



UNIVERSIDADES ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
RIO CLARO



SARAH MARIA RODRIGUES DOS SANTOS

**APLICAÇÃO DE TRAÇADORES ISOTÓPICOS NO CICLO
HIDROLÓGICO EM ÁREA DE RECARGA DO SISTEMA
AQUÍFERO GUARANI E SISTEMA AQUÍFERO BAURU, REGIÃO
DE BROTAS E ARARAQUARA (SP).**

Relatório final apresentado à Comissão do Trabalho de Conclusão de Curso da Graduação em Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, Campus Rio Claro, como parte das exigências para o cumprimento da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso no ano letivo de 2018.

Orientador: Dr. Didier Gastmans

Rio Claro – SP

2018

SUMÁRIO

RESUMO	3
1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVOS	6
3. ISÓTOPOS AMBIENTAIS NA PRECIPITAÇÃO COMO FERRAMENTA PARA COMPREENSÃO CLIMÁTICA.....	6
3.1. ISÓTOPOS ESTÁVEIS AMBIENTAIS	6
3.2. COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DA PRECIPITAÇÃO EM ÁREAS TROPICAIS	10
4. ÁREA DE ESTUDO.....	11
4.1. Sistema Aquífero Bauru (SAB).....	12
4.2. Sistema Aquífero Guarani (SAG)	14
5. METODOLOGIA	15
6. RESULTADOS.....	16
6.1. BROTAS.....	16
6.1.1. RESULTADOS CLIMÁTICOS	17
6.1.2. RESULTADOS ISOTÓPICOS DA PRECIPITAÇÃO	18
6.1.3. RESULTADOS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DOS POÇOS	20
6.2. ARARAQUARA.....	21
6.2.1. RESULTADOS CLIMÁTICOS	21
6.2.2. RESULTADOS ISOTÓPICOS DA PRECIPITAÇÃO	23
6.2.3. RESULTADOS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DOS POÇOS.....	24
7. DISCUSSÃO.....	26
8. CONCLUSÃO	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

RESUMO

Estudos sobre a dinâmica climática global, suas mudanças temporais e possíveis influências sobre o ciclo natural da água, são cada vez mais objeto de estudo em pesquisas, devido à necessidade de entendimento sobre os efeitos das mudanças climáticas e ambientais. Alterações físico-químicas na precipitação e suas consequências no ciclo hidrológico podem ser analisadas através do monitoramento e avaliação de sua composição isotópica, importante ferramenta para a compreensão da dinâmica climática. Os processos naturais, como os de evaporação e condensação, são responsáveis pelo fracionamento isotópico e através da análise dos mesmos, podemos inferir o comportamento das águas no ciclo hidrológico durante o presente e passado e o controle climático exercido na precipitação. O presente estudo avaliou as variações na composição dos isótopos estáveis de hidrogênio (H^2/H^1) e oxigênio (O^{16}/O^{18}) da precipitação e nas águas subterrâneas em áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) e do Sistema Aquífero Bauru (SAB), nas cidades de Brotas e Araraquara (SP), buscando uma melhor compreensão nos mecanismos de recarga.

Palavras-chave: Precipitação, isótopos estáveis e mudanças climáticas.

ABSTRACT

Studies on global climate dynamics, their temporal changes and possible influences on the natural cycle of water, are increasingly being studied in research because of the need to understand the effects of climate and environmental changes. Physical-chemical changes in precipitation and their consequences in the hydrological cycle can be analyzed through the monitoring and evaluation of its isotopic composition, an important tool for the understanding of climatic dynamics. Natural processes, such as evaporation and condensation, are responsible for isotopic fractionation and, through their analysis, we can infer the behavior of the water in the hydrological cycle during the present and past and the climatic control exerted in the precipitation. The present study evaluated the variations in the composition of stable isotopes of hydrogen (H^2/H^1) and oxygen (O^{16}/O^{18}) precipitation and in groundwater in outcrop areas of the Guarani Aquifer System (SAG) and Bauru Aquifer System (SAB), in the cities of Brotas and Araraquara (SP), seeking a better understanding of recharge mechanism.

Key words: Precipitation, stable isotopes and climate change.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação conjunta de dados isotópicos preservados em arquivos paleoclimáticos, como espeleotemas e águas subterrâneas, pode ser utilizada como ferramenta na interpretação de condições climáticas do Pleistoceno/Holoceno. (AGGARWAL *et al.*, 2012). Esse conjunto de informações auxilia na interpretação do ciclo hidrológico, já que os isótopos estáveis são entendidos como traçadores ambientais, ajudando a reescrever a história da trajetória das águas.

A molécula de água comporta dois dos principais isótopos ambientais: hidrogênio ($^1\text{H}/^2\text{H}$) e oxigênio ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$). Os isótopos estáveis ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$) presentes na precipitação vêm sendo utilizados, desde há muito, como traçadores do ciclo hidrológico, uma vez que as mudanças do estado físico da água produzem alterações nas razões isotópicas, por meio do fracionamento isotópico desses elementos. Tais alterações podem ser diretamente relacionados às variações da temperatura ambiente, bem como a definição da origem das massas de chuva, proporcionando dessa forma uma associação entre as condições climáticas e a precipitação (FRITZ E FONTES, 1980; CLARK & FRITZ, 1997; CLARK & ARAVENA, 2005).

Com o objetivo de monitorar o conteúdo isotópico das águas de chuva no planeta, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA – *International Atomic Energy Agency*), em parceria com a Organização Meteorológica Mundial (WMO – *World Meteorological Organization*), vem desde 1961, coordenando um amplo programa de monitoramento mensal e global da composição isotópica da água nas precipitações. O programa denominado GNIP (*Global Network of Isotopes in Precipitation*), busca a criação de um banco de dados aberto e disponível no site da IAEA, capaz de fornecer informações importantes para estudos e pesquisas em hidrologia, e mais recentemente em climatologia, oceanografia e hidrometeorologia (ROZANSKI *et al.*, 1993).

Variações na composição isotópica da precipitação em áreas tropicais, ocasionada por fenômenos climáticos, podem refletir diretamente na composição isotópica das águas subterrâneas. Grandes variações em escalas milenares são facilmente reconhecidas ao longo de inúmeros aquíferos, como é o caso do Sistema Aquífero Guarani (SAG), onde águas de áreas confinadas são isotopicamente depletadas, com cerca de -3‰ VSMOW em $\delta^{18}\text{O}$ e encontradas em áreas próximas as áreas de recarga da unidade (CHANG *et al.*, 2012). Por meio da associação das

variações observadas no tempo presente (precipitação e águas subterrâneas) com registros temporais de alta resolução da origem da precipitação será possível a elaboração de modelos de circulação atmosférica (STUTE *et al.*, 1995, CRUZ JR *et al.*, 2006, GASTMANS *et al.*, 2010, NOVELLO *et al.*, 2012) com base nos parâmetros isotópicos da molécula de água.

A análise das variações na composição isotópica da precipitação e das águas subterrâneas, aliada ao monitoramento dos níveis d'água e dos índices pluviométricos em regiões tropicais, pode auxiliar na exploração sustentável de águas de grandes aquíferos, como o SAG e SAB, permitindo um melhor entendimento sobre as taxas de recarga, a trajetória dessa água, condições de recarga e as interações sofridas durante o tempo geológico, dentro do ciclo hidrológico.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do presente projeto é avaliar as variações na composição isotópica da precipitação e nas águas subterrâneas em dois pontos de monitoramento situados nas cidades de Brotas e Araraquara. Como objetivos secundários podem ser apontados os seguintes:

- a. Avaliar os parâmetros climáticos que influenciam na composição isotópica da precipitação, de acordo com modelos estabelecidos.
- b. Entender a dinâmica climática e isotópica na hidrogeologia, de acordo com o posicionamento geográfico dos municípios.
- c. Observar como ocorre a recarga dos aquíferos através da análise isotópica das águas meteóricas e as águas subterrâneas.
- d. Estabelecer padrões de recarga de acordo com a sazonalidade e fenômenos climáticos.

3. ISÓTOPOS AMBIENTAIS NA PRECIPITAÇÃO COMO FERRAMENTA PARA COMPREENSÃO CLIMÁTICA

3.1. ISÓTOPOS ESTÁVEIS AMBIENTAIS

Isótopos ambientais ocorrem de maneira generalizada no meio ambiente, sendo considerados traçadores ambientais. A assinatura isotópica é registrada em

arquivos paleoclimáticos, como núcleos de gelo, anéis de árvores, corais, sedimentos e depósitos lacustres, sendo utilizados como ferramenta para a compreensão de processos naturais específicos em diversas áreas do conhecimento, como espeleologia (CRUZ *et al.*, 2006; FRAPPIER *et al.*, 2007), hidrologia isotópica (MEIER *et al.*, 2013; AGGARWAL *et al.*, 2016; SÁNCHEZ-MURILLO *et al.*, 2016; GASTMANS *et al.*, 2017), dendrocronologia (BOYSEN; EVANS; BAKER, 2014), dentre outras.

Os isótopos são átomos de um mesmo elemento químico, que possuem massas atômicas diferentes e mesmo número de prótons. Os isótopos estáveis são assim chamados por não alterarem sua massa, e diferem dos isótopos instáveis (radioativos), decaindo e alterando sua massa.

O uso de isótopos estáveis em estudos ambientais baseia-se na premissa de que a composição isotópica varia de uma forma previsível, conforme o elemento se move através dos diversos compartimentos de um ecossistema (MARTINELLI *et al.*, 2009). As análises da variabilidade natural dos isótopos em diferentes ciclos físico-químicos possibilitou a utilização dos mesmos como traçadores ambientais.

