

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 26/06/2019.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Campus de Rio Claro

GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

VINÍCIUS DOS SANTOS

VARIAÇÕES NA COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DA
PRECIPITAÇÃO NA PORÇÃO CENTRAL DO ESTADO DE
SÃO PAULO E SUA RELAÇÃO COM SISTEMAS
CLIMÁTICOS

Rio Claro - SP

2018

VINÍCIUS DOS SANTOS

VARIAÇÕES NA COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DA
PRECIPITAÇÃO NA PORÇÃO CENTRAL DO ESTADO DE
SÃO PAULO E SUA RELAÇÃO COM SISTEMAS
CLIMÁTICOS

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Geociências e médio ambiente.

Orientador: Didier Gastmans

Rio Claro – SP
2018

543.31 Santos, Vinícius dos
S237v Variações na composição isotópica da precipitação na
porção central do Estado de São Paulo e sua relação com
sistemas climáticos / Vinícius dos Santos. - Rio Claro, 2018
95 f. : il., figs., gráfs., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Didier Gastmans

1. Água – Composição. 2. Isótopos da precipitação. 3.
Precipitação. 4. Isótopos estáveis. 5. Mudanças climáticas. I.
Título.

ERRATA

SANTOS, V. **Variações na composição isotópica da precipitação na porção central do Estado de São Paulo e sua relação com sistemas climáticos.** 2018, 95 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, campus Rio Claro, Rio Claro, 2018.

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
Agradecimentos	22	Agradeço, também, a FAPESP (processo n°: 2016/18735-7), pela concessão de bolsa de mestrado	Agradeço ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo n°2016/18735-7 (FAPESP), pela concessão de bolsa de mestrado

VINÍCIUS DOS SANTOS

VARIAÇÕES NA COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DA PRECIPITAÇÃO
NA PORÇÃO CENTRAL DO ESTADO DE SÃO PAULO E SUA
RELAÇÃO COM SISTEMAS CLIMÁTICOS

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas
do Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Geociências e médio
ambiente.

Comissão examinadora

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

Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata
IGc/USP/São Paulo (SP)

Prof. Dr. Luiz Felipe Gozzo
FC/UNESP/Bauru (SP)

Resultado: APROVADO

Rio Claro, 26 de Junho de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Didier, por todos ensinamentos, conversas, lições, risadas e por ser um orientador que dá a devida atenção a seus alunos, proporcionando a realização de trabalhos incríveis, como este, obrigado pela parceria de anos.

Aos meus pais, Valdeci e Sonia, pela educação, incentivo, exemplo e por acreditar sempre em mim. A minha mãe Leildes, irmãs Juliana, Katia e Bruna, por toda atenção e zelo. A minha sobrinha mais linda, Manuela, por sempre me fazer sorrir nas visitas e descanso durante a realização deste trabalho. Ao meu cunhado Lucas, grande pessoa.

Aos meus companheiros de trabalho do Laboratório de Recursos Hídricos e Isótopos Ambientais (LARHIA), Ludmila, Lucas, Sebastian, Carol e José Claudio, por todas as conversas, sugestões, aprendizado, cafés, zueiras e risadas durante o dia a dia na sala de estudos mais chique dessa Unesp.

Aos meus amigos, Alexandre (Belo), grande irmão que a vida me deu. As amigas e parceiras Bianca e Karen, por todas conversas e motivação, e a Ana pelos convites a comilanças. Aos amigos queridos Japa e Isquimo, pelas intensas aventuras durante o início do mestrado. Aos moradores da Rep. Então, Aryel, Ivan, Luis, Juliano, Ruan, Brasa e Murilo, pela convivência, risadas e zueiras nestes intensos e loucos anos de mestrado.

A todos os funcionários do Centro de Estudos Ambientais (CEA), especialmente ao Marcos, grande amigo e parceiro de campo, ao professor Silvio Govone, por todos os ensinamentos em estatística, e aos funcionários e estagiários da estação meteorológica do CEAPLA, pela paciência e longos e-mails trocados para obtenção de dados utilizados neste trabalho.

Agradeço, também, a FAPESP (processo nº: 2016/18735-7), pela concessão de bolsa de mestrado e ao IPmet de Bauru, pelo fornecimento de informações meteorológicas e longos e-mail trocados pelo Hermes e Georgia. Desta mesma casa, agradeço ao Luís, pela participação na banca e importantes dicas meteorológicas.

