

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DELIMITAÇÃO DE ÁREAS PARA INSTALAÇÃO DE SISTEMA DE
FILTRAÇÃO EM MARGEM DE RIO (FMR) PELA COMBINAÇÃO DE TÉCNICAS
DE FOTOINTERPRETAÇÃO E GEOFÍSICA DE ELETORRESISTIVIDADE

Samara Melo Aguiar

Monografia

TF 22/52

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Alexandra Vieira
Suhogusoff

Coorientador: Fernando Augusto Saraiva

São Paulo

2022

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos vão primeiramente a Deus, por todas as portas que Ele abriu e me permitiu chegar onde estou hoje. A minha mãe Sonia e ao meu pai Ori, que com todas as dificuldades sempre me deram amor e ensinaram valores que levarei para a vida. A minha irmã e amiga Talita, aquela que sei que sempre posso contar e que me deu dois sobrinhos lindos, Calebe e Hadassa. A minha tia Lourdes e seus filhos, pelo carinho e cuidado, além de serem uma extensão da família. Ao meu companheiro e amigo João Pedro, que me ouve tagarelar e sempre cuida de mim.

Agradeço também aos professores e funcionários do Instituto de Geociências que estiveram presentes durante minha graduação, em especial, minha professora orientadora Alexandra e ao professor Gallas. A Miriam, Ideval e Jaqueline, minha família Museu, que me acolheram e me proporcionaram muita alegria. Aos pesquisadores e funcionários do Projeto SACRE, que me ajudaram diretamente ou indiretamente no desenvolvimento desse trabalho, em especial ao Vinicius, Fernando, Paulinho, Eduardo e Cláudia, que foram fundamentais para o levantamento dos dados.

Aos meus amigos e colegas de turma e aos agregados, por toda conversa, cerveja e história vivida durante a graduação. A Ariane (Jason), minha amiga e companheira desde o início e que levarei para a vida; a Fernanda (Iludida), por muitas vezes me abraçar como uma irmã e ouvir as minhas justificativas; ao Erilio (Gorfo) e Sara (Sid), pelas conversas e pelas refeições juntos. A Sara (Tey) e Bianca (Bombom), pelo carinho e por me mostrarem o amor à geologia. Aos geojunianos Nathalia (Catatau), Fábio (Nesquik), Larissa (Miss), Denis (Frida), Karina (Pitu), Felipe (Pizza), Mário (Sizu), Santiago (Pinguim), Felipe (Menos).

RESUMO

A Filtração em Margem de Rio (FMR), ou *Riverbank Filtration* (RBF), é uma técnica que consiste na instalação de poços produtores, nas margens de corpos superficiais, que captam água subterrânea misturada com água superficial devido ao rebaixamento do nível d'água gerado pelo bombeamento desses poços, proporcionando uma redução e diluição das concentrações de parâmetros físicos, químicos e biológicos. Atualmente, essa técnica é aplicada em alguns lugares do mundo, como em países da Europa, Ásia e nos Estados Unidos, sendo que no Brasil há apenas sistemas pilotos. Bauru, localizado no Estado de São Paulo, é um dos municípios que são atingidos pela crise hídrica e esse trabalho inserido no Projeto Temático "SACRE| Soluções integradas de água para cidades resilientes", busca selecionar áreas potenciais para a instalação de FMR próximo à zona urbana do município. A seleção dessas áreas considerou informações de levantamento bibliográficos; interpretação de bancos de sedimentos nos corpos d'água através de fotografias aéreas, imagens de satélite e de drone; visitas de campo nas áreas; levantamentos geofísicos de eletrorresistividade, caminhamentos elétricos (CE) e sondagens elétricas verticais (SEV); e, complementarmente, informações da granulometria do sedimento do leito dos corpos d'água. Consideraram-se áreas nos principais corpos d'água do município, porém, as duas mais propícias para o FMR localizam-se no rio Bauru (Ponto CPA) e no ribeirão da Água Parada (Ponto 6). Nessas áreas, os CEs e as SEVs realizados mostram que o nível de água (NA) está a uma profundidade de aproximadamente 2 a 2,5 m; há três principais estratos geoeletricos que podem indicar uma relação com três diferentes litotipos, sendo que a partir de 25 m de profundidade há um estrato com resistividade aparente maior que 3700 Ω .m; os bancos de sedimentos são lateralmente homogêneos. Em relação aos sedimentos dos leitos dos corpos d'águas superficiais das áreas, ambas apresentam uma fração granulométrica de areia fina a média superior a 70% em todos os pontos, exceto em uma amostra. Entretanto, as características climáticas e, principalmente, pluviométricas mostram que no período chuvoso o volume precipitado no município pode alterar as características hidrológicas dos corpos d'água e alterar a composição do leito. O Ponto CPA possui fácil acesso e uma lâmina d'água mais espessa (entre 0,5 m e 3,0m), aumentando o potencial dessa área para o FMR. Além disso, esse rio atualmente recebe a maior proporção do esgoto bruto do município, algo que possibilitaria uma melhor avaliação dos resultados do tratamento utilizando o FMR.

Palavras-chave: Filtração em Margem de Rio; Bauru; Bancos de sedimento; Eletrorresistividade; Granulometria.

