

## ALTERAÇÃO ANTRÓPICA NA QUALIDADE DOS AQUIFEROS COLUVIONAR E ITAQUERI NAS CABECEIRAS DO RIO MONJOLINHO, SÃO CARLOS-SP

*ANTHROPIC CHANGE IN THE QUALITY OF THE COLUVIONAR AND ITAQUERI AQUIFERS  
IN THE UPSTREAM OF THE MONJOLINHO RIVER, SÃO CARLOS-SP*

**Natália de Souza ARRUDA, Denise Balestrero MENEZES**

Universidade Federal de São Carlos. Departamento de Engenharia Civil e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Rod. Washington Luís, km 235 - SP-310, São Carlos, São Paulo. E-mails: arrudanatalia@hotmail.com; denisebm@ufscar.br

Introdução  
Materiais e métodos  
  Área de estudo  
  Metodologias adotadas na pesquisa  
  Classificação dos aquíferos na área  
  Uso e cobertura do solo, seleção de poços e definição dos parâmetros  
  Análise dos Resultados  
Resultados  
  Uso e cobertura do solo  
  Apresentação das análises da água  
  Qualidade da água  
Discussão  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências

**RESUMO** - No município de São Carlos, o importante manancial superficial do Rio Monjolinho tem as cabeceiras localizadas na região periurbana, com zona urbana consolidada, zona industrial e zona rural. Os aquíferos freáticos da sub-bacia possuem importância na dinâmica hidrológica, entretanto ainda sem investigação quanto à sua qualidade hidroquímica. Este trabalho buscou conhecer os impactos gerados pelas atividades antrópicas nas águas subterrâneas freáticas nas cabeceiras do Rio Monjolinho e para isso foram selecionados 28 geoindicadores físico-químicos. Foram coletadas amostras de água de 7 poços de abastecimento, nos períodos de alta e baixa pluviosidade, sendo dois poços localizados dentro do perímetro urbano (P26 e P41) e cinco localizados na região rural (P12, P13, P16, P19 e P42). Os poços localizados na zona rural apresentaram concentrações maiores dos parâmetros, K e P Total, além do Ca. Na região urbana o P26 altas concentrações de Na, Cl e N-nitrato, sugerindo contaminações provenientes de esgotamento sanitário, ou pelas piscinas localizadas no entorno. O estudo identificou interferência das atividades antrópicas urbanas e rurais, como vazamento do esgoto sanitário e aumento dos lixiviados nos aquíferos freáticos na sub-bacia do rio Monjolinho.

**Palavras-chave:** Hidroquímica. Qualidade das águas subterrâneas. Zona periurbana. Manancial de abastecimento.

**ABSTRACT** - In the city of São Carlos, the Monjolinho River, important water supply's source has its headwaters located in the peri-urban region, with a consolidated urban area, an industrial and a rural area. The phreatic aquifers in the sub basin are important in hydrological dynamics; however, their hydrochemical quality has not yet been investigated. This work aims to understand the impacts generated by anthropic activities on groundwater in the headwaters of the Monjolinho River and for this 28 physical-chemical geoindicators were selected. Water samples were collected from 7 supply wells, in periods of high and low rainfall, with two wells located within the urban perimeter (P26 and P41) and five located in the rural region (P12, P13, P16, P19 and P42). The wells located in the rural area had higher concentrations of the parameters, K and Total P, in addition to Ca. In the urban region, P26 had high concentrations of Na, Cl and N-nitrate, suggesting contamination from sewage, or by the pools located in the surroundings. The study identified interference from urban and rural anthropogenic activities, such as sewage leakage and increase in leachate in groundwater aquifers in the Monjolinho river sub basin.

**Keywords:** Hydrochemistry. Groundwater quality. Periurban area. Supply source.

### INTRODUÇÃO

Estudos de qualidade das águas subterrâneas envolvem o conhecimento das características naturais como clima, litologia e vegetação, sob a interação das atividades antrópicas como agricultura, indústria e urbanização. A alta vulnerabilidade de aquíferos freáticos em ambientes antropizados vem da interação complexa entre o ciclo hidrológico e as alterações do uso e cobertura do solo (Burri et al., 2019). A investigação da qualidade hidroquímica das águas subterrâneas

se faz necessária em um cenário onde há aumento na demanda e importância deste recurso na gestão dos mananciais locais. A superexploração e a contaminação desses recursos hídricos subterrâneos são identificadas em escalas globais (Elmahdy & Mohamed, 2016; Wu & Sun, 2016; Lapworth et al., 2017; Patra et al., 2018).

As regiões periurbanas possuem como característica principal a dinâmica variável do uso solo, apresentando estruturas urbanas consolidadas

que dão suporte ao desenvolvimento de zonas industriais e comerciais, além da proximidade com a zona rural que desenvolve agricultura de subsistência. Essa dinâmica variada e variável gera alterações físico-químicas por materiais lançados no solo que podem alterar mananciais superficiais, aquíferos freáticos e podendo chegar a aquíferos profundos. A mudança do uso e cobertura do solo pode ser fortemente correlacionável com os parâmetros químicos da água (Khatri & Tyagi, 2015; Li et al., 2014; Li et al., 2017; Li et al., 2018; Ramyapriya & Elango, 2018).

Nas pesquisas de qualidade da água subterrânea no Brasil, e essa tendência é observada também em outros países, há fragmentação no foco das análises em relação ao uso e cobertura do solo. São pesquisas agrupadas em: áreas agrícolas com investigação de contaminação por sistema de irrigação (Andrade et al., 2016), por pesticidas (Nogueira et al., 2012) e contaminação pontual por esgoto doméstico (Leite et al., 2018); áreas industriais com a investigação de compostos contaminantes provenientes de atividades suínícolas (Cadoná et al., 2018); lodo de estação de tratamento de esgotamento sanitário de indústria alimentícia (Pereira & Garcia, 2017), áreas urbanas para análise da qualidade das águas subterrâneas para consumo, investigação de contaminação por hidrocarbonetos (Forte et al., 2007), vazamentos de esgoto (Stradioto et al., 2019; Bezerra, et al., 2018), investigações de contaminação por deposição incorreta de resíduos em solos urbanos (Santos Filho et al., 2017)

Em São Carlos-SP a região das cabeceiras do Rio Monjolinho possui aquíferos freáticos ainda sem uma definição de padrão da qualidade hidroquímica. Estes aquíferos apresentam recargas de alto potencial, devido aos materiais inconsoli-

dados que possuem o predomínio de areias médias e finas (Basilio, 2019). O Rio Monjolinho é um importante manancial superficial, cuja região de cabeceira abastece parte do município, tendo as suas nascentes aflorando dos aquíferos freáticos que percolam estes materiais inconsolidados da região.

O uso do solo da área é característico de regiões periurbanas, com a zona industrial e comercial próximo à rodovia, zona urbana residencial e zona rural com culturas temporárias e pastagens. A análise hidroquímica conforme o ambiente antrópico com a utilização de geoindicadores (Edmunds, 1996; Berger, 1997; Klimas & Gregorauskas, 2002) auxilia na gestão dos recursos e no conhecimento da qualidade dos aquíferos. A compartimentação do uso do solo é utilizada como abordagem metodológica nas apresentações das interferências das atividades nos mananciais explorados em diversas regiões.

Não por acaso, são definidos no Plano Diretor Municipal (São Carlos, 2016), zonas de expansão urbana e zonas de preservação e ocupação controlada de acordo com as atividades potencialmente poluidoras, unindo gestão efetiva com desenvolvimento econômico.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é investigar a qualidade físico-química dos aquíferos freáticos localizados na sub-bacia do Rio Monjolinho, município de São Carlos, SP. Vale ressaltar que esta bacia é um importante manancial superficial responsável por 10 % a 15% do abastecimento do município (SAAE, 2017; SAAE, 2012) e que pelo Plano Diretor Municipal (São Carlos, 2016) ficou definida como área de ocupação controlada, corroborando a legislação municipal que a define como área de proteção de Mananciais - APREM (São Carlos, 2006).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

A área de estudo corresponde à sub-bacia do Rio Monjolinho (Figura 1) no trecho que possui como limite superior as nascentes do Rio Monjolinho e limite inferior a estação de captação de água superficial do Monjolinho (ETA Monjolinho-Espraiado) com total de 33 km<sup>2</sup>. O abastecimento público de 10 a 15% da cidade de São Carlos é proveniente das cabeceiras do rio Monjolinho e há na área diversos poços que captam água dos aquíferos superficiais para abastecimento humano, dessedentação animal e produção agrícola.

