

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora,
o texto completo desta dissertação
será disponibilizado somente a partir
de 14/12/2022.



**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO E FLUXOS DE NITROGÊNIO EM
ÁREA DE AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI,
IDENTIFICADOS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE ISÓTOPOS
ESTÁVEIS (H E O).

Camila de Lima

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

CAMILA DE LIMA

INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO E FLUXOS DE NITROGÊNIO EM
ÁREA DE AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI,
IDENTIFICADOS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE ISÓTOPOS
ESTÁVEIS (H E O).

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 Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans

Rio Claro - SP
2021

L732i Lima, Camila de
Interação rio-aquífero e fluxos de nitrogênio em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, identificados a partir da utilização de isótopos estáveis (H e O) / Camila de Lima. -- Rio Claro, 2021
101 p. : il., tabs., fotos, mapas

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

1. Hidrogeologia. 2. Águas subterrâneas. 3. Águas superficiais. 4. Bacias hidrográficas. 5. Isótopos estáveis. 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.

CAMILA DE LIMA

INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO E FLUXOS DE NITROGÊNIO EM
ÁREA DE AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI,
IDENTIFICADOS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE ISÓTOPOS
ESTÁVEIS (H E O).

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 Meio Ambiente.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Didier Gastmans (orientador)

CEA / UNESP / Rio Claro – SP

Dr^a. Sibeles Ezaki

IPA / São Paulo – SP

Dr^a. Ludmila Vianna Batista

UFRJ / Rio de Janeiro – RJ

Conceito: Aprovada

Rio Claro – SP, 14 de dezembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador, Prof. Dr. Didier Gastmans, por ter confiado em mim antes mesmo de me conhecer. E por ser um orientador tão presente, mesmo com a distância física que fomos obrigados a enfrentar. Obrigada por todo o apoio, conselhos, aprendizados e orientações não só para o estudo, mas para a vida. Vou levar muita coisa boa adquirida nesse tempo com você.

Aos meus pais, Luiz Carlos e Antonia Célia, por sempre terem me apoiado e incentivado a seguir meus estudos, mesmo eu tendo escolhido uma profissão tão diferente para vocês. Tudo o que eu sou hoje eu devo a vocês. À minha mãe, que sempre me ajuda a segurar as pontas nos momentos de ansiedade e me faz acreditar que sou capaz de enfrentar todos os desafios que aparecem pelo meu caminho. Obrigada por ser minha base e nunca me deixar desmoronar.

Aos amigos do LARHIA que fiz nessa caminhada, foi incrível conhecer e ter convivido com vocês, mesmo que por uma pequena parcela de tempo do mestrado presencial, no mundo virtual era como se estivesse com vocês no dia a dia. Uma pena ter acontecido uma pandemia e atrapalhado a realização de mais churrascos. Um agradecimento especial para Lia, Vinícius e Carol, pela parceria comigo desde o início, me ajudando com os trabalhos de campo, laboratório e os demais questionamentos que foram surgindo ao longo de todo trabalho.

A minha grande amiga da vida, Merie, que, mesmo estando longe, nunca deixou de estar presente em todas as etapas importantes da minha vida e esta não poderia ser diferente. Obrigada por sempre ouvir meus desabafos, me aconselhar, por todo apoio e risadas, saiba que tudo fica mais fácil para mim quando compartilhado com você. Agradeço também a Nat, outra grande amiga, que também acompanhou esse meu processo me ouvindo, aconselhando e, mesmo não sendo da mesma área, me ajudando sempre que precisei com revisões e dicas para que o trabalho ficasse melhor.

Aos funcionários e técnicos do CEA, que sempre me ajudaram quando precisei. Em especial, a Eleni, pelos ensinamentos no laboratório e ao ex-funcionário Marcos por todo companheirismo e ajuda nos campos.

Agradeço também ao CNPq (Processo 134919/2019-0) pela concessão de bolsa de mestrado e apoio financeiro ao projeto de pesquisa “Origem dos Fluxos, Nitrato e Tempos de Residência da Água em Bacias Hidrográficas do Estado de São Paulo” (Processo 404979/2018-1) ao qual está inserido o meu estudo.

RESUMO

Os fluxos de nitrogênio na natureza podem aumentar devido fontes antrópicas ou naturais. A utilização de fertilizantes nitrogenados na agricultura gera ganhos na produtividade, porém quando usado em demasia ocasiona um aumento nas concentrações de nitrato nas águas (superficiais e subterrâneas) podendo acarretar problemas de saúde para a população que consome desta água. Deste modo, compreender a movimentação das águas dentro de uma bacia e avaliar a possível interferência da produção agrícola nos fluxos de nitrogênio é importante para a correta gestão dos recursos hídricos locais. Situada na porção central do estado de São Paulo, a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira está inserida na área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Por meio da análise da evolução do uso e ocupação da terra dos anos de 1989 a 2019 observou-se um aumento de quase 5 vezes na área plantada com cana-de-açúcar na região. Devido a fragilidade ambiental e pelo fato de estar em uma área onde o avanço da agricultura está ganhando mais espaço a cada ano, três áreas dessa sub-bacia foram escolhidas para desenvolver o estudo. Em nove campanhas de amostragem no período de setembro de 2019 a julho de 2020, em três rios foram coletadas amostras representativas de suas águas superficiais e da descarga subterrânea em seus leitos, e ainda de água subterrânea em poços e surgências próximas a esses pontos para análises isotópicas e das concentrações de nitrato. Os traçadores isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) nas amostras das águas dos rios, subterrâneas e da precipitação foram utilizados para compreender que as redes de drenagens estudadas são abastecidas pela descarga subterrânea. Nas águas superficiais dos rios as concentrações de nitrato variaram de 0,2 a 1,1 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (mg.L^{-1}), na descarga subterrânea no leito dos rios variaram de $< 0,1$ a 0,8 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (mg.L^{-1}) e nas águas subterrâneas de 0,2 a 3,4 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (mg.L^{-1}). Apesar do cenário atual não indicar contaminação na sub-bacia, é visto uma concentração maior nas águas subterrâneas, o que leva a acreditar que esse nitrato observado atingiu o aquífero em um tempo pretérito e está caminhando para os rios. Portanto, o avanço da produção de cana-de-açúcar na região, e conseqüentemente o aumento da fertirrigação, aumenta ainda mais a possibilidade do nitrato lançado alcançar níveis considerados contaminantes nas águas dessa sub-bacia.

