

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**INFLUÊNCIA ANTRÓPICA NA QUALIDADE DOS**  
**AQUÍFEROS FREÁTICOS DA SUB-BACIA DO RIO**  
**MONJOLINHO**

**NATÁLIA DE SOUZA ARRUDA**

São Carlos-SP

2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**INFLUÊNCIA ANTRÓPICA NA QUALIDADE DOS  
AQUÍFEROS FREÁTICOS DA SUB-BACIA DO RIO  
MONJOLINHO**

**NATÁLIA DE SOUZA ARRUDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Denise Balestrero Menezes

São Carlos-SP

2020

Souza Arruda, Natália de

Influência antrópica na qualidade do aquíferos freáticos da sub-bacia do rio Monjolinho / Natália de Souza Arruda -- 2020.  
154f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos  
Orientador (a): Denise Balestrero Menezes  
Banca Examinadora: Reinaldo Lorandi, Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues  
Bibliografia

1. Qualidade da água subterrânea. 2. Aquíferos rasos. 3. Zona periurbana. I. Souza Arruda, Natália de. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Natália de Souza Arruda, realizada em 30/09/2020.

#### Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Denise Balestrero Menezes (UFSCar)

Prof. Dr. Reinaldo Lorandi (UFSCar)

Profa. Dra. Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues (USP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à orientação da Prof.<sup>a</sup> Denise Balestrero Menezes, pela orientação e parceria nos trabalhos de campo e durante todas as etapas deste trabalho.

Agradeço aos meus pais pela presença, conselhos e por eu me sentir sempre amparada e segura. Aos meus irmãos que definem muito bem a palavra amigo.

Aos amigos do PPGEU que deixaram os dias mais leves, Marina, Franciane, Monique, Djany, Danielly, Ileana e Lucas.

Aos amigos que reencontrei em São Carlos, Fernanda, Kiwi, Isabela, Thiago, Stephany, Lorenzo e Giuliano, obrigada pelas risadas, choros e descobertas.

Aos Professores, coordenadores e Secretário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*Embaixo sou doce  
Em cima salgada (..)  
Misturo sólidos com os meus líquidos(...)  
Eu não obedeco porque sou molhada(..)  
(Tulipa Ruiz)*

## RESUMO

A pressão das atividades antrópicas nos mananciais hídricos resulta na alteração da qualidade ambiental das bacias hidrográficas. Os aquíferos freáticos são importantes reservatórios e alimentadores dos mananciais superficiais. A análise dos indicadores geoambientais de rápida mudança auxiliam na interpretação da interferência antrópica na qualidade das águas subterrâneas. Para a gestão efetiva dos mananciais é necessário estudo da qualidade ambiental e dos possíveis impactos ambientais em regiões estratégicas nas bacias hidrográficas. A proposta desse trabalho foi investigar possível interferência antrópica na qualidade hidroquímica dos aquíferos freáticos na bacia hidrográfica do rio Monjolinho, a montante da captação de água do Espriado no município de São Carlos-SP. Este trecho da bacia está inserido em Área de Proteção e Recuperação de Mananciais, em região periurbana, com alta pressão imobiliária para expansão do perímetro urbano. Através do detalhamento do uso e ocupação do solo, dentro da zona rural e urbana dando atenção para atividades potencialmente poluidoras, foram escolhidos 28 parâmetros físico-químicos, amostrados em 7 poços freáticos, no período de alta e baixa precipitação. Pela interpretação das análises pode-se notar que os aquíferos freáticos Coluvionar e Itaqueri possuem hidroquímica diferente, sendo o aquífero coluvionar com tendência a águas mais ácidas e ausência de alguns metais. A interferência antrópica na qualidade hidroquímica foi observada nos poços P12, P13, P16, P19, P26 e P41. Sendo que o poço P26 apresentou altas concentrações de N-nitrato. O estudo identificou interferência das atividades antrópicas urbanas e rurais, como vazamento do esgoto sanitário e fertilizantes nos aquíferos freáticos na sub-bacia do rio Monjolinho.

Palavras-chave: Qualidade da água subterrânea; Aquíferos rasos; Zona periurbana; Contaminação.

## ABSTRACT

The pressure of human activities in water sources results in changes in the environmental quality of river basins. Groundwater aquifers are important reservoirs and feeders for surface water sources. The analysis of rapidly changing geoenvironmental indicators helps to interpret anthropic interference in the quality of groundwater. For the effective management of water sources, it is necessary to study the environmental quality and the possible environmental impacts in strategic regions in the hydrographic basins. The purpose of this work was to investigate possible anthropic interference in the hydrochemical quality of groundwater aquifers in the Monjolinho river basin, upstream of Espiraiado water abstraction in the municipality of São Carlos-SP. This section of the basin is inserted in a Protection and Recovery Area of Springs, in a peri-urban region, with high real estate pressure for the expansion of the urban perimeter. Through the detailing of land use and occupation, within the rural and urban areas, paying attention to potentially polluting activities, 28 physical-chemical parameters were chosen, sampled in 7 water tables, in the period of high and low precipitation. From the interpretation of the analysis, it can be noted that the aquifer Coluvionar and Itaqueri have different hydrochemistry, the aquifer being colluvial with a tendency to more acidic waters and the absence of some metals. Anthropic interference in hydrochemical quality was observed in wells P12, P13, P16, P19, P26 and P41. Well P26 showed high concentrations of N-nitrate. The study identified interference from urban and rural human activities, such as leakage of sanitary sewage and fertilizers in groundwater aquifers in the Monjolinho River sub-basin.

Keywords: Groundwater quality; Shallow aquifers; Periurban area; Contamination.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico e fluxo da água subterrânea. ....	5
Figura 2 - Potencial iônico .....	7
Figura 3 - Diagrama Eh - pH com os limites do campo de estabilidade .....	10
Figura 4 - Artigos publicados entre os anos de 1967-2020 na base de dado Scopus. .....	21
Figura 5 - Publicações brasileiras registradas na plataforma Scopus .....	25
Figura 6 - Gestão de recursos hídricos em âmbito nacional .....	28
Figura 7 - Gestão das águas subterrâneas no estado de São Paulo .....	29
Figura 8 - Sub-bacia do rio Monjolinho.....	33
Figura 9 - Médias das precipitações e temperaturas de 2010-2019.....	35
Figura 10 - Precipitação mensal de 2010 a 2019.....	36
Figura 11 - Modelo Hidrogeológico Regional .....	44
Figura 12 - Fluxograma com as etapas dos trabalhos. ....	48
Figura 13 - Coleta das amostras de água, frascos utilizados e medições realizadas em campo .....	55
Figura 14 - Equipamentos utilizados para medição em campo .....	55
Figura 15 - Fluxograma sistematizando procedimentos adotadas para análise do potencial poluidor. ....	58
Figura 16 - Somatória de pesos realizada pelo ArcGIS© para o desenvolvimento das matrizes.....	59
Figura 17 - Mapas de substrato rochoso e materiais inconsolidados da sub-bacia do rio Monjolinho. ....	62
Figura 18 - Perfil esquemático das unidades que estão aflorando na área de estudo. .....	63
Figura 19 - Altimetria e declividade da área de estudo. ....	64
Figura 20 - Precipitação e temperatura mensal dos últimos 10 anos em comparação com o ano de 2019.....	65
Figura 21 - Perfis hidrogeológicos da área de estudo .....	67
Figura 22 - Mapa dos aquíferos presentes na sub-bacia do Rio Monjolinho.....	69
Figura 23 - Nível estático dos aquíferos freáticos da área de estudo.....	70
Figura 24 - Mapa de Uso e Cobertura do Solo do ano de 2019. ....	72
Figura 25 - Áreas contaminadas no ano de 2019 (CETESB, 2019b) .....	73
Figura 26 - Matrizes e mapas do cruzamento 1 .....	75

Figura 27 - Matriz e mapa do cruzamento 2.....	76
Figura 28 - Mapa e matriz do Cruzamento 3.....	77
Figura 29 - Matriz e mapa do Cruzamento 4.....	77
Figura 30 - Potencial contaminante de área de estudo.....	79
Figura 31 - A: Poço 12; B: Caixa da água; C: Cultura de hortaliças hidropônica. ....	81
Figura 32 - Localização e perfil geológico do poço P12.....	82
Figura 33 - Perímetro do P13.....	82
Figura 34 - Localização e perfil geológico do poço P13 e P19.....	83
Figura 35 - P19 A: Plantação de cana de açúcar, com caixa d'agua ao fundo; B: Perímetro do poço; C: Poço e caixa d'agua. ....	84
Figura 36 - Localização e perfil geológico do poço P42.....	84
Figura 37 - A: Perímetro do P42; B: poço P42.....	85
Figura 38 - Localização e perfil geológico do poço P16.....	86
Figura 39 - P16 A: Perímetro do poço; B: poço P16.....	86
Figura 40 - Uso do solo dos poços P26 e P41.....	87
Figura 41 - A: Poço P26 B: Perímetro do P26.....	88
Figura 42 - P41 A: Coleta período chuvoso; B: Poço P41; C: Coleta no período seco com galão de cloro.....	88
Figura 43 - Valores da temperatura e oxigênio dissolvido.....	90
Figura 44 - Valores de Eh nos períodos chuvoso e seco.....	90
Figura 45 - Gráfico Eh por pH, influência do ambiente redox.....	91
Figura 46 - Teores do oxigênio dissolvido.....	92
Figura 47 - Condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos na Fase 2 de amostragem.....	93
Figura 48 - Teores dos íons cálcio, sódio, magnésio e cloreto.....	94
Figura 49 - Teores de sulfato e potássio.....	95
Figura 50 - Teores de fósforo total.....	96
Figura 51 - Teores de N-Amoniacal e N-Nitrato.....	97
Figura 52 - Parâmetro fluoreto analisado apenas no período seco.....	97
Figura 53 - Teores de ferro, manganês e alumínio.....	99
Figura 54 - Teores dos parâmetros Cd, Pb, Cu e Zn no período chuvoso.....	100
Figura 55 - Grau de disponibilidade segundo Malavolta, 1979.....	100
Figura 56 - Classificação hidroquímica através do Diagramas de Piper.....	102
Figura 57 - Gráfico de USSL.....	106

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Componentes inorgânicos naturais dissolvidos nas águas subterrâneas .8	
Quadro 2 - Alcalinidade em função do pH.....9	
Quadro 3 - Contaminantes mais comuns encontrados em águas subterrâneas. .... 13	
Quadro 4 - Geoindicadores relacionados às águas subterrâneas..... 17	
Quadro 5 - Indicadores da qualidade química das águas subterrâneas. .... 17	
Quadro 6 - Documentos publicados na base de dados <i>Scopus</i> .....20	
Quadro 7 - Comparação dos coeficientes de permeabilidade propostos em leis.....34	
Quadro 8 - Classificação das formas de relevo.....43	
Quadro 9 - Etapas de trabalho e as atividades realizadas. ....47	
Quadro 10 - Dados coletados.....50	
Quadro 11 - Bibliografias consultadas.....51	
Quadro 12 - Parâmetros analisados e os métodos utilizados. ....54	
Quadro 13 - Informações dos poços de acordo com o aquífero explorado .....66	
Quadro 14 - Atividades potencialmente poluidoras e os tipos de contaminantes.....74	
Quadro 15 - Informações dos poços freáticos amostrados .....80	
Quadro 16 - Classificação da água com o diagrama de Piper ..... 102	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos Aquíferos .....	44
Tabela 2 - VRQ dos aquíferos e VMP. ....	60
Tabela 3 - Características dos materiais inconsolidados .....	64
Tabela 4 - Classes delimitadas .....	71
Tabela 5 - Matriz resultante do cruzamento 5 .....	78
Tabela 7 - Coeficiente de correlação dos principais cátions .....	103
Tabela 8 - Coeficiente de correlação entre os principais ânions .....	104
Tabela 9 - VMP das legislações vigentes no estado de São Paulo para águas subterrâneas .....	104
Tabela 10 - Classificação das águas para irrigação .....	105

## **LISTA DE SIGLAS**

ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas

ANA – Agência Nacional de Águas

APREM-SC – Áreas de Preservação de Mananciais de São Carlos

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

DAEE – Departamento de Água e Energia Elétrica

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETA – Estação de Tratamento de Água

IGC – Instituto Geológico de Cartografia

LQ – Limite de Quantificação

MDE – Modelo Digital de Elevação

NA – Nível d'água

NE – Nível estático

ND – Nível Dinâmico

PD-SC – Plano Diretor de São Carlos

Q – Vazão Hidráulica

VMP – Valor Máximo Permitido

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS .....	4
2.1	OBJETIVOS GERAIS .....	4
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
3.1	AQUÍFEROS LIVRES .....	5
3.2	HIDROQUÍMICA .....	7
3.3	INFLUÊNCIA ANTRÓPICA.....	11
3.4	INDICADORES .....	16
3.5	ANÁLISE DE PARÂMETROS FÍSICOS-QUÍMICOS .....	17
3.5.1	DADOS HIDROGELÓGICOS EM AMBIENTE SIG .....	18
4	BIBLIOMETRIA.....	20
4.1	“GROUNDWATER QUALITY” .....	20
4.2	“GROUNDWATER QUALITY” EM ARTIGOS .....	22
4.2.1	PUBLICAÇÕES NACIONAIS .....	25
4.3	REVISÃO DAS PUBLICAÇÕES .....	26
5	LEGISLAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	28
5.1	LEGISLAÇÃO ESTADO DE SÃO PAULO .....	29
5.1.1	COMPETÊNCIA MUNICIPAL.....	31
6	ÁREA DE ESTUDO .....	33
6.1	CLIMA E PRECIPITAÇÃO .....	34
6.2	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO .....	36
6.2.1	VEGETAÇÃO .....	37
6.3	CARACTERIZAÇÃO GEOLOGICO-GEOTÉCNICA .....	37
6.3.1	GRUPO SÃO BENTO .....	38
6.3.2	FORMAÇÃO ITAQUERI.....	39

6.3.3	CENOZÓICO.....	40
6.4	MATERIAIS INCONSOLIDADOS .....	40
6.4.1	MATERIAIS INCONSOLIDADOS RESIDUAIS .....	41
6.4.2	MATERIAIS INCONSOLIDADOS TRANSPORTADOS.....	41
6.5	GEOMORFOLOGIA E DECLIVIDADE .....	42
6.5.1	MAPA DE <i>LANDFORMS</i> .....	42
6.6	HIDROGEOLOGIA E HIDROQUÍMICA .....	43
7	MATERIAIS E MÉTODOS .....	47
7.1	PLANEJAMENTO .....	48
7.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	49
7.2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	49
7.2.2	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	49
7.3	COLETA DE DADOS.....	50
7.3.1	ATRIBUTOS DO MEIO FÍSICO.....	51
7.3.2	PROCESSOS DE OUTORGA DOS POÇOS .....	51
7.3.3	ATIVIDADES ANTRÓPICAS.....	52
7.3.4	ÁREAS CONTAMINADAS .....	53
7.3.5	DEFINIÇÃO DOS INDICADORES .....	53
7.3.6	CAMPO .....	53
7.4	BANCO DE DADOS .....	56
7.4.1	MAPA DOS AQUÍFEROS .....	56
7.4.2	PERFIL GEOLÓGICO .....	56
7.4.3	MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO .....	56
7.4.4	CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS FREÁTICOS.....	56
7.5	ANÁLISE DOS DADOS .....	57
7.5.1	HIDROGEOLOGIA.....	57
7.5.2	POTENCIAL CONTAMINANTE.....	57

7.5.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICA.....	59
7.6 SÍNTESE .....	61
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	62
8.1 ATRIBUTOS DO MEIO FÍSICO .....	62
8.1.1 PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA .....	64
8.2 UNIDADES AQUÍFERAS.....	66
8.2.1 PERFIL HIDROGEOLÓGICO.....	66
8.2.2 MAPA DE UNIDADES AQUÍFERAS .....	68
8.3 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO .....	70
8.3.1 ÁREAS CONTAMINADAS .....	73
8.3.2 ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS .....	74
8.3.3 POTENCIAL CONTAMINANTE.....	75
8.4 CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS FREÁTICOS .....	80
8.4.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS .....	89
8.4.2 CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA.....	101
8.4.3 QUALIDADE DOS AQUÍFEROS FREÁTICOS .....	104
8.4.4 RISCO DE SALINIZAÇÃO .....	105
8.5 DISCUSSÃO.....	106
9 CONCLUSÃO .....	110
10REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
APÊNDICE I - MAPA DE DOCUMENTAÇÃO .....	122
APÊNDICE II - MAPA MATERIAIS INCONSOLIDADOS .....	124
APÊNDICE III - PERFIL HIDROGEOLÓGICO .....	126
APÊNDICE IV - MAPA DE AQUÍFEROS .....	128
APÊNDICE V - MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	130
APÊNDICE VI - TABELAS COM PERFIL DOS POÇOS .....	132
APÊNDICE VII - RESULTADOS DAS ANÁLISES .....	136



## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável para a vida. Devido aos processos de industrialização, urbanização e crescimento populacional, tem-se explorado cada vez mais as águas subterrâneas, consideradas fontes seguras de qualidade de recurso hídrico para abastecimento humano, industrial e rural, quando comparadas com as águas superficiais já impactadas pelos processos antrópicos. Na gestão de recursos hídricos é preciso avaliar os impactos naturais e antropogênicos na química das águas subterrâneas para o consumo humano, indústria, agricultura e dessedentação animal.

A falta de gestão e controle adequado no uso das águas subterrâneas, além dos impactos gerados na preservação das regiões de recarga, pode resultar na contaminação por diferentes atividades antrópicas, promovendo a perda de importantes mananciais e inutilização de poços, já que a remoção destes poluentes e reabilitação dos poços de captação de água subterrâneas, necessitam de altos recursos técnicos e financeiros (HIRATA, 1993).

A superexploração e a contaminação desses recursos hídricos subterrâneos são identificadas em escalas globais (ELMAHDY; MOHAMED, 2016; WU; SUN, 2016; PRATA et al. 2018.). A mudança natural e periódica do clima influencia na recarga, escoamento e descarga dos aquíferos. As atividades humanas estão gerando impactos ao ponto de potencializar essas variações que alteram a qualidade química do sistema. Para a utilização sustentável da água subterrânea, preservando sua qualidade, é necessário identificar possíveis fontes de poluição e os processos hidroquímicos que atuam.

A qualidade e a quantidade da água estão, portanto, ligadas, embora muitas vezes não sejam mensuradas simultaneamente. A quantidade de água é medida por poços de monitoramento ou abastecimento que registram variações do nível piezométrico em diferentes períodos. A qualidade da água é determinada pela análise de amostras de água coletadas periodicamente por esses poços de monitoramento. Os resultados do monitoramento da qualidade da água são importantes para determinar as tendências espaciais e temporais nas águas superficiais e subterrâneas. Avaliações locais, regionais e globais da qualidade da água (KHATRI; TYAGI, 2015), são eficazes na identificação rápida de alterações proporcionadas por agentes antrópicos.

Os estudos das águas subterrâneas tiveram avanços tanto na metodologia quanto nos recursos tecnológicos. Envolvem desde análise completa das amostras da água subterrânea, quando o ambiente possui dinâmica muito variável em grande escala, ou em um estudo mais direcionado, escolhendo parâmetros determinados através do ambiente, para analisar conforme o uso da água, seja para abastecimento humano, industrial ou para atividades rurais. As interpretações especializadas dos dados adquiridos são uma tendência para estudos de aquíferos, desenvolvidas através de modelagens, com análises estatísticas em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica).

Os impactos registrados nas águas subterrâneas são avaliados através da análise dos parâmetros físico-químicos, como citado anteriormente, com a proposta de geoindicadores. BERGER (1997) os definiu como grandezas, taxas, frequências e tendências aos processos e fenômenos geológicos, que estão sujeitos a mudanças, resultando na variação ambiental. São apresentados três grupos de geoindicadores de alteração química em águas subterrâneas: indicadores de salinidade; indicadores de poluição agrícola; e indicadores de poluição urbana e industrial.

Um exemplo para interpretar o ambiente a partir de geoindicadores é analisar as taxas de nitrogênio (N) para entender alterações provenientes de atividades antrópicas. Estudos com essa temática estão presentes em aquíferos de todo o mundo. No Brasil, estudos recentes identificaram taxas altas de nitrogênio em ambiente rural (VITÓ et al., 2016). Outro dado importante são alterações de aquíferos em áreas urbanas com registro de poluição oriunda de vazamento de esgoto (MENDES et al., 2017; GOMES et al., 2018;) e atividades industriais (IRATANI et al., 2013).

Na legislação brasileira são definidos valores máximos permitidos (VMP) de poluentes para as águas subterrâneas pelo Ministério da Saúde (MS) (BRASIL, 2017) e pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2019a); são valores que asseguram a saúde humana. Além disso, há outros artifícios legais para assegurar a qualidade do ambiente e dos recursos hídricos, como a Lei de Preservação e Recuperação de Mananciais, o Plano Diretor Municipal e a Outorga para utilização de Recursos Subterrâneos. Mas o controle da alteração química das águas subterrâneas subsuperficiais ainda é escasso a nível municipal. O que se encontra são estudos regionais que não apresentam detalhamento suficiente de

parâmetros presentes na realidade do uso do solo de determinado município, servindo como base para avaliar áreas industriais, urbanas, periurbanas e rurais.

Sendo assim, a quantificação de parâmetros físico-químico como por exemplo condutividade elétrica (CE), pH, nitrato, metais e sais das águas subterrâneas superficiais precisam ser analisados em conjunto com as atividades circundantes, apresentando dados em escala de detalhe como proposta de documento que auxilie gestão do espaço em um município.

No município de São Carlos a cabeceira do Rio Monjolinho, área de estudo deste trabalho, está inserida em Área de Proteção e Recuperação de Mananciais de captação responsável por parte do abastecimento de água urbano, está localizada em ambiente dinâmico de ocupação antrópica (rural, urbano e industrial) e com pouco controle de uso dos aquíferos subsuperficiais. Estes aquíferos possuem papel importante no ciclo hidrológico da bacia contribuindo para a recarga do rio Monjolinho.

Visando contribuir com caracterização dos aquíferos freáticos da região, ainda pouco estudados, mas com influência direta na descarga nos recursos hídricos superficiais e conseqüentemente na sua qualidade, buscou-se a sua caracterização hidroquímica e a observação de alterações antrópicas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo desta pesquisa é caracterizar os aquíferos livres e investigar possível alteração na composição hidroquímica natural dos aquíferos freáticos da bacia do Rio Monjolinho resultante das atividades antrópicas. O estudo propõe relacionar através das características geológicas e do detalhamento do uso do solo com a identificação de atividades potencialmente poluidoras, interferências no manancial freático, contribuindo com informações sobre a qualidade química do aquífero ainda pouco estudado.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A proposta de analisar parâmetros químicos, indicadores de contaminação e atividades antrópicas que interferem nas águas subterrâneas freáticas da região, tem como objetivo:

- ❖ Caracterizar os aquíferos freáticos quanto à sua geologia e hidroquímica;
- ❖ Detalhar o uso do solo para interpretar atividades potencialmente poluidoras e os tipos de contaminantes como proposta de banco de dados com detalhamento na zona urbana e rural;
- ❖ Identificar a interação dos tipos de uso e ocupação com as águas subterrâneas e alterações químicas nos aquíferos livres que possam ser correlacionáveis.

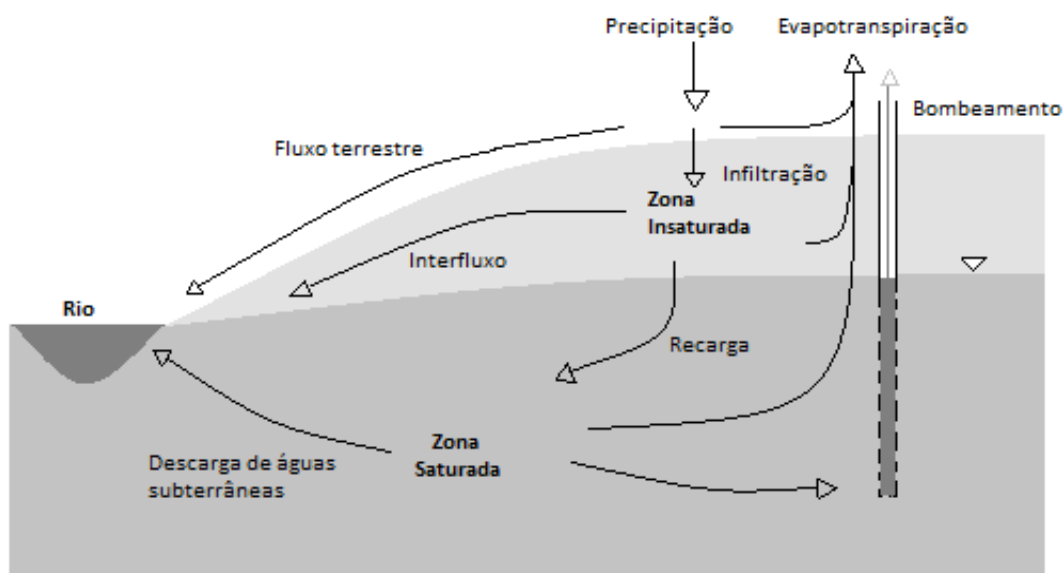
### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 AQUÍFEROS LIVRES

A interação entre as águas subterrâneas e superficiais não é constante. Pode variar conforme o período, taxa de infiltração e bombeamento, o que implica na diminuição e aumento dos níveis superficiais e subterrâneos. Essa alteração interfere na composição da água subterrânea e superficial, já que um dos parâmetros observados é o tempo de permanência da água nos reservatórios e o caminho do fluxo (MESTRINHO, 2008).

Nos reservatórios subterrâneos livres tem-se a estrutura de duas zonas: a saturada e a insaturada assim o limite superior da zona saturada é o seu nível freático (FITTS, 2015). A água que recarrega a zona saturada e provém da zona não saturada, ou vadosa, vêm da ação da infiltração e pode resultar no aumento do nível freático (BEAR; CHENG, 2010). A faixa de umidade acima do nível freático é resultado da ação da força capilar (zona não saturada) e adsorção. A zona saturada formada por material geológico, que permite o armazenamento e a permeabilidade, define-se como aquífero (FITTS, 2015) (Figura 1).

**Figura 1 - Ciclo hidrológico e fluxo da água subterrânea.**



Fonte: Fitts (2015)

Os aquíferos livres possuem recarga direta da água da chuva, sendo assim a composição dessas águas tem influência direta do ambiente que essa água está inserida, seja antrópico ou natural.

Estudos mostram que 65% da água precipitada é armazenada ou evapora no solo e plantas (OKI; KANAE, 2006). Da água que permanece no solo, 95% é armazenada na zona vadosa e na zona saturada, contribuindo com a manutenção do nível freático (BOCKHEIM; GENNADIYEV, 2010). Em decorrência da importância da interação da água no solo e dentro do ciclo hidrológico, o uso do solo de um determinado lugar pode interferir nos recursos hídricos de lugares distantes (WWAP, 2018).

A infiltração da água no subsolo depende de alguns fatores como: tipo e composição do material superficial; cobertura vegetal; topografia; precipitação; e ocupação do solo (MESTRINHO, 2008). A porosidade, permeabilidade e condutividade hidráulica são outros fatores que influenciam na disponibilidade hídrica dos aquíferos (FITTIS, 2015). A qualidade da água subterrânea possui relação com todos esses parâmetros físicos e que também determinam a mobilidade de contaminantes nos aquíferos.

O ciclo hidrológico em sua dinâmica natural proporciona boa qualidade para a água subterrânea. O solo funciona como filtro natural do reservatório subterrâneo livre. A partir das propriedades físicas, químicas e microbiológicas (MESTRINHO, 2013) as águas são classificadas conforme sua composição natural.

As atividades antrópicas cada vez mais interferem no ciclo hidrológico e conseqüentemente nas águas subterrâneas, na sua quantidade e qualidade. É necessário salientar que as descargas das águas subterrâneas, através das nascentes, alimentam rios. Esse complexo e longo caminho pode ser impactado, através da alteração do clima e das atividades antrópicas, em relação tanto à quantidade quanto à qualidade. As fontes de contaminações estão relacionadas às atividades industriais, urbanas e agrícolas, sendo necessário o conhecimento dos processos químicos atuantes.



líquidos e gases, além do tempo de trânsito e os tipos litológicos (MESTRINHO, 2008).

Entre os parâmetros físico-químicos que auxiliam na classificação das águas subterrâneas e interpretação dos processos atuantes, estão os Sólidos Totais Dissolvidos (STD), a Condutividades Elétrica (CE) e a temperatura, importantes parâmetros para determinação de contaminantes presentes nas águas.

Os teores de STD nas águas mais próximas à superfície aumentam com a solubilidade dos minerais e o tempo de permanência da água, normalmente mais de 95% dos STD são os constituintes inorgânicos principais (FITTS, 2015).

Os constituintes inorgânicos presentes nas águas subterrâneas podem ser classificados em constituintes maiores, constituintes menores e traços (Quadro 1) sendo que os constituintes maiores estão presentes em concentrações maiores que 5mg/L são chamados também de principais; os constituintes menores estão em concentrações entre 0,01 e 10mg/L, mas podem aparecer em concentrações maiores que os constituintes principais em áreas de jazidas, por exemplo; e os elementos traços que podem apresentar concentrações menores que 0,1 mg/L (MESTRINHO, 2008).

**Quadro 1 - Componentes inorgânicos naturais dissolvidos nas águas subterrâneas**

Constituintes	Componentes
Principais	Cloreto (Cl <sup>-</sup> ); Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> ); Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> ); Sódio (Na <sup>+</sup> ), Cálcio (Ca <sup>+2</sup> ); Magnésio (Mg <sup>+2</sup> ); Potássio (K <sup>+</sup> ); gases dissolvidos: Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ); Sílica Coloidal (SiO <sub>2aq</sub> ).
Secundários	Ferro Total (Fe <sup>+3</sup> + Fe <sup>+2</sup> ); Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> ); Carbonato (CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> ); Estrôncio (Sr <sup>+2</sup> ); Fluoreto (F <sup>-</sup> ); Boro (B).

Adaptado: FITTS (2015)

A CE indica a quantidade de sais na água, sendo produto da temperatura e concentrações iônica, está relacionada aos STD por ser determinada a partir dos solutos iônicos dissolvidos (FREESE; CHERRY, 2017). Altos teores de sais minerais, particularmente sulfato e cloreto, estão associados à tendência de corrosão em sistemas de distribuição, além de conferir sabor às águas.



A tendência à dissociação dos íons  $H^+$  é medida através do potencial hidrogeniônico (pH) definido pelo  $-\log [H^+]$  (FITTS, 2015). O pH representa o equilíbrio dos íons  $H^+$  e  $OH^-$ , com variação de 0 a 14, sendo que os valores de pH inferiores a 7 indicam água ácida, neutra com pH igual a 7 ou alcalina com pH superior a 7. O pH é função do gás carbônico dissolvido e da alcalinidade da água, sendo a alcalinidade a capacidade da água em neutralizar os ácidos, pela presença dos carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, admite-se a seguinte classificação apresentada no Quadro 2 (SANTOS, 2008).

**Quadro 2 - Alcalinidade em função do pH**

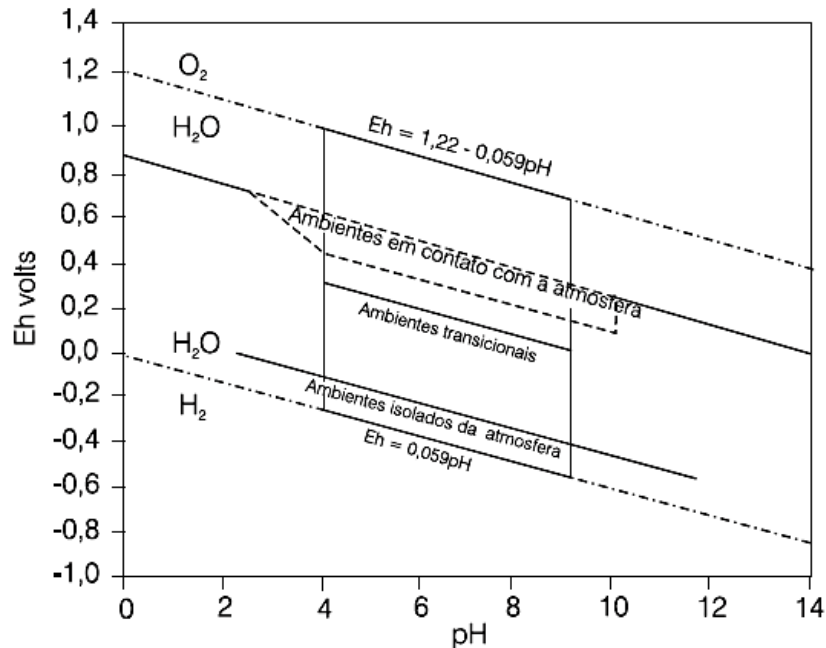
<b>pH</b>	<b>Alcalinidade</b>
11 a 9,4	Hidróxidos e carbonatos
9,4 a 8,3	Carbonatos e Bicarbonatos
8,3 a 4,6	Bicarbonatos
4,6 a 3,0	Ácidos Minerais

Fonte: Santos (2008)

O potencial de oxirredução (Eh) determina se o ambiente é redutor (-) ou oxidante (+), responsável pelo controle de diversos processos hidroquímicos. As alterações de Eh e pH afetam, portanto, a solubilidade e a mobilidade de muitos metais (MESTRINHO, 2008).

A Figura 3 representa os campos de estabilidade em relação à interferência da atmosfera. Em águas subterrâneas freáticas, essa interpretação permite saber qual é a influência do ambiente na ocorrência de espécies oxidadas e reduzidas.

**Figura 3 - Diagrama Eh - pH com os limites do campo de estabilidade**



Fonte: Carvalho (1995 apud MESTRINHO, 2008)

A concentração de oxigênio ( $O_2$ ) presente na água pode ser determinada pelo Oxigênio Dissolvido (OD) e auxilia na interpretação de processos químicos e bioquímicos atuantes. Nas avaliações de águas poluídas, o OD auxilia a interpretação das condições oxidantes para degradar matéria orgânica (MESTRINHO, 2013).

A temperatura influencia em uma série extensa de variáveis físico-químicas. Um aquífero livre pouco profundo possui interferência direta da temperatura atmosférica (MESTRINHO, 2013). As temperaturas altas podem reduzir a solubilidade dos gases e acelerar as reações químicas, aumentando o intemperismo das rochas a solubilização de elementos na água. Em temperaturas baixas e atividades iguais dos íons  $H^+$  e  $OH^-$ , o pH ocorre em valores mais altos; em  $0^\circ C$  tem-se pH de 7,53 e a  $50^\circ C$  pH de 6,63 (FREEZE; CHERRY, 2017)

A poluição da água se refere às modificações das suas características físicas e químicas, já o estudo das águas contaminadas diz respeito aos teores de poluentes que ultrapassam Valores Máximos Permitidos (VMP) e estão fora dos padrões de potabilidades por apresentarem risco à saúde humana. Nas análises que envolvem alteração da qualidade da água subterrânea, os componentes

analisados são determinados conforme o ambiente no qual o aquífero está localizado.

As zonas de recarga de aquíferos confinados e os perímetros de interferência nos poços em aquíferos freáticos são algumas das áreas onde são necessários esses estudos. Com a finalidade de interpretar o ambiente natural frente à sua capacidade de atenuação da contaminação, são utilizados índices de vulnerabilidade, interpretações conjuntas com os diferentes tipos de ocupação antrópica e o potencial contaminante dessas atividades aos aquíferos leva-se em consideração os componentes frente aos ambientes.

### 3.3 INFLUÊNCIA ANTRÓPICA

Existem dois aspectos intrinsicamente observados para a proteção das águas subterrâneas. Um está relacionado à superexploração dos aquíferos; o outro diz respeito à qualidade desta água, ou seja, níveis de alteração ou contaminação química (HIRATA, 1993).

A preservação dos aquíferos requer desafios, sendo necessário levar em consideração aspectos como: diversificação de produtos químicos potencialmente poluidores; lançamento de esgotos e efluentes industriais *in natura*; aumento na aplicação de fertilizantes e pesticidas; ocorrência de poluidores persistentes de baixas concentrações e nocivos à saúde humana; dificuldades na remoção de poluentes e reabilitação com custos elevados (FOSTER, 1988).

O uso intenso das águas subterrâneas é um fenômeno global, com 20% das fontes mundiais de água subterrânea já sendo superexploradas sem qualquer gerenciamento sustentável (WWAP, 2015). A depleção dos níveis das águas subterrâneas gera também impactos químicos (MACHIWAL et al., 2018), como por exemplo, a contaminação por arsênio (As) em algumas regiões.

Klimas e Gregorauskas (2002) ressaltam que o uso intensivo da água subterrânea resulta não só na alteração do nível de base e do equilíbrio hidrodinâmico, mas também na hidroquímica que pode causar mudanças na qualidade das águas subterrâneas.

Os estudos recentes mostram que, apesar das águas subterrâneas apresentarem naturalmente dinâmica que receba menores taxas de contaminantes que as águas superficiais, as atividades antrópicas cada vez mais intensivas sobre esses mananciais estão resultando na poluição de sistemas aquíferos, sendo necessários a caracterização química e o controle da qualidade dessas águas (MACHIWAL; JHA, 2015).

As mudanças no uso da terra geram impactos duradouros e, em alguns casos, irreversíveis, tornando a investigação da qualidade das águas subterrâneas atrelada ao desenvolvimento das atividades antrópicas, já que estima-se que a água subterrânea global forneça 36% de todo o abastecimento de água potável, 43% de água utilizada para agricultura irrigada, e 24% da oferta de água industrial direta (DÖLL et al., 2012).

A principal causa da redução dos níveis das águas subterrâneas é pelo uso no processo de irrigação (WWAP, 2018). A previsão é que em 2050 ocorrerá um grande aumento das captações subterrâneas (1.100 km<sup>3</sup>/ano), de 39% comparando com os níveis atuais (BUREK et al., 2016). Nos países da União Europeia, no período 2012-2015, 13,2% das estações de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas ultrapassaram os 5mg/L de nitrato e 5,7 % situaram-se entre 40 mg/L e 50 mg/L. Trata-se de uma ligeira melhora em comparação com o período anterior (2008-2011) no qual 14,4 % das estações ultrapassaram os 50 mg/L e 5,9 % se situaram entre 40 mg/L e 50 mg/L (EC, 2018).

A contaminação por nitrato, o poluente mais comum em águas subterrâneas, ocorre em diversos ambientes e as fontes primárias podem ser advindas dos fertilizantes e lixiviados sépticos (KHATRI, 2015). Na Argentina foi registrado por Calvi et al. (2016) o aumento das concentrações de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) nas águas subterrâneas em ambiente urbano advinda de esgotamento sanitário inadequado. Este tipo de contaminação vem sendo estudado em diversas cidades do Estado de São Paulo (CERH, 2019). Em ambiente rural esta contaminação normalmente ocorre por fonte difusa, pelo processo de mecanização e uso de fertilizantes (CAPRI et al., 2009).

As áreas urbanas possuem mais fontes potenciais de contaminação devido às descargas industriais e atividades domésticas intensas se comparadas com as áreas rurais. A mudança do uso e cobertura do solo, pode ser fortemente correlacionável com os parâmetros químicos da água (KHATRI, 2015).

Em ambiente urbano, tem-se registrado cada vez mais a contaminação do solo e águas subterrâneas por hidrocarbonetos com fonte relacionadas aos postos de combustíveis. No estudo realizado por Klimas e Gregorauskas (2002) aquíferos rasos confinados e não confinados na Lituânia apresentaram contaminação advinda da descarga de hidrocarbonetos nos solos. Em escala regional as contaminações registradas em ambiente rural e urbano apresentaram altas concentrações de nitrato (KLIMAS; GREGORAUSKAS, 2002). No estado de São Paulo foi registrado 4.724 áreas contaminadas por combustíveis automotivos, isso equivale a 70% do total de áreas contaminadas no ano de 2019 (CETESB, 2019b).

A USGS - *United States Geological Survey* (WALLER, 1982) disponibiliza em seu site uma série informativa que envolve estudos das águas subterrâneas e as interferências antrópicas através da contaminação e superexploração. No Quadro 3 estão listados contaminantes inorgânicos e orgânicos mais comuns, sua origem e os efeitos no ambiente e seres vivos.

**Quadro 3 - Contaminantes mais comuns encontrados em águas subterrâneas.**

<b>Contaminante</b>	<b>Fontes</b>	<b>Efeitos</b>
Alumínio (Al)	Ocorre naturalmente em rochas e minerais	Precipita depois do tratamento, causando aumento de turbidez e mudança na coloração da água.
Arsênio (As)	Processos naturais, atividades industriais, pesticidas e resíduos industriais.	Danos ao fígado e rins; diminui a hemoglobina. Carcinogênico.
Cádmio (Cd)	Baixas concentrações em rochas. Pode entrar no meio ambiente por descargas industriais, revestimento de metais, tubulação de água, baterias, tintas e pigmentos.	Pode substituir o zinco e causar pressão alta, danos no fígado, nos rins e anemia. Destroi o tecido testicular e os glóbulos vermelhos. Tóxico para biota aquática.
Cloreto (Cl)	Associado à presença de sódio quando presente em altas concentrações. Além por intrusão de água salgada, dissolução mineral, resíduos industriais e domésticos.	Danifica encanamentos. Gosto perceptível quando se encontra acima do valor máximo permitido.

Cobre (Cu)	Resíduos industriais e domésticos, mineração e lixiviação mineral.	Desconforto estomacal e intestinal; danos ao fígado e rins. Altera o sabor da água e mancha roupas.
Ferro (Fe)	Naturalmente em sedimentos e rochas; resíduos industriais e metais corrosivos.	Sabor amargo e pigmenta roupas.
Manganês (Mn)	Naturalmente em rochas e sedimentos; resíduos industriais.	Dá sabor a água e mancha roupas e encanamentos.
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Forma mais estável do nitrogênio. Encontrado naturalmente no ambiente. Entrada através de fertilizantes e esgotos.	Através da decomposição do Nitrato em Nitrito dificultando o transporte de oxigênio no sangue.
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Fertilizantes, indústrias, resíduos humanos ou agropastoris.	Através da decomposição do Nitrato em Nitrito dificultando o transporte de oxigênio no sangue.
Sódio (Na)	Através do processo de lixiviação, natural ou por contribuição antrópica.	Apresenta risco para quem tem baixo sódio na dieta.
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	Resíduos domésticos e industriais; contaminação por água salgada.	Sabor e efeito laxante.
Zinco (Zn)	Encontrado naturalmente; resíduos industriais e encanamentos. Componente importante do lodo	Não causa danos à saúde. Dá sabor a água. Tóxico para plantas em níveis altos.
Pesticidas	Herbicidas, inseticidas, fungicidas, rodenticidas e algicidas.	Afetam o sistema nervoso, a tireoide, o sistema reprodutivo, o fígado e os rins. Carcinogênicos.
Plastificantes, solventes clorados, benzo [a] pireno e dioxina	Selantes, revestimentos, solventes, pesticidas, plastificantes, componentes de gasolina, desinfetante e conservante de madeira	Causa câncer. Danifica os sistemas nervoso e reprodutivo, rim, estômago e fígado

Fonte: Adaptado de USGS (2019)

O Brasil possui 12% da água doce do mundo, estima-se que a disponibilidade de água subterrânea no Brasil seja em torno de 14.650 m<sup>3</sup>/s (ANA, 2019). O principal uso da água corresponde as práticas agrícolas. Estimativas mostram que em 2018 a retirada total foi de 2.048 m<sup>3</sup>/s, sendo que 49,8% foram destinadas à irrigação, 8,3% para uso animal, 24,4% para abastecimento urbano e 9,6% nas indústrias (ANA, 2019).

Assim como em outros países, as interferências das atividades antrópicas nos mananciais hídricos subterrâneos no Brasil são registradas em ambientes rurais, urbanos e industriais, com variadas fontes de contaminação e metodologias de

investigações. Em ambiente rural, em bacia hidrográfica localizada no estado do Ceará, foi registrado contaminação proveniente do sistema de irrigação, investigadas durante dois períodos, em local onde a evapotranspiração é o dobro da precipitação (ANDRADE et al., 2016). Em Santa Catarina é registrado contaminação por fossas sépticas em aquíferos freáticos em região rural (LEITE, et al., 2018). Presença de coliformes e de vírus indicando contaminação fecal da água subterrânea na porção aflorante do Aquífero Guarani também na região sul no país (LUZ et al., 2017). No estado de Minas Geral Lucon et al. (2018) registrou contaminação sazonal por cádmio.

O impacto na qualidade da água subterrânea em ambiente urbano também foi registrado por Bezerra et al. (2018) na região metropolitana de Fortaleza. E na Bahia, em um centro industrial, também foi registrada a presença de concentrações de bário e chumbo, em nível de contaminação, em poços do aquífero freático (LIMA et al, 2010).

No estado de São Paulo aproximadamente 80% dos municípios são abastecidos em sua totalidade ou parcialmente por águas subterrâneas. Anualmente a CETESB disponibiliza dados sobre a qualidade das águas subterrâneas do estado, com o objetivo de caracteriza-las e avaliar a tendência de alteração e concentração das substâncias monitoradas.

No último relatório da Rede CETESB de Qualidade das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo (CETESB, 2019) as concentrações de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) estavam acima do padrão de potabilidades em quatro municípios, 1% do total de amostras, todos pertencem ao Sistema Aquífero Bauru, aquífero superficial que abrange boa parte do estado, além das concentrações de crômio (Cr) também acima do padrão de potabilidade.