RESUMO

Isótopos estáveis de hidrogênio ($^1\text{H}/^2\text{H}$) e oxigênio ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$) constituem excelentes traçadores da movimentação da molécula da água ao longo do ciclo hidrológico, sendo utilizado como ferramentas auxiliares na interpretação dos controles climáticos sobre a precipitação. Em áreas tropicais, fatores climáticos regionais e locais se contrapõe, como responsáveis pela variabilidade da composição isotópica da precipitação. Com base em processos envolvidos nas transformações isotópicas sofridas pela água ao longo da sua movimentação no ciclo hidrológico em áreas continentais, essa dissertação de mestrado teve como objetivo avaliar e compreender quais fenômenos climáticos são responsáveis por governar a composição isotópica da precipitação na porção central do estado de São Paulo. Os resultados demonstraram que a disponibilidade de umidade na atmosfera, aliados a processos de recirculação de vapor ao longo do deslocamento de massas de ar que geram chuva na região estudada, governam a variabilidade da composição isotópica da precipitação, como demonstrado pelas retas meteóricas locais ($\delta^2\text{H} = 8.15 \cdot \delta^{18}\text{O} + 14.25$), valores de *d*-excess geralmente superiores a 11‰ e pelo efeito de sazonalidade, que se caracteriza por diferenças na composição isotópica da precipitação na estação seca, caracterizada por chuvas enriquecidas com valores de $\delta^{18}\text{O} = >-4\text{‰}$, e na estação chuvosa por chuvas empobrecidas com valores de $\delta^{18}\text{O} = <-4\text{‰}$. Esse efeito de sazonalidade foi igualmente observado durante os eventos El Niños 1997-98 e 2014-16, e ao longo do monitoramento realizado entre 2013-17. Os processos de recirculação de vapor são modulados pela atuação de sistemas atmosféricos ao longo das estações do ano, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante o verão, quando há grande disponibilidade de umidade na atmosfera e ocorre a formação de chuvas de larga escala que empobrecem a composição isotópica da precipitação, e as incursões de Frentes Frias (FF) junto a movimentos de advecção em uma atmosfera com menor disponibilidade de umidade, durante o inverno, com a ocorrência de chuvas convectivas que enriquecem a composição isotópica da precipitação. Assim, o trabalho fornece informações e conhecimentos que poderão ser aplicados em modelos hidrológicos futuros, face aos efeitos das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico.

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

ABSTRACT

Stable isotopes of hydrogen ($^1\text{H}/^2\text{H}$) and oxygen ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$) constitute excellent tracers of water movement through the hydrological cycle, and they have been used as an important tool to interpret climate controls on precipitation. In tropical areas, regional and local climatic factors are faced as responsible for the variability observed on isotopic composition of precipitation. Based on the processes involved in the water isotopic transformations along its path through the hydrological cycle in continental areas, the main purpose of this master thesis was to evaluate and understand which climatic factors are responsible for controlling the isotopic composition of the precipitation in the center of the state of São Paulo. The results demonstrate that the availability of moisture in the atmosphere, combined with moisture recirculation processes along the displacement of air masses that generate rain in the studied region, were the main key drivers responsible for the variability observed in isotopic composition of the precipitation, as demonstrated by the local meteoric lines ($\delta^2\text{H} = 8.15 \cdot \delta^{18}\text{O} + 14.25$), values of d -excess up to 11‰, and the seasonal effect, that is characterized by differences between more enriched precipitation during the dry season, characterized by values of $\delta^{18}\text{O} = >-4\text{‰}$, and more depleted precipitation during wet season, with values of $\delta^{18}\text{O} = <-4\text{‰}$. Seasonal effects were observed during the events El Niños 1997-98 and 2014-16, as well as during the period of precipitation monitoring (2013-2017). The moisture recirculation processes are modulated by the action of atmospheric systems over the seasons, such as South Atlantic Convergence Zone (SACZ), when there is large availability of moisture in the atmosphere and the occurrence of large scale rainfall that depleted the isotopic composition of precipitation, and Cold Frontier (CF) incursions together with advection movements in an atmosphere with lower moisture availability, during winter, with the occurrence of convective rains that enrich the precipitation isotopic composition. Thus, the work provides information and knowledge that can be applied in future hydrological models, given the effects of climate change on the hydrological cycle.

Keywords: Precipitation, stable isotopes and climate change.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS	13
INDICE DE ABREVIATÖES.....	14
1. Introdução.....	15
2. Objetivo geral.....	17
2.1. Objetivos específicos.....	17
3. Isótopos ambientais na precipitação como ferramenta para compreensão climática	18
3.1. Isótopos ambientais.....	18
3.2. Composição isotópica da precipitação em áreas tropicais	22
3.3. Sistemas atmosféricos que governam a precipitação no sudeste do Brasil	25
4. Metodologia	30
4.1. Amostragem e determinação do conteúdo de isótopos.....	30
4.2. Aquisição de dados meteorológicos.....	30
4.3. Determinação das trajetórias do modelo HYSPLIT	31
4.4. Análise estatística.....	32
5. Referências bibliográficas	34
6. Resultados.....	39
6.1. Controles climáticos sobre a variabilidade na composição isotópica da precipitação em Rio Claro (SP) 39	
6.1.1. Introdução	39
6.1.2. Características climáticas de Rio Claro (SP).....	40
6.1.3. Metodologia	41
6.1.4. Resultados e discussão.....	42
6.1.5. Conclusões	60
6.1.6. Referências bibliográficas.....	61

6.2. How different ENSO events act on the isotopic composition of precipitation in the southeast region of Brazil.....	64
6.2.1. Introduction	64
6.2.2. Climatic controls of study area.....	65
6.2.3. Methods	67
6.2.4. Interannual variability isotopic composition in the precipitation.....	69
6.2.5. Seasonal variability in the isotopic composition of precipitation.....	74
6.2.6. Conclusions	80
6.2.7. References	81
7. Considerações finais	85
8. ANEXO A – DADOS ISOTÓPICOS E METEOROLÓGICOS MENS AIS.....	87
9. ANEXO B – DADOS ISOTÓPICOS DIÁRIOS	89
10. ANEXO B - DADOS METEOROLÓGICOS DIÁRIOS.....	92

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 3. Isótopos ambientais na precipitação como ferramenta para compreensão climática