ABSTRACT

Riverbank Filtration (RBF) is a technique that consists of the installation of producing wells, on the banks of surface bodies, which capture groundwater mixed with surface water due to the lowering of the water level. generated by pumping these wells, providing a reduction and dilution of the concentrations of physical, chemical, and biological parameters. Currently, this technique is applied in some parts of the world, such as countries in Europe, Asia, and the United States, and in Brazil there are only pilot systems. Bauru, in the State of Sao Paulo, is one of the municipalities that are affected by the water crisis and this work, inserted in the Thematic Project "SACRE| Integrated water solutions for resilient cities", seeks to select potential areas for the installation of RBF close to the urban area of the Municipality. The selection of these areas considered bibliographic survey information; interpretation of sediment banks in water bodies through aerial photographs, satellite, and drone images; field visits in the areas; geophysical surveys of electroresistivity, electrical traversing and vertical electrical soundings; and, in addition, information on the granulometry of sediment from the bed of water bodies. Areas in the main water bodies of the Municipality were considered, however, the two most favorable for the FMR are in the Bauru River (Point CPA) and in the Água Parada stream (Point 6). In these areas, the electrical traversing and vertical electrical soundings performed show that the water level is at a depth of approximately 2 to 2.5 m; there are three main geoelectric strata that may indicate a relationship with three different lithotypes, and from 25 m deep there is a stratum with apparent resistivity greater than 3700 Ω .m; the sediment banks are laterally homogeneous. Regarding the sediments from the beds of the bodies of surface water in the areas, both have a granulometric fraction of fine to average sand greater than 70% at all points, except in one sample. However, the climatic and, mainly, rainfall characteristics show that in the rainy season the volume of precipitation in the Municipality can change the hydrological characteristics of the water bodies and change the composition of the bed. The CPA Point has easy access and a thicker water depth (between 0.5 m and 3.0 m), increasing the potential of this area for RBF. In addition, this river currently receives the largest proportion of the Municipality's raw sewage, something that would allow a better evaluation of the treatment results using the RBF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo.....	4
Figura 2 - Clima de Bauru, segundo o Mapa de Clima do Brasil do IBGE (2002). 5	
Figura 3 - Precipitação mensal na estação A705 – Bauru, referente ao ano de 2021. Fonte dos dados: INMETRO (2021).	6
Figura 4 – Mapa Geológico de Bauru.	7
Figura 5 - Mapa Geomorfológico de Bauru.	8
Figura 6 – Mapa Hidrogeológico de Bauru.	10
Figura 7 - Mapa das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Bauru, Estações de Tratamento de Esgoto e captação de água para abastecimento da população urbana. Fonte: CETESB (2022a e 2022b) e SNIS (2022).	11
Figura 8 - Esquema do sistema de Filtração em Margem de Rio e os processos associados em cada etapa. Traduzido de Hiscock & Grischek, 2002.	16
Figura 9 - Configurações e tipos de poços de Filtração em Margem de Rio que podem ser instalados. (A) Vista em perfil do tipo de poço horizontal. (B) Vista em perfil do tipo de poço vertical. (C) Vista em planta da configuração sob o leito do rio. (D) Vista em planta da configuração ao longo do leito do rio. Modificado de Ray <i>et al.</i> (2002)..	19
Figura 10 - Configuração vista em planta dos poços ao longo do leito do rio, agrupados em galerias (lado esquerdo) ou em grupos (lado direito). Modificado de Hu <i>et</i> <i>al.</i> (2016).	19
Figura 11 - Arranjo Schlumberger em superfície. Modificado de: Gallas (2000). 21	
Figura 12 - Arranjo dipolo-dipolo em superfície. Modificado de: Gallas (2000). 22	
Figura 13 - Representação de um perfil de pseudo-seção gerado em um arranjo dipolo-dipolo. Modificado de Gallas (2000).	23
Figura 14 - Mapa com as delimitações dos bancos de sedimentos, gerados a partir de imagens do <i>Google Earth</i> e fotografias aéreas de 2010, da EMPLASA.	29
Figura 15 - Comparação de parte do rio Bauru através de fotografia aérea de 1962 do Consórcio Natividade-Vasp-Cruzeiro-Aerofoto (A) com imagem de satélite do <i>Google</i> <i>Earth</i> atual (B).	30
Figura 16 - Mapa dos pontos visitados durante as atividades de campo.	32
Figura 17 - Fotografias dos bancos de sedimentos do Ponto 06 (A) e Ponto CPA (B), tiradas durante as atividades de campo.	33
Figura 18 - Mapa com o Perfil CPA e as imagens do drone do IPT.	34
Figura 19 - Mapa com o Perfil 6 e as imagens do <i>Google Earth</i>	35
Figura 20 - Pseudo-seção e seção modelada da resistividade do Ponto CPA, segundo Hollof (1957) e pelo software Res2DInv. Ambas interpoladas pelo Surfer 8.	36
Figura 21 - Pseudo-seção e seção modelada da resistividade do Ponto 6, segundo Hollof (1957) e pelo software Res2DInv. Ambas interpoladas pelo Surfer 8.	36
Figura 23 - Localização das Sondagens Elétricas Verticais (SEV) no Ponto CPA	38
Figura 24 - Curva de resistividade aparente da SEV 1 do Ponto CPA, elaboradas no software de inversão <i>IPI2win</i>	39
Figura 25 - Curva de resistividade aparente da SEV 2 do Ponto CPA, elaboradas no software de inversão <i>IPI2win</i>	39
Figura 25 – Localização das amostras de sedimento de leito do rio Bauru, próximo ao Ponto CPA.	40