A Rede Integra CETESB-DAEE (CETESB, 2019) apresentou resultados semelhantes no Sistema Aquífero Bauru, com concentrações de nitrato acima do padrão de potabilidade nas UGRHs 15, 17, 18, 19 e 20, e dos parâmetros alumínio (Al), ferro (Fe) e manganês (Mn), chumbo (Pb), zinco (Zn) e níquel (Ni) também acima do padrão de potabilidade.

### 3.4 INDICADORES

Os fatores físicos e químicos da rocha onde a água infiltrada é armazenada são determinantes nas características naturais da água subterrânea contudo a interferência provocada pelo uso do solo pode provocar alterações com o despejo de materiais que possam ser solubilizados e carreados com a recarga. O uso do solo é, portando, o fator antrópico que pode alterar a qualidade das águas subterrâneas.

Para análises da qualidade da água observa-se a localização, o tipo de uso e a rocha armazenadora, de modo a se identificar possíveis alterações em parâmetros físico-químicos na água, indicadores de alterações antrópicas. Diversas metodologias são apresentadas dentro do contexto do planejamento do uso do solo e monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.

A União Internacional de Ciências Geológicas formou uma Comissão de Ciências Geológicas para Planejamento Ambiental, que sugeriu métodos padrão para medir processos geoquímicos, geofísicos e geomorfológicos (BERGER E IAMS, 1996), com o objetivo de sintetizar todas as mudanças geológicas contemporâneas para qualquer área específica, que possam ser significativas para avaliações ambientais.

Na identificação de indicadores da rápida mudança de ambiente como resposta dos processos naturais e/ou antrópicos foram definidas abordagens que uniram processos da geofísica, geomorfologia e geoquímica para cada mudança ambiental (BERGER, 1998). A proposta definiu 27 geoindicadores, a partir da sua importância ecológica; sendo que cada indicador possui grau de impactos gerados a partir das atividades antrópicas e naturais. Três destes geoindicadores se relacionam às águas subterrâneas conforme apresentado no Quadro 4.



**Quadro 4 - Geoindicadores relacionados às águas subterrâneas.**

<b>Geoindicadores</b>	<b>Mudança</b>	<b>Influência Natural</b>	<b>Influência Humana</b>
Qualidade da Água Subterrânea	Poluição industrial, agrícola, urbana; intemperismo rocha e solo; uso do solo; precipitação e radioatividade	Média	Alta
Química da água subterrânea na zona não saturada	Uso do solo; Intemperismo	Alta	Alta
Nível da água subterrânea	Recarga; Descarga	Média	Alta

Adaptado: Berger (1998)

A influência humana aparece como alto fator quando analisados os parâmetros químicos e físicos das águas subterrâneas. No Quadro 5, estão os geoindicadores a partir dos componentes descritos anteriormente, referentes ao tipo de alteração.

**Quadro 5 - Indicadores da qualidade química das águas subterrâneas.**

Indicadores de salinidade	Cl, Condutividade Elétrica Específica, SO <sub>4</sub> , Br, TDS (total de sólidos dissolvidos), Mg/Ca, delta 18-O, delta <sup>2</sup> H, F
Indicadores de poluição agrícola	NO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , Carbono Orgânico Dissolvido, K/Na, P, pesticidas e herbicidas
Indicadores de poluição urbana e industrial	Cl, HCO <sub>3</sub> , Carbono Orgânico Dissolvido, B, hidrocarbonetos e solventes orgânicos

Fonte: adaptado de EDMUNDS (1996).

### 3.5 ANÁLISE DE PARÂMETROS FÍSICOS-QUÍMICOS

O tratamento de dados adquiridos das análises físico-químicas pode alcançar diferentes objetivos: análise de anomalias, compreender comportamento temporal, padrão espacial, processos responsáveis pela composição química e informar a composição da água subterrânea (MESTRINHO, 2013).

Podem ser apresentados de maneira tabular: qualitativos, quantitativos ou estatísticos. Podem aparecer em conjunto através de gráficos e diagramas que apresentem similaridades e variações; grande parte destes são usados para apresentar os constituintes principais. Também podem ser apresentados de maneira analítica, com médias e desvio padrão. Os gráficos utilizados para apresentação de valores discrepantes dentro das análises estatísticas são do tipo *box & whiskers* (MESTRINHO, 2013).

Os parâmetros químicos das águas subterrâneas podem ser analisados conforme a classificação através dos íons maiores, com auxílio de diagramas como o *de Piper e Stiff* que associa a composição da água aos diferentes tipos litológicos e os processos atuantes (FREEZE; CHERRY, 2017).

As análises dos parâmetros em vista aos ambientes antrópico e natural podem ser realizadas também através de comparações com o uso da água, Valor Máximo Permitido (VMP) e segundo a sua potabilidade.

### 3.5.1 DADOS HIDROGELÓGICOS EM AMBIENTE SIG

A espacialização dos dados adquiridos, através de mapas temáticos em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), é apresentada a partir de linhas de isoteores, podendo ser utilizadas juntamente a dados hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, ou seções de corte que contribuem para a visualização em profundidade da variação da água subterrânea conforme as diferentes unidades geológicas (MESTRINHO, 2013).

A utilização de ferramentas computacionais de hidrologia disponíveis possibilita a modelagem dos fluxos de água subterrânea para prever a dinâmica e simular vazamentos de poluentes (BIAGGIONI; GIMENES; FILHO, 2017). Também permite a espacialização de pontos de captação e a localização do ponto potencial à contaminação no mapa de classes de vulnerabilidade à contaminação; em ambiente SIG a manipulação e atualização de dados ocorre de forma dinâmica e constante (LÖBLER; SILVA, 2014).

A vulnerabilidade do aquífero é determinada a partir das características hidrogeológicas; sendo assim, a vulnerabilidade de um aquífero à contaminação diz respeito à suscetibilidade ao contaminante (FOSTER et al., 2006).

Entre as análises mais aplicadas para determinação do grau de vulnerabilidade estão os métodos GOD e DRASTIC. O GOD (*Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table*), difundido pela Organização Mundial de Saúde, é considerado o método mais simples e de fácil aplicação, por avaliar o grau de confinamento, tipo de material da zona não saturada e a distância do nível d'água (FOSTER et al., 2006). O método DRASTIC avalia a profundidade da água, recarga, material do aquífero, material do solo, declives topográficos, impacto da zona vadosa e condutividade

hidráulica (ALLER et al., 1987). Estes métodos podem ser aplicados através de ferramentas de interpolação em softwares SIG.

O detalhamento do uso do solo, em região rural e urbana, contribui para a análise de fontes potenciais de contaminação. Essas análises estão cada vez mais presentes em estudos de qualidade das águas subterrâneas visando o correto ordenamento e gestão dos recursos hídricos (BARROSO et al., 2015).

Técnicas de interpolação em ambiente SIG são muito utilizadas para mapeamentos de áreas contaminadas, como a interpolação ponderada pelo inverso da distância (traduzido de *inverse distance weight* - IDW ) e a krigagem ordinária (traduzido de *kriging ordinary* - OK) (ELUMALAI et al., 2017).

As análises multicritério têm desempenho diferente quando aplicadas a conjuntos de dados de diferentes regiões; um modelo em relação a outro não pode ser considerado universalmente aplicável. O peso que se aplica aos parâmetros de uma determinada região pode não ser o mesmo quando aplicado a uma região com o dobro da área, ou com características hidrogeológicas diferentes.

Análises de decisão múltiplos critérios (MCDA) com utilização de matrizes e definição de pesos entre cientistas e gestores podem ser utilizadas para a delimitação de áreas potencialmente contaminantes, por exemplo (COSTA et al., 2015; PIGA et al., 2017).

## 4 BIBLIOMETRIA

A análise bibliométrica une dados quantitativos e qualitativos, transformando o número de publicações e citações por autores em indicadores para análises qualitativas de artigos publicados.

Foi utilizada como base metodológica a interpretação dos artigos publicados na plataforma Scopus; a escolha dessa base de dados foi em decorrência do maior número de artigos publicados. A busca foi iniciada no mês de maio do ano de 2018 e consistiu na análise de artigos publicados até o ano de 2017 e em janeiro de 2020 uma nova análise foi realizada para introduzir artigos publicados nos anos de 2018 e 2019.

O objetivo da análise feita foi compreender as propostas metodológicas e os avanços na área da qualidade das águas subterrâneas.

A análise dos documentos publicados na base de dados Scopus, foi realizada em três etapas. A primeira introduziu-se o termo mais abrangente, e análises da metodologia dos artigos de maior destaque. A segunda etapa consistiu na introdução de termos limitantes, direcionando a pesquisa dos artigos. Em ambas as etapas foram analisados artigos filiados a instituições brasileiras (Quadro 6).

**Quadro 6 - Documentos publicados na base de dados *Scopus*.**

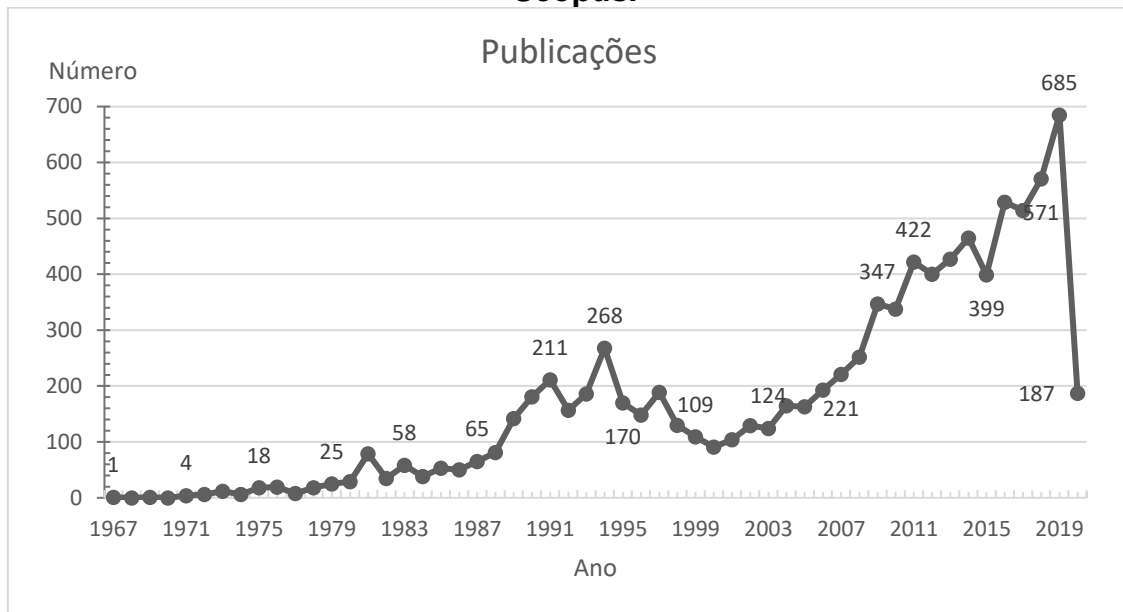
Anos	Documentos	Artigos	Inglês	Português
1967 - 2020	9247	7574	8574	36

Fonte: Scopus (2020)

### 4.1 “GROUNDWATER QUALITY”

Iniciando a análise com o termo “*Groundwater quality*” os documentos recuperados desde o primeiro registro, que ocorreu no ano de 1967, até março do ano de 2020, observa-se que no ano de 1994 houve pico de publicações que só superou no ano de 2009 com 347 publicações registradas (Figura 4). Em 2015 houve recuo no número de publicações. Para o ano de 2019 a consulta realizada totalizou 685 documentos registrados e para o ano de 2020, até março foram totalizados 187 documentos registrados.

**Figura 4 - Artigos publicados entre os anos de 1967-2020 na base de dado Scopus.**



Fonte: Scopus (2020)

O primeiro artigo publicado e indexado foi de 1967, “*Applications of factor analysis in study of chemistry of groundwater quality, Mojave River Valley, California*” pelos autores David R Dawdy e John H. Feth na revista *Water Resources Research*. Este artigo não está disponível para consulta online. A metodologia básica consistiu na aplicação da estatística através da Análise Fatorial dos resultados de parâmetros investigados em amostras de 103 poços de captação da água subterrânea, para determinação dos principais íons e o equilíbrio entre as fases líquida e sólida. Como resultado, identificaram que a variação na composição química do sistema hidroquímico é governada por fontes de cloreto de sódio.

A análise fatorial visa a interpretação de dados multivariados e inter-relações para a definição de conjuntos chamados de fatores sendo que as todas as variáveis são simultaneamente consideradas.

O artigo mais citado disponível, dentro desta análise geral, abordou o transporte dos contaminantes em subsuperfície. O estudo consistiu na mobilidade dos colóides, partículas que possuem menos que 10 µm de diâmetro, com contaminantes em ambientes de subsuperfície, para avaliar a capacidade de adsorver bactérias e frações quase moleculares de componentes (MCCARTHY; ZACHARA, 1989). Este estudo foi realizado nos Estados Unidos.

## 4.2 “GROUNDWATER QUALITY” EM ARTIGOS

Introduzindo o termo “*groundwater quality*” na plataforma Scopus e limitando-o para artigos nos idiomas inglês e português, tem-se 6.994 registros, sendo que 735 com acesso livre. Estes foram analisados conforme ano de publicação, metodologia e citações.

Dentro desta análise, no ano de 2010 foram publicados 235 artigos. O artigo com maior número de citações (194), foi desenvolvido por VASANTHAVIGAR et al. (2010) e os autores propõe a aplicação de um índice de qualidade da água subterrânea a partir da análise de 148 amostras de água entre as profundidades de 20 e 120 metros, em dois períodos, janeiro e maio de 2008. As composições de Ca, Mg, Na, K, HCO<sub>3</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, F, pH, CE, e STD, além das interpretações Geoquímicas, Índice da Qualidade da Água (IQA), Adsorção de Sódio (SAR), Carbonato Sódico Residual (RSC), Dureza total (D<sub>t</sub>), mostraram que a composição química das águas subterrâneas era influenciada pela ação do intemperismo e lixiviação de feldspatos e calcitas magnesianas das unidades litográficas, além das atividades antrópicas como os efluentes industriais, emissões de automóveis e fertilizantes fosfatados; o estudo foi realizado na Índia em duas bacias hidrográficas localizadas nas nascentes do rio Ganges.

Em 2011, entre os registros de 282 documentos, o artigo com 111 citações analisou a água subterrânea em relação aos indicadores de contaminação por fossas sépticas nos Estados Unidos (EUA) (KATZ; EBERTS; KAUFFMAN, 2011). A proposta consistiu na revisão da razão Cl/Br, como indicadores de contaminação e a relação com outros indicadores químicos. O estudo monitorou 1848 poços domésticos e 121 poços públicos. As análises das amostras de água incluíram os íons maiores, B, Br, Carbono Orgânico Dissolvido (COD), Nutrientes (N e P), e Compostos Orgânicos Voláteis (VOC's).

No ano de 2012 a plataforma registrou 311 artigos publicados e o maior número de citações (116) corresponde ao estudo realizado na Índia, distrito de Ballia que tratou da remoção do arsênio (As) na água através da eletrocoagulação (ALI; KHAN; ASSIM, 2012).

Com 328 publicações no ano de 2013, o artigo mais citado (222 citações) foi referente ao estudo realizado na Pensilvânia (EUA), que avaliou o impacto do

gás de xisto na qualidade das águas e a alteração identificadas nas águas subterrâneas levou ao estudo dos impactos gerados também nas águas superficiais (OLMSTEAD et al., 2013).

Publicada em 2014, a avaliação e origem da poluição associada ao risco à saúde humana em parque industrial localizado no noroeste da China identificou contaminações advindas das atividades industriais, agrícolas e até mesmo de processos naturais através do índice de qualidade da água (IQA). A partir de 20 amostras de água de poços com profundidade entre 15-20 metros a análise de íons maiores ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  e  $\text{HCO}_3^-$ )  $\text{F}^-$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ , pH, Demanda Química de Oxigênio (DQO), STD, Dureza Total ( $D_t$ ), Ar e metais pesados como Cobre, Alumínio, Manganês, Zinco e Mercúrio e Crômio (LI et al., 2014). O artigo captou até o momento 120 citações, no ano de sua publicação registrou-se 364 artigos.

Em 2015 registrou-se 335 artigos, o artigo com maior número de citações (156) apresentava o uso de ferramenta SIG, visando entender a espacialização da qualidade da água subterrânea no sudeste da Índia, zona costeira, com análises de pH, alcalinidade, CE, cloreto,  $D_t$ , STD, OD. O método de interpolação foi o Inverso da Distância Ponderada (IDW) (ILAYARAJA; AMBICA, 2015). Esse artigo não se encontra aberto para consulta pela plataforma CAPES.

A avaliação das águas subterrâneas rasas no centro-oeste da China identificou a contaminação proveniente das atividades agrícolas e industriais (WU; SUN, 2016). A metodologia consistiu na análise de íons maiores,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  e  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , DQO,  $D_t$ , STD e pH. Para avaliar a água para uso na irrigação, adicionou-se ao estudo cálculos de SAR e RSC e na avaliação de risco a saúde humana os parâmetros  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , e  $\text{F}^-$ . No ano de 2016, registrou-se 433 artigos sendo que o anteriormente citado obteve 185 citações.

Como proposta de revisão do progresso e pesquisas sobre a qualidade da água subterrânea na China (LI et al., 2017), com 112 citações, o artigo recebeu destaque no ano de 2017, que obteve o total de 410 artigos publicados. O artigo dispõe sobre a importância da água subterrânea e a suscetibilidade com o crescimento populacional e os impactos das atividades antrópicas. Devido ao

avanço nas pesquisas o oeste da China teve progresso na qualidade deste manancial e recebeu investimentos governamentais e de centros de pesquisas internacionais.

Estudo também realizado na China, com 67 citações, analisou os parâmetros pH, CE,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{F}^-$ , Dureza Total, STD,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  e DQO em 34 amostras de águas subterrâneas, sendo 18 amostras do aquífero livre raso, com o objetivo de analisar a qualidade das águas subterrâneas, a conectividade dos aquíferos e os processos geoquímicos atuantes (LI et al., 2018). No ano de 2018 a plataforma Scopus indexou 436 artigos.

No ano de 2019 registrou-se 584 artigos sendo que o artigo com maior número de citações (61), foi desenvolvido por He; Wu, (2019) e avaliou a qualidade das águas subterrâneas no noroeste da China e os impactos negativos do crômio hexavalente  $\text{Cr}^{+6}$  e  $\text{NO}_3^-$  para a saúde humana, além desta investigação de outros parâmetros para a interpretação da qualidade (pH, STD, DT,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{-2}$ ) de 30 poços. A metodologia utilizada neste estudo foi a análise de risco Fuzzy, interpretação através da lógica difusa.

Ainda na investigação do termo “*groundwater quality*” em artigos, o autor com o maior número de artigos indexados, totalizando 44, foi o Lakshmanan Elango, vinculado à *Anna University*, localizada em Chennai – Índia. Em um dos últimos artigos publicados em colaboração, a proposta da pesquisa foi identificar fontes geogênicas e antropogênicas na qualidade dos rios e águas subterrâneas, com a análise de parâmetros como a CE, pH,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ; (RAMYAPRIYA; ELANGO, 2018).

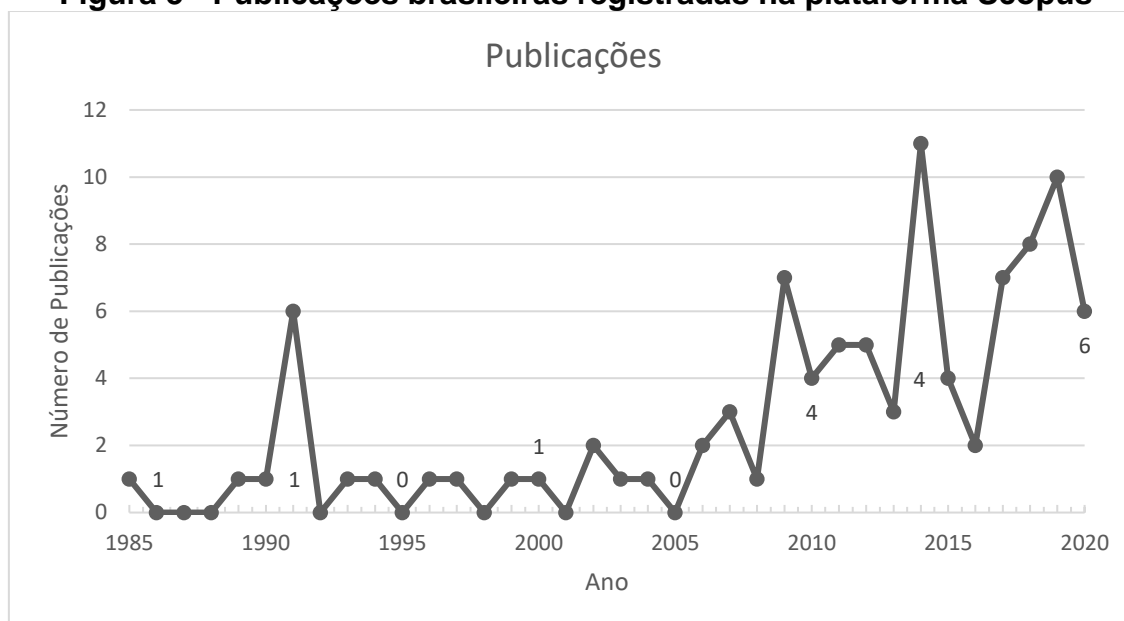
O artigo mais citado utilizou metodologia similar, analisando a água subterrânea em bacia hidrográfica localizada na Índia (SUBRAMANI; ELANGO; DAMODARASAMY, 2005), para determinar adequações para fins agrícolas e humano com a investigação dos parâmetros CE, pH, STD  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{B}^-$  e  $\text{SiO}_2$ , de 24 poços no ano de 2001 e 8 poços no ano de 2002.



#### 4.2.1 PUBLICAÇÕES NACIONAIS

Restringindo a pesquisa do termo “*groundwater quality*”, adicionando o Brasil como território, obteve-se a resposta de 97 documentos, sendo que no ano de 2019 registrou a publicação de 10 documentos (Figura 5).

**Figura 5 - Publicações brasileiras registradas na plataforma Scopus**



Fonte: Scopus, 2020

O primeiro artigo deste grupo, publicado na plataforma Scopus, teve como metodologia o monitoramento de um aterro sanitário e a influência na água subterrânea freática, com análises periódicas de 34 poços de monitoramento no município de Taubaté-SP (PARISOT, 1985). Além da medição mensal do nível freático, foi realizada a cada três meses análises dos componentes  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , B, CN, Cr, Oxigênio consumido, TOC, Mn, Fe, Pb, Si, Zn, Ni, Ag, Al, Ba, Ca, Cd, Cu, Mg, Na, e K.

Um bom parâmetro indicador tem como características ser: encontrado no lixo, móvel em água, sensível aos processos de troca iônica e outras reações químicas no solo, com baixo *background*, além de facilmente analisado (CLARK; PISKIN, 1977 apud PARISOT, 1985). O estudo enquadrou o  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e a CE (correlacionada com os STD) como indicadores na área de estudo.

O artigo com maior número de citações (143) na plataforma Scopus analisou a vulnerabilidade das águas subterrâneas, em Maceió - AL (NOBRE et al., 2007), gerando índice de vulnerabilidade com a introdução de pesos a 6 parâmetros; a

hierarquia *Fuzzy* foi aplicada para introduzir índices às fontes de contaminação e o índices de poços, levando em consideração as características de recarga e descarga dos poços. Destas análises tiveram como resposta o Índice de Avaliação de Risco (RI) e validação através dos testes de Índice da Qualidade das Águas Subterrâneas (sigla em inglês *GWQI*).

O autor Ricardo Hirata (referenciado como Hirata, R.), possui o maior registro de artigos indexados na plataforma, totalizando 8 até março de 2020. O artigo de maior destaque que conta com sua colaboração, analisou 31 poços de captação da água subterrânea do município de Urânia, extremo oeste do estado de São Paulo, entre os anos de 1977 e 1999 (BOUROTTE et al., 2009). A metodologia consistiu na interpretação dos íons maiores, metais potencialmente tóxicos, CE, STD, pH, Temperatura (T), Eh, alcalinidade, e Cr<sup>+6</sup>. As concentrações de crômio (Cr) são interpretadas como de origem natural, pelos processos geoquímicos e altas concentrações naturais de Cr no solo.

A Universidade de São Paulo (USP) apresentou destaque com 18 artigos indexados na plataforma, sendo que o artigo com maior número de citações avaliou a mobilidade do As a partir de fertilizantes fosfatados (CAMPOS, 2002). A metodologia consistiu em análises das concentrações do arsênio na zona não saturada e na zona saturada em região agrícola no município de Jundiaí-SP, que utiliza o NPK como principal fertilizante.

#### 4.3 REVISÃO DAS PUBLICAÇÕES

Na análise geral dos trabalhos publicados na plataforma Scopus, os artigos com maior destaque pelo número de citações foram de pesquisas realizadas na China e Índia, onde a oferta de água doce é restrita por habitante, necessitando de maiores investimentos em pesquisas relacionadas à qualidade da água subterrânea.

Além dos autores destacados anteriormente pelo número de citações, outra pesquisa, também realizada na Índia, que merece destaque por analisar a interferência antrópica e geogênica na qualidade das águas subterrâneas através dos marcadores ambientais; segundo o autor, as pesquisas no nordeste

da Índia estão avançadas quando o assunto é exploração da água subterrânea, o que se entende quando observamos o contexto social e ambiental da região (LAPWORTH et al.; 2017).

Na região sudeste do Brasil, entre os anos de 2011 e 2015 as precipitações estiveram abaixo da média histórica (CPRM, 2015; JACOBI et al. 2015). Unida às questões climáticas e ambientais entre os motivos da crise hídrica na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), a falta de gestão e uso sustentável dos mananciais agrava o cenário dos mananciais. Essa crise justifica a preocupação crescente das instituições de pesquisa no país e o salto dos artigos em plataformas de indexações.

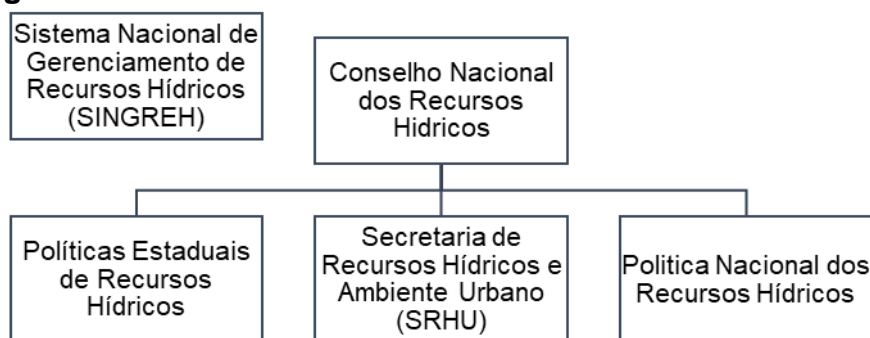
Nas pesquisas de qualidade da água subterrânea no Brasil, e essa tendência é observada também em outros países, há fragmentação no foco das análises em relação ao uso e ocupação do solo. São pesquisas agrupadas em: áreas agrícolas, com foco em qualidade da água subterrânea para irrigação (SOARES; FARIA; ROSA, 2017) para investigação de contaminação por pesticidas e contaminação pontual por esgoto doméstico (VITÓ et al., 2016); áreas industriais com a investigação de compostos contaminantes provenientes de alguma atividades suinícolas (CADONÁ et al., 2018); áreas urbanas para análise da qualidade das águas subterrâneas para consumo, investigação de contaminação por hidrocarbonetos (FORTE et al. 2007), vazamentos de esgoto (STRADIOTO, TERAMOTO, CHANG, 2019; BEZERRA, et al., 2018).

As pesquisas se caracterizam por apresentarem diversas etapas de análises hidrogeoquímica alinhadas ao contexto climático, temporal e ambiental, sendo que pesquisas que abordam diferentes usos do solo são mais atuais. Dois trabalhos realizados no Brasil obtiveram destaque na base de dados Scopus. O primeiro investigou a qualidade dos poços na região norte, em ambiente urbano, utilizando análises geofísicas, físico-químicas e bacteriológicas (MENDES et al., 2017); o segundo investigou na região nordeste a contaminação dos aquíferos costeiros por atividades antrópicas em regiões urbanas (BERTRAND et al., 2016).

## 5 LEGISLAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Em 1997, foi criada a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), através da Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997) pela necessidade de matéria que contemplasse todo o gerenciamento, unindo o desenvolvimento econômico e ambiental, com fundamentos, objetivos, diretrizes e instrumentos para gestão dos recursos hídricos. A PNRH é intermediadora e articuladora da gestão conjunta entre as Políticas Estaduais de Recursos Hídricos e a Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRHU) do Ministério do Meio Ambiente (MMA), definindo estratégias para gestão dos recursos transfronteiriços, que fazem parte do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) (Figura 6).

**Figura 6 - Gestão de recursos hídricos em âmbito nacional**



Fonte: Autora

A PNRH além de definir usos que necessitam de outorgas e diretrizes para pessoa física e jurídica na utilização dos recursos hídricos subterrâneos, criou o comitê de bacias, com a finalidade de unir a sociedade e poderes públicos para as tomadas de decisões. A Agência de Águas (ANA) foi criada para dar o suporte técnico e administrativo aos Comitês de Bacia, entre outras funções.

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) estabeleceu através da Resolução 22 (BRASIL, 2002) que os Planos de Recursos Hídricos deveriam promover a caracterização dos aquíferos e definir as inter-relações de cada aquífero com os demais corpos hídricos superficiais e subterrâneos e com o meio ambiente, visando a gestão sistêmica, integrada e participativa das águas.

O Ministério da Saúde definiu parâmetros de potabilidade para assegurar a qualidade da água para consumo humano, atualizada recentemente através da

Portaria de Consolidação nº 5 (BRASIL, 2017). A Secretaria de Vigilância em Saúde tornou-se então responsável por promover e acompanhar a potabilidade.

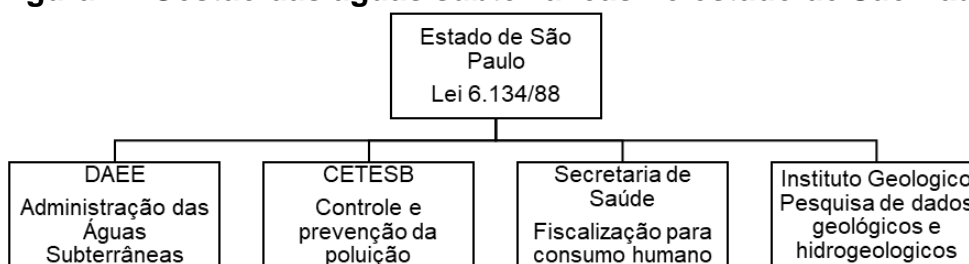
O Ibama regulamentou, através da instrução normativa IBAMA nº6/2014, o Relatório de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais (RAPP), previsto pela Lei 6.938/81 (BRASIL, 1981). Nela está presente a lista das atividades potencialmente poluidoras, que pode ser agrupada em: atividades industriais; atividades de extração mineral e vegetal; serviços de utilidade (tratamento e disposição de resíduos); transporte, terminais e comércio de atividades e produtos que oferecem algum risco humano e/ou ambiental.

Outra iniciativa governamental que auxilia na gestão indireta de recursos hídricos é o Plano Diretor, definido pelo Estatuto da Cidade (BRASIL, 2001) e obrigatório para municípios a partir de 20 mil habitantes, que deve definir áreas de expansão e restrição, áreas de interesse ambiental ou social.

## 5.1 LEGISLAÇÃO ESTADO DE SÃO PAULO

A Lei n. 6.134, de 02 de junho de 1988 (SÃO PAULO, 1988) tem como matéria a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo e definiu os órgãos administrativos e suas responsabilidades: Departamento de Água e energia elétrica (DAEE) administrando e fiscalizando a extração e interação dos recursos com o ciclo hidrológico; a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) prevenindo e monitorando contaminações; a Secretaria de Saúde do Estado fiscalizando os padrões de potabilidade e o Instituto Geológico com pesquisas e informações dos dados geológicos (Figura 7).

**Figura 7 - Gestão das águas subterrâneas no estado de São Paulo**



Fonte: Autora

A Lei n. 7.663 (SÃO PAULO, 1991) que decretou a Política Estadual dos Recursos Hídricos, em seu Artigo 22 definiu os órgãos responsáveis: Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CRH, de nível central; Comitês de Bacias Hidrográficas, com atuação em unidades hidrográficas estabelecidas pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos. No Plano Estadual dos Recursos Hídricos instituiu-se as unidades de gerenciamento dos recursos hídricos, além de programas de duração continuada com as diretrizes para o desenvolvimento e proteção das águas subterrâneas (PDAS).

O estado de São Paulo possui 22 Unidades Hidrográficas de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (UGRHI) e por meio dos comitês das bacias hidrográficas são desenvolvidas políticas para a preservação dos recursos hídricos. A CETESB publica a cada três anos relatórios de qualidade dos recursos hídricos, seja das praias litorâneas, águas interiores, águas costeiras, qualidade do ar e por fim das águas subterrâneas.

A partir do panorama legislativo, entende-se que as águas subterrâneas possuem um aparato legal com diretrizes para uma gestão efetiva e participativa. Entretanto é identificado através desses relatórios a alteração dos recursos hídricos provocada pela superexploração e contaminação, de maneira significativa.

Gestão das águas subterrâneas, delimitação das áreas de recargas, fiscalização e controle de poços de captação, são ações que precisam ser entendidas como essenciais para a manutenção do ciclo hidrológico presando a qualidade e quantidade deste recurso. O Brasil é um país com grande volume de água doce do mundo, 13,7% (SNIS, 2017) sendo que a atividade que mais retira água é a irrigação com 1019,9 m<sup>3</sup>/s, seguido do abastecimento urbano com 500,6 m<sup>3</sup>/s e logo atrás a retirada para atividades industriais com 195,6 m<sup>3</sup>/s (ANA, 2019).

A captação das águas subterrâneas antes utilizadas apenas em regiões com limitado acesso a rede de abastecimento, nos últimos anos é a alternativa mais viável quando se quer água com elevada qualidade e quantidade. Atualmente, a maioria dos poços artesianos localizados na região metropolitana de São Paulo são irregulares, porque falta consciência por parte dos usuários do impacto da

sua captação em todo o sistema hídrico, ou ainda porque os poços estão dentro de propriedades privadas, o que dificulta a fiscalização e controle (JACOBI; CIBIM; SOUZA, 2015). De acordo com Albuquerque et al. (2015) e Coelho et al. (2017) e essa realidade pode ser facilmente transferida para outras regiões do Brasil.

#### 5.1.1 COMPETÊNCIA MUNICIPAL

Na Constituição Federal (BRASIL, 1988) a água, como colocado no artigo 20, incisos IV, V, VI, VII, VIII, é de domínio da união, porém no artigo 23:

Art. 23. É competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios: (...)

VI - Proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas; (...)

XI - Registrar, acompanhar e fiscalizar as concessões de direitos de pesquisa e exploração de recursos hídricos e minerais em seus territórios; (...)

Conforme explicitado na Lei das Águas - 9433/97 (BRASIL, 1997), adota-se a bacia hidrográfica como unidade de gestão territorial de recursos hídricos; dentro dessa perspectiva os estados têm o domínio das águas subterrâneas. São apresentados alguns elementos para gestão das águas: a outorga dos direitos de uso da água; o desenvolvimento, aprovação e acompanhamento dos Planos de Recursos Hídricos; sistemas de informações com a realização dos Comitês de Bacia Hidrográfica para a resolução de conflitos.

O ciclo hidrológico, de complexa dinâmica e não respeitando limites territoriais, dificulta o planejamento das águas subterrâneas, também as áreas de descarga e recarga ultrapassam as áreas de atuação dos comitês das bacias hidrográficas.

Portanto, é competência municipal o desenvolvimento dos planos de Recursos Hídricos, onde deve conter a gestão sistêmica com promoção da caracterização dos aquíferos e definir a relação destes com as águas superficiais e com o meio na qual estão inseridas. Além de fiscalizar os padrões de qualidade da água oferecida a população, através de padrões estabelecidos pela Portaria

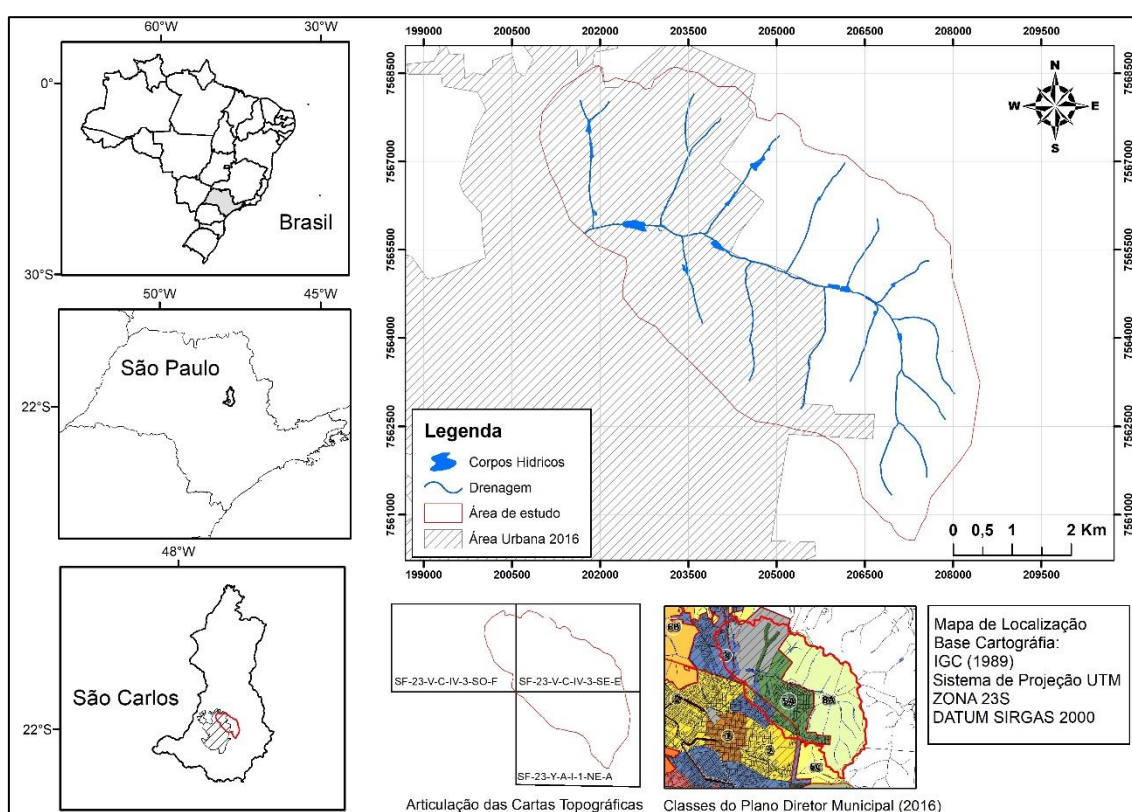
nº5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), os municípios devem também apresentar através da legislação urbanística municipal, começando pelo plano diretor, sendo o instrumento básico da política de desenvolvimento e expansão urbana do município, como exposto no art. 182 (BRASIL, 1988), o planejamento territorial e o Plano de Saneamento Básico (SILVA, 2018).



## 6 ÁREA DE ESTUDO

São Carlos está localizada no centro-leste do estado de São Paulo. A área de estudo corresponde à sub-bacia do Rio Monjolinho (Figura 8), no trecho que possui como limite superior as nascentes deste rio e limite inferior a estação de captação de água superficial do Monjolinho (ETA Monjolinho-Espraiado). Nela estão localizados os córregos da margem direita, Jatobá, Dois Portões, Cascavel, Martinha e Espraiado, e os da margem esquerda, Douradinho, São Rafael, Ponte de Tábua e Belvedere.

**Figura 8 - Sub-bacia do rio Monjolinho**



Fonte: Autora

No estado de São Paulo a Lei nº 9.866 (SÃO PAULO, 1997) dispõe sobre diretrizes e normas para a proteção e recuperação das bacias hidrográficas dos mananciais de interesse regional, vinculada ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SIGRH. Em São Carlos, a Lei nº 13.944/2006 delimitou as Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais (APREM) (SÃO CARLOS, 2006), sendo uma delas a sub-bacia do Rio Monjolinho, a montante da estação de captação de água Espraiado; devido à

sua importância como manancial, foi classificada em duas subáreas: urbanização consolidada (SUC) à esquerda do rio principal onde há área urbana consolidada, e uso e ocupação diferenciado (SUD), composto predominantemente por imóveis rurais (Quadro 7).

**Quadro 7 - Comparação dos coeficientes de permeabilidade propostos em leis.**

	SUC APREM (2006)	SUD APREM (2006) e Zona 8B Plano Diretor (2016)	Zona 5A - Plano diretor 2016
<b>Valores Mínimos de Permeabilidade</b>	15% em lotes de até 125m <sup>2</sup>	50% em lotes mínimos de 1500m <sup>2</sup>	20% em lotes de até 500m <sup>2</sup>

Fonte: Adaptado de São Carlos (2016 e 2006) SUC: Urbanização Consolidada; SUD: Uso e Ocupação Diferenciado; APREM: Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais.

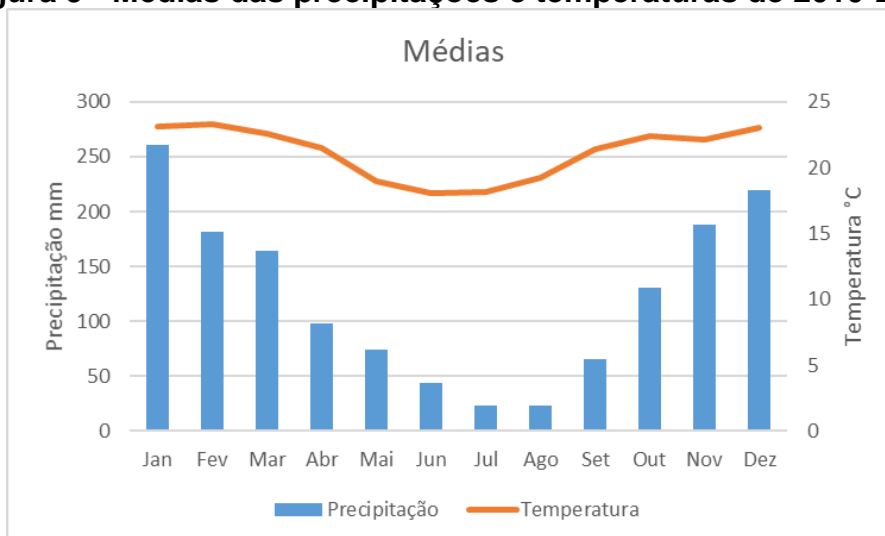
Tanto no primeiro Plano Diretor do município de São Carlos em 2005 (SÃO CARLOS, 2005), quanto na sua atualização em 2016 (SÃO CARLOS, 2016), a área objeto de estudo deste trabalho foi delimitada como de Proteção e Ocupação Controlada SUC Monjolinho-Espraiado (Zona 5A) e Proteção e Ocupação Restrita do Monjolinho-Espraiado (Zona 8B).

A escolha da área foi devido à importância da bacia hidrográfica para o município, sendo uma das fontes de abastecimento de água superficial e do aquífero local dentro do ciclo hidrológico na recarga das drenagens superficiais. A área possui três tipos de ocupação antrópica bem definidas: zona rural, zona urbana, e zona industrial.

**6.1 CLIMA E PRECIPITAÇÃO**

O clima da cidade é tropical semiúmido com inverno seco e verão chuvoso, classificação Cwa de Köppen, clima subtropical de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C), como observado nas médias das precipitações e temperaturas dos últimos 10 anos (Figura 9) da estação meteorológica da Embrapa Pecuária Sudeste, localizada dentro da área de estudo.

**Figura 9 - Médias das precipitações e temperaturas de 2010-2019**



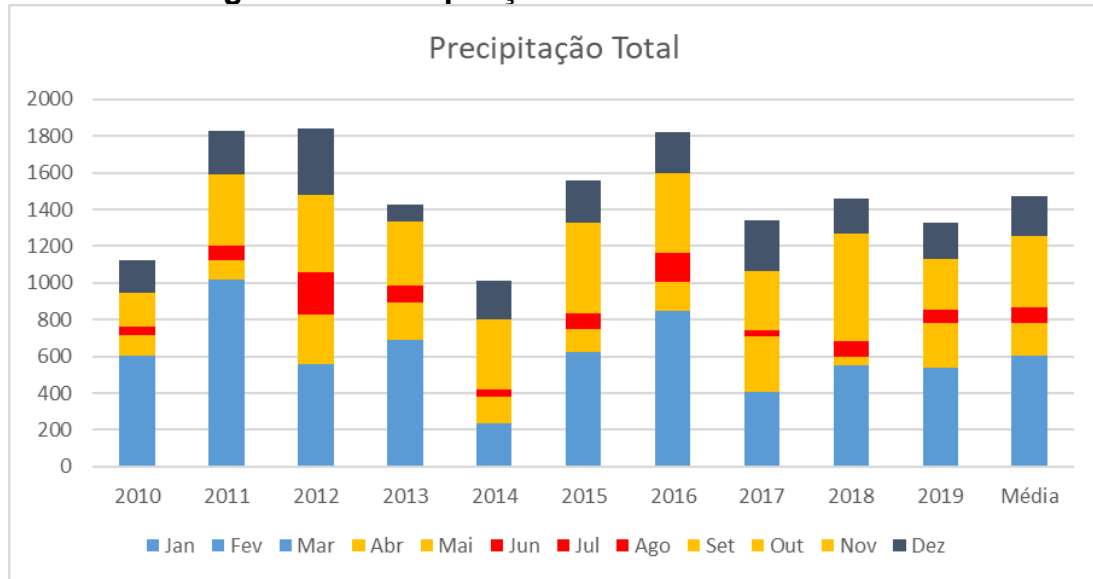
Fonte: CPPSE (2020)

A precipitação influencia na recarga direta das águas subterrâneas freáticas. Para auxiliar nas avaliações dos dados levantados neste estudo, foram coletados dados de precipitação e temperatura de 2010 a 2019 e interpretar padrões de maiores recargas comparados com o ano da coleta das amostras.