Figura 1 - Distribuição da composição isotópica da precipitação no globo. Fonte: <http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/GNIP%20brochure.pdf> 21

Figura 2 - Efeito de continentalidade. Fonte: Elaborado pelo autor..... 21

Figura 3 - Sistemas atmosféricos geradores da precipitação no Sudeste do Brasil: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Alta da Bolívia (AB), Jatos de Baixos Níveis (JBN), Baixa do Chaco (BC), Zona de Convergência Intertropical (ZCAS), Frentes Frias (FF) e Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Precipitação anual (mm) obtida junto ao Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (CMAP), disponível em: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/global_precip/html/wpage.cmap.html 26

Capítulo 6. Controles climáticos sobre a variabilidade na composição isotópica da precipitação na região sudeste do Brasil

Figura 1 – Variação mensal dos parâmetros meteorológicos ao longo do período de monitoramento da composição isotópica da precipitação: [a] precipitação mensal (coluna azul)/média móvel (linha tracejada em azul) e média histórica mensal (coluna em laranja)/média móvel histórica (linha tracejada em laranja); [b] média da umidade relativa do ar (linha azul) e umidade relativa histórica mensal (linha em cinza); [c] temperatura média mensal (linha vermelha) e média histórica da temperatura média mensal (linha em amarelo). 43

Figura 2 – Box-plot resultados isotópicos mensais ilustrando as médias, medianas, valores máximos e mínimos: [a] $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$, [b] $\delta^2\text{H}\text{‰}$ e [c] $d\text{-excess}$ 44

Figura 3 - Variação anual da composição isotópica da precipitação: [a] reta meteórica local (RML) entre os anos de 2013-16 em comparação com a GMWL e [b] box-plot anual para os valores de $\delta^{18}\text{O}$ 45

Figura 4 - Variação sazonal: com valores da média mensal de precipitação (coluna em azul) e média ponderada pela precipitação para os valores de $\delta^{18}\text{O}$ (linha em vermelho). 46

Figura 5 - Box-plots para os valores diários de $\delta^{18}\text{O}$ [a], $\delta^2\text{H}$ [b] e $d\text{-excess}$ [c]. 47

Figura 6 – Histograma representando os 3 tipos de chuvas classificados com base nos valores da média aritmética e desvio padrão do $\delta^{18}\text{O}$: chuvas empobrecidas (<-7.96), chuvas médias (-7.96 e -0.54) e chuvas enriquecidas (>-0.54). 48

Figura 7 – Distribuição temporal da composição isotópica da precipitação diária, valores de $\delta^{18}\text{O}$ e precipitação diária (mm) (a), $\delta^2\text{H}$ (b) e $d\text{-excess}$ (c). Relação entre $\delta^{18}\text{O}$ e temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$) (d). 48

Figura 8 – Combinação entre as retas meteóricas locais, diária $\delta^2\text{H} = 8.15 \cdot \delta^{18}\text{O} + 14.25$ (linha tracejada

em azul) e mensal $\delta^2\text{H} = 8.34 \cdot \delta^{18}\text{O} + 15.59$ (linha preta), demonstrando qualidade das amostras coletadas 49

Figura 9 – Mapas das (back) trajetórias do modelo HYSPLIT: (a) chuvas empobrecidas ($\delta^{18}\text{O} < -7.96$), (b) chuvas médias ($\delta^{18}\text{O}$ entre -7.96 e -0.54) e (c) chuvas enriquecidas ($\delta^{18}\text{O} > -0.54$) 54

Figura 10 – Mapas de umidade específica (kg kg^{-1}), água precipitável (kg m^{-2}) e taxa de precipitação (mm day^{-1}), ambos no nível de 850 hPa, campo de velocidade vertical (Pa s^{-1}) a 500 hPa e campo de vento horizontal a 850 hPa e 200 hPa (m s^{-1}), obtido junto ao NCEP/NCAR Reanalysis NOAA. (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>) para amostras de chuvas empobrecidas, valores de $\delta^{18}\text{O} < -7.96$ 55

Figura 13 – Modelo de regressão linear múltipla para as variáveis [a] $\delta^{18}\text{O}$ e [b] $\delta^2\text{H}$ medidas (linhas em azul) e estimados (linha em laranja). [c] $\delta^{18}\text{O}$ medido versus $\delta^{18}\text{O}$ estimado, correlação $r = 0.54$, e [d] $\delta^2\text{H}$ medido versus estimado, correlação $r = 0.56$ 59

Capítulo 7. How different ENSO events act on the isotopic composition of precipitation in the southeast region of Brazil

Figure 1. Main regional climatic figures that operated over Brazilian territory: During summer the main figures are the ITCZ – Intertropical Convergence Zone, the presence of pressure zones, such as the BH - Bolivian High and Chaco Low (CL), moisture transport in the Amazon by LLJ – Low-Level Jet, formation SACZ – Southern Atlantic Convergence Zone and SASH - Southern Atlantic Subtropical High over central Atlantic Ocean. During the winter mainly the occurrence of CF – Cold Front, associated to the presence of SASH closer the continent, inhibiting the formation of rains. In the left, location of precipitation sampling I for stable isotope determinations. Annual precipitations (in mm) were obtained from the dataset of Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (CMAP), available at: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/global_precip/html/wpage.cmap.html 66