A composição isotópica de um elemento é expressa pela relação entre o isótopo raro e o isótopo mais abundante. No caso da água, os isótopos mais “leves”, ou seja, com menor massa atômica, são mais abundantes, como podemos ver na seguinte tabela:

Tabela 1. Isótopos estáveis da água.

Elemento	O			H	
	¹⁶ O	¹⁷ O	¹⁸ O	¹ H	² H
Isótopos	¹⁶ O	¹⁷ O	¹⁸ O	¹ H	² H
Abundância natural (%)	0,9976	0,0004	0,0020	0,9998	0,0001
Expresso como	-	¹⁷ δ ou δ ¹⁷ O	¹⁸ δ ou δ ¹⁸ O	-	² δ ou δ ² H ou δD
Padrão internacional	VSMOW (‰)				
Razão Isotópica	¹⁸ O/ ¹⁶ O			² H/ ¹ H	
	0,00204			0,015	

Fonte: MOOK, 2002.

A abundância isotópica, também chamada de composição isotópica absoluta, dos principais isótopos estáveis segue padrão estabelecido, e no caso dos estudos hidrológicos, utiliza-se o padrão *Vienna Standart Mean Ocean Water* (VSMOW), criado com base em uma mistura de águas dos cinco oceanos (MARTINELLI *et al.*, 2009).

Fracionamento isotópico é o processo que ocorre na natureza e provoca a variação na proporção dos isótopos estáveis em um determinado composto. No caso dos estudos hidrológicos, os processos de maior importância são a condensação e a evaporação, durante as mudanças do estado físico da água.

Craig (1961) buscando compreender os processos de mudanças de fase no ciclo hidrológico de águas meteóricas que resultam nas variações do conteúdo isotópico identificou uma relação linear entre os isótopos de oxigênio (O^{18}/O^{16}) e hidrogênio (D^2/H^1), descrita por uma reta, denominada de Linha ou Reta Meteórica Global (*GMWL* sigla em inglês), representados pela equação $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$, onde a relação entre os isótopos de oxigênio (O^{18}/O^{16}) e hidrogênio (H^2/H^1) é de 8‰ (em condições de não-equilíbrio). Com amostras de água e suas análises isotópicas, é possível posicionar a amostra em uma reta local para comparação com a reta global e inferir dados climáticos sobre a região de coleta estudada. Amostras de todo o mundo se encaixam próximas à inclinação de 8, ou ainda estão inclinadas com valores superiores ou inferiores a este. Amostras com inclinação ≤ 8 indicam enriquecimento isotópico, associadas a processos *Rayleigh*, governados principalmente pela temperatura (CRAIG, 1961) enquanto inclinações > 8 , empobrecimento isotópico.

O valor de 10 na *GMWL* representa um importante componente na análise de águas meteóricas, denominado de excesso de Deutério (d), calculado através da seguinte equação, definida por Dansgaard em 1964: $d = \delta^2H - \delta^{18}O \cdot 8$. Esses valores estão relacionados a condições físicas como umidade, temperatura do ar, temperatura da superfície do mar, fonte de vapor atmosférico e reevaporação, podendo ser usado como uma “impressão digital” de processos associados à formação de chuva. Variações nos valores de (d) maiores que 10 podem ser correlacionados a distintas fontes de vapor que originam uma chuva e indicam sucessivos processos de reevaporação e ou recirculação de vapor durante o deslocamento e mistura de massas de ar, além de evaporação parcial de gotas de chuva abaixo da base da nuvem em condições climáticas quentes e secas (FROEHLICH; GIBSON; AGGARWAL, 2002).

Alguns fatores ambientais e geográficos podem influenciar localmente e até globalmente a composição isotópica, de maneiras distintas. Dansgaard (1964) apresentou os primeiros resultados obtidos entre a década de 1950 e 1960, sobre a composição isotópica da precipitação no globo, identificando algumas relações empíricas sobre os efeitos de: latitude, continentalidade e altitude, sazonalidade,

temperatura (*temperature effect*) e quantidade de precipitação (*amount effect*). A localização geográfica da área de estudo define quais desses parâmetros possui relevância e deve ser analisado em conjunto para melhor entendimento da dinâmica isotópica das águas.

O efeito da latitude é causado principalmente pela temperatura, já que o fracionamento isotópico entre o vapor e a chuva depende dela. É esperado que em altas latitudes haja maior fracionamento e, portanto, valores mais depletados de $\delta^{18}\text{O}$. O inverso também ocorre, sendo esperados em regiões tropicais e subtropicais, valores mais enriquecidos de $\delta^{18}\text{O}$.

O efeito da continentalidade é explicado pelo deslocamento de massas de ar em direção ao interior do continente, com o vapor d'água isotopicamente mais leve gerando chuvas com a mesma característica. Ou seja, quanto mais continental, mais depletados os valores da água da chuva.

O efeito da quantidade (*ammount effect*) se dá pela quantidade de vapor condensado. Com uma maior condensação, há um resfriamento mais elevado, aumentando o valor do fracionamento entre a chuva e o vapor de origem. Durante períodos secos a intensidade de troca isotópica com o ar atmosférico, enriquece as partículas de chuva (MARTINELLI *et al.*, 2009). São esperados em regiões mais secas, valores mais enriquecidos de $\delta^{18}\text{O}$ e em regiões mais chuvosas, valores mais empobrecidos de $\delta^{18}\text{O}$. Entretanto, o efeito de quantidade não pode ser interpretado por apenas por uma forçante climática, havendo distintos processos que o controlam, podendo estar associado a fatores regionais (origem da fonte de umidade, sistemas atmosféricos que geram as chuvas, tipos de chuvas) e ou a fatores locais (quantidade de precipitação, variação da temperatura e umidade relativa).

O efeito de altitude é quando os valores isotópicos tornam-se mais leves com o aumento da altitude, devido à redução da temperatura em relação a altitude. (Martinelli *et al.* 2009) Esse empobrecimento de isótopos com o aumento da altitude é governado pela mudança da temperatura, associada aos processos de mudança do estado da água, durante a formação da chuva orográfica (FREEMAN, 2014; WINNICK *et al.*, 2014).

3.2. COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DA PRECIPITAÇÃO EM ÁREAS TROPICAIS

A assinatura isotópica da precipitação é muito bem compreendida em regiões de altas latitudes, não ocorrendo o mesmo nos trópicos. As fontes de umidade e os distintos processos de formação de chuva realçam a necessidade de explicar a diversidade regional no equilíbrio de processos concorrentes que afetam a hidrologia tropical (WORDEN *et al.*, 2007). Segundo Santos (2018), há um efeito sazonal sobre a composição isotópica da precipitação: “Os ciclos sazonais de temperatura, regime pluviométrico e a composição de isótopos da precipitação nos trópicos possuem uma relação distinta, apesar de haver uma tendência de que a precipitação empobrecida (enriquecida) de O^{18} esteja associada há elevadas (diminutas) temperaturas e grandes (pequenos) volume de chuva”.

Cerca de 500.000 km^3 de água evaporada da superfície terrestre, 86% evapora dos oceanos e 14% dos continentes, sendo que 90% da água evaporada nos oceanos precipita nele mesmo e os 10% restantes são transportados e precipitam nos continentes (GIMENO *et al.*, 2010). As fontes de umidade dominante sobre os continentes tropicais são predominantemente oceânicas e de evapotranspiração, provocando uma diferença entre a assinatura isotópica do vapor de água troposférico em relação à precipitação (SANTOS, 2018).

Desta forma, o conteúdo isotópico da precipitação pode estar diretamente associado à fonte de umidade que origina a chuva e aos sistemas atmosféricos que comandam todo o processo (WORDEN *et al.*, 2007; GIMENO *et al.*, 2010). Segundo Risi *et al.*, (2013), a água evaporada da superfície terrestre nos trópicos é mais enriquecida em isótopos pesados do que a água evaporada do oceano, por exemplo.

De maneira geral, muitos parâmetros que se correlacionam com as mudanças na composição isotópica da água na precipitação identificados entre o equador e os trópicos foram associados à fonte de vapor da precipitação (LEWIS, 2010; VACHON *et al.*, 2010; JOUZEL *et al.*, 2013), destilação durante o transporte de massas de ar (VUILLE; WERNER, 2005; ISHIZAKI *et al.*, 2012; ZHAI *et al.*, 2013; SINGH, 2015), a reciclagem da água por processos de troca na superfície terrestre (UNNIKRISHNAN WARRIER; PRAVEEN BABU, 2011; RISI *et al.*, 2013; WINNICK *et al.*, 2014), e a atuação de processos convectivos (RISI; BONY; VIMEUX, 2008; KURITA *et al.*, 2009; KURITA, 2013; AGGARWAL *et al.*, 2016; LACOUR *et al.*, 2018).

4. ÁREA DE ESTUDO

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) e o Sistema Aquífero Bauru (SAB) constituem importantes reservatórios de água subterrânea que tem grande área aflorante no Estado de São Paulo, e são amplamente utilizados para o abastecimento público em diversas cidades. A compreensão dos mecanismos de recarga em suas áreas de afloramento constitui desafio para a correta gestão dos recursos, e nesse sentido a aplicação de isótopos ambientais como traçadores é fundamental, como uma ferramenta chave à gestão dos recursos hídricos.