Palavras-chave: interação rio-aquífero, fluxo de nitrogênio, isótopos ambientais, nitrato nas áreas rurais, Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira

ABSTRACT

In the nature, the nitrogen flux can increase due to anthropic or natural sources. The use of nitrogen fertilizers in agriculture can improve crop yields, but when it used in excess causes an increase in nitrate concentrations in water (surface or groundwater), which can lead to health problems for the population that consumes it. In this way, understand the water movement within a watershed and evaluate the possible agricultural production interference in the nitrogen flux is important for the correct management of the local water resources. Located in the central portion of São Paulo state, the Upper Jacaré-Pepira Sub-Basin is inserted in the outcrop area of the Guarani Aquifer System (SAG). By analyzing the region land use evolution, from 1989 to 2019, there was an almost 5 times increase in sugarcane planted area. Due to the environmental fragility and the agriculture advancement in the region, three areas in this sub-basin were chosen to develop the study. In nine sampling campaigns from September 2019 to July 2020, three creeks had representative samples of surface water and groundwater discharge in their riverbeds collected, as well as groundwater in wells and springs near these creeks, for isotopic ratios and nitrate concentrations analysis. The isotopic tracers ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) in the rivers, groundwaters and precipitation samples were used to understand that the studied creeks are supplied by groundwater discharge. In the creeks surface waters, the nitrate concentrations ranged from 0.2 to 1.1 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (mg.L^{-1}), in the groundwater discharge they ranged from < 0.1 to 0.8 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (mg.L^{-1}) and in the groundwaters from 0.2 to 3.4 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (mg.L^{-1}). Despite of the current scenario does not indicate contamination in the sub-basin, the nitrate concentration in the groundwater is higher than in the creeks, which leads to believe that this observed nitrate reached the aquifer in a past time and is heading towards the rivers. Therefore, the expansion in sugarcane production in the region, and consequently increasing the fertigation, increases the possibility that the released nitrate reaches levels considered contaminants in the water of this sub-basin.

Keywords: river-aquifer interaction, nitrogen flux, environmental isotopes, nitrate in rural areas, Upper Jacaré-Pepira Sub-Basin

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1 Mapa de localização da Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira.	19
Figura 3.2 Mapa Geológico da Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira.	22
Figura 3.3 Mapa hidrológico da Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira.	26
Figura 4.1 Representação esquemática do ciclo hidrológico (Retirado de MANOEL FILHO, 2008).	30
Figura 4.2 A. Modelo conceitual para rios efluentes. B. Modelo conceitual para rios influentes, cenário em que a elevação do nível d'água que separa a zona saturada da não saturada está conectada com o rio. C. Modelo conceitual para rios influentes, cenário em que a elevação do nível d'água que separa a zona saturada da não saturada está desconectado do rio. D. Modelo conceitual de fluxo direto (Adaptado de WOESSNER, 2020).	33
Figura 4.3 Conexões água superficial e subterrânea analisada a partir de mapas potenciométricos. A. Para rio efluente. B. Para rio influente (Adaptado de Winter et al., 1999).	34
Figura 4.4 Ciclo do nitrogênio (Retirado de São Paulo, 2019).	40
Figura 4.5 Potenciais fontes de contaminação das águas subterrâneas por nitrato nas áreas rurais. (Retirado de São Paulo, 2019).	44
Figura 5.1 Fluxograma de atividades para desenvolvimento do estudo.	48
Figura 5.2 Localização e detalhe dos rios amostrados.	52
Figura 5.3 A. Piezomanômetro desenvolvido por Kennedy et al. (2007). B. Piezomanômetro desenvolvido para a realização deste estudo instalado em área de amostragem.	53
Figura 5.4 A. Seringa acoplada à torneira de três válvulas para amostragem da água da descarga no leito do canal. B e C. Realização da purga para diminuir a turbidez. D. Momento da coleta da amostra para concentração de nitrato.	53
Figura 5.5 A. Amostragem para concentração de nitrato coletadas no canal. B. Amostragem para isótopos estáveis, filtradas no local.	54
Figura 5.6 A. Medição da condutividade elétrica do rio no momento da realização do método do traçador químico. B. Exemplo de curva da condutividade elétrica gerada na realização do método do traçador químico.	55
Figura 5.7 Mapa de localização de poços e surgências próximos aos rios amostrados.	57
Figura 5.8 A. Poço (P1) próximo ao R1. B. Poço de monitoramento (P2) próximo ao R2. C. Surgência (S2) próxima ao R2.	57

Figura 5.9 Modelo de pluviômetro PALMEX utilizado para coletar as amostras de precipitação.	59
Figura 5.10 A. Membranas de acetato de celulose de 0,45 µm. B. Filtragem das amostras utilizando bomba a vácuo elétrica. C. Reagente para nitrato sendo colocado em cada amostra e no branco. D. Tubo de amostra com reagente sendo agitado no agitador de tubos. E. Espectrofotômetro após ter feito a leitura do nitrato na amostra.	61
Figura 6.1 Mapas de evolução do uso e ocupação da terra nos anos de 1989, 1999, 2009 e 2019 na Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira.	65
Figura 6.2 Dados diários da precipitação, U.R. e temperatura com destaque para o período estudado.	67
Figura 6.3 Vazão dos rios e a precipitação diária.	68
Figura 6.4 Dados isotópicos da precipitação e a LMWL da cidade de Brotas, com destaque para os dados do período estudado, e a média total da precipitação e do período estudado.	70
Figura 6.5 Precipitação e razões isotópicas de ^{18}O da precipitação da região.	71
Figura 6.6 Variação de $\delta^{18}\text{O}$ e d-excess nas águas de R1A e R1D e das amostras de água subterrânea próximas a esse rio comparados com a precipitação.	72
Figura 6.7 Variação de $\delta^{18}\text{O}$ e d-excess nas águas de R2A e R2D e das águas subterrâneas do poço e surgência próximo a esse rio comparados com a precipitação.	74
Figura 6.8 Variação de $\delta^{18}\text{O}$ e d-excess nas águas de R3A e R3D e na água subterrânea localizada próxima a esse rio comparado comparados com a precipitação.	76
Figura 6.9 Concentrações de nitrato das águas da R1A, da R1D, do P1 e da S1b comparado com a precipitação diária.	77
Figura 6.10 Concentrações de nitrato das águas da R2A, R2D e da S2 comparado com a precipitação diária.	78
Figura 6.11 Concentrações de nitrato das águas da R3A, da R3D e do P3 comparado com a precipitação diária.	79
Figura 6.12 Relação das concentrações de nitrato da água superficial dos rios e das águas subterrâneas com a precipitação diária.	80
Figura 6.13 Relação das concentrações de nitrato da descarga subterrânea nos rios e das águas subterrâneas com a precipitação diária.	80
Figura 6.14 Relação entre as composições isotópicas das águas dos rios (água superficial e descarga) e das águas subterrâneas (surgências e poços) com a precipitação do período estudado e LMWL e a GMWL.	81
Figura 6.15 Modelo conceitual da Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira com a representação das áreas amostradas no estudo.	83

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 3.1 Parâmetros analisados no monitoramento da qualidade das águas.	25
Tabela 3.2 Valores de IQA e a qualidade da água.	25
Tabela 3.3 Resultados da qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Guarani no período de 2007 a 2009.	28
Tabela 4.1 Isótopos estáveis da água.	35
Tabela 5.1 Síntese dos pontos amostrados.	50
Tabela 5.2 Localização geográfica dos rios amostrados.	52
Tabela 5.3 Localização dos pontos de água subterrânea amostrados.	58
Tabela 6.1 Uso e ocupação da terra no município de Brotas nos anos de 1989, 1999, 2009 e 2019.	64