Figura 26 - Localização das amostras de sedimento de leito do ribeirão da Água Parada, próximo ao Ponto 6.....	41
Figura 27 - Porcentagem das faixas granulométricas na margem interna do rio Bauru no Ponto CPA, sendo os dados obtidos por análise granulométrica por difração à laser.....	43
Figura 28 - Porcentagem das faixas granulométricas do perfil transversal da curva no Ponto CPA, do rio Bauru, sendo os dados obtidos por análise granulométrica por difração à laser.....	44
Figura 29 - Porcentagem das faixas granulométricas dos perfis transversais da curva no Ponto 6, do ribeirão da Água Parada, sendo os dados obtidos por análise granulométrica por difração à laser.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos de monitoramento da Qualidade das Águas Interiores da CETESB nos cursos de água de Bauru.....	14
Tabela 2 – Mínimo e máximo das características dos sistemas de Filtração em Margem de Rio pelo mundo atualmente.	27
Tabela 3 - Informações levantadas durante as atividades de campo, para reconhecimento das áreas previamente selecionadas.	31
Tabela 4 - Informações do local, quantidade de amostra coletada e analisada do rio Bauru, próximo ao Ponto CPA.	42
Tabela 5 - Informações do local, quantidade de amostra coletada e analisada do ribeirão da Água Parada, próximo ao Ponto 06.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
3	ÁREA DE ESTUDO	3
3.1	Localização	4
3.2	Clima e Pluviometria	4
3.3	Geologia e Geomorfologia.....	6
3.4	Hidrogeologia	8
3.5	Hidrografia.....	10
3.6	Abastecimento de Água e Coleta e Tratamento de Esgoto.....	12
3.7	Qualidade das Águas e Saneamento	13
4	FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	14
4.1	Filtração em Margem de Rio	15
4.1.1	Critérios para a instalação do sistema de filtração em margem de rio	16
4.1.2	Configuração do sistema e tipos de poços	18
4.2	Interpretação de Fotografias Aéreas para Identificação de Bancos de Sedimentos	20
4.3	Técnicas Geofísicas de Eletrorresistividade	20
5	MATERIAIS E MÉTODOS	23
5.1	Levantamento Bibliográfico	23
5.2	Identificação de Bancos de Sedimentos a partir da Interpretação de Fotografias Aéreas e Imagens de Satélite e Drone	23
5.3	Levantamento de Dados Preliminares em Campo	24
5.4	Levantamento Geofísico	24
5.5	Dados de Granulometria do Leito do Corpo D'Água Superficial	25
6	RESULTADOS	26
6.1	Características de Sistemas em Operação de Filtração em Margem de Rio	26
6.2	Avaliação da Qualidade da Água Superficial	27
6.3	Identificação de Potenciais Bancos de Sedimentos	28
6.4	Reconhecimento das Áreas Pré-selecionadas	31
6.5	Caminhamento Elétrico e Sondagem Elétrica Vertical nas Áreas Preliminares	33
6.6	Granulometria do Leito do Rio Bauru e Ribeirão da Água Parada	40

7	DISCUSSÃO	45
8	CONCLUSÕES	48
9	REFERÊNCIAS	50

Apêndice 01 - Características de alguns exemplos de Sistema de Filtração em Margem de Rio em operação pelo mundo

Apêndice 02 - Resultados da análise granulométrica, por difração a laser, e descrição dos sedimentos

1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são de grande importância para a vida, pois deles são captadas as águas utilizadas para consumo, produção agrícola e industrial, higiene e lazer, e com o aumento da população e desenvolvimento das economias há uma demanda contínua e crescente por água.

Atualmente, 84,1% da população brasileira e 96,5% da população paulista é atendida pela rede de abastecimento de água (SNIS, 2022). Dos municípios brasileiros, 43% são abastecidos por água superficial, 40% por água subterrânea, 14% misto com predomínio de água superficial e 3% misto com predomínio de água subterrânea (ANA, 2021). Após a captação, a água superficial passa por um tratamento, que ocorre principalmente por processos físico-químicos, envolvendo coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (IBGE, 2020). Os tipos de tratamentos mais utilizados nos municípios brasileiros são tratamento convencional e tratamento simplificado, sendo realizadas todas as etapas, citadas anteriormente, no tratamento convencional e, no tratamento simplificado, apenas a desinfecção. O tipo de tratamento utilizado depende da classificação da água doce, seguindo a Resolução CONAMA nº 357/2005. A água subterrânea, por outro lado, geralmente passa apenas pelo tratamento simplificado, dependendo das condições físico-químicas dela (SNIS, 2021).

Após o uso da água, seja de fins domésticos ou industriais, constitui-se o esgoto sanitário, composto por água e impurezas (SNIS, 2021). Cerca de 55,0% da população brasileira é atendida pela coleta de esgoto, e do volume coletado apenas 50,8% é tratado (SNIS, 2022). Essas porcentagens para o estado de São Paulo são maiores, sendo 90,6% da população atendida pela coleta de esgoto e 69,6% desse volume tratado (SNIS, 2022). A porcentagem de esgoto não tratado é descartada, de forma bruta, diretamente nos corpos d'água superficiais, afetando a qualidade desses (ANA, 2017). Além disso, o descarte inadequado dos resíduos sólidos, que gera chorume, e o uso indiscriminado de agrotóxicos e fertilizantes podem contaminar a água subterrânea (SNIS, 2021).

