

**ASSINATURA ISOTÓPICA DAS ÁGUAS PLUVIAIS E SUBTERRÂNEAS NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO ITAPEMIRIM, ESTADO DO ESPÍRITO SANTO**

Mirna Aparecida Neves¹; Renato Ferreira Miranda²; Mariana da Silva Trigo³; Matheus Serri Moulin de Oliveira³; Arthur Dias Pessoa⁴; Luis Henrique Mancini⁵

Resumo – Grande parte do território Espírito Santense ocorre sobre o Sistema Aquífero Cristalino, onde a percolação da água subterrânea está condicionada, dentre outros fatores, a padrões de faturamento de difícil previsibilidade que afetam rochas graníticas e gnáissicas. O conhecimento do fluxo subterrâneo e dos processos de recarga nestes terrenos é ainda limitado, embora seja crescente a necessidade de prospecção destes mananciais. Este trabalho apresenta dados isotópicos da água da chuva e subterrânea, levantados como parte de um projeto em rede (HIDROFRAT) que tem, como uma de suas metas, o monitoramento da concentração de isótopos de Oxigênio (¹⁸O) e Hidrogênio (²H) na Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), situada no sul capixaba. Apresenta-se aqui a reta meteórica local obtida, descrita pela equação $y = 8,58 x + 19,05$, além das variações encontradas na área, ligadas aos efeitos de pluviosidade e continentalidade. A assinatura isotópica das águas subterrâneas é similar à das águas pluviais, indicando alta velocidade de recarga, porém, com taxas variadas ao longo da bacia. Algumas hipóteses estão sendo aventadas para explicar as variações isotópicas observadas, dentre elas a influência dos tipos litológicos e a presença de descontinuidades que favorecem localmente a recarga.

Abstract – The major part of the State of Espírito Santo, Southeastern Brazil is over the Crystalline Aquifer System, where the groundwater flow is controlled by hardly predictable fracturing patterns that affect granitic and gneissic rocks. The knowledge of groundwater flow and recharge processes in these terrains is still restricted, although the necessity of water prospecting in the region is raising. This paper shows stable isotopic data of rain and groundwater, collected at a network project (HIDROFRAT) which has, as one of its goals, the monitoring of stable isotope concentrations of Oxygen (¹⁸O) and Hydrogen (²H) in the Itapemirim River Catchment (BHRI), located in the Southern Espírito Santo State. We present here the Local Meteoric Line, that is described by the

¹ Departamento de Geologia, CCENS / Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, (28) 3552-8698, mirnaan@gmail.com

² Geólogo Autônomo, (31) 99947-8787, renatogeologia@hotmail.com

³ Graduandos do Curso de Geologia, Departamento de Geologia, CCENS / UFES

⁴ Poço Fundo Solução em Abastecimento de Água – Serra (ES)

⁵ Laboratório de Estudos Geocronológicos, Geodinâmicos e Ambientais, IG / Universidade de Brasília – UnB

equation $y = 8.58x + 19.05$, besides the isotope variations along the area, attributed to the rainfall and continental effects. The isotope signature of groundwater is similar to that found in the rainwater, indicating high recharge rates, but in different ways along the catchment. Some hypothesis are being raised to explain the isotope variations, between them, the influence of lithologic types and the presence of discontinuities that locally favor the recharge.

Palavras-Chave – isótopos estáveis, aquíferos fraturados, Sistema Aquífero Cristalino.

1 - INTRODUÇÃO

Grande parte dos terrenos capixabas está sobre o Sistema Aquífero Cristalino, onde a percolação da água é controlada principalmente por estruturas geológicas como falhas e fraturas. O conhecimento da percolação da água neste tipo de aquífero é ainda incipiente e muitos esforços têm sido dispendidos nas últimas décadas para melhorar o entendimento dos processos de recarga e os fatores controladores do fluxo subterrâneo.

O estudo de isótopos estáveis tem sido empregado neste sentido (e.g. Tweed et al., 2005; Sukhija et al., 2005), constituindo importante ferramenta a ser utilizada no melhor entendimento do sistema fraturado. A força das ligações químicas envolvendo diferentes espécies isotópicas geralmente é diferente, sendo que as moléculas que contêm os isótopos pesados são mais estáveis e têm tendência a sofrer precipitação ou condensação com maior facilidade do que as moléculas com isótopos mais leves, os quais, pelo contrário, são mais facilmente evaporados e mobilizados (Kendall, 1998; Allègre, 2008).

Tal ferramenta é aplicada neste trabalho, cujo objetivo é estudar a assinatura dos isótopos estáveis de Oxigênio (^{18}O) e Hidrogênio (^2H ou Deutério) nas águas pluviais e subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI). A bacia abrange o sul do Estado do Espírito Santo, com área de 6.014 km², englobando 17 municípios capixabas e um mineiro (Figura 1).

Estudos hidrogeológicos são raros na região, sendo, portanto, desconhecido o potencial e as fragilidades de um importante manancial hídrico subterrâneo. Foi possível, neste trabalho, por meio de um monitoramento realizado durante cerca de um ano, definir a reta meteórica local. Com relação às águas subterrâneas, foi feito um levantamento preliminar, estando prevista a finalização da pesquisa até dezembro de 2016.