LISTA DE ABREVIATURAS

CBH-TJ – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Tietê-Jacaré

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Ci – Concentração de NaCl na solução

Cb – Condutividade elétrica do rio antes de injetar a solução

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

C(t) – Condutividade elétrica no tempo t

ea – Pressão de vapor do ar

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

es – Pressão de vapor saturado

GMWL – Global Meteoric Water Line

GPS – Global Positioning System

IAEA – International Atomic Energy Agency

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGCE – Instituto de Geociências e Ciências Exatas

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

IQA – Índice da Qualidade das Águas

ks – Concentração de potássio no solo

kvi – Concentração de potássio na vinhaça

LMWL – Local Meteoric Water Line

P1 – Poço tubular da Área 1

P2 – Poço tubular da Área 2

P3 – Poço tubular da Área 3

Q – Vazão

R1 – Rio 1

R1A – Amostra de Água Superficial do Rio 1

R1D – Amostra da Descarga Subterrânea do Rio 1

R2 – Rio 2

R2A – Amostra de Água Superficial do Rio 2

R2D – Amostra da Descarga Subterrânea do Rio 2

R3 – Rio 3

R3A – Amostra de Água Superficial do Rio 3

R3D – Amostra da Descarga Subterrânea do Rio 3
S1a – Surgência “a” da Área 1
S1b – Surgência “b” da Área 1
S2 – Surgência da Área 2
SAB – Sistema Aquífero Bauru
SAG – Sistema Aquífero Guarani
SASG – Sistema Aquífero Serra Geral
SMOW – Standard Mean Ocean Water
T – Temperatura
UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UNESP – Universidade Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UR – Umidade Relativa do Ar
USGS – United States Geological Survey
UTM – Universal Transversa de Mercator
Vi – Volume injetado
VSMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water
WGS 84 – World Geodetic System 84

SUMÁRIO

	Pág.
AGRADECIMENTOS	3
RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE ABREVIATURAS	10
SUMÁRIO.....	12
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS.....	18
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
3.1 GEOLOGIA	21
3.2 RECURSOS HÍDRICOS	24
3.2.1 <i>Águas Superficiais.....</i>	<i>24</i>
3.2.2 <i>Águas Subterrâneas.....</i>	<i>26</i>
4 REFERENCIAL TEÓRICO	30
4.1 INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO.....	30
4.2 ISÓTOPOS ESTÁVEIS	35
4.2.1 <i>Isótopos Estáveis em Estudos de Interação entre Águas Superficiais e Subterrâneas.....</i>	<i>37</i>
4.3 CICLO DE NITROGÊNIO E SUA RELAÇÃO COM AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	39
4.3.1 <i>A problemática do nitrato nas áreas rurais.....</i>	<i>43</i>
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
5.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	49
5.2 LEVANTAMENTO DE CAMPO	49
5.2.1 <i>Rios.....</i>	<i>51</i>
5.2.2 <i>Coleta de Amostras de Água Subterrânea.....</i>	<i>56</i>
5.2.3 <i>Precipitação.....</i>	<i>58</i>
5.2.4 <i>Dados Climáticos.....</i>	<i>59</i>
5.3 ANÁLISES LABORATORIAIS.....	60
5.4 INTERPRETAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	62

5.4.1	<i>Análise Estatística</i>	62
5.4.2	<i>Confecção de Mapas</i>	62
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
6.1	EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NA SUB-BACIA DO ALTO JACARÉ-PEPIRA 64	
6.2	ANÁLISE CLIMÁTICA	66
6.3	VAZÃO NOS RIOS	67
6.4	ISÓTOPOS ESTÁVEIS	69
6.4.1	<i>Precipitação</i>	69
6.4.2	<i>Pontos Amostrados</i>	71
6.5	NITRATO	77
6.6	MODELO HIDROLÓGICO CONCEITUAL DAS BACIAS ESTUDADAS	79
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	85
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	ANEXO 1. DADOS DE VAZÃO, CONCENTRAÇÕES DE NITRATO E COMPOSIÇÕES ISOTÓPICAS DOS RIOS.	100
	ANEXO 2. DADOS DE CONCENTRAÇÕES DE NITRATO E RAZÕES ISOTÓPICAS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.	101

1 INTRODUÇÃO

A utilização de novas técnicas agrícolas com o objetivo do aumento da produtividade, associada a diversas atividades humanas, ocasionou um aumento nas concentrações de nitrogênio nas águas superficiais e subterrâneas, fazendo com que concentrações acima dos limites aceitáveis sejam observadas em aquíferos e rios ao redor do mundo, transformando o nitrato em um problema ambiental de escala global.

Essa contaminação pode vir de fontes antrópicas ou naturais. A utilização de águas residuais tratadas nas áreas irrigadas, resíduos domésticos e utilização de fertilizantes químicos na agricultura são exemplos de fontes antrópicas. Os resíduos derivados de criação de animais são considerados fontes naturais. A prática agrícola e a utilização intensiva de agroquímicos, principalmente em solos arenosos, muito friáveis ou permeáveis, resulta em uma grande poluição do solo e conseqüentemente da água. Portanto, é preciso a adoção de medidas que controlem e fiscalizem essas atividades com produtos tóxicos, além de estimular o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas nas áreas rurais (ALBUQUERQUE FILHO *et al.*, 2012; NEJATIJAHRMI, *et al.*, 2019; RESENDE, 2002; YU *et al.*, 2019;).

O nitrogênio é um dos nutrientes mais utilizados na adubação, devido a relação do seu uso com maiores ganhos de produtividade. Desse modo, o agricultor investe na compra e aplicação de fertilizantes nitrogenados, aumentando a possibilidade da quantidade demasiada e inaceitável de nitrogênio seja ainda maior (RESENDE, 2002).

Em diversos países existe uma grande preocupação em relação à contaminação das águas subterrâneas por nitrato, devido ao composto ser um importante indicador de contaminação antrópica (MOURA *et al.*, 2015). Pela lixiviação, as cargas de nitrogênio acabam sendo levadas e estocadas, temporariamente nas porções superiores de aquíferos subjacentes a terras agrícolas, podendo alcançar a rede de drenagem conectada a esses aquíferos (PUCKETT; TESORIERO; DUBROVSKY, 2011).

Embora seu uso deva ser controlado, para gerar aumento na eficiência dos fertilizantes, vem sendo aplicada uma técnica chamada fertirrigação. A fertirrigação difere-se da aplicação convencional de fertilizantes pelo fato dele ser aplicado na

cultura através da água de irrigação. Na aplicação convencional, há a necessidade da chuva ou da irrigação para que os fertilizantes lançados ao solo atinjam a planta. Portanto, a fertirrigação acelera o ciclo de nutrientes utilizados além de reduzir a mão de obra e o custo com máquinas (COELHO *et al.*, 2010). Porém, se o potencial de infiltração e a capacidade de drenagem do solo for alto, essa técnica se torna preocupante, pois pode acelerar a chegada de contaminantes às águas subterrâneas e superficiais (JADOSKI *et al.*, 2010).