O Brasil, mesmo possuindo uma das maiores disponibilidades de água doce do mundo, vem sofrendo com problemas de escassez hídrica associados a eventos de seca extrema. Dentre os municípios brasileiros, 48,6 % passaram por crise hídrica (Hirata *et al.*, 2019). Segundo SNIS (2021), entre os anos de 2012 e 2017, período que teve um

baixo volume de chuva em território nacional, os níveis dos reservatórios ficaram comprometidos e medidas alternativas foram necessárias para o abastecimento da população. Além disso, alguns municípios brasileiros também sofrem com águas de qualidade ruim captadas de corpos superficiais (ANA, 2017), que muitas vezes podem apresentar concentrações de parâmetros físicos, químicos e biológicos impróprios para uso, devido ao descarte de esgoto sem tratamento nos corpos superficiais.

Bauru foi um dos municípios atingidos pela crise hídrica. Em novembro de 2021, medidas emergenciais para complementar o abastecimento de água foram anunciadas, dentre elas estão a contratação de caminhões pipas, a perfuração de poços, a interligação de poços privados à rede de abastecimento e o sistema de rodízio 24h/ 72h, que dividiu os bairros em quatro grupos, nos quais, cada um era abastecido com água durante 24 horas e depois fica 72 horas sem (BAURU, 2021).

Considerando questões como a crise hídrica e as contaminações de águas superficiais e subterrâneas, buscam-se técnicas para tratamento e captação de água, de forma que contribuam para o abastecimento da população e que sejam, preferencialmente, de baixo custo e com eficiência comprovada.

A Filtração em Margem de Rio (FMR), ou *Riverbank Filtration* (RBF), é uma técnica não aplicada em larga escala no Brasil, possuindo apenas sistemas pilotos, ao contrário de outros países como Estados Unidos, Alemanha e China. Essa técnica consiste em poços produtores instalados nas margens de corpos superficiais, que bombeiam água subterrânea misturada com água superficial, devido ao rebaixamento do nível d'água gerado pelos poços. Algumas das aplicações dessa técnica apresentam boa eficiência no tratamento da água e complementam o abastecimento de água da população (ROMERO-ESQUIVEL *et al.*, 2016; RAY *et al.*, 2002; GRISCHEK *et al.*, 2002), porém são necessários estudos para se definir as condições adequadas de implementação da técnica.

Esse Trabalho de Formatura (TF) insere-se no Projeto Temático com auxílio FAPESP denominado "SACRE| Soluções integradas de água para cidades resilientes" (processo no 2020/15434-0), que engloba diversas instituições públicas de pesquisa e ensino (Instituto de Pesquisas Ambientais e Humanidades-IPAH, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo-CETESB, Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT, Departamento de Água e Esgoto de Bauru-DAE, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Universidade Federal de São Paulo-

UNIFESP), incluindo o Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas da Universidade de São Paulo (CEPAS|USP). O principal objetivo do SACRE é criar soluções para reduzir a vulnerabilidade no abastecimento de água e tratar água contaminada, integrando métodos clássicos e inovadores, gestão e técnicas baseadas na natureza.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo desse projeto de Trabalho de Formatura (TF) é a seleção e delimitação de potenciais áreas para a instalação do sistema de Filtração em Margem de Rio (FMR) próximo à zona urbana do município de Bauru, sendo o foco nas regiões de entorno das principais drenagens.

Os objetivos específicos abrangem:

- Levantamento bibliográfico das características (hidrológicas e qualidade das águas) dos principais corpos d'água da área de estudo, dados sobre hidrogeológicas, geológicas, clima e geomorfológicas da região e características principais dos sistemas de FMR atuais;
- Identificação e seleção de bancos de sedimentos arenosos, aos longos dos principais corpos superficiais, a partir da interpretação de fotografias aéreas, imagens de satélites e de drones;
- Caracterização das áreas selecionadas a partir de visita de campo, considerando descrição tátil-visual da granulometria e mineralogia, dimensionamento dos bancos de sedimentos, avaliação do acesso e das condições do entorno, e estimativa das velocidades dos corpos de água;
- Identificação da espessura e dos limites laterais dos bancos de sedimentos das áreas selecionadas através da investigação geofísica de eletrorresistividade;
- Caracterização da granulometria dos sedimentos do leito dos principais corpos d'água das áreas selecionadas para avaliar a heterogeneidade e a fração granulométrica predominante.

3 ÁREA DE ESTUDO

A seguir, serão abordadas algumas características da área de estudos obtidas a partir do levantamento bibliográfico.

3.1 Localização

A área de estudo desse Trabalho de Formatura (TR) situa-se no município de Bauru (Figura 1), que está localizado no interior do estado de São Paulo, na porção centro-oeste, e faz parte da microrregião do Bauru, sendo sua divisa com Arealva (à nordeste), Reginópolis (ao norte), Piratininga (à sudoeste), Agudos (ao sul), Pederneiras (ao leste), e Avaí (à noroeste). O município vem tendo dificuldades no abastecimento de água devido à crise hídrica, não suprimindo a demanda dos moradores (BAURU, 2021).

As atividades desenvolvidas estão relacionadas aos principais corpos d'água superficiais do município, dentre eles, o rio Bauru, o rio Batalha e o ribeirão da Água Parada, além de alguns afluentes menores, priorizando a zona urbana e seus entornos.