A bacia localiza-se em região periurbana da

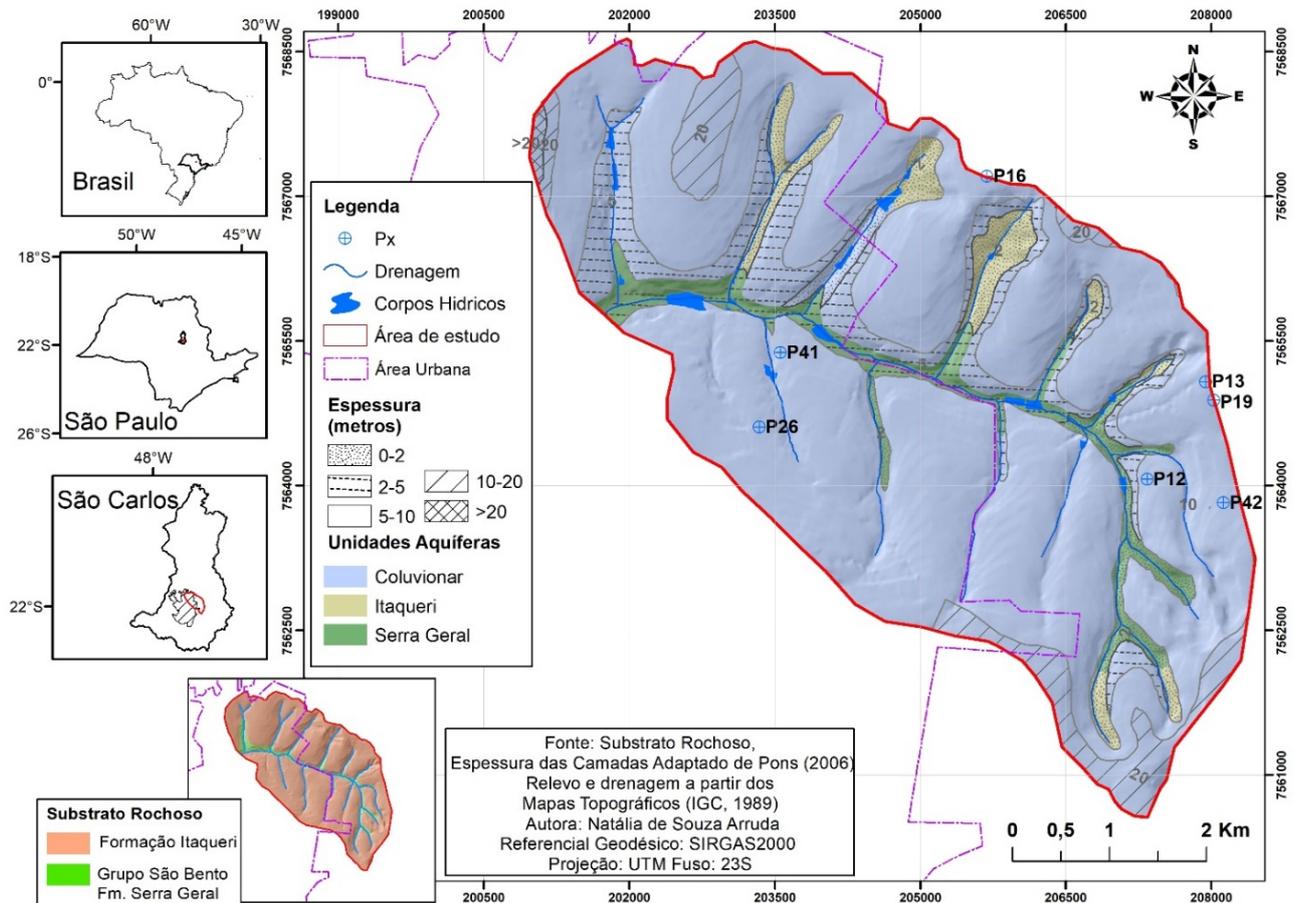
cidade de São Carlos - SP e possui como dinâmica de ocupação a zonas urbanas consolidada e em expansão e a zona rural, como principais atividades cultivo de hortaliças, cana-de-açúcar e extensas áreas de pastos.

A rodovia Washington Luiz atravessa a região urbana na área de estudo, na margem esquerda do Rio Monjolinho, proporcionando a instalação de indústrias e comércios facilitada pelo escoamento rodoviário, proximidade da área urbana e bairros residenciais.

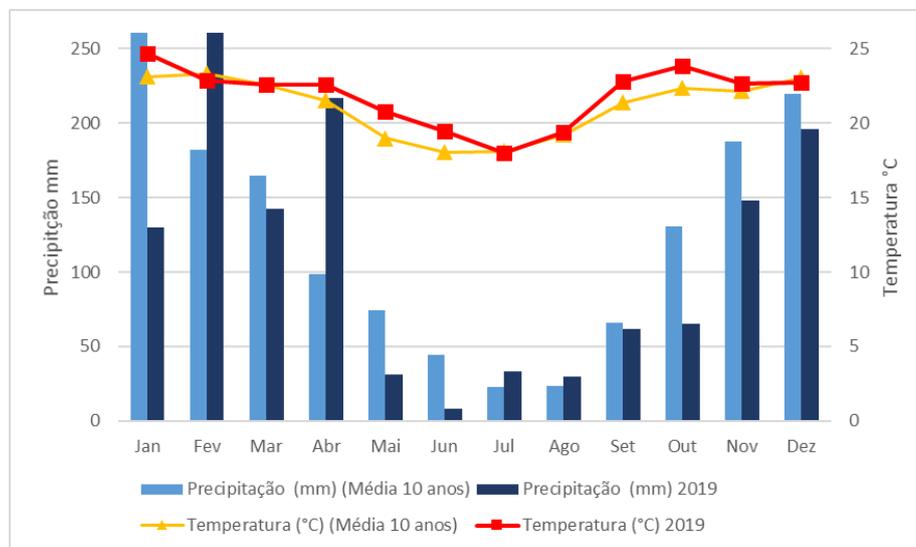
O clima da região é tropical semiúmido, classificação Cwa segundo *Koppen*. São registradas

precipitações baixas entre os meses de maio e setembro com e para os meses restantes alta precipitações (Figura 2). A média de temperatura para os meses de baixa precipitação nos últimos dez anos foi de 19,04°C. e para o período chuvoso as temperaturas médias ficam entre 22,51°C. No

ano de 2019 registrou-se chuvas atípicas nos meses de fevereiro e abril, em quase todos os meses as temperaturas médias foram maiores no ano de 2019 comparando com médias dos últimos 10 anos, em destaque para os meses de abril, maio, junho, setembro e outubro (CPPSE, 2020).



**Figura 1** - Localização da sub-bacia do rio Monjolinho no município de São Carlos – SP, o seu substrato rochoso, poços estudados e as unidades aquíferas delimitadas.



**Figura 2** - Médias das temperaturas mensais e soma das precipitações mensais do ano de 2019 em comparação com as médias dos últimos dez anos (Fonte: CPPSE, 2020).

A sub-bacia do Rio Monjolinho estudada encontra-se sobre substrato rochoso da Bacia Vulcano-Sedimentar do Paraná, ocorrendo rochas

dos derrames basálticos da Formação Serra Geral do Grupo São Bento, sobrepostas pelas rochas sedimentares Formação Itaqueri do Grupo Bauru.

Dos materiais inconsolidados registrados na área de estudo, que são parte do substrato para os aquíferos freáticos na área, há o predomínio do Retrabalhado Coluvionar, denominado Arenoso III (Pons, 2006) ou Cenozoico (Failache, 2018), pequenas ocorrências do retrabalhado Orgânico em alguns fundos de vale e os inconsolidados residuais da Formação Itaqueri e da Formação Serra Geral que aparecem nos entalhes das drenagens (Pons, 2006). Neste trabalho adotamos a denominação Retrabalhado Coluvionar, referente a estas duas denominações dos dois autores.

O material Retrabalhado Coluvionar ocorre de maneira mais expressiva na sub-bacia, apresenta contribuição de materiais inconsolidados de diferentes litologias da região e ocorre acima de residuais da Formação Itaqueri ou residuais da Formação Serra Geral. Possui textura areno-argilosa, homogêneo e frequentemente apresenta linhas de seixos em profundidade de 2,5 a 8 m, que comumente marcam o contato inferior (Pons, 2006). Em mapeamento geológico-geotécnico na região de São Carlos (Failache, 2018), o material foi classificado com textura franco-argilo-arenoso com as frações de 36% de argila, 16% de silte, 34% de areia fina e 9%, areia média, coloração amarelo avermelhada. Segundo dados de perfil de sondagens e poços profundos as espessuras variam de 5 a 20 m, predominando a faixa de 5 a 10 m na maior parte da bacia (CPRM, 2019).

Os residuais da Formação Itaqueri afloram próximo a nascentes e canais dos afluentes de 1ª e 2ª ordem da cabeceira e margem direita do Rio Monjolinho, em cotas topográficas acima de 857m. As espessuras das camadas dos residuais da Formação Itaqueri são de 2 metros, apresenta composição de areia fina (60%), areia média (2 a 20%), silte (5 a 28%) e argila (10 a 63,5%) (Pons, 2006), constituída por quartzo, caulinita, gibbisita, illita e esmectita (Failache, 2018).

Os residuais da Formação Serra Geral afloram nas calhas dos rios abaixo da cota de 845 m são compostos por areia fina de 10 a 35%, silte de 20 a 45%, e argila entre 25 a 60% (Pons, 2006). A composição mineralógica da fração argila é composta por caulinita e gibbisita e da fração areia fina pelo quartzo, magnetita e ilmenita além de goethita, esmectita e limonita (Failache, 2018).