Vários estudos analisam a qualidade das águas subterrâneas com relação à contaminação por nitrato, alguns ainda buscam a sua fonte de origem (EGBI *et al.*, 2020; GILMORE *et al.*, 2016; LEE *et al.*, 2020; NEJATIJAHROME *et al.*, 2019). O gerenciamento do fluxo de nitrogênio tem sido um passo fundamental para determinar se o aquífero está ou não contaminado. Estudos de contaminação tem utilizado quantificar o nitrogênio que está sendo transferido da água subterrânea para a água superficial, principalmente em drenagens e áreas de recarga localizados em regiões agrícolas (BÖLKE, 2002; GILMORE *et al.*, 2016; SPRUILL *et al.*, 2004).

A interação entre águas subterrâneas e superficiais representa um aspecto crítico na gestão dos recursos hídricos, uma vez que ela desempenha um importante papel na disponibilidade hídrica dos rios e aquíferos, bem como na qualidade das suas águas (KENNEDY *et al.*, 2007). Considerando que a água subterrânea possibilita a recarga dos mananciais de superfície, ter um conhecimento do seu nível de degradação é fundamental (RESENDE, 2002). E para avaliar a qualidade da água superficial, é essencial entender duas questões críticas, o presente e os futuros impactos da descarga da água subterrânea na água superficial (GILMORE *et al.*, 2016). Desse modo, o conhecimento da origem da água, o caminho por ela percorrido e o tempo em que permanece na bacia são pontos chaves para fazer um bom estudo hidrológico.

Os isótopos estáveis de ^{18}O e ^2H têm sido utilizados como uma ferramenta para estudos de movimentação da água devido a sua composição variar de forma previsível. Dentro desses estudos estão a interação entre as águas superficiais e subterrâneas e a compreensão dos processos de recarga. Quando comparadas as composições isotópicas das águas superficiais, subterrâneas e da precipitação de uma região é possível compreender como a água tem se comportado dentro dessa

bacia (MARTINELLI *et al.*, 2009; BATISTA *et al.*, 2018; BATISTA; SANTOS; GASTMANS, 2017).

Na porção centro-leste do Estado de São Paulo, encontra-se a Bacia Hidrográfica do Rio Tietê-Jacaré, denominada Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – 13 (UGRHI – 13). A Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira, região estudada, está contida nas subdivisões da UGRHI-13 (CBH – TJ, 2018). Essa área está assentada geologicamente sobre os sedimentos clásticos, predominantemente arenosos, das Formações Botucatu e Piramboia. Portanto, isso faz com que ela seja uma área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), o que requer cuidados específicos (ALBUQUERQUE FILHO *et al.*, 2012a, 2012b).

A região em que está localizada a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira faz parte de um dos principais polos industriais e agrícolas do país, tendo como principais culturas a cana-de-açúcar, laranja e reflorestamento, além de possuir grandes áreas de pastagens (CETESB, 2007). E por se tratar de uma área de recarga do SAG, essa sub-bacia deve ser ambientalmente protegida. Através de estudos e monitoramentos de suas águas, é possível se ter conhecimento de toda mudança causada na região, seja de maneira natural ou antrópica.

Em um estudo hidrogeoquímico realizado nas águas superficiais dessa sub-bacia foram encontrados resultados pontuais de altas concentrações de nitrato, indicando possíveis fontes de contaminação antrópica recente e/ou associadas a atividade agrícola (BATISTA; GASTMANS, 2015). O que pode representar um problema com relação a sua fragilidade ambiental. Além disso, sabendo que essa região é agricolamente ativa e da existência do aumento da conversão do uso do solo, principalmente para a plantação de cana-de-açúcar, torna-se ainda mais necessário o conhecimento de o quanto a agricultura está afetando ou não ambientalmente essa sub-bacia.

Apesar de apresentar altas concentrações pontuais de nitrato, não é encontrado nenhum subsídio científico ainda para avaliar o fluxo de nitrogênio que vem acontecendo na região, sendo que se este estiver com altas concentrações em toda a sub-bacia, principalmente na área de recarga do SAG, pode acarretar problemas sérios tanto para o presente, quanto para o futuro.

Sendo assim, o monitoramento, a avaliação do fluxo de nitrogênio e a compreensão da interação das águas superficiais e subterrâneas na Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira é importante para que possa ser feita uma correta gestão dos recursos hídricos do local.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através dos resultados obtidos pelas razões isotópicas e concentrações de nitrato foi possível a construção de um modelo hidrológico conceitual para a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira, o qual envolve a movimentação de águas. Esse modelo mostra que as águas dos rios são uma mistura de águas.

Os isótopos estáveis de H e O foram uma boa ferramenta para mostrar essa conexão entre as águas subterrâneas e superficiais. Pelas razões isotópicas foi possível compreender que as redes de drenagens estudadas são abastecidas pela descarga subterrânea. Tendo esse importante papel principalmente durante a estação seca onde o volume de precipitação é menor, o que torna a água subterrânea a fonte principal de abastecimento dos rios.

Os resultados não mostraram uma contaminação por nitrato atualmente nas águas da sub-bacia estudada. Porém, apresentaram uma concentração maior na água subterrânea, o que leva a acreditar que esse nitrato atingiu o aquífero em um tempo pretérito e está caminhando para os rios. Apesar dos níveis de concentração de nitrato na água subterrânea não estarem acima dos limites aceitos para o consumo humano, eles já se tornam um alerta para cuidados maiores.

Com o avanço da agricultura e a forte produção de cana-de-açúcar se estendendo pela região, mostrado pelos dados de evolução do uso e ocupação da terra, é recomendável ter um controle sobre a carga de fertilizante nitrogenado aplicada, seguindo corretamente as normas da fertirrigação. Uma vez em excesso, os componentes dos fertilizantes não são totalmente absorvidos pela cultura, infiltrando para o lençol freático e atingindo as águas subterrâneas, e/ou sendo escoados até as águas superficiais.

Além disso, se tratando de uma área de recarga de um importante sistema aquífero como o SAG, o cuidado deve ser ainda maior. Uma vez que essa água seja contaminada, a situação se torna irreversível a curto prazo. Desse modo, é necessário a ampliação de uma rede de poços de monitoramento, com amostras analisadas periodicamente, para verificar se está aumentando ou não a contaminação na água subterrânea e, conseqüentemente, nas águas superficiais. Assim sendo, a realização

de uma campanha para saber o tempo de residência da água nessa sub-bacia, poderá prever a chegada dessa possível contaminação.