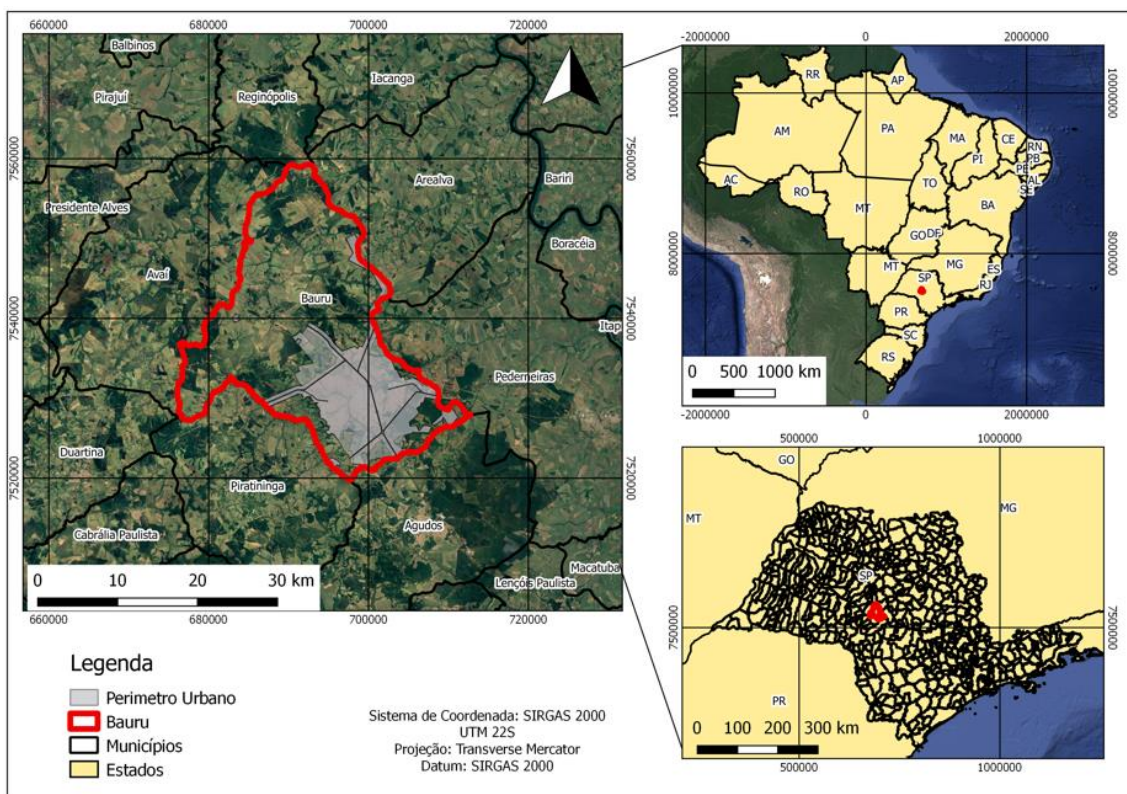


Figura 1 - Localização da área de estudo.

3.2 Clima e Pluviometria

O clima, segundo Ribeiro (1993) é um conjunto das condições atmosféricas (temperatura, pluviométrica, umidade, pressão atmosférica, ventos, radiação solar) em um determinado tempo e espaço. A classificação do clima depende da escala de estudo e a metodologia abordada. Uma das classificações é o clima zonal, que está relacionado com a distribuição da radiação solar na superfície da Terra, variando de acordo com a

posição no globo, definindo a circulação geral da atmosfera (RIBEIRO, 1993). Segundo essa classificação, o Brasil está predominantemente na Zona Tropical, devido a maior parte de sua extensão estar entre os Trópicos.

Segundo o Mapa de Clima do Brasil do IBGE (2002), o município de Bauru está posicionado na Zona Tropical Brasil Central (Figura 2), que é caracterizado como úmido, com apenas três meses secos ao ano, e temperatura subquente (média entre 15° a 18°C em pelo menos um mês ao ano).