Segundo a Carta Hidrogeológica, Folha SF23 (CPRM, 2015), em escala de 1:1.000.000, parte da área da bacia está sobre a unidade hidroestratigráfica Itaqueri, com baixo potencial hidrológico local, foi classificado como classe 5. Localmente o

aquífero possui importância na dinâmica do manancial superficial. Na folha ainda, não existem referências das análises hidroquímicas do aquífero atestando a necessidade de informações a respeito da qualidade da água.

### **Metodologias adotadas na pesquisa**

#### ***Classificação dos aquíferos na área***

Visando gerar um mapa de unidades aquíferas individualizadas, neste trabalho os aquíferos da área estudada (Figura 1) foram classificados conforme o material inconsolidado ocorrente, seguindo a proposta de Costa et al. (2019). A partir do mapeamento dos substrato geológico e materiais inconsolidados e espessura desses materiais de Pons (2006) e antecessores, as unidades aquíferas presentes na área de estudo foram delimitadas em escala de 1:20.000, com informações do nível d'água presente tanto nas bibliografias consultadas quanto em dados dos poços de captação da água subterrânea da região, levantados no Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE e no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas-SIAGAS do Serviço Geológico do Brasil-CPRM, com auxílio das cartas topográficas (IGC, 1989)

#### ***Uso e cobertura do solo, seleção de poços e definição dos parâmetros***

Para definir o desenho da pesquisa, inicialmente foi realizada a análise e delimitação das classes de uso e cobertura do solo buscando a investigação de geoindicadores presentes em cada classe.

Foram definidas 17 classes de uso e cobertura do solo, entre elas estão os comércios, indústrias e construções potencialmente poluidoras. A imagem utilizada para a delimitação das classes de uso e cobertura do solo foi do satélite Digital Globe da plataforma Google Earth Pro ©, ano de 2019. A classificação foi complementada com investigação em campo de atividades potencialmente contaminantes em funcionamento e áreas contaminadas apresentadas na Relação de áreas contaminadas do estado de São Paulo, (CETESB, 2019).

Na sub-bacia foram recuperados dados e localização de 20 poços que retiram, ou retiraram água do aquífero freático. Desses foi possível a investigação e coleta de água de 7 poços, sendo cinco localizados na zona rural e 2 localizados na zona urbana (Tabela 1), próximos a unidades industriais ou de comércio.

A partir dos usos e cobertura do solo e parâmetros básicos de qualidade de águas subterrâneas, foram determinados parâmetros físico-químicos para a investigação da qualidade da água na área (Figura 3).

**Tabela 1** - Características dos poços dos quais foram coletadas as águas para análise.

Poço	Prof. (m)	NE (m)	Local	Uso	Aquífero
P12	23,7	9,0	Rural	Irrigação	Coluvionar
P13	59,5	15,0	Rural	Sanitário	Formação Itaqueri
P16	72,0	33,0	Rural	Sanitário/ Dessedentação	Formação Itaqueri/ Coluvionar
P19	64,0	S/I	Rural	Sanitário	Formação Itaqueri
P26	10,1	2,2	Urbana	Recreação	Coluvionar
P41	S/I	S/I	Urbana	Sanitário	Formação Itaqueri
P42	S/I	18	Rural	Sanitário	Formação Itaqueri

Parâmetro	Método	Parâmetro	Método
pH	Phmetro AK95	Na	SMWW 3120 B
T °C	Phmetro AK95	K	SMWW 3120 B
CE µS/cm	Condutivímetro	Mg	SMWW 3120 B
STD ppm	Condutivímetro	Ca	SMWW 3120 B
ORP mV	Medidor de bolso AK95	B	SMWW 3120 B
OD ppm	Medidor de bolso AK95	NO <sub>3</sub>	USEPA 300.0
Pb	Espectrofotômetro	NO <sub>2</sub>	USEPA 300.0
Zn	Espectrofotômetro	Cl-	USEPA 300.0/ SMWW 4500- E
Cu	Espectrofotômetro	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	USEPA 300.0
Cd	Espectrofotômetro	N-NH <sub>3</sub>	USEPA Method 350.2
As	SMWW 3120 B	P	SMEWW 4500 P E
Al	SMWW 3120 B	Glifosato	USEPA 300.0
Fe	SMWW 3120 B	Fl <sup>-</sup>	USEPA 300.0
Mn	SMWW 3120 B	Atrazina	USEPA 8270 D

**Figura 3** - Parâmetros e métodos das análises.

Para as coletas, a metodologia seguida foi do *Standart methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2012). Alguns parâmetros foram medidos em campo: pH, condutividade (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), oxigênio dissolvido (OD) e potencial de oxirredução (ORP) e os demais em laboratório.

A primeira fase de coleta das amostras foi realizada em três dias (28/03, 29/03 e 1/04 de 2019) no final do período chuvoso, e a segunda fase de coleta foi realizada em dois dias (30/09 e 4/10 de 2019) no final do período seco. Os parâmetros foram interpretados conforme padrões estabelecidos pela bibliografia e conforme padrões de potabilidade exigidos por legislações federais e estaduais.

#### **Análises dos resultados**

O uso e cobertura do solo foi analisado quanto a presença das atividades antrópicas que podem gerar alteração química nas águas subterrâneas,

desta maneira após a delimitação detalhada do uso do solo foram analisados 28 parâmetros físico-químicos.

Com a escolha dos indicadores e poços as coletas das amostras das águas subterrâneas foram realizadas em dois períodos na ânsia de investigar alterações conforme o regime pluviométrico.

Os resultados das análises físico-químicas foram interpretados a partir das unidades aquíferas, o uso do solo e comparação com resultado de análises anteriores em regiões próximas a sub-bacia estudada. Outra análise realizada foi quanto a potabilidade da água em relação as legislações vigentes.

Os teores foram interpretados conforme a localização dos poços quanto ao uso e cobertura do solo de entorno e posteriormente comparados com valores estabelecidos conforme a Resolução CONAMA nº 396/2008 (Brasil, 2008) e Portaria nº 5 do Ministério da Saúde (Brasil, 2017).

## **RESULTADOS**

### **Uso e cobertura do solo**

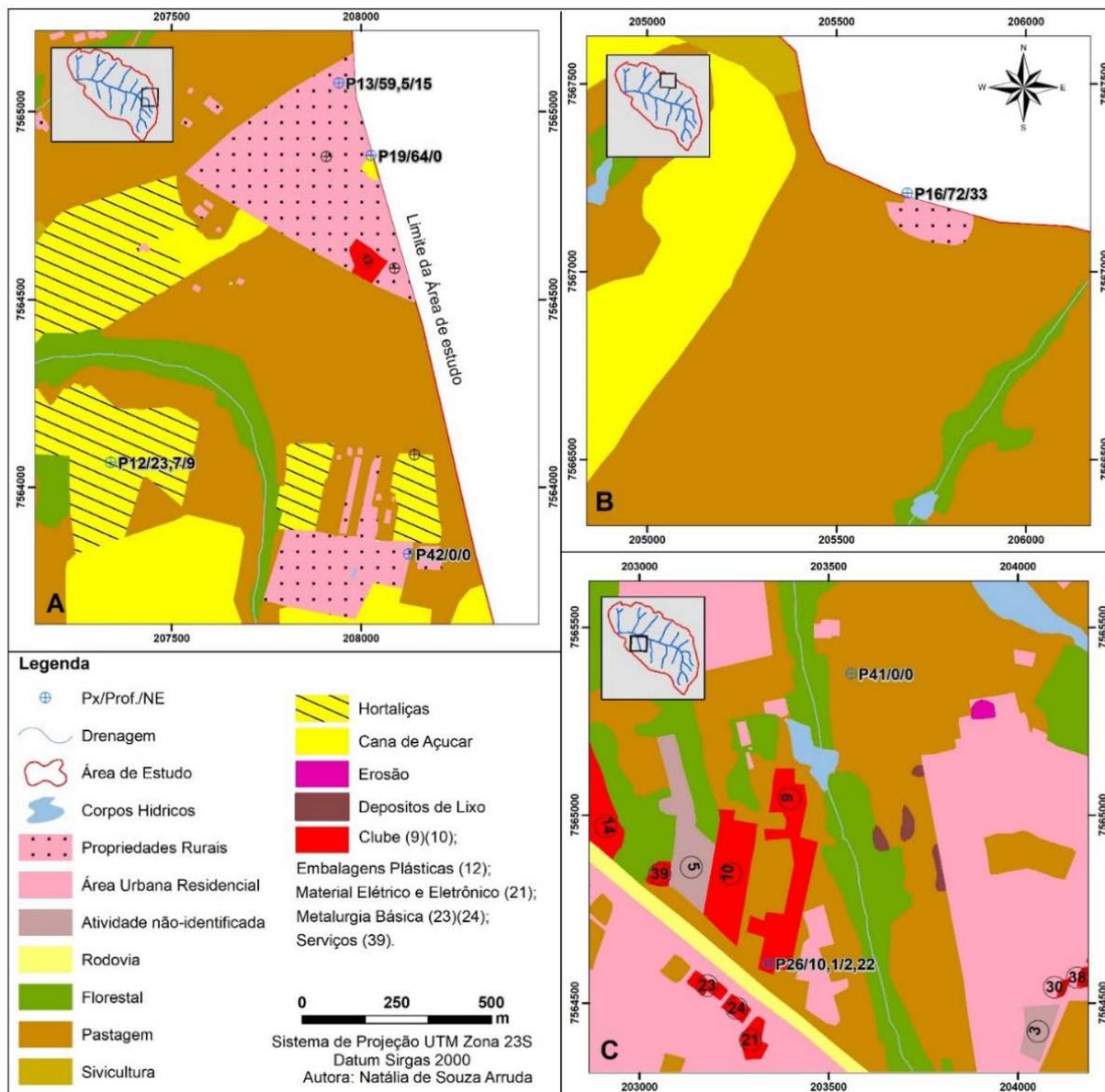
Os poços P12, P13, P16, P19 e P42 estão localizados na região rural da sub-bacia (Figuras