Por fim, este trabalho reforça a necessidade de monitorar todas as águas das bacias hidrográficas (tanto águas da superfície quanto da descarga subterrânea), bem como os aquíferos, principalmente as que se encontram em regiões com grande expansão agrícola como é o caso da Sub-Bacia do Alto Jacaré-Pepira. Pois como visto, as águas superficiais e subterrâneas fazem parte de um conjunto de águas, e quando poluído ou explorado demasiadamente uma delas, a outra também sofrerá o impacto, e ele poderá aparecer no presente bem como no futuro.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, B. W.; BISHOP, K.; ZARNETSKE, J. P.; MINAUDO, C.; CHAPIN III, F. S.; KRAUSE, S.; HANNAH, D. M.; CONNER, L.; ELLISON, D.; GODSEY, S. E.; PLONT, S.; MARÇAIS, J.; KOLBE, T.; HUEBNER, A.; FREI, R. J.; HAMPTON, T.; GU, S.; BUHMAN, M.; SAYEDI, S. S.; URSACHE, O.; CHAPIN, M.; HENDERSON, K. D.; PINARY, G. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. **Nature Geoscience**, [s.l.], v. 12, 533-540, 2019.

ADAMNS, S.; TITUS, R.; PIETERSEN, K.; TREDoux, G.; HARRIS, C. Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v.241(1-2), 91-103, 2001.

ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; CARVALHO, A. M.; IKEMATSU, P.; BARBOSA, M. C.; IRITANI, M.; PRESSIONATTI, M. M. N.; ROCHA, G.; SILVA, M. P. M.; THEODOROVICZ, A. Diretrizes para o desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no estado de São Paulo, Brasil. **Boletim Geológico y Minero**, [s.l.], v. 123, 3, 353–366. 2012a.

ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; IKEMATSU, P.; BARBOSA, M. C.; CARVALHO, A. M.; CAVANI, A. C. M. Zoneamento da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Guarani em sua área de afloramento no Estado de São Paulo, Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17., Bonito. **Anais [...]**. ABAS, 2012b.

ANDRADE, F. P. **Uso da vinhaça na fertirrigação: revisão da literatura sobre a técnica e seus benefícios**. 2012. 57 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2012.

ANDRADE, S. M.; SOARES, P. C. **Geologia do Centro-Leste do Estado de São Paulo**. Ponta Grossa: Petrobrás-Desul, Rel. 407, 1971.

BARBALHO, M. G. S.; CAMPOS, A. B. Vulnerabilidade natural dos solos e águas do estado de Goiás à contaminação por vinhaça utilizada na fertirrigação da cultura de cana-de-açúcar. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiás, v. 30, n. 1, 155-170, 2010.

BATISTA, L. **Hidrogeoquímica e qualidade das águas superficiais na Bacia do Alto Jacaré-Pepira (SP)**. 2015. 106p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2015.

BATISTA, L. **Desvendando a movimentação da água em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), utilizando análise hidrológica e traçadores isotópicos**. 2019. 112p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019.

BATISTA, L. V.; GASTMANS, D. Hidrogeoquímica e qualidade das águas superficiais na bacia do Alto Jacaré-Pepira (SP), Brasil. **Pesquisa em Geociências**, [s.l.], v. 42, 3, 297-311, 2015.

BATISTA, L. V.; GASTMANS, D.; SÁNCHEZ-MURILLO, R.; FARINHA, B. S.; SANTOS, S. M. R.; KIANG, C. H. Groundwater and surface water connectivity within the recharge area of Guarani aquifer system during El Niño 2014-2016. **Hydrological Processes**, v. 32, 2483-2495, 2018.

BATISTA, L. V.; SANTAROSA, L. V.; SANTOS, V.; GASTMANS, D. Influência das águas subterrâneas na manutenção da vazão do rio em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 20., 2018, Campinas. **Anais** [...]. ABAS, 2019. Disponível em: < <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29410> >. Acesso em: 25 jan. 2021.

BATISTA, L. B.; SANTOS, V.; GASTMANS, D. Variações temporais na composição isotópica das águas superficiais e subterrâneas em uma pequena bacia hidrográfica na área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais** [...]. ABRHidro, 2017. Disponível em: < <http://anais.abrh.org.br/works/3029> >. Acesso em: 21 jan. 2021.

BIGUELINI, C. P.; GUMY, M. P. Saúde Ambiental: Índices de nitrato em águas subterrâneas de poços profundos na região sudoeste do Paraná. **Revista Faz Ciência**, Francisco Beltrão/PN, v. 14, 20, 153-175, Jul/Dez 2012.

BRASIL, **Ministério da Saúde**, Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade

da água para o consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. 15p.

BÖHLKE, J. K. Groundwater recharge and agricultural contamination. **Hydrogeology Journal**, [s.l.], 10, 153-179, 2002. DOI: 10.1007/s10040-001-0183-3.

BORROCAS, R. **A (Trans)formação do Turismo no Município de Brotas, SP: a relação entre o morador e o turista**. 2005. 111p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

CABRAL, J. J. S. P. Movimento das Águas Subterrâneas. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (org). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. p. 77-91.

CAETANO-CHANG, M. R. **A Formação Pirambóia no centro-leste do estado de São Paulo**. Habilitation Thesis, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 1997.

CAMPOS, H. C. N. S. **Caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo**. 1993. 181p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

CBH – TJ. Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê – Jacaré. 2018. **Plano da Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré**. Disponível em: <
<http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents//CBH-TJ/13655/plano-de-bacia-relatorio-ii.pdf> > Acesso em: 17 de junho de 2020.

CBH – TJ. Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê – Jacaré. 2018. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2018 – Ano Base 2017**. Disponível em: <
<http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents//CBH-TJ/13920/relatorio-situacao-2018.pdf> > Acesso em: 17 de junho de 2020.

CETESB. Decisão da Diretoria n 132/2018/E/C, de 11 de julho de 2018. Regulamentação de Critérios Técnicos para o Plano de Monitoramento das Águas Subterrâneas – Subitem 5.10 da Norma P4.321 “Vinhaça – Critérios e Procedimentos para a Aplicação no Solo agrícola”. **Diário Oficial Estado de São Paulo – Caderno Executivo I (Poder Executivo, Seção I)**, edição n. 128 (127) do dia 12 jul. 2018, p. 36.

CETESB. Norma P4.231, Terceira Edição, 2ª versão, de fevereiro de 2015. Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. **Diário Oficial do Estado de São Paulo** – Caderno Executivo I, v. 125, n. 30, de 13 fev. 2015, Poder Executivo, Seção I, p. 51-53.

CETESB. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo: 2007-2009**. Equipe técnica Rosângela Pacini Modesto... [et al.]. São Paulo: CETESB, 2010.

CLARK, I.; FRITZ, P., 1997. **Environmental Isotopes in Hydrogeology**. CRC Press, Boca Raton, 343 p.

COELHO, E. F.; COSTA, E. L.; BORGES, A. L.; ANDRADE NETO, T. M., PINTO, J. M. Fertirrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.31, n.259, 58-70, nov./dez. 2010.