A área selecionada para a realização do estudo situa-se na porção central do estado de São Paulo, área de clima tropical, englobando as cidades de Araraquara e Brotas, inseridas na bacia Hidrográfica do Rio Tietê-Jacaré (BH-TJ) - UGRHI-13 onde se encontram instaladas duas estações de coleta de precipitação e de monitoramento das condições atmosféricas (Figura 1).

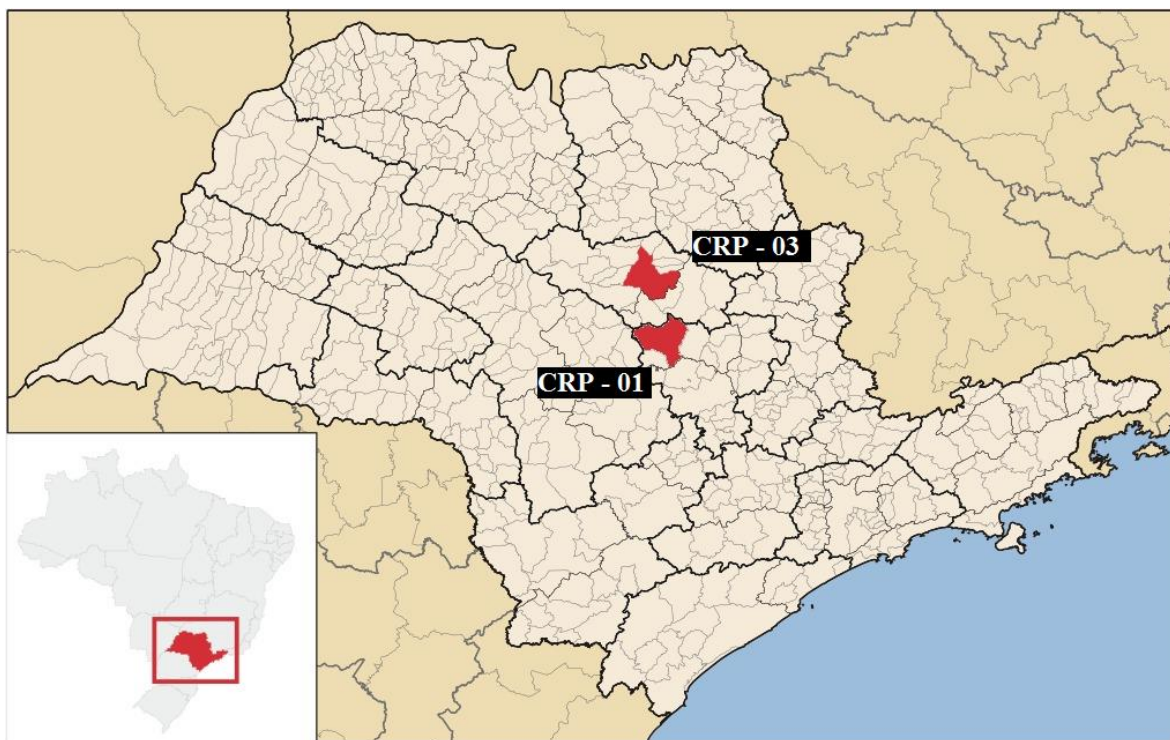


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e dos pontos de monitoramento, respectivamente CRP-01 (Brotas) e CRP 03 (Araraquara).

Os dois municípios seguem um padrão de distribuição pluviométricos parecidos ao longo do ano, com duas estações: uma chuvosa, entre os meses de dezembro a fevereiro, concentrando cerca de 50% de toda a precipitação anual, e uma estação mais

seca, que se estende de junho a agosto, quando chove aproximadamente 5% do índice anual (Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos, SIGRH –, 2005).

4.1. Sistema Aquífero Bauru (SAB)

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) é um aquífero sedimentar de extensão regional, contínua, livre a semiconfinada, com espessura média de 100 metros, podendo alcançar mais de 300 metros, na região de Marília. O sistema tem idade cretácea e é constituído por rochas do Grupo Bauru – uma sucessão de arenitos, arenitos argilosos, carbonatados ou não, siltitos, lamitos e argilitos, apresentando, localmente, conglomerados e camadas calcárias (DAAE, 1979).

O aquífero ocupa a metade oeste do Estado de São Paulo, numa área de cerca de 96.900km², cobrindo aproximadamente 40% da área estadual. Sua área é totalmente aflorante em superfície e assenta-se normalmente sobre o embasamento basáltico, de caráter impermeável, fisiografia muito irregular e com caimento geral para sudoeste. Cerca de 240 municípios do interior paulista captam água do SAB e a perfuração de poços e extração de água é facilitada devido a pouca profundidade e caráter predominantemente livre do aquífero.

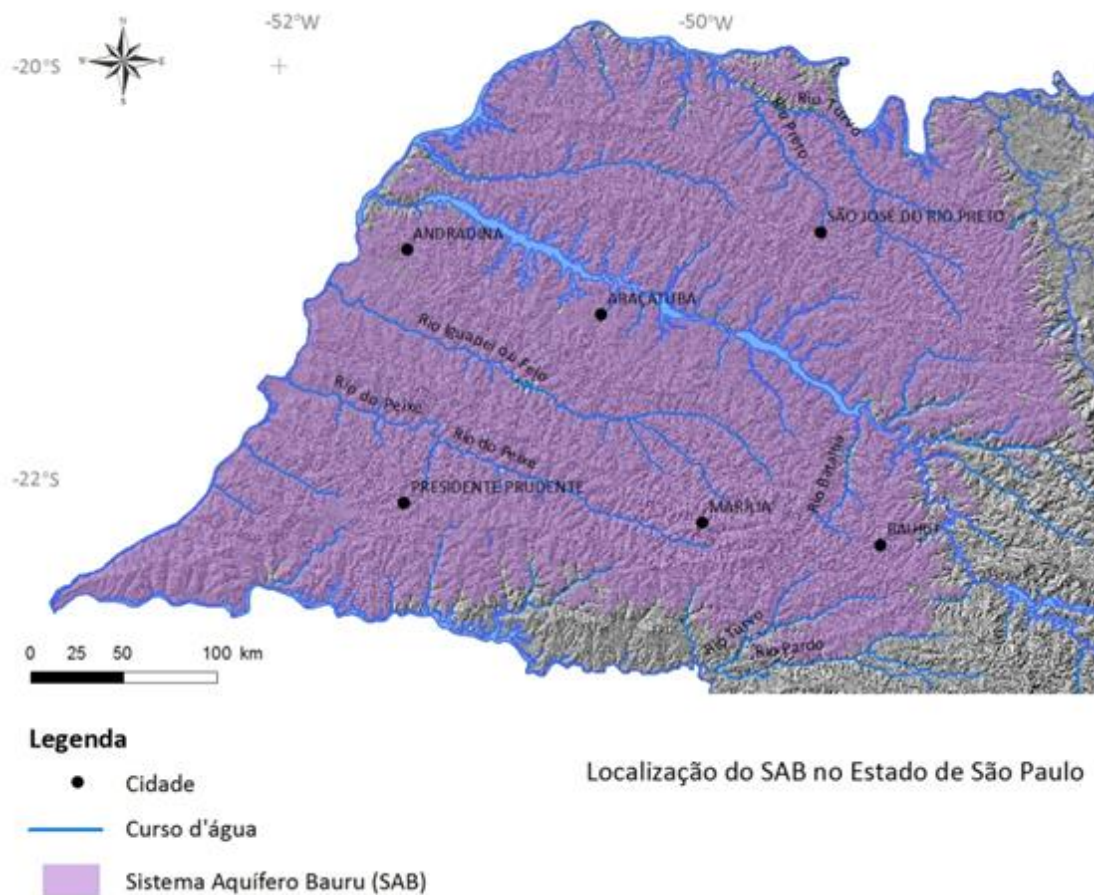


Figura 2. Área de ocorrência do Sistema Aquífero Bauru (SAB), no Estado de São Paulo. Modificado de Rocha (2005).

Soares *et. al.* (1980) propuseram a divisão estratigráfica clássica do Grupo Bauru, que corresponde às quatro unidades aquíferas, sendo as formações Cuiá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília.

Segundo IPT (1999), o SAB constitui um aquífero poroso, moderadamente permeável, devido ao teor relativamente elevado de material argiloso e siltoso. Em termos regionais, apresenta comportamento livre, mas, localmente, apresenta condições de semiconfinamento a confinamento.

Dados da CETESB apresentam um valor médio permeabilidade de 0,5 m/dia que, multiplicado pela espessura do aquífero, fornece valores da transmissividade da ordem de 10 m²/dia a 100 m²/dia. É um aquífero freático e sua recarga é feita diretamente pela precipitação pluvial, sendo sua base de drenagem os rios Paranapanema, Tietê, Grande e Paraná, e suas malhas de afluentes em toda a área de afloramento.

4.2. Sistema Aquífero Guarani (SAG)

O Aquífero Guarani é também um aquífero sedimentar de extensão regional, considerado um dos maiores reservatórios de água subterrânea do mundo, estendendo-se por 1.195.500 km². Ocorre no oeste do Estado de São Paulo e também se estende pelos estados de Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, chegando até o Uruguai, Paraguai e Argentina.



Figura 3. Localização do Aquífero Guarani. Fonte: Delimitação do aquífero com base no mapa geológico do Estado de São Paulo - CPRM/ SGB (PERROTTA *et al.* 2005).