Registrou-se precipitações baixas entre os meses de maio e setembro, e alta precipitação para os outros meses. A média de temperatura para os meses de baixa precipitação nos últimos dez anos foi de 19,04°C. Já para o período chuvoso médias de temperatura foram de 22,51°C (Figura 9).

As precipitações totais (Figura 10), indicam seca nos primeiros meses dos anos de 2014 e 2015, isso foi resultado do deslocamento do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) desfavorecendo a precipitação na região sudeste do país. Já em 2016 a ZCAS não estava enfraquecida, retomando os regimes pluviométricos próximo das médias históricas (REBOITA, et al., 2015).

**Figura 10 - Precipitação mensal de 2010 a 2019.**



Fonte: CPPSE (2020).

## 6.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

O município de São Carlos possui extensão de 1.136,907 km<sup>2</sup> (IBGE, 2017) com população estimada em 249.415 habitantes (IBGE, 2018). A cidade é conhecida pela dinâmica produtiva variada, passando de produtor primário para industrial e científico, em consequência da instalação de importantes centros de formação superior na região desde a década de 70.

Aproximadamente 2/3 da área de São Carlos está na bacia do Mogi-Guaçu (UGRHI 9) e 1/3 está na bacia do Tietê-Jacaré (UGRHI 13), incluindo grande parte da área urbana inserida na bacia hidrográfica do rio Monjolinho (CAMPANELLI, LORANDI, LOLLO, 2016).

O abastecimento público de 15% da cidade de São Carlos é fornecido pelas cabeceiras do rio Monjolinho, 35% da sub-bacia do ribeirão do Feijão, e os poços de captação da água subterrânea são responsáveis por parte do abastecimento público (SÃO CARLOS, 2007). O rio Monjolinho tem sua nascente a leste da área urbana no Planalto de São Carlos e possui aproximadamente 43,25km de extensão (CAMPANELLI, LORANDI, LOLLO, 2016).

A sub-bacia é ocupada pelos bairros Residencial Astolpho Luiz do Prado, Parque Maria Stella Fagá, Chácara Valinhos, Residencial Acatu, Jardim Veneza,

Jardim Tangará, Chácara de Recreio Monte Carlo, Parque do Espraiado, Parque Sabará, Vila São José, Jardim Santa Helena e São Carlos VIII. Além da Área Especial de Urbanização Específica (AEIs) Parque Saint Patrick, localizada na região rural da bacia.

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.

### 6.2.1 VEGETAÇÃO

A vegetação natural da região é representada pelos cerrados, cerradões e mata tropical subcadocifólias (GONÇALVES, 1986). O cerrado é composto por plantas de pequeno porte, bastante desuniforme, associadas a solos arenosos. As árvores de médio porte compõem os cerradões e as matas tropicais subcadocifólias.

As formas de vegetação não florestal herbáceo-lenhosa e herbáceo-arbustiva com árvores perenifólias (GONÇALVES, 1986) do cerrado têm limitado número de espécies devido às grandes profundidades e permeabilidade dos solos e ao baixo potencial de nutrientes do mesmo (OLIVEIRA; PRADO, 1984).

A vegetação rasteira do cerrado de solo arenoso é substituída pelo adensamento da vegetação de mata tropical subcadocifólia nas áreas com solo nutritivo e mais argiloso proveniente do intemperismo dos basaltos (OLIVEIRA; PRADO, 1984). Na região de São Carlos o avanço da atividade agropastoril e monocultura extensiva resultou na supressão dessa vegetação natural que atualmente ocorre em pequenas áreas de preservação e próximo aos cursos da água.

### 6.3 CARACTERIZAÇÃO GEOLOGICO-GEOTÉCNICA

A geologia do município faz parte do contexto da deposição das bacias da Província Sedimentar Meridional do Paraná, apresentando formações da Bacia do Paraná, Bacia Serra Geral e a Bacia Bauru (SILVA et al., 2003) e coberturas

sedimentares, com formações que datam desde a Era Paleozóica até a Cenozoica.

Ocorrem formações do Grupo São Bento (Formação Pirambóia, Botucatu e Serra Geral) de deposição do Jurássico ao Eo-Cretáceo. Inicialmente com depósitos de rios evoluindo para depósitos de sedimentos eólicos intercalados e recobertos por vulcanismo básico e intrusivas associadas (diques e sills) (SILVA et al., 2003).

A Bacia Bauru tem como base os derrames basálticos da Formação Serra Geral onde sobre eles estão depósitos sedimentares de dunas e sistemas de leques aluviais, fluviais e pântanos, que compõem dois grupos cronocorrelatos, (FERNANDES; COIMBRA, 1998 apud SILVA et al. 2003) que na região de São Carlos são o Grupo Bauru e a Formação Itaqueri (RICCOMINI, 1997).

### 6.3.1 GRUPO SÃO BENTO

Constituído por depósitos de arenitos sobrepostos por derrames basálticos. Inicia no jurássico com depósitos fluviais e eólicos, representados pelas Formações Piramboia e Botucatu, respectivamente, e durante o cretáceo inferior pela Formação Serra Geral (GONÇALVES, 1989).

A formação Pirambóia, representada por arenitos de granulação fina a média de estratificação plano paralela destacada com lâminas ricas em argila e silte. Seu contato com a formação Botucatu, pode ocorrer gradualmente, por mudança litológica, ou através da discordância erosiva, quando a formação Botucatu se inicia por arenito conglomerático ou conglomerado basal (GONÇALVES, 1989).

A formação Botucatu caracteriza-se por arenitos eólicos de granulação fina a média, bem selecionados, foscos e alta esfericidade, estratificações cruzadas de médio a grande porte (GONÇALVES, 1989), com porções (camadas) silicificadas. O contato superior faz-se por interdigitação com a formação Serra Geral, e também estes aparecem com intercalações de camadas areníticas (GONÇALVES, 1989). Na região de São Carlos aflora na porção sul do município, porém normalmente ocorre recoberto pelos derrames basálticos da formação Serra Geral e formação Itaqueri.

A formação Serra Geral foi resultado de intenso magmatismo fissural, no final da Supersequência Gondwana III (MILANI, 2004) no período Jurássico. Na forma de uma espessa cobertura de lavas, com cerca de 1.500 metros de espessura junto ao depocentro da bacia, associado a uma extensa rede de diques e múltiplos níveis de soleiras (intrusivas básicas) intrudidos na pilha sedimentar (PERROTA et al, 2006).

Os basaltos efusivos da formação Serra Geral na região possuem espessura de até 250 m; ocorrem nas serras e em regiões de fundos de vales. Entre esses derrames também são encontrados sedimentos da Formação Botucatu (PONS, 2006), na forma de arenitos intertrapianos.

Estas rochas básicas são densas com textura afanítica e coloração escura, além de intensamente fraturados (NISHIYAMA, 1991), e permeabilidade equivalente é de  $10^{-5}$  cm/s. A formação Serra Geral é recoberta em discordância angular pelas formações sedimentares do Grupo Bauru ou depósitos inconsolidados cenozoicos.

### 6.3.2 FORMAÇÃO ITAQUERI

Definida por Almeida e Barbosa (1953) para representar os sedimentos da serra homônima, estes autores consideraram inicialmente que seu depósito seria inferior ao Grupo Bauru, Cretáceo. Atualmente a Formação Itaqueri é considerada por Riccomini (1997), Muro (2000), Pons (2006) e Costa (2017) como correspondente deposicional do Grupo Bauru na região de São Carlos.

Ponçano (1981) descreveu os sedimentos como eventualmente silicificados, com grande variedade mineralógica, de matriz argilosa e em pequena quantidade o cimento é calcedônia, incluindo ainda óxido de ferro. Os conglomerados, com espessuras de até 5 m, compõem-se de clastos bem selecionados, com até 30 cm de diâmetro; compostos principalmente por basalto, tendo ainda quartzo, calcedônia, granito, quartzito, argilito, filito, pegmatito, sílex e folhelhos.

A formação Itaqueri é composta por depósitos irregulares de coberturas pós-trapianas, de idade paleocênica-eocênica e corresponde aos depósitos areno-conglomeráticos que recobrem as serras de Itaqueri, Santana, São Carlos e Cuzzeiro (RICCOMINI, 1997).

Pons (2006) descreveu a ocorrência da Formação Itaqueri a leste da cidade de São Carlos baseando-se nos trabalhos de Bortolucci (1983), Aguiar (1989) e Muro (2000). São arenitos finos a conglomeráticos, mas com raros registros devido ao espesso pacote de idade cenozóica que os recobre (PONS, 2006). Segundo Failache (2018) a espessura dos depósitos na região de São Carlos pode chegar a 30 metros. A Formação Itaqueri tem como ambiente deposicional os leques aluviais, fluviais e lacustres, de média a alta energia (PONÇANO, 1981).

### 6.3.3 CENOZÓICO

As Formações Superficiais que datam do Cenozóico são sedimentos com contribuição das litologias dos depósitos anteriores, formando aluviões e coluviões. Bortolucci (1983) descreveu esses sedimentos como pouco compactos, extremamente porosos e com gênese relacionada ao retrabalhamento do Grupo Bauru e São Bento, por meio de transportes com influência da água, podendo atingir espessura de até 20m (NISHYIAMA, 1991). Apresentam minerais de quartzo, caulinita gipsita, ilmenita e magnetita.

Soares e Landim (1976) dividiram os depósitos cenozóicos da região em terciários relacionados aos sedimentos arenosos pouco argilosos sobrepostos à Formação Itaqueri e os quaternários associados aos depósitos arenosos localizados nas bases das encostas e terraços. Muro (2000) também registrou esses depósitos cenozóicos em seu trabalho.

## 6.4 MATERIAIS INCONSOLIDADOS

Admitindo as propriedades geotécnicas e a classificação de mapeamentos desenvolvidos anteriormente, os materiais inconsolidados na região de São Carlos, foram descritos por Zuquette (1981), Aguiar (1989), Nishiyama (1991), Muro (2000), Pons (2006), Fagundes (2010), Bartolomeu (2012), Failache (2018). Aguiar (1989) propôs para a área de expansão urbana de São Carlos a classificação de nove materiais inconsolidados, subdividida em três materiais residuais e seis materiais transportados que sofreram retrabalhamento; a subdivisão foi adotada por Pons (2006), com atualização de nomenclatura.



#### 6.4.1 MATERIAIS INCONSOLIDADOS RESIDUAIS

Os residuais Botucatu possuem espessuras que não ultrapassam 2 m (PONS, 2006) constituída por areias médias de 70 a 80% (Muro, 2000), sua mineralogia é constituída principalmente de quartzo (90%), seguida de argila caulínica (PONS, 2006) e gibbsita (FAILACHE, 2018).

Os residuais da Formação Serra Geral 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 gibbsita e a fração areia fina pelo quartzo, magnetita e ilmenita além de goethita, esmectita e limonita (FAILACHE, 2018). Os coeficientes de permeabilidade (K) variam de  $10^{-6}$  a  $10^{-3}$  cm/s (NISHIYAMA, 1991, MURO, 2000 E PONS 2006), diminuindo com a profundidade do perfil (MURO, 2000).

O Residual Itaqueri 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, gibbsita, ilita e esmectita (FAILACHE, 2018). Apresenta espessura dominante de 2 m, posicionada em altitudes em torno de 850 m (PONS, 2006). O coeficiente de permeabilidade possui grande amplitude, devido aos níveis conglomeráticos característicos destes depósitos, na ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-2}$  cm/s (NISHIYAMA, 1991); Pons (2006) registrou intervalo menor, de  $10^{-5}$  a  $10^{-2}$  cm/s.

#### 6.4.2 MATERIAIS INCONSOLIDADOS TRANSPORTADOS

O arenoso I é composto predominantemente por areias finas a média, tem contribuição significativa da formação Botucatu, mas apresenta contribuição das formações Serra Geral e Itaqueri (PONS, 2006). Sua espessura pode chegar até 20 m e tem composição mineralógica de quartzo, caulinita e óxidos de ferro.

O arenoso II está presente nas áreas de ocorrência da formação Botucatu e próximo aos magmatitos básicos, resultando na maior proporção de finos diferenciando-o do Arenoso I. O quartzo é o mineral mais abundante, mais de 90%, seguido da caulinita, magnetita e zircão. Com indices variáveis de permeabilidade de  $10^{-5}$  a  $10^{-3}$  cm/s ou maiores (PONS, 2006).

O arenoso III ocorre mais significativamente na região, com textura areno-argilosa, possui contribuição de todas as unidades. É homogêneo

frequentemente apresenta linhas de seixos em profundidade de 2,5 a 8 m, que comumente marcam o contato inferior.

As classes texturais são argila (38%), silte 14%, areia fina 41%, areia média 7% de coloração amarelo avermelhada (FAILACHE, 2018). Com espessuras de 5 a 20 m, predominando a faixa de 5 a 10 m na maior parte da bacia. O coeficiente de permeabilidade (K) está entre  $10^{-3}$  e  $10^{-2}$  cm/s (NISHIYAMA, 1991).

O material aluvionar ocupa locais de baixa declividade e fazem parte depósitos sedimentares recentes com textura arenosa, altos teores de finos e pedregulho, principalmente ao longo do rio Monjolinho na região sul do perímetro urbano (BARTOLOMEU, 2012), além da presença de matéria orgânica.

Os materiais coluvionares são resultantes da contribuição das encostas de basalto e areias da formação Botucatu com espessura maior que 10 m, aparecem em encostas com declividades superiores a 15% (PONS, 2006). Apresenta teores de argila (35%), silte (8%) e frações equilibradas de areia fina e média (BARTOLOMEU, 2012).

O material orgânico está localizado em baixios topográficos e constitui-se predominantemente de material orgânico com textura bastante variável, desde extratos arenosos, siltosos e argilosos (PONS, 2006).

## 6.5 GEOMORFOLOGIA E DECLIVIDADE

As “cuestas basálticas” caracterizam-se morfologicamente por escarpas, composta por grandes plataformas estruturais de relevo suavizado inclinadas na direção do Rio Paraná, constituindo o reverso das cuestas e dissecadas pelas bacias dos rios Jacaré-Guaçu e Mogi-Guaçu (AGUIAR, 1989), onde se situa São Carlos.

### 6.5.1 MAPA DE *LANDFORMS*

Pons (2006) adotou a classificação de Muro (2000), definido que em São Carlos estão presentes 5 unidades de *landforms* (formas de terreno), como apresentado no Quadro 8. Na área de estudo, estão presentes os morrotes suaves, vales abertos, e uma pequena faixa de platôs.

**Quadro 8 - Classificação das formas de relevo.**

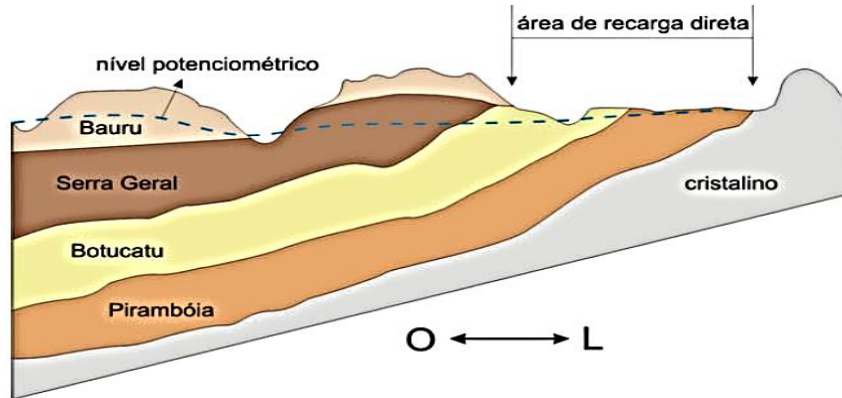
<b>Unidades de <i>Landforms</i></b>	
Morrotes Suaves	-Declividades 2 a 10% -Profundidade 10 a 20 metros -Raros canais de drenagem
Platôs	-Declividade até 5% -Grande espessura de Inconsolidados (maior que 10 metros) -Raros canais de drenagem
Vales abertos	-Encostas côncavas e convexas suaves -Declividades inferior a 15% -Profundidade menor que 10 metros
Morrotes com topos arredondados	-Pontos isolados, sobre basaltos -Declividade maior que 20% -Profundidades em torno de 5 metros
Encostas Íngremes	-Côncavas -Declividades superior a 20% -Profundidade menor que 2 metros dos materiais inconsolidados

Adaptado de Muro (2000).

## 6.6 HIDROGEOLOGIA E HIDROQUÍMICA

Os sistemas de aquíferos presentes no estado de São Paulo se enquadram em dois grandes grupos: aquíferos fraturados e sedimentares (Figura 11). Entre os sedimentares estão os aquíferos Guarani, Bauru, Taubaté, São Paulo, Tubarão, Litorâneo e Furnas e entre os fraturados estão os aquíferos Serra Geral e Cristalino (ROCHA et al., 2006).

**Figura 11 - Modelo Hidrogeológico Regional**



Fonte: Fagundes (2010)

Estão presentes em São Carlos três importantes sistemas de aquíferos: o Sistema Aquífero Guarani (SAG), o Sistema Aquífero Serra Geral e o Sistema Aquífero Bauru (SAB). O SAG é constituído pelas rochas sedimentares das formações Pirambóia e Botucatu, do Grupo São Bento. Sotoposta ao SAG estão presentes rochas de baixa permeabilidade e sobrepostas a elas estão os sucessivos derrames basálticos, que confinam e recarregam o aquífero de forma indireta, através das fraturas (Tabela 1). No município de São Carlos estão presentes os Aquíferos Pirambóia / Botucatu, confinado e livre, Serra Geral livre, Itaqueri livre e Aluvionar também livre (COSTA, 2019).

**Tabela 1 - Características dos Aquíferos**

Unidade Aquífera	SAG	Aquífero Serra Geral	SAB
Espessura	20 a 238 (m)	300 a 1500 (m)	75 a 300 (m)
Condutividade Hidráulica média (K)	2 a 4 (m/d)	0,04 a 4,3 (m/d)	0,0382 a 0,45 (m/d)
Varição de Transmissividade (T)	39 a 1.037(m <sup>2</sup> /d)	0,864 a 691 (m <sup>2</sup> /d)	10 a 100 (m <sup>2</sup> /d)
Porosidade	0,2 a 0,4	0,01 a 0,05	Variável
Composição	Bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas mistas e bicarbonatadas sódicas	Bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas cálcicas.	Bicarbonatadas cálcicas e mistas e bicarbonatadas sódicas.

Fonte: Costa (2019) e CETESB (2018).

O Aquífero Pirambóia / Botucatu é um importante aquífero sedimentar poroso, livre nas regiões sul e norte da área urbana do município, a confinado em outras

regiões, quando recoberto pelos derrames basálticos. Composto pelas rochas das formações Pirambóia e Botucatu, de granulometria fina-média, com alto potencial armazenador e circulador de água.

Segundo CETESB (2019) as águas do SAG são classificadas predominantemente como bicarbonatadas cálcicas (45%) e, secundariamente, bicarbonatadas mistas (28%) e sódicas (23%), segundo o Diagrama de Piper. Ocorrem também águas cloretadas mistas (2%). O pH está entre 4,63 e 10,2 sendo que na porção aflorante apresenta caráter ácido e na porção profunda e confinada, básico, bem como a temperatura entre 21,3 a 44,7°C.

O Aquífero Serra Geral, armazena água nas fraturas das rochas basálticas, parcialmente livre e ocorre aflorando no fundo dos vales. Os solos possuem baixo coeficientes de permeabilidade além de lenta recarga por confluir com relevo acidentado. No ASG as águas são classificadas predominantemente como bicarbonatadas sódicas (40%) e, secundariamente, bicarbonatadas cálcicas (30%) e mistas (26%); já o pH varia entre 6,7 a 9,5 e as temperaturas no intervalo de 22,5 a 30,9 °C (CETESB, 2019).

O Aquífero Bauru (SAB) que na região é representado pela Formação Itaqueri, é poroso e livre, ocorre recobrimo o Aquífero Serra Geral ou o Guarani. As águas do SAB são classificadas em bicarbonatadas cálcicas (43%) e mistas (37%) e, secundariamente, as bicarbonatadas sódicas (17%). Com temperatura variando de 19,4 a 29,5°C, e pH de 5 a 9,96 (CETESB, 2019).

Segundo o último relatório da qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo, em decorrência da maior pluviosidade o SAB apresentou menor presença de metais e sais e aumento das concentrações de Nitrato e Cloreto, em comparação com dados do período de 2010-2015, quando as taxas de pluviosidade foram menores resultado no aumento das concentrações de sais e metais e redução de Nitrato (CETESB, 2018).

Apesar do Aquífero Itaqueri ser uma unidade aquífera significativa e bastante explorada na região e no município de São Carlos, não há individualização deste, sendo tratado como pertencente ao SAB; e nem mesmo sua separação das unidades coluvionares da região, segundo suas características hidrogeológicas e hidroquímicas, havendo portanto, interesse em estudar tais características, já

que os colúvios possuem espessura significativa podendo contribuir com a característica da água.

Além das unidades aquíferas coluvionares, Costa (2017) em estudo de bacia hidrográfica próxima à do presente estudo, propôs a Unidade Aquífera Aluvionar que tem como característica a ocorrência nas planícies aluviais, próximo à superfície e trata-se de um aquífero sedimentar, poroso, livre e com baixo custo de exploração.

## 7 MATERIAIS E MÉTODOS

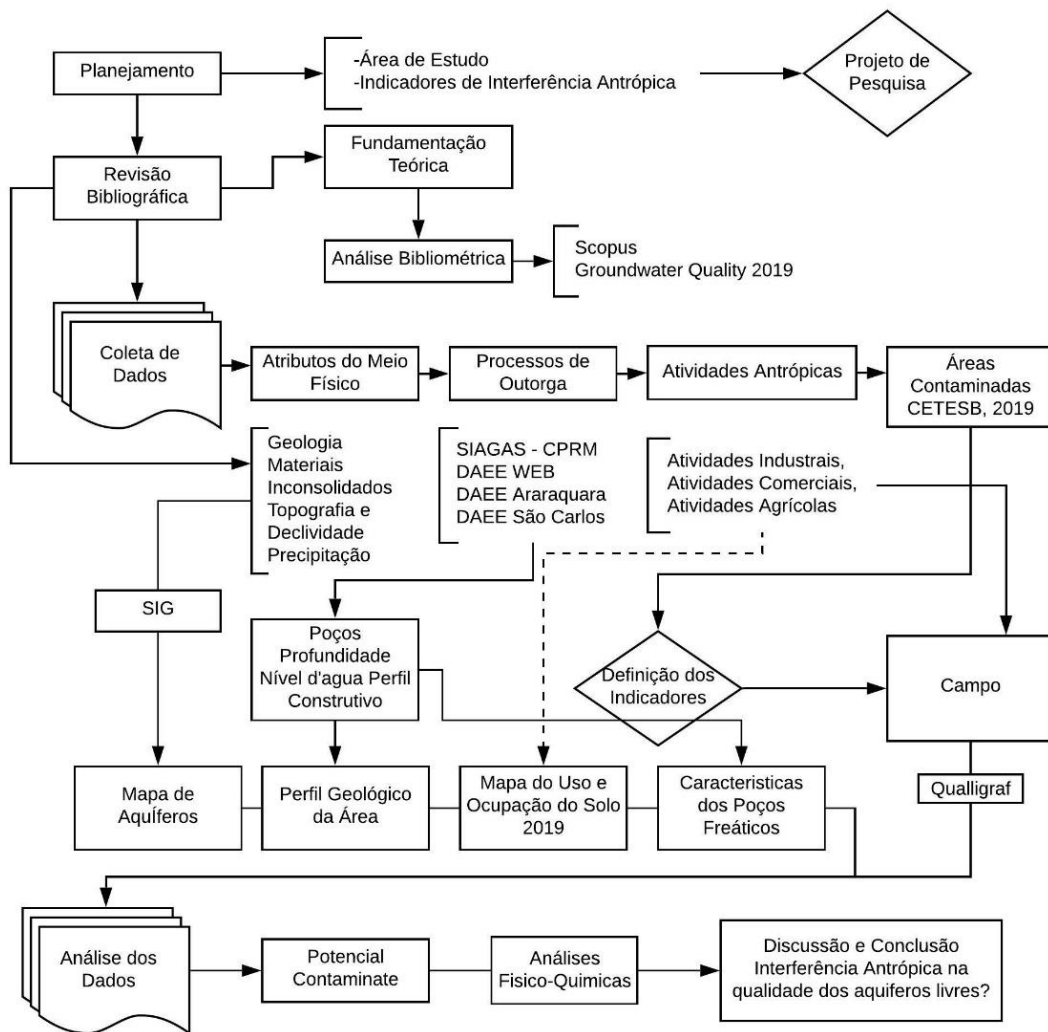
A presente pesquisa foi desenvolvida em seis etapas, organizadas no Quadro 9 e Figura 12 e descritas na sequência.

**Quadro 9 - Etapas de trabalho e as atividades realizadas.**

<b>Etapas</b>	<b>Atividades</b>
<b>1.Planejamento</b>	Revisão bibliográfica preliminar
	Definição do tema e área de estudo
	Métodos de análise
	Projeto de Pesquisa
<b>2.Revisão Bibliográfica</b>	Fundamentação Teórica
	Análise Bibliométrica
<b>3.Coleta de Dados</b>	Atributos do meio físico
	Processos de outorga dos Poços
	Atividades antrópicas
	Áreas contaminadas
	Definição dos indicadores
	Campo
<b>4.Banco de Dados</b>	Mapa dos Aquíferos Freáticos
	Perfil Geológico
	Mapa de uso e ocupação do solo
	Características dos poços freáticos
<b>5.Análise e Discussão dos Dados</b>	Potencial Contaminante
	Análises físico-químicas
<b>6.Síntese</b>	Conclusão

Fonte: Autora

**Figura 12 - Fluxograma com as etapas dos trabalhos.**



Fonte: Autora

## 7.1 PLANEJAMENTO

Inicialmente foi definida a grande área a ser pesquisada e dentro do contexto da influência antrópica na qualidade das águas subterrâneas foi desenvolvido o projeto de pesquisa; para tanto foi necessária uma pesquisa preliminar.

A pesquisa consistiu em analisar áreas que apresentam dinâmicas de uso antrópicas variadas e que tiveram mudanças significativas no seu uso. A consulta das áreas foi realizada previamente através do Plano Diretor do município, no qual são definidas áreas de proteção e importância para o manancial que abastece a cidade de São Carlos.



Posteriormente, definiu-se a metodologia básica para a investigação da qualidade da água subterrânea, através de indicadores de resposta de rápida mudança no ambiente natural e antrópica.

## 7.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica pertinente ao assunto foi consultada durante todas as etapas da pesquisa. Buscando sempre artigos e trabalhos atualizados, que permitiu a análise das mudanças hidroquímicas, mais registradas, que os ambientes antrópicos provocam em todo o planeta. A consulta dos artigos, monografias, teses foi realizada a partir das plataformas de indexação Scopus, Capes além das teses disponíveis nos sites das universidades.

### 7.2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Inicialmente foram investigadas referências bibliográficas a respeito das relações das águas subterrâneas freáticas no ciclo hidrológico e sua interferência nas águas superficiais; hidroquímica básica, definida pelos constituintes maiores menores, dentro do contexto de indicadores utilizados nos diferentes ambientes antrópicos; proposta de Geoindicadores, disponibilizada pela USGS, foi utilizada como base para a investigação.

### 7.2.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica foi iniciada em julho de 2019, com a necessidade de entender como são desenvolvidas as metodologias acerca do tema qualidade das águas subterrâneas. Nessa perspectiva foram contabilizados artigos publicados na plataforma Scopus durante o mês de julho e atualizados em março de 2020, para adicionar artigos publicados recentemente nesta pesquisa.

Na análise, para além da quantificação dos artigos, buscou-se analisar artigos de maior destaque pelo número de citações nos últimos dez anos (2010 – 2020). A análise englobou a metodologia aplicada, os parâmetros analisados, o ambiente antrópico investigado e a localização geográfica. Os materiais utilizados nessa pesquisa foram a plataforma de indexação Scopus®, o Software Excel e Word.

### 7.3 COLETA DE DADOS

A terceira etapa consistiu na investigação dos dados do meio físico através de mapeamentos realizados anteriormente em trabalhos desenvolvidos na região do município de São Carlos.

A busca de informações sobre os poços de captação da água subterrânea, as atividades antrópicas existentes e áreas contaminadas estão descritas no Quadro 10. Durante essa etapa foi realizadas as campanhas de investigação em campo.

Durante a coleta de dados em laboratório os materiais utilizados foram os softwares ArcGIS© 9.1, Word, Excel, Bloco de Notas, os sites Earth Explorer e Diretório Inpe para aquisição das imagens de satélites.

**Quadro 10 - Dados coletados**

<b>Materiais</b>	<b>Referência</b>
<b>Cartas topográficas IGC, 1989</b>	SF-23-V-C-IV-3-SO-F; SF-23-V-C-IV-3-SE-E; SF-23-Y-A-I-1-NE-A
<b>Imagem de Satélite 2019</b>	Digital Globe – Google Earth Pro ©
<b>Imagem de Satélite 2014</b>	
<b>Informações dos Poços</b>	DAEE, SIAGAS e Consulta física DAEE Araraquara e DAEE São Carlos, Identificação em campo
<b>Áreas Contaminadas</b>	CETESB, 2018
<b>Atividades Industriais e Comerciais</b>	Licenciamentos Cetesb

Fonte: autora

Com os mapas topográficos e suas curvas de nível foi gerado o modelo digital de terreno (MDT) da área de estudo em escala de 1:10.000. A compilação realizada nos mapas geológico e de materiais inconsolidados foi em escala de 1:25.000. A digitalização foi realizada em ambiente SIG, com o *software* ArcGIS© 9.1. O DATUM utilizado em todos os mapas apresentados nesse trabalho foi o SIRGAS 2000, Zona 23S, projeção UTM. Através da ferramenta *Project and Transformation* na ferramenta *ArcToolbox*, as coordenadas foram atualizadas. Imagem de alta resolução do ano de 2014, disponível no PPGEU, foi utilizada para a confirmação do georreferenciamento.

### 7.3.1 ATRIBUTOS DO MEIO FÍSICO

Nesta etapa foram organizados dados referentes às análises pertinentes ao presente trabalho, como teste de infiltração, granulometria, análises geoambientais, condutividade hidráulica, análises físico-químicas da água, geologia, materiais inconsolidados, espessura dos materiais inconsolidados, declividade e altimetria. Para o desenvolvimento da base cartográfica e teórica dentro da sub-bacia (Quadro 11).

**Quadro 11 - Bibliografias consultadas**

<b>Autor, ano</b>	<b>Título</b>	<b>Dados utilizados</b>	<b>Pontos</b>
<b>Aguiar, 1989</b>	Mapeamento Geotécnico da área de expansão urbana de São Carlos: contribuição ao planejamento.	Materiais Inconsolidados, Geologia.	35 Pontos
<b>Muro, 2000</b>	Carta de Zoneamento da seleção de áreas frente à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos	Características Geológico Geotécnicas	2 pontos
<b>Pons, 2006</b>	Levantamento e Diagnóstico Geológico-Geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos -SP com auxílio de Geoprocessamento.	Ensaio de Infiltração	6 pontos
<b>Souza, 2011</b>	Avaliação da qualidade ambiental nas nascentes do rio Monjolinho na porção à montante da estação de captação de água do espraído, São Carlos-SP.	Localização das nascentes	4 pontos
<b>Bartolomeu, 2012</b>	Análise de Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos na Região Urbana de São Carlos (SP) por vazamento em postos de combustíveis, utilizando do método GOD e avaliação dos condicionantes geotécnicos.	Pontos de Descrição Potencial de Vulnerabilidade	2 pontos
<b>Failach, 2018</b>	Proposta de procedimentos para a estimativa de infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial baseada em dados geológicos, geotécnicos, de uso e ocupação e eventos de chuva.	Composição Hidroquímica dos Aquíferos	1 pontos
<b>Basilio, 2019</b>	Estudo das águas subsuperficiais em áreas de contribuição de fontes naturais suportadas por sedimentos cenozoicos e da formação Itaqueri na região de São Carlos-SP	Recarga dos Aquíferos Subsuperficiais e localização das nascentes	4 pontos

Fonte: Autora

### 7.3.2 PROCESSOS DE OUTORGA DOS POÇOS

Inicialmente consultou-se os poços presentes na área de estudo pela plataforma online SIAGAS, disponibilizada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Em seguida, no site do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), fez-se a consulta dos poços, por Bacia Hidrográfica e por Município, separando-se os inseridos na área de estudo; nessa etapa as informações dos autos dos poços selecionados auxiliaram na terceira etapa desta consulta.

Ao final da primeira etapa da pesquisa observou-se que as informações disponíveis nos sites não tinham todos os dados dos poços e seria necessária a

consulta dos processos no escritório de apoio técnico do DAEE em Araraquara; com a lista dos poços identificados nos sites, consultou-se os processos de outorga de todos os poços, profundos e freáticos. Foi feita uma ampliação de busca por registros não disponíveis nos sites, coletando-se as coordenadas de todos os processos registrados, gerando-se base de dados com a informação completa dos processos outorgados dentro da bacia de estudo.

Alguns poços da zona rural da área de estudo tinham seus cadastrados no escritório de apoio técnico do DAEE São Carlos, mas sem informações do perfil construtivo do poço nem do perfil geológico, apenas mencionando o aquífero que captam a água e a profundidade do poço.

As informações necessárias para a presente pesquisa foram a localização, o aquífero que retira água, a situação do poço (cadastrado, tamponado) o tipo de uso dos poços (industrial, rural e/ou sanitário) a profundidade, as características hidrogeológicas (nível estático - NE, nível dinâmico - ND, vazão - Q), perfil construtivo, perfil geológico, análises químicas anteriores e as datas dessas análises. As informações foram organizadas em tabela no Excel, e os pontos digitalizados em ambiente SIG.

### 7.3.3 ATIVIDADES ANTRÓPICAS

O detalhamento das atividades atuais teve início com a consulta de mapeamentos anteriores de uso do solo para a interpretação preliminar dos tipos de culturas realizadas na zona rural, já que nesses mapeamentos não havia detalhamento da parte urbana da área de estudo.

Para o detalhamento tanto na zona rural quanto na zona urbana, foram consultadas imagens de satélite históricas da plataforma Google Earth Pro®, imagens de satélite de alta resolução dos anos de 2019 e 2014, esta última disponível no PPGEU. Interpretações manuais, como a rugosidade, tonalidade e padrão da zona rural, resultaram na definição manual dos limites das culturas no *software* ArcGIS®.

O IBGE (2013) definiu 5 classes do uso do solo, baseando-se nas atividades antrópicas e na cobertura do solo: (1) áreas antrópicas não agrícolas, (1.1) área urbanizada, (1.2) área de mineração; (2) áreas antrópicas agrícolas (2.1) cultura temporária, (2.2) cultura permanente, (2.3) pastagem, (2.4) silvicultura (2.5) uso

não identificado; (3) áreas de vegetação natural, (3.1) florestal, (3.1) campestre; (4) água, (4.1) corpo d'água continental (4.2) corpo d'água costeiro; (5) outras áreas (5.1) área descoberta.

Neste trabalho, buscou-se dividir e detalhar a região urbanizada; com interpretação de imagens de densidade de construções, arruamentos e outros. Com o auxílio do *Google Street View* e checagem de campo, foram detalhadas as atividades comerciais e indústrias; paralelamente estas mesmas atividades foram consultadas na plataforma de licenciamento ambiental da Cetesb quanto ao caráter potencial contaminante e o tipo de contaminante. Em campo foram comprovadas ou não a existência dessas atividades e identificados depósitos irregulares de lixo e atividades que não identificadas através do licenciamento. As informações foram organizadas em tabelas do Excel® e os limites das atividades desenhados no *software* ArcGIS© sobre imagens de satélite.

#### 7.3.4 ÁREAS CONTAMINADAS

A CETESB disponibiliza o Relatório Anual de Áreas Contaminadas, do estado de São Paulo. A consulta realizada do relatório de 2019 uniu todas as áreas registradas no município de São Carlos. Os dados foram organizados em tabela, as coordenadas, o tipo de atividade, os contaminantes e situação atual do grau de contaminação, posteriormente georreferenciadas em SIG.

#### 7.3.5 DEFINIÇÃO DOS INDICADORES

A definição dos indicadores foi feita a partir dos dados anteriormente adquiridos. Procurou unir informações a respeito do uso dos poços e as atividades do entorno. No total foi analisado 29 parâmetros entre a primeira e segunda fase de amostragem (Quadro 12).

#### 7.3.6 CAMPO

O primeiro campo foi realizado na fase de pré-projeto, para reconhecimento da área de estudo e viabilidades de acesso aos locais. Em campo fez-se a identificação das atividades potencialmente poluidoras, das áreas contaminadas, do uso e cobertura do solo, e dos poços encontrados nos cadastros consultados, além de novos poços não cadastrados e a viabilidade da retirada de amostras contatando os proprietários. Nessa fase também foi confirmado e registrado a

atividades antrópicas, tanto na zona urbana quanto na zona rural da área de estudo.

A primeira coleta das amostras foi realizada nos dias 28/03, 29/03 e 1/04 de 2019, referente ao final do período chuvoso, coletadas amostras de águas em 8 poços freáticos. A segunda coleta foi realizada nos dias 30/09 e 4/10 de 2019, referendo ao final do período seco e foram coletadas amostra de água em 7 poços. Um poço foi descartado por não retirar água do aquífero freático como constava dos cadastros consultados. No Quadro 12 estão descritos os parâmetros e os respectivos métodos de análises.

**Quadro 12 - Parâmetros analisados e os métodos utilizados.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>
<b>pH</b>	Phmetro AK95	<b>K</b>	SMWW 3120 B
<b>T°C</b>	Phmetro AK95	<b>Mg</b>	SMWW 3120 B
<b>CE µS/cm</b>	condutivímetro	<b>Ca</b>	SMWW 3120 B
<b>TDS ppm</b>	condutivímetro	<b>B</b>	SMWW 3120 B
<b>ORP mV</b>	Medidor de bolso AK95	<b>NO<sub>3</sub></b>	USEPA 300.0
<b>OD ppm</b>	Medidor de bolso AK95	<b>NO<sub>2</sub></b>	USEPA 300.0
<b>Pb</b>	Espectrofotômetro	<b>Cl<sup>-</sup></b>	USEPA 300.0/ SMWW 4500- E
<b>Zn</b>	Espectrofotômetro	<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	USEPA 300.0
<b>Cu</b>	Espectrofotômetro	<b>N-NH<sub>3</sub></b>	USEPA Method 350.2
<b>Cd</b>	Espectrofotômetro	<b>P</b>	SMEWW 4500 P E
<b>As</b>	SMWW 3120 B	<b>Alcalinidade Total</b>	SMWW - 2320 B
<b>Al</b>	SMWW 3120 B	<b>Glifosato</b>	USEPA 300.0
<b>Fe</b>	SMWW 3120 B	<b>Fl<sup>-</sup></b>	USEPA 300.0
<b>Mn</b>	SMWW 3120 B	<b>Atrazina</b>	USEPA 8270 D
<b>Na</b>	SMWW 3120 B		

Fonte: Autora

Para as coletas, a metodologia seguida foi da *Standart methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2015). Antes das coletas foi efetuado o bombeamento dos poços; no caso de poços já em uso no dia, não houve bombeamento por já ter havido circulação de água no interior do mesmo. Para cada poço foram utilizados 5 frascos para a coleta de amostra (Figura 13). Os frascos foram lavados com a água do poço de cada ponto antes de coletada. As amostras foram rotuladas e refrigeradas a 4°C até serem encaminhadas para

o laboratório particular Venturo Análises, localizado em Araraquara, e para o Laboratório de Geotecnia Ambiental localizado na USP.

**Figura 13 - Coleta das amostras de água, frascos utilizados e medições realizadas em campo**



Fonte: Autora

Os equipamentos utilizados em campo foram previamente calibrados em solução tampão conforme especificado no manual do fabricante. Em campo para a medição dos parâmetros de condutividade, pH, OD, ORP e TDS, os equipamentos foram lavados com água deionizada e depois com a água do poço, medindo-se após purga do poço (Figura 14).

**Figura 14 - Equipamentos utilizados para medição em campo**



Fonte: Autora

## 7.4 BANCO DE DADOS

O banco de dados gerados a partir das etapas anteriores, permitiu a interpretação das unidades aquíferas, perfis geológicos, mapa de uso e ocupação do solo e as características dos poços amostrados.

### 7.4.1 MAPA DOS AQUÍFEROS

O mapa dos aquíferos presentes na área de estudo, em escala de 1:20.000, foi desenvolvido a partir dos mapas de substrato geológico e materiais inconsolidados e espessura desses materiais de acordo com o trabalho de Pons (2006), além das informações do nível d'água presente tanto nas bibliografias consultadas quanto dos poços de captação da água subterrânea da região, com auxílio das cartas topográficas (IGC, 1989), as referências consultados estão dispostas no Quadro 10 e Quadro 11.

### 7.4.2 PERFIL GEOLÓGICO

A partir do compilado de mapas com pontos descritos em trabalhos anteriores (Quadro 11) e das informações dos poços consultados nos processos de outorga, foram desenvolvidos perfis geológicos da área de estudo.

### 7.4.3 MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A partir das informações adquiridas das atividades antrópicas mapeadas com auxílio das informações descritas no Quadro 10, os dados gerados nesta etapa consistiram na delimitação de 28 classes de uso do solo, potencial contaminante e os tipos de contaminantes. Em escala de detalhe e abrangendo todas as informações adquiridas.

### 7.4.4 CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS FREÁTICOS

As informações utilizadas para compreender a disposição dos aquíferos freáticos da região foi através das consultas de todos os poços localizados na área de estudo, além de outros presentes na região, foram coletadas informações como localização dos poços, o uso do solo, características hidrogeológicas e perfil geológico e ou construtivo.



## 7.5 ANÁLISE DOS DADOS

Através das informações adquiridas nas etapas anteriores foi possível a interpretação do potencial contaminante da área de estudo, a espacialização de dados hidrogeológicos, além da apresentação dos resultados das análises-físico-químicas, classificação das amostras de água e o risco à salinização.

### 7.5.1 HIDROGEOLOGIA

O nível estático da área de estudo foi determinado a partir das informações dos poços localizados na área de estudo com a aplicação da ferramenta IDW (*Inverse Distance Weighted*) inverso da distância dos pesos, para a visualização em distribuição espacial dos níveis identificados, onde é aplicada a uma análise estatística linear, sendo necessário delimitar o número máximo e mínimo de vizinhos e o valor padrão.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (2)$$

Onde Z: valor estipulado para o nó reticulado, Zi: valor do ponto amostrado vizinho ao nó, hij: distância entre o nó da grade e Zi,b: expoente de ponderação, n: número de pontos amostrados.

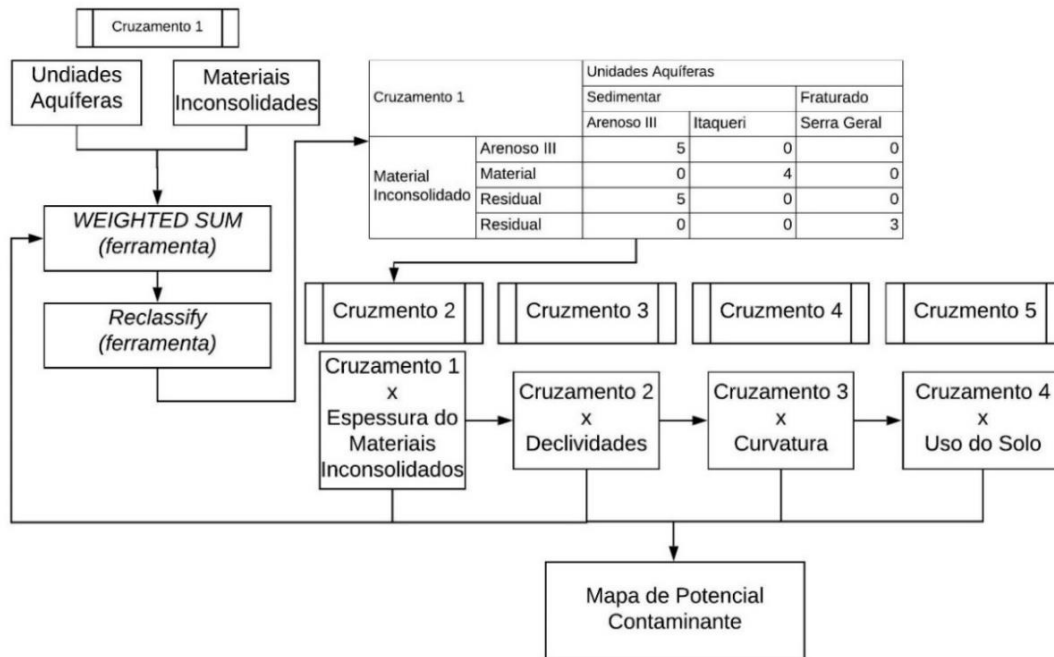
### 7.5.2 POTENCIAL CONTAMINANTE

A caracterização do uso do solo foi desenvolvida em três etapas. A primeira consistiu analisar o principal uso do solo em mapeamentos anteriores. A delimitação foi efetuada manualmente no *software* ArcGIS© referente ao ano de 2019 em escala de 1:20.000, com reconhecimento das atividades em campo e imagens de satélites.