4A e B) e possuem dinâmica de uso no entorno variada. O P12 extrai água para o cultivo hidropônico de hortaliças. Já os poços P13 e P19

se encontram próximos e são para uso sanitário, sendo o P19 localizado ao lado de uma pequena plantação de cana-de-açúcar. O P16 é utilizado para a dessedentação animal e está localizado no limite da área de estudo.

Dos poços localizados dentro do perímetro

urbano (Figura 4C), o P26 é para uso sanitário e está ao lado de piscinas, rodovias e atividades comerciais e industriais. O poço P41 também tem como finalidade o uso sanitário de chácara de eventos e não possui atividades comerciais e ocupações residenciais próximas. .



**Figura 4** - Uso do solo no entorno dos poços investigados. (A) Estão representados os poços P12, P13, P19 e P42, todos localizados na região rural da área de estudo; (B) P16 também localizado na região rural e no limite da sub-bacia; (C) Estão representados os poços P26 e P41 localizados dentro do perímetro urbano e próximos a indústrias e comércios localizados na margem da rodovia.

Dos geoindicadores testados, alguns foram considerados mais relevantes. Para poços localizados na zona rural foram o  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , K/Na, P, pesticidas e herbicidas, onde há a possibilidade da contaminação por fertilizantes e insumos como por exemplo na produção de hortaliças e cana-de-açúcar (P12, P16 e P42), além da contaminação por fossas sépticas, como por exemplo nos poços P13 e P19. Já na zona urbana a possibilidade de compostos contaminantes

aumenta como no caso do poço P26, localizado próximo à rodovia que possui intenso tráfego de veículos pesados, piscinas, restaurante e atividades comerciais como: indústria de material elétrico, metalurgia básica, estacionamento de ônibus podendo ser considerados como geoindicadores o  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{N}$ -nitrito,  $\text{Mg}/\text{Ca}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Zn}$  e outros metais.

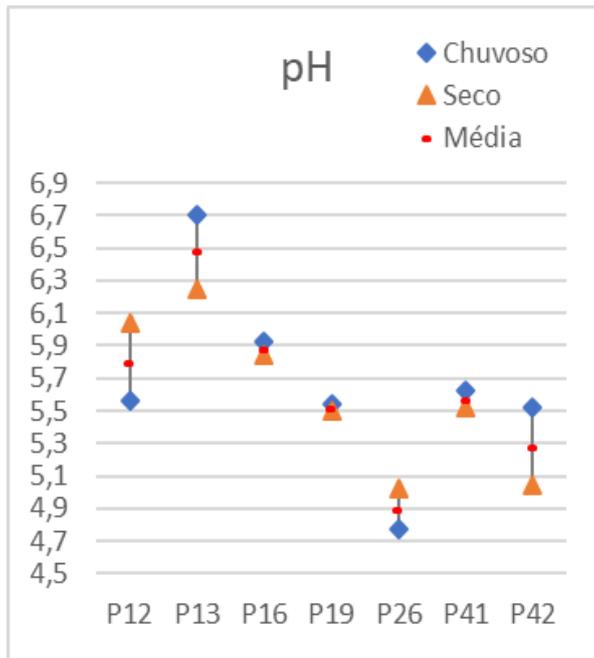
#### Apresentação das análises de água

As águas coletadas nestes poços foram classificadas como ácidas e, segundo sua alcalinidade,

estão em faixas de minerais ácidos e bicarbonatos.

Os poços P12 e P26 apresentaram pH mais elevado no período seco; já os poços P13, P16,

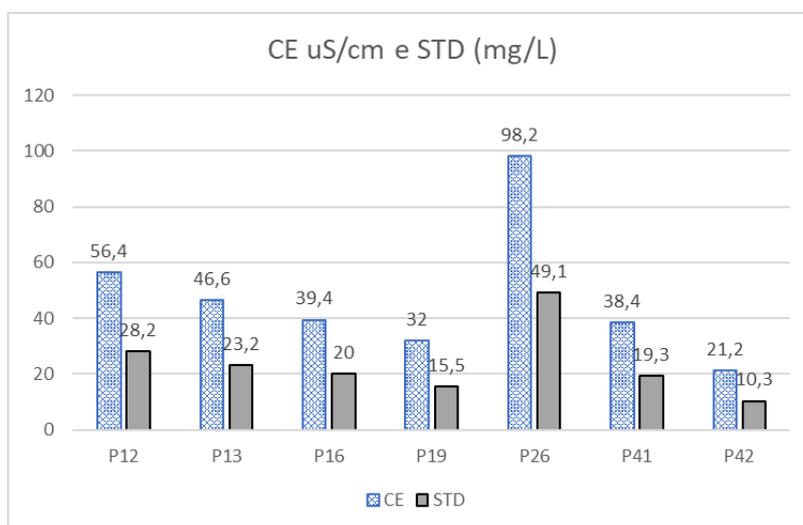
P19, P41 e P42, apresentaram pH mais elevado no chuvoso. Os poços P12, P13 e P42 apresentaram uma variação mais significativa, não chegando a uma unidade (Figura 5)



**Figura 5** – Quadro do pH das águas analisadas observados nos poços monitorados em períodos seco e chuvoso.

A condutividade elétrica (CE) e os sólidos totais dissolvidos (STD) foram medidos apenas no período seco (Figura 6). Os teores de STD ficaram entre 10,3 a 28,2 mg/L e a CE entre 21,2 e 56,4 uS/cm, com exceção do poço P26 que apresentou valores mais elevados, fora dessa faixa, com STD 49,1 mg/L e CE, 98,2 uS/cm; vale ressaltar que o valor de pH neste poço foi de 5,02 no mesmo período, sendo a água mais ácida coletada. O poço P12 foi o segundo que

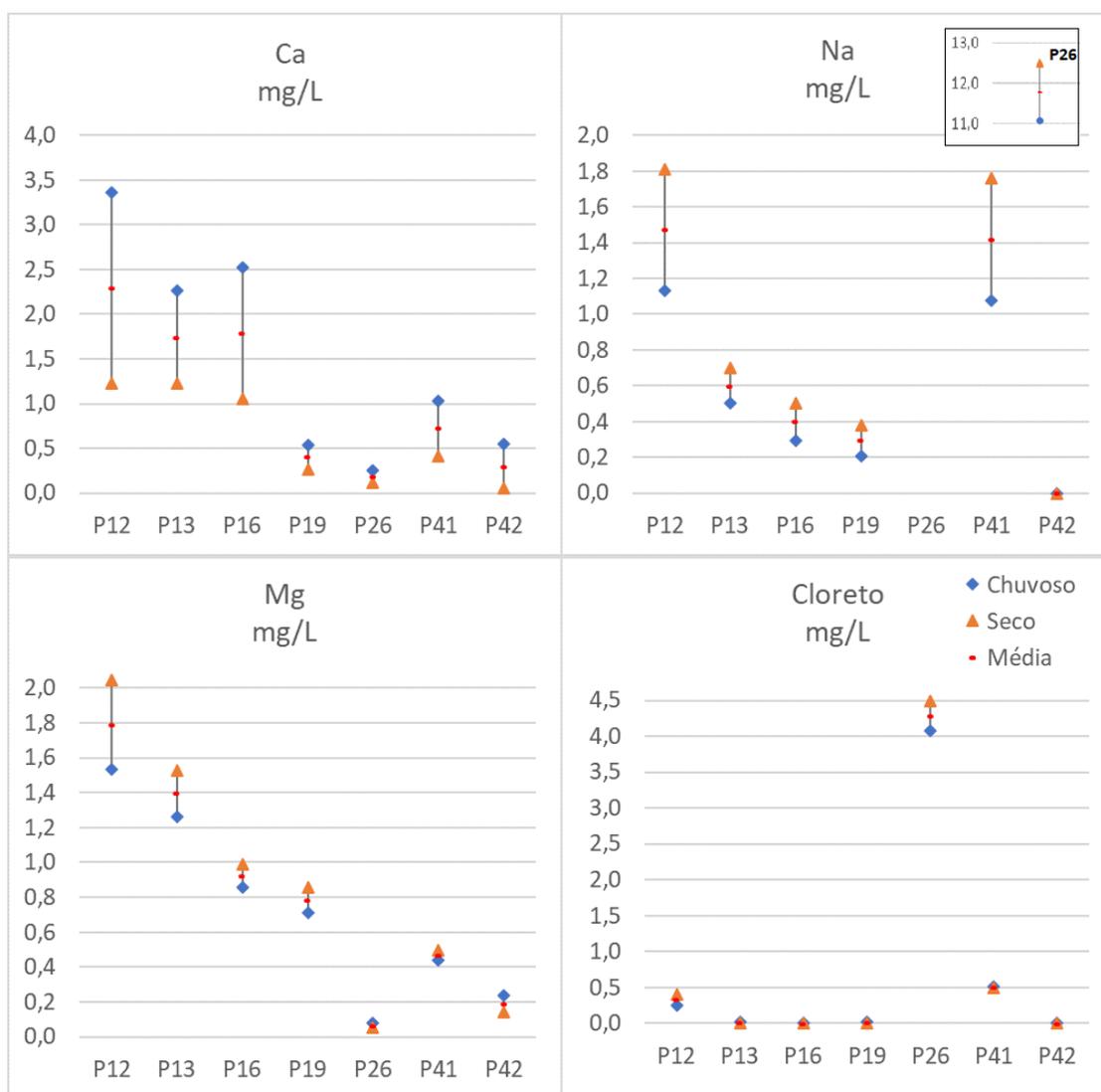
apresentou valores de CE e STD mais elevados. Quanto à localização os poços P13, P16, P19 e P42 são topograficamente mais elevados (902 m, 912 m, 900 m respectivamente) e estão localizados no divisor da bacia estudada; apresentaram valores similares de CE e STD. O poço P41 localizado em cotas mais baixa (836 m) e mais próximo ao rio Monjolinho apresentou valores dentro da faixa dos poços de topografias elevadas.