No Estado de São Paulo tem cerca de 137.700 km², mergulhando em sentido a oeste, e é confinado pelos basaltos do Aquífero Serra Geral e pelas rochas do Aquífero Bauru. O SAG é granular, regionalmente homogêneo e livre na sua porção aflorante, mas predominantemente confinado, constituindo um pacote contínuo desde sua área de afloramento, a leste, até o extremo oeste de São Paulo, onde extrapola os limites estaduais. Sua porção aflorante estende-se por cerca de 17.700 km com espessura média de aproximadamente 100 metros, podendo alcançar até 450m ao longo da calha do Rio Tietê, e é explorado por mais de 1000 poços.

Formado há cerca de 130 milhões de anos, o SAG é constituído, predominantemente por arenitos da Formação Piramboia na base e arenitos da

Formação Botucatu no topo. O arenito é bastante homogêneo, possui grande quantidade de poros interconectados, que imprime uma elevada capacidade de armazenar e fornecer água.

As vazões exploráveis recomendadas para a área de afloramento estão entre 20 a 80 m³/h por poço. Na área confinada, podem-se obter maiores vazões, uma vez que a espessura do aquífero também aumenta.

5. METODOLOGIA

Para a coleta das amostras de precipitação foi utilizado um coletor especialmente desenvolvido para evitar evaporação, uma vez que a mesma altera a composição isotópica original da amostra coletada devido ao fracionamento isotópico (GRÖNING *et.al.*, 2012). As amostras de chuva foram coletadas mensalmente, em alíquotas de 25 mL, filtradas com filtro seringa de acetato de celulose, abertura 0,45µm e armazenadas em frascos de vidro âmbar com dupla vedação, evitando-se grandes volumes de ar no interior do frasco, de modo a evitar a ocorrência de fracionamento por evaporação.

As amostras de água subterrânea foram coletadas mensalmente, nos primeiros dias do mês, em poços tubulares com 30 metros de profundidade, um perfurado em arenitos da Formação Botucatu na localidade de Brotas, e o outro nos arenitos do Grupo Bauru, na cidade de Araraquara. Antes da coleta da amostra foi efetuada a medição dos níveis d'água e da condutividade elétrica, para se evitar amostragem de água estagnada no interior do poço, o mesmo era bombeado por cerca de 20 minutos, garantindo que a amostra representasse a água contida no aquífero.

O conteúdo isotópico das amostras foi determinado por Espectroscopia Laser de Cavidade Oca (*CavityRing Laser Spectroscopy*), no Laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP, e os resultados expressos de acordo com a notação δ‰ em relação ao VSMOW (*Vienna Standard MeanOceanWater*), calculada de acordo com a equação 1:

$$\delta_{amostra} = \frac{R_{amostra} - R_{padrão}}{R_{padrão}} \times 1000 \quad (\text{Eq. 1})$$



Figura 4. Preparo das amostras e determinação do conteúdo isotópico por Espectroscopia a Laser (Los Gatos ResearchInc) no Laboratório de Hidrogeoquímica do DGA-IGCE.

Dados climáticos diários, como: temperatura, umidade, pressão atmosférica e precipitação foram obtidos a partir de estação meteorológica automática modelo DRIA-0511, instalada nos mesmos locais da coleta das amostras de precipitação.

Com o objetivo de se avaliar qual o conjunto de variáveis que melhor se correlacionam com a composição isotópica foi empregada correlação. As variações temporais foram analisadas por meio de gráficos de séries temporais dos parâmetros avaliados, enquanto as variações na composição isotópica das águas foram analisadas por meio de gráficos correlacionando os valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ e a Reta Meteorica Global ($\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$).

6. RESULTADOS

6.1. BROTAS

Através das análises de amostras de coleta de chuva periódica e dos dados meteorológicos diários em uma estação meteorológica situada em Brotas, dos meses de outubro de 2014 até dezembro de 2015, foram obtidos dados e elaborados gráficos correlacionando a precipitação com fatores climatológicos, como pressão atmosférica, umidade relativa e temperatura. Os dados da estação meteorológica englobam o período de outubro/2014 até dezembro/2015.

A pressão atmosférica se manteve com pouca variação, sendo mais eficaz, então, a interação entre temperatura, umidade e precipitação.

Segundo dados do DAAE - Departamento de Água e Esgoto, a precipitação média anual para Brotas é de 1510 mm/ano.

6.1.1. RESULTADOS CLIMÁTICOS

No período de monitoramento, a precipitação observada foi de 980 mm durante o ano de 2014 e 1050 mm no ano de 2015, os dois anos bem abaixo da média observada na região. Os meses mais chuvosos foram novembro/2014 e dezembro/2014, com 105,9 e 166 mm respectivamente e fevereiro/2015, com volumes que alcançaram 179 mm. Os meses mais secos foram outubro/2014, com 28,5 mm e junho/2015, com 0,9 mm. Com base na análise meteorológica do período podemos definir duas estações: uma seca, que coincide com menores temperaturas que vai de abril a setembro/2015, e uma mais chuvosa, coincidindo com temperaturas maiores, de outubro/2014 a março/2015 e outubro/2015 até dezembro/2015, tendo os meses moderadamente entre os padrões definidos pelo SIGRH (a estação seca de junho a agosto e a estação chuvosa de dezembro a fevereiro).

Tabela 2. Dados meteorológicos obtidos durante o período para Brotas.

	Temperatura	Precipitação	Umidade
Mínima	9,8°C	0,3 mm	41,1%
Média	23,4°C	2,7 mm	73,7%
Máxima	32,4°C	74,1 mm	98,5%

Os valores mínimos, médios e máximos para cada variável meteorológica analisada de acordo com as medições diárias.

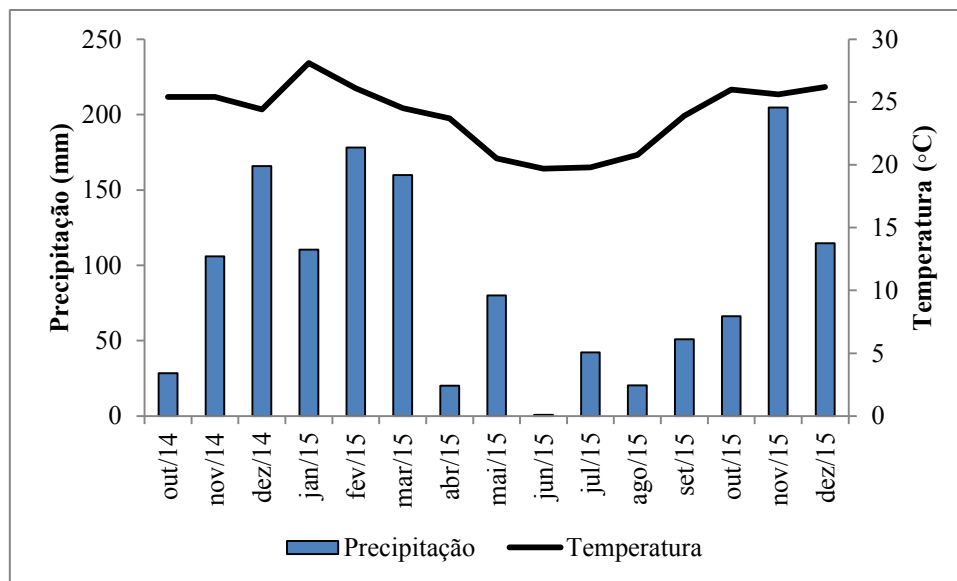


Figura 5. Relação entre precipitação e temperatura para o período monitorado.

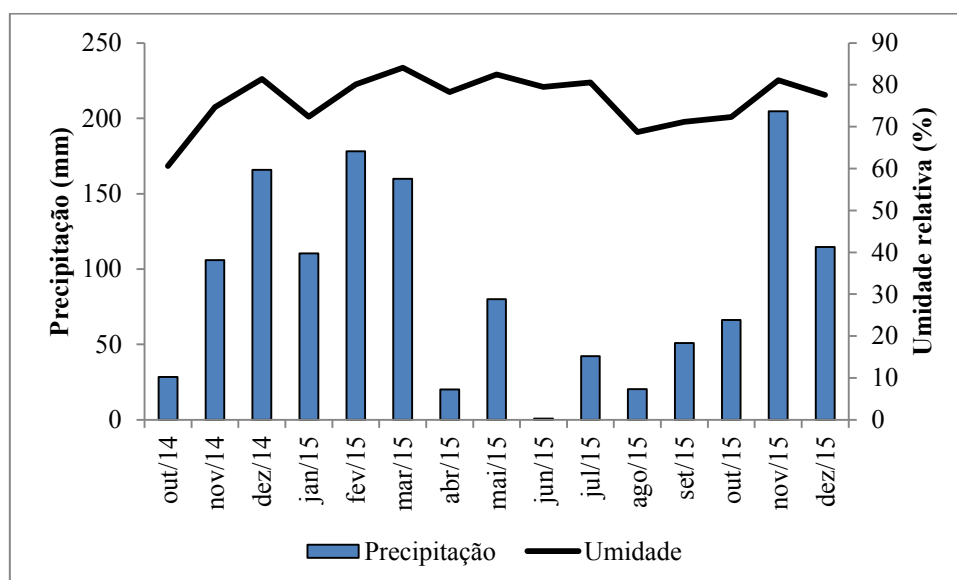


Figura 6. Relação entre precipitação e umidade relativa do ar para o período monitorado.

6.1.2. RESULTADOS ISOTÓPICOS DA PRECIPITAÇÃO

Em termos da composição isotópica para as águas meteóricas, temos as médias ponderadas para $\delta^{18}\text{O}$ de $-5,105\text{‰VSMOW}$ e para $\delta^2\text{H}$ de $-26,91\text{‰VSMOW}$. A reta meteórica local é dada por: $\delta^2\text{H} = 8,18\delta^{18}\text{O} + 14,783$, com interseção da reta meteórica local de $d=14,783$.