COMINA, C.; LASAGNA, M.; LUCCA, D. A.; SAMBUELLI, L. Discharge measurement with salt dilution method in irrigation canals: direct sampling and geophysical controls. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, [s.l.], v. 8, 10035-10060, 2013.

COSTA, A. B.; AZEVEDO, A. E. G.; LEAL, L. R.; SANTOS, C. P. L. Avaliação do Padrão de Composição Isotópica de Águas na Bacia do Rio Joanes: Implicações para a Interação entre Águas Superficiais e Subterrâneas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 12, 3, 211-219, 2007.

CRAIG, H. Standards for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in natural waters. **Science**, (New York, NY), v.133(3467), 1833-1834, 1961.

CREMEANS, M. M.; DEVLIN, J. F.; MCKNIGHT, U. S.; BJERG, P. L. Application of new point measurement device to quantify groundwater-surface water interactions. **Journal of Contaminant Hydrology**, [s.l.], v. 211, 85-93, 2018.

DAEE/IG/IPT/CPRM. **Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo**. Escala 1:1.000.000. Nota explicativa. São Paulo: DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica, IG – Instituto Geológico, IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 3 v. (mapa e CD-ROM). 2005.

DAEE/UNESP. **Mapa Geológico**. Escala 1:250.00. São Paulo: Convênio DAEE/UNESP, Secretaria de Obras do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 1980. (Compilação eletrônica Lebac/IGCE/UNESP, 2009).

DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. **Tellus**, 16, 436-468, 1964.

EGBI, C. D.; ANORNU, G. K.; GANYAGLO, S. Y.; APPIAH-ADJEI, E. K.; LI, S. L.; DAMPARE, S. B. Nitrate contamination of groundwater in Lower Volta River Basin of Ghana: Sources and related human health risks. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.] v.191, mar. 2020.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Ciclo do Nitrogênio em Sistemas Agrícolas**. Rosana Faria Vieira, Brasília, DF: Embrapa, 2017. 165 p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Panorama da Contaminação Ambiental por Agrotóxicos e Nitrato de origem Agrícola no Brasil: cenário 1992/2011**. Marco Antonio Ferreira Gomes; Robson Rolland Monticelli Barizon. Jaguariuna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2014. 35 p.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. Groundwater. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1979.

FONTES, A. S.; ZUCCHI, M. R.; MEDEIROS, Y. D. P.; AZEVEDO, A. E. G. Estudo da dinâmica do fluxo de água na bacia do Rio Jacuípe por meio de traçadores ambientais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 16, 3, 17-36, 2011.

GALVÃO, P.; HIRATA, R.; HALIHAN, T.; TERADA, R. Estudo de isótopos estáveis para confirmar interconexões entre lagoas e águas subterrâneas, Sete Lagoas/MG. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 20, 2017, Campinas. **Anais [...]**. ABAS, 2017.

GALVÃO, P.; SOUZA, E. L.; ALMEIDA, R.; PINHEIRO, C. S.; BAESSA, M. P. M.; CABRAL, M. R. S. O uso de isótopos estáveis na província petrolífera de Urucu, Região Amazônica, Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19, 2016, Campinas. **Anais [...]**. ABAS, 2016.

GASTMANS, D.; REIS, M. M.; KIANG, C. H. Geotermometria das águas hipertemais do Sistema Aquífero Guarani no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, [s.l.], v. 42, 2012b.

GASTMANS, D.; VEROSLAVSKY, G.; KIANG CHANG, H.; CAETANO-CHANG, M. R.; PRESSIONOTTI, M. M. N. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. **Boletín Geológico y Minero**, [s.l.], v. 123 (3), 249-265, 2012a.

GILMORE, T. E.; GENEREUX, D. P.; SOLOMON, D. K.; FARRREL, K. M.; MITASOVA, H. Quantifying an aquifer nitrate budget and future nitrate discharge using field data from streambeds and well nests. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 52, p. 9046–9065, 2016.

GILMORE, T.; RICHARDS, G.; MITTELSTET, A.; SNOW, D.; MESSER, T. **Bazile Creek and Groundwater Nitrate**. 2021. Disponível em: < <https://storymaps.arcgis.com/stories/42e378f7040d43b6b56e0defa97643fb> > Acesso em: 08 mar. 2021.

GLOSE, T. J.; LOWRY, C. S.; HAUSNER, M. B. Examining the utility of continuously quantified Darcy fluxes through the use of periodic temperature time series. **Journal of Hydrology**, [s.l.], 125675, 2020.

GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D.; BOEIRA, R. C.; TOLEDO, L. G. **Nutrientes vegetais no meio ambiente**: ciclos biogeoquímicos, fertilizantes e corretivos. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 50 p.

GONZAGA, G. M.; TOMPKINS, L. A. **Geologia do Diamante**. In: SSCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E. T.; COELHO, C. E. S. (coords.). Principais Depósitos Minerais do Brasil, Departamento Nacional da Produção Mineral- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, v. IV (A), p. 53-116, Brasília, 1901.

GONZÁLEZ-PINZÓN, R.; WARD, A. S.; HATCH, C. E.; WLOSTWSKI, A. N.; SINGHA, K.; GOOSEFF, M. N.; HAGGERTY, R.; HARVEY, J. W.; CIRPKA, O. A.; BROCK, J. T. A field comparison of multiple techniques to quantify groundwater–surface-water interactions. **Freshwater Science**, [s.l.], v. 34, n.1, Aug. 2014, 2015.

GRÖNING, M.; LUTZ, H. O.; ROLLER-LUTZ, Z.; KRALIK, M.; GOURCY, L.; PÖLTENSTEIN, L. A simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ analysis of cumulative precipitation samples. **Journal of Hydrology**, [s.l.], 448-449, 295-200, 2012.

HEALY, R. W. **Estimating Groundwater Recharge**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2010, 244 p.

HERCZEG, A. L.; BARNES, C. J.; MACUMBER, P. G.; OLLEY, J. M. A stable isotope investigation of groundwater-surface water interactions at Lake Tyrrel, Victoria, Australia. **Chemical Geology**, [s.l.], v.96. 19-32, 1992.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Geologia das folhas Campinas (SF.23-Y-A) e Ribeirão Preto (SF.23-V-V)**. São Paulo. (IPT. Relatório, 31 723).

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: DMGA, 2 v. 1981 Escala 1:1.000.000.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Comitê de Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré (CBH – TJ). **Relatório Zero UGRHI13:**

_____. Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do plano da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré. Araraquara: CBHT- TJ, 2010.

_____. Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do plano da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré. Araraquara: CBHT- TJ, 2006.

JADOSKI, S. O.; SAITO, L. R.; PRADO, C. do; LOPES, E. C.; SALES, L. L. S. R. Características da lixiviação de nitrato em áreas de agricultura intensiva. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, [s.l.], v. 3, n. 1, 150-168, 2010.

JASECHKO, S. Global isotope hydrogeology – Review. **Reviews of Geophysics**, [s.l.], v.57, 835-965, 2019. DOI: 10.1029/2018RG000627.