**Figura 6** - Condutividade Elétrica e Sólido totais dissolvidos observados nos poços monitorados em período seco.

Pela figura 7 verifica-se que o cálcio apresentou valores superiores no período chuvoso quando comparado com o período

seco em todos os pontos amostrados. As concentrações no período chuvoso variaram de 0,257 mg/L no P26 a 3,360 mg/L no P12, sendo que no



**Figura 7** - Teores de cálcio, sódio, magnésio e cloreto observados nos poços monitorados em períodos seco e chuvoso.

período seco os valores variaram de 0,053 mg/L no P42 a 1,230 mg/L no P13. O sódio apresentou baixas concentrações, com exceção do poço P26 que apresentou valores de 11,087 mg/L no período chuvoso e 12,507 mg/L no período seco.

Nas concentrações de magnésio houve valores maiores no período seco em relação ao chuvoso com exceção dos poços P26 e P42 que tiveram menores teores no período seco; no período chuvoso variaram entre 0,079 mg/L no P26 e 1,535 mg/L no P12 e no período seco os valores variam de 0,052 mg/L no P26 e 2,046 mg/L no P12.

Quanto à dureza total, resultado das concentrações de íons  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$ , todos os poços foram classificados como águas moles; no período chuvoso a dureza observada, controlada pelo  $\text{Ca}^{+2}$ , foi maior do que no período seco, controlada pelo íon  $\text{Mg}^{+2}$ . Os poços P12, P13 e P16 apresentaram os maiores valores em ambos períodos.

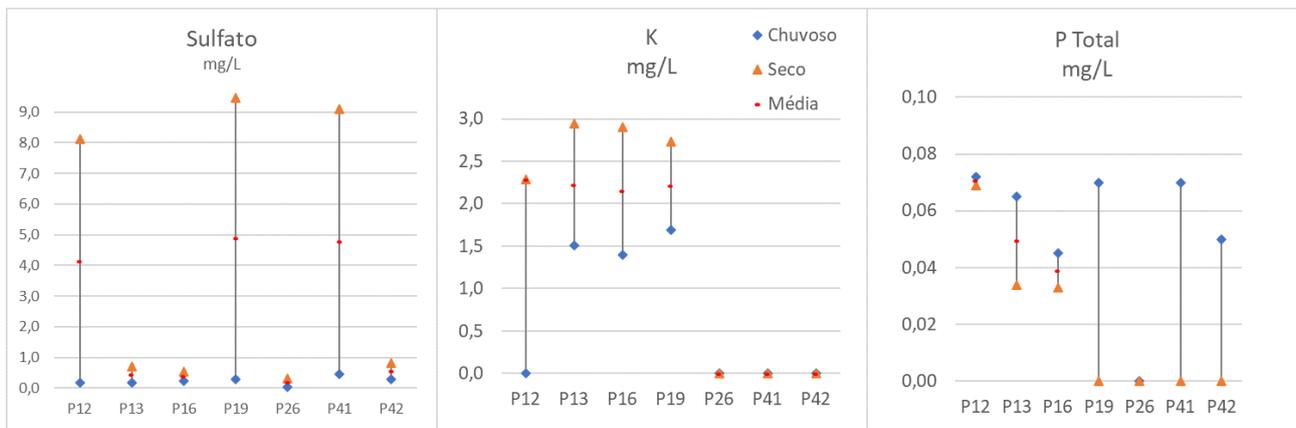
O cloreto, apesar dos métodos de análise

terem sido diferentes nos 2 períodos, não apresentou variação sazonal; os resultados encontrados foram ligeiramente superiores nos poços P12 e P41, mas muito superiores no P26 com teores de 4,08 mg/L no período chuvoso e 4,50 mg/L no período de baixa pluviosidade.

Os teores de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) tiveram valores superiores no período seco (Figura 8), sendo que os poços P12, P19 e P41 apresentaram valores de 8,12, 9,47 e 9,105, respectivamente. No período chuvoso o maior valor registrado foi no P41 com 0,46 mg/L. Os demais poços apresentaram valores abaixo de 1,00 mg/L, tanto no período chuvoso quanto no período de baixa pluviosidade.

Os teores de potássio nas amostras dos poços P12, P13, P16 e P19 também registraram variação significativa entre os períodos analisados. Sendo que o P12 no período chuvoso registrou valor abaixo do limite de quantificação (1,109 mg/L).

No período de alta pluviosidade o fósforo apre-

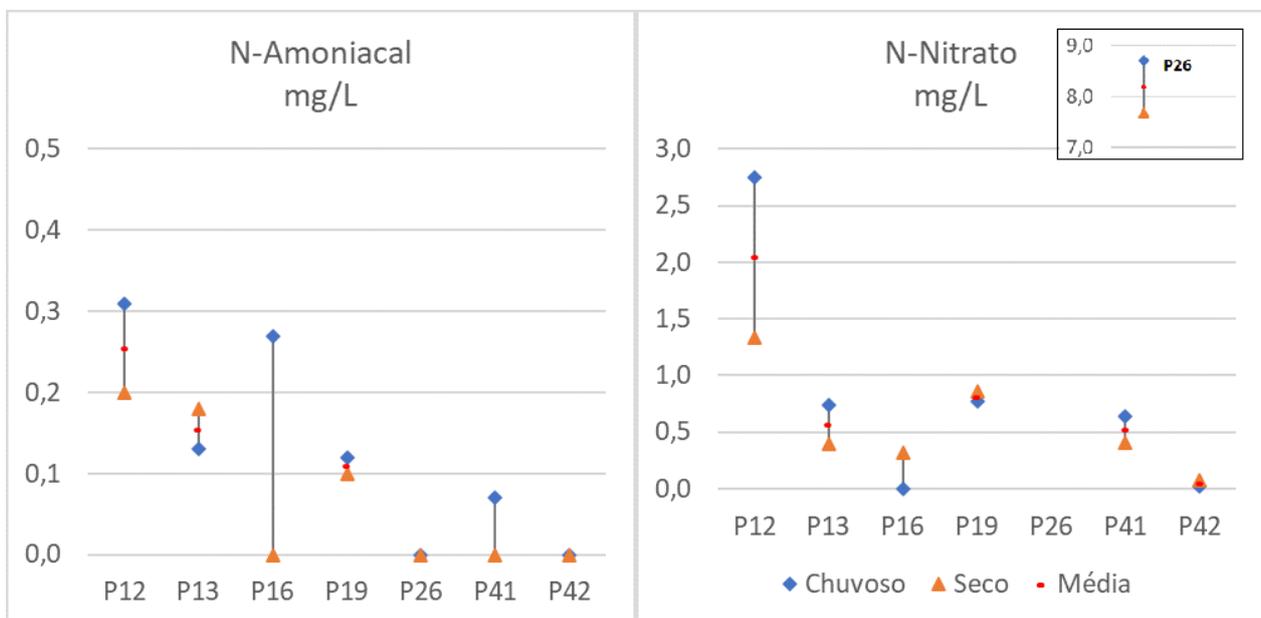


**Figura 8** - Teores de sulfato, potássio e fósforo total observados nos poços monitorados em períodos seco e chuvoso.

sentou valores entre 0,045 e 0,072 mg/L (P16 e P12, respectivamente) com o poço P26 registrando teores abaixo do limite de quantificação (0,029 mg/L). Já no período de baixa pluviosidade, a presença de valores abaixo do limite de quantificação (LQ) se estendeu para o P19, P41 e P42. Os poços P12, P13 e P16 tiveram teores menores quando comparados com o período chuvoso (0,069; 0,034 e 0,033 mg/L respecti-

vamente).

