

## RESSALVA

Atendendo solicitação da autora,  
o texto completo desta dissertação  
será disponibilizado somente a partir  
de 01/10/2022.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus Rio Claro



Lia Nogueira Garpelli

**Variação espaço-temporal da composição isotópica das águas  
subterrâneas de um aquífero basáltico e sua implicação na  
construção de um modelo de fluxo na Bacia Hidrográfica do  
Paraná 3**

RIO CLARO  
2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"Júlio de Mesquita Filho"

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus Rio Claro

**LIA NOGUEIRA GARPELLI**

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA COMPOSIÇÃO  
ISOTÓPICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE UM  
AQUÍFERO BASÁLTICO E SUA IMPLICAÇÃO NA  
CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE FLUXO, NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO PARANÁ 3**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente. Área de Concentração: Recursos Hídricos, Minerais e Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans

Coorientador: Gustavo Barbosa Athayde

Rio Claro - SP

2022

G237v Garpelli, Lia Nogueira  
Variação espaço-temporal da composição isotópica das águas subterrâneas de um aquífero basáltico e sua implicação na construção de um modelo de fluxo, na Bacia Hidrográfica do Paraná 3 / Lia Nogueira Garpelli. -- Rio Claro, 2022  
98 p. : il., tabs., fotos, mapas  
  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro  
Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans  
Coorientador: Gustavo Barbosa Athayde  
  
1. Águas subterrâneas. 2. Basalto. 3. Isótopos. 4. Química da água. 5. Hidrogeologia.  
I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

LIA NOGUEIRA GARPELLI

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA COMPOSIÇÃO  
ISOTÓPICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE UM  
AQUÍFERO BASÁLTICO E SUA IMPLICAÇÃO NA  
CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE FLUXO, NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO PARANÁ 3**

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

**Prof. Dr. Didier Gastmans - Orientador**  
CEA/UNESP/Rio Claro (SP)

**Profa. Dra. Alexandra Vieira Suhogusoff**  
IGc/USP/São Paulo (SP)

**Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato**  
IPH/UFGRS/Porto Alegre (RS)

Conceito: Aprovada

Rio Claro (SP), 01 de abril de 2022.

# Agradecimentos

Mais importante do que encerrar ciclos, é agradecer por todo processo de conhecimento e todas as pessoas que compartilharam dessa caminhada. Tentarei ser breve e sem formalidades, para não ser cansativo.

Inicio agradecendo ao CNPq pela concessão de bolsa (134432/2019-3) que foi primordial para realizar a pesquisa. Ao meu orientador, Didier Gastmans que desde a graduação, esteve sempre pronto para ajudar com os quesitos acadêmicos e pessoais. Obrigada pelos ensinamentos, discussões e por escutar meus desabafos vez ou outra. Também ao meu coorientador Gustavo Athayde, que possibilitou minha participação no projeto Hidrosfera. Obrigada por confiarem em mim na realização desse projeto, espero ter atingido as suas expectativas, e se não atingi... deu ruim!

Agradeço à minha família por todo apoio. Meus pais, Patrícia e Waldir, por serem meu por seguro, por darem suporte (não só psicológico), aguentarem meu humor e estarem sempre presentes (mesmo com a distância física). Ao meu irmão Lucas, por me tirar da zona de conforto e me ensinar LaTeX, e me dar dicas acadêmicas e afins, mas não menos importante, por todas risadas, traduções espontâneas (the life snake), todos os momentos de descontração e papos sérios que sempre tivemos. Amo vocês incondicionalmente!

Agradeço as minhas famílias do coração, Larhia e Degusta, por fazerem parte da minha vida enquanto estive em Rio Claro. Agradeço a Camila de Lima, Carolina Quaggio, Vinicius Santos, Ludmila, Lucas Santarosa, Rafaela, Graziela, Marcelo, Marquinhos, Rafael Lula, Sebastian e José Claudio. Obrigada pelos campos, cafés, churrascos, e os momentos compartilhados na salinha mais animada do CEA, Go Larhia! À Degusta, em especial a Jeimy Cortéz, a Dayane Santos e Luis Rodrigo Oliveira (Mateca) pelas longas conversas filosóficas ou banais, regadas às vezes por comidas e bebidas, e as meninas pelas caminhadas e danças na sala que me ajudaram no período de quarentena. Não teria sido tão boa essa fase, sem a presença de vocês!

Aos meus amigos que se fizeram presentes de alguma forma. Obrigada Thaís Leme (Geodiva), Tatiana Sitolini (Xeninha), Jonas Zenero (Raleira), Rafael Ribeiro (Cica), Débora Targa, Melissa Komatsu (Chorito), Helder Granuzzio (Budinha), Murilo Zaine (Murilindo), Vanderlei Farias, Juliana Crosatti, Camila Regonha. Difícil sintetizar em algumas palavras o que cada um representa para mim, compartilhamos muitos momentos juntos, viagens, copos de cerveja, jantares e diversas outras ocasiões que só queria agradecer por estarem a tanto tempo em minha vida e o principal, por me aturarem, porque não deve ser fácil! haha

Enfim, obrigada a todos!

*"Não feito, não perfeito, não completo  
Não satisfeito nunca, não contente  
Não acabado, não definitivo  
Eis aqui um vivo, eis-me aqui"  
(Lenine - Vivo)*

# Resumo

Compreender as condições climáticas e as suas relações com as águas que recarregam os aquíferos é primordial para uma gestão pública mais correta. Na região da Bacia do Paraná 3, no oeste do estado do Paraná, ocorrem rochas vulcânicas que caracterizam o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), amplamente utilizado pelas companhias de abastecimento do estado. A utilização de traçadores ambientais, como isótopos de oxigênio e deutério, auxiliam na compreensão das origens das águas, e dos fluxos das águas subterrâneas em aquíferos como o SASG. O estudo consistiu em coletas trimestrais de 35 amostras de poços tubulares, uma cacimba e coletas em três locais distintos do rio Lopeí, iniciadas em abril de 2019, até janeiro de 2020, além de coletas mensais de precipitação (de maio de 2019 a dezembro de 2020). Foram realizadas análises físico-químicas, medidas *in situ*, análises hidroquímicas dos principais cátions e ânions e a caracterização isotópica de oxigênio e deutério. Os resultados obtidos permitiram a caracterização climática e isotópica da precipitação, água superficial e subterrânea. As chuvas com variação de  $-9,02$  a  $0,24\text{‰}$  ( $\delta^{18}O$ ) e de  $-57,92$  a  $16,56\text{‰}$  ( $\delta^2H$ ), apresentaram os valores mais depletados nos períodos de maior incidência de chuva que culminaram com o fim da primavera e início do verão, com característico efeito quantidade e, os valores mais enriquecidos, nos períodos de menor umidade relativa e pluviosidade, típicos do inverno. As águas superficiais variaram o  $\delta^{18}O$  de  $-5,28$  a  $-4,83\text{‰}$ , de  $-29,46$  a  $-26,39\text{‰}$  para  $\delta^2H$ , e apresentaram efeito altitude de  $0,21\text{‰}$  a cada  $100\text{ m}$  de altitude. As águas subterrâneas com variação isotópica que foi de  $-5,81$  a  $-4,30\text{‰}$  e de  $-34,06$  a  $-24,29\text{‰}$ , para  $\delta^{18}O$  e  $\delta^2H$ , respectivamente. Possuem três fácies hidroquímicas distintas, o grupo 1, do tipo  $Ca-Mg-HCO_3$ , que representa a porção intermediária entre os dois grupos, indicativo de mistura de águas; o grupo 2, do tipo  $Ca-Mg-HCO_3$  com  $NO_3$  que representa águas de porções mais rasas com recargas pluviais recentes, e valores da composição isotópica mais enriquecidos e; o grupo 3, com tipologia  $Na-HCO_3$ , que são marcadas por águas de fluxo mais profundo, com características de águas mais evoluídas hidroquimicamente e assinaturas isotópicas com valores mais depletados.