A segunda etapa desta análise foi investigar os tipos de atividades comerciais e industriais através da consulta dos licenciamentos ambientais, áreas contaminadas e investigação em campo. A análise multicritério foi realizada com a ferramenta de álgebra de mapas através da distribuição de pesos. Dentro do

ambiente SIG e com auxílio do Excel para o desenvolvimento das matrizes (Figura 15). A definição dos pesos dos materiais inconsolidados e substrato geológico foi baseado no trabalho de COSTA et al (2019), já que o mesmo foi realizado em região próxima à área de estudo. O valor zero de alguns valores é por não haver o cruzamento dessas informações.

**Figura 15 - Fluxograma sistematizando procedimentos adotadas para análise do potencial poluidor.**

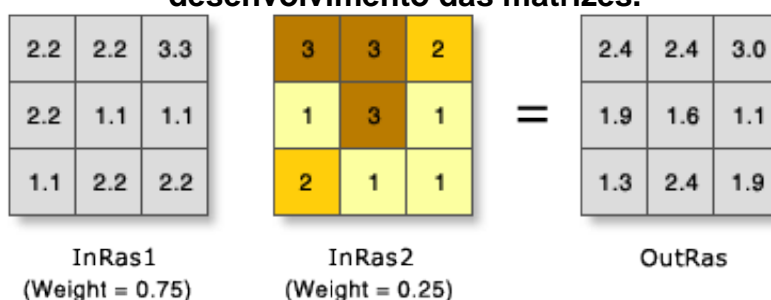


Fonte: Adaptado de COSTA (2019)

Os pesos aplicados nas classes de uso do solo dentro do perímetro urbano das atividades industriais e comerciais foi baseado a partir dos poluentes gerados das atividades e o risco a poluição a partir do índice w e classificação em tabelas disponíveis (SÃO PAULO, 2006; CETESB, 2001; IRITANI et al., 2013).

A ferramenta soma dos pesos (*Weighted Sum*) que funciona a partir da soma de duas raster. A Figura 16 demonstra como são somadas as duas camadas de informações, o resultado é a somatória dos pesos de cada camada. Para o presente estudo considera-se peso uso para a somatória final.

**Figura 16 - Somatória de pesos realizada pelo ArcGIS© para o desenvolvimento das matrizes.**



Fonte: ArcGIS (2019)

Os potenciais contaminantes das classes do uso do solo foram definidos conforme o cruzamento dos pesos do potencial contaminante com as atividades. Entende-se como potencial contaminante, toda atividade e cobertura do solo, que pode potencializar alguma alteração na dinâmica das águas subterrâneas. Sendo assim, estão adicionadas na lista todas as classes do uso do solo identificadas na área de estudo.

### 7.5.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICA

A apresentação dos parâmetros analisados foi efetuada através dos gráficos com resultados iniciais, médios (quando necessário) e finais. Os gráficos estão apresentados por poços e desenvolvidos em Excel.

Em seguida as amostras foram classificadas no Diagrama de Piper, através do *software* Qualigraf. Foi analisada também a qualidade das águas para irrigação através da concentração de sódio, magnésio e cálcio, calculando a razão de adsorção do sódio (RAS):

$$RAS = \frac{N_a}{\sqrt{\frac{c_a + m_g}{2}}} \quad (3)$$

Posteriormente classificadas pelo diagrama USSL, que aplica a Razão de RAS pela Condutividade Elétrica (CE) da água.

Em um segundo momento foram comparados os valores encontrados para os parâmetros analisados com os Valores Máximos Permitidos (VMP) em quatro legislações vigentes para controle da qualidade da água subterrânea (BRASIL, 2017; CONAMA, 2008; CETESB, 2016). Os resultados foram comparados com os valores de referência de qualidade (VRQ) apresentados pela (CESTESB,

2019) e por fim comparados também com composições apresentadas em trabalhos anteriores que investigaram o aquífero freático da região.

**Tabela 2 - VRQ dos aquíferos e VMP.**

Parâmetro	Unidade	Valor de Referência de Qualidade por Aquífero		VMP(a)
		Bauru	Serra Geral	
pH	--	7,5	8,0	6,0-9,5(b)
Temperatura	°C	26	26	--
Condutividade Elétrica	$\mu\text{s cm}^{-1}$	240	170	--
Sólidos Dissolvidos Totais	$\text{mgL}^{-1}$	200	145	1000
Alumínio – Al	$\text{mgL}^{-1}$	0,05	0,04	0,2
Arsênio – As	$\text{mgL}^{-1}$	<0,002	<0,002	0,01
Boro – B	$\text{mgL}^{-1}$	<0,03	<0,03	--
Cálcio – Ca	$\text{mgL}^{-1}$	25	15,5	--
Cádmio – Cd	$\text{mgL}^{-1}$	<0,0001	<0,0001	0,005
Cloreto – Cl	$\text{mgL}^{-1}$	5	1,5	250
Chumbo – Pb	$\text{mgL}^{-1}$	<0,002	<0,002	0,01
Cobre – Cu	$\text{mgL}^{-1}$	<0,01	<0,01	2
Crômio – Cr	$\text{mgL}^{-1}$	0,04	0,002	0,05
Ferro – Fe	$\text{mgL}^{-1}$	0,04	0,04	0,3
Fluoreto – F	$\text{mgL}^{-1}$	0,3	0,2	1,5
Magnésio – Mg	$\text{mgL}^{-1}$	8	4	--
Manganês – Mn	$\text{mgL}^{-1}$	<0,005	<0,005	0,1
Nitrato – $\text{NO}_3$	$\text{mgL}^{-1}$	1,5	0,5	10
Nitrito – $\text{NO}_2$	$\text{mgL}^{-1}$	<0,002	<0,002	0,1
N- Amoniacal – $\text{N-NH}_3$	$\text{mgL}^{-1}$	0,04	0,05	1,25(c)
Potássio - K	$\text{mgL}^{-1}$	4,5	2	--
Sódio – Na	$\text{mgL}^{-1}$	15	14,5	200
Sulfato – $\text{SO}_4^{2-}$	$\text{mgL}^{-1}$	<10	<10	250
Zinco – Zn	$\text{mgL}^{-1}$	0,03	0,02	1,8(e)
Glifosato				500 (d)
Atrazina	$\mu\text{gL}$			2 (d)

Fonte: CETESB (2019)

- (a) Portaria de Consolidação nº 05/2017 do Ministério da Saúde  
 (b) Recomendação de uma faixa de pH a ser mantida no sistema de distribuição de água para abastecimento;  
 (c) Valor do Padrão Organoléptico de Potabilidade para Amônia ( $1,5 \text{ mg NH}_3\text{L}^{-1}$ ) expresso em  $\text{mg N L}^{-1}$ ;  
 (d) VMP para consumo humano da Resolução CONAMA nº 396/2008  
 (e) Valor de intervenção (CETESB, 2016)

## 7.6 SÍNTESE

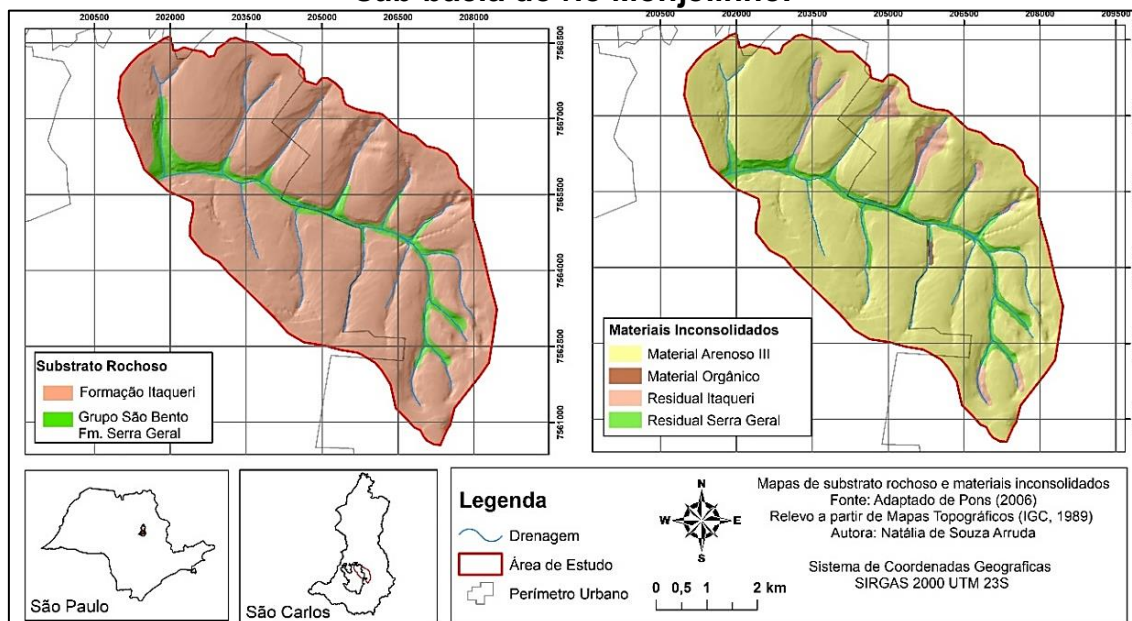
Na síntese buscou-se discutir os resultados adquiridos bem como responder pergunta chave desta pesquisa.

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 8.1 ATRIBUTOS DO MEIO FISICO

Os limites das unidades geológicas e dos materiais inconsolidados foram propostos por Aguiar (1989) e Pons (2006) em escala de 1:20.000.

**Figura 17 - Mapas de substrato rochoso e materiais inconsolidados da sub-bacia do rio Monjolinho.**



Fonte: Autora

Na presente área de estudo as unidades geológicas observadas são Formação Serra Geral e Formação Itaqueri. Quanto aos materiais inconsolidados tem-se o registro de quatro unidades, sendo que dois materiais de origem retrabalhada e dois residuais. O presente trabalho utiliza a classificação do Muro (2000) e Pons (2006).

Na área de estudo as rochas basálticas estão aflorando nos canais de drenagem em altimetria variando de 816 a 846 metros e correspondem a 7,7 % da área. Por outro lado, a Formação Itaqueri, corresponde aos afloramentos em cotas topográficas maiores, alcançado 943 m e atinge 92,3% da área. Essa formação tem grande importância regional, já que a maior parte da área urbana está sobre seus sedimentos.

Quanto aos materiais inconsolidados, segundo Pons (2006) estão presentes na área os Residuais da Formação Serra Geral, Residuais da Formação Itaqueri,

e também os materiais inconsolidados retrabalhados Arenoso III e o Material Orgânico (Figura 17). O perfil esquemático (Figura 18) mostra como as unidades estão presentes na área de estudo, a partir dos poços estudados e dos resultados identificados por Pons (2006).

**Figura 18 - Perfil esquemático das unidades que estão aflorando na área de estudo.**

Arenoso III	Residual Itaqueri	Residual Serra Geral
Residual Itaqueri	Fm. Itaqueri	Fm. Serra Geral
Fm. Itaqueri	Residual Serra Geral	Fm. Botucatu
Residual Serra Geral	Fm. Serra Geral	

Fonte: Autora

Os residuais da Formação Serra Geral na bacia estudada têm espessura variando entre 2 e 10 m, sendo as menores espessuras relacionadas aos relevos mais acentuados e as maiores espessuras ocorrendo próximo ao limite jusante da área. Os residuais da Formação Itaqueri encontram-se acima dos basaltos, aflorando em cabeceiras de drenagem e podendo ocorrer abaixo do Retrabalhado Arenoso III; ocorrem com pouca espessura, até 2 m de profundidade e estão localizados próximo à nascente na margem esquerda do canal principal.

O material retrabalhado Arenoso III é um material coluvionar que possui a contribuição de várias litologias, está sobrejacente ao material residual da Formação Itaqueri; ocorre em poções mais elevadas da bacia, sua espessura pode variar em profundidades maiores de 20 m, é a unidade mais expressiva da área de estudo (PONS, 2006).

Em uma pequena porção está o material orgânico, próximo ao canal de drenagem, podendo variar até 5 m de espessura (PONS, 2006). As características quanto a extensão, espessura, granulometria média e permeabilidade dos materiais inconsolidados estão dispostos na Tabela 3.

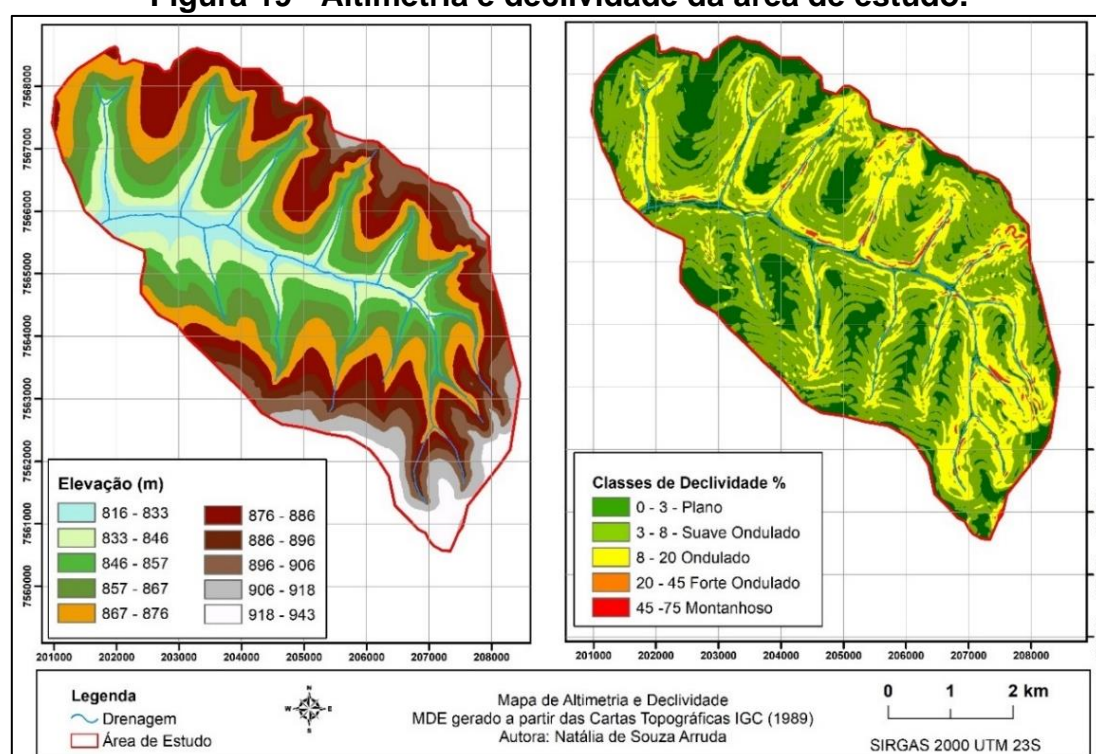
**Tabela 3 - Características dos materiais inconsolidados**

Materiais Inconsolidados		Área km <sup>2</sup> - (%)	Espessura (m)	Granulometria Média (%)						K (cm/s)
				*Ar	Si	Af	Am	Ag	G	
Residual	Fm.	2,12 – (6,56)	2 a 5	36	35	24	4	1	-	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-3</sup>
Residual	Fm.	1,42 – (4,4)	2	35	20	38	6	1	-	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-2</sup>
Arenoso III		28,66 – (88,9)	5 a 20	38	14	41	7	-	-	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-2</sup>
Material Orgânico		0,05 – (0,14)	5	-	-	Areia pura	-	-	-	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-3</sup>

\*Ar: argila, Si: silte, Af: areia fina, Am: areia média, Ag: areia grossa, G: pedreglho, K: coeficiente de permeabilidade. (NISHYIAMA, 1991).

A altimetria da área de estudo varia de 816 a 943 m. As baixas altitudes estão próximas ao curso principal do rio Monjolinho. A declividade varia de plano a ondulado, sendo que a área é caracterizada majoritariamente por relevo suavemente ondulado. As declividades acentuadas são percebidas próximo aos cursos d'água (Figura 19).

**Figura 19 - Altimetria e declividade da área de estudo.**



Fonte: Autora

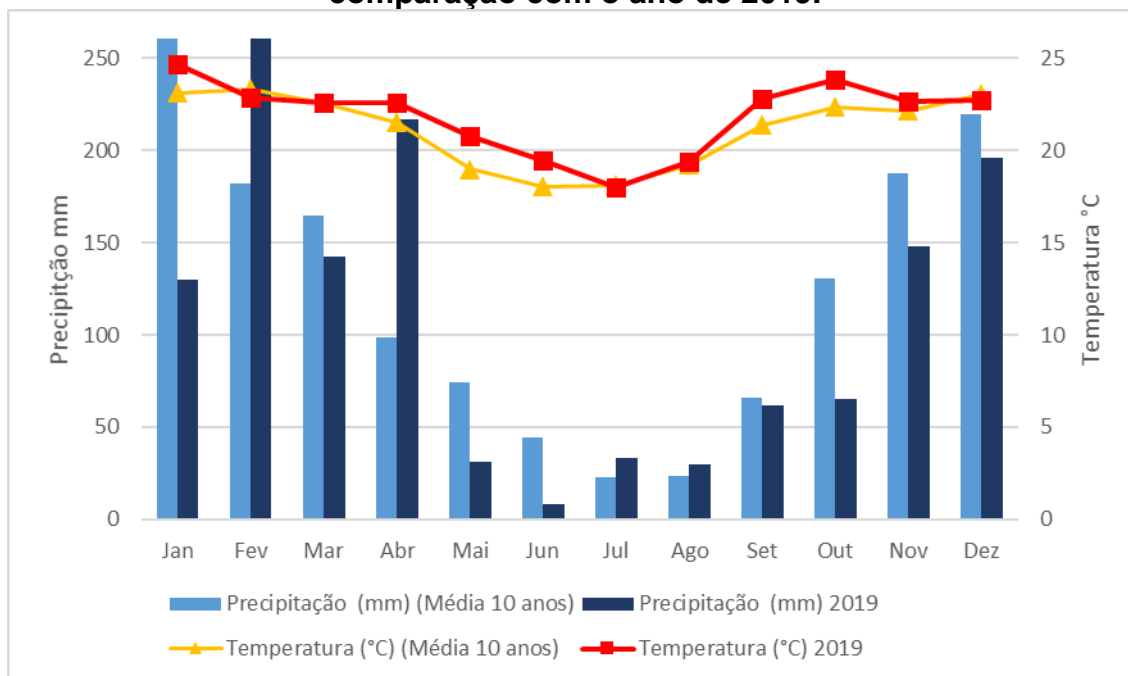
### 8.1.1 PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA

Na comparação dos dados climáticos de médias das temperaturas e das precipitações totais anuais dos últimos dez anos, com os do ano de 2019 (Figura 20), registrou-se precipitações mensais significativamente inferiores em janeiro,



maio, junho e outubro e superiores em fevereiro e abril de 2019; a média da temperatura em quase todos os meses foi superior em 2019, com destaque para os meses de abril, maio, junho, setembro e outubro.

**Figura 20 - Precipitação e temperatura mensal dos últimos 10 anos em comparação com o ano de 2019.**



Fonte: CPPSE (2020).

No verão entre os anos de 2018 e 2019, o mês de janeiro 2019 apresentou chuvas abaixo das médias históricas. Desde o ano de 2014 o mês de janeiro tem registros de precipitação abaixo das médias históricas na região Sudeste (REBOITA et al., 2015). A anomalia do verão de 2019 não é maior do que a de 2014, quando o período seco predominou por quase todo o verão (SILVA et al., 2020).

Períodos secos podem resultar na diminuição da recarga dos aquíferos e consequente diminuição de nascentes. Em região localizada dentro da presente área de estudo, tem-se que a média da recarga direta da precipitação anual de 16-36%, isso resulta em recargas de alto padrão, devido a granulometria dos materiais inconsolidados da região que possuem o predomínio de areia médias e finas (BASILIO, 2019).

## 8.2 UNIDADES AQUÍFERAS

Foram identificadas na área da sub-bacia, 42 poços de captação da água subterrânea (Apêndice 2). Desses, 38 possuem cadastro no DAEE e 22 poços tem cadastro no SIAGAS. Apenas 11 poços não possuem nem perfil geológico ou perfil construtivo, por esse motivo a permanência da classificação apresentados nos documentos de outorga ou cadastramento do poço. As informações completas de outros poços e pontos descritos anteriormente, conjuntamente com os mapeamentos de materiais inconsolidados e substrato rochoso preexistentes adotados nesta pesquisa, permitiram a interpretação das camadas aquíferas da sub-bacia. A seguir (Quadro 13) são apresentadas as informações dos poços consultadas nos processos de outorga.

**Quadro 13 - Informações dos poços de acordo com o aquífero explorado**

Aquífero	Zona		Cota dos Poços	Profundidade dos Poços	NE
	Rural	Urbana			
<b>Guarani</b>	5 poços	4 poços	820 - 920	204-484	9 - 167,7
<b>Botucatu</b>	1 poço	8 poços	840-905	176-405	10 - 132
<b>Serra Geral</b>	3 poços	2 poços	822-899	43-130	3,5-32,7
<b>Itaqueri</b>	11 poços	9 poços	823- 912	3-72	2,1-33

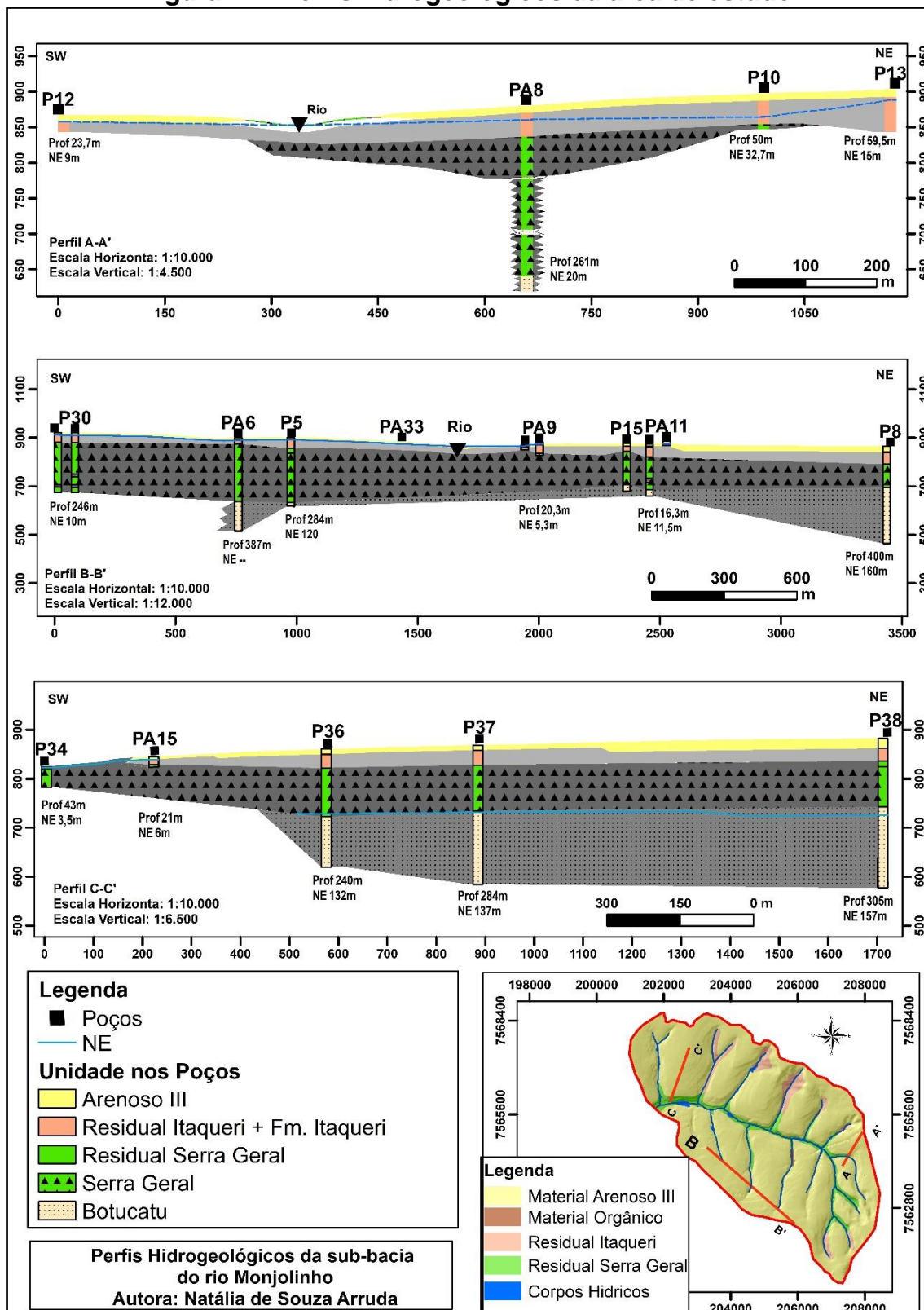
Fonte: Autora

### 8.2.1 PERFIL HIDROGEOLÓGICO

Para o entendimento da disposição dos materiais inconsolidados e do NE da área de estudo, foram traçados três perfis que podem ser observados na Figura 21 e em mais detalhe no Apêndice III.

O perfil A- A', está localizando na zona rural. Se inicia no poço raso P12, que possui 23,7 m de profundidade e nível estático a 9 m. Seguindo o perfil, os poços PA8, P10 e P13, este último também amostrado para análises físico-químicas têm NE de 20, 32,7 e 15 m, respectivamente. A altitude varia de 850 até 900 metros. O rio passa pela cota topográfica de 850 m. O NE do aquífero freático se encontra nas camadas de materiais inconsolidados Arenoso III, Residual Itaqueri e formação Itaqueri, podendo chegar ao Residual Serra Geral, já que não existe o detalhamento desses pacotes no perfil construtivo ou geológico desses poços.

Figura 21 - Perfis hidrogeológicos da área de estudo



Fonte: Autora

O perfil B-B' se inicia no poço PA5, com 246 metros de profundidade e nível estático 10 m. Próximo a este poço estão três poços rasos, P24, P25 e P26, com nível estático em torno de 2 m de profundidade. Entre os poços profundos PA33

e P17 estão os poços rasos PA12 e PA9 com NE de 5,3 e 9,5 m, respectivamente. O último poço raso deste perfil é o PA11 com NE de 11,5 m. O P17 apresenta NE de 60 m, referente ao aquífero Serra Geral. Os arenitos intertrapianos foram observados nos poços PA5, P30 e P17 em profundidades entre 160 e 215 m, com 10 m de espessura, não havendo a possibilidade de uma interpretação que permita o avanço dessas camadas, pela não continuidade observada.

O perfil C-C', localizado próximo à captação de água superficial do Monjolinho - Espreado, se inicia sobre o Residual Serra Geral no poço PP5. Há poucos poços rasos que permitam interpretar a profundidade do NE nesse perfil. BASÍLIO (2019) fez medições do NE de poços de monitoramento localizados próximo às nascentes dos cursos d'água superficiais próximo ao perfil.

#### 8.2.2 MAPA DE UNIDADES AQUÍFERAS

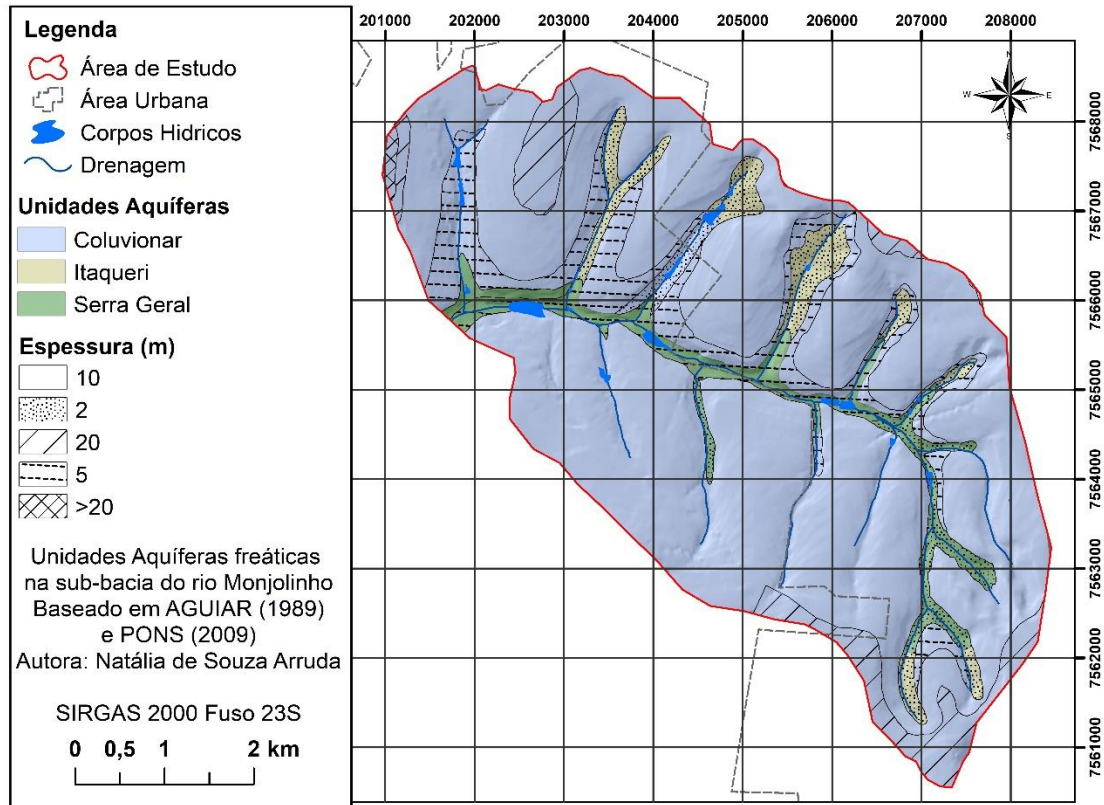
A partir das interpretações do substrato rochoso e dos materiais inconsolidados, foram delimitadas três unidades aquíferas freáticas na sub-bacia do rio Monjolinho (Figura 22 e Apêndice IV).

A unidade aquífera Coluvionar, correspondente ao material inconsolidado Arenoso III (AGUIAR, 1989), tem espessura variando de 5 a 20 m e o NE desta unidade está entre as cotas topográficas mais altas em 870 a 904 m, em cotas topográficas baixas de 830 a 845 m. Está sobreposta aos materiais residuais da formação Itaqueri ou residuais da formação Serra Geral. Cotas do NA

A unidade aquífera Itaqueri está abaixo da unidade Coluvionar e aflorando próximo a nascentes de canais de 1ª e 2ª ordem da cabeceira e dos afluentes margem direita do Rio Monjolinho na área estudada, acima da unidade aquífera Serra Geral. O aquífero Itaqueri possui porções do seu material residual e de sedimentos da formação Itaqueri. As espessuras das camadas dos residuais estão entre de 2 m além de ser registrado nascentes aflorando em cotas topográficas de 855 m. (Figura 22).

A unidade aquífera Serra Geral, tem afloramentos no curso do rio Monjolinho. A distribuição dos materiais residuais da formação Serra Geral não é delimitada a partir dos perfis dos poços de captação da água subterrânea pois não se consegue uma interpretação contínua desses depósitos.

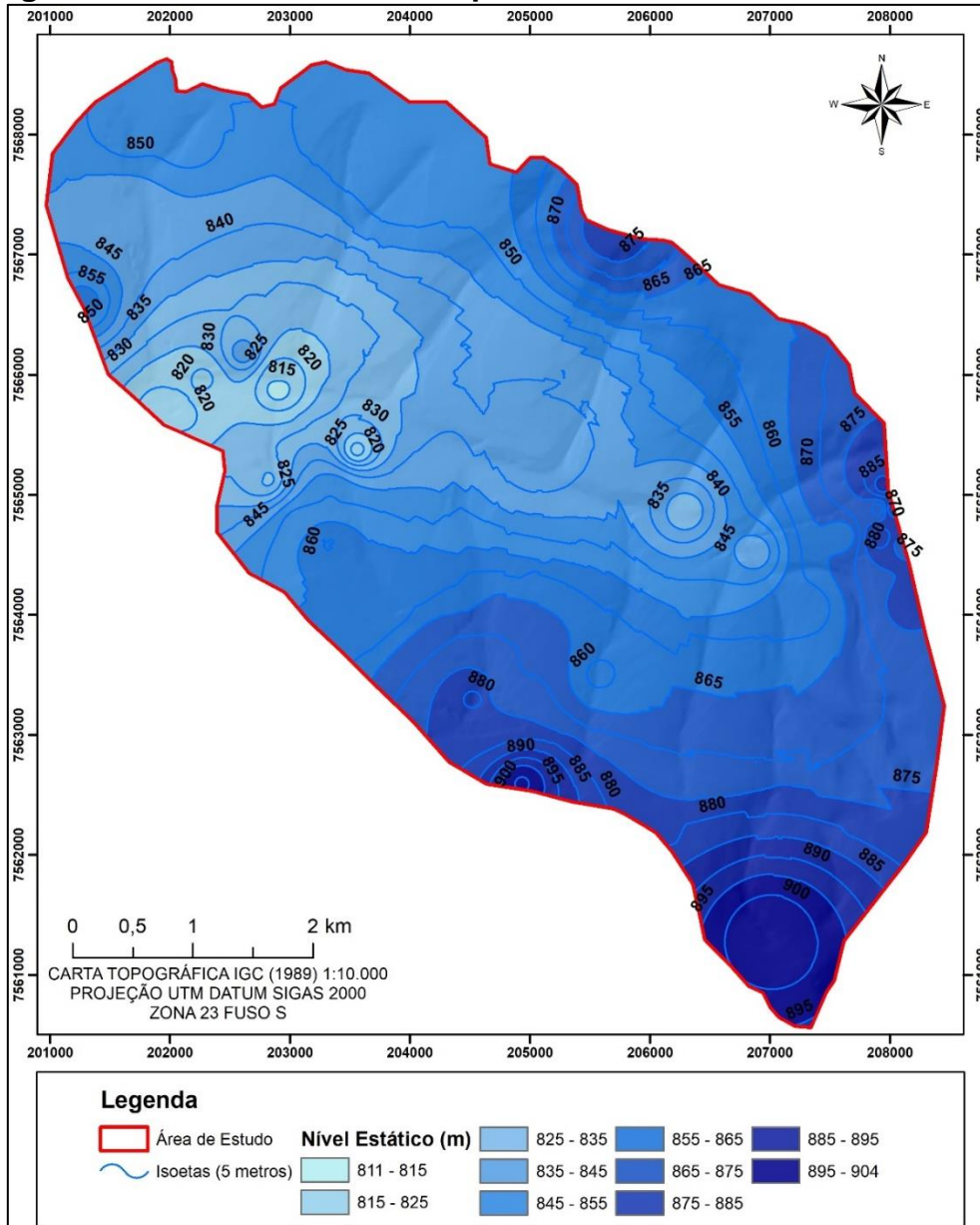
**Figura 22 - Mapa dos aquíferos presentes na sub-bacia do Rio Monjolinho**



Fonte: Autora

Os valores da cota do NE dos aquíferos freáticos da área de estudo (Figura 23) foram compilados a partir da profundidade do NE dos poços de captação da água subterrânea, subtraída das cotas topográficas onde estão localizados, além das nascentes e suas cotas topográficas.

**Figura 23 - Nível estático dos aquíferos freáticos da área de estudo**



Fonte: Autora

### 8.3 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A sub-bacia do rio Monjolinho apresenta características variadas de ocupação do solo, em decorrência da localização onde há tendência de expansão urbana, com aparelhos urbanísticos consolidados e nos últimos anos houve aumento do perímetro urbano. Esta análise foi feita a partir da interpretação de imagens de satélites (ARRUDA; MENEZES, 2019).

O uso e cobertura do solo pode ser dividido em duas regiões, uma localizada no perímetro urbano, com residências, comércios e indústrias, e a outra a região rural com atividades agropastoris, intensivas e pequenas propriedades rurais. A delimitação dos tipos de uso e cobertura do solo buscou um maior detalhamento destes usos, além de formar um banco de dados de áreas contaminadas ou com atividades potencialmente poluidoras ou que apresentem algum risco ambiental dentro da bacia hidrográfica.

Foram delimitadas 17 classes de uso do solo, sendo 9 delas localizadas apenas na região rural da área de estudo. Na Tabela 4 estão descritas as classes do uso do solo, a área ocupada em km<sup>2</sup> e a porcentagem que representam em relação à área total da sub-bacia. O mapeamento está na Figura 24 e no Apêndice V para visualização em detalhe.

**Tabela 4 - Classes delimitadas**

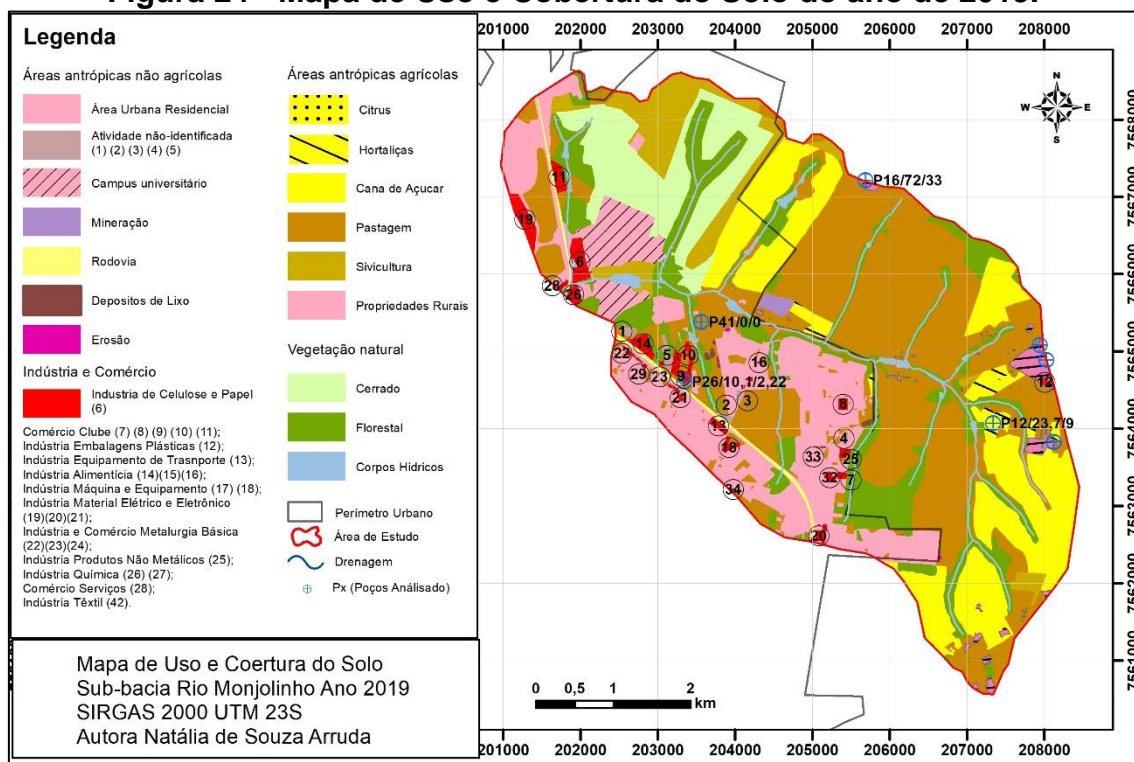
<b>Uso</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Área Urbana Residencial	5	15,50
Atividades não identificadas	0,1	0,31
Campus Universitário	0,93	2,88
Mineração	0,09	0,28
Rodovia	0,23	0,71
Depósito de Lixo	0,01	0,03
Erosão	0,01	0,03
Indústrias e Comércios	0,6	1,86
Citrus	0,01	0,03
Hortaliças	0,45	1,39
Cana de Açúcar	4,52	14,01
Pastagem e Vegetação Rasteira	11,04	34,23
Silvicultura	1,63	5,05
Propriedades Rurais	0,41	1,27
Cerrado	2,41	7,47
Florestal	4,58	14,20
Corpos Hídricos	0,23	0,71
Total	32,25	100

Fonte Autora

A maior classe em extensão areal é a de pastagem, nela foram incluídos os grandes terrenos vazios dentro do limite urbano municipal cobertas por vegetação rasteira, áreas de pasto e áreas sem cultivo identificado na área rural; a classe ocupa 34,23% da área. Há preocupação quanto ao caráter de potencial contaminante desta área, tanto na região urbana por serem áreas propensas à

deposição de lixo urbano, quanto em relação as atividades não identificadas nos terrenos rurais.

**Figura 24 - Mapa de Uso e Cobertura do Solo do ano de 2019.**



Fonte: Autora

A Área Urbana Predominantemente Residencial, ocupando 15,57% da área total, é a segunda maior classe. Estão incluídas nessa classe residências e comércios sem potencial contaminante muito significativo.

As áreas de preservação permanente SAPRE 1 e SAPRE 2, delimitadas na APREM-SC (SÃO CARLOS, 2006), situam-se ao longo dos rios, em nascentes, lagos e reservatórios e em encostas. Em análise anterior, identificamos o aumento de áreas vegetadas no curso do rio principal, comparação do ano de 2005, portanto anterior a delimitação, e 2019 (ARRUDA; MENEZES, 2019).

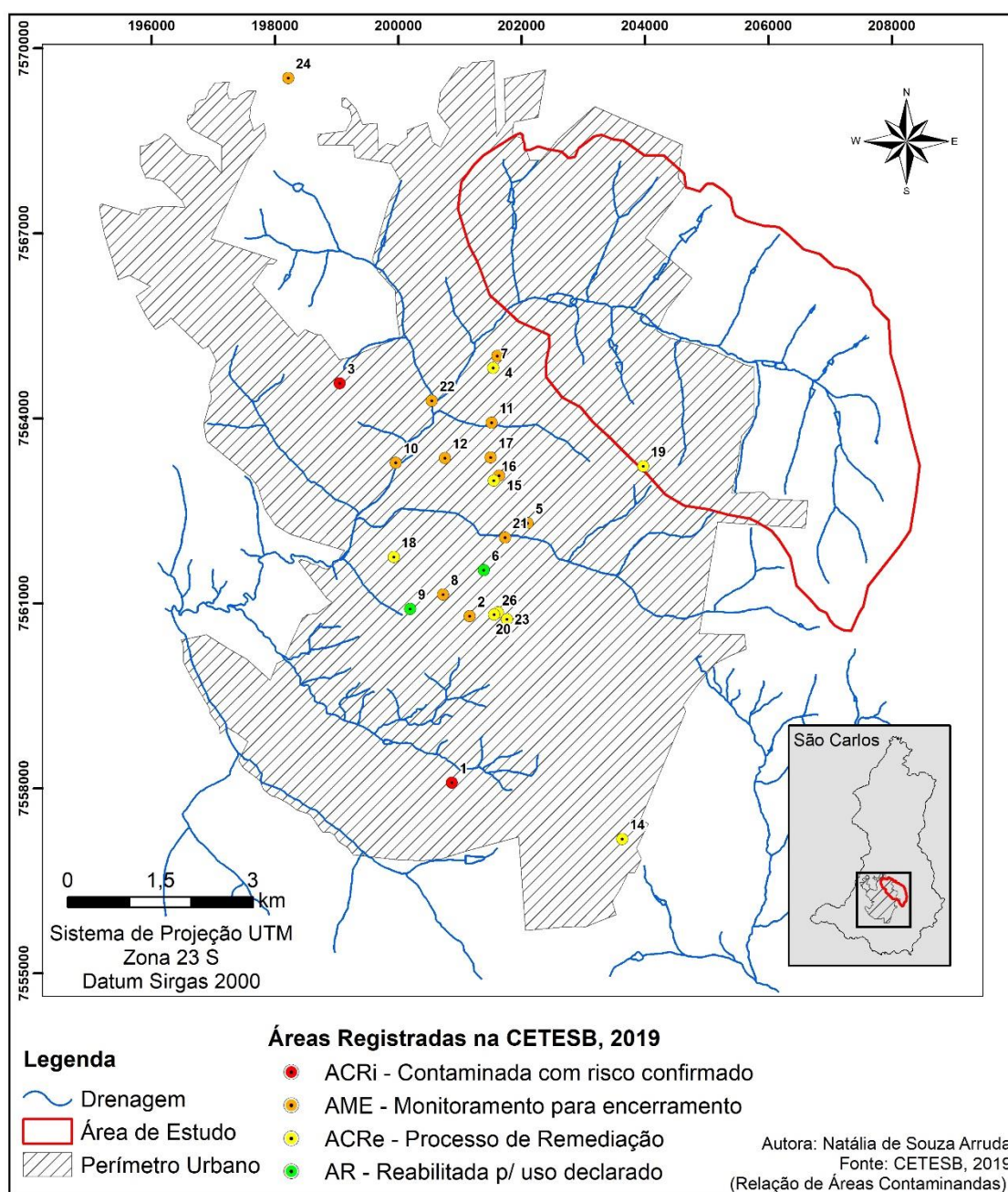
O detalhamento do perímetro urbano apresentou a delimitação de classes que apresentam potencial contaminante, que são as atividades industriais e comerciais de grande porte, depósitos de lixo, além dos galpões com atividade não identificada em área com indústria e empresas com potencial poluidor.



### 8.3.1 ÁREAS CONTAMINADAS

Como áreas contaminadas, foram consideradas apenas as cadastradas pela CETESB. Segundo o último relatório de áreas contaminadas (CETESB, 2019b), São Carlos possui 26 áreas contaminadas, sendo três classificadas como contaminada de risco Confirmado (ACRi), oito em processo de remediação (ACRe), 13 em processo de monitoramento para encerramento (AME) e duas estão reabilitadas para uso declarado (AR). A Figura 25 ilustra a localização das áreas contaminadas.