Os teores de nitrogênio (N) amoniacal (Figura 9) no período chuvoso foram de 0,07 mg/L do P41 a 0,031 do P12 mg/L, sendo que os poços P26 e P42 apresentaram valores abaixo do limite de quantificação, permanecendo sem alteração no período de baixa pluviosidade e estendendo para o P16 e P41. O poço P13 registrou valores maiores no período seco.



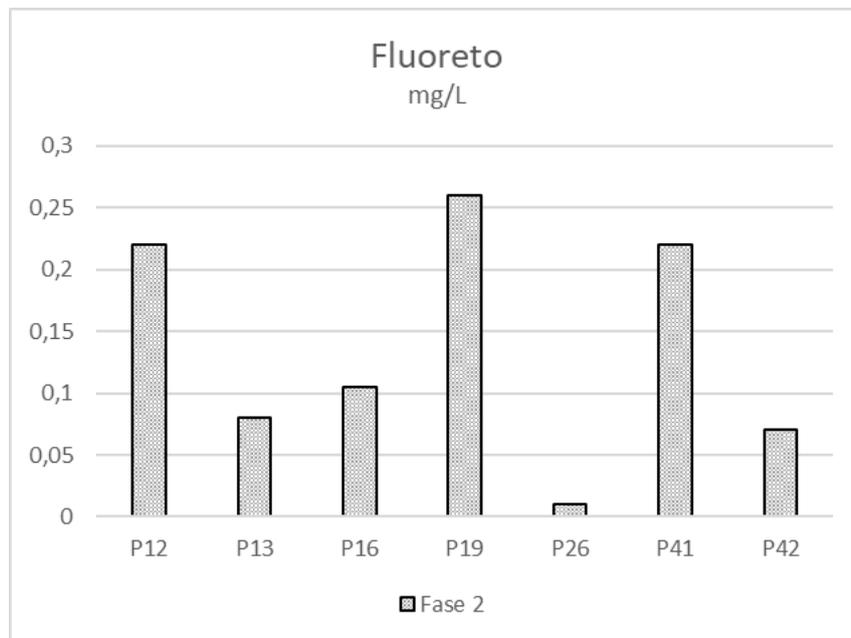
**Figura 9** - Teores de N-Nitrato e N-Amoniacal observados nos poços monitorados em períodos seco e chuvoso.

O poço P26 registrou teores de N-Nitrato de 8,7 mg/L no período chuvoso e 7,67 mg/L no período de seca, valores que são elevados quando comparados com as outras amostras. O poço P12 também apresentou valores mais elevados de Nitrito em comparação aos demais poços, variando de 2,75 no período chuvoso para 1,34 mg/L no período seco.

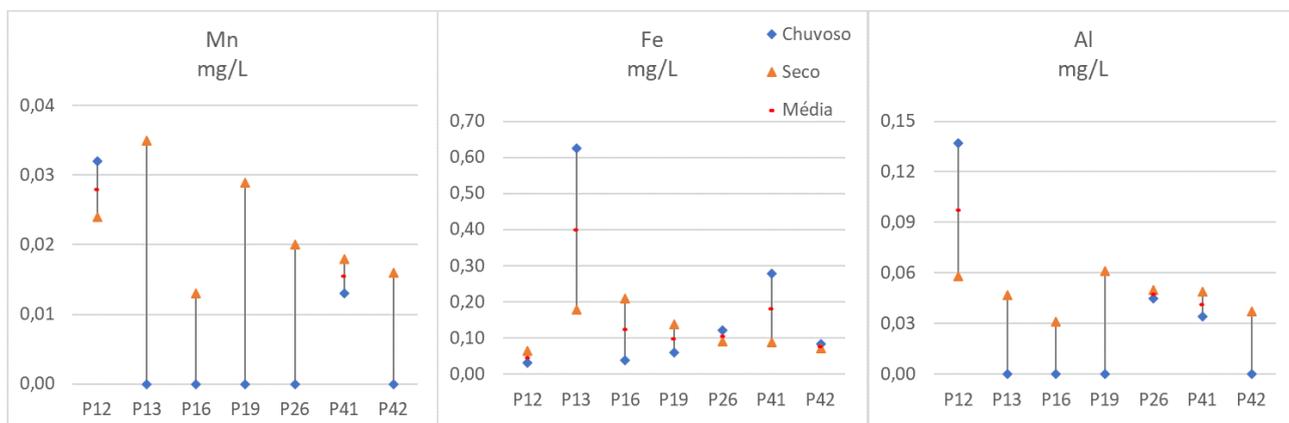
Os teores mais altos de fluoreto foram registrados nos poços P12, P19 e P41 (Figura 10).

Os teores de manganês (Figura 11) no período chuvoso registraram valores acima do limite de

quantificação nos poços P12 e P41, com teores de 0,032 e 0,013 mg/L, respectivamente. No período seco todos os teores ficaram acima do limite de quantificação, sendo que o maior valor registrado foi do P13 com 0,035 mg/L. Os teores de ferro tanto no período chuvoso quanto no período seco são bastante heterogêneos (Figura 9). Os poços P13 e P41 apresentaram valores altos de ferro no período chuvoso com 0,625 e 0,277 mg/L respectivamente. Os poços P16 e P19 tiveram registro de maiores teores de ferro total no período seco. Os poços P12, P26 e P41 apresentaram teores de



**Figura 10** - Teores de Fluoreto observados nos poços monitorados no período seco.



**Figura 11** - Teores de manganês, ferro e alumínio observados nos poços monitorados em períodos seco e chuvoso.

alumínio no período chuvoso acima do limite de quantificação (0,137 mg/L; 0,045 mg/L; 0,034 mg/L, respectivamente), sendo que o P12 se destacou por ter maiores concentrações tanto no período seco quanto no período chuvoso.

Outros metais analisados no período chuvoso foram o Cd, Pb, Cu e Zn (Figura 12). O P12, P13, P16 e P19 apresentaram registro de Cd acima de 0,006 mg/L, sendo que o P29 com 0,056 mg/L. Em todos os poços o Pb esteve abaixo do limite de quantificação. O Cu teve registro em torno de 0,015 e 0,018 mg/L nos P12, P13, P16 e P19, no P26 e P42 estão em 0,02 mg/L, e o maior valor apresentado foi no P41 com 0,045 mg/L. O Zn não registrou valores acima do limite de quantificação no P16 e P19, nos outros poços os valores ficaram entre 0,01 e 0,02 mg/L.

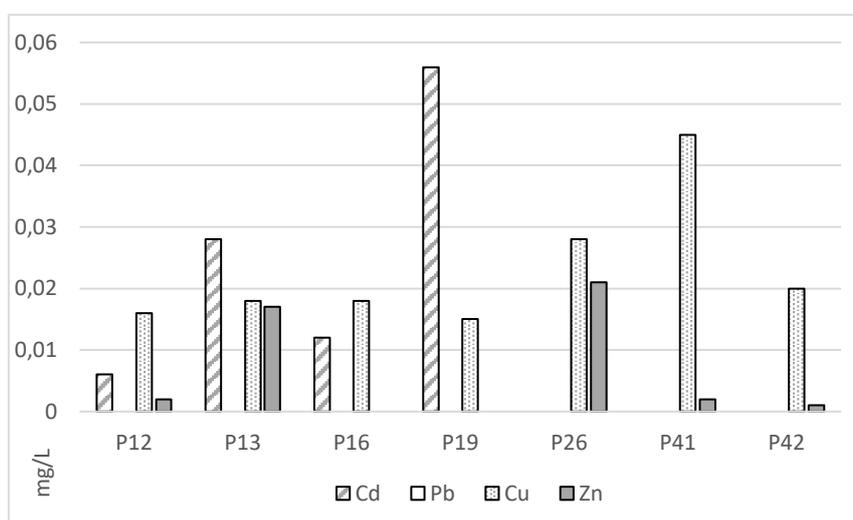
Os parâmetros Ar, B, N-NO<sub>2</sub>, Glifosato e Atrazina não apresentaram valores acima do limite de quantificação nas análises, assim como os parâmetros Pb no período chuvoso e Cd no

período de baixa pluviosidade. Sobre o Cádmiu é possível dizer que os valores registrados no período chuvoso são inconclusivos, visto que no período seco não foram detectadas variações.