**Palavras-chave:** Aquífero Serra Geral, BP3, isótopos ambientais, fácies hidroquímicas.



# Abstract

Understanding the climatic conditions and their relationship with the waters that recharge aquifers is essential for a better water public management. In the Paraná Basin 3 region, in the west of the state of Paraná, there are volcanic rocks which characterize the Serra Geral Aquifer System (SASG), widely used by the state's water supply companies. The use of environmental tracers, such as oxygen and deuterium isotopes, assists the understanding of the origins of water and groundwater flows in aquifers such as the SASG. The study consisted of quarterly collection of 35 water well samples, a domestic water well and sampling in three different locations on the Lope River, started in April 2019 until January 2020, besides to monthly rain sampling (from May 2019 to December 2020). It was carried out physicochemical analyses, *in situ* measurements, hydrochemical analyzes of the main cations and anions, and oxygen and deuterium isotopic characterization. The results obtained allowed the climatic and isotopic characterization of precipitation. Rains with a variation from -9.02 to 0.24‰( $\delta^{18}O$ ) and from -57.92 to 16.56‰( $\delta^2H$ ), presented the most depleted values in periods of higher rainfall that culminated in late spring and early summer, with a characteristic quantity effect. During winter, the most enriched values, related to periods of lower relative humidity and rainfall. The surface water  $\delta^{18}O$  varied from -5.28 to -4.83‰,  $\delta^2H$  from -29.46 to a -26.39‰, and showed an altitude effect of 0.21‰ of every 100 m of altitude. Groundwater with isotopic variation ranging from -5.81 to -4.30‰ and from -34.06 to -24.29‰ for  $\delta^{18}O$  and  $\delta^2H$  respectively. There are three distinct hydrochemical facies, group 1, of the *Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>* type, which represents the intermediate portion between the two groups, indicative of water mixture; group 2, of the *Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>* with *NO<sub>3</sub>* type, which represents water from shallower portions with recent rain recharge, and isotopic compositions with more enriched values; group 3, with *Na-HCO<sub>3</sub>* typology, which is marked by deeper flowing waters, with more hydrochemically evolved water characteristics and isotopic signature with more depleted values.

**Keywords:** Serra Geral aquifer, BP3, environmental isotopes, hydrochemical facies.

# Lista de Ilustrações

Figura 1.1 – Mapa de localização da Bacia do Paraná 3 no Brasil e no Paraná (mapas superiores). Porção inferior com rede hidrográfica e os municípios total ou parcialmente inseridos na BP3 (polígonos em vermelho). . . . .	19
Figura 2.1 – A) Mapa Geológico simplificado da Bacia do Paraná, com destaque em azul a área de estudo, que corresponde às rochas vulcânicas básicas; B) Mapa geológico de detalhe na região da BP3, com compartimentação da Fm Serra Geral em fácies. . . . .	21
Figura 2.2 – Coluna cronoestratigráfica da Bacia do Paraná, com representação dos pacotes sedimentares. A área de estudo representa o vulcanismo da fase Gondwana III, correspondente à sigla SGL. . . . .	22
Figura 2.3 – Valores limites dos principais elementos utilizados para classificação química, proposta por Licht e Lima (2014a), Licht e Lima (2014b). . .	24
Figura 2.4 – Mapa geológico do Grupo Serra Geral no estado do Paraná, com a proposta da nova hierarquização. . . . .	25
Figura 2.5 – Características do relevo. A) Hipsometria da BP3, a partir de MDT, no setor montante, com porções mais altas (com cotas de 500 a 786 m), a região intermediária (300 a 500 m), e setor inferior, com cotas mais baixas próximo ao rio Paraná (entre 102 e 300); B) Declividade do terreno. . . . .	29
Figura 2.6 – Tipos de solos (A) e uso e ocupação da região (B). . . . .	30
Figura 2.7 – Características climáticas da BP3. A) Distribuição da temperatura média; B) Umidade relativa e; C) Evapotranspiração potencial. . . . .	31
Figura 2.8 – Mapa de isoietas com a precipitação média anual da chuva (A), e o acúmulo das precipitações por trimestre (B). Em (C), distribuição das chuvas nos municípios de Guaíra, Cascavel e Foz do Iguaçu. . . . .	32
Figura 2.9 – Balanço hídrico das estações convencionais A e B, e virtuais C e D. . .	33
Figura 2.10 – Exemplo dos isótopos de hidrogênio e oxigênio, com seus respectivos número atômico (prótons) e massa atômica (nêutrons). . . . .	34
Figura 2.11 – Relação meteórica de $^2H$ e $^{18}O$ na precipitação e variação na composição isotópica por regiões climáticas e fisiográficas. . . . .	37

Figura 2.12–Diagrama esquemático da composição isotópica e relação da GMWL, com evaporação e <i>d-excess</i> . Valores mais enriquecidos são geralmente relacionados à temperaturas mais quentes, baixa latitude e altitude e regiões litorâneas. O <i>d-excess</i> igual a 10 representa o intercepto na GMWL. Processos evaporativos geram retas de inclinação menor do que 8, e concentram-se abaixo da GMWL. . . . .	39
Figura 2.13–Composição isotópica do Oxigênio e Hidrogênio do oceano e da precipitação da chuva. Os valores $\delta$ da precipitação se tornam mais negativos ao longo das tempestades e conforme a água é removida das massas de ar.	41
Figura 3.1 – Síntese das etapas realizadas no presente trabalho. . . . .	45
Figura 3.2 – Pontos amostrados e bacias hidrográficas da área. . . . .	46
Figura 3.3 – Procedimento de amostragem. A) Amostragem de água subterrânea em poços tubulares; B) Coleta na parte superficial do rio Lopeí; C) Coletor de chuva sendo amostrado; D) Modelo de sonda multi-parâmetros utilizada para análises <i>in situ</i> ; E) Detalhe dos vasilhames utilizados para determinação da composição isotópica; F) Modelo do coletor de chuva, Palmex (2019). . . . .	48
Figura 4.1 – NCEP Reanalysis: Dados trimestrais (JFM-AMJ-JAS-OND) da quantidade de água precipitável (A a D) e da quantidade de Radiação de Onda Longa (E a H), com destaque da BP3, com triângulo vermelho nos mapas. . . . .	54
Figura 4.2 – Dados de pluviosidade, umidade relativa de Marechal Cândido Rondon e composição isotópica do ISO05 (Dados de maio de 2019 a dezembro de 2020). . . . .	56
Figura 4.3 – Comparativo da composição isotópica da chuva na BP3: os círculos vazados representam a distribuição das médias anuais retirados do OIPC, enquanto que as gotas azuis representam as chuvas da ISO05. . . . .	57
Figura 4.4 – Gráfico da distribuição das águas subterrâneas, superficiais e a LMWL da ISO05. As gotas são referentes às precipitações, os losangos à água superficial e os círculos às águas subterrâneas, e os símbolos em vermelho as respectivas médias. . . . .	59
Figura 4.5 – Gráfico da relação do $\delta^{18}O$ das águas superficiais e altitude. O ponto ISO04 representa poço cacimba. . . . .	60
Figura 4.6 – Diagrama de Piper, subdividido em quatro grupos: grupo 1 ( <i>Ca-Mg-HCO<sub>3</sub></i> ); grupo 2 ( <i>Mg-Ca-HCO<sub>3</sub></i> com <i>NO<sub>3</sub></i> ); grupo 3 ( <i>Na-HCO<sub>3</sub></i> ); grupo 4 ( <i>Na-Cl</i> e <i>Na-SO<sub>4</sub></i> ). . . . .	62
Figura 4.7 – Variação dos principais parâmetros químicos e físico-químicos das fácies hidroquímicas. <i>Boxplot</i> : cinza - grupo 1; verde-água - grupo 2; mostarda - grupo 3. . . . .	64