**Figura 25 - Áreas contaminadas no ano de 2019 (CETESB, 2019b)**



Fonte: Autora

Na área de estudo foi identificada uma área contaminada por PAH – Hidrocarboneto Aromático Policíclico e combustíveis automotivos, por fonte de armazenagem, atividade referente a posto de combustíveis. Atualmente se encontra em processo de remediação (ACRe), além de possuir registro de contaminação de água subterrânea e subsolo dentro da área do posto.

### 8.3.2 ATIVIDADES POTENCIALMENTE POLUIDORAS

Para o detalhamento do uso do solo na região urbana foram analisados os tipos de contaminantes das atividades comerciais e industriais que apresentam risco ou potencial poluidor (Quadro 14).

As atividades industriais e comerciais de grande porte em sua maioria estão concentradas próximas às rodovias, justificado pela facilidade do escoamento rodoviário. Dentro do perímetro urbano também estão as atividades classificadas como Serviços, atribuídas ao comércio como lavadora de carros e caminhões oficinas mecânicas, garagem de veículos grandes e postos de gasolina.

**Quadro 14 - Atividades potencialmente poluidoras e os tipos de contaminantes**

Atividades	Total	Classificação	Tipos de Contaminante
Depósitos de Lixo e Recicláveis	9	Utilidade Pública e Tratamento de Efluentes e Resíduos	Ácidos, bases, metais, solventes, fenóis, cianetos
Posto de Gasolina, Oficina Mecânica	14	Serviços	Amônia, solventes, hidrocarbonetos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos- PAH,
Industria Alimentícia	3	Alimentícia	Sódio
Industria de Tintas e Solventes	2	Química	Ácidos, bases, metais, solventes, fenóis, cianetos
Industria de Papel	1	Celulose e Papel	Óleos e graxas, ácidos, bases; bário, alumínio, chumbo, cádmio, cromo, sulfetos, cloretos
Industria de embalagens plástico	1	Reciclagem	-
Industria e Comércio de Transformadores e Compressores	3	Material Elétrico e Eletrônico	Ácidos, bases, fenóis, hidrocarbonetos, chumbo, cobre, cromo, níquel, cádmio, mercúrio, antimônio, bário, óleos e graxas
Industria de Reparos e Pesquisa	12	Equipamentos de Transporte	Ferro, cádmio, chumbo, cobre, cromo, berílio, níquel, cianetos, hidrocarbonetos, tintas e solventes
Industria de Equipamentos Odontológicos	5	Máquinas e Equipamentos	Ferro, alumínio, chumbo, cobre, cromo, cádmio, níquel, vanádio, antimônio,

			tungstênio, cianetos, hidrocarbonetos, óleos e graxas, solventes.
Área de Empréstimo	1	Minerais não metálicos	-
Pré-Moldados	1	Produtos Minerais Não Metálicos	Chumbo, cobre, cromo, níquel, cádmio, antimônio, bário, alumínio, tâlio, silicatos.
Fábrica de camisetas	1	Têxtil	Chumbo, cobre, cromo, cianetos, hidrocarbonetos, corantes
Cromagem	3	Metalurgia Básica	Ferro, cádmio, chumbo, cobre, cromo, bário níquel, antimônio, cianetos, asbestos, bifenilas policloradas-PCB, solventes, hidrocarbonetos, tintas, óleos e graxas

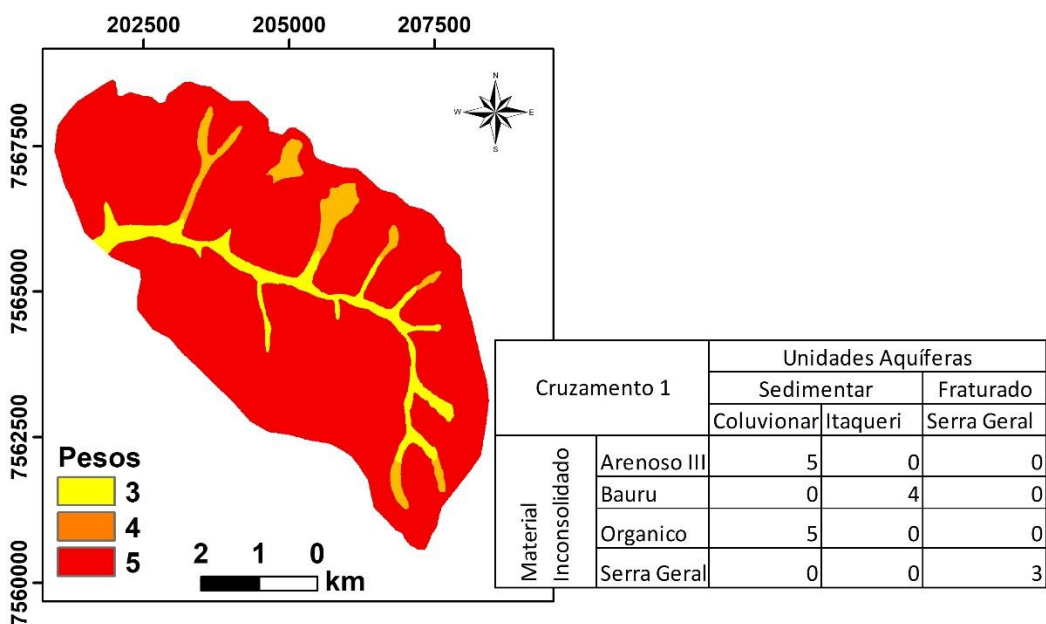
Fonte: Autora; \*São Paulo (2006)

### 8.3.3 POTENCIAL CONTAMINANTE

Buscou-se interpretar o potencial contaminante das atividades da área de estudo a partir da análise multicritério de 6 variáveis (unidades aquíferas, materiais inconsolidados, espessura dos materiais inconsolidados, declividade, curvatura do terreno e uso e ocupação do solo). As matrizes resultantes com os pesos correspondentes estão expostas a seguir juntamente com os respectivos mapas.

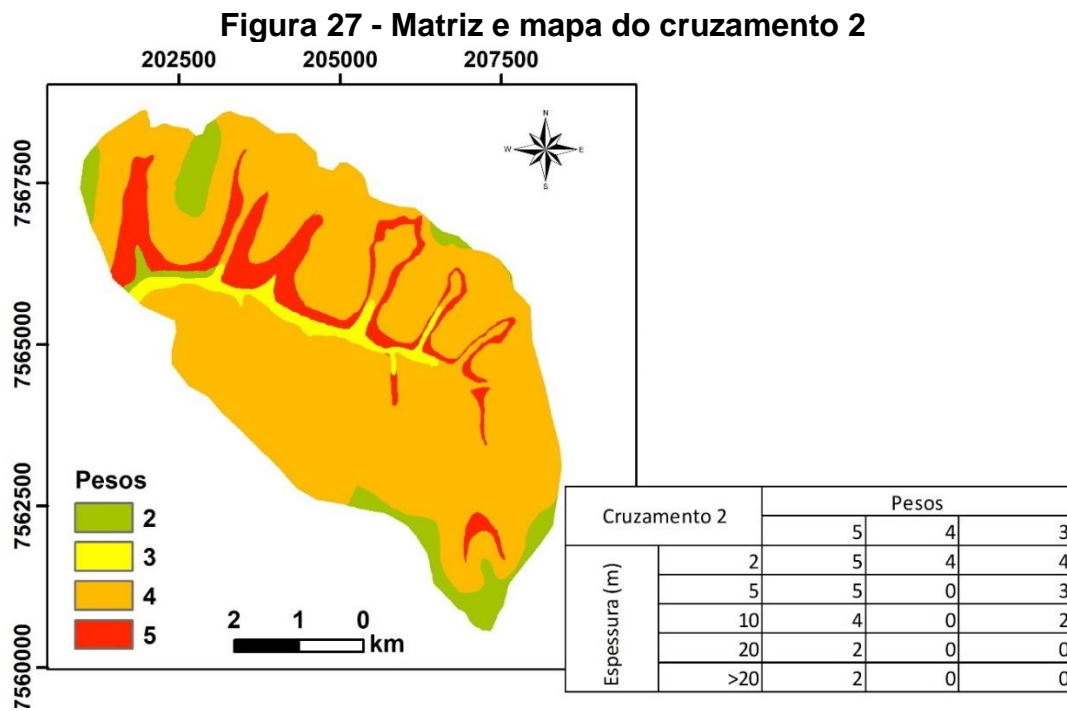
O primeiro cruzamento (Figura 26) determinou a relação dos materiais inconsolidados com as unidades aquíferas. A definição dos pesos foi a partir do trabalho de Costa et al (2019). Os zeros nas matrizes são camadas que não se cruzaram. O primeiro cruzamento apresentou apenas três pesos.

**Figura 26 - Matrizes e mapas do cruzamento 1**



Fonte: Autora

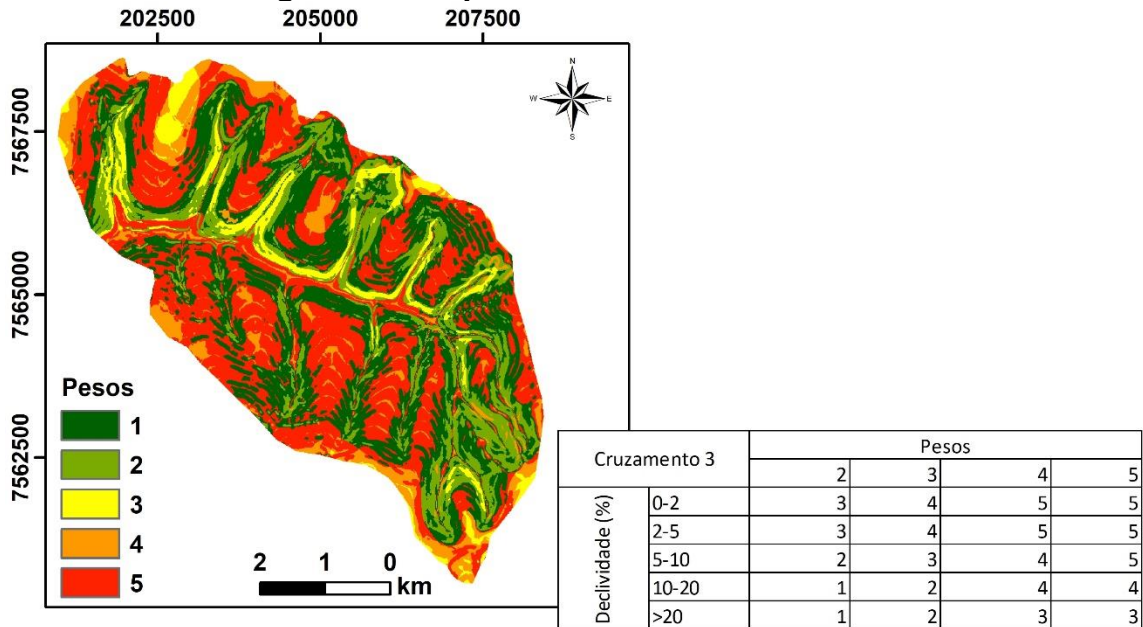
O cruzamento 2 (Figura 27) foi o resultado do primeiro cruzamento mais a espessura dos materiais inconsolidados; como resultado apresentou quatro pesos. Locais onde a espessura dos materiais é de 20 m ou mais apresentaram pesos mais baixos devido ao tipo de material presente nessas regiões, já em extensão representativa que tem o Material Arenoso III em 10 m de profundidade aplicou-se peso 4.



Fonte: Autora

O resultado do cruzamento 2 com a declividade da área de estudo resultou no cruzamento 3 (Figura 28). A declividade próxima aos canais de drenagem está entre 10 e >20%. Sendo assim, nessas regiões a infiltração da água no solo é menor quando compara a regiões mais planas. No geral, a área apresenta topografia pouco acidentada, porém nota-se que em área urbana as declividades estão suavizadas por contextos de interferências antrópicas.

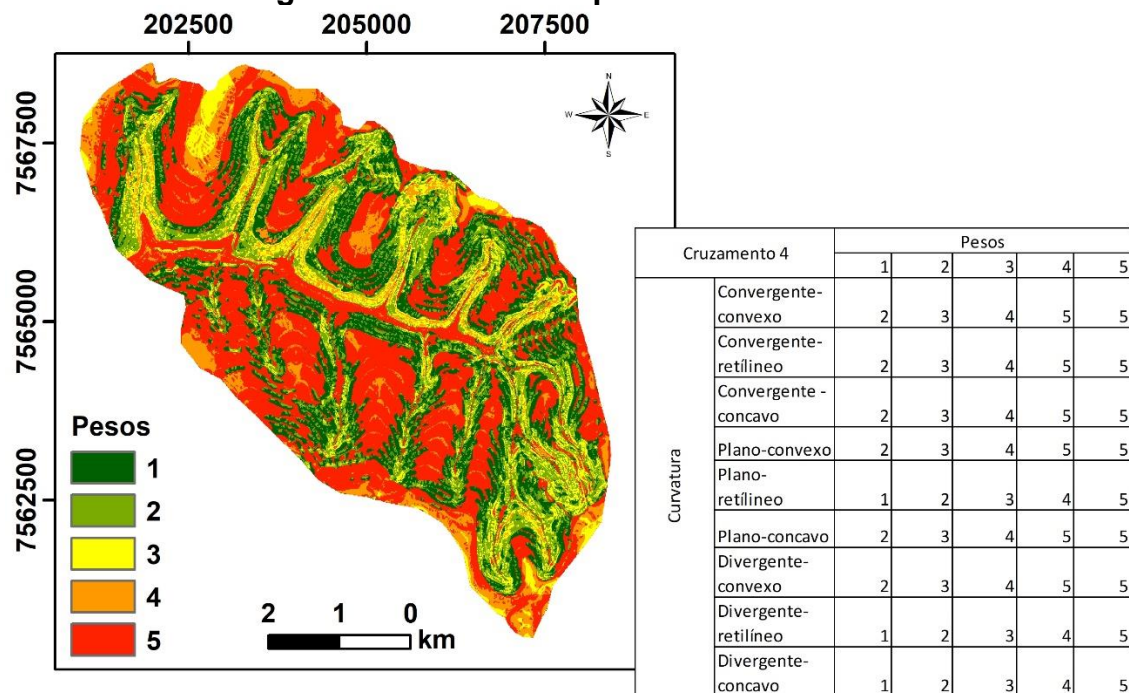
**Figura 28 - Mapa e matriz do Cruzamento 3**



Fonte: Autora

O Cruzamento 4 resultou do cruzamento 3 com informações das curvaturas do terreno como pode-se observar na Figura 29. Adicionou-se na análise a informação detalhada de áreas onde a curvatura do terreno contribui para a infiltração. O resultado do cruzamento 4 foi a expansão de áreas com peso 3, 4 e 5.

**Figura 29 - Matriz e mapa do Cruzamento 4**



Fonte: Autora

O último cruzamento foi referente ao uso do solo, delimitado em escala de detalhe; o resultado dos pesos atribuídos às atividades identificadas pode ser observado na matriz (Tabela 5). São 28 classes de uso e cobertura do solo.

**Tabela 5 - Matriz resultante do cruzamento 5**

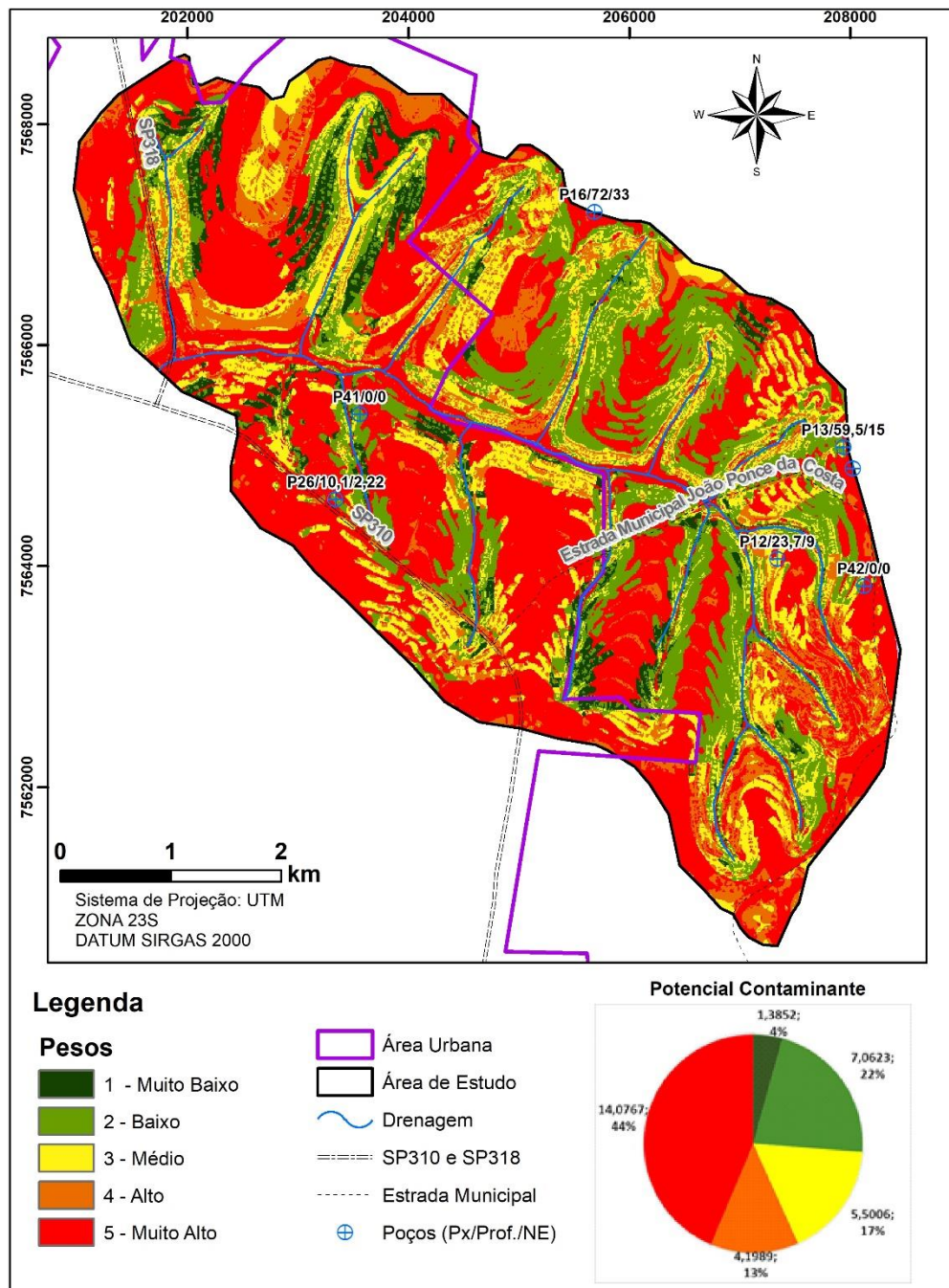
<b>Cruzamento 5</b>		<b>Pesos</b>				
	<b>Uso</b>	<b>Muito Baixo</b>	<b>Baixo</b>	<b>Médio</b>	<b>Alto</b>	<b>Muito Alto</b>
<b>Zona Rural</b>	Vegetação	1	2	3	4	5
	Vegetação Rasteira	2	2	3	4	5
	Cerrado	1	2	3	4	5
	Reflorestamento	2	3	3	4	5
	Cana de Açúcar	3	4	5	5	5
	Citrus	3	4	5	5	5
	Hortaliças	3	4	4	5	5
	Corpos Hídricos	2	3	3	4	5
	Propriedade Rural	2	3	4	5	5
<b>Zona Urbana</b>	Área de Empréstimo	2	3	3	4	5
	Campus Universitário	3	4	4	5	5
	Material Elétrico e Eletrônico	3	3	3	4	5
	Celulose e Papel	0	3	3	4	5
	Química	3	3	3	4	5
	Serviços	3	3	0	4	5
	Industria Alimentícia	3	3	3	4	5
	Metalurgia Básica	3	3	0	4	5
	Equipamentos de Transporte	2	2	0	0	2
	Maquinas e Equipamentos	3	4	4	5	5
	Clube	2	3	4	4	5
	Produtos minerais não metálicos	3	3	0	0	5
	Têxtil	3	3	0	0	3
	Embalagens Plásticas	0	0	0	4	4
	Área Urbana Construída	3	4	4	5	5
	Rodovia	4	4	5	5	5
	Depósitos de Lixo	5	5	5	5	5
	Erosão	5	5	0	0	5
	Atividade Não identificada	2	2	2	2	2

Fonte: Autora

O resultado final, que corresponde ao último cruzamento, pode ser observado na Figura 30. Foi considerada a classificação de 1 a 5, sendo que 1 corresponde ao menor potencial contaminante e 5 corresponde ao maior potencial contaminante, definindo as classes: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto.

O potencial contaminante muito alto (5) ocorre em aproximadamente 44% da área total. São locais onde a topografia apresenta baixa declividade, ou seja, maior possibilidade de infiltração e baixo fluxo superficial, tratando-se de sedimentos coluvionares do material transportado Arenoso III. Nessas regiões também estão as áreas construídas da região rural e urbana.

**Figura 30 - Potencial contaminante de área de estudo**



Fonte: Autora

Com 22% da área, o baixo potencial contaminante (2) está associado a áreas com cobertura vegetal, próximas aos canais de drenagem e declividade média a alta, ou seja, maior fluxo superficial e baixas taxas e de infiltração. Nota-se que em algumas regiões no canal de drenagem apresentam alto potencial contaminante dada pela supressão da vegetação, já que o tipo de material superficial, mais argiloso e com baixa capacidade de infiltração, apresenta baixa potencial contaminante.

Sobrepondo ao mapa gerado os poços onde foi feita coleta e análise de água, observou-se que P13, P26 e P41 estão em áreas com potencial contaminante baixo. O P12 está em região com médio potencial contaminante e os poços P16, P19 e P42, todos localizados na região rural, estão em áreas de potencial contaminante muito alto.

#### 8.4 CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS FREÁTICOS

O presente estudo analisou a água coletada em sete poços nos aquífero freáticos: P12, P13, P16, P19, P26, P41 e P42 (Quadro 15), os poços P12, P13, P16, P19 e P42 estão localizados na região rural, sendo que no perímetro dos poços P13, P19 e P42 estão residências das propriedades rurais.

Para os poços dos quais não foi obtida a profundidade e NE foram inferidos valores a partir do mapa apresentado na Figura 23. Considerando os perfis construtivos e ou hidrogeológicos foi definido o aquífero que está sendo explorado.

**Quadro 15 - Informações dos poços freáticos amostrados**

Poço	Cota da superfície	Prof. do poço (m)	NE (m)	Cota do NE	Local	Uso do poço	Aquífero
P12	866	23,7	9	857	Rural	Irrigação	Coluvionar e Itaqueri
P13	902	59,5	15	887	Rural	Sanitário	Itaqueri
P16	912	72	33	879	Rural	Sanitário	Itaqueri
P19	900	64	17	883	Rural	Sanitário	Itaqueri
P26	863	10,1	2,2	861	Urbana	Recreação	Coluvionar
P41	836	S/l	18	818	Urbana	Sanitário	Itaqueri
P42	895	S/l	18	873	Rural	Sanitário	Itaqueri

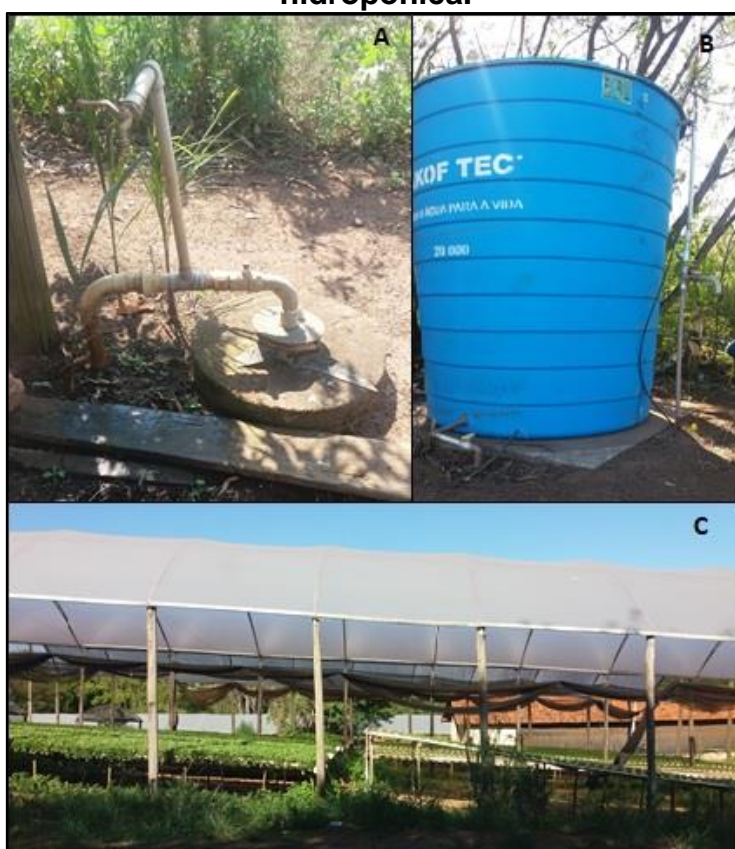
Fonte: Autora



Os poços analisados possuem cota do NE variando de 818 m próximo ao canal de drenagem até 836 m, referente ao P41, localizado dentro do perímetro urbano. O poço P12 foi o com cota topográfica mais alta identificada de 912 m, com NE de 879 m; se encontra localizado na região rural próximo ao divisor de águas.

A água retirada do poço P12 (Figura 31) é utilizada na produção de hortaliças e no seu entorno estão as classes de uso de vegetação natural, vegetação rasteira, reflorestamento e produção de hortaliças (Figura 32).

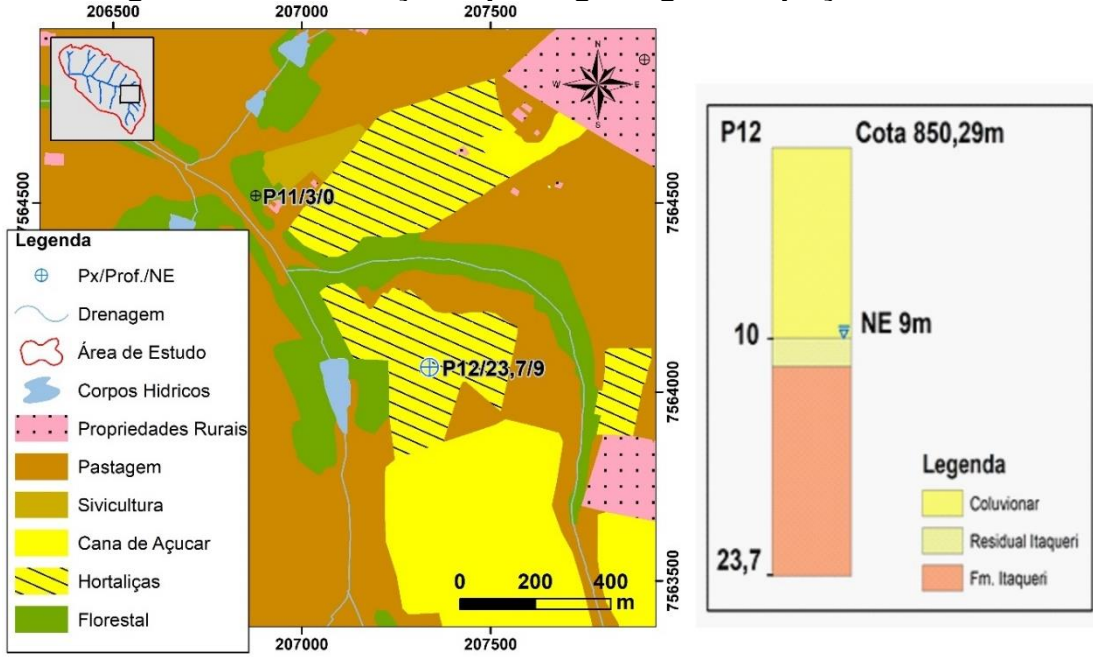
**Figura 31 - A: Poço 12; B: Caixa da água; C: Cultura de hortaliças hidropônica.**



Fonte: Autora

O nível estático registrado no P12 está no aquífero Coluvionar, podendo ocorrer variação deste nível de acordo com a recarga do aquífero durante o ciclo hidrológico (Figura 32).

**Figura 32 - Localização e perfil geológico do poço P12**



Fonte: Autora

O P13 (Figura 33) está localizado próximo ao divisor da bacia estudada, dentro de lote residencial e seu uso é sanitário (Figura 34).

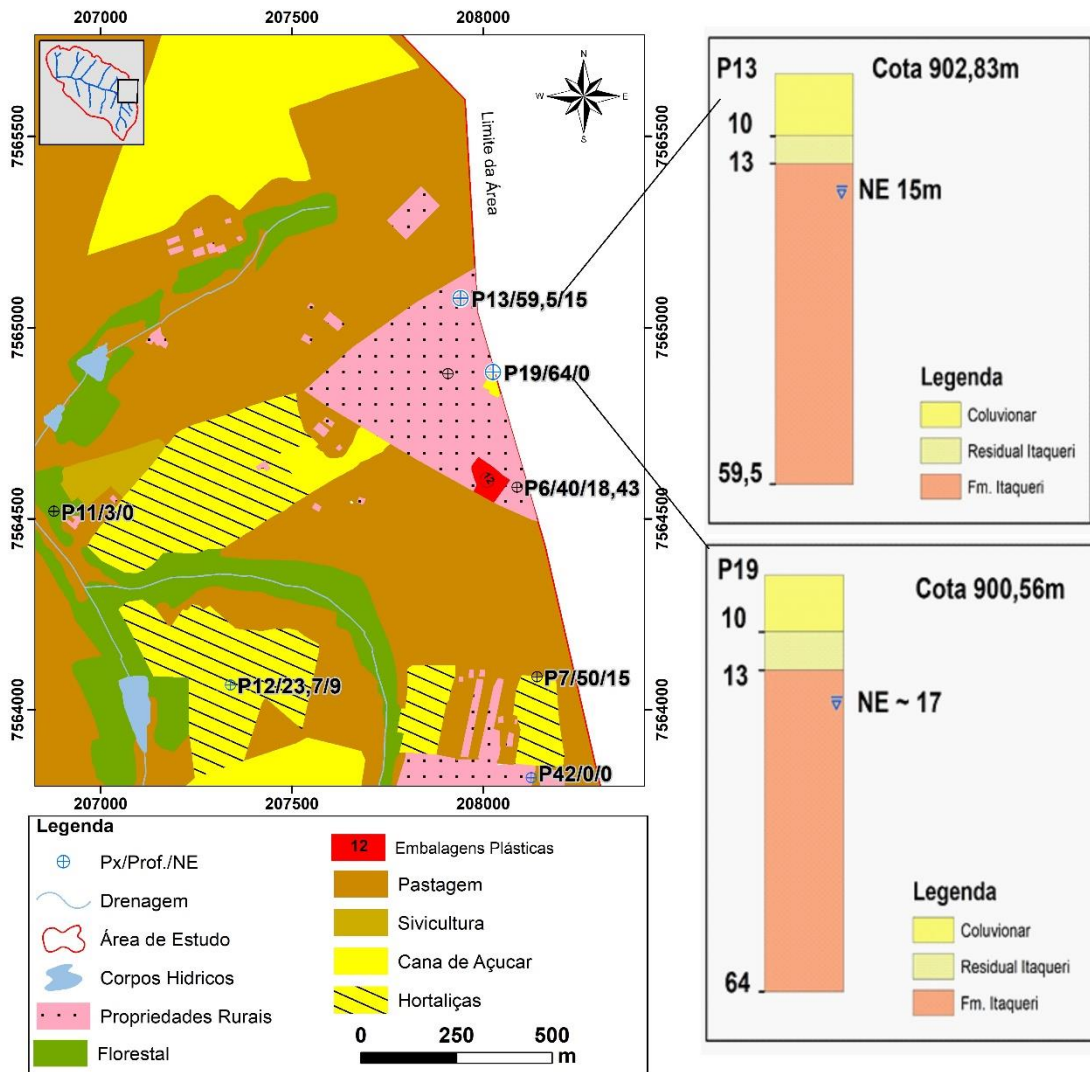
**Figura 33 - Perímetro do P13.**



Fonte: Autora

O NE do P13 se encontra no aquífero Itaqueri, e considerou-se que recebe contribuição mineralógica apenas da Fm. Itaqueri, mesmo em regimes de alta pluviosidade (Figura 34).

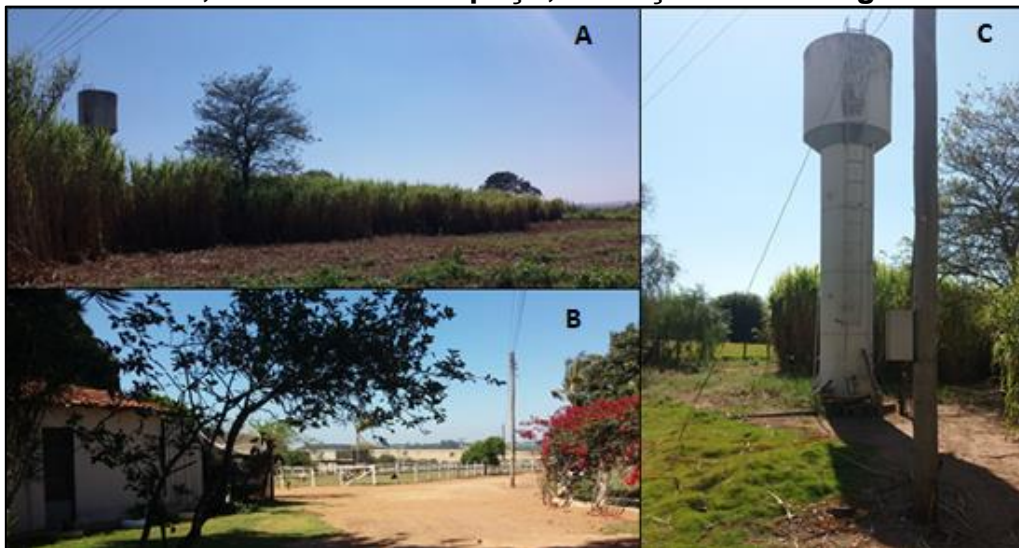
**Figura 34 - Localização e perfil geológico do poço P13 e P19**



Fonte: Autora

O poço P19 está próximo a pequena plantação de cana de açúcar, como representado na Figura 35. Localiza-se dentro de uma propriedade rural, com a finalidade de uso sanitário.

**Figura 35 - P19 A: Plantação de cana de açúcar, com caixa d'água ao fundo; B: Perímetro do poço; C: Poço e caixa d'água.**

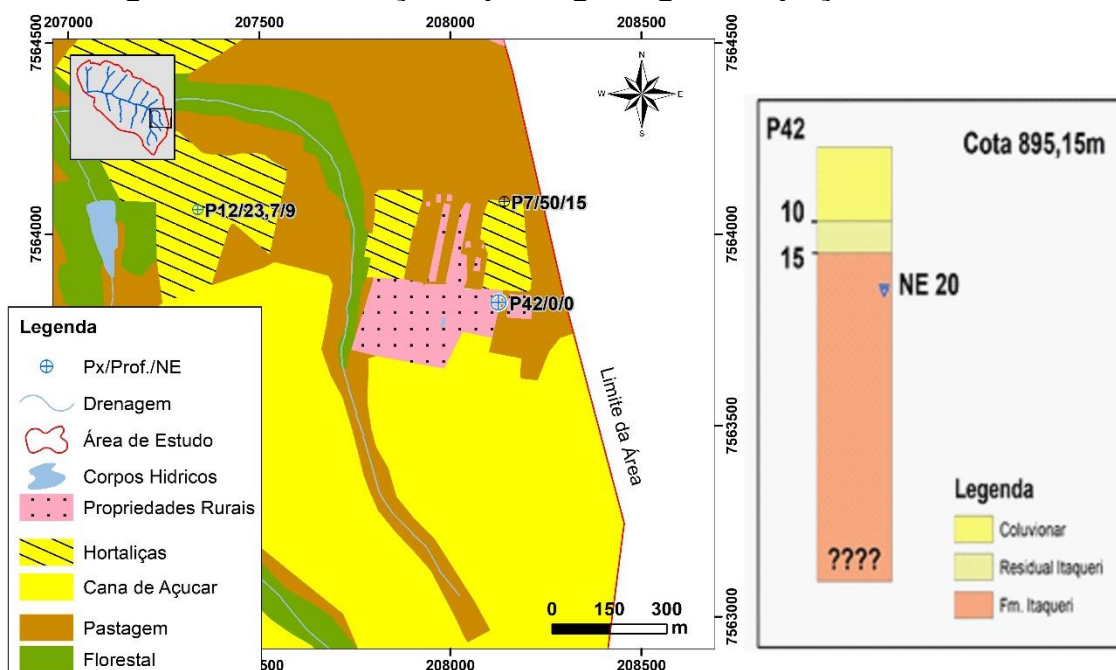


Fonte: Autora

O P19 está localizado próximo ao limite da bacia em cota topográfica de 900 m, o NE inferido é de 17 m, retirando água do aquífero Itaqueri, podendo receber contribuição mineralógica dos residuais em períodos de alta pluviosidade (Figura 34).

O P42 está localizado na região rural, próximo a plantações de hortaliças, porem seu uso é estritamente sanitário (Figura 36).

**Figura 36 - Localização e perfil geológico do poço P42**



Fonte: Autora

Por não possuir cadastro, não há informações de profundidade e nível d'água; o proprietário salienta que o poço não atingiu o basalto, pois não foram utilizados equipamentos necessários para perfurar rocha na abertura do poço. O NE foi obtido a partir das informações de poços vizinhos (Figura 37).

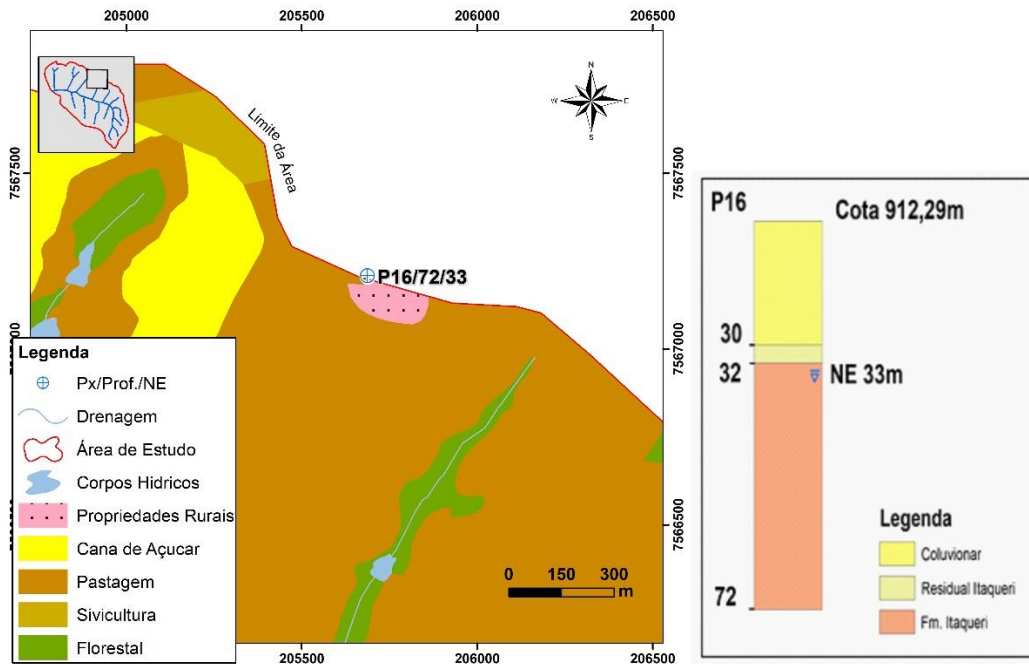
**Figura 37 - A: Perímetro do P42; B: poço P42**



Fonte: Autora

O poço 16 é utilizado para a irrigação e dessedentação dos animais. O poço está localizado no limite da área de estudo, assim como o P19, com cota topográfica de 912 m, retira água do aquífero Itaqueri, com NE de 33 m de profundidade (Figura 38).

**Figura 38 - Localização e perfil geológico do poço P16**



Fonte: Autora

Localizado na região rural, o poço está próximo aos estábulos e casa de suporte para equipamentos (Figura 39). Pode ter influência do coluvionar em período de alta pluviosidade.

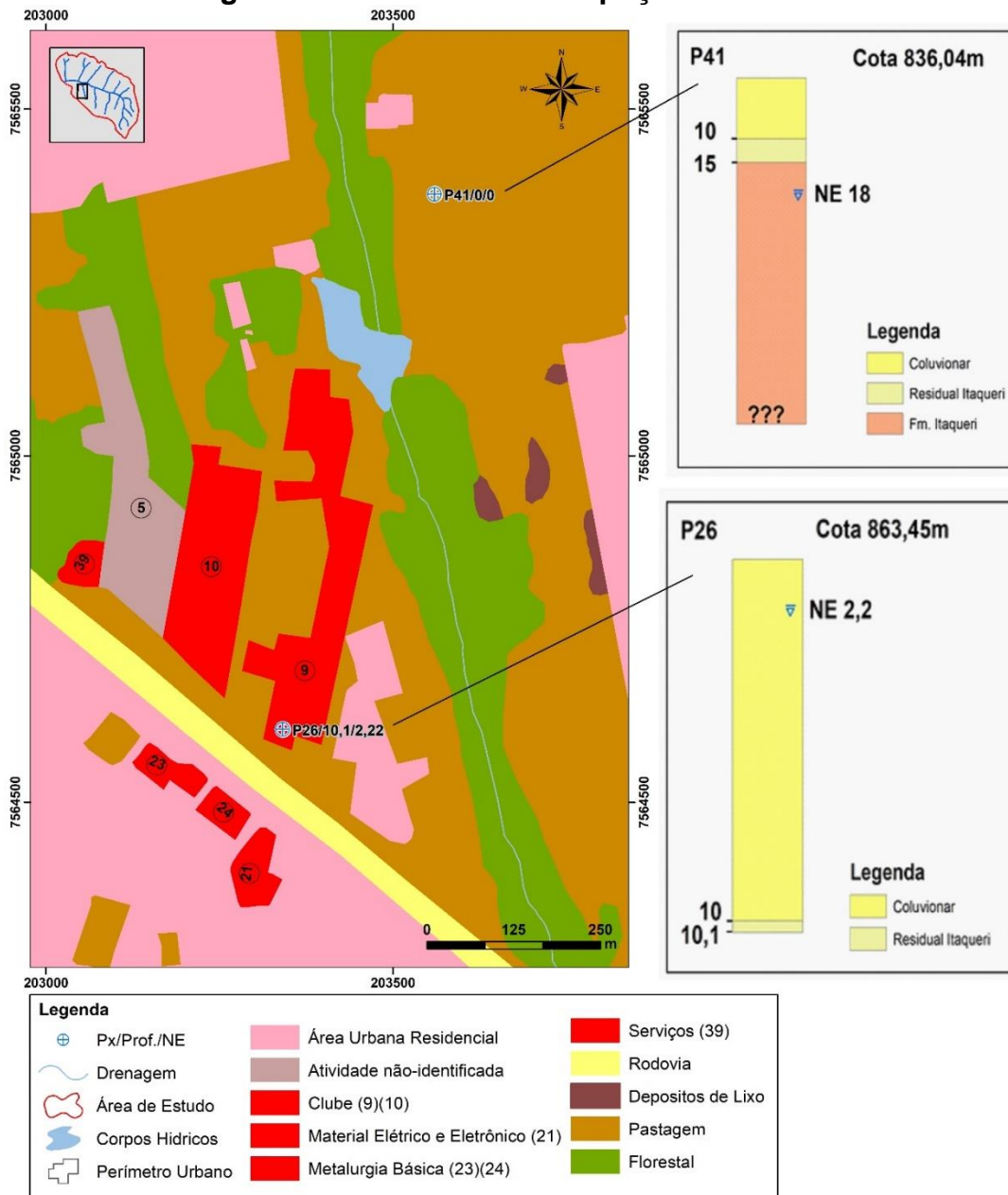
**Figura 39 - P16 A: Perímetro do poço; B: poço P16**



Fonte: Autora

Os poços 26 e 41 estão localizados no perímetro urbano (Figura 40). O poço 26 está localizado próximo a outros poços de captação que pertencem ao mesmo proprietário, onde funciona clube de recreação, com piscinas, quadras de vôlei de areia e campo de futebol e próximo a indústrias e comércios com potencial contaminante como observado na delimitação das classes de uso do solo.

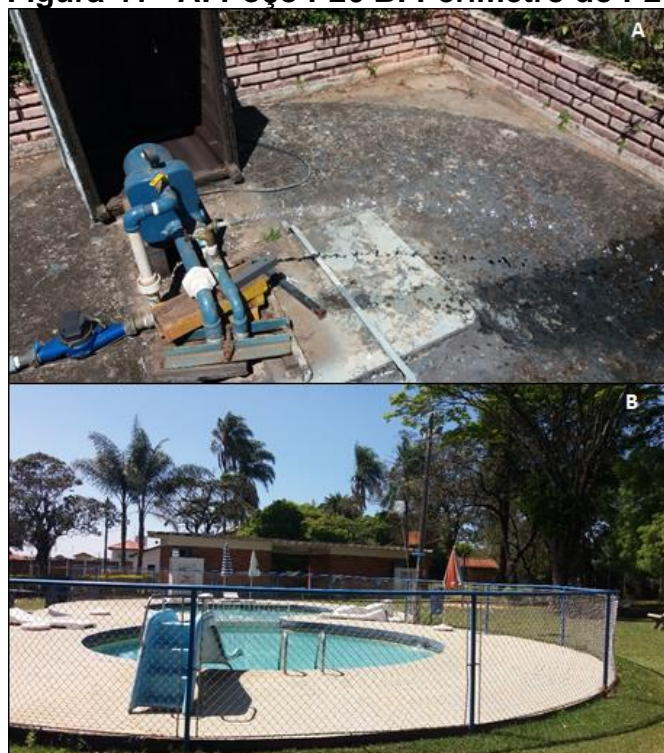
**Figura 40 - Uso do solo dos poços P26 e P41.**



Fonte: Autora

A água é utilizada para uso sanitário, recreação e lazer. É o poço mais raso estudo na presente pesquisa, com 10,1 m de profundidade e o NE de 2,2 m. (Figura 41).