#### Qualidade da água dos aquíferos freáticos

Em relação à qualidade da água coletada, foram feitas comparações com os valores máximos permitidos (VMP) para consumo humano da Resolução CONAMA n° 396/2008 (Brasil, 2008), em relação ao padrão de potabilidade definido pela Portaria n° 5 do Ministério da Saúde (Brasil, 2017), além de também os valores de orientadores para Solos e Águas Subterrâneas (CETESB, 2016).

A qualidade da água coletada no período chuvoso apresentou teores no poço P12 de Cd de 0,006 mg/L e Al de 0,137 mg/L acima do VMP (0,005 mg/L para Cd e 0,2 mg/L para Al). No poço P13, o teor de Cd estava acima do VMP (0,005 mg/L) com 0,028 mg/L e o de Fe acima do padrão de potabilidade (0,3 mg/L) com 0,625 mg/L.



**Figura 12** - Teores de cádmio, chumbo, cobre e zinco observados nos poços monitorados no período chuvoso.

No poço P13, o teor de Cd estava acima do VMP (0,005 mg/L) com 0,028 mg/L e o de Fe acima do padrão de potabilidade (0,3 mg/L) com 0,625 mg/L. No poço P16 o teor de Cd estava também acima do VMP com 0,012mg/L, e o P19 apresentou teor de 0,056mg/L. O teor de Nitrato do P26 (8,7mg/L) merece atenção pois este foi o único poço a registrar alto teor, próximo do padrão de potabilidade (10mg/L). O poço P41 teve o registro de Fe a 0,277mg/L, próximo ao

valor máximo permitido para potabilidade (0,3 mg/L). No período seco apenas dois poços tiveram valores próximo dos VMP (Brasil, 2017), com o teor de 0,21mg/L de Fe no P16, e o teor de 7,67mg/L de N-Nitrato no P26. No P26 esse valor foi mais significativo no período seco, indicando interferência antrópica na região do poço. Os valores de amônia diminuíram no período seco, isso pode ser pela menor infiltração de água, carreando a amônia do solo.

## DISCUSSÃO

A identificação das alterações físico-químicas nas águas subterrâneas freáticas permitiu a compreensão da qualidade de aquíferos freáticos ainda pouco investigados. O município de São Carlos possui parte do seu abastecimento feito pelo manancial superficial localizado na área estudada, que além da contribuição do escoamento superficial é mantido pelos aquíferos freáticos nela ocorrentes, contribuindo para a manutenção do ciclo-hidrológico na região.

Nos poços que captam água do aquífero coluvionar (P12 e P26) as concentrações de N-Nitrato foram maiores quando comparadas com as concentrações observadas no aquífero Residual Itaqueri (P13, P16, P19, P41 e P42). O poço P26, localizado na região urbana, apresentou as maiores concentrações de N-Nitrato. O N-Nitrato em ambiente oxidável é facilmente lixiviado, sendo considerados dentro do padrão de potabilidade os valores de até 10mg/L para águas subterrâneas (BRASIL, 2017). Teores elevados de N-Nitrato e N-Amônia podem indicar contaminação por esgotamento sanitário.

As concentrações de fluoreto nos poços localizados na zona rural no período seco ficaram entre 0,07 mg/L (P42) e 0,2 mg/L (P12 e P19);

quando se analisa as concentrações de aquíferos sedimentares como o Bauru o valor de referência de qualidade (VRQ) do F<sup>-</sup> aparece com 0,3 mg/L (CETESB, 2019). As fontes antropogênicas podem ser por efluentes industriais, queima de carbono, indústria plásticas e monocultura de cana-de-açúcar, características de uso observado próximo aos poços com maiores concentrações.

O sulfato em altas concentrações no período seco nos poços P12, P19 e P41 e o P total presente em todos os poços no período chuvoso, são parâmetros que merecem atenção, pois a sua presença pode indicar interferências das atividades antrópicas, já que não há fontes naturais destes compostos nos sedimentos e rochas dos aquíferos estudados. Em especial o P total possui como principal processo de entrada a alta taxa de lixiviação observada no período chuvoso, onde todos os poços apresentaram diminuição nas concentrações no período seco.

Na zona rural o poço P19 apresentou teores altos de sulfato e uma baixa abrupta do fósforo total no período seco; também apresentou no mesmo período a maior concentração de fluoreto registrada entre os poços. Os teores de N-Amônia e N-Nitrato se mantiveram constantes,

indicando entrada constante de nitrogênio. Estas particularidades indicam interferência das atividades antrópicas próximas ao poço (cana-de-açúcar, indústria de reciclagem plástica e esgotamento sanitário).

A diminuição do nitrato no período seco nos poços P12, P13, P26 e P41 mostra a tendência natural pelo processo de nitrificação já que a entrada da amônia diminui no período seco, o que pode ser explicado pela diminuição do processo de lixiviação pela água da chuva que ocorre em taxas mais elevadas no período chuvoso. Já nos poços P16 e P19, o processo de lixiviação pela ação da chuva não é a principal fonte de entrada de N-Nitrato nas águas subterrâneas, já que apresentou aumento da concentração de nitrato no período seco, sendo o nitrato extremamente móvel em solos com textura arenosa, podendo ocorrer em profundidades superiores.

Em relação aos aquíferos que estes poços exploram (Coluvionar e Itaqueri), tem-se a formação de dois grupos. Os poços P12 e P26 que retiram água totalmente do aquífero Coluvionar, tanto no período seco quanto no período chuvoso e o poço P16, que pode apresentar influência do aquífero Coluvionar na composição

da água. Os poços P13, P19, P41 e P42 têm como camada armazenadora os sedimentos da Formação Itaqueri.

A análise do pH nos dois períodos permitiu identificar que os poços localizados no aquífero Coluvionar apresentaram aumento do pH no período seco (P12 e P26), ou seja, momento em que nível freático encontra-se mais profundo. Os poços que retiram água do aquífero Itaqueri apresentaram diminuição do pH. Essa informação permite a interpretação quanto ao grau de solubilidade de alguns parâmetros analisados.

Na zona urbana o P26 apresentou o pH mais ácido entre as amostras analisadas, além de alta CE e STD. As concentrações de sódio e cloreto também foram as maiores registradas nos dois períodos. As concentrações de N-Nitrato também foram as maiores nos dois períodos, porém o N-amoniaco se encontra baixo, sinalizando contaminação pretérita. Este poço está localizado em um clube, que teve início da atividade na década de 60; em seu entorno há um condomínio residencial, piscinas e o restaurante do clube. Sendo assim, a contaminação pode ter ocorrido pelo vazamento de esgotamento sanitário próximo ao poço.

## CONCLUSÃO

Nossos resultados mostraram interferência das atividades antrópicas na hidroquímica dos aquíferos freáticos localizados na sub-bacia do rio Monjolinho tanto na zona urbana quanto na zona rural. A análise de parâmetros físico-químico como indicadores das atividades antrópicas se mostrou eficiente para análises de simples reconhecimento, dando embasamento para estudo aprofundado da hidroquímica dos aquíferos freáticos aqui analisados.

A interpretação de 28 parâmetros físico-químicos da água permitiu identificar diferenças hidroquímicas entre os aquíferos freáticos. O aquífero Coluvionar possui maior tendência a águas ácidas com aumento do pH em períodos de baixa pluviosidade. O aquífero Itaqueri apresentou diminuição do pH em período seco, confirmando a primeira afirmação.

As concentrações no período chuvoso de N-Nitrato foram mais elevadas quando comparadas com o período de baixa pluviosidade, o que pode evidenciar que a lixiviação é principal processo

de entrada de Nitrato nas águas freáticas. Em dois poços localizados na área rural, o processo de lixiviação pode ser controlado pela alta taxa de irrigação no período seco, sendo necessário adequação para a diminuição da entrada de contaminante chegando no lençol freático.

Em relação à diferença entre as regiões de uso e ocupação do solo, foi observado que os poços localizados na zona rural apresentaram variações e concentrações maiores dos parâmetros K e P Total, além do Ca. Outra particularidade relacionada ao uso do solo, foi que o P26 localizado na zona urbana apresentou altas concentrações de Na, Cl e N-nitrato, sugerindo contaminações provenientes de esgotamento sanitário, ou ainda a influência de vazamentos pelas piscinas localizadas no entorno.

Tratando-se de um importante manancial, os ciclos hidrogeológico e hidroquímico mostraram que estão sendo alterados na área, havendo a necessidade da correta gestão desses recursos para a manutenção dinâmica da bacia.

