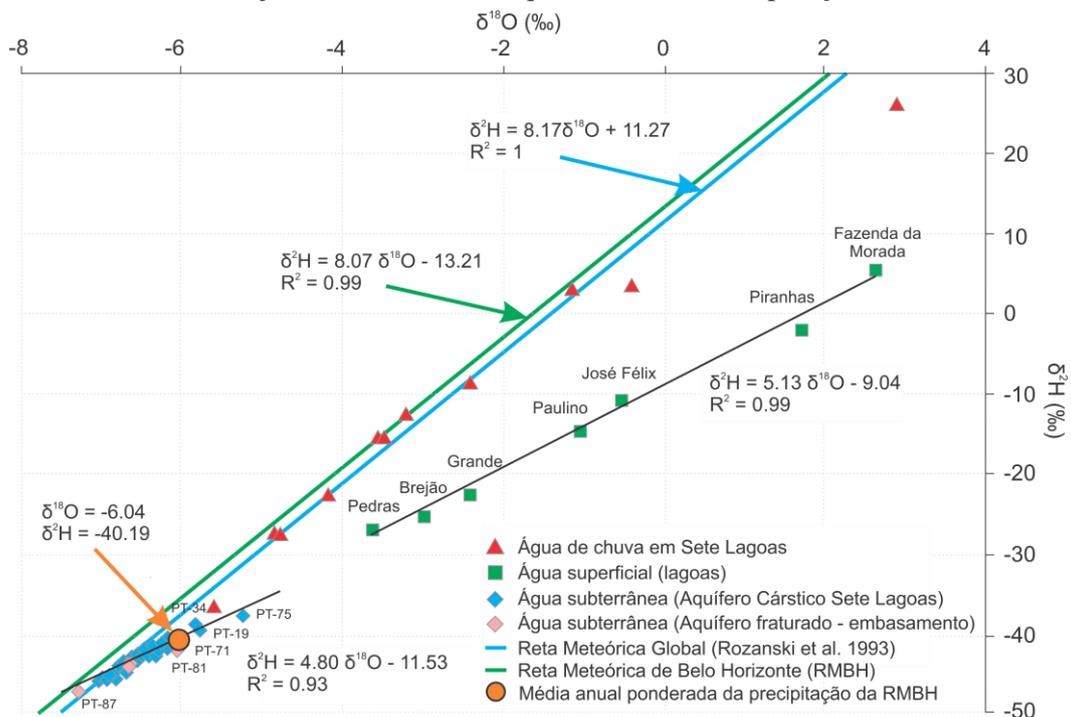
Foram coletadas amostras de água subterrânea de 30 poços do SAAE (25 no ACSL e 5 no embasamento) e de águas superficiais de 7 lagoas (Brejão, Grande, José Felix, Paulino, Pedras, Piranhas e Fazenda da Morada), bem como da água da chuva entre agosto de 2011 e junho de 2013 para análises isotópicas (Fig. 1 e Tabela 1). A principal preocupação com as amostras foi evitar o fracionamento pós-amostragem. Foram utilizados frascos de polipropileno (30 mL), sendo esses completamente preenchidos com amostras, evitando bolhas de ar no interior, de acordo com Martins et al. (2010). No caso das lagoas, todas foram coletadas no centro, usando uma bomba peristáltica (Geotech Geopump), seguindo a técnica *low-flow*, evitando sedimentos do substrato da lagoa.

Todas as amostras foram analisadas para ¹⁸O e ²H no Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS/USP), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. As amostras foram analisadas no Picarro L2130i e normalizadas de acordo com as normas internas de água para laboratório previamente calibrados em relação ao *Vienna Standard Mean Ocean Water* (VSMOW). Os resultados foram expressos em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, onde $\delta_{\text{amostra}} (\text{‰}) = ((R_{\text{amostra}}/R_{\text{padrão}}) - 1) \times 1000$, onde R é D/H, ¹⁸O/¹⁶O. As precisões analíticas foram $\pm 0,09 \text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ e $\pm 0,9 \text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$. Todos os resultados foram comparados com a Reta Meteorológica Global (RMG), linearmente relacionada pela equação proposta por Rozanski et al. (1993) $\delta^2\text{H} = 8,17 \delta^{18}\text{O} + 11,27$ e pela Reta Meteorológica de Belo Horizonte (RMBH) $\delta^2\text{H} = 8,07 \delta^{18}\text{O} + 13,21$. A RMBH foi considerada nesse estudo por estar em condições climáticas e de altitudes semelhantes às de Sete Lagoas, bem como pela proximidade geográfica.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

As lagoas possuem os maiores valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, observados no gráfico da Fig. 2 bem abaixo da RMBH e da RMG. Estas águas formam uma linha indicando uma exposição a um alto grau de evaporação. Essas águas foram coletadas em junho durante a seca, quando a taxa de evaporação é mais alta.