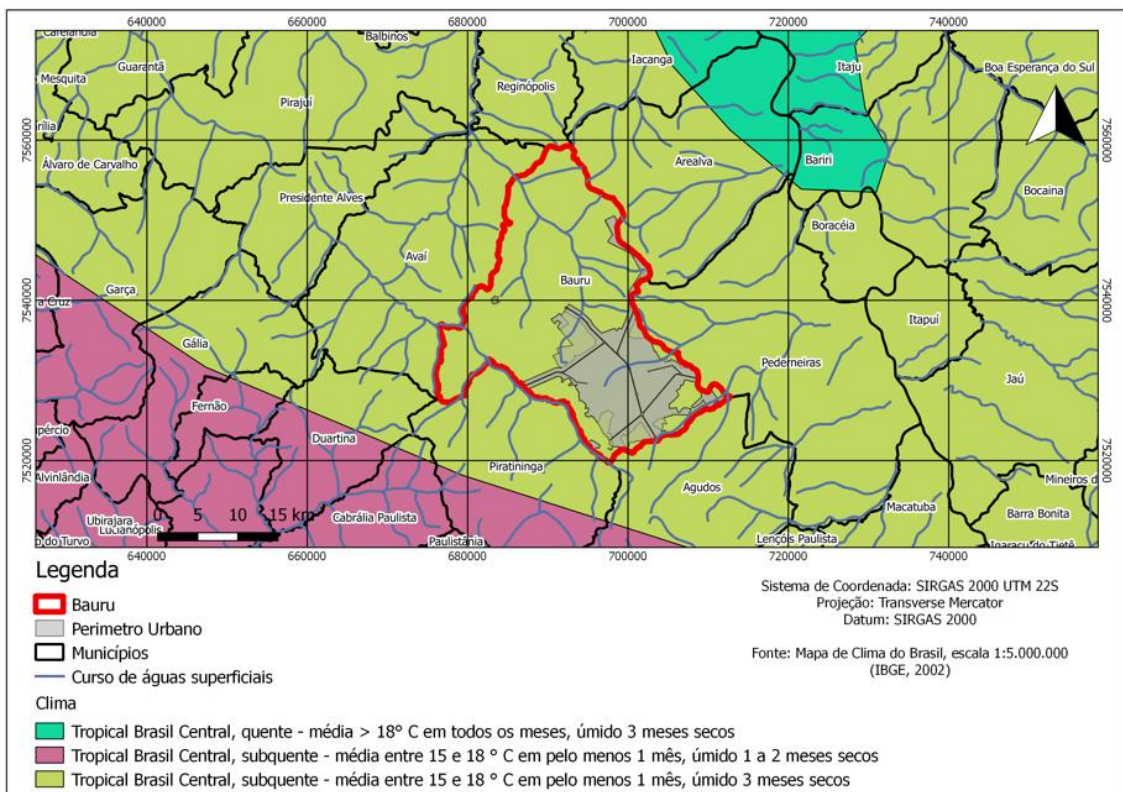


Figura 2 - Clima de Bauru, segundo o Mapa de Clima do Brasil do IBGE (2002).

Segundo a classificação do clima pelo Sistema *Koppen* (SETZER, 1966), o clima do município de Bauru é o *Cwa* (subtropical quente com inverno seco), com temperatura média mais alta no verão (acima de 22° C) e mais baixa no inverno (abaixo de 18° C).

Considerando os dados da estação pluviométrica automática A705 – Bauru (INMETRO, 2021) do ano de 2021, foi elaborado a Figura 3 para avaliar os períodos de chuva e de estiagem e a quantidade pluviométrica mensal. A partir dessa Figura 3 temos que o período de chuva é entre outubro e março, com média de aproximadamente 140 mm, e o período de estiagem entre abril e setembro, com média de aproximadamente 20 mm. Segundo SHS (2008), as chuvas da região são tipicamente tropicais, sendo temporais

violentos de curta duração, que ocorrem no final de tarde e no início da noite, devido ao forte aquecimento durante o dia no verão.

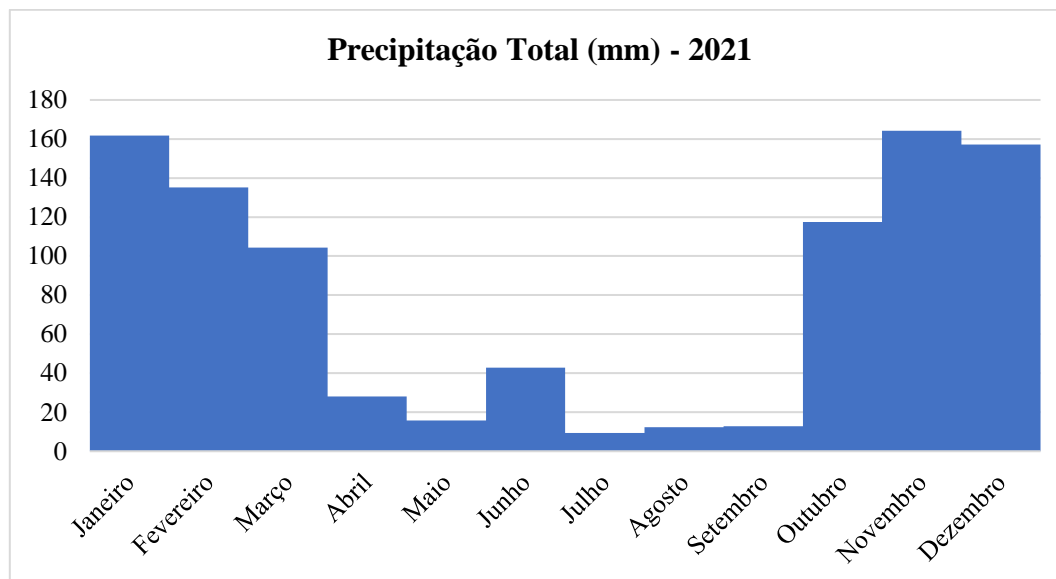


Figura 3 - Precipitação mensal na estação A705 – Bauru, referente ao ano de 2021. Fonte dos dados: INMETRO (2021).

3.3 Geologia e Geomorfologia

A área de estudo está inserida na Bacia do Paraná, porção centro-oeste da Plataforma Sul-Americana, onde ocorreu sedimentação durante o Paleozoico e o Mesozoico (MILANI *et al.*, 2007). No estado de São Paulo, a sequência estratigráfica da Bacia do Paraná, da base para o topo, é composta pelo Grupo Itararé (Carbonífero-Permiano), Formação Tatuí (Permiano), Grupo Passa Dois (Permiano), Formação Piramboia (Triássico), Formação Botucatu (Jurássico), os derrames basálticos da Formação Serra Geral (Cretáceo) e o Grupo Bauru (Cretáceo), que possui as formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília. Acima do Grupo Bauru, estão os depósitos Cenozoicos, que são os sedimentos dos depósitos aluviais e coluviais, produto da desagregação de rochas e solos da região, depositando-se na calha e no terraço dos cursos d'água (SHS, 2008).