A composição isotópica da precipitação variou para $\delta^{18}\text{O}$ de -10,3‰ a 0,05‰, para o $\delta^2\text{H}$ -69,4‰ a 20,11‰ e para o d -excess 1,6‰ a 21,4‰. Os dados podem ser mais bem visualizados na tabela abaixo:

Tabela 3. Valores isotópicos para as águas meteóricas em Brotas

Média ponderada $\delta^{18}\text{O}$	-5,105‰ VSMOW
Varição $\delta^{18}\text{O}$	-10,3 a 0,05‰
Média ponderada $\delta^2\text{H}$	-26,91‰ VSMOW
Varição $\delta^2\text{H}$	-69,4 a 20,11‰
Média ponderada d -excess	14,783
Varição d -excess	1,6 a 21,4‰

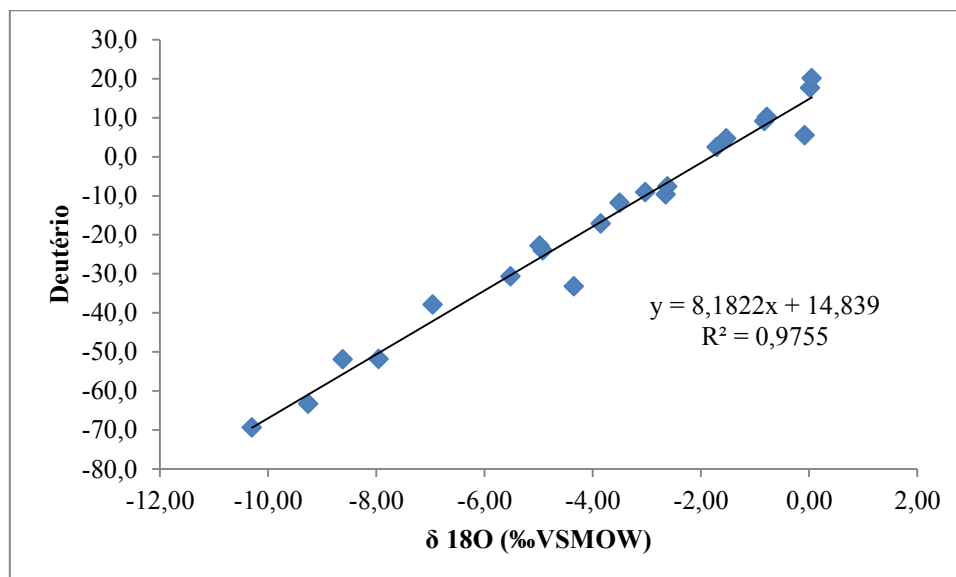


Figura 7. Reta meteórica local da precipitação.

A Reta Meteórica Local (Figura 7) apresenta inclinação similar da reta meteórica global com intersecção ligeiramente superior, indicando que a composição isotópica da precipitação está relacionada a sucessivos processos de evaporação e recirculação de vapor durante o deslocamento de massas de ar (GASTMANS *et al.*, 2017; JOUZEL *et al.*, 2013; RISI *et al.*, 2013).

O excesso de deutério acima de 10 reforça que as condições climáticas do período de análise foram secas e com valores isotópicos dispersos, porém no geral, mais enriquecidos em relação à reta meteórica global.

Porém, para um entendimento melhor do comportamento isotópico na região a quantidade de chuva para o período exerce um grande papel de análise. O período de monitoramento contou com quantidade precipitada abaixo da média esperada, o que acaba implicando em valores mais elevados de deutério e de oxigênio 18 enriquecido.

6.1.3. RESULTADOS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DOS POÇOS

Analisando o nível da água dos poços em relação à precipitação, durante o período de julho/2013 até outubro/2016, podemos notar que eventos de recarga ocorrem associados a maiores eventos de precipitação, como esperado, associado à recuperação dos níveis d'água observado no poço.

A variação do nível da coluna d'água analisada em Brotas foi de 1,4m, tendo seus níveis, máximo e mínimo, em 9,69m e 8,29m, respectivamente.

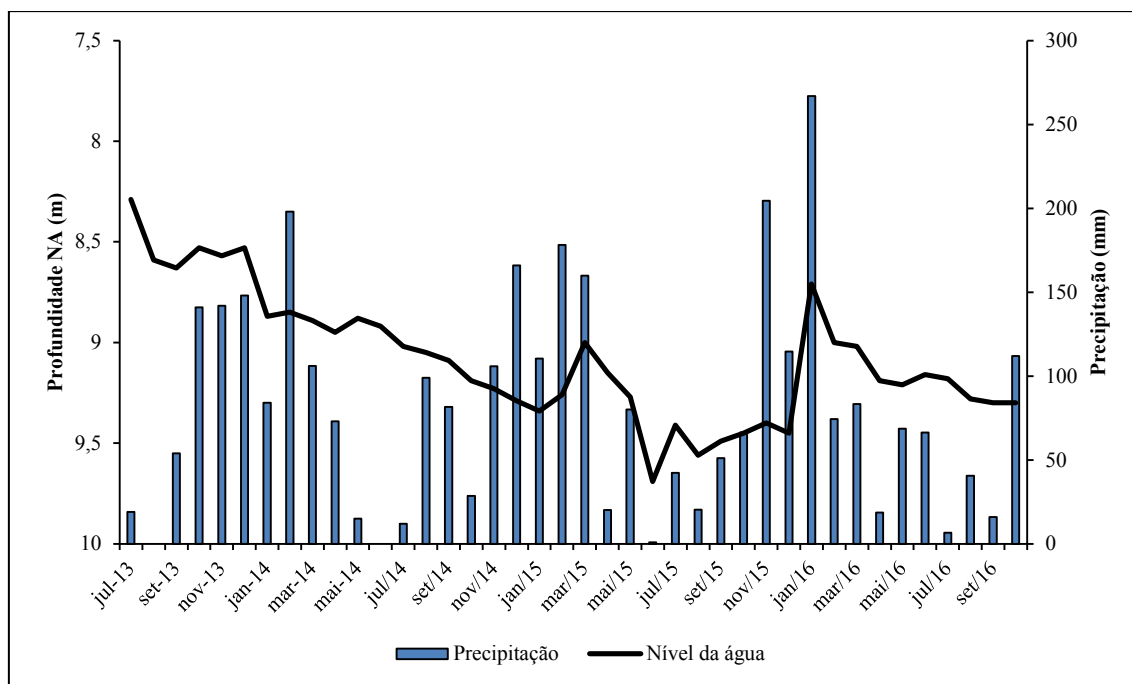


Figura 8. Relação entre nível d'água e precipitação em Brotas.

A pequena variação observada nas razões isotópicas das águas subterrâneas se explica pela atenuação do sinal isotópico durante o processo de recarga, quando ocorre a mistura de águas. A correlação do excesso de deutério em relação com a composição isotópica do $\delta^{18}\text{O}$ é cerca de 68%.

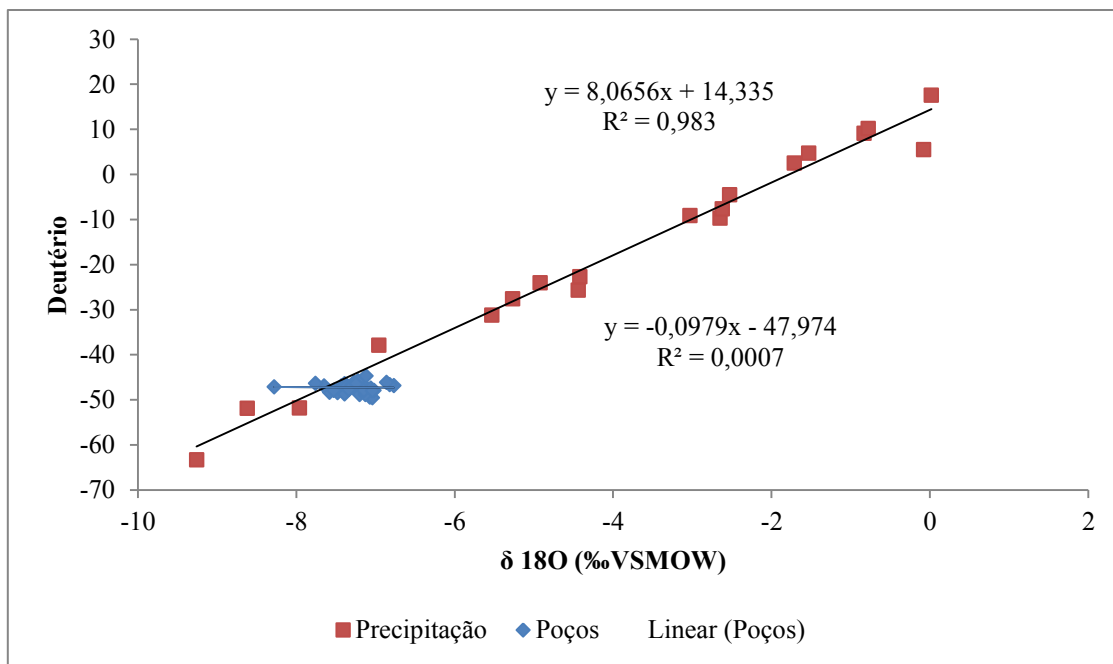


Figura 9. Composição isotópica das águas da chuva em relação à composição isotópica às águas do poço.