As águas subterrâneas, coletadas durante as estações seca e chuvosa, em sua maioria, estão sobre ou próximas das RMBH e RMG, indicando recarga provavelmente de precipitação local. Outras amostras deram assinaturas de evaporação e mistura, e estão plotadas na parte inferior esquerda (ver indicação dos poços PT 19, 34, 71, 75 e 81 – Fig. 2). O agrupamento de amostras de águas subterrâneas pode sugerir um período limitado de recarga (Clark e Fritz, 2007). A estação chuvosa em Sete Lagoas ocorre de outubro a março, abrangendo 89% da precipitação anual (Galvão et al. 2017). Outubro, novembro e dezembro são os principais períodos de recarga, de acordo com balanço hídrico feito por Pessoa (1996). A média anual ponderada de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ é considerada uma boa estimativa para a recarga moderna (ver círculo laranja na Fig. 2) e está localizada próxima à maioria das amostras de águas subterrâneas, confirmando que, realmente, trata-se de recarga por precipitação local.

As águas subterrâneas plotadas no canto inferior esquerdo podem sugerir que os aquíferos recebem contribuições de água superficial de lagoas ou drenagens. Alguns dos poços amostrados estão próximos às lagoas estudadas, e.g. PT-71 (Brejão), PT-75, 77 (Grande e Piranhas) (Fig. 1). Outros poços apresentam evidências de pouca evaporação e estão localizados próximos às lagoas José Felix e Paulino, ou próximos a drenagens e sedimentos inconsolidados cenozoicos (Fig. 1).

As águas do ACSL são armazenadas em dois planos de acamamento principais que passaram por processos intensos de carstificação, onde a região urbana central é coberta por sedimentos inconsolidados (Galvão et al., 2015a, b). As águas subterrâneas poderiam ter contribuições de água superficial local nesta área, a partir de lagoas ou pequenas drenagens. Isso se reflete na plotagem de alguns pontos no canto inferior esquerdo das RMBH e RMG, formando padrões de mistura e evaporação.

Portanto, as evidências isotópicas sugerem que as águas subterrâneas são (1) recarregadas diretamente por chuvas locais, (2) em um período limitado, de outubro a dezembro, e (3) que apresentam alguma infiltração superficial de água de lagoa na porção central da cidade, onde o ACSL está em contato com sedimentos cenozoicos inconsolidados.

Tabela 1 - Dados de isótopos estáveis para águas subterrâneas, lagoas e chuvas em Sete Lagoas.

	Amostras	Data (mês/ano)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Aquífero
	Águas subterrâneas	PT-01	04/12	-6,37	-42,4
PT-07		04/12	-6,42	-42,5	ACSL
PT-12		10/12	-6,24	-41,4	ACSL
PT-15		03/12	-6,18	-41,1	ACSL
PT-18		11/11	-6,18	-40,9	ACSL
PT-19		03/12	-5,80	-39,1	ACSL
PT-22		01/12	-6,17	-40,4	ACSL
PT-34		03/12	-5,85	-38,8	ACSL
PT-36		11/11	-6,51	-42,1	ACSL
PT-40		12/11	-6,60	-42,7	ACSL
PT-45		02/12	-6,57	-42,8	ACSL
PT-47		04/12	-6,71	-44,3	ACSL
PT-48		03/12	-6,21	-41,8	ACSL
PT-51		01/12	-6,51	-42,3	ACSL
PT-57		10/11	-6,91	-45,1	ACSL
PT-64		12/11	-6,64	-43,9	ACSL
PT-69		03/12	-6,33	-42,2	ACSL
PT-71		03/12	-6,84	-45,4	ACSL
PT-75		03/12	-5,26	-37,6	ACSL
PT-77		12/11	-6,01	-41,3	ACSL
PT-78	09/11	-6,73	-43,4	AFBH	
PT-81	11/11	-6,06	-41,7	AFBH	
PT-82	08/11	-7,06	-45,6	ACSL	
PT-84	01/12	-7,02	-45,4	ACSL	
PT-86	01/12	-6,72	-43,5	AFBH	
PT-87	10/11	-7,31	-47,0	AFBH	
PT-89	09/11	-6,36	-41,2	AFBH	
PT-90	09/11	-6,31	-41,5	ACSL	
PT-99	11/11	-6,83	-44,3	ACSL	
PT-105	11/12	-6,77	-43,7	ACSL	
Média	-	-6,45	-42,5	-	

Lagoas	Amostras	Data (mês/ano)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Tipo de lagoa
	Grande	06/13	-2,44	-22,4	Natural
	José Félix	06/13	-0,55	-10,8	Natural
	Paulino	06/13	-1,07	-14,4	Natural
	Pedras	06/13	-3,64	-26,9	Natural
	Fazenda da Morada	06/13	2,62	5,6	Artificial
	Brejão	06/13	-3	-25	Natural
	Piranhas	06/13	1,71	-2,1	Natural
	Média	-	-0,91	-13,71	-