Figure 2 – Climatic and isotopic variability during evaluated ENSO events: ONI Index for ENSO 1 (a) and ENSO 2 (b); Amount precipitation in blue bars observed during ENSO 1 (Piracicaba) (c) and ENSO 2 (d), in orange bars historical mean precipitation; Variability $\delta^{18}\text{O}$ (e) and d-excess (g) to Bragança Paulista (blue line), Campinas (winter line), Piracicaba (orange line), Santa M. da Serra (yellow) and Rio Claro (figure f and g, green line); Histogram of $\delta^{18}\text{O}$ to ENSO 1 (j) and ENSO 2 (i) 70

Figure 3 – Box-plot represented variations, percentile and arithmetic mean of the ^{18}O , ^2H and d-excess from complete distribution for all locations: (1) Bragança Paulista, (2) Campinas, (3) Piracicaba, (4) Santa Maria da Serra and (5) Rio Claro. 71

Figure 4. Dual isotope diagram for $\delta^{18}\text{O}$ (‰) and $\delta^2\text{H}$ (‰). Diamonds for samples representing ENSO 1 (Bragança Paulista, Campinas, Piracicaba, and Santa Maria da Serra), and black squares ENSO 2 (Rio Claro). Gray line dotted represents the Global Meteoric Water Line ($\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$). Regressions equations are presented in the upper left side of the figure. 73

Figure 5 – Histograms for Piracicaba (ENSO 1) and Rio Claro (ENSO 2) represented distribution of enriched and depleted values during different seasons.	75
Figure 6 – Atmospheric back-trajectories for all rain hours from ENSO 97-98 and ENSO 2014-16. Trajectories were calculated for 240 hours preceding rainfall at the study site in Piracicaba and Rio Claro using the HYSPLIT model.	76
Figure 7 – Average 850 hPa: Specific humidity (kg kg^{-1}), precipitation rate (mm day^{-1}), precipitable water (kg m^{-2}) and 500 hPa vertical velocity field (Pa s^{-1}). Image provided by the NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado from their Web site at http://www.esrl.noaa.gov/psd/ . Dry season ENSO 97-98. Fonte: U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory, Physical Sciences Division. http://www.esrl.noaa.gov/	78
Figure 8 – Similar to Fig. 6. Wet season ENSO events.	79

LISTA DE TABELAS

Capítulo 3. Isótopos ambientais na precipitação como ferramenta para compreensão climática

Tabela 1. Isótopos estáveis da água..... 18

Capítulo 6. Controles climáticos sobre a variabilidade na composição isotópica da precipitação na região sudeste do Brasil

Tabela 1 - Matriz de Correlação dos resultados isotópicos e meteorológicos..... 51

Tabela 2 – Principais resultados da regressão Stepwise 58

Capítulo 7. How different ENSO events act on the isotopic composition of precipitation in the southeast region of Brazil

Table 1 – Sampling points general information 67

Table 2. Statistical evaluation of Isotopic composition of precipitation. 72

Table 3 – Statistical correlation between monthly ONI index and average isotopic composition of precipitation 75

INDICE DE ABREVIACES

AB – Alta da Bolvia

ASAS – Alta Subtropical do Atlntico Sul

BC - Baixa do Chaco

CEA – Centro de Estudos Ambientais

CEAPLA – Centro de Análise e Planejamento Ambiental

CCM – Complexo Convectivo de Mesoescala

CBS - Cumulonimbus

ENOS - El Niño-Oscilao Sul

FF – Frente Fria

FQ – Frente Quente

GMWL – Global Meteoric Water Line

GNIP – Global Network of Isotopes in Precipitation

HYSPLIT – Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory

IAEA – International Atomic Energy Agency

INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais

JBN – Jatos de Baixos Níveis

JST – Jato Subtropical

NE – Nordeste

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

NW – Noroeste

VSMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water

ZCAS - Zona de Convergcia do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergcia Intertropical

WMO - World Meteorological Organization

1. INTRODUÇÃO

O debate acerca das modificações antrópicas provocadas na natureza tem sido acirrado, principalmente quando se trata das condições de vida do planeta e das consequências para as gerações futuras. Dentre as grandes preocupações, a dinâmica do clima em escala global, tem sido o objeto de estudo de cientistas nas áreas de climatologia, hidrologia, meteorologia, dentre outras.

Com o objetivo de se compreender as consequências das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico, os isótopos estáveis presentes na precipitação têm sido utilizados como ferramenta em estudos climáticos e hidrometeorológicos. Sua aplicação está relacionada às mudanças no estado físico (líquido, sólido e vapor) da molécula de água, constituída por isótopos de oxigênio ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$) e hidrogênio ($^1\text{H}/^2\text{H}$), decorrentes do processo de fracionamento isotópico, e que podem ser diretamente relacionados à variações de parâmetros climáticos, como temperatura, quantidade de precipitação, origem das massas de vapor, tipos de chuva, dentre outras, proporcionando dessa forma uma associação entre as condições climáticas e os isótopos da precipitação (KOHN & WELKER, 2005; KURITA et al., 2009; SODERBERG et al., 2013; AGGARWAL et al., 2016; GASTMANS et al., 2017).