6.2. ARARAQUARA

Através das análises de amostras de coleta de chuva periódica e dos dados meteorológicos diários em uma estação meteorológica situada em Araraquara, dos meses de Outubro/2014 até Dezembro/2015, foram obtidos dados e elaborados gráficos correlacionando a precipitação com fatores climatológicos, como pressão atmosférica, umidade relativa e temperatura. A pressão atmosférica se manteve com pouca variação, sendo mais eficaz, então, a interação entre temperatura, umidade e precipitação.

Segundo dados do DAAE - Departamento de Água e Esgoto, a precipitação média anual para Araraquara é de 1489 mm/ano.

6.2.1. RESULTADOS CLIMÁTICOS

No período de monitoramento, a precipitação observada foi de 377,5 mm durante o ano de 2014 e 1029 mm no ano de 2015, bem abaixo da média observada na região. Os meses mais chuvosos foram novembro/2014 e dezembro/2014, com 200,2 e 166 mm respectivamente, fevereiro/2015 e novembro/2015, com índices que alcançaram 179 e 205 mm, respectivamente. Os meses mais secos foram junho/2015 e agosto/2015, com 0,3 e 10,5 mm, respectivamente. Com base na análise meteorológica

podemos definir duas estações: uma seca, que coincide com menores temperaturas que vai de abril a outubro de 2015, e uma mais chuvosa, coincidindo com temperaturas maiores, de novembro de 2014 a março de 2015 e novembro a dezembro de 2015, ficando com os meses moderadamente entre os padrões definidos pelo SIGRH (a estação seca de junho a agosto e a estação chuvosa de dezembro a fevereiro).

Tabela 4. Dados meteorológicos obtidos durante o período para Araraquara.

	Temperatura	Precipitação	Umidade
Mínima	10,9°C	0,3 mm	45%
Média	22,4°C	2,9 mm	69,6%
Máxima	32,9°C	69,6 mm	97,4%

Os valores mínimos, médios e máximos para cada variável meteorológica analisada de acordo com as medições diárias durante o período.

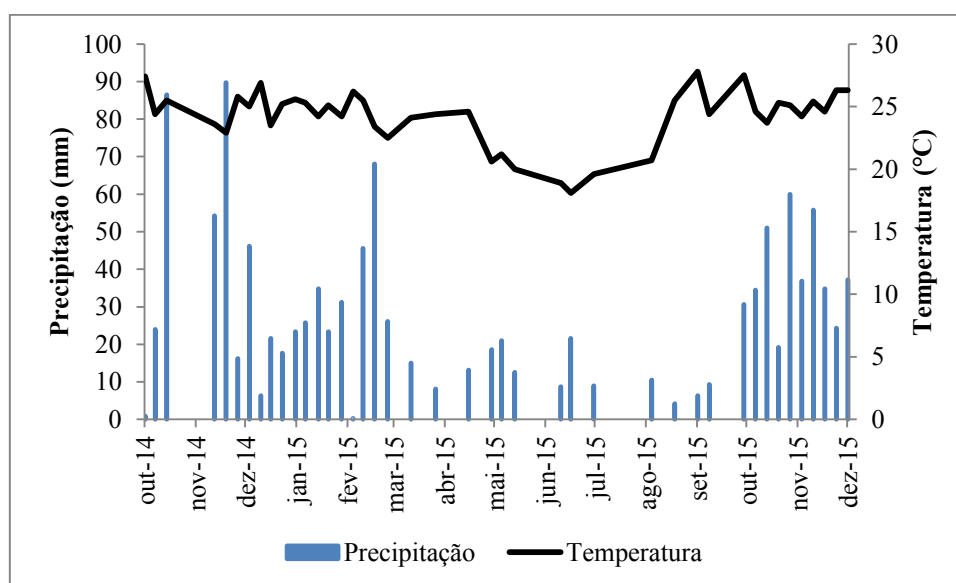


Figura 10. Relação entre precipitação e temperatura para o período monitorado.

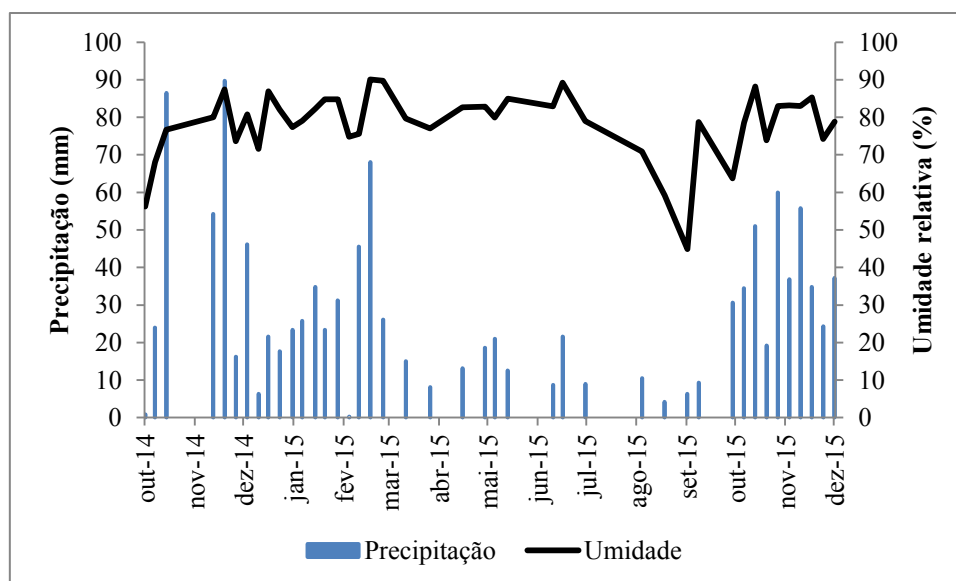


Figura 11. Relação entre precipitação e umidade para o período monitorado.

6.2.2. RESULTADOS ISOTÓPICOS DA PRECIPITAÇÃO

Em termos da composição isotópica para as águas meteóricas, temos as médias ponderadas para $\delta^{18}\text{O}$ de $-5,1\text{‰ VSMOW}$ e para $\delta^2\text{H}$ de $-25,4\text{‰ VSMOW}$. A reta meteórica local é dada por: $\delta^2\text{H} = 8,42\delta^{18}\text{O} + 16,85$, sendo o valor o excesso de deutério $d=16,18$.

A composição isotópica da no período variou para o $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ de $-11,94\text{‰}$ a $1,95\text{‰}$, para o $\delta^2\text{H}$ $-85,20\text{‰}$ a $37,51\text{‰}$ e para o d -excess $6,44\text{‰}$ a $24,54\text{‰}$. Os dados podem ser mais bem visualizados na tabela abaixo:

Tabela 5. Valores isotópicos para as águas meteóricas em Araraquara

Média ponderada $\delta^{18}\text{O}$	$-5,1\text{‰ VSMOW}$
Varição $\delta^{18}\text{O}$	$-11,4$ a $1,95\text{‰}$
Média ponderada $\delta^2\text{H}$	$-25,4\text{‰ VSMOW}$
Varição $\delta^2\text{H}$	$-85,2$ a $37,51\text{‰}$
Média ponderada d -excess	16,85
Varição d -excess	6,44 a $24,54\text{‰}$

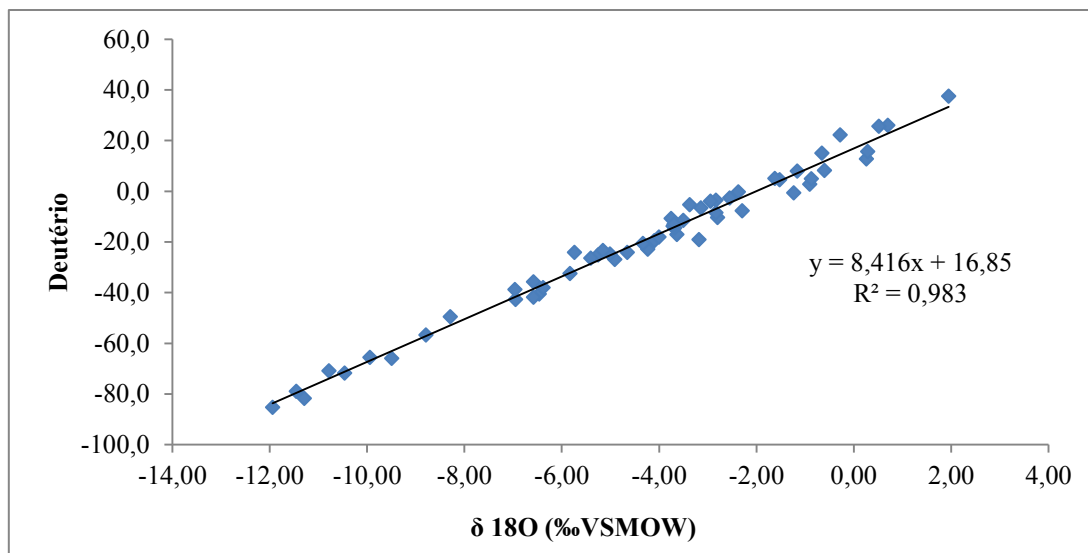


Figura 12. Reta Meteórica Local da precipitação.

A Reta Meteórica Local (Figura 12) também apresenta inclinação similar da reta meteórica global com intersecção ligeiramente superior, indicando uma precipitação que passou por sucessivos processos de evaporação e recirculação de vapor.

O excesso de deutério acima de 10 reforça que as condições climáticas do período de análise foram secas e com valores isotópicos dispersos, porém no geral, mais enriquecidos em relação à reta meteórica global.