**Figura 41 - A: Poço P26 B: Perímetro do P26**



Fonte: Autora

O poço 41 está próximo ao rio Monjolinho e seu uso é estritamente sanitário para uma atividade comercial que se trata de um salão de eventos além de uma pequena residência para os uso dos funcionários, não havendo outras construções no perímetro do poço (Figura 40). Na segunda coleta de amostras da água o poço passou a ser clorado, com mangueira localizada na entrada da caixa da água (Figura 42).

**Figura 42 - P41 A: Coleta período chuvoso; B: Poço P41; C: Coleta no período seco com galão de cloro.**



Fonte: Autora



A única informação coletada juntamente com o proprietário é a respeito do NE que está em 18 metros de profundidade, retirando água do aquífero Itaqueri, podendo ter contribuição na composição do seu residual em período chuvoso. Além das atividades potencialmente poluidoras foi identificado depósitos irregulares de resíduos sólidos (Figura 40).

#### 8.4.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

No período chuvoso as temperaturas variaram de 24,3 a 26,8°C, já no período seco ficou entre 22,4 - 28,5°C (Figura 43). No período chuvoso, o poço P13 apresentou a maior temperatura e no período seco o P12, podendo influenciar nas reações químicas e intemperismos das rochas. Os poços P19 e P41 registraram as menores temperaturas no período chuvoso, ambos com 24,3°C e no período seco o P13 registrou a menor temperatura com 22,4°C.

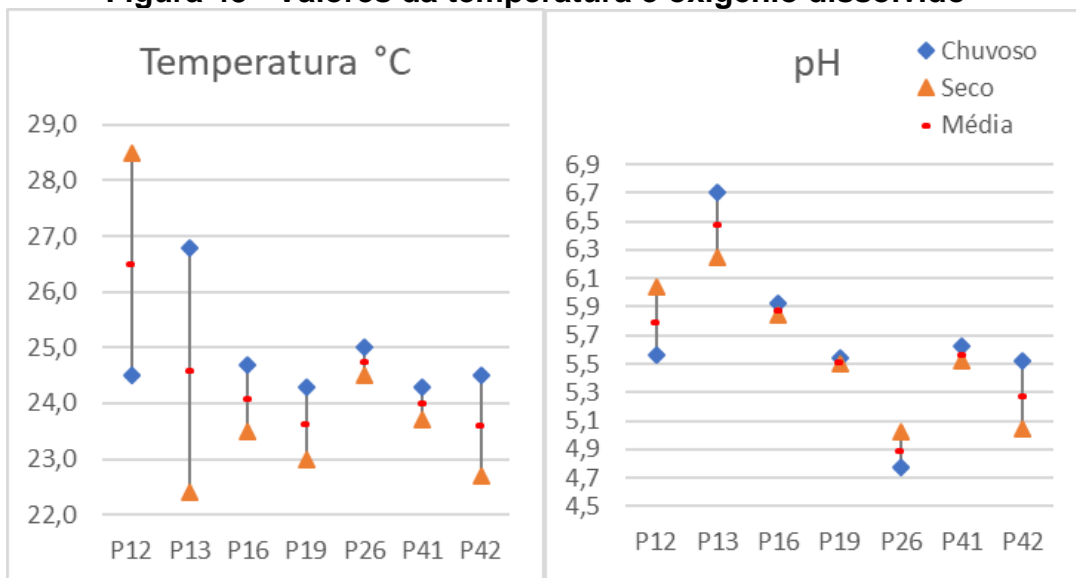
Nos dias de coleta a temperatura do ar registrada no período chuvoso esteve entre 17,46 e 28,6°C; já no período seco a temperatura esteve entre 15,2 e 31,8°C, sem registro de chuvas nas últimas 24 horas, nos dois períodos.

Os poços P13 e P19 possuem as maiores cotas topográficas e nível estático (NE) entre os poços amostrados. A temperatura do P41 variou pouco entre os dois períodos; este poço possui cota do NE a 818 m. As temperaturas altas podem reduzir a solubilidade dos gases e acelerar as reações químicas, aumentando o intemperismo das rochas a solubilização de elementos na água.

Segundo os valores de pH (Figura 43) do P12 e P26 apresentaram resultados mais elevados no período seco do que no chuvoso, respectivamente 5,5-6,1 e 4,7-5,1. Os poços P13, P16, P19, P41 e P42 apresentaram menor pH no período seco do que no chuvoso, sendo que o P13 e P42 com variação mais significativa, 6,3-6,7 e 5,1-5,5, respectivamente. As águas estão classificadas como ácidas e, segundo sua alcalinidade, estão em faixas de minerais ácidos e bicarbonatos.

Quanto aos aquíferos investigados, observa-se que do período chuvoso para o seco houve diminuição do pH nos poços do aquífero Itaqueri (P13, P16, P19, P41, P42); já os poços P12 e P26 que retiram água do aquífero Coluvionar apresentaram aumento do pH no período seco (Figura 43).

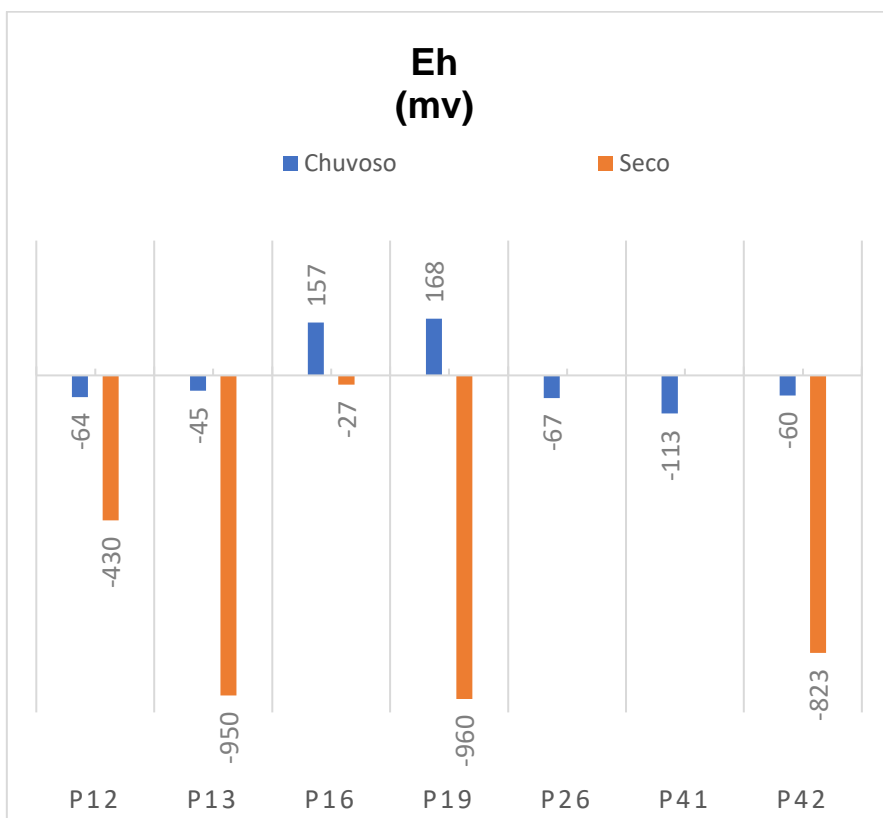
**Figura 43 - Valores da temperatura e oxigênio dissolvido**



Fonte: Autora

O potencial de oxirredução (ORP) está representado na Figura 44 como Eh em mV. Eh positivo indica condição oxidante, observado principalmente no período chuvoso.

**Figura 44 - Valores de Eh nos períodos chuvoso e seco**

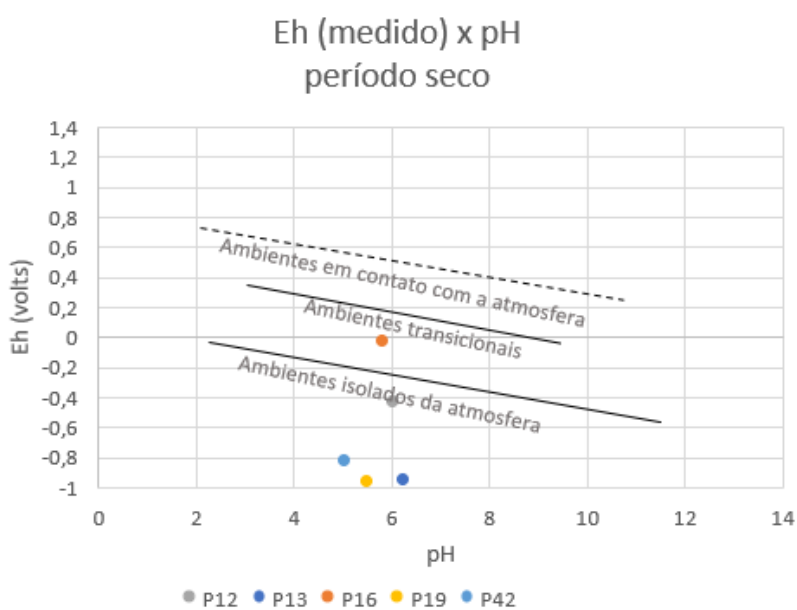
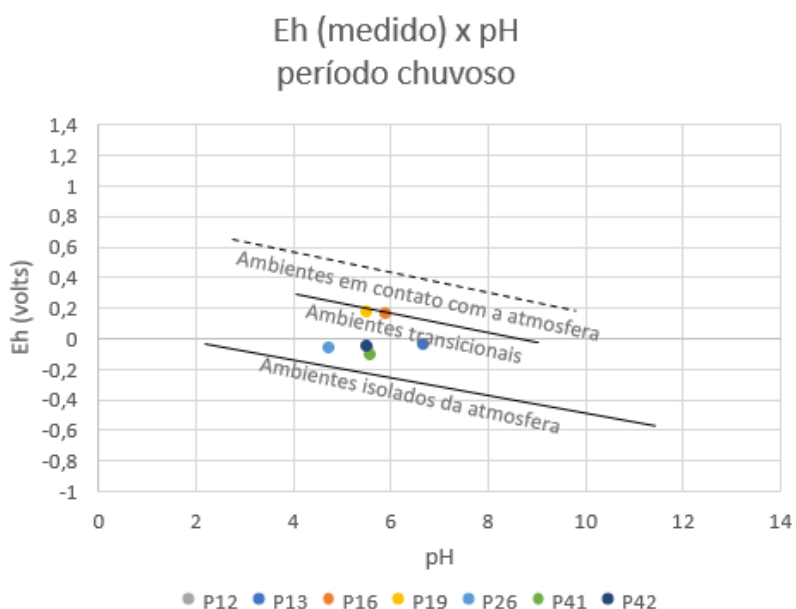


Fonte: Autora

No período seco observa-se valores de Eh negativo, chegando a -960 mV no Eh medido nos poços P12, P13, P19 e P42. Não houve medição dos poços P26 e P41 no período seco, no entanto no período chuvoso esses poços apresentaram valores em condições oxidantes.

Segundo os gráficos apresentados na Figura 45, o cruzamento dos valores de Eh com os valores de pH determinam a influência do ambiente redox na água (CARVALHO, 1995 apud MESTRINHO, 2013). Todos as águas coletadas no período chuvoso estão em ambiente transicional, sendo que o P16 e P19 apresentaram valores muito próximos a ambientes em contato com a atmosfera.

**Figura 45 - Gráfico Eh por pH, influência do ambiente redox**

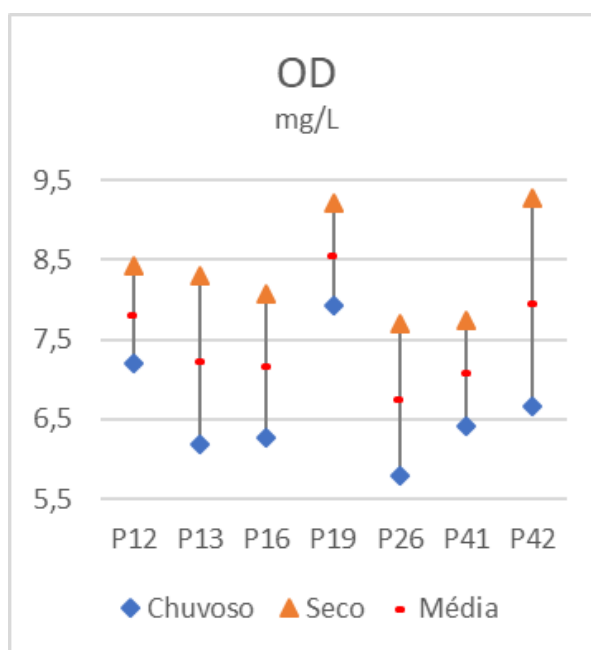


Fonte: Autora

No período seco o ambiente tende a ser redutor provocado pela diminuição da recarga do aquífero através da precipitação. Apenas o poço P16 apresentou valores correspondentes a ambientes transicionais, ficando os poços P12, P13, P19 e P42 com características de ambientes isolados da atmosfera.

O OD depende de outros fatores como a temperatura, pressão atmosférica e presença de sais, em águas subterrâneas; é utilizado para entender os processos químicos e os teores tendem a ser depletados. Todos os poços apresentaram aumento de oxigênio dissolvidos no período seco (Figura 46).

**Figura 46 - Teores do oxigênio dissolvido**



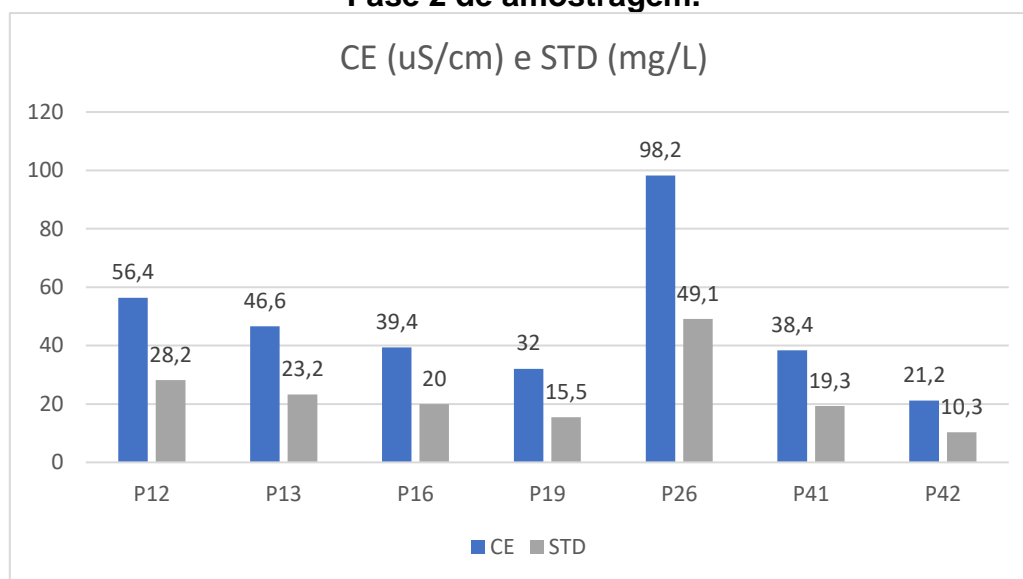
Fonte: Autora

A condutividade elétrica (CE) e os sólidos totais dissolvidos (STD) foram medidos apenas no período seco (Figura 47). Os teores de STD ficaram entre 10,3 a 28,2 mg/L, sendo que o P26 apresentou valor fora dessa faixa, com 49,1 mg/L além disso, o P26 teve o maior registro da CE, 98,2 uS/cm, vale lembrar que o valor de pH foi de 5,02 no mesmo período, sendo a água mais ácida quando comparada com os outros poços.

Os poços P12 e P26 retiram água do aquífero Coluvionar podendo ter interferência do Residual Itaqueri no período de baixa pluviosidade; eles apresentaram valores altos de CE e STD, podendo indicar alguma contaminação. Os poços P13, P16, P19 e P42 quanto à localização são

topograficamente mais altos e próximos ao limite da bacia estudada com valores similares de CE e STD, todos retiram água do aquífero Itaqueri. O P41 apesar de ser o poço mais baixo topograficamente tem valores dentro da faixa dos poços de topografias elevadas, corroborando a possibilidade de alguma contaminação nos poços P12 e P26.

**Figura 47 - Condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos na Fase 2 de amostragem.**

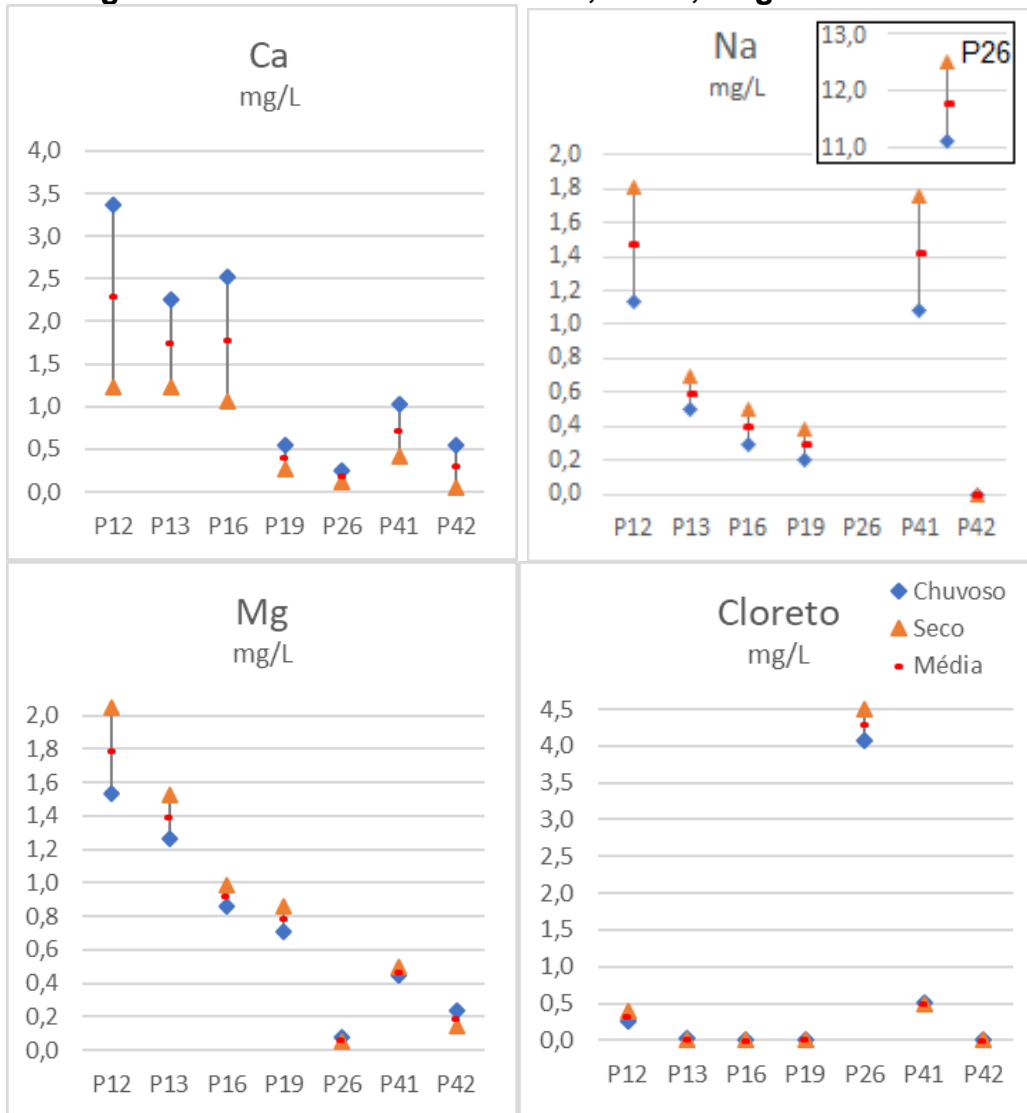


Fonte: Autora

O cálcio (Figura 48), apresentou valores superiores no período chuvoso quando comparados com o período seco, em todos os pontos amostrados. A presença natural é controlada principalmente pelos minerais carbonáticos de cálcio e magnésio. As concentrações variaram de 0,257 mg/L no P26 a 3,360 mg/L registrado no P12 no período chuvoso, sendo que no período seco os valores variaram de 0,053 mg/L no P42 a 1,230 mg/L no P13. Os poços P12, P13 e P16 apresentaram maiores concentrações no período chuvoso e seco, todos eles estão localizados na zona rural.

O Na (Figura 48) apresentou baixas concentrações, com exceção do poço P26, com o registro de Na<sup>+</sup> maior tanto no período chuvoso com 11,087mg/L, quanto no período de baixa pluviosidade com 12,507 mg/L. O P42 não apresentou valores acima do limite de detecção. Os poços P12 e P41 apresentaram valores maiores nos teores de Na<sup>+</sup> no período chuvoso; são poços com NE mais rasos além de estarem localizados próximo a canais de drenagem. O P26 e P41 estão localizados dentro do perímetro urbano.

**Figura 48 - Teores dos íons cálcio, sódio, magnésio e cloreto**



Fonte: Autora

O magnésio (Figura 48) é mais solúvel que o  $\text{Ca}^{+2}$  e também contribui para a variação de dureza na água. Sendo assim as relações dos dois elementos são correlatas e o que observamos nas concentrações de Mg é o aumento em relação aos períodos analisados com exceção dos poços P26 e P42 que tiveram diminuição nos teores. No período chuvoso as variações estão entre 0,079 mg/L no P26 e 1, 535 mg/L no P12, já no período seco os valores variam de 0,052 mg/L também do P26 e 2,046 mg/L também do P12.

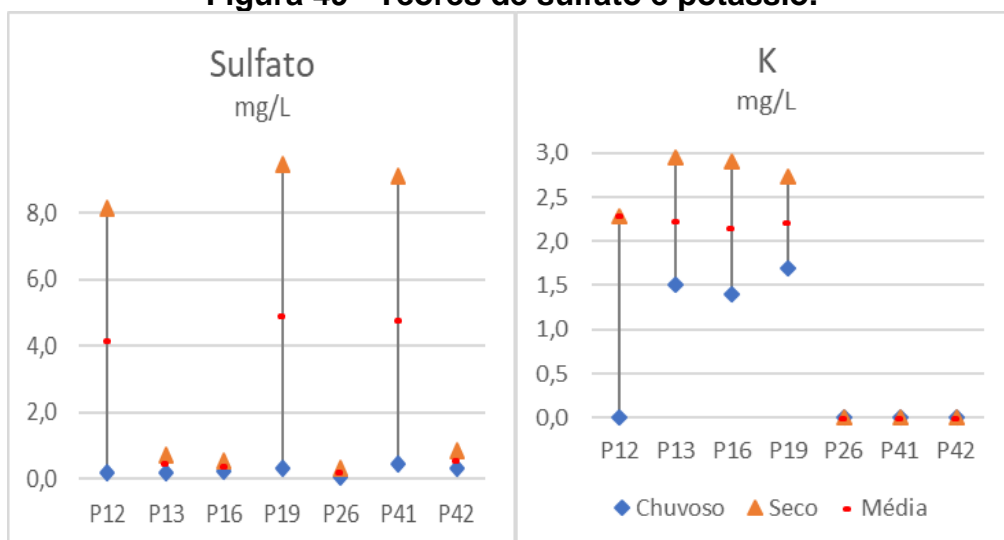
O cloreto (Figura 48), apesar dos métodos de análise terem sido diferentes nos períodos, merece destaque por apresentar maior teor no P12, P26 e P41 em relação aos outros poços, entretanto o valor do P26 por exemplo, variou pouco

de 4,080 mg/L no período chuvoso para 4,5 mg/L no período de baixa pluviosidade.

Os valores de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) tiveram aumento significativo no período seco, sendo o P12, P19 e P41 apresentaram valores de 8,12, 9,47 e 9,105, mg/L respectivamente (Figura 49). No período chuvoso o maior valor registrado foi no P41 com 0,460 mg/L. O P13, P16, P26 e P42 apresentaram valores abaixo de 1,0 mg/L tanto no período chuvoso quanto no período de baixa pluviosidade (Figura 49).

Os teores de potássio nas amostras do P12, P13, P16 e P19 registraram variação entre os períodos analisados. Sendo que o P12 no período chuvoso registrou valor abaixo do limite de detecção que é de 1,109 mg/L (Figura 49).

**Figura 49 - Teores de sulfato e potássio.**



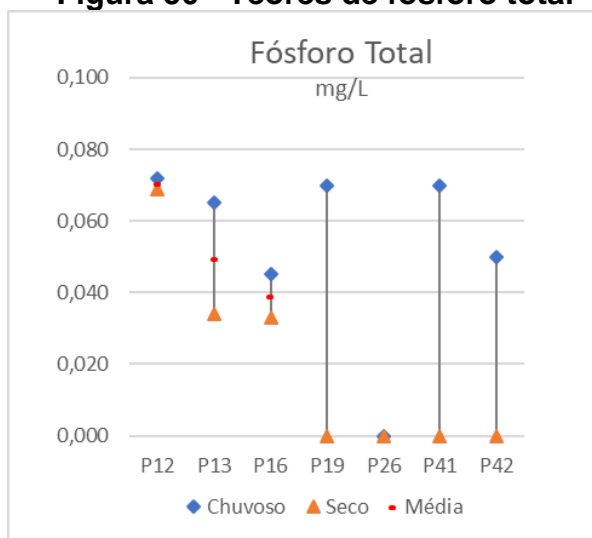
Fonte: Autora

A presença natural do potássio pode ser pela presença de feldspatos e micas, dissolução da matéria vegetal, além de fontes antrópicas pelo uso de fertilizantes agrícolas. Todos os poços que apresentaram variação estão na região rural da área de estudo.

O fósforo (Figura 50), no período de alta pluviosidade, apresentou valores entre 0,045 e 0,072 (P16 e P12, respectivamente) com apenas o P26 com registro abaixo do limite de detecção (0,029 mg/L). Já no período de baixa precipitação a presença de valores abaixo do LQ se estendeu para o P19, P41

e P42. O P12, P13 e P16 tiveram teores menores quando comparados com o período chuvoso (0,069; 0,034 e 0,033 mg/L respectivamente).

**Figura 50 - Teores de fósforo total**



Fonte: Autora

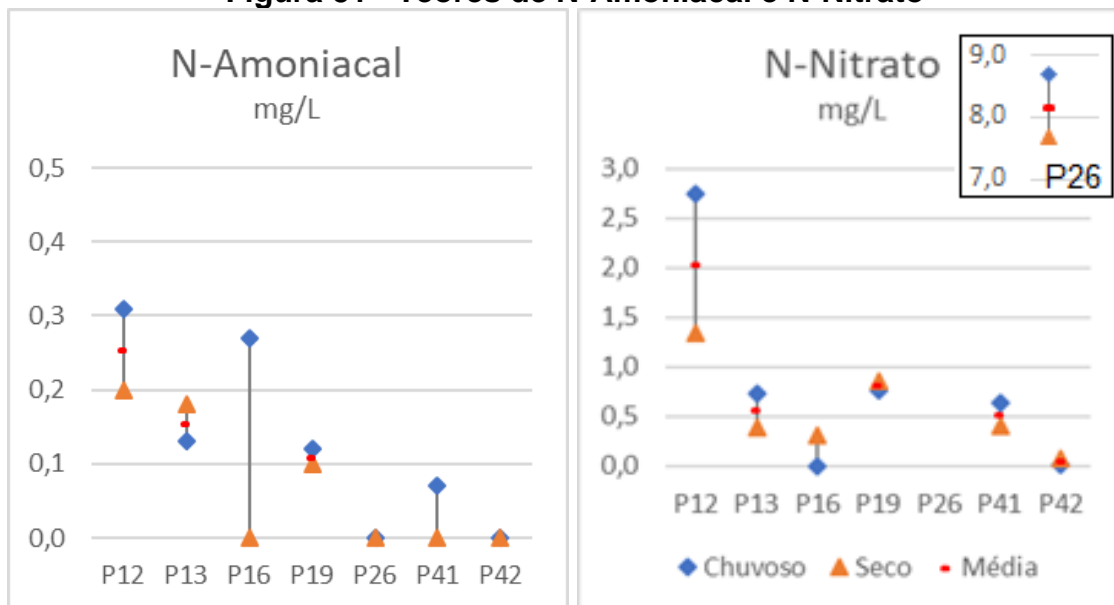
Os teores de nitrogênio amoniacal (Figura 51) no período chuvoso foram de 0,07 mg/L do P41 a 0,031 do P12 mg/L, o P26 e P42 apresentaram valores abaixo do limite de detecção, permanecendo sem alteração no período de baixa precipitação e estendendo para o P16 e P41. Na baixa pluviosidade as concentrações do N-amoniacal foram menores, com exceção do P13 que registrou teores maiores neste período o que pode significar que o processo de amonificação continuou no período seco.

A presença de N-nitrato (Figura 51) representa o estágio final da oxidação da matéria orgânica. Em águas pouco profundas, com ambiente oxidável, ele é facilmente lixiviado sendo considerável valores de até 5 mg/L para águas subterrâneas. O P26 registrou altos valores quando comparado com as outras amostras 8,7 mg/L no período chuvoso e 7,67 mg/L no período de seca, devido as baixas concentrações de N-amoniacal e a presença alta de nitrato sugere fonte de poluição pretérita.

No P12 os resultados variam de 2,75 para 1,34 mg/L, assim como o P26 possuem o NE mais raso quando comparado com outros poços. O P19, P26 e o P42 tiveram pouca alteração nas concentrações no período de baixa pluviosidade.



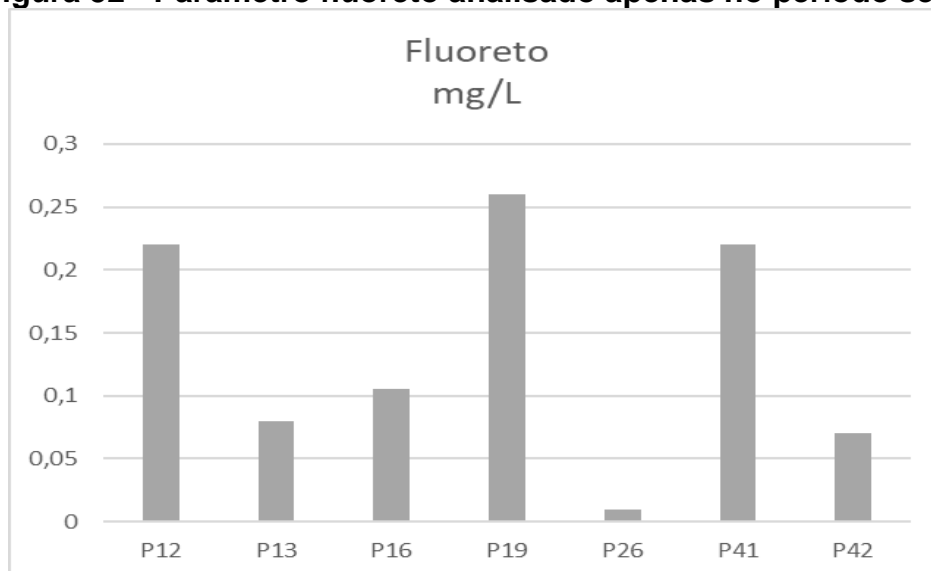
**Figura 51 - Teores de N-Amoniacal e N-Nitrato**



Fonte: Autora

O Fluoreto (Figura 52) foi analisado apenas no período de baixa pluviosidade. A presença natural deste parâmetro pode ocorrer pela presença de minerais como a apatita e a fluorita e normalmente ocorrem em baixas concentrações. Os teores mais altos foram registrados no P12, P19 e P41. As fontes antropogênicas podem ser por efluentes industriais, queima de carbono, indústria plásticas e monocultura de cana-de-açúcar.

**Figura 52 - Parâmetro fluoreto analisado apenas no período seco**



Fonte: Autora

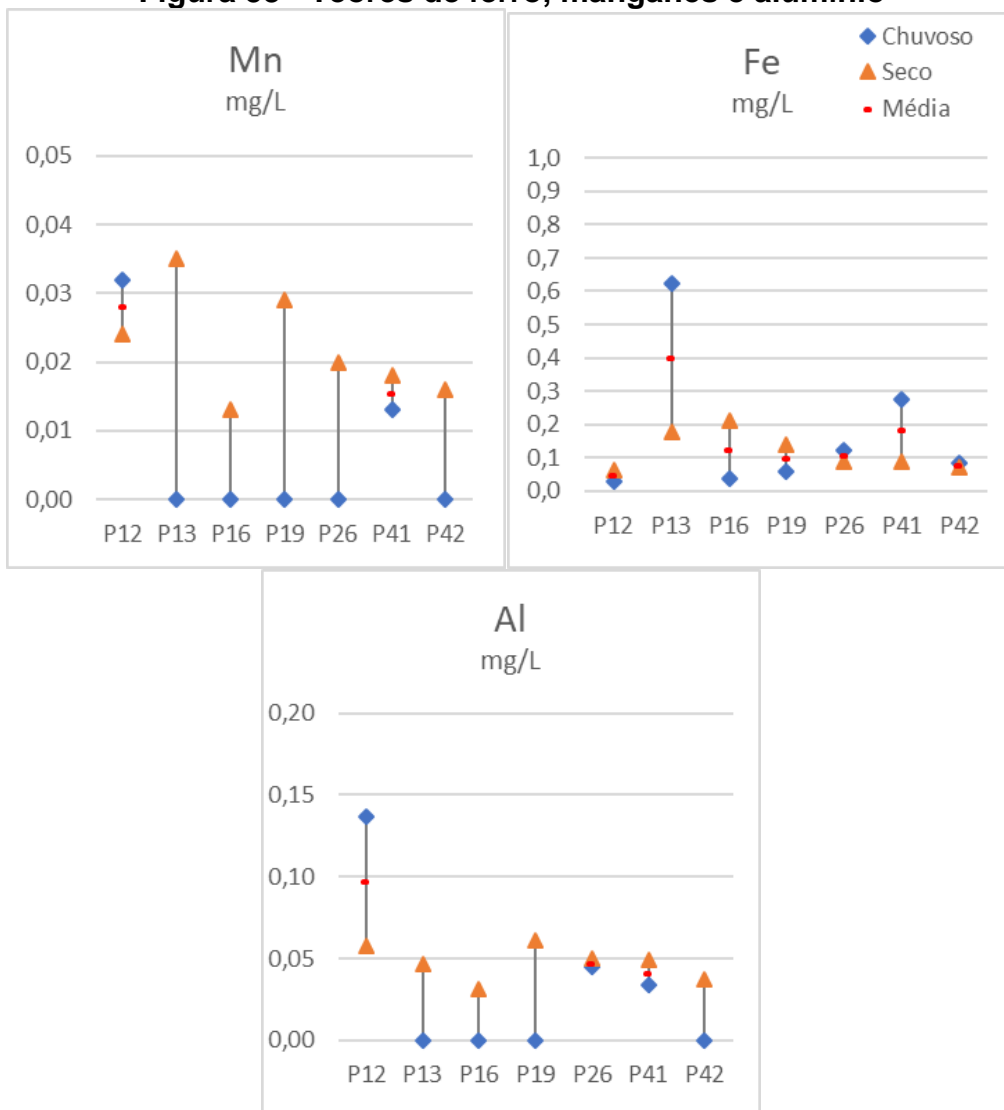
Os teores de manganês (Figura 53) no período chuvoso registraram valores acima do limite de detecção nos poços P12 e P41 com teores de 0,032 e 0,013

mg/L, respectivamente. No período seco todos os teores ficaram acima do limite de detecção, sendo que o maior valor registrado foi do P13 com 0,035 mg/L. O P12 apesar dos valores estarem acima do LQ, no período seco as concentrações diminuíram ligeiramente em relação ao período chuvoso, de 0,032 mg/L para 0,024 mg/L.

As fontes naturais de ferro, são de minerais como magnetita, biotita, pirita, piroxênio e anfibólios. Os valores adquiridos tanto no período chuvoso quanto no período seco são bastante heterogêneos (Figura 53). O P13 e P41 apresentaram valores altos no período chuvoso com 0,625 e 0,277 mg/L respectivamente, isso pode estar relacionado à lixiviação do solo. O P16 e P19 tiveram registro aumento nos teores de ferro total no período seco.

Variações de Al foram registradas nos poços. No período seco todos os poços apresentaram valores acima do limite de detecção (0,029 mg/L). Os poços P26 e P41 que estão dentro do perímetro urbano apresentaram pouca variação na concentração do Al entre os períodos analisados. No P12 houve diminuição da concentração em relação ao período chuvoso, de 0,137 mg/L para 0,058 mg/L.

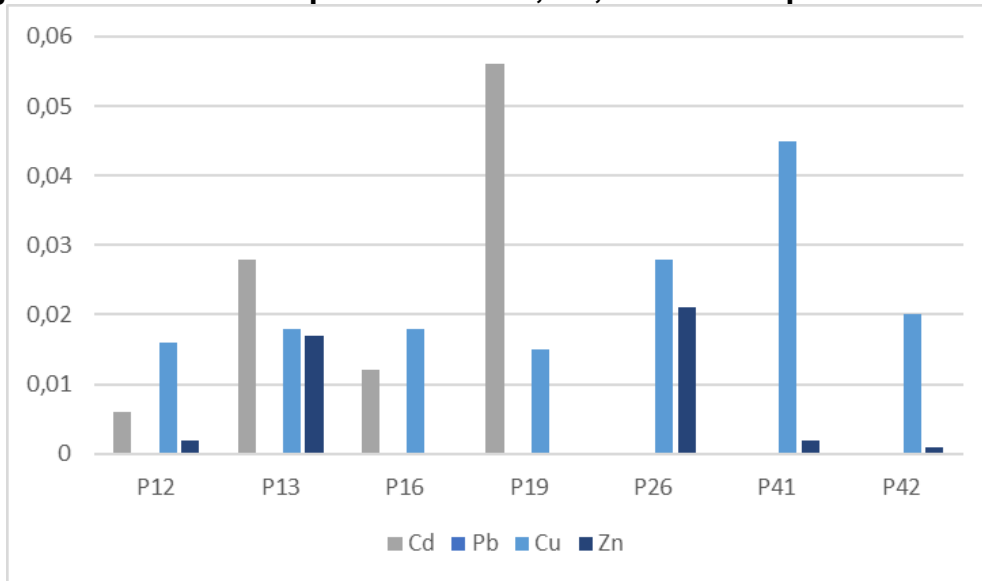
**Figura 53 - Teores de ferro, manganês e alumínio**



Fonte: Autora

Outros parâmetros analisados no período chuvoso foram o Cd, Pb, Cu e Zn (Figura 54). Os poços 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 detecção. O Cu teve registro em torno de 0,015 e 0,018 mg/L nos poços P12, P13, P16 e P19, e nos poços P26 e P42 foi de 0,02 mg/L; o maior valor apresentado foi no P41 com 0,045 mg/L. Para o Zn não foram registrados valores acima do limite de detecção nos poços P16 e P19; nos demais poços os valores ficaram entre 0,01 e 0,02 mg/L.

**Figura 54 - Teores dos parâmetros Cd, Pb, Cu e Zn no período chuvoso**

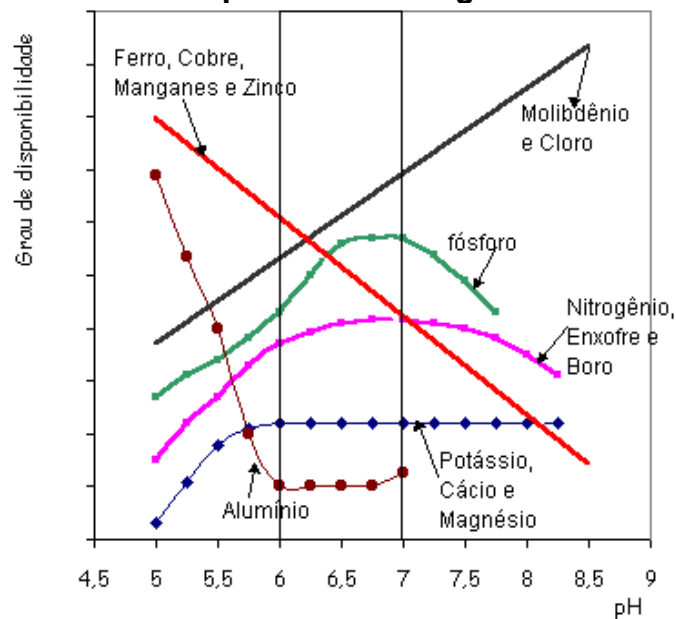


Fonte: Autora

Segundo o grau de disponibilidade dos parâmetros em relação ao pH (Figura 55), os valores maiores de pH causam a diminuição da solubilidade de Al, Fe e Mn, além de aumento das concentrações de K, Ca, Mg e P.

Os poços P12 e P26, com pH inferior a 6, apresentaram aumento do pH no período seco, porém a concentração de Ca apresentou diminuição no período seco em ambos os poços. O P26 registrou aumento de Al e o P12 aumento de Fe.

**Figura 55 - Grau de disponibilidade segundo Malavolta, 1979**



Fonte: Malavolta, 1979

A diminuição de pH em faixas menores que 6, teve como tendência o aumento das concentrações de Fe, Mn, Al nos poços P16 e P19 e o P42, seguindo o apresentado no gráfico da Figura 55.

O P13 se encontra dentro do grau de solubilidade ideal, pH entre 6 e 7. Em relação aos períodos analisados observa-se que a concentração de Fe no período seco (pH 6,25) diminuiu em relação ao período chuvoso (pH 6,7), isso provavelmente se deu por fonte não natural sendo facilitada pela recarga da chuva. Outra particularidade foi o aumento das concentrações de K e Mg quando a tendência seria a diminuição nas concentrações desses parâmetros.

Os poços P16, P19 e P41 registraram ligeira diminuição do pH no período seco, sendo o P16 com pH próximo a 6 e o P19 e P41 com pH na faixa de 5,5. Os poços P16 e P19 apresentaram mesma tendência nas concentrações de Al, Fe, Mn, Cu e Zn; com a diminuição do pH no período seco houve o aumento desses elementos. A concentração de Fe do P41 no período seco diminuiu, não acompanhando a variação segundo o pH, porém as concentrações ficaram próximas das concentrações observadas nos outros poços no mesmo período (Figura 53).

Os poços P16, P19 e P41 apresentaram aumento das concentrações de Mg, houve aumento nas concentrações de K no P16 e P19 este último apresentou ligeira diminuição da concentração de P-total, similar ao P13. A única particularidade observada no P42 foi a diminuição do Fe no período seco, quando a tendência seria o aumento do mesmo.

Os parâmetros Pb no período chuvoso e Cd no período de baixa pluviosidade, e os parâmetros Ar, B, N-NO<sub>2</sub>, Glifosato e Atrazina em ambos, não apresentaram valores acima do limite de detecção.

#### 8.4.2 CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA

Para a classificação hidroquímica das águas subterrâneas foram utilizados valores de Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> (Quadro 16). No período chuvoso, segundo o diagrama de Piper, as águas foram classificadas em mistas cloretadas, mistas sulfatadas e cálcica sulfatada nos poços da região rural. A classificação da composição da água no período de baixa pluviosidade (FASE

2) ficou entre águas mistas e sódicas, entretanto apenas o P42 apresentou registro de águas magnesianas.