Desta forma, desde 1961, um programa de monitoramento global e mensal da composição isotópica da precipitação, denominado de GNIP (*Global Network of Isotopes in Precipitation*), vêm sendo coordenado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA – *International Atomic Energy Agency*), em parceria com a Organização Meteorológica Mundial (WMO – *World Meteorological Organization*). O GNIP fornece um banco de dados aberto e disponível no site da IAEA http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html), com o conteúdo dos isótopos ambientais (oxigênio (^{18}O), deutério (^2H) e trítio (^3H)) e de dados meteorológicos (precipitação, temperatura, umidade relativa, dentre outras) de diversas estações espalhadas pelo globo.

Atualmente com o advento da técnica da Espectrometria de Absorção à Laser (*Laser Absorption Spectroscopy*), a capacidade de determinação de um número maior de amostras, faz com que novas fronteiras se abram para a utilização de isótopos estáveis em estudos hidrológicos e climáticos (WASSENAAR; COPLEN; AGGARWAL, 2014).

No Brasil, os primeiros estudos sobre a composição isotópica de águas naturais iniciaram-se na década de 1960, a partir de um projeto internacional patrocinado pela IAEA e WMO. Foram instaladas, estações coletoras de precipitação nas cidades de Cuiabá – MT, Natal – RN, Rio de Janeiro – RJ, Uaupês -AM, Belém – PA, Brasília – DF, Fortaleza – CE, Manaus – AM, Porto Alegre – RS, Porto Velho – ES e Salvador – BA. O monitoramento da precipitação em território brasileiro foi realizado até meados da década de 1980, quando houve interrupção do funcionamento da maior parte das estações.

Apenas no ano de 2008, o programa de monitoramento isotópico da precipitação foi retomado, com a instalação de uma estação de coleta da precipitação, incorporada pela GNIP, no Centro e Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, localizado na cidade de Belo Horizonte (MG), e mais recentemente nas dependências do Centro de Estudos Ambientais (CEA), em Rio Claro (SP), com a coleta mensal de isótopos da precipitação em 2013 e diária em 2014.

A lacuna temporal de investigações dos mecanismos responsáveis pelas mudanças climáticas no Brasil, no que tange a compreensão das relações isotópicas, contribui para a pequena participação de pesquisadores brasileiros em pesquisas internacionais sobre o tema.

Em áreas tropicais, ao contrário de áreas temperadas em que a composição isotópica da precipitação está diretamente relacionada a variações na temperatura, a relação existente entre os parâmetros climáticos e a composição isotópica da precipitação, não é uma questão completamente solucionada dentro da comunidade científica, sendo motivo de muitas controvérsias. Alguns autores associam as variações a aspectos de dinâmica climática local (CELLE-JEANTON *et al.*, 2004; VUILLE & WERNER, 2005; LEE *et al.*, 2011), enquanto a outros processos de escala regional (RISI; BONY; VIMEUX, 2008; KURITA *et al.*, 2009; VIMEUX *et al.*, 2011).

A principal premissa de interpretações é que uma mudança no $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação representa diretamente uma alteração em um ou mais parâmetros incluindo a variabilidade da composição isotópica da precipitação e a contribuição de vapor proveniente de fluxos superficiais (HENDRICKS *et al.*, 2000), aspectos relacionados à própria dinâmica convectiva (KURITA *et al.*, 2009; LACOUR *et al.*, 2018; LAWRENCE; GEDZELMAN, 2003), processos de pós condensação (LEE, J. *et al.*, 2011; RISI; BONY; VIMEUX, 2008), origens das fontes de vapor (SODERBERG *et al.*, 2013); e tipos de nuvens durante a formação da chuva (AGGARWAL *et al.*, 2016). Recentemente, $\delta^{18}\text{O}$ tem sido utilizado em modelos de circulação geral da atmosfera (VUILLE, 2003; VUILLE; WERNER, 2005; BROWN; SIMMONDS; NOONE, 2006; RISI *et al.*, 2013; LACOUR *et al.*, 2018), como parâmetro de calibração, principalmente por ser uma ferramenta que ajuda a compreender os processos de mudanças no estado da água, fator importantíssimo na modelagem dos processos entre o sistema superfície-atmosfera.

Nesse sentido, a avaliação da composição isotópica da precipitação na cidade de Rio Claro-SP contribui para o debate acerca dos processos que governam a variabilidade isotópica em áreas tropicais, gerando informações e conhecimento que podem ser utilizados na compreensão dos processos climáticos.

O presente trabalho é apresentado em duas partes: i) introdução, os objetivos e objetivos específicos do projeto, revisão bibliográfica e metodologias empregadas; ii) os resultados e discussões serão apresentados em dois capítulos. O primeiro capítulo apresenta os resultados do monitoramento da composição isotópica da precipitação em Rio Claro (Capítulo 6.1), enquanto o outro (Capítulo 6.2) trata-se da comparação entre a composição isotópica da precipitação durante diferentes eventos de El Niño em estações de monitoramento no estado de São Paulo.