Assim como ocorre em Brotas, para um melhor entendimento do comportamento isotópico em Araraquara, são feitas análises quanto à quantidade de chuva precipitada. O período de monitoramento contou com uma quantidade abaixo da média esperada, o que acaba implicando em valores mais elevados de deutério e de oxigênio 18 enriquecido. Portanto, a análise chega a resultados que condizem com o esperado.

6.2.3. RESULTADOS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DOS POÇOS

Analisando o nível da água dos poços em relação à precipitação, durante o período de julho/2013 até outubro/2016, podemos notar que eventos de recarga ocorrem associados a maiores eventos de precipitação, como esperado, associado à recuperação dos níveis d'água observado no poço.

A variação do nível da coluna d'água analisada em Araraquara foi de 1,84m, tendo seus níveis, máximo e mínimo, com 12,54m e 10,7m, respectivamente.

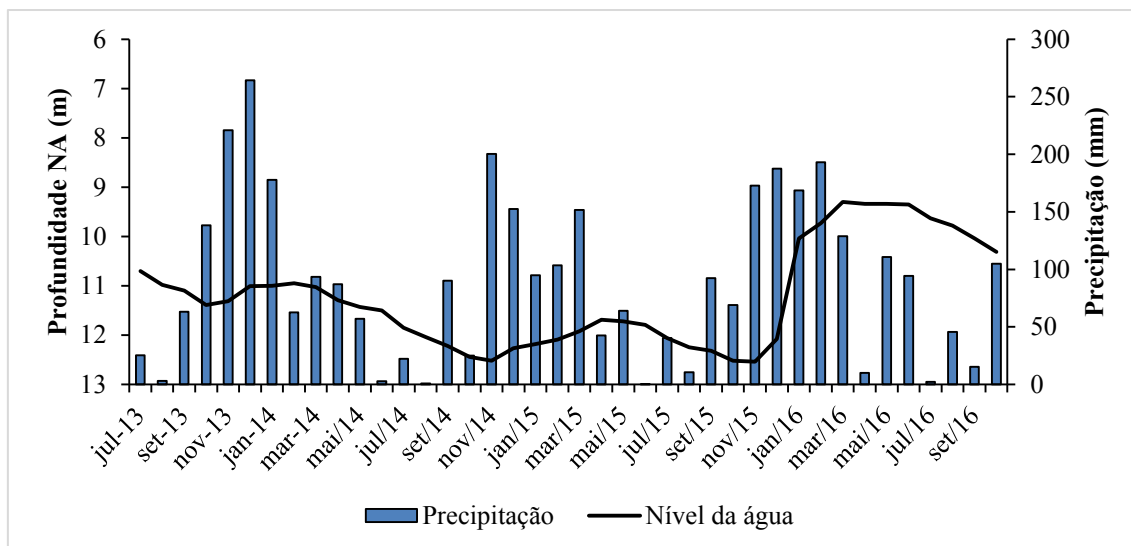


Figura 13. Relação entre nível d'água e precipitação em Araraquara.

A pequena variação observada nas razões isotópicas das águas subterrâneas, observada na figura abaixo, se explica pela atenuação do sinal isotópico durante o processo de recarga, quando ocorre a mistura de águas. A correlação do excesso de deutério em relação com a composição isotópica do oxigênio-18 é de cerca de 65%.

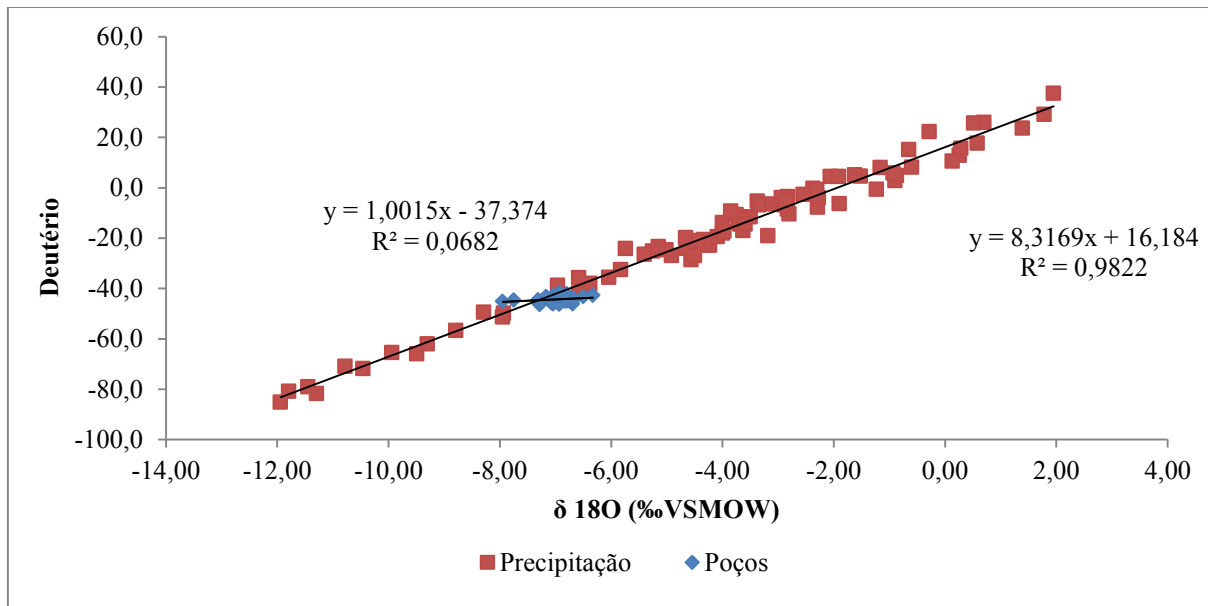


Figura 14. Composição isotópica da água dos poços de Araraquara comparada com a da chuva.

7. DISCUSSÃO

A proximidade dos municípios e o fato de ambos os poços serem abastecidos pelo Sistema Aquífero Guarani possibilitou observar relações entre os resultados meteorológicos e químicos, podendo chegar a conclusões similares para o comportamento isotópico em Brotas e Araraquara, como é possível observar na figura 13.

O período de monitoramento foi caracterizado por precipitações abaixo da média, que se refletiram no rebaixamento dos níveis d'água, interrompido no verão 2014/2015. As variações medidas na composição isotópica da precipitação ($\sim 10\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ e 80‰ para $\delta^2\text{H}$) são muito maiores que aquelas das águas subterrâneas ($\sim 1\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ e 5‰ para $\delta^2\text{H}$). As águas subterrâneas apresentam razões isotópicas médias mais depletadas ($\delta^{18}\text{O} = -7,25\text{‰}$ VSMOW e $\delta^2\text{H} = -49,5\text{‰}$ VSMOW) que as da precipitação, entretanto esses valores são semelhantes aos medidos na precipitação durante a estação chuvosa (entre novembro/2014 e maio/2015), quando se observa a recuperação dos níveis d'água.

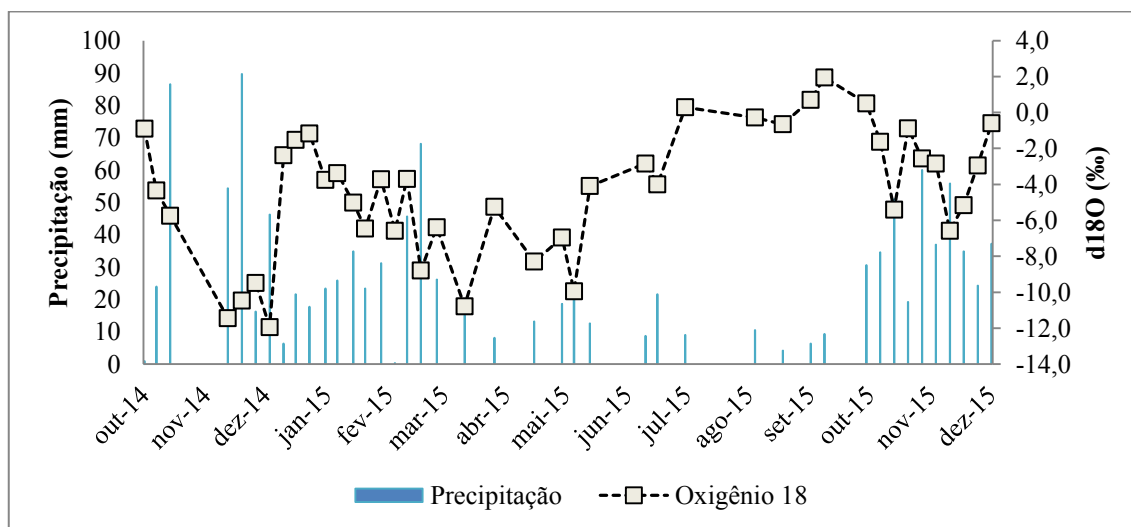


Figura 15. Variação do oxigênio 18 em relação à precipitação em Araraquara. O mesmo comportamento é visto para Brotas.

Uma possível explicação para a condição climática distinta ocorrida em 2014 foi a atuação de um bloqueio atmosférico, provocado por um sistema de alta pressão que inibia a ação dos sistemas geradores de chuva, principalmente a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante o verão (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016). Para o período entre 2015 e 2016, a explicação pode ser atribuída à

atuação do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), cuja duração ocorreu entre novembro de 2014 a março de 2016, embora seus efeitos ainda não sejam muito bem esclarecidos para esta região (SANTOS, 2018).

Os resultados isotópicos seguem os padrões esperados de acordo com o efeito quantidade de chuvas, com meses mais secos sendo isotopicamente mais enriquecidos e meses mais chuvosos com valores isotopicamente mais depletados.