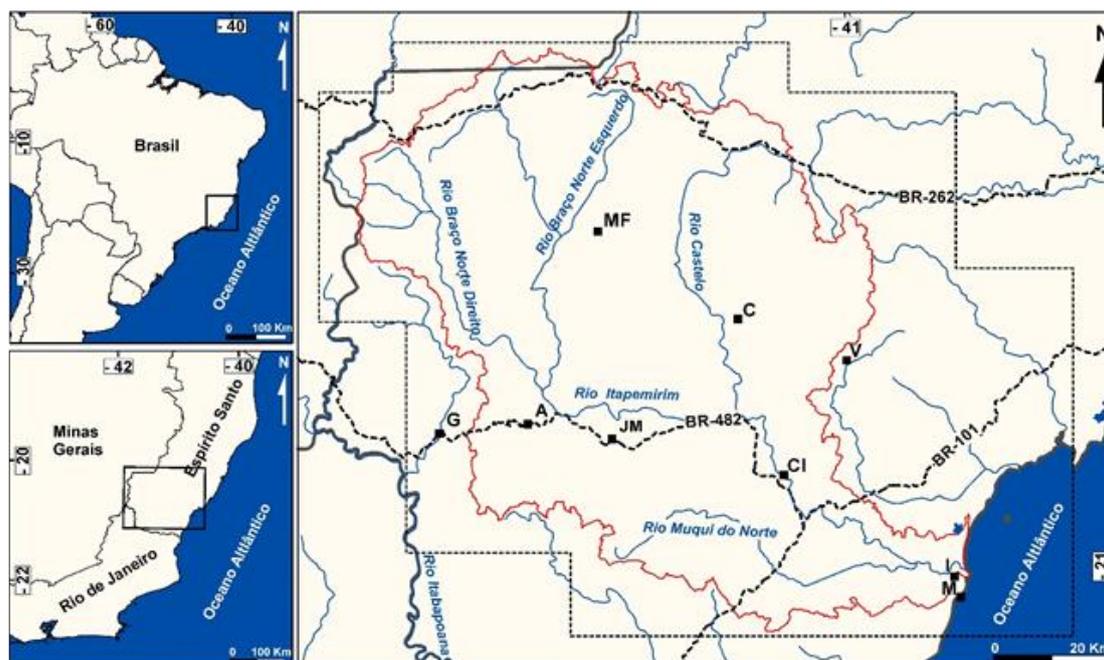


Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim – BHRI (Cidades: M = Marataízes, I = Itapemirim, CI = Cachoeiro de Itapemirim, JM = Jerônimo Monteiro, A = Alegre, G = Guaçuí, V = Venda Nova do Imigrante, C = Castelo, MF = Muniz Freire) (elaboração: Salomão Calegari).

2 - MATERIAL E MÉTODOS

Na plataforma HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA), foram adquiridos dados de precipitação de 10 estações pluviométricas, do período de setembro de 2013 a fevereiro de 2015.

As águas pluviais foram coletadas em 18 pontos de coleta distribuídos na BHRI, conforme ilustrado na Figura 2. As coletas foram realizadas mensalmente durante os meses de novembro de 2013 a dezembro de 2014 e foram gerados 234 dados amostrais. As estações de coleta foram montadas segundo o método sugerido pela *International Atomic Energy Agency* (IAEA, 2002). O coletor de águas pluviais foi construído de forma a evitar trocas gasosas entre a água e o ar atmosférico e foi utilizado um sombrite para minimizar o aquecimento por exposição ao sol. As águas subterrâneas foram coletadas em 17 poços tubulares profundos que exploram o aquífero fraturado (Figura 2).

As amostras de águas pluviais e subterrâneas foram analisadas no Laboratório de Estudos Geocronológicos, Geodinâmicos e Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília - UnB, por meio do *Picarro Ultra High-Precision Isotopic Water Analysis*.