6.2.7. References

- Aggarwal, P.K., Alduchov, O.A., Froehlich, K.O., Araguas-Araguas, L.J., Sturchio, N.C., Kurita, N., 2012. Stable isotopes in global precipitation: A unified interpretation based on atmospheric moisture residence time. *Geophys. Res. Lett.* 39, 1–6. <https://doi.org/10.1029/2012GL051937>
- Aggarwal, P.K., Romatschke, U., Araguas-Araguas, L., Belachew, D., Longstaffe, F.J., Berg, P., Schumacher, C., Funk, A., 2016. Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. *Nat. Geosci.* 9, 624–629. <https://doi.org/10.1038/ngeo2739>
- Allison, E.H., Bassett, H.R., 2017. Climate change in the oceans: Human impacts and responses. *Science* (80-.). 350, 778–782.
- Beckage, B., Gross, L.J., Lacasse, K., Carr, E., Metcalf, S.S., Winter, J.M., Howe, P.D., Fefferman, N., Franck, T., Zia, A., Kinzig, A., Hoffman, F.M., 2018. Linking models of human behaviour and climate alters projected climate change. *Nat. Clim. Chang.* 8, 79–84. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0031-7>
- Brondízio, Eduardo S.; Lima, Ana C. B.; Scharamski, Sam; Adams, C., 2016. Social and health dimensions of climate change in the Amazon [WWW Document]. *Ann. Hum. Biol.* <https://doi.org/doi.org/10.1080/03014460.2016.1193222>
- Calzadilla, A., Rehdanz, K., Betts, R., Falloon, P., Wiltshire, A., Tol, R.S.J., Rehdanz, K., Betts, R., Falloon, P., Wiltshire, A., Tol, R.S.J., 2013. Climate change impacts on global agriculture. *Clim. Change* 120, 357–374. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0822-4>
- Celle-Jeanton, H., Gonfiantini, R., Travi, Y., Sol, B., 2004. Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation: Application of the Rayleigh model to selected rainfalls in Southern France. *J. Hydrol.* 289, 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.11.017>
- Clark, I., Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press, Boca Raton, p. 343.
- Cobb, K.M., Charles, C.D., Cheng, H., Edwards, R.L., 2003. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. *Nature* 424, 271–276. <https://doi.org/10.1038/nature01779>
- Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Jenne, R., Joseph, D., 1996. The NCEP NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 77, 437–472.
- D’Agostino, R.B., Belanger, A., D’Agostino, R.B.J., 1990. A Suggestion for Using Powerful and Informative Test of Normality. *Am. Stat.* 44, 316–321.
- Dansgaard, W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16, 436–468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>
- Deng, K., Yang, S., Lian, E., Li, C., Yang, C., Wei, H., 2016. Three Gorges Dam alters the Changjiang (Yangtze) river water cycle in the dry seasons: Evidence from H-O isotopes. *Sci. Total Environ.* 562, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.213>
- Driscoll, R., Elliot, M., Russon, T., Welsh, K., Yokoyama, Y., Tudhope, A., 2014. ENSO reconstructions over the past 60 ka using giant clams (*Tridacna* sp.) from Papua New Guinea. *Geophys. Res. Lett.* 41, 6819–6825. <https://doi.org/10.1002/2014GL061446>
- Fan, J., Meng, J., Ashkenazy, Y., Havlin, S., Schellnhuber, H.J., 2017. Network analysis reveals strongly localized impacts of El Niño. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 7543–7548. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701214114>

Garreaud, R.D., Aceituno, P., 2007. Atmospheric Circulation and Climatic Variability. *Phys. Geogr. South Am.* 45–59.

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., Drumond, A., Nieto, R., Trigo, R.M., Stohl, A., 2010. On the origin of continental precipitation. *Geophys. Res. Lett.* 37, 1–7. <https://doi.org/10.1029/2010GL043712>

Grimm, A.M., 2011. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stoch. Env. Res. Risk Assess.* 25, 537–554. <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0420-1>

Grimm, A.M., 2003. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: Regional processes versus remote influences. *J. Clim.* 16, 263–280. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0263:TENIOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0263:TENIOT>2.0.CO;2)

GRONING, M.; LUTZ, H. O.; ROLLER, L.; KRALIK, M.; GOURCY, L.; POLTENSTEIN, L., 2002. Simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for and analysis of cumulative precipitation samples. *Journal of Hydrology*, 448-449, 195-200.

Hendricks, M.B., DePaolo, D.J., Cohen, R.C., 2000. Space and time variation of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation: Can paleotemperature be estimated from ice cores? *Global Biogeochem. Cycles* 14, 851–861. <https://doi.org/10.1029/1999GB001198>

Hilden, M., Huuki, H., Kivisaari, V., Kopsakangas-Savolainen, M., 2018. The importance of transnational impacts of climate change in a power market. *Energy Policy* 115, 418–425. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.039>

Huang, B., Thorne, P.W., Banzon, V.F., Boyer, T., Chepurin, G., Lawrimore, J.H., Menne, M.J., Smith, T.M., Vose, R.S., Zhang, H.M., 2017. Extended reconstructed Sea surface temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons. *J. Clim.* 30, 8179–8205. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0836.1>

Jouzel, J., Delaygue, G., Landais, A., Masson-Delmotte, V., Risi, C., Vimeux, F., 2013. Water isotopes as tools to document oceanic sources of precipitation. *Water Resour. Res.* 49, 7469–7486. <https://doi.org/10.1002/2013WR013508>

Kurita, N., Ichiyanagi, K., Matsumoto, J., Yamanaka, M.D., Ohata, T., 2009. The relationship between the isotopic content of precipitation and the precipitation amount in tropical regions. *J. Geochemical Explor.* 102, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.03.002>

Lacour, J.L., Risi, C., Worden, J., Clerbaux, C., Coheur, P.F., 2018. Importance of depth and intensity of convection on the isotopic composition of water vapor as seen from IASI and TES δD observations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 481, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.048>