No município de Bauru, afloram as formações Adamantina, Marília e os depósitos Cenozoicos (Figura 4). A Formação Adamantina é composta por arenitos argilosos avermelhados, de granulometria fina a média e alguns níveis com seixos espaçados. Segundo Fernandes *et al.* (2000), a Formação Adamantina corresponde a grande parte da Formação Vale do Rio do Peixe, atualmente utilizada pela CPRM (2004) e considerada na Figura 4. A Formação Marília ocorre em partes mais elevadas e é composta por

arenitos desde finos a grossos e, por vezes, conglomeráticos, mal selecionados e com grãos angulosos. Os depósitos Cenozoicos são constituídos por conglomerados sotopostos por areias e argilas (SHS, 2008). Afloram nos vales dos rios Batalha, Bauru, ribeirão da Água Parada e seus afluentes a Formação Adamantina e os depósitos Cenozoicos.

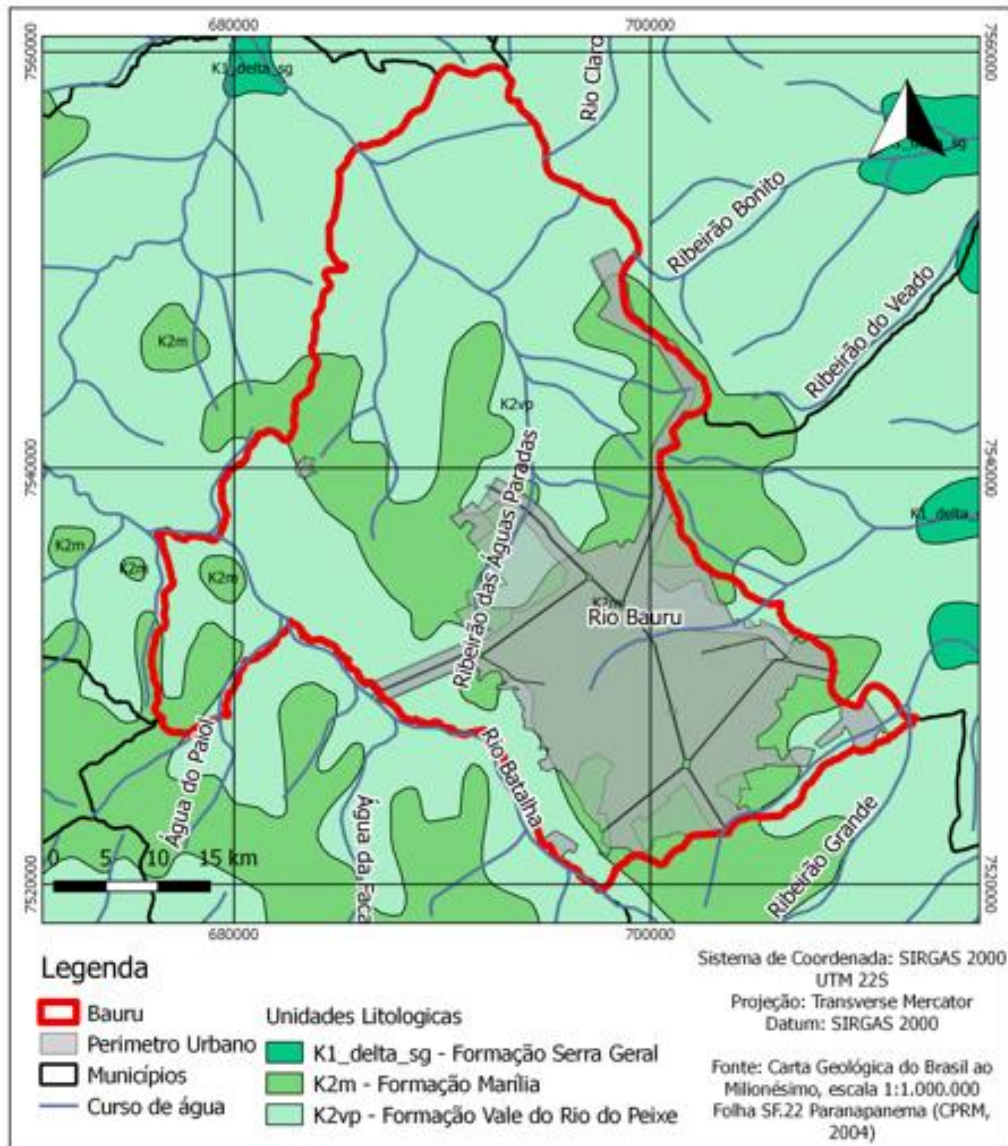


Figura 4 – Mapa Geológico de Bauru.

Em relação a distribuição da geomorfologia do município, segundo a Carta Geomorfológica do IBGE (2018), de escala 1:250.000, há duas Unidades Geomorfológicas, o Planalto Rebaixado do Rio Tietê e as Planícies e Terraços Fluviais (Figura 5). O Planalto Rebaixo do Rio Tietê predomina em toda a extensão do município, pertencendo ao Domínio Morfoestrutural Bacia e Coberturas Sedimentares Fanerozoicas, que está relacionado com formas de relevos nas rochas sedimentares horizontais ou sub-

horizontais. As Planícies e Terraços Fluviais ocorrem associados aos principais rios do município, pertencendo ao Domínio Morfoestrutural Depósitos Sedimentares Quaternários e possui os níveis mais baixos.