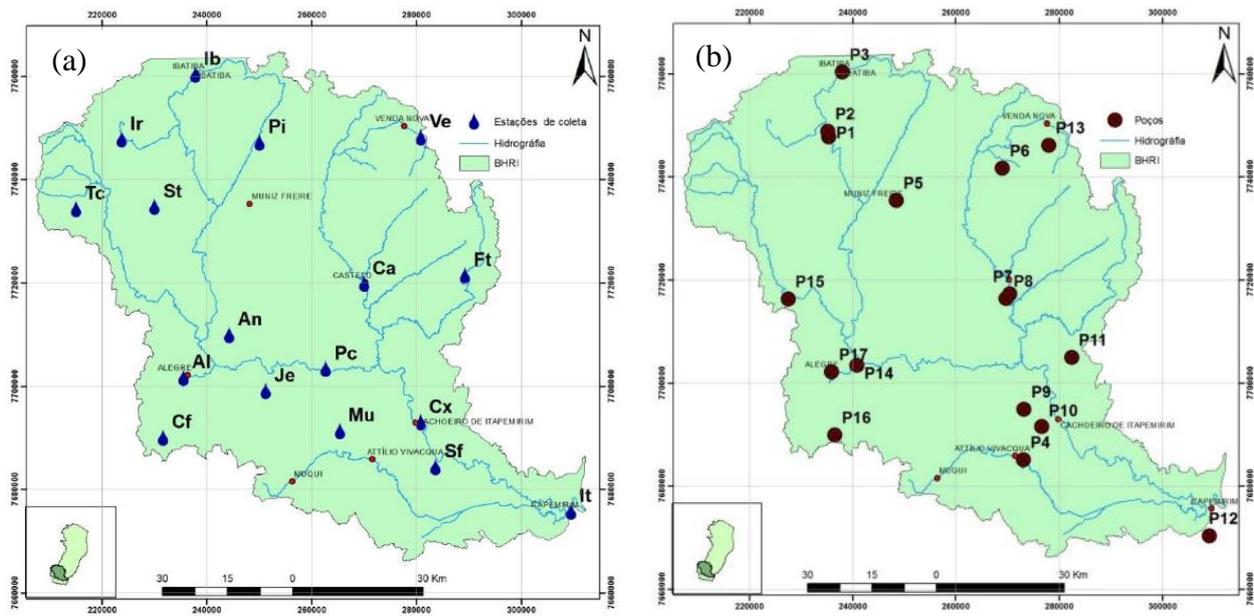


Figura 2: (a) Pontos de coleta da água da chuva e (b) da água subterrânea em poços tubulares profundos na BHRI.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Linha meteórica local

A linha meteórica local (LML) da BHRI foi definida, neste trabalho, pela equação $y = 8,5787x + 19,049$ obtendo-se um coeficiente de correlação $R^2 = 0,9592$ (Figura 3). Relacionando-se a linha meteórica global (V-SMOW) e a LML, observa-se que o coeficiente angular da LML (8,5787) apresenta valor próximo ao da V-SMOW (8). Por outro lado, os valores do coeficiente linear (também conhecido como “excesso de deutério”) das equações das retas (LML = 19,049; V-SMOW = 10) são significativamente diferentes. Esses valores podem ter sido influenciados pela taxa de evaporação das águas provindas do oceano ou, no caso de massas de ar continentais, por processos consecutivos de condensação e evaporação.

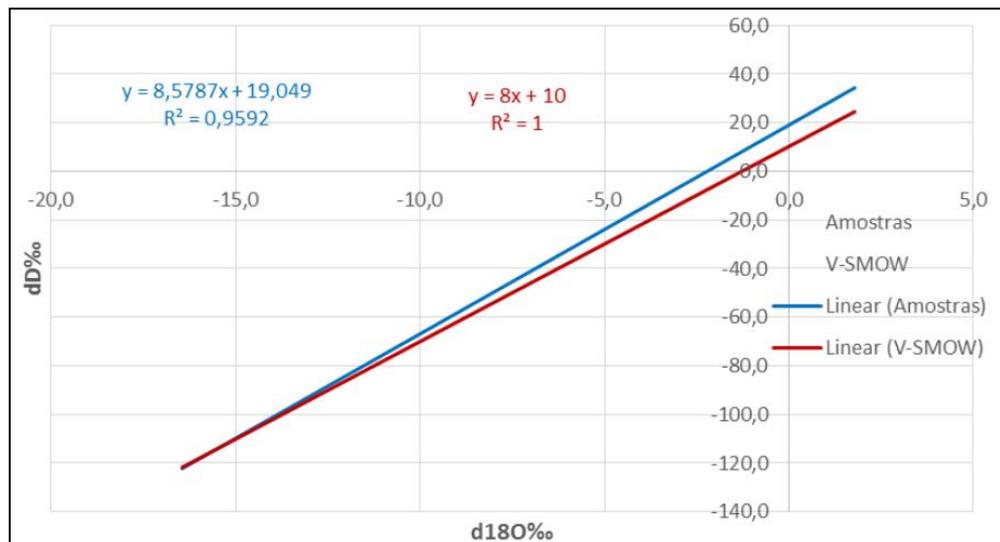


Figura 3: Reta meteórica local, em azul, e global (V-SMOW), em vermelho, com as respectivas equações.

3.2 - Variações da assinatura isotópica das águas pluviais

A curva de precipitação média mensal (Figura 4a) apresenta um padrão sazonal de variação da precipitação, com tendência de concentração de chuvas nos meses de verão, conforme o esperado para a Região Sudeste do Brasil. Porém, observa-se que o mês de dezembro de 2013 apresentou valores duas vezes maiores que o mesmo mês do ano seguinte, 2014. Por outro lado, o mês de janeiro de 2013 também apresentou valores anômalos de precipitação, isto é, valores muito baixos, semelhantes aos meses de seca (julho). O gráfico de variação isotópica mensal dos coletores (Figura 4b) foi construído com base nos meses referentes à coleta, ou seja, os valores plotados no gráfico se referem ao mês anterior à coleta. Nota-se também um padrão sazonal nas variações dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD , com uma tendência de empobrecimento de isótopos pesados durante os meses chuvosos (verão) e enriquecimento nos períodos de seca (inverno).