**Quadro 16 - Classificação da água com o diagrama de Piper**

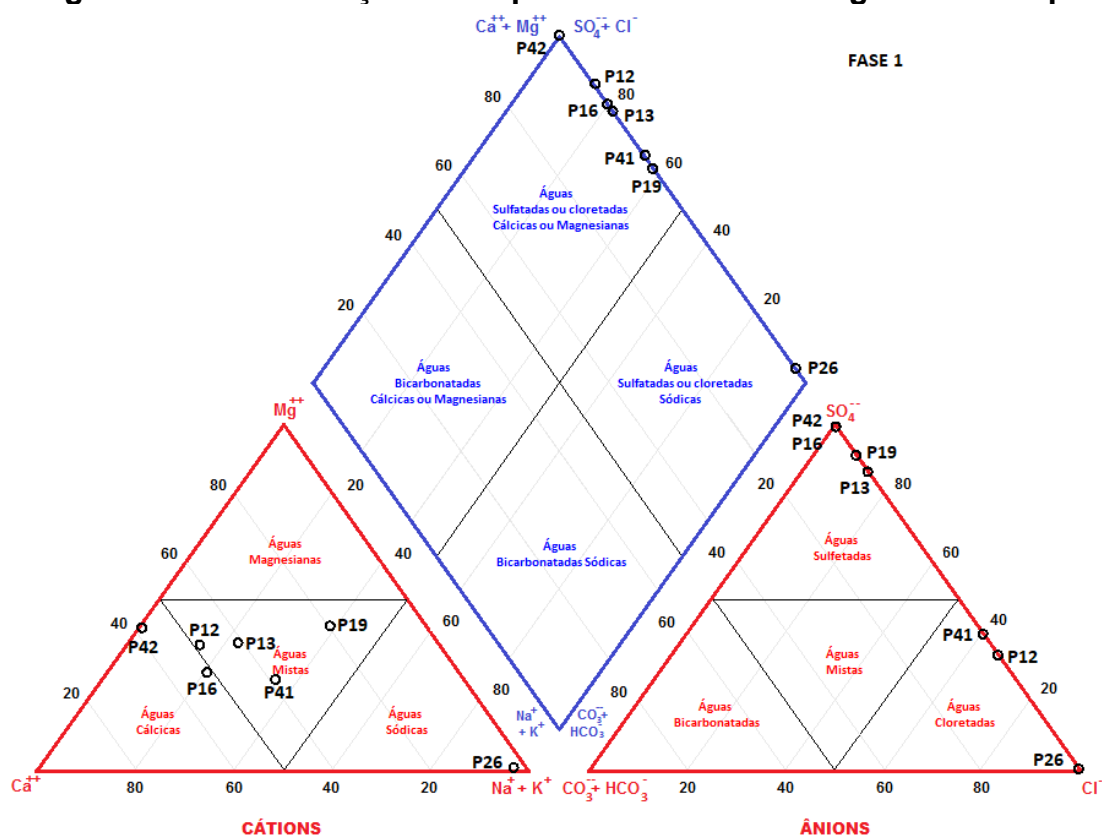
Poço	P12	P13	P16	P19	P26	P41	P42
Fase 1 Chuvoso	Mista Cloretada	Mista Sulfatada	Cálcica Sulfatada	Mista Sulfatada	Sódica Cloretada	Mista Cloretada	Cálcica Sulfatada
Fase 2 Seco	Mista Sulfatada	Mista Sulfatada	Mista Sulfatada	Sódica Sulfatada	Sódica Cloretada	Sódica Sulfatada	Magnesianas Sulfatada

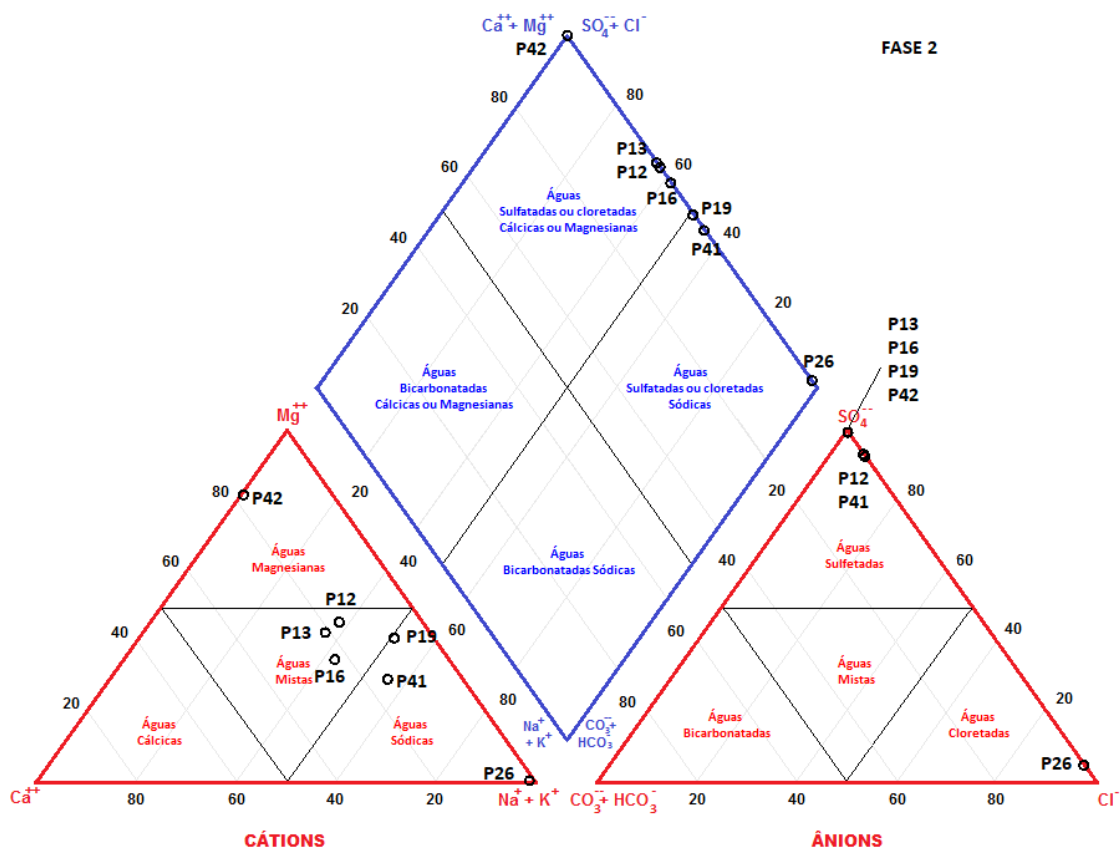
Fonte: Autora

Apenas o P26 e o P13 não apresentaram alteração da classificação nos períodos analisados. Na região urbana a classificação compreende águas mistas cloretada e sódica cloretada que pertencem aos P26 e P41. Observando diagrama do período chuvoso (FASE 1), o poço P16 se encontra no limite para águas mistas.

O P19 se encontra no limite da classificação de águas sódicas, como observado no diagrama de Piper. O P26 e P41, localizados na região urbana, sua água é classificada como sódica, na Fase 2, no período da seca.

**Figura 56 - Classificação hidroquímica através do Diagramas de Piper**





Fonte: Autora

Os cátions Ca e Mg possuem forte relação nos dois períodos. A ocorrência natural desses parâmetros está relacionada com presença de minerais como a magnesita e dolomita, e contribuem para a dureza da água. No período seco o K torna-se com maior influência na matriz, e a presença natural é proveniente de minerais feldspatos e micas (Tabela 6).

**Tabela 6 - Coeficiente de correlação dos principais cátions**

Período Chuvoso					Período Seco						
	pH	Ca	Mg	Na	K		pH	Ca	Mg	Na	K
pH	1					pH	1				
Ca	0,54	1				Ca	0,95	1			
Mg	0,63	<b>0,90</b>	1			Mg	0,91	<b>0,90</b>	1		
Na	-0,68	-0,40	-0,49	1		Na	-0,48	-0,36	-0,42	1	
K	0,60	0,15	0,35	-0,39	1	K	0,79	0,74	0,76	-0,47	1

Fonte: Autora

Em relação aos ânions, tanto no período chuvoso quanto no período seco, houve forte relação do Cl⁻ e NO₃⁻. A presença do nitrato indica o estágio final da oxidação da matéria orgânica, já o cloreto pode aparecer tanto naturalmente pelo resultado da lixiviação de minerais ferro-magnesianos, quanto por contaminação

antrópica. No período seco, foi adicionada a análise do F<sup>-</sup>, segundo a matriz, forte relação com o SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> (Tabela 7).

**Tabela 7 - Coeficiente de correlação entre os principais ânions**

Período Chuvoso					Período Seco					
	pH	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>		pH	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	F <sup>-</sup>
<b>pH</b>	1				<b>pH</b>	1				
<b>Cl<sup>-</sup></b>	-0,70	1			<b>Cl<sup>-</sup></b>	-0,52	1			
<b>NO<sub>3</sub></b>	-0,68	<b>0,96</b>	1		<b>NO<sub>3</sub></b>	-0,48	<b>0,98</b>	1		
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	0,19	-0,59	-0,71	1	<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	0,14	-0,29	-0,27	1	
					<b>F<sup>-</sup></b>	0,31	-0,53	-0,49	<b>0,95</b>	1

Fonte: Autora

#### 8.4.3 QUALIDADE DOS AQUÍFEROS FREÁTICOS

Segundo os VMP (Tabela 8), a qualidade da água coletada no período chuvoso, apresentou teores de alerta no P12 com valores de Cd de 0,006 mg/L e Al de 0,137 mg/L; No P13, o teor de Cd estava acima do VMP com 0,028 e o de Fe acima do padrão de potabilidade com 0,625 mg/L. No P16 o teor de Cd estava também acima do padrão estabelecido com 0,012mg/L, e o P19 apresentou teor de 0,056mg/L. O teor de Nitrato do P26 merece atenção, com valor de 8,7mg/L, foi o único poço a registrar alto teor. O P41 teve o registro de Fe a 0,277mg/L, próximo ao valor máximo permitido para potabilidade.

**Tabela 8 - VMP das legislações vigentes no estado de São Paulo para águas subterrâneas**

Legislação	Portaria V mg/L	CETESB, 2016 mg/L	Resolução 396 mg/L
<b>Pb</b>	0,01	0,01	0,01
<b>Zn</b>	5	1,8	1,05
<b>Cu</b>	2	2	2
<b>Cd</b>	0,005	0,005	0,005
<b>As</b>	0,01	0,01	0,01
<b>Al</b>	0,2	-	3,5
<b>Fe</b>	0,3	-	2,45
<b>Mn</b>	0,1	-	0,4
<b>Na</b>	200	-	-
<b>K</b>	-	-	-
<b>Mg</b>	-	-	-
<b>Ca</b>	-	-	-
<b>B</b>	-	2,4	0,5
<b>N-NO<sub>3</sub></b>	10	10	10
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	1	-	-
<b>Cl<sup>-</sup></b>	250	-	-
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	250	-	-
<b>NH<sub>3</sub></b>	1,5	-	-



<b>P</b>	-	-	-
<b>Glifosato</b>	500 µg/L <sup>1</sup>	-	-
<b>Atrazina</b>	2 µg/L <sup>1</sup>	-	-
<b>Fluoreto</b>	1,5 µg/L <sup>1</sup>	-	-

Fonte: BRASIL, 2017; CETESB, 2016; CONAMA, 2008.

No período seco, apenas dois poços tiveram valores de alerta, com o teor de Fe do P16 a 0,21mg/L, e o teor de NO<sub>3</sub> do P26 a 7,67mg/L. Foi identificado em todos os poços a relação de nitrato > amônia nos dois períodos de coleta. No P26 esse valor foi mais significativo, indicando interferência antrópica na região do poço. Os valores de amônia diminuíram no período seco, isso pode ser pela diminuição do nível freático.

#### 8.4.4 RISCO DE SALINIZAÇÃO

Quanto ao uso destinado à irrigação, avalia-se a razão de adsorção de sódio (RAS), através da razão do Na<sup>+</sup> pelo Mg<sup>++</sup> e Ca<sup>++</sup> para a determinação da sodicidade e a salinidade da água baseada na condutividade elétrica. Na tabela Tabela 9, C indica o perigo da sodicidade e o S o risco de salinidade. Todos os poços, na Fase 2, foram classificados em C0, risco nulo de sodicidade e S1, risco baixo de salinidade.

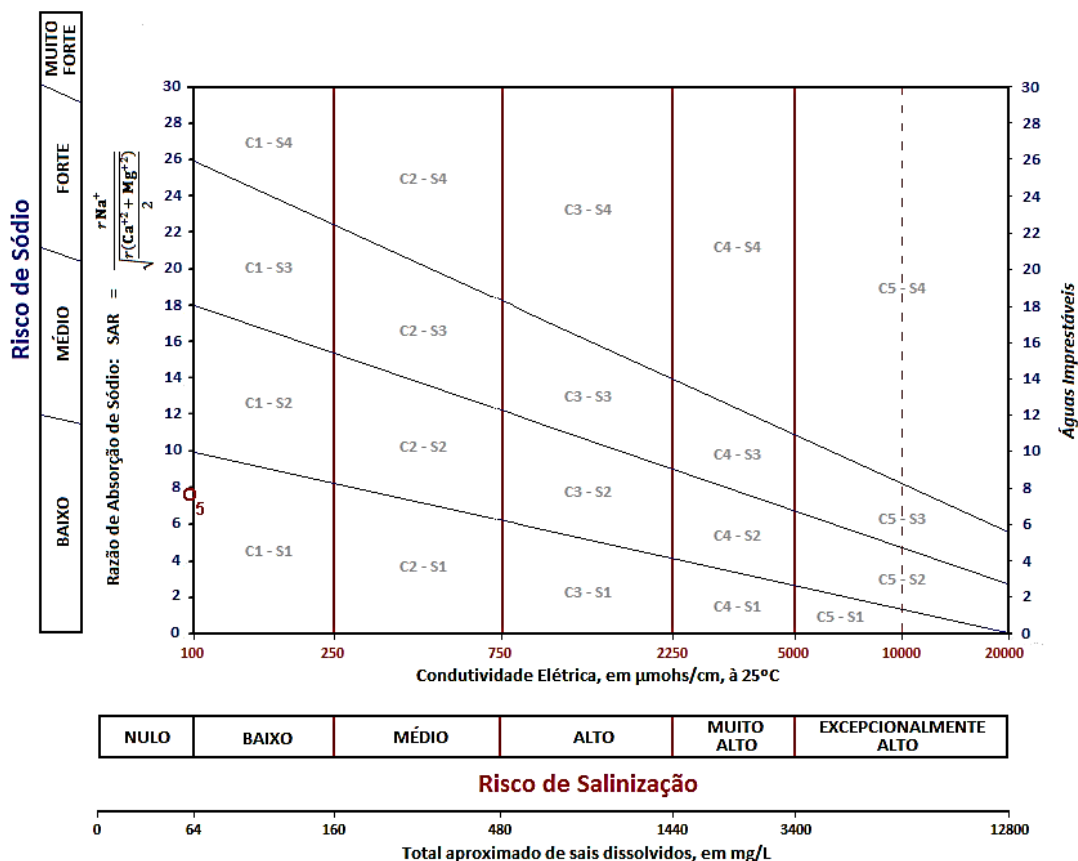
**Tabela 9 - Classificação das águas para irrigação**

<b>N</b>	<b>Poço</b>	<b>Na (mg/L)</b>	<b>Ca (mg/L)</b>	<b>Mg (mg/L)</b>	<b>CE (uS/cm)</b>	<b>RAS</b>	<b>Classificação</b>
<b>1</b>	P12	1,81	1,23	2,05	56,4	0,2321	C0 - S1
<b>2</b>	P13	0,70	1,23	1,53	46,6	0,0995	C0 - S1
<b>3</b>	P16	0,51	1,06	0,99	39,4	0,0856	C0 - S1
<b>4</b>	P19	0,38	0,27	0,86	32	0,0806	C0 - S1
<b>5</b>	P26	12,51	0,12	0,05	98,2	7,6537	C0 - S1
<b>6</b>	P41	1,76	0,42	0,50	38,4	0,4344	C0 - S1
<b>7</b>	P42	0,00	0,05	0,14	21,2	0,0000	C0 - s/dados

Fonte: Autora

O maior valor da razão de adsorção, veio do P26 com 7,65 (Figura 57) seguido do P41 com 0,4 e o P12 com 0,2 de RAS. Mesmo com altas concentrações de Na<sup>+</sup> em relação aos outros pontos amostrados, o P26 apresentou risco nulo de salinização e baixo de sodicidade. São, portanto águas que não precisam de correção para práticas de irrigação.

Figura 57 - Gráfico de USSL



Fonte: Autora

## 8.5 DISCUSSÃO

Com a delimitação do uso do solo e o detalhamento das atividades comerciais e industriais, além das áreas com galpões e depósitos de lixos na zona urbana, foi possível a identificação de áreas com potencial à contaminação. O potencial alto de contaminação está presente em 44% da bacia.

A densidade de ocupação atual da bacia mostra tendência de crescimento do perímetro urbano. Interpretação feita a partir de delimitações do perímetro urbano que indica avanço constante dos bairros sobre as áreas de preservação permanente, próximas aos canais de drenagem, além da abertura de novo condomínio localizados a jusante da bacia.

Depósitos de lixo irregulares foram identificados dentro do perímetro urbano; são fontes de resíduos domésticos e de construção civil. Próximo ao córrego São Rafael, localizado na margem esquerda do Rio Monjolinho, tem-se o registro de coletora de recicláveis, atividade que necessariamente precisa estar em

topografia favorável e longe de rios e matas ciliares, visto que o canal de drenagem é alimentado também pelo fluxo subterrâneo, podendo carrear resíduos químicos através do manuseio do lixo e dos caminhões que os despejam.

Na consulta das atividades comerciais e industriais da área, foram realizadas investigações dos licenciamentos ambientais junto à CETESB para identificações das atividades potencialmente contaminantes. Os resultados encontrados foram atividades licenciadas, atividades onde não foram encontradas as licenças e atividades em funcionamento com licenciamento prévio negado, com a justificativa de que a atividade se encontra em área de ocupação restrita, delimitadas tanto no PD-SC (SÃO CARLOS, 2016) e APREM-SC (SÃO CARLOS, 2006).

Apesar dos procedimentos apresentados em portarias do estado, a procura de informações dos poços de captação de água subterrânea de pouca vazão e profundidade, são vagas. As informações coletadas em meio eletrônico, dão pistas da localização de poços, porém não possuem atualização constante das informações.

Como exemplo tem-se que foi coletada água de poço freático outorgado, mas aprofundando a pesquisa descobriu-se que foi realizado o afundamento do poço, que passou a ter 170m de profundidade, captando água do aquífero Guarani (outra situação observada foi a ausência do cadastro de poços presentes na área de estudo). A escolha da investigação de poços de captação de água subterrânea sem as informações hidrogeológicas e construtivas, foi exatamente, analisar como se encontram as águas desses poços. Assume-se que se tratam de poços freáticos de baixa vazão, sendo utilizados, para abastecimento sanitário.

As análises realizadas por poço quanto a interferências antrópicas observadas, observou-se que o P12, em área rural, pode ter influência dos fertilizantes das plantações da cana de açúcar próximas, isso se explica a partir da presença de sulfato e fluoreto além concentrações de N-Amoniacal e N-nitrato que se mantiveram altas nos períodos de alta pluviosidade. A presença de

metais Cd e Cu com pH em torno de 6 não é explicada pela faixa de solubilização.

O P13 apresentou o maior pH entre os poços analisados, chegando a 6,7 no período chuvoso, e dentro do intervalo ideal de solubilidade segundo gráfico de Malavota (1979). Altas concentrações de K no período seco, e comparadas com os outros poços altas concentrações de Fe no período chuvoso. As concentrações de N-amoniaco e N-nitrato permaneceram constantes, aumento de Mn e diminuição de P no período seco e concentrações de Cd, Cu e Zn.

O P16 apresentou pouca variação do pH, na faixa de 5,9. Com diminuição do Ca no período seco e aumento do K, Fe, N-amoniaco e pequena variação do N-nitrato. A entrada desses elementos pode ser pela aplicação de fertilizantes que no período chuvoso ocorre maior lixiviação do solo, comprovado com a diminuição da concentração de nitrato no período seco.

O P19 apresentou teores altos de  $\text{SO}_4^{2-}$  e uma baixa abrupta do P total no período seco, outra característica é a presença de  $\text{F}^-$ , a maior concentração registrada entre os poços, no mesmo período. Os teores de N-amoniaco e N-nitrato se mantiveram constantes, indicando contaminação constante. As particularidades segundo os teores analisados indicam interferência das atividades antrópicas próximas ao poço (cana-de açúcar, indústria de reciclagem plástica e esgotamento sanitário).

O P26 apresentou pH mais baixo entre as amostras analisadas, além de alta CE e STD. As concentrações de Na e  $\text{Cl}^-$  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. Está localizado em um clube, que iniciou suas atividades na década de 60; vizinho a condomínios residenciais, rodovia, piscinas e o restaurante do clube. Sendo assim, a contaminação pode ter ocorrido pelo vazamento de esgotamento sanitário próximo ao poço.

O P41 apresentou características similares ao P12, com altas concentrações de Na comparado com os outros poços, alto teor de  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{F}^-$  no período seco.

O P42 entre os poços analisados foi o que obteve resultados de concentrações dentro das máximas e mínimas apresentadas. O pH ficou entre 5,3 e baixa CE e STD. Isso se refletiu na ausência de valores anômalos nos dois períodos e quando em comparação com os outros poços estudados.

A diminuição do nitrato no período seco nos poços P12, P26 e P41 mostra a tendência natural pelo processo de nitrificação já que a entrada da amônia diminui no período seco. O poço P13 apesar da diminuição do nitrato no período seco existe entrada crescente da amônia no mesmo período, o único poço que apresentou tais características. Os poços P16 e P19 apresentou aumento da concentração de nitrato no período seco, sendo o nitrato extremamente móvel podendo aparecer 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.

Embora os poços P13, P26 e P41 estejam em áreas de potencial de contaminação baixo, P26 e P41 apresentaram alterações provenientes das atividades antrópicas que ocorrem em seus entornos. O mesmo aconteceu para os poços P12, em local com potencial médio para contaminação além dos poços P16 e P19 em local com potencial alto para contaminação antrópica. O P42, apesar de estar localizado em área com alto potencial contaminante, não apresentou interferências das atividades antrópicas do entorno segundo os parâmetros analisados; observa-se que seu perímetro de proteção não apresentava usos conflitantes, refletindo na qualidade da água.

## 9 CONCLUSÃO

A efetiva gestão dos recursos hídricos da região, se baseia na legislação com propostas de restrições ao tipo de uso do solo e atividade potencialmente contaminante, contribuindo, assim, com o planejamento municipal, no entanto observamos atividades potencialmente poluidoras em diversos pontos da área, que geram impactos tanto na qualidade dos recursos hídricos, quanto na quantidade, com o adensamento construtivo.

A interpretação de 28 parâmetros físico-químicos da água permitiu identificar diferenças hidroquímicas entre os aquíferos freáticos. O aquífero Coluvionar possui maior tendências 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.

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

Sendo assim, foi possível identificar interferência antrópica nos dois aquíferos freáticos estudados, presentes na sub-bacia do rio Monjolinho, nos períodos analisados. Recomenda-se a continuidade do monitoramento da qualidade dessas águas, para a gestão efetiva dos mananciais da região.

As recomendações para estudo posteriores são o adensamento de pontos amostrados, permitindo o detalhamento hidroquímico dos aquíferos freáticos. Outra recomendação seria o levantamento de dados quanto à qualidade hidroquímica das nascentes buscando relacionar a composição química no sistema de recarga as drenagens superficiais.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, R. L. **Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana de São Carlos-SP: Contribuição ao planejamento**. 1989. 104f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos-SP, 1989.
- 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. **Ver. Ceres**, Viçosa, v. 63, n 5, p 621-63, 2016. DOI 10.1590/0034-737X201663050005.
- ALBUQUERQUE et al. Recarga de aquífero aluvial sob uso agrícola. **Revista Brasileira de Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 60-71, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v29i1.27931>.
- ALI I.; KHAN T.; ASIM M. Removal of arsenate from groundwater by electrocoagulation method. **Environ Sci Pollut Res**, v. 19, p. 1668-1676, 2012. DOI 10.1007/s11356-011-0681-3.
- ALLER, L., BENNETT, T., LEHR, J.H., PETY, R.J., HACKETT, G., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. **United States Environmental Protection Agency**, EPA/600/2-87/03, p. 622.
- ALMEIDA, F. F. M.; BARBOSA, O. Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo. Bol. DNPM/DGM, p. 43:96p. 1953.
- ANA – Agência Nacional de Águas. 2019. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual. Brasília, p. 100. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.bb39ac07.pdf>
- APHA – American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22th ed., Washington, 2012.
- BARROSO, M. F. et al. Assessment of groundwater contamination in an agricultural peri-urban area (NW Portugal): an integrated approach. **Environ Earth Sci**, v. 73, p. 2881–2894, 2015.
- BARTOLOMEU D. **Análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos na região urbana de São Carlos (SP) por vazamentos em postos de combustíveis, utilizando o método GOD e Avaliação dos condicionantes geotécnicos**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 2012.
- BIAGGIONI, F.; GIMENES, Q.; FILHO, O. A. Modelagem dos Fluxos de Água Subterrânea na Região Metropolitana de João Pessoa (PB) Utilizando Ferramentas de Hidrologia em SIG. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**. p. 9-18. São Paulo. Disponível em: [https://www.abge.org.br/downloads/revistas/RevistaABGE\\_Modelagem\\_dos\\_Fluxos.pdf](https://www.abge.org.br/downloads/revistas/RevistaABGE_Modelagem_dos_Fluxos.pdf).
- BERGER, A. R. Assessing rapid environmental change using geoindicators. **Environmental Geology**, V 32(1) p 36-44. jul 1997. Disponível em: <http://www.gcric.org/geo/>. Acesso em: 22 nov. 2018.

BERGER, A. R.; IAMS W. J. Geoindicators: Assessing rapid environmental changes in earth systems. A A Balkema/Rotterdam, Brookfield. 466p 1996.

BERTRAND, G.F; et al. Groundwater contamination in coastal urban areas: Anthropogenic pressure and natural attenuation processes. Example of Recife (PE State, NE Brazil). **Journal of Contaminant Hydrology**, v.192, pp.165-180, 2016.

BEZERRA et al. Análise situacional da qualidade da água subterrânea oriunda de poços da região metropolitana de Fortaleza-Ceará, Brasil. **ACTA Biomedica Brasiliense**, v. 9, n. 1, p. 94 a 104, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18571/acbm.158>.

BOCKHEIM J. G.; GENNADIYEV A. N. Soil-Factorial models and Earth-system Science: a review. **Geoderma**, v.159, p.243 – 251, 2010.

BORTOLUCCI A. A. 1983. **Caracterização geológico-geotécnica da região de São Carlos – SP, a partir de sondagens de simples reconhecimento**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos-SP.

BOUROTTE, C. et al. Natural occurrence of hexavalent chromium in a sedimentary aquifer in Urânia, State of São Paulo, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 81, n. 2, p. 227–242, 2009.

Burek P , Satoh Y, Fischer G, Kahil MT , Scherzer A, Tramberend S , Nava LF , Wada Y , et al. (2016). Water Futures and Solution - Fast Track Initiative (Final Report). IIASA Working Paper. IIASA, Laxenburg, Austria: WP-16-006.

BRASIL (1981). Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF. Acesso em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm).

BRASIL (1988). Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Constituicao/Constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm). Acesso em:

BRASIL (1997). Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm).

BRASIL (2002). Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 22 de 24 de maio de 2002. Dispõe sobre os Planos de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/67-resolucao-n-22-de-24-de-maio-de-2002/file>.

BRASIL (2001). Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Brasília – DF. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/l10257.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm).

BRASIL (2008). 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. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>.

BRASIL (2017) **Portaria de Consolidação Nº 5 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. Disponível 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. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2017. Brasília: SNS/MDR, 2019. 226 p

CADONÁ, E. A. et al. 2018. Contaminação por nitrogênio e fósforo de águas destinadas ao consumo humano em região com intensa atividade suinícola. *Geociências, UNESP*. v. 37, n. 4, p.883-891. Disponível em: <http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/12274/8749>.

CALVI, C. et al. Abundance and distribution of fluoride concentrations in groundwater: La Ballenera catchment, southeast of Buenos Aires Province, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, 2016.

CAMPANELLI, L.C. **Zoneamento (Geo)Ambiental Analítico da Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho – São Carlos- SP**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos. Programa de pós-Graduação em Engenharia Urbana. 2012.

CAMPANELLI L. C., LORANDI R., LOLLO J. A. **Cartografia geoambiental da bacia do rio do Monjolinho (São Paulo)**. 2016. In: MORAES, MEB., and LORANDI, R., orgs. Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas [online]. Ilhéus, BA: Editus, 2016, pp. 241-263. ISBN 978-85-7455-443-3.

CAMPOS, V. Arsenic in groundwater affected by phosphate fertilizers at São Paulo, Brazil. *Environmental Geology*. v. 42. p. 83–87, 2002. DOI 10.1007/s00254-002-0540-0.

CAPRI E. et al. Assessment of nitrate contamination risk: the Italian experience. *J Geochem Explor* v. 102 p. 71–86, 2009. doi:10.1016/j.gexplo.2009.02.006

CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos. 2019. Nitrato nas águas subterrâneas: desafios frente ao panorama atual. São Paulo: SIMA / IG.128p. (versão online). ISBN: 978-85-87235-25-1. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1Sv1al3rkTfhJ2ueDwaMW9-mKpq02V59g/view>.

CETESB (São Paulo). 2019a **Qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo 2016-2018**. 291p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/publicacoes-e-relatorios/>>. ISBN 978-85-9467-091-5.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relação de áreas contaminada**. 2019b. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas\\_contaminadastexto\\_areas\\_cont\\_nov\\_09\\_.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadastexto_areas_cont_nov_09_.pdf)>. Acesso em: dez 2019.

CETESB. Decisão de Diretoria nº 256, de 22 de novembro de 2016. Dispõe sobre a aprovação dos valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo 2016, em substituição aos valores orientadores de 2014, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado de São Paulo, Poder Executivo I, São Paulo, ed. 126. p. 55-56. Disponível em <https://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-256-2016-E-Valores-Orientadores-Dioxinas-e-Furanos-2016-Intranet.pdf>

COELHO et al. 2017. Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data. **Journal of Hydrology**. v. 548. p. 1-15. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2017.02.054.

COSTA, C.W et al. Potencial de contaminação de aquíferos por atividades antrópicas da Bacia do Ribeirão do Meio – Município de Leme – SP. **Rev. Bras. De. Recur. Hídricos**, ano 20, v. 1, p. 218–225, 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n1.p218-225>.

COSTA, W. C. **Mapeamentos geoambientais, em escala 1:50.000 aplicados em análises de planejamento territorial de manancial periurbano: bacia do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). PPGCAm – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos -SP.

COSTA, W. C.; LORANDI, R.; LOLLO, A. J.; 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. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.08.007>

CPPSE, 2020. Condições Meteorológicas - Estação da Embrapa Pecuária Sudeste. Disponível em: <http://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=inicio>.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil - Acompanhamento da Estiagem na Região Sudeste do Brasil Relatório 1: Área de Atuação da Superintendência Regional da CPRM de São Paulo. 2015. São Paulo. Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/sace/boletins/secas\\_estiagens/Relatorios/Sao\\_Paulo/2015\\_001-20150810%20-%20134628.pdf](http://www.cprm.gov.br/sace/boletins/secas_estiagens/Relatorios/Sao_Paulo/2015_001-20150810%20-%20134628.pdf).

DAWDY D. R.; FETH J. H. Applications of factor analysis in study of chemistry of groundwater quality, Mojave River Valley, California. 1967. **Water Resources Research**. v. 3. n. 2. p. 505-510. <https://doi.org/10.1029/WR003i002p00505>.

DÖLL, P. et al. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. **Journal of Geodynamics**, v. 59-60, p. 143–156, 1 set. 2012. DOI: 10.1016/j.jog.2011.05.001.

EC, 2018. Report from the commission to the council and the european parliament: on the implementation of Council Directive 91/676/EEC concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources based on Member State reports for the period 2012–2015: Brussels. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0257&from=en>

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, 23 dez. 2016.

ELUMALAI, V. et al. Spatial interpolation methods and geostatistics for mapping groundwater contamination in a coastal area. **Environ Sci Pollut Res**, v. 24, p. 11601–11617, 2017.

FAILACHE, M. F. 2018. **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**. Tese. (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Paulo – USP. São Carlos-SP.

FAGUNDES, J. R. T. **Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP**. 2010. (Tese Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

FITTS, C. R. 2015. **Águas Subterrâneas**. Elsevier: 2ed. 608p. ISBN 9788535277449.

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. **Quím. Nova**, São Paulo, v.30. n.7. p. 1539-1544, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422007000700008>.

FOSTER, S. (1988) Groundwater Recharge and Pollution Control of British Aquifers: a critical overview. In Robins N (editor). Groundwater pollution, aquifer recharge and vulnerability. **Geological Society**, London, Special Publication, v. 130 n. p. 7-22.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da Qualidade da Água Subterrânea. Um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial, Washington, D.C. 2006.

FOSTER, S., HIRATA, R. & Andreo, B. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection?. **Hydrogeology Journal**. V. 21, 1389–1392 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7>.

GOMES, M. A. et al. Avaliação Hidroquímica e de Parâmetros Físico-Químicos de Qualidade das Águas Subterrâneas da Zona Urbana do Município de Sousa-PB. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, p. 162–172, 9 maio 2018.

GONÇALVES, A. R. L. 1986. **Geologia ambiental da área de São Carlos**. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências – USP. São Paulo - SP.

HIRATA, R. C. A. (1993). Os Recursos Hídricos Subterrâneos e as novas exigências ambientais. **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo v. 14 n. 1. p. 39-62. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19930009>.

HE, S.; WU, J. Hydrogeochemical Characteristics, Groundwater Quality, and Health Risks from Hexavalent Chromium and Nitrate in Groundwater of Huanhe Formation in Wuqi County, Northwest China. **Exposure and Health**, v. 11, p. 125–137, 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2013. Manual Técnico de uso da terra. Manuais Técnicos em Geociências nº 7. Rio de Janeiro. p. 171. ISBN: 978-85-240-4307-9. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81615.pdf>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Área territorial brasileira. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente com data de referência 2018.

ILAYARAJA, K.; AMBICA, A. Spatial distribution of groundwater quality between injambakkam-thiruvanmyiur areas, south east coast of India. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 14, n. 4, p. 771–776, 1 dez. 2015.

IRATANI, M. A. et al. Proposta de classificação das fontes potenciais de contaminação da água subterrânea. **Revista do Insituto Geológico**. v. 34. N. 2, p. 1-26. 2013. DOI: 10.5935/0100-929X.20130006

JACOBI, P. R. et al. Estudo de caso – crise da água na região metropolitana de São Paulo – 2013/2015. **Centro regional em mudanças climáticas**. Estudo de Caso. Disponível em: [http://www.cambioclimaticoydecisiones.org/wp-content/uploads/2016/03/Estudo-de-caso\\_-Crise-da-%C3%A1gua-na-Regiao-Metropolitanta-de-Sao-Paulo.pdf](http://www.cambioclimaticoydecisiones.org/wp-content/uploads/2016/03/Estudo-de-caso_-Crise-da-%C3%A1gua-na-Regiao-Metropolitanta-de-Sao-Paulo.pdf).

JACOBI, P. R.; CIBIM, J. C.; SOUZA, A. N. Crise da água na Região Metropolitana de São Paulo – 2013-2015. **Geosp – Espaço e Tempo** (Online). v. 19. n. 3. p. 422-444, 2016. ISSN 2179-0892.

KATZ, B. G.; EBERTS, S. M.; KAUFFMAN, L. J. Using Cl/Br ratios and other indicators to assess potential impacts on groundwater quality from septic systems: A review and examples from principal aquifers in the United States. **Journal of Hydrology**, v. 397, n. 3–4, p. 151–166, 3 fev. 2011.

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, 2 jan. 2015.

KLIMAS, A; GREGORAUSKAS, M. Groundwater abstraction and contamination in Lithuania as geoindicators of environmental change. **Environmental Geology**. V. 42. P. 767-772. 2002. DOI 10.1007/s00254-002-0554-7

KOEPPEN, W. **Climatologia**. México, Ed. Fundo de Cultura Economica.1948.

LAPWORTH D.J.; KRISHAN, G.; MACDONALD, A. M.; RAO, M.S. 2017. 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. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.04.223.

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. S. Hydrochemistry of shallow groundwater and springs used for potable supply in Southern Brazil. **Environmental Earth Sciences**. v. 77, n. 80, 17p. 2018.

LIMA, A. C. P.; DIAS, S. M. F.; ORRICO, S. R. M.; ARAÚJO, D. R. S. M. 2010. Avaliação da qualidade da água do aquífero freático do entorno do centro industrial do Subaé -Tomba - Feira de Santana - BA. **XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Anais. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27553/17815>.

LI, P. et al. 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. et al. 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 Re**, v. 24, p. 13224–13234, 2017.

LI, P. et al. 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.

LÖBLER, C. A.; SILVA, J. L. S. DA. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do município de Nova Palma, Rio Grande do Sul, Brasil. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 1, p. 141–152, 2014.

LUCON et al. 2018. Contaminação sazonal das águas subterrâneas da bacia do rio São Miguel (mg) por cádmio e proposição de valores de background. Em anais: **XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. 2018. Acesso em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29319/18922>.

LUZ, Roger Bordin da et al. Contaminação viral e bacteriana em águas subterrâneas na porção aflorante do Aquífero Guarani, município de Ivoti, RS. **Rev. Ambient. Água** [online], vol.12, n.5, pp.871-880, 2017. ISSN 1980-993X. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2068>.

MACHIWAL, D. et al. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. **Earth-Science Reviews**, v 185. P. 901-927. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>.

MACHIWAL, D.; JHA, M. K. Identifying sources of groundwatercontamination in a hard-rock aquifer systemusing multivariate statistical analyses andGIS-based geostatistical modeling techniques. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 80–110, 2015.

MCCARTHY, J.F.; ZACHARA, J.M. (1989) Subsurface Transport of Contaminants. **Environmental Science & Technology**. v. 23 p. 496-502. DOI: <https://doi.org/10.1021/es00063a001>.

MENDES, A. et al. Relations of the groundwater quality and disorderly occupation in an Amazon low-income neighborhood developed over a former dump area, Santarém/PA, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1–16, 6 out. 2017. DOI 10.1007/s10668-017-0040-8.

MESTRINHO S. S. P. 2008. **Geoquímica das águas subterrâneas** in FEITOSA, F.A.C. et al. 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID.

MESTRINHO, S. S. P. Qualidade e classificação das águas subterrâneas. In: GIAMPÁ, C. E. QUAGLIA; GONÇALVES, V. G. (Org.). **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. Cap. 4.

MILANI E. J. 2004. **Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná**. In Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flavio Marques de Almeida. São Paulo: Beca. p. 265-279.

MURO, M. D. **Carta de zoneamento para seleção de áreas frente à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos: escala 1:50.000**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos – USP. v. 1. p. 199. São Carlos – SP. 2000.

NISHIYAMA, L. 1991. **Mapeamento geotécnico preliminar da quadrícula de São Carlos – SP**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos-SP. 1991.

NOBRE, R. C. M. et al. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 94, n. 3–4, p. 277–292, 7 dez. 2007.

OKI, B T, KANAE, S (2006) Global Hydrological Cycles and World Water Resources. **SCIENCE**. V. 313, N 5790, p. 1068-1072. DOI: 10.1126/science.1128845. Acesso em: jul 2019.

OLIVEIRA, J.; PRADO, H. 1984. **Levantamento pedológico semi-detalle do Estado de São Paulo: Quadrícula de São Carlos**. II Memorial descritivo. Instituto Agrônômico de Campinas, SP, Boletim Técnico 98. p.188.

OLMSTEAD et al. Shale gas development impacts on surface water quality in Pennsylvania. PNAS, v. 110, n. 13, p. 4962–4967, 2013. Disponível em: [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1213871110](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1213871110)

PARISOT E. H. Monitoramento das águas subterrâneas adjacentes ao aterro sanitário de Taubaté (SP), resultados primários. **Boletim IG**, v. 16, p. 32-45, 1985.

PATRA, S. et al. 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, set. 2018.

PERROTA, M.M.; et al. 2006. **Geologia e recursos minerais do estado de São Paulo. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.** São Paulo: CPRM.

PIGA et al. Multi-criteria potential groundwater contamination and human activities: Araras watershed, Brazil. **Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, v. 22, n. 56, p. 1-10, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0217170052>

PONS, N. A. D. **Levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos-SP com auxílio de geoprocessamento.** 2006. TESE (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos -SP.

PONÇANO (1981). Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo – Escala de 1:500.000. DIV. Min. E Geol. Aplic. IPT, São Paulo – SP. Publicação numero 1183, serie monografia 5, 2 v, 94 p. il.

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.

REBOITA, M. S., OLIVEIRA, D. M., FREITAS, C. H., OLIVEIRA, G. M., PEREIRA, R. A. A. Anomalias dos Padrões Sinóticos da Atmosfera na América do Sul nos Meses de Janeiro de 2014 e 2015. **Revista brasileira de energias renováveis**, v. 4, n. 4, 2015.

REBOUÇAS, A. C. 1994. Sistema Aquífero Botucatu no Brasil. In: 80 Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS, Recife-PE, Anais, p.500-509.

RICCOMINI, C. (1997). Considerações sobre a posição estratigráfica e tectonismo deformador da Formação Itaqueri na porção centro-leste do estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**. 18(1/2), 41-48. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929x.19970003>.

ROCHA, G. et al. **Mapa de águas subterrâneas do estado de São Paulo.** Revista Águas Subterrâneas in Anais XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Curitiba, p. 1-20, 2006.

SANTOS, A. C. 2008. Noções de Hidroquímica in FEITOSA, F.A.C. et al. 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID.

SÃO CARLOS. Cartas ambientais do município de São Carlos. Edição Comemorativa do Sesquicentenário – 150º aniversário. São Carlos, SP: Prefeitura Municipal, 2007.

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. Disponível 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. SECRETÁRIA DE COMUNICAÇÃO. Lei nº 18.053 de 19 de dezembro de 2006. Estabelece o Plano Diretor do Município de São Carlos, e dá outras providências. Prefeitura Municipal de São Carlos: São Carlos-SP, 2016.

SÃO PAULO. LEI Nº 9.866, DE 28 DE NOVEMBRO DE 1997. Dispõe sobre diretrizes e normas para a proteção e recuperação das bacias hidrográficas dos mananciais de interesse regional do Estado de São Paulo e dá outras providências. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1997/lei-9866-28.11.1997.html>

SÃO PAULO. LEI Nº 6.134, DE 02 DE JUNHO DE 1988. Dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo e dá outras providências. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1988/lei-6134-02.06.1988.html>

SÃO PAULO. LEI Nº 7.663, DE 30 DE DEZEMBRO DE 1991. Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos. 1991. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1991/lei-7663-30.12.1991.html>

SILVA et al 2003. Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores. In Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.) CPRM, Brasília, 2003. p. 55-85.

SILVA, H. C. Tutela das águas: competência municipal. IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. IBEAS, São Bernardo do Campo - SP, p.1-9, 2018.

SILVA, Paola do Nascimento; CAPUCIN, Bruno César; SILVA, Bruna Andreлина; REBOITA, Michelle Simões; CARACTERÍSTICAS ANÔMALAS DO VERÃO DE 2019 NO SUDESTE DO BRASIL. Revista Brasileira de Climatologia. n.16 v. 27. p. 612-634. 2020. DOI:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.69492>.

SOUZA, A. B. **Avaliação da qualidade ambiental nas nascentes do rio Monjolinho na porção à montante da Estação de Captação de Água do Espreado, São Carlos – SP.** Dissertação (Mestrado – Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B. (1976). Depósitos Cenozóicos na região Centro-Sul do Brasil. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, 16 (31): 17-39.

SOARES, D. F.; FARIA, A. M.; ROSA, A. H. 2017. Análise de risco de contaminação de águas subterrâneas por resíduos de agrotóxicos no município de Campo Novo do Parecis (MT), Brasil. **Eng Sanit Ambient.** v.22 n.2 p. 277-284. DOI: 10.1590/S1413-41522016139118.

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. DOI: 10.33958/revig.v40i3.672.

SUBRAMANI, T.; ELANGO, L.; DAMODARASAMY, S. R. Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River Basin, Tamil Nadu, India. **Environ Geol**, v. 47, p. 1099–1110, 2005.



VASANTHAVIGAR et al., 2010. Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 171, p. 595–609. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1302-1>.

VITÓ, C. V. G. et al. Avaliação da qualidade da água: determinação dos possíveis contaminantes da água de poços artesianos na região noroeste fluminense. **ACTA Biomedica Brasiliensia**, v. 7. N 2 p. 59-75. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18571/acbm.111>.

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.

WWAP (United Nation World Water Assesment Programme) /UM-Water. 2018. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based solutions for Water. Paris, UNESCO.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2015. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO.