Figura 4.8 – Gráfico de $\delta^{18}O$ versus <i>d-excess</i> das águas subterrâneas. Observa-se por exemplo, valores de $\delta^{18}O$ mais empobrecidos e com maiores valores de <i>d-excess</i> . . . . .	66
Figura 4.9 – Isoscapes do $\delta^{18}O$ (A), $\delta^2H$ (B) e <i>d-excess</i> (C), demonstrados por períodos de coleta. . . . .	68
Figura 4.10–Distribuição da composição isotópica das águas subterrâneas por campanha. A) gráfico de dispersão dos pontos com representação em boxplot no canto direito, representando as médias das composições isotópicas das fácies hidroquímicas; B) Boxplot das fácies segmentado por campanha. . . . .	69
Figura 4.11–Matriz de correlação das análises químicas das águas subterrâneas. As tonalidades mais escuras indicam correlações fortemente positivas (azul), e negativas (vermelho). . . . .	71
Figura 4.12–Gráfico da relação da composição isotópica pela condutividade elétrica e pH, subdivididos em grupos hidroquímicos, pelos meses de coleta/análise. . . . .	71
Figura 4.13–Distribuição das pressões de $CO_2$ na BP3 e base da distribuição média dos isótopos de oxigênio. As numerações 1, 2 e 3 no mapa, correspondem as fácies hidroquímicas, enquanto os círculos ao valor do $\log PCO_2$ (quanto maior o círculo, mais confinado o sistema). . . . .	72
Figura 4.14–Mapa potenciométrico, com distribuição dos poços utilizados na interpolação dos dados (a nomenclatura referente aos pontos de coleta). As fácies hidroquímicas foram indicadas nos poços de amostragem: Ca-Mg- $HCO_3$ (círculo); Ca-Mg- $HCO_3$ com $NO_3$ (losango); Na- $HCO_3$ (triângulo). . . . .	74
Figura 4.16–Imagens de satélites das localizações dos poços que correspondem ao Grupo 2. A a D) próximo à urbanização, com poços em cotas inferiores; E a L) poços em áreas rurais, próximos à granjas, agricultura, imóveis rurais e às drenagens. . . . .	77

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Isótopos estáveis da água, sua abundância natural e razão isotópica do hidrogênio e oxigênio. . . . .	34
Tabela 2.2 – Características das propriedades físicas de $^1H_2^{16}O$ , $^2H_2^{16}O$ e $^1H_2^{18}O$ . . .	35
Tabela 3.1 – Padrões de referência do laboratório LIA/CEPAS. . . . .	49
Tabela 3.2 – Testes analíticos e limite de quantificação dos equipamentos utilizados nas análises. . . . .	50
Tabela 4.1 – Composição isotópica das amostras da chuva e dados da estação meteorológica de Marechal Cândido Rondon. . . . .	55
Tabela 4.2 – Comparativo da GMWL com as LMWLs das estações mais próximas da BP3. . . . .	57
Tabela 4.3 – Amostras de água subterrânea com DBI acima de 10%. . . . .	61
Tabela 4.4 – Resumo estatístico das principais análises químicas e físico-químicas das águas subterrâneas e cacimba, segmentados por fácies hidroquímicas (grupos 1, 2 e 3), e testes de comparação múltipla, por Kruskal-Wallis e teste <i>post-hoc</i> de Dunn. . . . .	63

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Hipóteses	17
1.2	Objetivos	17
1.3	Localização da área	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>20</b>
2.1	Caracterização da área	20
2.1.1	Geologia	20
2.1.1.1	Generalidades e evolução dos estudos da Formação Serra Geral	21
2.1.1.2	Características Estruturais	26
2.1.2	Hidrogeologia e hidrogeoquímica	26
2.1.3	Relevo e geomorfologia	28
2.1.4	Tipos de solo e seu uso e ocupação	29
2.1.5	Caracterização climática	30
2.2	Isótopos ambientais no ciclo hidrológico	32
2.2.1	Precipitação	37
2.3	Estudo da composição isotópica em aquíferos basálticos	40
2.3.1	A composição isotópica no Sistema Aquífero Serra Geral	42
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>45</b>
3.1	Levantamento bibliográfico e composição do banco de dados	45
3.2	Amostragem e análise laboratorial	46
3.2.1	Procedimentos de coleta e determinação da composição isotópica	47
3.2.2	Procedimentos de coleta das amostras para análise hidroquímica	49
3.3	Análise climática e isotópica	50
3.4	Definição do fluxo subterrâneo	51
3.5	Processamento e compilação dos dados	52
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>53</b>
4.1	Precipitação Pluviométrica	53
4.1.1	Caracterização do regime de chuva	53
4.1.2	Composição Isotópica da Precipitação	55
4.2	Águas superficiais	59
4.3	Águas subterrâneas	61
4.3.1	Principais assinaturas hidroquímicas das águas subterrâneas	61
4.3.2	Composição isotópica das águas subterrâneas	66
4.3.3	Correlação dos parâmetros hidroquímicos e isotópicos	69

4.4	Modelo conceitual do fluxo . . . . .	72
4.4.1	Fluxo subterrâneo . . . . .	72
4.4.2	Modelo Conceitual . . . . .	73
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	80
	Referências . . . . .	82
	ANEXOS . . . . .	93
A	POÇOS INATIVOS - MONITORAMENTO DE NÍVEL D'ÁGUA . . . . .	93
B	LOCALIZAÇÃO E DADOS DOS PONTOS AMOSTRADOS . . . . .	94
C	ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA . . . . .	95
D	ANÁLISE HIDROQUÍMICA . . . . .	96
E	ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICAS - <i>in situ</i> . . . . .	97

## 1 INTRODUÇÃO

Compreender os caminhos percorridos pela água e sua relação com as condições climáticas são informações básicas para avaliar as taxas de renovação e susceptibilidade à contaminação de um aquífero. Estudos sobre a qualidade da água subterrânea podem ser aperfeiçoados sabendo-se a sua fonte de recarga.