Quanto maior o volume precipitado, mais depletado em isótopos pesados se torna a água pluvial, indicando uma correlação entre o empobrecimento de isótopos pesados e a quantidade de chuva. Com períodos de alta pluviosidade observa-se valores menores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD , enquanto em períodos secos ocorrem os maiores valores desses isótopos. Esse efeito é conhecido como efeito de quantidade de precipitação (IAEA, 2001). A sazonalidade observada na assinatura isotópica também pode estar sendo influenciada pela entrada de diferentes massas de ar em cada época do ano.

O efeito da continentalidade também pode ser observado nos dados levantados. A Figura 5 mostra uma tendência de depleção do $\delta^{18}\text{O}$ na água da chuva coletada em pontos mais distantes do litoral. O coeficiente de correlação em relação aos quartis foi de $R^2=0,58$.

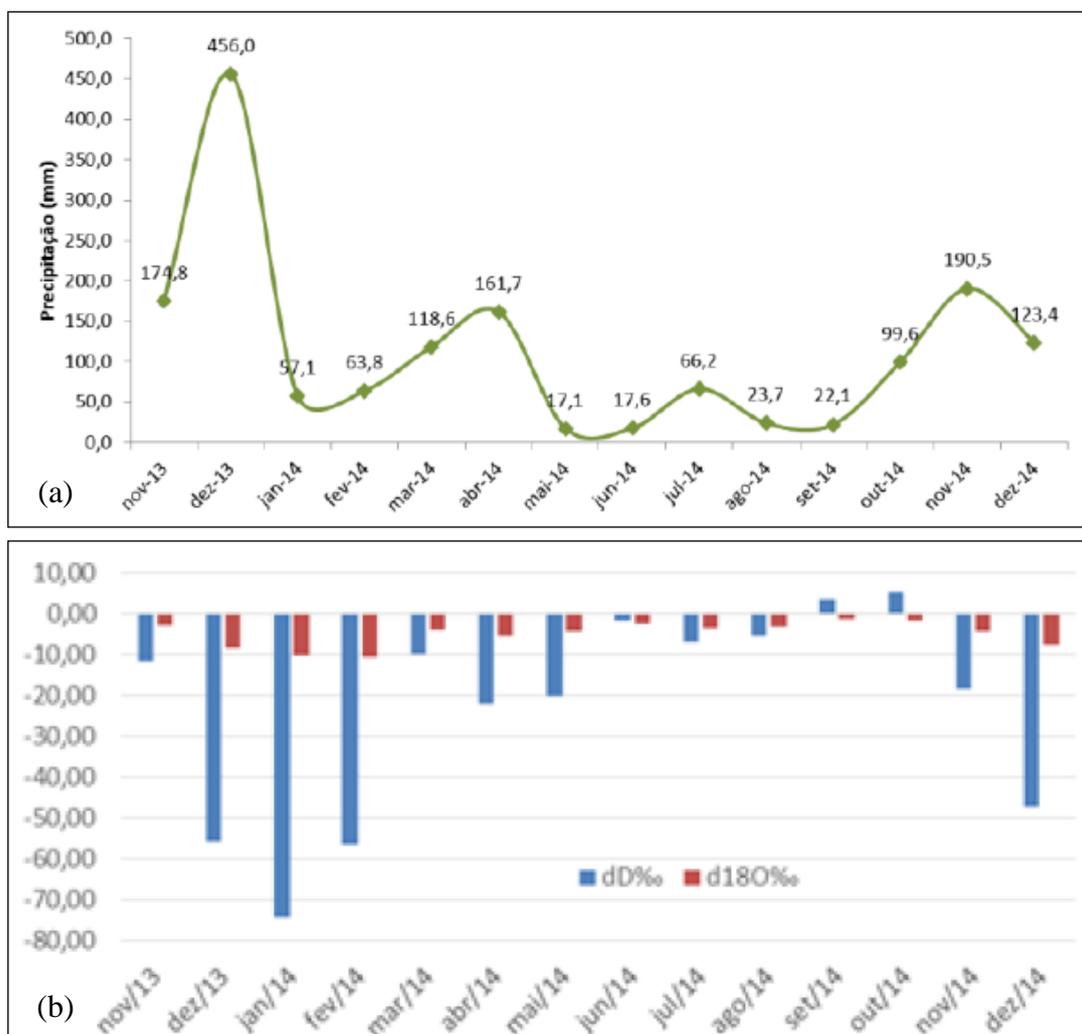


Figura 4: (a) Variação da precipitação média mensal e (b) do conteúdo de isótopos estáveis ($\delta^{18}\text{O}$ e δD) da água da chuva na BHRI durante os meses de monitoramento.