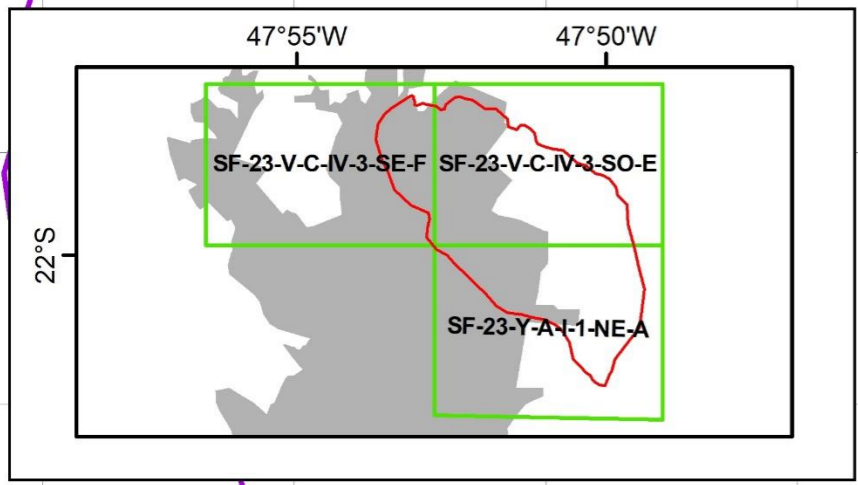
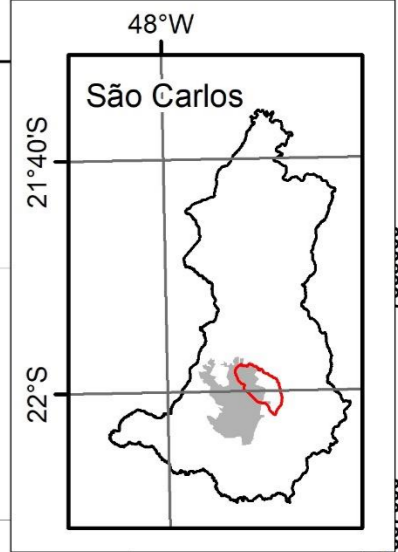
## APÊNDICE I - MAPA DE DOCUMENTAÇÃO

### LEGENDA

- PAx (Aguiar, 1989)
- ◆ PBx (Bartolomeu, 2012)
- ▲ PMx (Muro, 2000)
- PPx (Pons, 2006)
- ⊕ Px DAEE/SIAGAS
- ⊕ Px Poços Amostrados
- 💧 Nascentes PTx (Basilio, 2019) PSx (Souza, 2011)

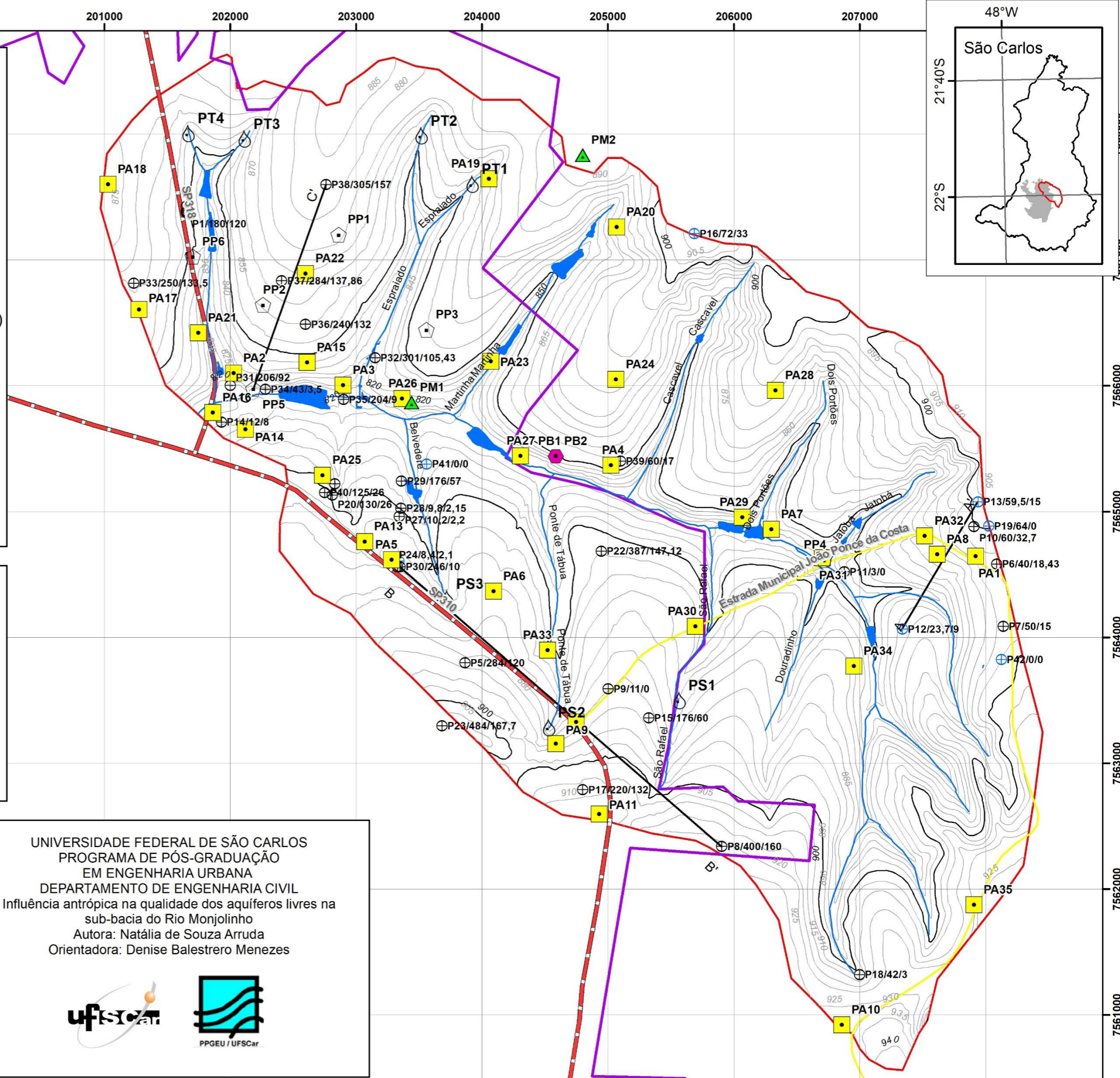
- 🌊 Corpos Hidricos
- 📏 SP310 e SP318
- + Área Urbana
- 🛣️ Estrada Municipal
- + Área de Estudo
- 🌊 Drenagem
- Curva de Nível Intervalo 5m
- 850, 900 m



ANEXO I- MAPA DE DOCUMENTAÇÃO  
 PONTOS: AGUIAR (1989), PONS (2006),  
 CARTA TOPOGRÁFICA IGC (1989) 1:10.000 - CURVA DE NÍVEL  
 PROJEÇÃO UTM DATUM SIGAS 2000  
 ZONA 23 FUSO S

**1:30.000**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
 EM ENGENHARIA URBANA  
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
 Influência antrópica na qualidade dos aquíferos livres na  
 sub-bacia do Rio Monjolinho  
 Autora: Natália de Souza Arruda  
 Orientadora: Denise Balestrero Menezes

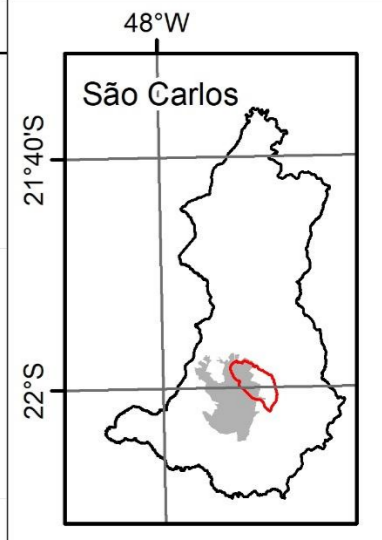


## APÊNDICE II - MAPA MATERIAIS INCONSOLIDADOS

197000 198000 199000 200000 201000 202000 203000 204000 205000 206000 207000

**Legenda**

- Material Arenoso III
- Material transportado areno-argiloso com contribuição de todas as unidades presentes na região.
- Material Orgânico
- Textura variável, constitui-se predominantemente por material orgânico
- Residual Itaqueri
- Areia fina a média, podendo chegar argila-arenosa, material residual da Fm. Itaqueri
- Residual Serra Geral
- Material argiloso, aumento de silte com a profundidade, residual da Fm. Serra Geral.
- Corpos Hidricos



**Legenda**

- Formação Itaqueri
- Arenitos finos a conglomeráticos.
- Formação Serra Geral
- Basalto formetemente fraturado afanítico, com arenitos intertrapianos.

203500 207000

7567000

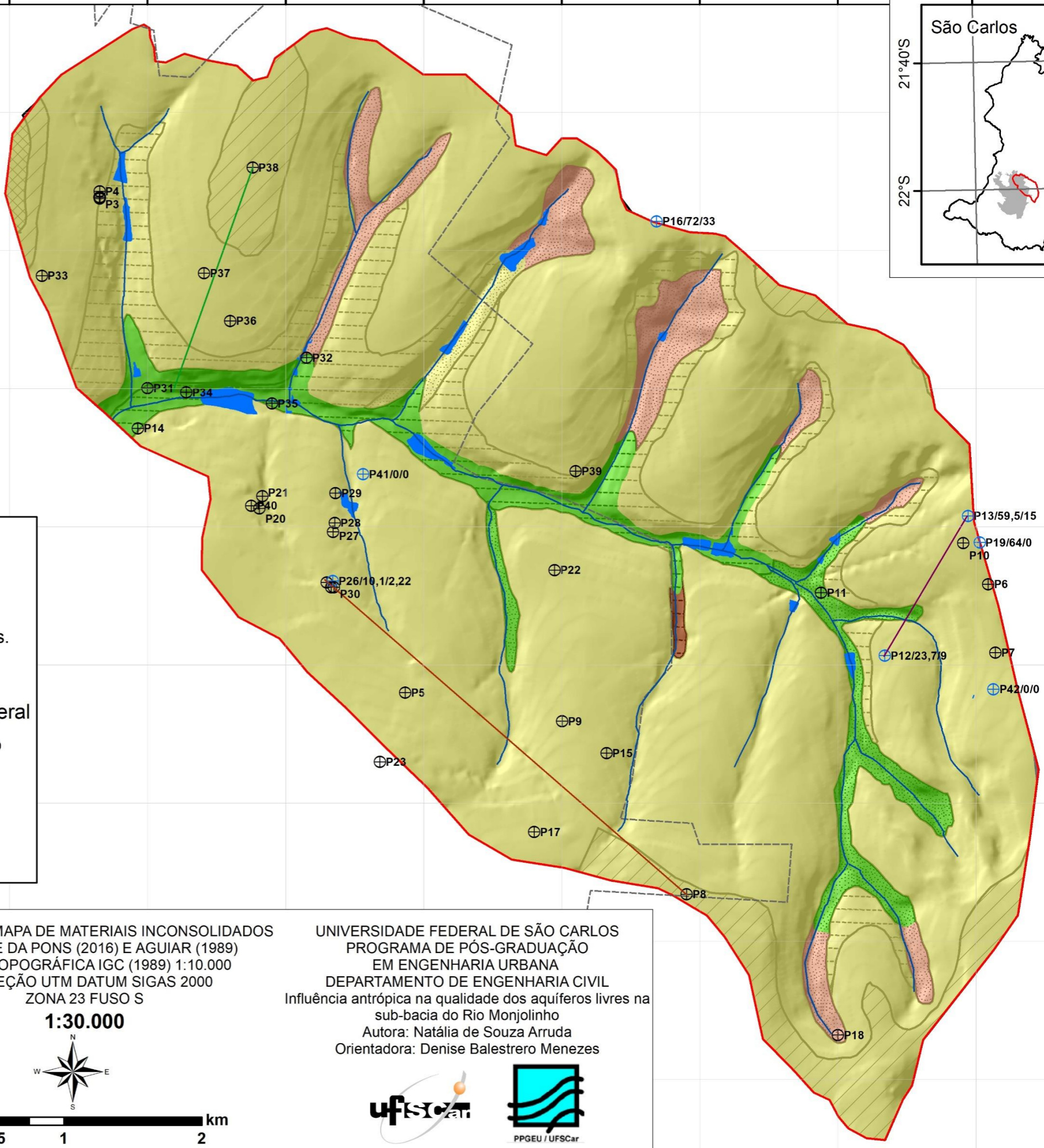
7564000

7563500

7563000

7560000

203500 207000



**Espeçura**

- 10
- 2
- 20
- 5
- >20

- Perímetro Urbano
- Área de Estudo
- Drenagem
- Poços DAEE/SIAGAS
- Px (Poços Análísado)

APÊNDICE II- MAPA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS  
 RECORTE DA PONS (2016) E AGUIAR (1989)  
 CARTA TOPOGRÁFICA IGC (1989) 1:10.000  
 PROJEÇÃO UTM DATUM SIGAS 2000  
 ZONA 23 FUSO S

**1:30.000**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
 EM ENGENHARIA URBANA  
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
 Influência antrópica na qualidade dos aquíferos livres na  
 sub-bacia do Rio Monjolinho  
 Autora: Natália de Souza Arruda  
 Orientadora: Denise Balestrero Menezes

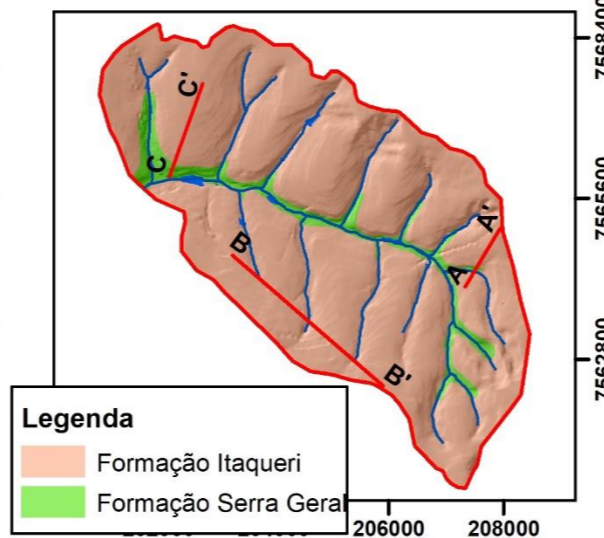
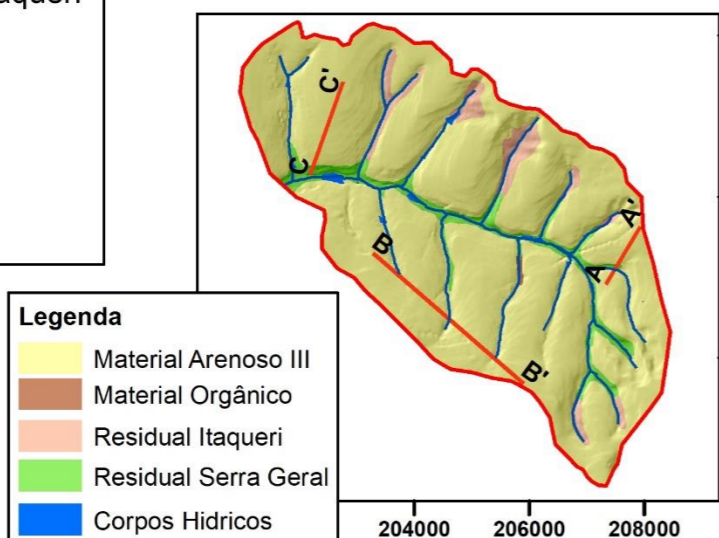
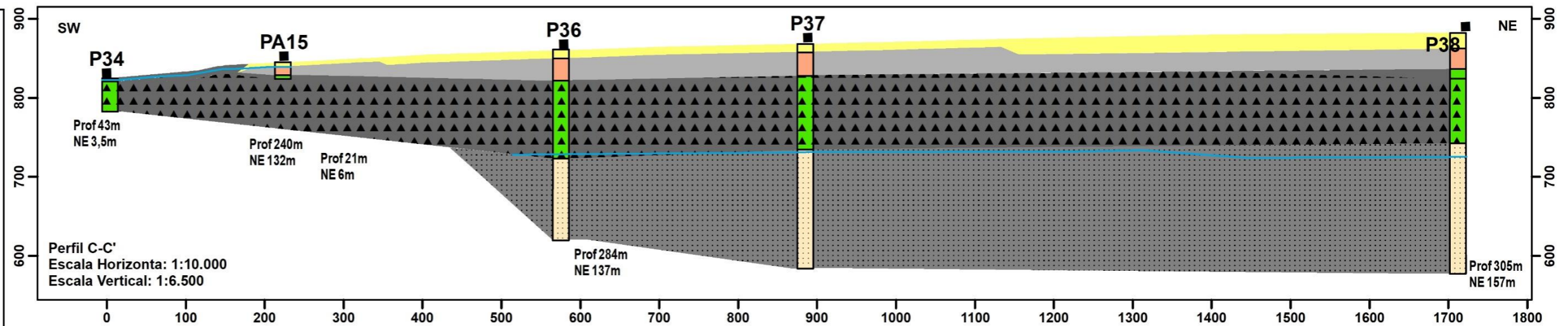
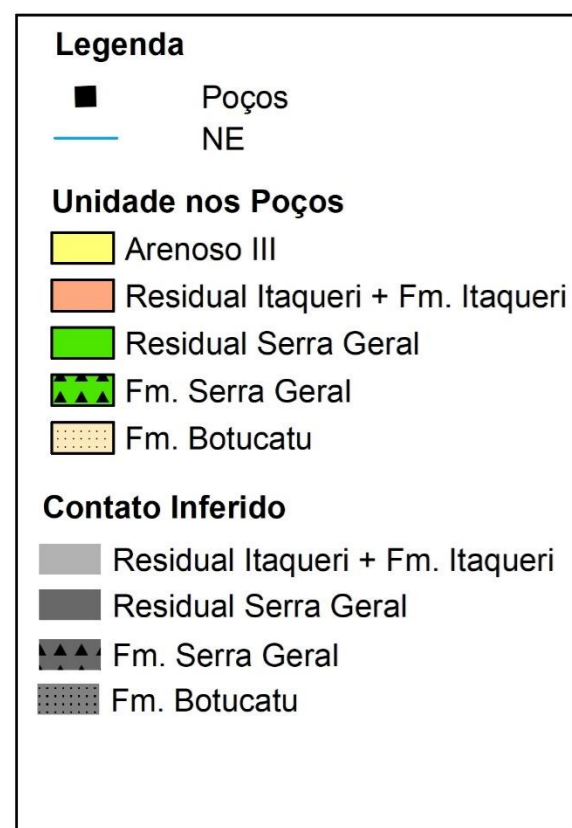
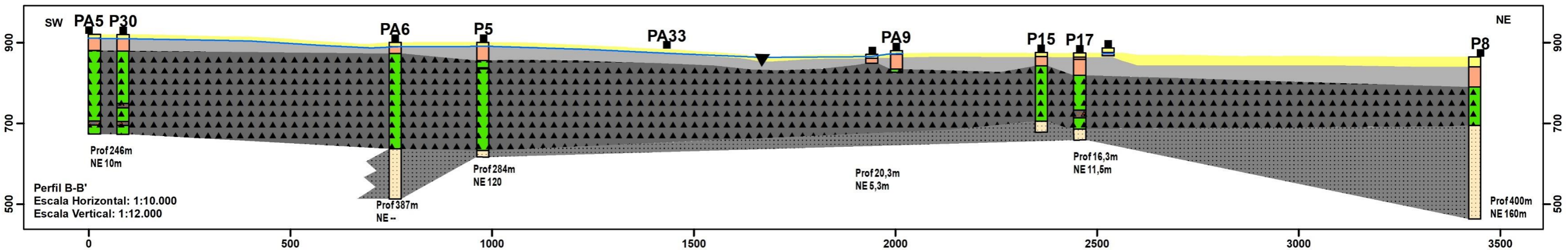
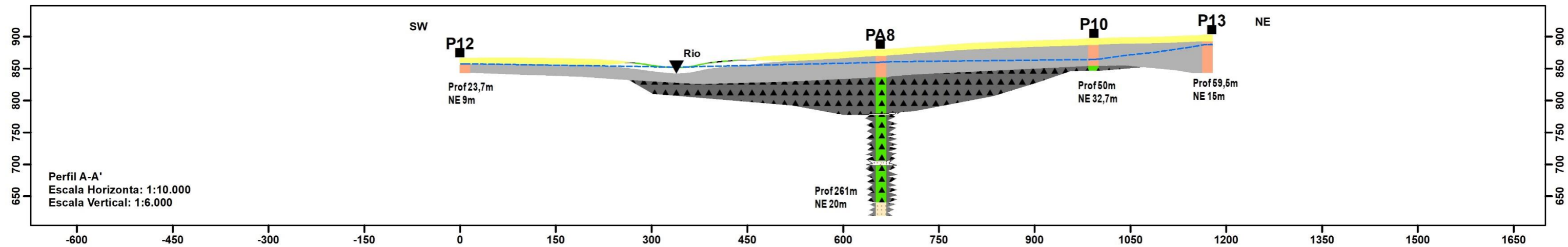


197000 198000 199000 200000 201000 202000 203000 204000 205000 206000 207000 208000

7568000  
7567000  
7566000  
7565000  
7564000  
7563000  
7562000  
7561000

7566000  
7565000  
7564000  
7563000  
7562000  
7561000

### APÊNDICE III - PERFIL HIDROGEOLÓGICO



APÊNDICE III - PERFIL GEOLÓGICO  
 PONTOS: AGUIAR (1989), PONS (2006), DAAE, SIAGS  
 CARTA TOPOGRÁFICA IGC (1989) 1:10.000 - CURVA DE NÍVEL  
 PROJEÇÃO UTM DATUM SIGAS 2000  
 ZONA 23 FUSO S

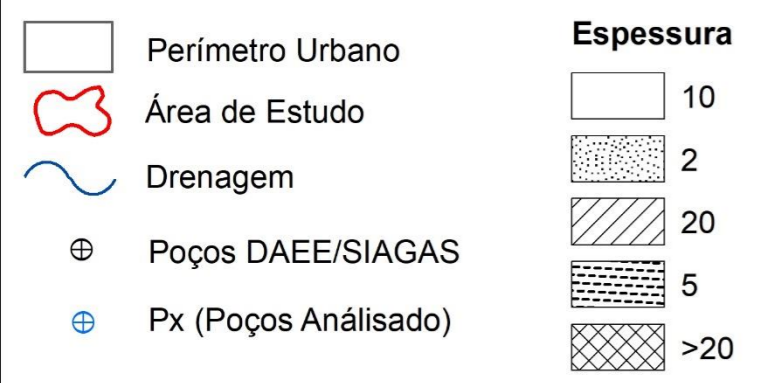
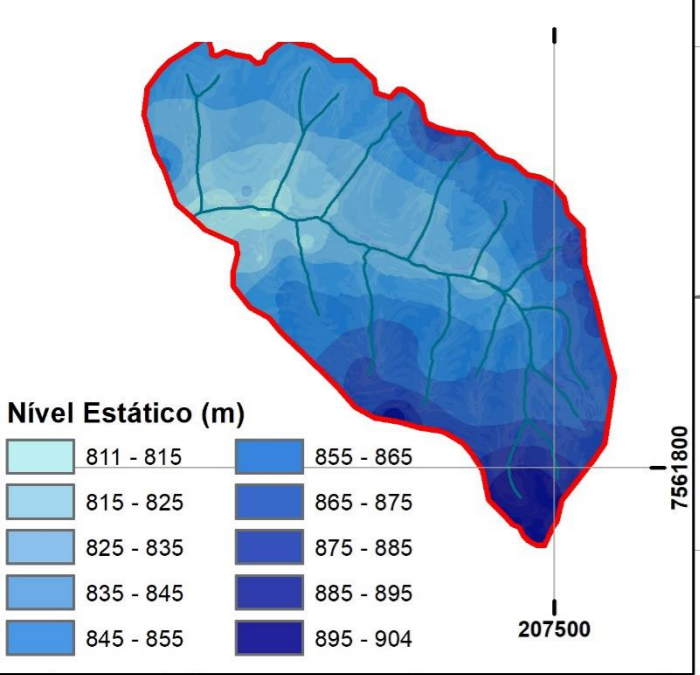
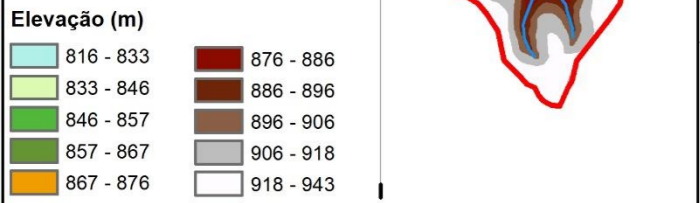
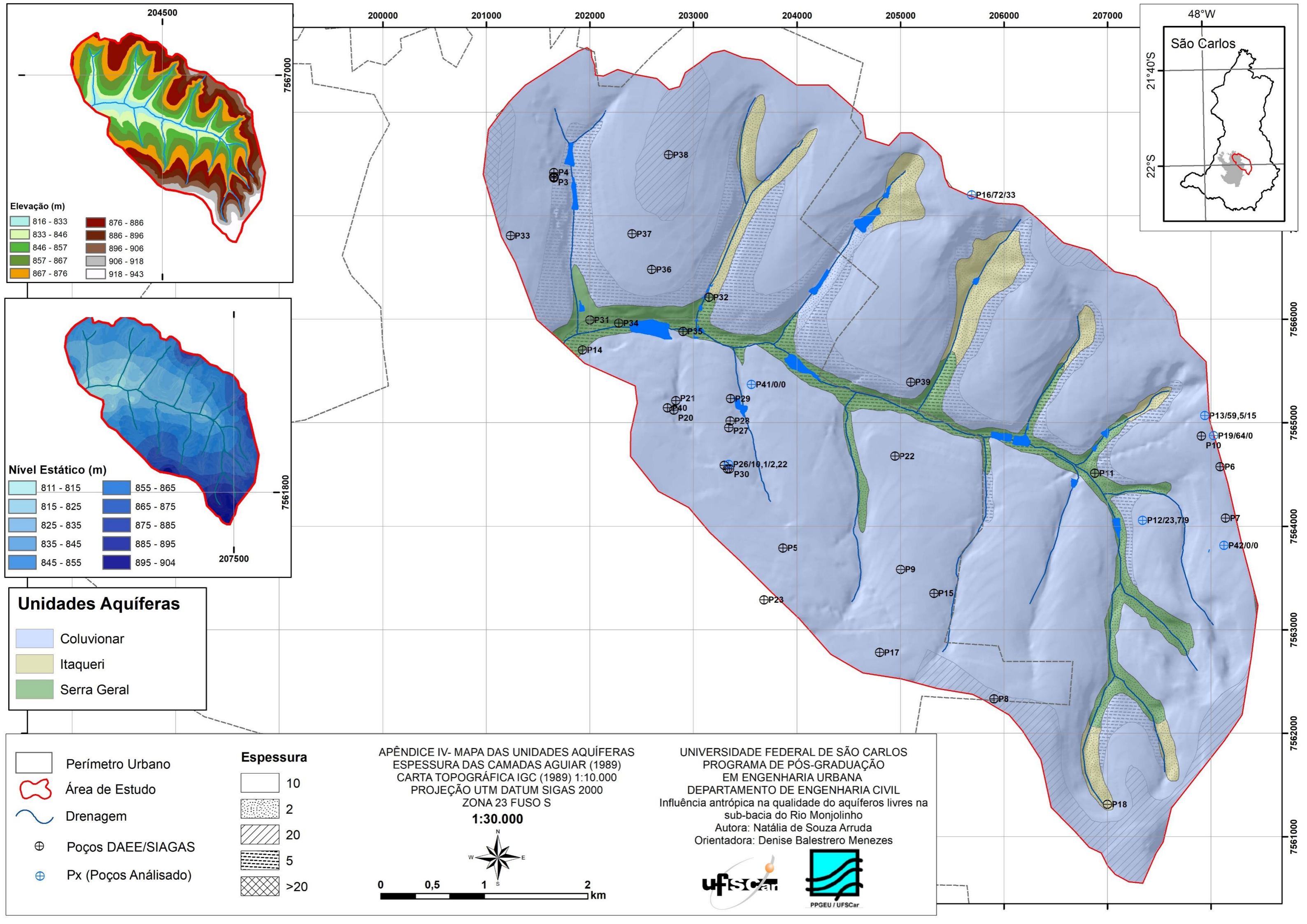
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
 EM ENGENHARIA URBANA  
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
 Influência antrópica na qualidade dos aquíferos livres na  
 sub-bacia do Rio Monjolinho  
 Autora: Natália de Souza Arruda  
 Orientadora: Denise Balestrero Menezes

ufscar

PPGEU / UFSCar

## APÊNDICE IV - MAPA DE AQUIFEROS





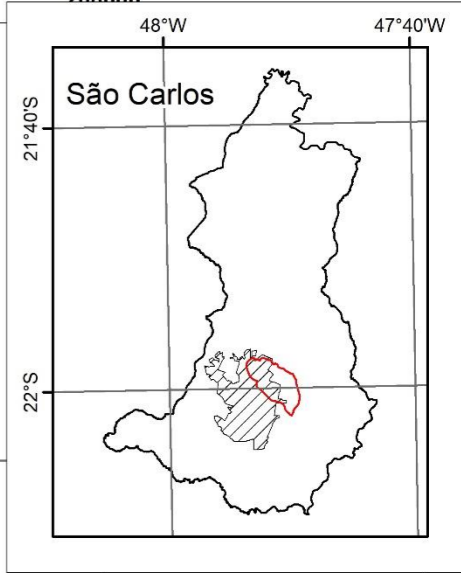
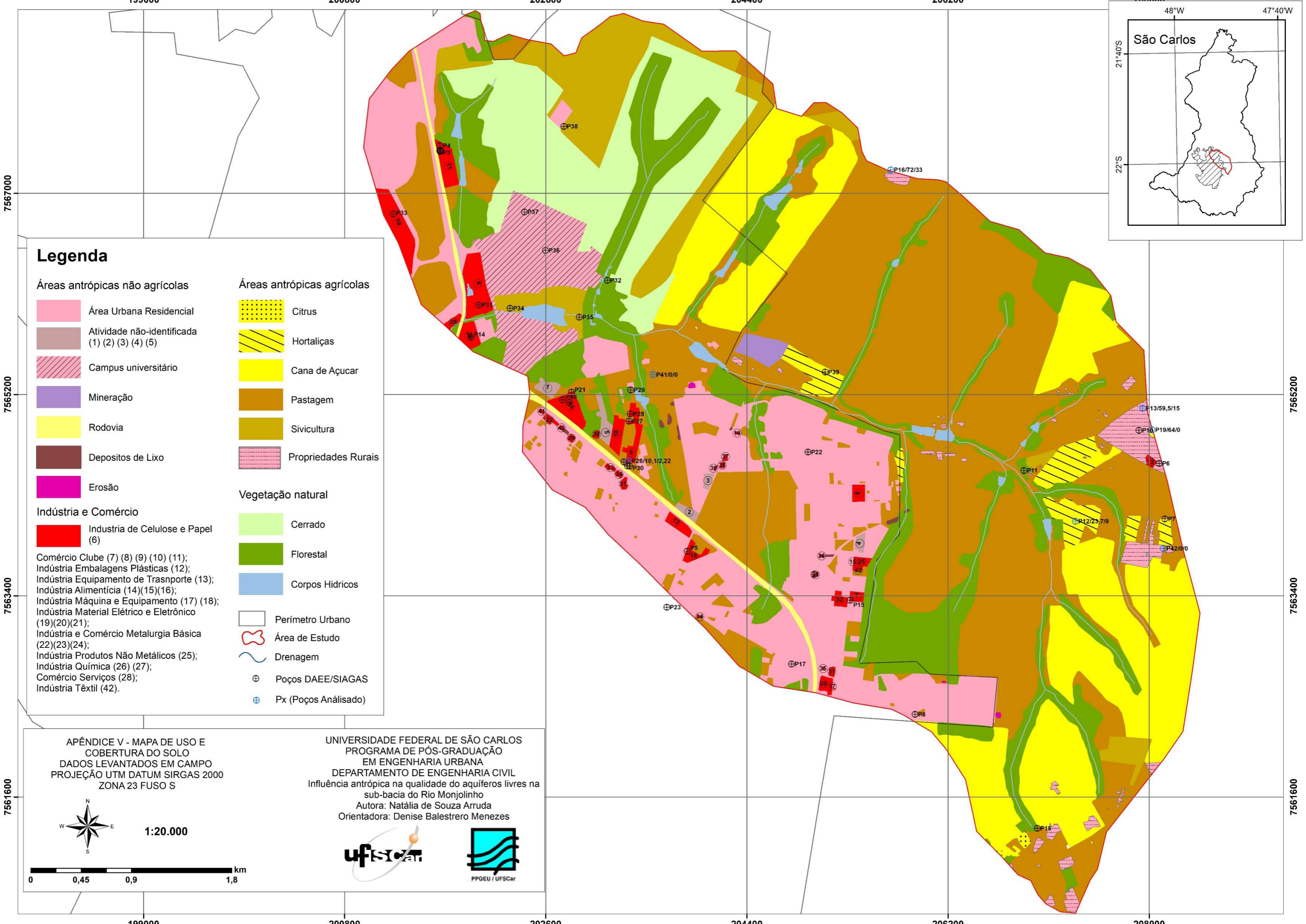
APÊNDICE IV- MAPA DAS UNIDADES AQUÍFERAS  
 ESPESSURA DAS CAMADAS AGUIAR (1989)  
 CARTA TOPOGRÁFICA IGC (1989) 1:10.000  
 PROJEÇÃO UTM DATUM SIGAS 2000  
 ZONA 23 FUSO S  
**1:30.000**

0 0,5 1 2 km

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
 EM ENGENHARIA URBANA  
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
 Influência antrópica na qualidade do aquíferos livres na  
 sub-bacia do Rio Monjolinho  
 Autora: Natália de Souza Arruda  
 Orientadora: Denise Balestrero Menezes

ufscar  
 PPGEU / UFSCar

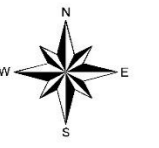
APÊNDICE V - MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO



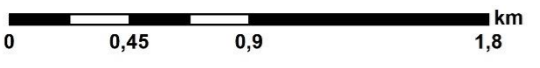
**Legenda**

- |  |  |                                   |                      |
|--|--|-----------------------------------|----------------------|
| <b>Áreas antrópicas não agrícolas</b>                  |  | <b>Áreas antrópicas agrícolas</b> |                      |
|  | Área Urbana Residencial                        |                                   | Citrus               |
|  | Atividade não-identificada (1) (2) (3) (4) (5) |                                   | Hortaliças           |
|  | Campus universitário                           |                                   | Cana de Açúcar       |
|  | Mineração                                      |                                   | Pastagem             |
|  | Rodovia  |                                   | Sivicultura          |
|  | Depositos de Lixo                              |                                   | Propriedades Rurais  |
|  | Erosão   | <b>Vegetação natural</b>          |                      |
| <b>Indústria e Comércio</b>                            |  |                                   | Cerrado              |
|  | Indústria de Celulose e Papel (6)              |                                   | Florestal            |
| Comércio Clube (7) (8) (9) (10) (11);                  |  |                                   | Corpos Hidricos      |
| Indústria Embalagens Plásticas (12);                   |  |                                   | Perímetro Urbano     |
| Indústria Equipamento de Transporte (13);              |  |                                   | Área de Estudo       |
| Indústria Alimentícia (14)(15)(16);                    |  |                                   | Drenagem             |
| Indústria Máquina e Equipamento (17) (18);             |  |                                   | Poços DAEE/SIAGAS    |
| Indústria Material Elétrico e Eletrônico (19)(20)(21); |  |                                   | Px (Poços Análísado) |
| Indústria e Comércio Metalurgia Básica (22)(23)(24);   |  |                                   |                      |
| Indústria Produtos Não Metálicos (25);                 |  |                                   |                      |
| Indústria Química (26) (27);                           |  |                                   |                      |
| Comércio Serviços (28);                                |  |                                   |                      |
| Indústria Têxtil (42).                                 |  |                                   |                      |

APÊNDICE V - MAPA DE USO E COBERTURA DO SOLO  
 DADOS LEVANTADOS EM CAMPO  
 PROJEÇÃO UTM DATUM SIRGAS 2000  
 ZONA 23 FUSO S



1:20.000



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
 EM ENGENHARIA URBANA  
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
 Influência antrópica na qualidade do aquíferos livres na sub-bacia do Rio Monjolinho  
 Autora: Natália de Souza Arruda  
 Orientadora: Denise Balestrero Menezes



7567000

7565200

7563400

7561600

7565200

7563400

7561600

199000

200800

202600

204400

206200

208000

APÊNDICE VI - TABELAS COM PERFIL DOS POÇOS

ID	Cota (m)	Prof (m)	NE (m)	Prof Litologia (m)	Litologia	Unidade Estratigráfica
P1	849,28	180	120	30,00	Arenito Argiloso	Fm. Itaqueri
				140,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				180,00	Arenito Friável	Fm. Botucatu
P2	849,04	30	10	30,00	Arenito Argiloso	Fm. Itaqueri
P3	849,11	31,5	3	1,50	Saibro	Orgânico
				5,00	Areia	Res. Itaqueri
				10,00	Argila	Res. Itaqueri
				19,50	Areia	Res. Itaqueri
				25,50	Arenito duro	Fm. Itaqueri
				31,50	Basalto	Fm. Serra Geral
P4	849,15	32	6,19	1,50	Saibro	Orgânico
				5,00	Argila Vermelha	Res. Itaqueri
				15,00	Areia	Res. Itaqueri
				23,00	Argila Roxa	Fm. Itaqueri
				26,00	Areia	Fm. Itaqueri
				32,00	Basalto	Fm. Serra Geral
P5	884,76	284	120	45,00	Sedimentos	Arenoso III
				63,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				65,00	Argila	Fm. Serra Geral
				268,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				284,00	Arenito	Fm. Botucatu
P6	892,23	40	18,43	40,00	Arenito	Fm. Itaqueri
P7	892,16	50	15	20,00	Solo	Solo
				50,00	Arenito	Fm. Itaqueri
P8	920,07	400	160	75,00	Arenito e Argilito	Fm. Itaqueri
				170,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				400,00	Arenito	Fm. Botucatu
P9	879,57	11	S/l	11,00	Arenito	Fm. Itaqueri
P10	899,72	50	32,7	10,00	Solo	Arenoso III
				50,00	Basalto	Fm. Serra Geral
P11	844,58	3	3	3,00	Areia	Res. Serra Geral
P12	850,29	23,7	9	23,70	Areia	Arenoso III
P13	902,83	59,5	15	59,50	Solo	Arenoso III
P14	823,92	12	8	8,00	Solo	Res. Serra Geral
P15	880,57	176	60	34,00	Solo	Arenoso III
				166,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				176,00	Arenito	Fm. Botucatu
P16	912,29	72	33	30,00	Arenito argiloso	Arenoso III
				32,00	Siltito e Argilito	Res. Itaqueri
				72,00	Arenito argiloso	Fm. Itaqueri

ID	Cota (m)	Prof (m)	NE (m)	Prof Litologia (m)	Litologia	Unidade Estratigráfica
P17	905,56	220	132	15,00	Areia argilosa	Res. Fm. Itaqueri
				54,00	Arenito grosseiro inconsolidado	Fm. Itaqueri
				141,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				160,00	Arenito siltoso	Fm. Serra Geral
				188,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				215,00	Arenito friável	Fm. Botucatu
P18	907,56	42	3		Solo	Res. Itaqueri
				42,00	Arenito argiloso	Fm. Itaqueri
P19	900,56	64	S/I	10,00	Solo	Arenoso III
				64,00	Arenito argiloso	Fm. Itaqueri
P20	848,87	130	26	25,00	Solo	Arenoso III
				50,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				60,00	Arenito	Fm. Serra Geral
				90,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				100,00	Arenito	Fm. Serra Geral
				130,00	Basalto	Fm. Serra Geral
P21	840,36	405	128,45	16,00	Arenito	Solo
				32,00	Argila	Fm. Itaqueri
				222,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				405,00	Arenito	Fm. Botucatu
P22	853,55	387	147,12	26,00	Areia média a grossa	Fm. Itaqueri
				262,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				387,00	Arenito friável	Fm. Botucatu
P23	910	484	167,7	24,00	Arenito e Siltito	Arenoso III
				46,00	Arenito argiloso	Fm. Itaqueri
				66,00	Conglomerado basal	Fm. Itaqueri
				252,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				484,00	Arenito	Fm. Botucatu
P24	864,53	8,4	2,1	8,40	Solo Arenoso	Ar III
P25	864,74	9,6	2,18	9,60	Solo Arenoso	Ar III
P26	863,45	10,1	2,22	10,10	Solo Arenoso	Ar III
P27	853,3	10,2	2,2	10,20	Solo Arenoso	Ar III
P28	849,95	9,8	2,15	9,80	Solo Arenoso	Ar III
P29	840	176	57	46,50	Argila e Arenito	Fm. Itaqueri
				174,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				176,00	Arenito	Fm. Botucatu
P30	864,24	246	10	40,00	Argila e Arenito	Ar III
				170,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				180,00	Arenito	Fm. Serra Geral
				215,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				225,00	Arenito	Fm. Serra Geral
				246,00	Basalto	Fm. Serra Geral

ID	Cota (m)	Prof (m)	NE (m)	Prof Litologia (m)	Litologia	Unidade Estratigráfica
P31	820,29	206	92	14,00	Solo	Res. Serra Geral
				112,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				206,00	Arenito	Fm. Botucatu
P32	827,81	301	105,43	8,00	Areia argilosa	Res. Serra Geral
				112,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				264,00	Arenito Friável	Fm. Botucatu
				301,00	Arenito fino a médio	Fm. Pirambóia
P33	865,9	250	133,5	20,00	Solo	Ar III + Res. Itaqueri
				39,00	Arenito argiloso grosso	Fm. Itaqueri
				136,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				250,00	Arenito fino	Fm. Botucatu
P34	822,35	43	3,5	4,00	Solo argiloso	Res. Serra Geral
				43,00	Basalto	Fm. Serra Geral
P35	820	204	90	26,00	Solo argiloso	Res. Serra Geral
				93,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				205,00	Arenito fino	Fm. Botucatu
P36	849,48	240	132	38,00	Solo arenoso	ArIII + Res Serra Geral
				136,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				240,00	Arenito fino	Fm. Botucatu
P37	868,92	284	137,86	40,00	Solo	ArIII + Res. Serra Geral
				134,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				284,00	Arenito fino a muito fino	Fm. Botucatu
P38	882,08	305	157	46,00	Solo Arenoargiloso	ArIII + Res. Itaqueri
				58,00	Argilito	Res. Serra Geral
				140,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				305,00	Arenito fino a médio	Fm. Botucatu
P39	853,51	60	17	1,00	Solo	Ar III
				22,00	Areia argilosa	Res. Serra Geral
				60,00	Basalto	Fm. Serra Geral
P40	852,06	125	26	25,00	Solo	Arenoso III
				50,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				60,00	Arenito médio	Fm. Serra Geral
				90,00	Basalto	Fm. Serra Geral
				100,00	Arenito médio	Fm. Serra Geral
				125,00	Basalto	Fm. Serra Geral
P41	836,04	S/I	18			
P42	895,15	S/I	S/I			

## APÊNDICE VII - RESULTADOS DAS ANÁLISES



FASE 1									
Parâmetros	Unidades	LQ	P12	P13	P16	P19	P26	P41	P42
Temperatura	°C	--	24,5	26,8	24,7	24,3	25	24,3	24,5
pH	--	--	5,56	6,7	5,92	5,54	4,77	5,62	5,52
ORP mV	--	--	-64	-45	157	168	-67	-113	-60
OD ppm	--	--	7,21	6,18	6,27	7,92	5,8	6,42	6,66
Ar	mg/L	0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008
Al	mg/L	0,029	0,137	<0,029	<0,029	<0,029	0,045	0,034	<0,029
Fe	mg/L	0,008	0,03	0,625	0,038	0,059	0,121	0,277	0,082
Mn	mg/L	0,011	0,032	<0,011	<0,011	<0,011	<0,011	0,013	<0,011
Na	mg/L	0,093	1,133	0,503	0,293	0,208	11,087	1,079	<0,093
K	mg/L	1,109	<1,109	1,511	1,402	1,696	<1,109	<1,109	<1,109
Mg	mg/L	0,005	1,535	1,263	0,856	0,711	0,079	0,443	0,240
Ca	mg/L	0,013	3,360	2,260	2,520	0,541	0,257	1,036	0,546
B	mg/L	0,016	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016
NO3	mg/L	0,01	2,75	0,735	<0,010	0,77	8,7	0,645	0,02
Nitrito	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,010	<0,01	<0,01	<0,010	<0,01
Cl-	mg/L	0,01	0,260	0,020	<0,010	0,015	4,080	0,510	<0,01
SO4-2	mg/L	0,01	0,180	0,175	0,230	0,300	0,045	0,460	0,290
N-Amoniacal	mg/L	0,05	0,31	0,13	0,27	0,12	<0,05	0,07	<0,05
P	mg/L	0,029	0,072	0,065	0,045	0,07	<0,029	0,07	0,05
Glifosato 1	mg/L	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Alcalinidade	mg/L	5	50	53	51	<5	55	50	37
Cd	mg/L	0,001	0,006	0,028	0,012	0,056	<0,001	<0,001	<0,001
Pb	mg/L	--	<0,819	<0,797	<0,783	<0,797	<0,771	<0,805	<0,808
Cu	mg/L	--	0,016	0,018	0,018	0,015	0,028	0,045	0,02
Zn	mg/L	0,001	0,002	0,017	<0,001	<0,001	0,021	0,002	0,001

FASE 2									
Parâmetros	Unidades	LQ	P12	P13	P16	P19	P26	P41	P42
Temperatura	°C		28,5	22,4	23,5	23	24,5	23,7	22,7
pH	--		6,04	6,25	5,84	5,5	5,02	5,52	5,04
CE			56,4	46,6	39,4	32	98,2	38,4	21,2
tds			28,2	23,2	20	15,5	49,1	19,3	10,3
ORP			-430	-950	-27	-960	S/l	S/l	-823
OD			8,42	8,3	8,08	9,21	7,7	7,74	9,28
Ar	mg/L	0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008
Al	mg/L	0,029	0,058	0,047	0,031	0,061	0,05	0,049	0,037
Fe	mg/L	0,008	0,063	0,178	0,21	0,138	0,09	0,089	0,071
Mn	mg/L	0,011	0,024	0,035	0,013	0,029	0,02	0,018	0,016
Na	mg/L	0,093	1,811	0,699	0,505	0,382	12,507	1,762	0,000
K	mg/L	1,109	2,285	2,942	2,905	2,736	<1,109	<1,109	<1,109
Mg	mg/L	0,005	2,046	1,528	0,988	0,860	0,052	0,498	0,144
Ca	mg/L	0,013	1,229	1,230	1,057	0,268	0,117	0,415	0,053
B	mg/L	0,016	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016
NO3	mg/L	0,01	1,34	0,395	0,315	0,86	7,67	0,405	0,075
Nitrito	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cl-	mg/L	0,01	0,400	<0,4	<0,4	<0,4	4,500	0,500	<0,4
SO4-2	mg/L	0,01	8,120	0,720	0,545	9,470	0,325	9,105	0,825
N-Amoniacal	mg/L	0,05	0,2	0,18	<0,05	0,1	<0,05	<0,05	<0,05
P	mg/L	0,029	0,069	0,034	0,033	<0,029	<0,029	<0,029	<0,029
Atrazina	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cd	mg/L	0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Fl	mg/L	0,01	0,22	0,08	0,105	0,26	0,01	0,22	0,07