JASECHKO, S.; BIRKS, S. J.; GLEESON, T.; WADA, Y.; FAWCETT, P. J.; SHARP, Z. D.; MCDONNELL, J. J.; WELKER, J. M. The pronounced seasonality of global groundwater recharge. **Water Resources Research**, [s.l.], v.50, 8845-8867, 2014. DOI: 10.1002/2014WR015809.

JUNQUEIRA, C. A.; MOLINA JUNIOR, V. E.; LOSSARDO, L F.; FELICIO, B. C.; MOREIRA JUNIOR, O.; FOSCHINI, R. C.; MENDES, R. M.; LORANDI, R.

Identificação o potencial de contaminação de aquíferos livres por vinhaça na bacia do Ribeirão do Pântano, Descalvado (SP), Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, [s.l.], v. 39, 507-518, 2009.

KALBUS, E.; REINSTORF, F.; SCHIRMER, M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v.10, n.6, 873-887, 2006. Disponível em: < www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/873/2006/ >. Acesso em: 04 nov. 2020.

KENNEDY, C. D.; GENEREUX, D. P.; CORBETT, D. R.; MITASOVA, H. Design of a light-oil piezomanometer for measurement of hydraulic head differences and collection of groundwater samples. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 43, W09501, 2007.

KIANG, C. H.; BASSO, J. B.; SOTO, M. A. Impactos da fertirrigação por vinhaça em corpos d'água. In: DOMICIANO, C. L. C.; BASTOS, J. F.; SILVA, J. C. P.; PEREIRA, M. A. R.; MATINS, M. A. S. R. **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica**. Bauru, SP: Canal 6, 2017, 275 p.

LEE, C-M.; HAMM, S-Y.; CHEONG, J-Y.; KIM, K.; YOON, H.; KIM, M.; KIM, J. Contribution of nitrate-nitrogen concentration in groundwater to stream water in an agricultural head watershed. **Environmental Research**, [s.l.], v.184, 2020.

LEVIA, D. F.; CREED, I. F.; HANNAH, D. M.; NANKI, K.; BOYER, E. W.; CARLYLE-MOSES, D. E.; VAN DE GIESEN, N.; GRASSO, D.; GUSWA, A. J.; HUDSON, J. E.; HUDSON, S. A.; LIDA, S.; JACKSON, R.; KATUL, G. G.; KUMAGAI, T.; LLORENS, P.; RIBEIRO, F. L.; PATAKI, D. E.; PETERS, C. A.; CARRETERO, D. S.; SELKER, J. S.; TETZLAFF, D.; ZALEWSKI, M.; BRUEN, M. Homogenization of the terrestrial water cycle. **Nature Geoscience**, [s,l.], v. 13, 656-660, 2020.

MAPBIOMAS. Disponível em: < <https://mapbiomas.org> >. Acesso em: 30 ago. 2021.

MARTINELLI, L. A. Conferência N2007: os caminhos do nitrogênio – do fertilizante ao poluente. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 118, 6-10, 2007.

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

MANOEL FILHO, J. 2008. Ocorrência das Águas Subterrâneas. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (org). **Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. p. 53-75.

MANZIONE, R, L. **Águas Subterrâneas: Conceitos e Aplicações sob uma Visão Multidisciplinar**. Jundiaí: Paco Editorial, 2015.

MENCIÓ, A.; GALÁN, M.; BOIX, D.; MAS-PLA, J. Analysis of stream-aquifer relationships: A comparison between mass balance and Darcy's law approaches. **Journal of Hydrology**, [s.l.], 517, 157-172, 2014.

MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. *In*: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELI, A.; CARNEIRO, C.; BRITO NEVES, B. (eds), **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. Beca, São Paulo, p. 265-287, 2004.

MOOK, W. G. **Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000.

MOURA, C. C.; GASTMANS, D.; KIANG, C. H.; MODESTO, R. P.; RODRIGUES, P. F.; RUBY, E. C.; BORGES, A.V. Concentrações de nitrato nas águas subterrâneas em áreas rurais do município de São José do Rio Preto (SP). **Águas Subterrâneas**, [s. l.], v.29, n.3, 268-284, nov. 2015.

NEJATIJAHRAMI, Z.; NASSERY, H. R.; TAKIRO, H.; NAKHEI, M.; ALIJANI, F.; OKUMURA, A. Groundwater nitrate contamination in na area using urban wastewaters for agricultural irrigation under arid climate condition, southeast of Tehran, Iran. **Agricultural Water Management**, [s.l.], 221, p. 397-414, 2019.

NOORDUJIN, S.; HARRINGTON, G. A.; COOK, P. G. The representative stream length for estimating surface water-groundwater exchange using Darcy's Law. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 513, 353-361, 2014.

POETER, E.; FAN, Y.; CHERRY, J.; WOOD, W.; MACKAY, D. **Groundwater in Our Water Cycle: Getting to know Earth's Most Important Fresh Water Source**. Ontario: The Groundwater Project, 2020. 136 p. Disponível em: < <https://gw-project.org/books/groundwater-in-our-water-cycle/> >. Acesso em: 11 nov. 2020.

PUCKETT, L. J.; TESORIERO, A. J.; DUBROVSKY, N. M. Nitrogen Contamination of Surficial Aquifers – A Growing Legacy. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 45, 839-844, 2011.

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**, [s.l.], v.55(8), 6896–6910, 2019.

REIS, C. E. R.; HU, B. Vinasse from Surgarcane Ethanol Production: Better Treatment or Better Utilization? **Frontiers in Energy Research**, [s.l.], v. 5, 1-7, 2017.

RESENDE, A. V. **Agricultura e qualidade da água: contaminação da água por nitrato**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 29p. Documentos/Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, n. 57, 2002.

RIBEIRO, L.; PARALTA, E.; NASCIMENTO, J.; AMARO, S.; OLIVEIRA, E.; SALGUEIRO, A. R. A agricultura e a delimitação das zonas vulneráveis aos nitratos de origem agrícola segundo a Directiva 91/676/CE. *In*: CONGRESSO IBÉRICO SOBRE GESTIÓN E PLANIFICACIÓN DEL AGUA, 3, 2002. Universidad de Sevilla, Spain, p 508-513.

RIBEIRO, O. C. F.; AMARAL, S. C. F. Impactos do turismo no lazer dos munícipes: O caso de Brotas/SP. **LICERE – Revista do Programa de Pós-Graduação Interdisciplinas em Estudos do Lazer**, [s.l.], v.18, n. 1, p 110-135, 2015. DOI: 10.35699/1981-3171.2015.1078.

ROSENBERRY, D. O.; LABAUGH, J. W. **Field Techniques for Estimating Water Fluxes between Surface Water and Ground Water**: Techniques and Methods 4-D2. Reston: U.S. Geological Survey: 2008. 128 p. Disponível em: < <https://pubs.usgs.gov/tm/04d02/> >. Acesso em: 11 nov. 2020.