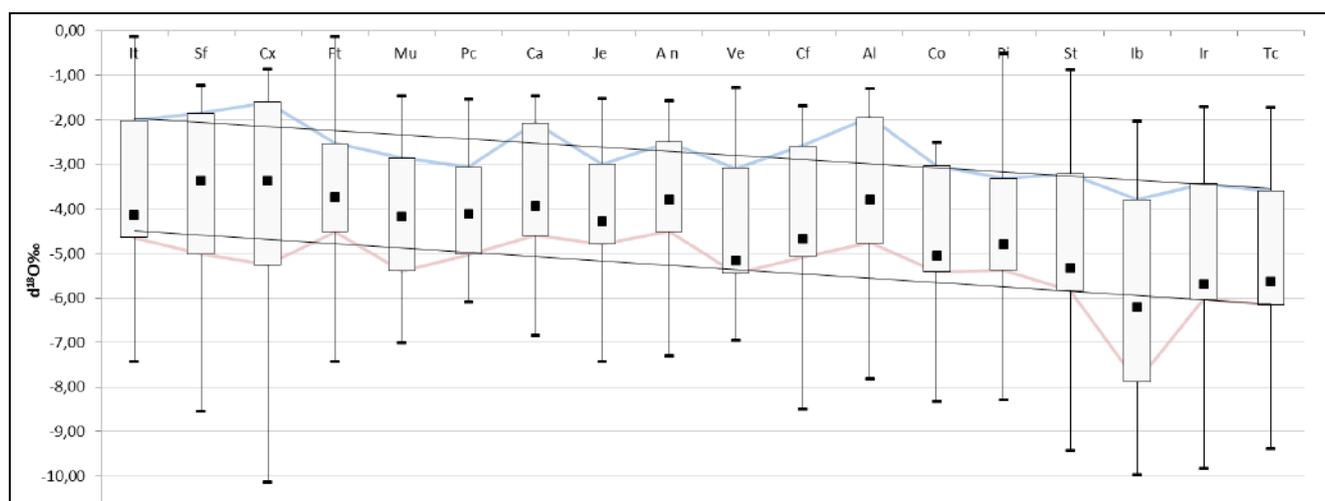


Figura 5: Dispersão dos dados em relação à distância da linha de costa (eixo x indica pontos mais distantes do litoral no sentido da esquerda para a direita).

Os pontos de coleta foram separados por setores, considerando-se a distância do litoral e o compartimento topográfico da BHRI. Os setores são: Litoral, Interior e Continental, conforme ilustrado na Figura 6.

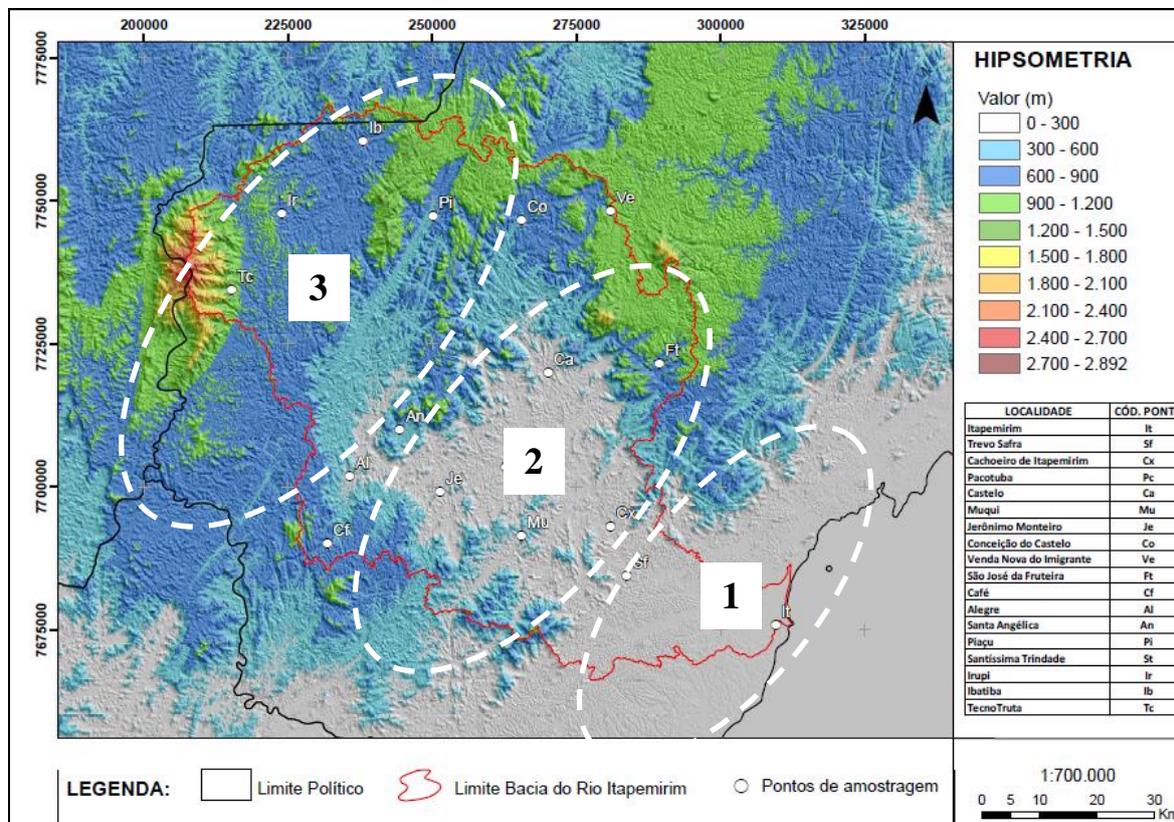
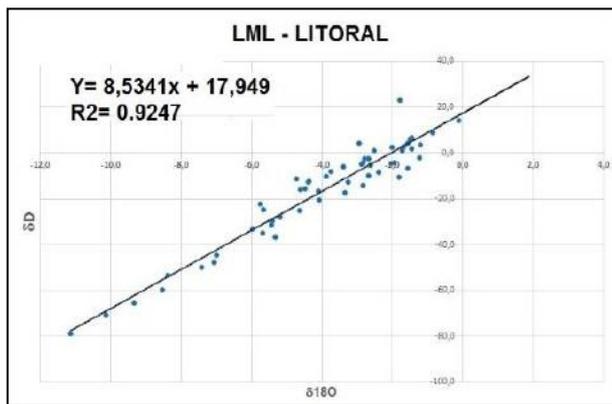


Figura 6: Setores da BHRI considerados para estudo das variações isotópicas da água da chuva.