## AGRADECIMENTOS

Os autores externam seus agradecimentos aos proprietários dos poços e à EMBRAPA Pecuária Sudeste – São Carlos por autorizarem a coleta das amostras de água. À Profa. Dra. Valéria Guimarães

(EESC-USP) por realizar as análises dos metais pesados. Ao DAEE São Carlos e Araraquara por disponibilizar informações dos poços. Ao editor e revisores pelas contribuições. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE E. M.; AQUINO, D.N.; LUNA, N.R.S.; LOPES, F.B.; CRISÓSTOMO, L. A. Dinâmica do nível freático e da salinização das águas subterrâneas em áreas irrigadas. **Revista Ceres**, v. 63, n. 5 p. 621-630, 2016.
- APHA – American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22th ed., Washington, 2012.
- BASILIO, T. **Estudo de águas subsuperficiais em áreas de contribuição de fontes naturais suportadas por sedimentos cenozoicos e da formação Itaqueri, na região de São Carlos-SP**. São Carlos, 2019. 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos.
- BERGER, A. R. Assessing rapid environmental change using geoindicators. **Environmental Geology**, v. 32, n. 1, p. 36-44. 1997.
- BEZERRA, A. D. A.; ROCHA, J. C.; NOGUEIRA, E. R.; SOUSA, M. L.; ARAÚJO, F. G. D. M.; BRANDÃO, M.G.A. & PANTOJA L.D.M.; Análise situacional da qualidade de água subterrânea oriunda de poços da região metropolitana de Fortaleza, Ceará, Brasil. **ACTA Biomédica Brasiliense**, v. 9, n. 1, p. 94-104, 2018.
- BRASIL. Portaria de Consolidação Nº 5 de 03 de outubro de 2017. Ministério da Saúde. Anexo XX: **Do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Disp. em: [http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005\\_03\\_10\\_2017.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html). Acesso em: 3 jun. 2018.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 396 de 3 de abril de 2008. **Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências**. Disp. em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>.
- BURRI, N. M.; WEATHERL, R.; MOECK, C.; SCHIRMER, M. A review of threats to groundwater quality in the Anthropocene. **Science of the Total Environment**, v. 684, p. 136-154, 2019.
- CADONÁ, E.A. & LOURENZI, C.R.; SOUZA, E.L.; RAMPINELLI, E.C.; SANTOS, M.L.; SETE, P.B.; SOARES, C.R.F.S. Contaminação por nitrogênio e fósforo de águas destinadas ao consumo humano em região com intensa atividade suinícola. **Geociências**, v. 37, n. 4, p.883-891, 2019.
- CETESB (São Paulo). **Qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo 2016-2018**. 291p. 2019. Disp. em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/publicacoes-e-relatorios/>. ISBN 978-85-9467-091-5.
- CETESB (São Paulo). **Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo**. Dezembro de 2019. Disp. em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2020/02/Munic%C3%ADpios.pdf>.
- COSTA, C. W.; LORANDI, R.; LOLLO, J.A.; SANTOS, V.S. Potential for aquifer contamination of anthropogenic activity in the recharge area of the Guarani Aquifer System, southeast of Brazil. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 8, p. 10-23, 2019.
- CPPSE – Centro de Pesquisa Pecuária Sudeste. **Condições Meteorológicas**, Estação da Embrapa Pecuária Sudeste. Disp. em: <http://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg>
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Folha SF.23 Rio de Janeiro: carta hidrogeológica - escala 1:1.000.000**. Recife: CPRM, 2015.
- EDMUNDS, W.M. Indicators in the groundwater environment of rapid environmental change. In: BERGER, A.R.; IAMS W.J. **Geoindicators: Assessing rapid environmental changes in earth systems**. Balkema Rotterdam, 1996. Cap 8, p.135-150.
- ELMAHDY, S. I. & MOHAMED, M. M. Land use/land cover change impact on groundwater quantity and quality: a case study of Ajman Emirate, the United Arab Emirates, using remote sensing and GIS. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 9, n. 19, p. 722, 2016.
- FAILACHE, M. F. **Proposta de procedimentos para a estimativa da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial baseada em dados geológicos, geotécnicos de uso e ocupação e eventos de chuva**. São Carlos, 2018 v. 1, 332p. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo.
- FORTE, E. J.; AZEVEDO M. S.; OLIVEIRA, R. C.; ALMEDA, R. Contaminação de aquífero por hidrocarbonetos: estudo de caso na Vila Tupi, Porto Velho – Rondônia. **Química Nova**, v. 30. n. 7. p. 1539-1544, 2007.
- KHATRI, N. & TYAGI, S. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas. **Frontiers in Life Science**, v. 8, n. 1, p. 23–39, 2015.
- KLIMAS, A. & GREGORAUSKAS, M. Groundwater abstraction and contamination in Lithuania as geoindicators of environmental change. **Environmental Geology**. v. 42. p. 767-772, 2002.
- LAPWORTH D.J.; KRISHAN, G.; MACDONALD, A. M.; RAO, M.S. Groundwater quality in the alluvial aquifer system of northwest India: New evidence of the extent of anthropogenic and geogenic contamination. **Science of the Total Environment**, v. 599-600. p. 1433-1444, 2017.
- LEITE, N.K.; STOLBERG, J.; CRUZ, S.P.; TAVELA, A.O.; SAFANELLI, J.L.; MARCHINI, H.R.; EXTERKOETTER, R.; LEITE, G.M.C.; KRUSCHE, A.V.; JOHNSON, M. . Hydrochemistry of shallow groundwater and springs used for potable supply in Southern Brazil. **Environmental Earth Sciences**. v. 77, n. 80, 17p. 2018.
- LI, P.; TIAN, R.; XUE, C.; WU, J. Progress, opportunities, and key fields for groundwater quality research under the impacts of human activities in China with a special focus on western China. **Environ Sci Pollut Res**, v. 24, p. 13224–13234, 2017.
- LI, P.; WU, J.; QIAN H.; LYU, X.; LIU, H. Origin and assessment of groundwater pollution and associated health risk: a case study in an industrial park, northwest China. **Environ Geochem. Health**, v. 36, p. 693–712, 2014.
- LI, P.; WU, J.; TIAN, R.; HE, S.; HE, X.; XUE, C.; ZHANG, K. Geochemistry, Hydraulic Connectivity and Quality Appraisal of Multilayered Groundwater in the Hongdunzi Coal Mine, Northwest China. **Mine Water and the Environment**, v. 37, p. 222–237, 2018.
- NOGUEIRA, E.N.; DORES, E.F.G. C.; PINTO, A.A.; AMORIM, R.S.S.; RIBEIRO, M.L.; LOURENCETTIA, C. Currently Used Pesticides in Water Matrices in Central-Western Brazil. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 23, n. 8, p.1476-1487, 2012.
- PATRA, S.; MISHRA, P.; MAHAPATRA, S. C. Impacts of urbanization on land use /cover changes and its probable implications on local climate and groundwater level. **Journal of Urban Management**, v. 7, n. 2, p. 70–84, 2018.
- PEREIRA, A.C.A. & GARCIA, M.L. Disposição de lodo de ETE de indústria alimentícia no solo: efeitos na água subterrânea. **Geociências**, v. 36, n. 2, p. 275–283, 2017.
- PONS, N.A.D. **Levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos-SP, com auxílio de geoprocessamento**. 2006. 323 f. Tese

- (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RAMYAPRIYA, R. & ELANGO, L. Evaluation of geogenic and anthropogenic impacts on spatio-temporal variation in quality of surface water and groundwater along Cauvery River, India. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 2, p. 1–17, 2018.
- SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto – São Carlos. **Gerência de Operação de Tratamento de Água e Esgoto: Produção de Água e Esgoto Tratado**, 2017. Disp. em: <https://www.saaesaocarlos.com.br/saaesc/index.php/dados-de-saneamento/producao-de-agua-e-esgoto-tratado>
- SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto. **Revisão e complementação do Plano Diretor de Saneamento de São Carlos: nas disciplinas de abastecimento de água e esgotamento sanitário**. 130 p. 2012. Disp. em: [http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/pdf/Plano\\_diretor\\_saneamento/Relatorio\\_revisao\\_pmsc\\_agua\\_e\\_esgoto.pdf](http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/pdf/Plano_diretor_saneamento/Relatorio_revisao_pmsc_agua_e_esgoto.pdf)
- SANTOS FILHO, M.G.; HIRATA, R.; LUIZ, M.B.; CONICELLI, B. Solo e águas subterrâneas contaminadas pela deposição de resíduos Sólidos urbanos: o caso do vazadouro de Tatuí (sp). **Revista do Instituto Geológico**, v. 38, n. 1, p. 31-47, 2017.
- SÃO CARLOS. Lei nº 13.944, de 12 de dezembro de 2006. **Dispõe sobre a criação das Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais do Município de São Carlos – APREM**. Disp. em: [http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/concursos2009/lei%2013944\\_06%20-%20texto.pdf](http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/concursos2009/lei%2013944_06%20-%20texto.pdf).
- SÃO CARLOS. SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO. Lei nº 18.053 de 19 de dezembro de 2016. **Estabelece o Plano Diretor do Município de São Carlos, e dá outras providências**. Prefeitura Municipal de São Carlos: São Carlos-SP.
- STRADIOTO, M.R.; TERAMOTO, E.H.; CHANG, H.K. Nitrato em águas subterrâneas do estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**. v. 40, n. 3. p. 1-12. 2019.
- WU, J. & SUN, Z. Evaluation of Shallow Groundwater Contamination and Associated Human Health Risk in an Alluvial Plain Impacted by Agricultural and Industrial Activities, Mid-west China. **Exposure and Health**, v. 8, p. 311–329, 2016

*Submetido em 12 de junho de 2021  
Aceito para publicação em 25 de fevereiro de 2022*