Chuvas empobrecidas acabam sendo resultado de processos de recirculação de vapor em períodos mais úmidos e temperaturas mais elevadas, enquanto chuvas enriquecidas ocorrem mais frequentemente durante os períodos de menor umidade e temperaturas mais amenas.

8. CONCLUSÃO

O objetivo principal do trabalho foi alcançado, estabelecendo relações entre a sazonalidade observada nos municípios e a composição isotópica da água meteórica e subterrânea.

Os objetivos secundários serão possíveis de atingir com a continuidade do trabalho e monitoramento contínuo das áreas, entendendo melhor a dinâmica climática e isotópica na hidrogeologia, assim como possíveis padrões de recarga dos aquíferos.

A análise isotópica, portanto, se mostra uma ferramenta útil para o presente estudo. Assim, temos a reafirmação da importância do papel dos isótopos estáveis como traçadores ambientais em estudos climáticos e hidrogeológicos, tanto do passado quanto do presente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL P.K., ALDUCHOV O.A., FROELICH K.O., ARAGUAS-ARAGUAS L.J., STURCHIO N.C., and KURITA N. (2012). Stable isotopes in global precipitation: A unified interpretation based on atmospheric moisture residence time. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, L11705, doi:10.1029/2012GL051937

BOYSEN, B. M. M.; EVANS, M. N.; BAKER, P. J. $\delta^{18}\text{O}$ in the tropical conifer *Agathis robusta* records ENSO-related precipitation variations. *PLoS ONE*, v. 9, n. 7, p. 1–10, 2014.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2018. Aquífero Bauru. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/programa-de-monitoramento/consulta-por-aquiferos-monitorados/aquifero-bauru/>

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2018. Aquífero Guarani. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/programa-de-monitoramento/consulta-por-aquiferos-monitorados/aquifero-guarani/>

CHANG, H.K.; ARAVENA, R., GASTMANS, D., HIRATA, R., MANZANO, M., VIVES, L., RODRIGUES, L., AGGARWAL, P., ARAGUAS, L. Role of isotopes in the development of a general hydrogeological conceptual model of the Guarani Aquifer System (GAS) In: *Isotopes in Hydrology, Marine Ecosystems and Climate Change Studies*. 1 ed. Viena : International Atomic Energy Agency, 2013, v.2, p. 281-290. Chang *et al.*, 2012

CLARK, I. D.; FRITZ, P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Boca Raton, Florida: *Lewis Publishers*, 1997. 325p.

CLARK, I. D.; ARAVENA, R. 2005. Environmental Isotopes in Ground Water Resource and Contaminant Hydrogeology. San Diego: *NGWA, NGWA COURSE #394 - January 25-26*, 103p.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 125, n. 3–4, p. 769–784, 2016.

CRUZ JR F.W., BURNS S.J., KARMAN I., SHARP W.D., VUILLE M. 2006. Reconstruction of regional atmospheric circulation features during the late Pleistocene in subtropical Brazil from oxygen isotope composition of speleothems. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 248, pag. 495-507, doi:10.1016/j.epsl.2006.06.019.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1979. Estudo de águas subterrâneas, Regiões Administrativas 10 e 11: Presidente Prudente e Marília. São Paulo: v.1 e v.2.

FRAPPIER, A. B. *et al.* Stalagmite stable isotope record of recent tropic cyclone events. *Geology*, v. 35, n. 2, p.

FREEMAN, K. H. Earth science: Controls on isotopic gradients in rain. *Nature*, v. 516, n. 7529, p. 41–42, 2014.

FROEHLICH, K.; GIBSON, J.J.; AGGARWAL, P. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, n. July 2002, p. 1–23, 2002.

GASTMANS, D., CHANG, H.K., HUTCHEON, I. (2010). Stable isotopes (H-2, O-18 and C-13) in groundwaters from the northwestern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil). *Hydrogeology Journal*, 18(6): 1497-1513.

GASTMANS, D. *et al.* Controls over spatial and seasonal variations on isotopic composition of the precipitation along the central and eastern portion of Brazil. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, v. 53, n. 5, p. 518–538, 3 set. 2017.

GAT, J., MOOK, W., MEYER, H., 2000. Observed isotope effects in precipitation. *Environ. Isot. Hydrol. Cycle Princ. Appl. II Atmos. Water* 197–208.

GIMENO, L. *et al.* On the origin of continental precipitation. *Geophysical Research Letters*, v. 37, n. 13, p. 1–7, 2010.

GRÖNING, M.; LUTZ, H.O.; ROLLER-LUTZ, Z.; Kralik, M.; GOURCY, L.; PÖLTENSTEIN, L. A simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ analysis of cumulative precipitation samples. *Journal of Hydrology*, 448-449: 195-200. 2012.

IG – INSTITUDO GEOLÓGICO; IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2016. Sistema Aquífero Bauru: delimitação de perímetros de proteção de poços de abastecimento público. *Cadernos do Projeto Aquíferos, n° 6 - São Paulo. 71p.*

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1999. Diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Turvo/Grande. São Paulo: IPT, 1999. *Relatório n. 40.515.*

JOUZEL, J. *et al.* Water isotopes as tools to document oceanic sources of precipitation. *Water Resources Research*, v. 49, n. 11, p. 7469–7486, 2013.

KURITA, N. Water isotopic variability in response to mesoscale convective system over the tropical ocean. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 118, n. 18, p. 10376–10390, 2013.

ISHIZAKI, Y. *et al.* Interannual variability of H₂¹⁸O in precipitation over the Asian monsoon region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 117, n. D16, p. n/a-n/a, 27 ago. 2012.

LACOUR, J. L. *et al.* Importance of depth and intensity of convection on the isotopic composition of water vapor as seen from IASI and TES δ D observations. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 481, p. 387–394, 2018.

LEWIS, S. C.; LEGRANDE, A. N.; KELLEY, M. AND SCHMIDT, A. Water vapour source impacts on oxygen isotope variability in tropical precipitation during Heinrich events. *Climate Past Discuss*, v. 6, p. 87–133, 2010.

MARTINELLI, L.A.; OMETTO, J.P.H.B.; FERRAZ, E.S.; VICTORIA, R.L.; CAMARGO, P.B. & MOREIRA, M.Z. Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis. São Paulo, *Oficina de Textos*, 2009. 144p.

NOVELLO, V.F., CRUZ JR., F.W., KARMAN I., BURNS S.J., STIRKIS N.M., VUILLE M., CHENG H., EDWARDS R.L., SANTOS R.V., FRIGO E., BARRETO E.A.S. (2012) Multidecadal climate variability in Brazil's Nordeste during the last 3000 years based on speleothem isotope records. *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L23706, doi:10.1029/2012GL053936.

PAULA E SILVA, F. & CAVAGUTI, N. Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru - SP. *In: Revista Geociências. UNESP*. p.83-99, 1994.

RISI, C.; BONY, S.; VIMEUX, F. Influence of convective processes on the isotopic composition (δ ¹⁸O and δ D) of precipitation and water vapor in the tropics: 2. Physical interpretation of the amount effect. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 113, n. 19, p. 1–12, 2008.

RISI, C. *et al.* Role of continental recycling in intraseasonal variations of continental moisture as deduced from model simulations and water vapor isotopic measurements. *Water Resources Research*, v. 49, n. 7, p. 4136–4156, 2013.

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS, L. A. Spatial and temporal variability of stable isotope composition of precipitation over the South American continent. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, v. 24, n. 3, p. 379–390, 1995.

SÁNCHEZ-MURILLO, R. *et al.* Key drivers controlling stable isotope variations in daily precipitation of Costa Rica: Caribbean Sea versus Eastern Pacific Ocean moisture sources. *Quaternary Science Reviews*, v. 131, p. 250–261, 2016.

SANTOS, 2018. Variações na composição isotópica da precipitação na porção central do Estado de São Paulo e sua relação com sistemas climáticos. Dissertação apresentada no programa de pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente da UNESP Rio Claro, IGCE como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre, Rio Claro, 2018.

SINGH, B. P. Isotopic composition of water in precipitation due to seasonal variation and variation in intensity of rain fall at a place. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 95, p. 72–75, 2015.

SOARES, P.C.; LAMDIM, P.M.B.; FULFARO, V.J.; SOBREIRO NETO, A. F. 1980. Ensaio de caracterização do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. *Revista Brasileira de Geociências*, 10 (3): 177-185.

UNNIKRISHNAN WARRIER, C.; PRAVEEN BABU, M. A comparative study on isotopic composition of precipitation in wet tropic and semi-arid stations across southern India. *Journal of Earth System Science*, v. 120, n. 6, p. 1085– 1094, 2011.

VACHON, R. W. *et al.* Monthly precipitation isoscapes ($\delta^{18}\text{O}$) of the United States: Connections with surface temperatures, moisture source conditions, and air mass trajectories. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 115, n. 21, p. 1–17, 2010.

VUILLE, M.; WERNER, M. Stable isotopes in precipitation recording South American summer monsoon and ENSO variability: Observations and model results. *Climate Dynamics*, v. 25, n. 4, p. 401–413, 2005.

WINNICK, M. J. *et al.* Quantifying the isotopic “continental effect”. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 406, p. 123–133, 2014.

WORDEN, J. *et al.* Importance of rain evaporation and continental convection in the tropical water cycle. *Nature*, v. 445, n. 7127, p. 528–532, 2007.

ZHAI, Y. *et al.* Hydrochemical and isotopic investigation of atmospheric precipitation in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, v. 456–457, p. 202–211, 2013.