ROSS, J. L. S., MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, [s.l.], v. 10, p. 41-58, 2011. DOI: 10.7154/RDG.1996.0010.0004. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/53703>. Acesso em: 12 jan. 2021.

SANTOS, A. C. Noções de Hidroquímica. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (org). **Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008, 325-357.

SÃO PAULO. Conselho Estadual de Recursos Hídricos, Câmara Técnica de Águas Subterrâneas. **Nitrato nas águas subterrâneas: desafios frente ao panorama atual**. Claudia Varnier (coord.). São Paulo: SIMA/IG, 2019. 128 p.

SCHERER, C. M. S. **Análise estratigráfica e litofaciológica da Formação Botucatu (Cretáceo Inferior da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul**. 1998, 202 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SILVA, C. A. **Análise sistêmica, turismo de natureza e planejamento ambiental de Brotas: proposta metodológica**. 2006, 270 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

SILVA, G. S. P. L.; SILVA, F. C.; ALVES, B. J. R.; TOMAZ, E.; BERTON, R. S.; MARCHIORI, L. F. S.; SILVEIRA, F. G. Efeitos da aplicação de vinhaça “in natura” ou concentrada associado ao n-fertilizante em soqueira de cana-de-açúcar e no ambiente”. **Holos Environment**, [s.l.], v. 19, n. 1, 1-21, 2019.

SILVA, R. B. G. **Estudo Hidroquímico e Isotópico do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo**. 1983, 133 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

SMERDON, B. D.; DEVITO, K. J.; MENDOZA, C. A. Interaction of groundwater and shallow lakes on outwash sediments in the sub-humid Boreal Plains of Canada. **Journal of Hydrology**, [s.l.], 314, 246-262, 2005.

SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: where do we go from here? **Trends in Ecology & Evolution**, [s.l.], v. 24, n. 4, 201-207, 2009.

SOARES, P. C. **O Mesozóico Gondwânico no Estado de São Paulo**. 1973, 153p. Tese (Doutorado em Geologia) – Faculdade de Ciências e Letras de Rio Claro, Rio Claro, 1973.

SOTO, M. A. A.; BASSO, J. B.; KIANG, C. H.; GENUCHTEN, M. T. V. Simulação de fluxo e transporte de íons de vinhaça através de vertente da Formação Rio Claro. **Águas Subterrâneas**, [s.l.], v. 29, 162-174, 2015.

SOUZA, J. K. C.; MESQUITA, F. O.; DANTAS NETO, J.; SOUZA, M. M. A.; FARIAS, C. H. A.; MENDES, H. C.; NUNES, R. M. A. Fertirrigação com vinhaça na produção

da cana-de-açúcar. **Agropecuária Científica no Semiárido**, [s.l.], v. 11, n. 2, 7-12, abri-jun 2015.

SPALDING, R. F.; HIRSH, A. J.; EXNER, M. E.; LITTLE, N. A.; KLOPPENBORG, K. L. Applicability of the dual isotopes $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ to identify nitrate in groundwater beneath irrigated cropland. **Journal of Contaminant Hydrology**, [s.l.], v. 220, 128-135, 2019.

SPRUIILL, T. B.; TESORIERO, A. J.; MEW, H. E.; FARRELL, K. M.; HARDEN, S. L.; COLOSIMO, A. B.; KRAEMER, S. R. **Geochemistry and Characteristics of Nitrogen Transport at a Confined Animal Feeding Operation in a Coastal Plain Agricultural Watershed, and Implications for Nutrient Loading in the Neuse River Basin, North Carolina, 1999-2002** – Scientific Investigations Report 2004-5283. Denver: U.S. Geological Survey, 2004, 66 p.

STRADIOTO, M. R.; TERAMOTO, E. H.; CHANG, H. K. Nitrato em águas subterrâneas do estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, 40, 1-12, 2019.

TAZIOLI, A. Experimental methods for river discharge measurements: comparison among tracers and current in meter. **Hydrological Sciences Journal**, [s.l.], v. 56, 7, 1314-1324, 2011.

VALEZIO, E. V.; PEREZ FILHO, A. Alterações antrópicas e repercussões na dinâmica do Rio Jacaré-Pepira (SP). *In*: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada e Congresso Nacional de Geografia Física, 17 e 1, 2017, Campinas. **Ebook: Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. Campinas: Instituto de Geociências – Unicamp, 2017, p 6836-6845. DOI: 10.20396/sbgfa.v1i2017.1875.

VARNIER, C.; HIRATA, R. Contaminação da água subterrânea por nitrato no Parque Ecológico do Tietê – São Paulo, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, [s.l.], 16, 97-104, 2002.

WANG, L.; STUART, M. E.; LEWIS, M. A.; WARD, R. S.; SKIRVIN, D.; NADEN, P. S.; COLLINS, A. L.; ASCOTT, M. J. The changing trend in nitrate concentrations in major aquifers due to historical nitrate loading from agricultural land across England and Wales from 1925 to 2150. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 542, 694-705, 2016.

WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. **Groundwater and surface water a single resource**. Denver: U.S. Geological Survey Circular 1139: 1999. 79 p.

WOESSNER, W. W. **Groundwater-Surface Water Exchange**. Ontario: The Groundwater Project, 2020. 158 p. Disponível em: < <https://gw-project.org/books/groundwater-surface-water-exchange/> >. Acesso em: 11 nov. 2020.

WU, P.; CHRISTIDIS, N.; SCOTT, P. Anthropogenic impact on Earth's hydrologic cycle. **Nature Climate Change**, [s.l.], v. 3, 807-810, 2013.

YEH, H.; LIN, H.; LEE, C.; HSU, K.; WU, C. Identifying Seasonal Groundwater Recharge Using Environmental Stable Isotopes. **Water**, [s.l.], v. 6, 2849-2861, 2014.

YIN, L., HOU, G., SU, X., WANG, D., DONG, J., HAO, Y., WANG, X. Isotopes (δD and $\delta^{18}O$) in precipitation, groundwater and surface water in the Ordos Plateau, China: implications with respect to groundwater recharge and circulation. **Hydrogeology Journal**, [s.l.], v.19, 429-443 (2011). DOI: 10.1007/s10040-010-0671-4.

YU, C.; HUANG, X.; CHEN, H.; GODFRAY, H. C. J.; WRIGHT, J. S.; HALL, J. W.; GONG, P.; NI, S.; QIAO, S.; HUANG, G.; XIAO, Y.; ZHANG, J.; FENG, Z.; JU, X.; CIAIS, P.; STENSETH, N. C.; HESSEN, D. O.; SUN, Z.; YU, L.; CAI, W.; FU, H.; HUANG, X.; ZHANG, C.; LIU, H.; TAYLOR, J. Managing nitrogen to restore water quality in China. **Nature**, [s.l.], v. 567, p. 516-520, 2019.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; VIEIRA, I. S.; ASTOLFI, M. A. M.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. A Divisão Tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, 1987.