Entretanto, os aquíferos vulcânicos apresentam particularidades que torna complexa a compreensão da movimentação das águas somente pela hidrogeologia tradicional. A comunicação dos diferentes fluxos de água subterrânea nesses ambientes ocorre por discontinuidades das rochas marcadas por estruturas primárias (*i.e.* amígdalas e vesículas, juntas de resfriamento) e secundárias (como falhas e fraturas). Assim a água flui devido aos contrastes de permeabilidade entre fraturas e ao redor da matriz da rocha, por ascensão de águas de aquíferos adjacentes, ou pelo aporte da chuva e dos rios, através do movimento gravitacional (TWEED et al., 2005).

Aquíferos fraturados provenientes de rochas vulcânicas como os basaltos são mundialmente importantes. A potencialidade agrícola dos solos formados do intemperismo dos basaltos, propiciam a intensa atividade agrícola e a concentração populacional. O sistema aquífero desse tipo de ambiente tem sido utilizado como fonte de abastecimento para atividades antrópicas, devido à qualidade de suas águas e à facilidade na construção dos poços tubulares. Aquíferos vulcânicos em áreas com extensa agricultura foram alvos de diversos estudos, como nos Estados Unidos (BROWN et al., 2011; LARSON et al., 2000), Israel (DAFNY et al., 2003), Etiópia (ALEMAYEHU et al., 2011), Austrália (LOCSEY; COX, 2003).

A vasta distribuição das rochas vulcânicas pertencentes à Formação Serra Geral demonstram também, a importância do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no Brasil. De dimensão regional, o aquífero ultrapassa a fronteira brasileira e representa em muitos estados, a principal fonte de abastecimento para consumo humano e para agroindústria (GASTMANS et al., 2010; LASTORIA et al., 2006; ROSA FILHO et al., 2006). Somente no estado do Paraná, onde está localizada a área de estudo, cerca de 57% do total de poços da Companhia de Abastecimento do Estado (SANEPAR) são provenientes do SASG (ATHAYDE; MÜLLER-ATHAYDE, 2015).

Por ser um ambiente anisotrópico e de difícil interpretação do fluxo da água com os métodos tradicionais, os isótopos estáveis têm sido aplicados há muito tempo para identificar fontes de recarga e movimentação da água. A utilização dos isótopos de H e O, para compreensão do fluxo subterrâneo, complementa informações hidrogeológicas levantadas através de técnicas combinadas com hidrodinâmica, hidroquímica, geofísica entre outros (JASECHKO, 2019).



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compreensão dos movimentos das águas subterrâneas do SASG na BP3 foi executada com a combinação de técnicas relacionadas à análise climática local, aos isótopos estáveis de O e H, hidroquímica e hidrodinâmica, que possibilitaram confirmar as hipóteses apresentadas no trabalho.

Os padrões climáticos estabelecidos com dados de radiação de ondas longas de satélite (OLR), isótopos estáveis e dados meteorológicos locais, indicaram os períodos mais propícios para a recarga no sistema aquífero na BP3. A caracterização climática da área, relacionada as maiores atividades convectivas no Brasil, em conjunto com a assinatura isotópica da chuva, revelam que uma maior contribuição das chuvas estão associadas aos valores isotópicos de  $\delta^{18}O$  e  $\delta^2H$  mais depletados.

Assim, foi identificado dois regimes climáticos na região. No fim da primavera até o verão, a ZCAS traz águas provenientes da bacia amazônica até a região Sul do país. As fortes chuvas provocam a depleção dos isótopos, com o efeito quantidade. No outono e inverno, sem a ocorrência da ZCAS, o fluxo de umidade na área é originado pelo Oceano Atlântico, que resulta em chuvas convectivas em atmosfera relativamente mais seca, com composição isotópica mais enriquecida. Chuvas de maio, com valores mais negativos, estariam relacionadas à massa Polar da Antártica.

A técnica dos traçadores naturais (os isótopos ambientais de  $^{18}O$  e  $^2H$ ), forneceram de forma combinada com a hidroquímica, importantes informações sobre os diferentes padrões de circulação das águas. Além disso, a integração de ferramentas distintas auxiliou na interpretação das interferências antrópicas no sistema.

As águas superficiais do rio Lopeí apresentam efeito altitude mesmo em pouca variação das cotas altimétricas. Os valores de *d-excess* apresentam no verão valores mais reduzidos, relacionados à evaporação. Quanto aos isótopos de O e H, seus valores são similares às das águas subterrâneas, com médias próximas que indicam uma conectividade entre os diferentes sistemas.

A análise multi-parâmetros das águas subterrâneas, gerou um modelo conceitual dos principais padrões de fluxo do aquífero SASG na BP3, com distinção das águas em fácies hidroquímicas. Dois grupos (Grupo 2 e 3) apresentam valores opostos em uma série de análises, enquanto o Grupo 1 define valores intermediários e indica mistura entre os diferentes fluxos. O Grupo 2, de tipologia *Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>* com *NO<sub>3</sub>*, representa águas de fluxo raso, com recargas diretas pela chuva com forte influência antrópica, identificadas por pHs mais ácidos, maior concentração de nitrato e assinatura isotópica mais enriquecida. O Grupo 3, do tipo *Na-HCO<sub>3</sub>*, são definidas como águas de fluxo regional, com características de águas mais evoluídas hidroquimicamente e assinatura isotópica com os valores mais

depletados.

As variações espaço-temporais da composição isotópica na BP3, não é fortemente evidenciada entre os quatro períodos de observação. Espacialmente, entretanto, nota-se que a porção sul da área tem maior aporte de fluxo regional, com águas mais depletadas isotopicamente, enquanto que a porção norte, e próximo ao lago Itaipu apresentam um maior aporte do fluxo local, com valores mais enriquecidos de  $\delta^{18}O$  e  $\delta^2H$ .

O presente trabalho atingiu os objetivos propostos para a realização da dissertação. Entretanto, devido à pandemia do Covid-19, algumas etapas de trabalho tiveram que ser suspensas e com isso, ideias para adicionar ao trabalho não foram implementadas. Recomenda-se como parte complementar, dar continuidades nas amostragens das águas de chuva, água superficial e subterrânea. Análises adicionais de isótopos ambientais e hidroquímica podem aprimorar os resultados já apresentados e definir um modelo conceitual mais robusto.

Sugere-se também, a datação das águas subterrâneas. Avaliar as idades das águas subterrâneas são determinantes para conferir dinâmicas de circulação, cenários de disponibilidades hídricas e definir critérios para a gestão dos recursos hídricos. No tocante ao trabalho, poderia ser comprovada a evolução hidroquímica das águas do SASG ou, embora desconsiderado nesse trabalho, identificar se existem poços com mistura do SAG.