A equação da linha meteórica é diferente para cada um dos setores (Figura 7). O setor denominado Litoral (pontos de coleta: It, Sf, Cx, Mu) é representado pela equação $y = 8,5341x + 17,494$ e um coeficiente de correlação $R^2 = 0,92$. O setor Interior (pontos: Cf, Al, An, Je, Pc, Ca, Ft) é representado pela equação $y = 8,5257x + 18,535$ ($R^2 = 0,94$). O setor Continental (pontos: Tc, St, Ir, Ib, Pi, Ve) é representado pela equação $y = 8,8507x + 21,989$ ($R^2 = 0,98$). A medida em que se afasta da linha de costa, o excesso de deutério das LML's (coeficiente linear da reta) aumenta, demonstrando a influência da continentalidade no fracionamento isotópico e na assinatura isotópica das águas pluviais.



LINHA METEÓRICA POR ESTAÇÃO DE COLETA								
SETOR LITORAL			SETOR INTERIOR			SETOR CONTINEN		
EST.	C.A.	C.L.	EST.	C.A.	C.L.	EST.	C.A.	C.L.
Mu	8,99	20,39	Cf	8,44	18,08	Tc	8,95	23,45
Sf	8,87	19,24	Al	8,89	18,00	St	8,97	23,13
It	8,44	16,57	An	8,61	19,69	Ir	8,98	23,24
Cx	8,13	15,12	Je	8,64	19,12	lb	8,78	21,07
			Pc	7,61	13,96	Pi	8,75	21,17
			Ca	8,85	19,72	Ve	8,73	20,49
			Ft	9,53	25,09			

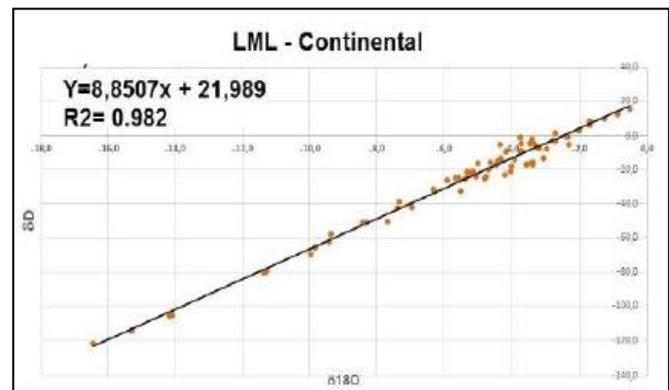
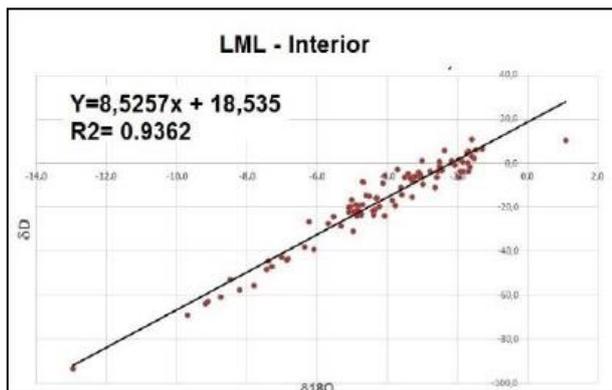


Figura 7: Linhas meteóricas locais (LML) dos diferentes setores da BHRI e dados das LMLs de cada estação de coleta (EST = estação de coleta, C.A. = coeficiente angular da reta, C.L. = coeficiente linear da reta)

3.3 - Assinatura isotópica da água subterrânea

A assinatura isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ e δD da água subterrânea é similar à da LML (Figura 8), pois a maior parte dos pontos caem sobre ou próximo à linha. O mesmo pode ser verificado nos valores de excesso de deutério ($d = \delta\text{D} - 8,579 \delta^{18}\text{O}$) e seus relativos desvios com relação à LML. Tal fato indica uma recarga relativamente rápida desse aquífero.