Landais, A., Risi, C., Bony, S., Vimeux, F., Descroix, L., Falourd, S., Bouygues, A., 2010. Combined measurements of ^{17}O excess and d-excess in African monsoon precipitation: Implications for evaluating convective parameterizations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 298, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.07.033>

Lawrence, J.R., Gedzelman, S.D., Dexheimer, D., Cho, H.K., Carrie, G.D., Gasparini, R., Anderson, C.R., Bowman, K.P., Biggerstaff, M.I., 2004. Stable isotopic composition of water vapor in the tropics. *J. Geophys. Res.* 109, 16. <https://doi.org/10.1029/2003jd004046>

Lee, J., Worden, J., Noone, D., Bowman, K., Eldering, A., Legrande, A., Li, J.L.F., Schmidt, G., Sodemann, H.,

2011. Relating tropical ocean clouds to moist processes using water vapor isotope measurements. *Atmos. Chem. Phys.* 11, 741–752. <https://doi.org/10.5194/acp-11-741-2011>
- Lewis, S.C., 2010. Water vapour source impacts during Heinrich events, 87–133.
- Marengo, J.A., Cunha, A.P., Alves, L.M., Ciências, C. De, Instituto, T., Pesquisas, N. De, 2016. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Rev. Climanalise Edição Com*, 1–6.
- Mcphaden, M.J., 1999. Genesis and Evolution of the 1997-98 El Niño. *Sci. Compass* 283, 950–955.
- Muller, C.L., Baker, A., Fairchild, I.J., Kidd, C., Boomer, I., 2015. Intra-Event Trends in Stable Isotopes: Exploring Midlatitude Precipitation Using a Vertically Pointing Micro Rain Radar. *J. Hydrometeorol.* 16, 194–213. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0038.1>
- Otto, F.E.L., 2016. Extreme events: The art of attribution. *Nat. Clim. Chang.* 6, 342–343. <https://doi.org/10.1038/nclimate2971>
- Palmer, L., 2014. The next water cycle. *Nat. Clim. Chang.* 4, 949–950. <https://doi.org/10.1038/nclimate2420>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Peterson, T.C., Stott, P.A., Herring, S., 2012. Explaining extreme events of 2011 from a climate perspective. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 1041–1067. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00021.1>
- Pezzi, L.P., Cavalcanti, I.F. a., 2001. The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: a numerical study. *Clim. Dyn.* 17, 205–212. <https://doi.org/10.1007/s003820000104>
- Rao, J., Ren, R., 2017. Parallel comparison of the 1982/83, 1997/98 and 2015/16 super El Niños and their effects on the extratropical stratosphere. *Adv. Atmos. Sci.* 34, 1121–1133. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-6260-x>
- Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R.P. da, Ambrizzi, T., 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Rev. Bras. Meteorol.* 25, 185–204. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>
- Risi, C., Bony, S., Vimeux, F., 2008. Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of precipitation and water vapor in the tropics: 2. Physical interpretation of the amount effect. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2008JD009943>
- Risi, C., Noone, D., Frankenberg, C., Worden, J., 2013. Role of continental recycling in intraseasonal variations of continental moisture as deduced from model simulations and water vapor isotopic measurements. *Water Resour. Res.* 49, 4136–4156. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20312>
- Rodrigues, R.R., Haarsma, R.J., Campos, E.J.D., Ambrizzi, T., 2011. The impacts of inter-El Niño variability on the tropical Atlantic and northeast Brazil climate. *J. Clim.* 24, 3402–3422. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3983.1>
- Ropelewski, C.F., Halpert, M.S., 1987. Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Weather Rev.* [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2)
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L., Gonfiantini, R., 1993. Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation 1–36. <https://doi.org/10.1029/GM078p0001>
- Sánchez-Murillo, R., Durán-Quesada, A.M., Birkel, C., Esquivel-Hernández, G., Boll, J., 2017. Tropical precipitation

anomalies and d-excess evolution during El Niño 2014-16. *Hydrol. Process.* 31, 956–967. <https://doi.org/10.1002/hyp.11088>

Saulo, a. C., Nicolini, M., Chou, S.C., 2000. Model characterization of the South American low-level flow during the 1997-1998 spring-summer season. *Clim. Dyn.* 16, 867–881. <https://doi.org/10.1007/s003820000085>

Silva, G.A.M., Ambrizzi, T., Marengo, J.A., 2009. Observational evidences on the modulation of the South American Low Level Jet east of the Andes according the ENSO variability. *Ann. Geophys.* 27, 645–657. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-645-2009>

Soderberg, K., Good, S.P., O'connor, M., Wang, L., Ryan, K., Caylor, K.K., 2013. Using atmospheric trajectories to model the isotopic composition of rainfall in central Kenya. *Ecosphere* 4, 1–18. <https://doi.org/10.1890/ES12-00160.1>

Trenberth, K.E., Caron, J.M., Trenberth, K.E., Caron, J.M., 2000. The Southern Oscillation Revisited: Sea Level Pressures, Surface Temperatures, and Precipitation. *J. Clim.* 13, 4358–4365. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<4358:TSORSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<4358:TSORSL>2.0.CO;2)

Tsonis, A.A., Hunt, A.G., Elsner, J.B., 2003. On the relation between ENSO and global climate change. *Meteorol. Atmos. Phys.* 84, 229–242. <https://doi.org/10.1007/s00703-003-0001-7>

van der Ent, R.J., Tuinenburg, O.A., 2017. The residence time of water in the atmosphere revisited. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 779–790. <https://doi.org/10.5194/hess-21-779-2017>