## Referências

- ABOUBAKER, M.; JALLUDIN, M.; RAZACK, M. Hydrochemistry of a complex volcano-sedimentary aquifer using major ions and environmental isotopes data: Dalha basalts aquifer, southwest of Republic of Djibouti. *Environmental Earth Sciences*, v. 70, n. 7, p. 3335–3349, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2398-8>>.
- AGGARWAL, P. K.; ROMATSCHKE, U.; ARAGUAS-ARAGUAS, L.; BELACHEW, D.; LONGSTAFFE, F. J.; BERG, P.; SCHUMACHER, C.; FUNK, A. Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. *Nature Geoscience*, Nature Publishing Group, v. 9, n. 8, p. 624–629, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1038/ngeo2739>>.
- ALEMAYEHU, T.; LEIS, A.; EISENHAUER, A.; DIETZEL, M. Multi-proxy approach (2H/H, 18O/16O, 13C/12C and 87Sr/86Sr) for the evolution of carbonate-rich groundwater in basalt dominated aquifer of Axum area, northern Ethiopia. *Chemie der Erde*, Elsevier GmbH., v. 71, n. 2, p. 177–187, 2011. ISSN 00092819. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemer.2011.02.007>>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. d. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <<http://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. *HIDROWEB - Séries Históricas de Estações*. 2018. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- ARAVENA, R. *Informe Final de Isotópia del Sistema Acuífero Guarani Informe Técnico -Consórcio Guarani*. Montevideo, 2008.
- ATHAYDE, G. B.; MÜLLER-ATHAYDE, C.; Rosa Filho, E. F.; LICHT, O. A. B. Contribuição ao estudo da conectividade entre os Sistemas Aquíferos Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG) no Estado do Paraná, Brasil. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 71, n. 1, p. 36–45, 2014. Disponível em: <<http://doi.org/10.5380/geo.v71i0.31790>>.
- ATHAYDE, G. B.; MÜLLER-ATHAYDE, C. d. V. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná. *Águas Subterrâneas*, v. 29, n. 3, p. 315–333, 2015. Disponível em: <<http://doi.org/10.14295/ras.v29i3.28406>>.
- ATHAYDE, G. B.; MÜLLER-ATHAYDE, C. d. V.; ROSA FILHO, E. F. Compartimentação hidroestrutural e aptidões químicas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42, n. SUPPL.1, p. 167–185, 2012.
- ATHAYDE, G. B.; MÜLLER, C. D. V.; FRANCISCO, E.; CHEMAS, E.; Rosa Filho, E. F. da; HINDI, E. C. Estudos sobre os tipos das águas do Aquífero Serra Geral, no município de Marechal Cândido Rondon, PR. *Águas Subterrâneas*, v. 21, n. 1, p. 111–122, 2007.

BARBOSA, N. d. S.; BARBOSA, N. d. S.; SALLES, L. d. Q. Métodos de avaliação de isótopos estáveis ( $\delta^2H$  e  $\delta^{18}O$ ) na hidrologia: uma revisão. *Terrae Didactica*, v. 14, n. 2, p. 157–172, jun 2018. Disponível em: <<http://doi.org/10.20396/td.v14i2.8649972>>.

BERTRAND, G.; CELLE-JEANTON, H.; HUNEAU, F.; LOOCK, S.; RENAC, C. Identification of different groundwater flowpaths within volcanic aquifers using natural tracers for the evaluation of the influence of lava flows morphology (Argnat basin, Chaîne des Puys, France). *Journal of Hydrology*, Elsevier B.V., v. 391, n. 3-4, p. 223–234, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.021>>.

BITTENCOURT, A. V. L. *Sólidos Hidrotransportados na bacia hidrográfica do rio Ivaí: Aplicação de balanços hidrogeoquímicos na compreensão da evolução dos processos da dinâmica externa*. 201 p. Tese (Tese de doutorado) — Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.

BITTENCOURT, A. V. L.; Rosa Filho, E. F.; HINDI, E. C.; Buchmann Filho, A. C. A influência dos basaltos e de misturas com águas de aquíferos sotopostos nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na bacia do rio Piquiri, Paraná – BR. *Águas Subterrâneas*, v. 1, n. 17, p. 67–76, 2003. Disponível em: <<http://doi.org/10.14295/ras.v17i1.1313>>.

BORTOLIN, T. A. *Padrões hidroquímicos e isotópicos do sistema aquífero serra geral do Município de Carlos Barbosa, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul*. 116 p. Tese (Mestrado em Engenharia) — Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/98154>>.

BORTOLIN, T. A.; ANTONIO, P.; REGINATO, R.; FRANCIÉLE, . .; CARLOS, S.; ATHAYDE, G. B.; MARCOS, . .; LEÃO, I.; LUIS, . .; MANCINI, H.; SCHNEIDER, V. E. Seasonal variations of the isotopic ratios for oxygen and deuterium in the groundwater of the Serra Geral Aquifer System in the northeast region of the state of Rio Grande do Sul, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 79, p. 507, 2020. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s12665-020-09247-1>>.

BOWEN, G. J. *The online isotopes in precipitation calculator, version OIPC3.1 (4/2017)*. 2017. Disponível em: <<http://www.waterisotopes.org>>. Acesso em: 16 mai. 2021.

BOWEN, G. J.; REVENAUGH, J. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water Resources Research*, American Geophysical Union, v. 39, n. 10, p. 1299, oct 2003. ISSN 00431397. Disponível em: <<http://doi.org/10.1029/2003WR002086>>.

BOWEN, G. J.; WASSENAAR, L. I.; HOBSON, K. A. Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wildlife forensics. *Oecologia*, Springer, v. 143, n. 3, p. 337–348, apr 2005. ISSN 00298549. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00442-004-1813-y>>.

BROWN, K. B.; MCINTOSH, J. C.; RADEMACHER, L. K.; LOHSE, K. A. Impacts of agricultural irrigation recharge on groundwater quality in a basalt aquifer system (Washington, USA): a multi-tracer approach. *Hydrogeology Journal*, Springer, v. 19, n. 5, p. 1039–1051, aug 2011. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s10040-011-0736-z>>.

- BUCHMANN FILHO, A. C.; Rosa Filho, E. F. da; HINDI, E. C.; BITTENCOURT, A. V.; NADAL, C. A.; FERREIRA, F. J. F. Aspectos da química da água subterrânea da Formação Serra Geral no âmbito da bacia hidrográfica do rio Piquiri – PR. In: *XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Florianópolis: Águas Subterrâneas, 2002. p. 1–17.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. *Bioestatística: princípios e aplicações*. Porto Alegre: [s.n.], 2003. 255 p. ISBN 978-85-363-0092-4.
- CARVALHO, S. M.; STIPP, N. A. F. Contribuição ao estudo do balanço hídrico no estado do Paraná: uma proposta de classificação qualitativa. *GEOGRAFIA (Londrina)*, v. 13, n. 1, p. 57–72, 2004.
- CHANG, H. K.; GONÇALVES, R. D.; AGGARWAL, P. K.; STRADIOTO, M. R.; HESPANHOL, E. C.; STURCHIO, N. C.; ROMATSCHKE, U.; ARAGUAS, L. J. Groundwater isotope ratios reflect convective and stratiform (paleo)precipitation fractions in Brazil. *Journal of Hydrology*, Elsevier B.V., v. 585, n. 124801, p. 1–9, 2020. ISSN 00221694. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124801>>.
- CLARK, I.; FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1997. 328 p. ISBN 1-56670-249-6.
- COOK, P. G.; HERCZEG, A. L. *Environmental tracers in subsurface hydrology*. Springer Science & Business Media, 2000. ISBN 978-1-4615-4557-6. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/978-1-4615-4557-6>>.
- COPLIN, T. B.; HERCZEG, A. L.; BARNES, C. Isotope Engineering—Using Stable Isotopes of the Water Molecule to Solve Practical Problems. In: *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*. Springer US, 2000. p. 79–110. Disponível em: <[http://doi.org/10.1007/978-1-4615-4557-6\\_3](http://doi.org/10.1007/978-1-4615-4557-6_3)>.
- CPRM. *Serviço Geológico do Brasil. Atlas Pluviométrico do Brasil: Mapa de Isoietas de precipitações médias trimestrais*. 2011. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique///Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>. Acesso em: 02 jul. 2021.
- CPRM; MINEROPAR. *Serviço Geológico do Brasil e Minerais do Paraná. Geologia e Recursos minerais do Sudoeste do Estado do Paraná. Texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais, escala 1:200.000 [Wildner, Brito Licht, Arioli - Coord.]*. Curitiba, PR, 2006. 95 p.
- CRAIG, H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, v. 133, n. 3465, p. 1702–1703, 1961. Disponível em: <<http://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>>.
- CRAIG, H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science*, v. 133, n. 3467, p. 1833–1834, 1961. Disponível em: <<http://doi.org/10.1126/science.133.3467.1833>>.
- CRAIG, H.; GORDON, L. I.; HORIBE, Y. Isotopic exchange effects in the evaporation of water: 1. Low-temperature experimental results. *Journal of Geophysical Research*, Wiley Online Library, v. 68, n. 17, p. 5079–5087, 1963. Disponível em: <<http://doi.org/10.1029/JZ068i017p05079>>.