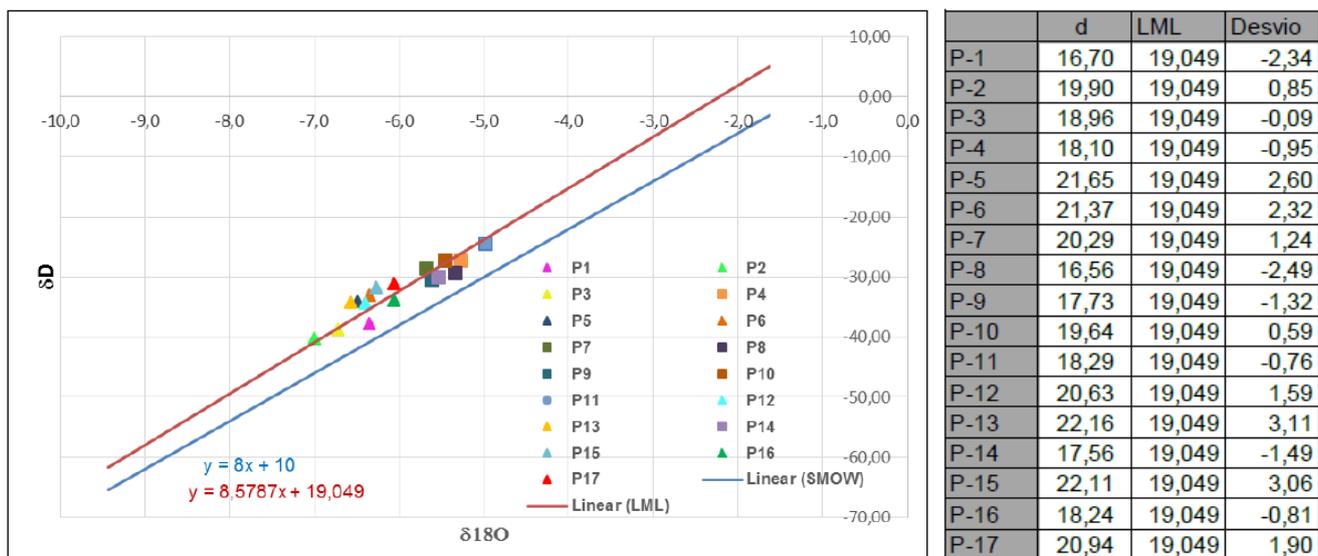
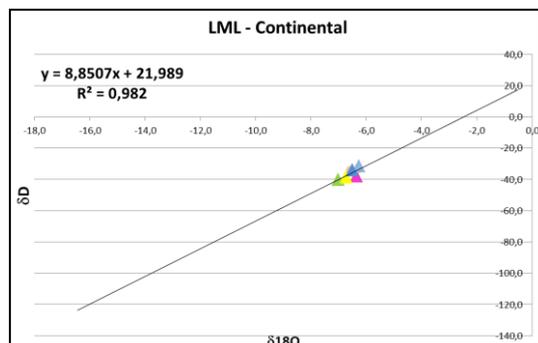
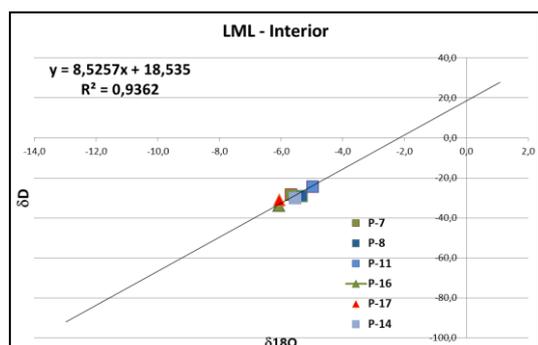
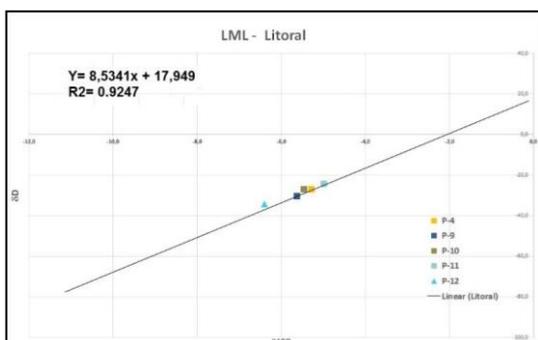


Figura 8: Linhas meteorológicas local (em vermelho) e global (em azul) e assinatura isotópica da água subterrânea (pontos plotados) na BHRI. As formas quadriculadas e triangulares indicam, respectivamente, grupos de alta e baixa condutividade elétrica.

Existem dois agrupamentos bem definidos dos pontos correspondentes à água subterrânea. O Agrupamento 1 (quadrados plotados na parte superior da LML – Figura 8) correspondem a águas mais mineralizadas (CE entre 300 e 1300 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e tendem a apresentar um enriquecimento em isótopos pesados, enquanto o Agrupamento 2 (triângulos mais abaixo, na LML – Figura 8), são águas menos mineralizadas (CE de, no máximo, 250 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Com relação à CE, os diferentes agrupamentos podem ser reflexo da localização de poços em rochas carbonáticas que ocorrem na região de Cachoeiro de Itapemirim. A circulação mais lenta em determinados locais contribuiria tanto para as modificações na assinatura isotópica quanto para o enriquecimento em sais a partir das rochas.

Analisando-se as relações entre a linha meteorológica de cada setor da BHRI e as águas subterrâneas, também por setor, nota-se que o desvio do excesso de deutério das últimas não segue um padrão bem definido (Figura 9). O desvio aleatório do excesso de deutério pode indicar que o aquífero apresenta heterogeneidades em relação ao seu padrão de recarga, o que corresponde aos regimes hidráulicos descontínuos do sistema fraturado. Assim, os dados isotópicos indicam que os padrões de recarga estão sendo influenciados pelos diferentes graus de faturamento e conectividade das fraturas.