Wahl, D., Viscaino, A., Dunbar, R., Anderson, L., 2013. Late Holocene ENSO variability in the central Pacific: Preliminary data from Palmyra Atoll. *Quat. Int.* 310, 244–245. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.07.120>

Ward, P.J., Jongman, B., Kummu, M., Dettinger, M.D., Sperna Weiland, F.C., Winsemius, H.C., 2014. Strong influence of El Nino Southern Oscillation on flood risk around the world. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 15659–15664. <https://doi.org/10.1073/pnas.1409822111>

Winnick, M.J., Chamberlain, C.P., Caves, J.K., Welker, J.M., 2014. Quantifying the isotopic “continental effect.” *Earth Planet. Sci. Lett.* 406, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.09.005>

Wrzesien, M., Wise, E.K., 2015. Influence of Northern Hemisphere teleconnections on ENSO-related precipitation patterns in the United States. *Quat. Int.* 387, 149–150. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.01.188>

Yan, H., Liu, C., Zhang, W., Li, M., Zheng, X., Wei, G., Xie, L., Deng, W., Sun, L., 2017. ENSO variability around 2000 years ago recorded by *Tridacna gigas* $\delta^{18}\text{O}$ from the South China Sea. *Quat. Int.* 452, 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.05.011>

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados e discussões desenvolvidos durante a realização do mestrado concluem que a composição isotópica da precipitação na porção central do estado de São Paulo é governada pelos seguintes fatores climáticos:

Parâmetros meteorológicos locais, como variação de temperatura (*temperature effect*) e quantidade de precipitação (*amount effect*) não possuem correlação estatística significativa com a composição isotópica da precipitação, como demonstrado pela análise diária, embora na escala mensal a correlação ser negativa e significativa, devido atenuação provocada pela somatória de eventos de chuvas registrados conjuntamente na coleta mensal.

Parâmetros meteorológicos regionais, como umidade relativa e precipitação ao longo das trajetórias de partículas do modelo HYSPLIT possuem grande influência sobre a composição isotópica da precipitação, como demonstrado pelos testes de regressão. Assim, durante o deslocamento de massas de ar processos de recirculação de vapor promovem variação isotópica na precipitação, caracterizando a existência de processos de escala regional sobre a composição isotópica da precipitação.

Estes parâmetros meteorológicos regionais, representam a atuação dos sistemas atmosféricos de grande escala geradores de chuva para a área de estudo. Porém a atuação destes sistemas, varia ao longo das estações do ano, devido ao aquecimento/resfriamento da superfície continental, modificando a presença de zonas de altas e baixas pressões, formação da ZCAS e incursões de Frente Frias, e consequentemente a disponibilidade de umidade na atmosfera, resultando em regimes de precipitações e tipos de chuva diferentes.

Esta diferença sazonal é percebida pelos valores de excesso de deutério, como demonstrado pela diferença estatística do d-excess entre os eventos ENSOs 1997-98 e ENSO 2014-16. O mesmo ocorre na avaliação mensal da média ponderada pela precipitação com o $\delta^{18}\text{O}$.

O efeito de sazonalidade é caracterizado pela formação de chuvas empobrecidas, devido a atuação de processos de recirculação de vapor em uma atmosfera com grande disponibilidade de umidade, e chuvas enriquecidas, formadas por processos de recirculação de vapor em uma atmosfera cuja condições de disponibilidade de umidade é reduzida.

A maior ou menor umidade disponível na atmosfera resulta em composições isotópicas diferentes nas estações dos eventos ENSOs, por exemplo, com chuvas empobrecidas ocorrendo durante a estação seca do ENSO 1997-98 e enriquecidas, ocorrendo durante a estação seca do ENSO 2014-16. O mesmo não ocorreu para as estações chuvosas de ambos eventos ENSO, devido a condições de umidade disponível similares.

Nas avaliações entre anos, este mesmo padrão relacionado à umidade disponível é observado, como no ano seco de 2014, de precipitação enriquecida e no ano chuvoso de 2015, cuja precipitação foi mais empobrecida.

As chuvas denominadas de média (-4‰), que são a maior parte das amostras coletadas, representam os processos de recirculação de vapor em condições de umidade disponível menor do que as chuvas empobrecidas, porém maior do que as chuvas enriquecidas, confirmando toda análise sazonal, anual e entre ENSOs.

Corroborando a avaliação sobre as chuvas médias que foram muito bem modeladas pela Regressão Linear Múltipla, também confirma a existência de processos de escala regional e de sazonalidade, porém não explica os valores mais extremos, que só poderão ser entendidos por completo a partir de uma análise intra-evento de chuva, que confirme e demonstre os processos de formação de chuvas estratiformes e convectivas sobre o ponto de coleta amostral.

O conhecimento gerado pela presente dissertação de mestrado, poderá ser utilizado na realização de estudos e pesquisas do ciclo hidrológico, para compreensão dos processos de interação chuva-rios-água subterrânea sobre as áreas de recarga do Sistema Aquífero Guarani e parte da Bacia do Rio do Paraná, promovendo registros proxy que podem ser utilizados em modelagem hidrológica, para desvendar os impactos das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico e contribuir para previsões de crises hídricas futuras.