Chuva	Amostras	Data (mês/ano)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Precipitação mensal (mm)*
	-	Mar/12	-4,2	-22,4	203,4
	-	Abr/12	-3,24	-12,1	55,3
	-	Mai/12	-3,58	-15	33,7
	-	Jun/12	-2,43	-8,3	14,4
	-	Jul/12	-	-	0,0
	-	Ago/12	-0,44	4	0,7
	-	Set/12	-3,6	-15	7,8
	-	Out/12	2,93	25,8	29,1
	-	Nov/12	-4,89	-27,4	211,1
	-	Dez/12	-1,2	3,9	96,2
	-	Jan/13	-4,87	-27,2	159,5
	-	Fev/13	-5,62	-36,5	54,4
	Média	-	-2,83	-11,84	44,1

ACSL: Aquífero Cárstico Sete Lagoas
 AFBH: Aquífero Fraturado Belo Horizonte
 * dados do INMET

CONCLUSÃO

Os dados isotópicos evidenciam processos de evaporação, indicando algumas interconexões entre as águas superficiais quando combinadas com algumas amostras de águas subterrâneas com assinatura de evaporação. As águas do aquífero fraturado, de mesma assinatura isotópica das águas do ACSL, têm a mesma origem, da precipitação local. A área urbana central, onde os sedimentos cenozoicos inconsolidados sobrepõem aos calcários da Formação Sete Lagoas, e em áreas com sumidouros e entradas de cavernas, bem como as próprias lagoas amostradas, são consideradas as áreas mais sensíveis à contaminação do ACSL.

AGRADECIMENTOS

Servmar Meio Ambiente & Engenharia, FAPESP (processo 2012/12846-9) e SAAE - Sete Lagoas (Serviço de Abastecimento de Água e Esgoto).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Clark I, Fritz P (1997) *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New York, CRC Press. 328p.
- Feng W, Banner JL, Guilfoyle A, Musgrove M, James EW (2012) Oxygen isotopic fractionation between drip water and speleothem calcite: A 10-year monitoring study, central Texas, USA. *Chemical Geology* 304-305, 53-67.
- Ford DC, Williams PW (1989) *Karst geomorphology and hydrology*: Boston, Unwin Hyman, 601 p.
- Galvão P, Halihan T, Hirata R (2015a) Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeology Journal*. Vol. 23, No. 7, 1499-1513.
- Galvão P, Halihan T, Hirata R (2015b) The Karst Permeability Scale Effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. *Journal of Hydrology*. V. 531, P. 85/15-105. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.11.026.
- Galvão P, Hirata R, Halihan T, Terada, R (2017) Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. *Environmental Earth Sciences (Print)*, v. 76, p. 159.
- Harris DM, McDonnell JJ, Rodhe A (1995) Hydrograph separation using continuous open system isotope mixing. *Water Resources Research* 31 (1), 157-171.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015) Informação básica municipal. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=316720&search=minas-gerais|sete-lagoas> Acessado em outubro de 2017.
- Lee KS, Kim Y (2007) Determining the seasonality of groundwater recharge using water isotopes: a case study from the upper North Han River basin, Korea. *Environmental Geology* 52 (5), 853-859.
- Machavaram MV, Whittemore DO, Conrad ME, Miller NL (2006) Precipitation induced stream flow: an event based chemical and isotopic study of a small stream in the Great Plains region of the USA. *Journal of Hydrology* 330 (3-4), 470-480.
- Martins VTS, Babinski M, Hirata R, Cruz FW, Karmann I (2010) Stable isotopes (^{18}O and ^2H) of precipitation in an urban area of São Paulo, southeast Brazil. In: VII South American Symposium on Isotope Geology, Brasília. *Anais VII South American Symposium on Isotope Geology*.
- O'Driscoll MA, DeWalle DR, McGuire KJ, Gburek WJ (2005) Seasonal O-18 variations and groundwater recharge for three landscape types in central Pennsylvania, USA. *Journal of Hydrology* 303 (1-4), 108-124.
- Pessoa P (1996) Caracterização Hidrogeológica da Região de Sete Lagoas – MG: Potencialidades e Riscos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 205p.
- Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R (1993) Isotopic patters in modern global precipitation, in *Climate Change in Continental Isotopic Records*, Geophys. Monogr. Ser., 78, ed. by P.K. Swart, et al, pp. 1-36, AGU, Washington, DC.
- Ryan M and Meiman J (1996) An examination of short-term variation in water quality at the karst spring in Kentucky: *Ground Water*, v. 34, no 1, p. 23-30.
- Souza E, Galvão P, Almeida R, Pinheiro C, Baessa M, Cabral M (2015) Stable Isotopes Studies in the Urucu Oil Province, Amazon Region, Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 7, 131-142.
- Wong C, Kromann JS, Hunt BB, Smith BA, Banner JL (2013) Investigating groundwater flow between Edwards and Trinity Aquifers in Central Texas, *Groundwater* 52, 624-39.