Comprovando-se a eficácia do método, o próximo passo da pesquisa é o estudo de cada setor em escala de maior detalhe, conforme está em andamento na pesquisa aqui apresentada.



SETOR	POÇO	d	LML	Desvio
LITORAL	P-4	18,1	17,95	0,15
	P-9	17,73	17,95	-0,22
	P-10	19,64	17,95	1,69
	P-12	20,63	17,95	2,69
INTERIOR	P-7	20,29	18,535	1,75
	P-8	16,56	18,535	-1,98
	P-11	18,29	18,535	-0,25
	P-16	18,24	18,535	-0,3
	P-17	20,94	18,535	2,41
CONTINENTAL	P-14	17,56	18,535	-0,98
	P-1	16,7	21,989	-5,28
	P-2	19,9	21,989	-2,09
	P-3	18,96	21,989	-3,03
	P-5	21,65	21,989	-0,34
	P-6	21,37	21,989	-0,62
	P-7	20,29	21,989	-1,7
P-13	22,16	21,989	0,17	

Figura 9: Variações dos desvios no excesso de deutério das águas subterrâneas com relação à LML de cada um dos setores da BHRI.

4 - CONCLUSÕES

A linha meteórica local da BHRI é descrita pela equação $y = 8,5787x + 19,049$ e apresenta alto valor do excesso de deutério comparativamente à V-SMOW. O excesso de deutério pode ser consequência da influência de contribuição de massas de ar continental para as chuvas da região.

Os principais fatores que influenciam as variações isotópicas da água pluvial na BHRI são os efeitos de quantidade de precipitação e da continentalidade. Tais relações são verificadas no enriquecimento de isótopos pesados com a redução da precipitação nos meses de inverno e, de modo inverso, no verão. O efeito da continentalidade pode ser observado pela depleção de isótopos pesados e aumento do excesso de deutério no sentido do litoral para o interior continental.

As águas subterrâneas apresentam rápida velocidade de recarga com taxas variadas ao longo da BHRI. A forte mineralização das águas subterrâneas observada na porção média da BHRI pode ser consequência das interações com rochas carbonáticas presentes na área. O tempo de residência

maior poderia ser o fator responsável, tanto pelo enriquecimento mineral, quanto pelas diferenças na assinatura isotópica.

O efeito de continentalidade observado nas águas pluviais não é notável nas águas subterrâneas, ocorrendo poços com valores de excesso de deutério bastante distintos em situações geográficas semelhantes. Tais alterações são consequência do caráter heterogêneo e anisotrópico do Sistema Aquífero Cristalino, onde a recarga é alterada conforme as variações estruturais. Desta forma, o uso de análises do conteúdo isotópico das águas pode ser considerado uma importante ferramenta para o entendimento do sistema de fluxo em escala de detalhe.

Esta pesquisa continua em andamento, por meio do monitoramento do conteúdo isotópico das águas pluviais e subterrâneas ao longo dos meses. Foram selecionadas áreas-chave para verificar as relações entre as variações isotópicas da água da chuva e da água subterrânea junto a um levantamento geológico-estrutural em escala de maior detalhe.

5 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP pelos recursos financeiros recebidos através do Projeto HIDROFRAT - Hidrogeologia de Aquíferos Fraturados: entendimento da circulação da água e de contaminantes para uma melhor gestão dos recursos hídricos (Convênio 01.10.0808.00). Agradem também ao Laboratório de Estudos Geocronológicos, Geodinâmicos e Ambientais do IG/UnB, na pessoa do Prof. Dr. Elton Dantas, pelo apoio na realização das análises isotópicas.

6 - REFERÊNCIAS

ALLÈGRE, C. J. **Isotope Geology**. New York. Cambridge University Press. 2008. 415 p.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. A new device for monthly rainfall sampling for GNIP. **Water & Environment News**, n. 16. 2002.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle**: principles and applications. Paris, 2001. n.39, v. II, 122 p.

KENDALL, C.; CALDWELL, E.A. Fundamentals of isotope geochemistry. In: KENDALL, C.; MCDONNELL, J.J. (Eds), **Isotope Tracers in Catchment Hydrology**. Amsterdam: Elsevier,

1998. pp: 51-86. Disponível em <<http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/isoig/isopubs/>>. Acesso em 12 jan. 2016.

SUKHIJA, B.S.; REDDY, D.V.; NAGABHUSHANAM, P.; BHATTACHARYA, S.K.; JANI, R.A.; KUMAR, D. Characterization of recharge processes and groundwater flow mechanisms in weathered-fractured granites of Hyderabad (India) using isotopes. **Hydrogeology Journal**, v. 14, p. 663 – 674. 2005.

TWEED, S.O.; WEAVER, T.R.; CARTWRIGHT, I. Distinguishing groundwater flow paths in different fractured-rock aquifers using groundwater chemistry: Dandenong Ranges, Southeast Australia. **Hydrogeology Journal**, v.13, p. 771-786. 2005.