- DAFNY, E.; BURG, A.; GVIRTZMAN, H. Deduction of groundwater flow regime in a basaltic aquifer using geochemical and isotopic data: The Golan Heights, Israel case study. *Journal of Hydrology*, v. 330, n. 3-4, p. 506–524, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.002>>.
- DAFNY, E.; GVIRTZMAN, H.; BURG, A.; FLEISCHER, L. The hydrogeology of the Golan basalt aquifer, Israel. *Israel Journal of Earth Sciences*, v. 52, n. 3-4, p. 139–153, 2003. ISSN 00212164. Disponível em: <<http://doi.org/10.1560/MXXA-CPJB-8LJ9-R7FM>>.
- DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, v. 16, n. 4, p. 436–468, 1964. Disponível em: <<http://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>>.
- DUNN, O. J. Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, v. 6, n. 3, p. 241–252, 1964. Disponível em: <<http://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>>.
- EDMUNDS, W. M.; CARRILLO-RIVERA, J. J.; CARDONA, A. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. *Journal of Hydrology*, v. 258, n. 1-4, p. 1–24, 2002. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00461-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00461-9)>.
- EMBRAPA. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10<sup>a</sup> reunião Técnica de Levantamento de Solos*. Rio de Janeiro, RJ, 1979. 83 p.
- EMBRAPA. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Mapa de Solos do Estado do Paraná, escala 1:250.000: legenda / [Silvio Barge Bhering et al.]*. Rio de Janeiro, RJ, 2007. 75 p.
- FERNANDES, A. J.; MALDANER, C.; WAHNFRIED, I.; FERREIRA, L. M. R.; PRESSINOTTI, M. M. N.; VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; HIRATA, R. Modelo Conceitual Preliminar de circulação de água subterrânea no Aquífero Serra Geral, Ribeirão Preto, SP. In: *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Curitiba: Águas Subterrâneas, 2006. p. 16.
- FRAGA, C. G. *Introdução ao Zoneamento do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná*. 125 p. Tese (Mestrado em Geologia Geral e de Aplicação) — Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.
- FREITAS, M. A. de. *Hidrogeoquímica e isotopia de águas com alta salinidade do Sistema Aquífero Serra Geral na região do Alto Rio Uruguai, Brasil*. 195 p. Tese (Doutorado em Geociências) — Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/150915/001009735.pdf?sequence=1>>.
- FROELICH, K.; GIBSON, J.; AGGARWAL, P. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance. In: *IAEA-CSP-13/P*. [S.l.]: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2002. p. 23.
- GASTMANS, D.; CHANG, H. K.; HUTCHEON, I. Stable isotopes (<sup>2</sup>H, <sup>18</sup>O and <sup>13</sup>C) in groundwaters from the northwestern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil). *Hydrogeology Journal 2010 18:6*, Springer, v. 18, n. 6, p. 1497–1513, jun 2010. ISSN 1435-0157. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s10040-010-0612-2>>.

GASTMANS, D.; GARPELLI, L. N.; SANTOS, V. dos; LIMA, C. de; QUAGGIO, C. S.; SANTAROSA, L. V.; KIRCHHEIM, R. E. Contribuição dos Isótopos Estáveis da Água (H e O) no Conhecimento dos Aquíferos Brasileiros: Estado da Arte e Perspectivas Futuras. *Derbyana*, v. 42, n. e734, 2021. Disponível em: <<http://doi.org/10.14295/derb.v42.734>>.

GASTMANS, D.; HUTCHEON, I.; MENEGÁRIO, A. A.; CHANG, H. K. Geochemical evolution of groundwater in a basaltic aquifer based on chemical and stable isotopic data: Case study from the Northeastern portion of Serra Geral Aquifer, São Paulo state (Brazil). *Journal of Hydrology*, v. 535, p. 598–611, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.016>>.

GASTMANS, D.; MENEGÁRIO, A. A.; HUTCHEON, I. Stable isotopes, carbon-14 and hydrochemical composition from a basaltic aquifer in São Paulo State, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 76, n. 4, 2017a. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s12665-017-6468-1>>.

GASTMANS, D.; MENEGÁRIO, A. A.; MOURA, C. C. Hidrogeoquímica das Águas Subterrâneas do Aquífero Serra Geral na Porção Centro Sul do Estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, v. 27, n. 3, p. 27–44, 2013. Disponível em: <<http://doi.org/10.14295/ras.v27i3.27391>>.

GASTMANS, D.; MIRA, A.; KIRCHHEIM, R.; VIVES, L.; RODRÍGUEZ, L.; VEROSLAVSKY, G. Hypothesis of Groundwater Flow through Geological Structures in Guarani Aquifer System (GAS) using Chemical and Isotopic Data. *Procedia Earth and Planetary Science*, v. 17, p. 136–139, 2017b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.030>>.

GIAMPÁ, C. E. Q.; SOUZA, J. C. de. Potencial Aqu[ifero dos Basaltos da Formação Serra Geral no estado de São Paulo. In: *Anais do 2º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. [S.l.]: Águas Subterrâneas, 1982. p. 3–15.

GONFIANTINI, R.; FRÖHLICH, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; ROZANSKI, K. Isotopes in Groundwater Hydrology. In: *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. [s.n.], 1998. cap. 7, p. 203–246. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/B978-0-444-81546-0.50014-8>>.

GRÖNING, M.; LUTZ, H. O. O.; ROLLER-LUTZ, Z.; KRALIK, M.; GOURCY, L.; PÖLTENSTEIN, L. A simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for  $\delta^{18}O$  and  $\delta^2H$  analysis of cumulative precipitation samples. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 448-449, p. 195–200, jul 2012. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.041>>.

HEDDINGHAUS, T. R.; KRUEGER, A. F. Annual and interannual variations in outgoing longwave radiation over the tropics. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society, Boston MA, USA, v. 109, n. 6, p. 1208 – 1218, 1981.

HINDI, E. C. *Hidroquímica e Hidrotermalismo do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Paraná*. 153 p. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) — Dpto. de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

HIRATA, R.; GESICKI, A.; SRACEK, O.; BERTOLO, R.; GIANNINI, P. C.; ARAVENA, R. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2011.03.006>>.

- HOEFS, J. *Stable Isotope Geochemistry*. 8. ed. Berlin: Springer International Publishing, 2018. v. 43. 662 p. ISBN 978-3-319-78527-1. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/978-3-319-78527-1>>.
- IAEA; USGS. *International Atomic Energy Agency; United States Geological Survey. LIMS for Lasers 2015: Laboratory Information Management System for Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Water Samples by Laser Spectrometry User Manual (Revision v 2.1.1 LIMS for Lasers v10.092)*. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/rcm.7372>>.
- IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010*. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=microda>>. Acesso em: 15 mai. 2018.
- INMET. *Instituto Nacional de Meteorologia: Sistema de Suporte à Decisão Agropecuária - Balanço Hídrico*. s.a. Disponível em: <<http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/balancoHidrico>>. Acesso em: 20 out. 2020.
- ITAIPU BINACIONAL. *Reservatório*. 2010. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/energia/reservatorio>>. Acesso em: 01 jun. 2020.
- ITAIPU BINACIONAL. *Rio Paraná*. 2010. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/energia/rio-parana>>. Acesso em: 01 jun. 2020.
- JASECHKO, S. Global isotope hydrogeology - Review. *Reviews of Geophysics*, American Geophysical Union, v. 57, p. 835–965, 2019. Disponível em: <<http://doi.org/10.1029/2018RG000627>>.
- JASECHKO, S.; TAYLOR, R. G. Intensive rainfall recharges tropical groundwaters. *Environmental Research Letters*, Institute of Physics Publishing, v. 10, n. 12, p. 124015, dec 2015. ISSN 17489326. Disponível em: <<http://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124015>>.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J. et al. The ncep/ncar 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, v. 77, n. 3, p. 437–472, 1996. Disponível em: <[http://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)>.
- KONG, Y.; PANG, Z. A positive altitude gradient of isotopes in the precipitation over the Tianshan Mountains: Effects of moisture recycling and sub-cloud evaporation. *Journal of Hydrology*, Elsevier B.V., v. 542, p. 222–230, nov 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.007>>.
- KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, v. 47, n. 260, p. 583–621, 1952. Disponível em: <<http://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>>.
- LANGMUIR, D. *Aqueous environmental geochemistry / Donald Langmuir*. New Jersey: [s.n.], 1997. 602 p. ISBN 0-02-367412-1. Disponível em: <<https://ezp.lib.unimelb.edu.au/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=catalog00006a&AN=melb.b2238091&s>>.
- LARSON, K. R.; KELLER, C. K.; LARSON, P. B.; ALLEN-KING, R. M. Water Resource Implications of  $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$  distributions in a Basalt Aquifer System. *Groundwater*, v. 38, n. 6, p. 947–953, 2000.



- LASTORIA, G.; SINELLI, O.; CHANG, H. K.; HUTCHEON, I.; Paranhos Filho, A. C.; GASTMANS, D. Hidrogeologia da Formação Serra Geral no estado de Mato Grosso do Sul. *Águas Subterrâneas*, v. 20, n. 1, p. 139–150, 2006. Disponível em: <<http://doi.org/10.14295/ras.v20i1.9727>>.
- LICHT, O. A. B. A revised chemo-chrono-stratigraphic 4-D model for the extrusive rocks of the Paraná Igneous Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Elsevier, v. 355, p. 32–54, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.12.003>>.
- LICHT, O. A. B.; ARIOLI, E. E. *Mapa Geológico do Grupo Serra Geral no Estado do Paraná - Nota Explicativa*. Curitiba, PR, 2018. 316 p.
- LICHT, O. A. B.; LIMA, E. F. d. A associação dos gaps de Si-Zr-Ti-P na subdivisão das rochas da Província Ígnea do Paraná. In: *Anais do XLVII Congresso Brasileiro de Geologia*. Salvador, BA: Sociedade Brasileira de Geologia, 2014.
- LICHT, O. A. B.; LIMA, E. F. d. Estratigrafia das rochas básicas e intermediárias da porção central da Província Ígnea do Paraná - geoquímica, morfologia dos derrames e texturas. In: *Anais do XLVII Congresso Brasileiro de Geologia*. Salvador, BA: Sociedade Brasileira de Geologia, 2014.
- LOCSEY, K. L.; COX, M. E. Statistical and hydrochemical methods to compare basalt- and basement rock-hosted groundwaters: Atherton Tablelands, north-eastern Australia. *Environmental Geology*, v. 43, n. 6, p. 698–713, 2003. ISSN 09430105. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s00254-002-0667-z>>.
- MANASSES, F.; ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; BITTENCOURT, A. V. L. Estudo hidrogeológico da Formação Serra Geral na região sudoeste do estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 64, n. 64-65, p. 59–67, 2011. Disponível em: <<http://doi.org/10.5380/geo.v65i0.13558>>.
- MANASSES, F.; ROSA FILHO, E. F. da; BITTENCOURT, A. V. L. Estudo Hidrogeoquímico da Formação Serra Geral na região Sudoeste do estado do Paraná. *Águas Subterrâneas*, v. 21, n. 2, p. 49–58, 2007.
- MARCHINA, C.; ZUECCO, G.; CHIOGNA, G.; BIANCHINI, G.; CARTURAN, L.; COMITI, F.; ENGEL, M.; NATALI, C.; BORGA, M.; PENNA, D. Alternative methods to determine the  $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$  relationship: An application to different water types. *Journal of Hydrology*, Elsevier B.V., v. 587, aug 2020. ISSN 00221694. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124951>>.
- MARQUES, L. S.; ERNESTO. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. [S.l.: s.n.], 2004. cap. XV, p. 245–263.
- MELATI, M. D.; FAN, F. M.; ATHAYDE, G. B. Estudo das interações entre as águas superficiais e subterrâneas na bacia do Paraná utilizando modelagem hidrológica e separação do escoamento de base. In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (Ed.). *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Florianópolis: [s.n.], 2017. p. 1–8.
- MILANI, E. J.; MELO, J. H. G. D.; SOUZA, P. A. D.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007.

- MINARDI, P. S. P.; VELÁSQUEZ, L.; BOMTEMPO, V. L.; COTA, S.; RODRIGUES, P. Técnicas Isotópicas Aplicadas em Estudos Hidrogeológicos no Município de Araguari, MG. In: *XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–11.
- MINEROPAR; UFPR. *Minerais do Paraná; Universidade Federal do Paraná. Atlas Geomorfológico Do Estado Do Paraná - Escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000 [Coord. Oka-Fiori, C. & Santos, L.J.C.]*. Curitiba: [s.n.], 2006. 63 p. Disponível em: <<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00298818/document>>.
- MOOK, W. G. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications - Volume I*. [S.l.]: International Atomic Energy Agency, IAEA and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO, 2000. v. 1. 1–164 p.
- NANNI, A. S.; ROISENBERG, A.; HOLLANDA HELENA BEZERRA MAIA, M.; MARIMON, P. C.; VIERO, A. P.; SCHEIBE, L. F. Fluoride in the Serra Geral Aquifer System: Source Evaluation Using Stable Isotopes and Principal Component Analysis. *Journal of Geological Research*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2013, 2013. Disponível em: <<http://doi.org/10.1155/2013/309638>>.
- NASA; METI; AIST; Japan Spacesystems. *ASTER Global Digital Elevation Model. 2009, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC*. 2009. Disponível em: <<http://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv002/{\#}citac>>. Acesso em: 06 mar. 2020.
- NERY, G. G.; MACARI, R. Estudo do Comportamento da Perfilagem Ótica e Geofísica na Formação Serra Geral. In: *Anais XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–20.
- NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. d. S.; PINTO, L. F. D. *Atlas Climático do Estado do Paraná*. Londrina, PR: [s.n.], 2019. Disponível em: <<http://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Atlas-Climatico>>.
- PAIVA, M. L. de. *Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani: relação com a oceanografia*. 77 p. Tese (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) — Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2014. Disponível em: <<http://sistemas.furg.br/sistemas/sab/arquivos/bdtd/0000011375.pdf>>.
- PALMEX. *Palmex Rain Sampler RS1*. 2019. Disponível em: <<http://www.rainsampler.com/portfolio-page/rain-sampler-rs1/>>.
- PARKHURST, D. L.; APPELO, C. A. J. *User's guide to Phreeqc (version 2) - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. Denver, Colorado: U.S. Geological Survey, 1999. 312 p. Disponível em: <<http://doi.org/10.3133/tm6A43>>.
- PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Buletin of Volcanology*, v. 55, p. 119–139, 1992.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union*, v. 4, n. 2, p. 439–473, 2007. Disponível em: <<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00298818/document>>.

PORTELA FILHO, C. V.; FERREIRA, F. J. F.; Rosa Filho, E. F.; ROSTIROLLA, S. P. Compartimentação magnética-estrutural do Sistema Aquífero Serra Geral e sua conectividade com o Sistema Aquífero Guarani na região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 3, p. 369–381, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.2005353369381>>.

PUTMAN, A. L.; FIORELLA, R. P.; BOWEN, G. J.; CAI, Z. A Global Perspective on Local Meteoric Water Lines: Meta-analytic insight into Fundamental Controls and Practical Constraints. *Water Resources Research*, Blackwell Publishing Ltd, v. 55, n. 8, p. 6896–6910, 2019. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019WR025181>>.

QUAGGIO, C. S.; GASTMANS, D.; KIRCHHEIM, R.; BATISTA, L. V. Variações na composição das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral em território brasileiro e sua relação com anomalias hidrogeoquímicas. *Águas Subterrâneas*, v. 32, n. 3, p. 283–294, 2018. Disponível em: <<http://doi.org/10.14295/ras.v32i3.29085>>.

REBOUÇAS, A. d. C. Potencialidade hidrogeológicas dos Basaltos da Bacia Sedimentar do Paraná, no Brasil. In: *Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia*. Recife, PE: [s.n.], 1978. v. 6, p. 2963–2978.

REGINATO, P. A. R. As águas subterrâneas associadas aos aquíferos da Formação Serra Geral e sua caracterização hidroquímica. In: *Anais do Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo*. São Paulo: ABAS, 2009. p. 11. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22010/14371>>.

REGINATO, P. A. R.; FINOTTI, A. R.; MICHELON, C. Comportamento hidrogeológico de poços tubulares associados às estruturas primárias das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. In: *Anais do I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste*. Gramado: Águas Subterrâneas, 2007. p. 1–9.

ROCHA, A. S. da; BADE, M. R. *Geografia da Bacia Hidrográfica do Paraná 3: fragilidades e potencialidades socioambientais*. 1. ed. Jundiaí, SP: Editora In House, 2018. 314 p. ISBN 978-85-7899-591-1.

ROSA FILHO, E. F. d.; BITTENCOURT, A. V. L.; HINDI, E. C.; BITTENCOURT, A. Estudo sobre os tipos das águas e as condicionantes estruturais do Sistema Aquífero Guarani no Extremo Oeste do Estado do Paraná. *Águas Subterrâneas*, v. 20, n. 2, p. 39–48, 2006. Disponível em: <<http://doi.org/10.14295/ras.v20i2.11431>>.

ROSMAN, K.; TAYLOR, P. Commission on Atomic Weights and Isotopic Abundances - Isotopic Compositions of the Elements 1997 (Technical Report ). *Pure & Appl. Chem.*, v. 70, n. 1, p. 217–235, 1998.

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. In: SWART, P.; LOHWAN, K.; MCKENZIE, J.; SAVIN, S. (Ed.). *Climate Change in Continental Isotopic Record*. Washington, DC: American Geophysical Union, 1993. p. 1–36. Disponível em: <<http://doi.org/10.1029/gm078p0001>>.

RStudio Team. *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Boston, MA, 2019. Disponível em: <<http://www.rstudio.com/>>.

SAHRA. Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Area. *Isotopes & Hydrology: Water Isotopes*, 2005. Disponível em: <<http://web.sahra.arizona.edu/programs/isotopes/oxygen.html>>.

SANTOS, V. dos; GASTMANS, D.; SÁNCHEZ-MURILLO, R.; Felipe Gozzo, L.; Vianna Batista, L.; Lilla Manzione, R.; MARTINEZ, J. Regional atmospheric dynamics govern interannual and seasonal stable isotope composition in southeastern Brazil. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 579, 2019. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124136>>.

SIEBERT, C.; ROSENTHAL, E.; MÖLLER, P.; RÖDIGER, T.; MEILER, M. The hydrochemical identification of groundwater flowing to the Bet She'an-Harod multiaquifer system (Lower Jordan Valley) by rare earth elements, yttrium, stable isotopes (H, O) and Tritium. *Applied Geochemistry*, Elsevier Ltd, v. 27, n. 3, p. 703–714, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.11.011>>.

SIMLER, R. *Software Diagrammes - logiciel d'hydrochimie multilangage en distribution libre*. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, Université d'Avignon, 2020. Disponível em: <[http://www.lha.univ-avignon.fr/Fichiers/Setup\\_Diagrammes.exe](http://www.lha.univ-avignon.fr/Fichiers/Setup_Diagrammes.exe)>.

SRACEK, O.; HIRATA, R. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the state of São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 6, p. 643–655, 2002. ISSN 14312174. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s10040-002-0222-8>>.

SUDERHSA; SEMA. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental e Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos. Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas Subterrâneas. *Governo do Paraná*, Produto 1., n. Parte B, p. 141, 2010.

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, n. 5-6, p. 771–786, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10040-004-0348-y>>.

UNIOESTE; ITAIPU BINACIONAL; AGUASPARANÁ; COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ 3. *Plano da Bacia Hidrográfica do Paraná 3 - Uso e Ocupação do Solo [Armin Feiden Coord. Geral]*. Cascavel, PR, 2014. 73 p.

UREY, H. C. The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, Royal Society of Chemistry, p. 562–581, 1947. Disponível em: <<http://doi.org/10.1039/JR9470000562>>.

VUILLE, M.; WERNER, M. Stable isotopes in precipitation recording South American summer monsoon and ENSO variability: observations and model results. *Climate Dynamics*, v. 25, p. 401–413, 2005. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s00382-005-0049-9>>.

WAHNFRIED, I. *Modelo conceitual de fluxo do Aquífero Serra Geral e do Sistema Aquífero Guarani na região de Ribeirão Preto, SP*. 122 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) — Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.