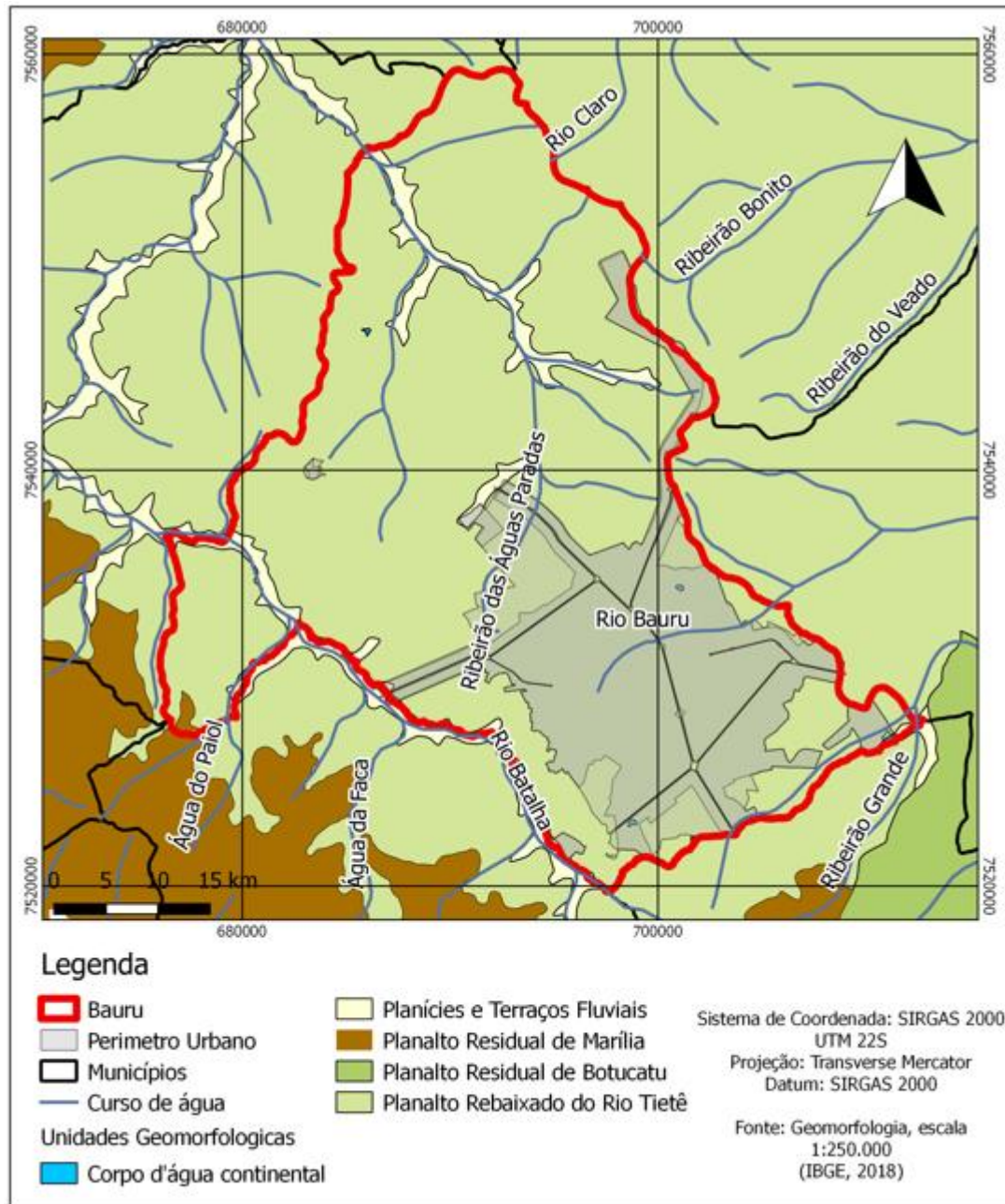


Figura 5 - Mapa Geomorfológico de Bauru.

3.4 Hidrogeologia

O Sistema Aquífero Bauru (SAB), homônimo do Grupo Bauru, é uma unidade hidrogeológica sedimentar com porosidade granular, que possui comportamento de aquífero livre, estando presente em uma extensa área no estado de São Paulo, incluindo o município de Bauru. Segundo SHS (2008), os níveis d'água dessa unidade são rasos e

sua espessura no município varia entre 10 e 190 m. Os rios que atravessam o SAB possuem caráter efluente (SHS, 2008).

Outro sistema aquífero presente é o Serra Geral (SASG), homônimo da Formação Serra Geral. O SASG é constituído por rochas cristalinas fraturadas e sua espessura varia de 100 a 1.200 m em toda sua extensão. Devido à sua baixa transmissividade hidráulica e à grande espessura, o basalto da Formação Serra Geral apresenta-se como uma camada confinante do Aquífero Guarani (SHS, 2008). Abaixo do SASG, encontra-se o Sistema Aquífero Guarani (SAG), abrangido pelas formações Piramboia e Botucatu. O SAG possui porosidade granular e sua espessura varia de 250 a 580 m, em toda a sua extensão. Sobre o SAB, ocorrem os Aquíferos Aluviais, associados aos depósitos Cenozoicos nos rios, que são do tipo aquífero livre e possuem espessuras variadas. A localização superficial dos aquíferos é apresentada na Figura 6.

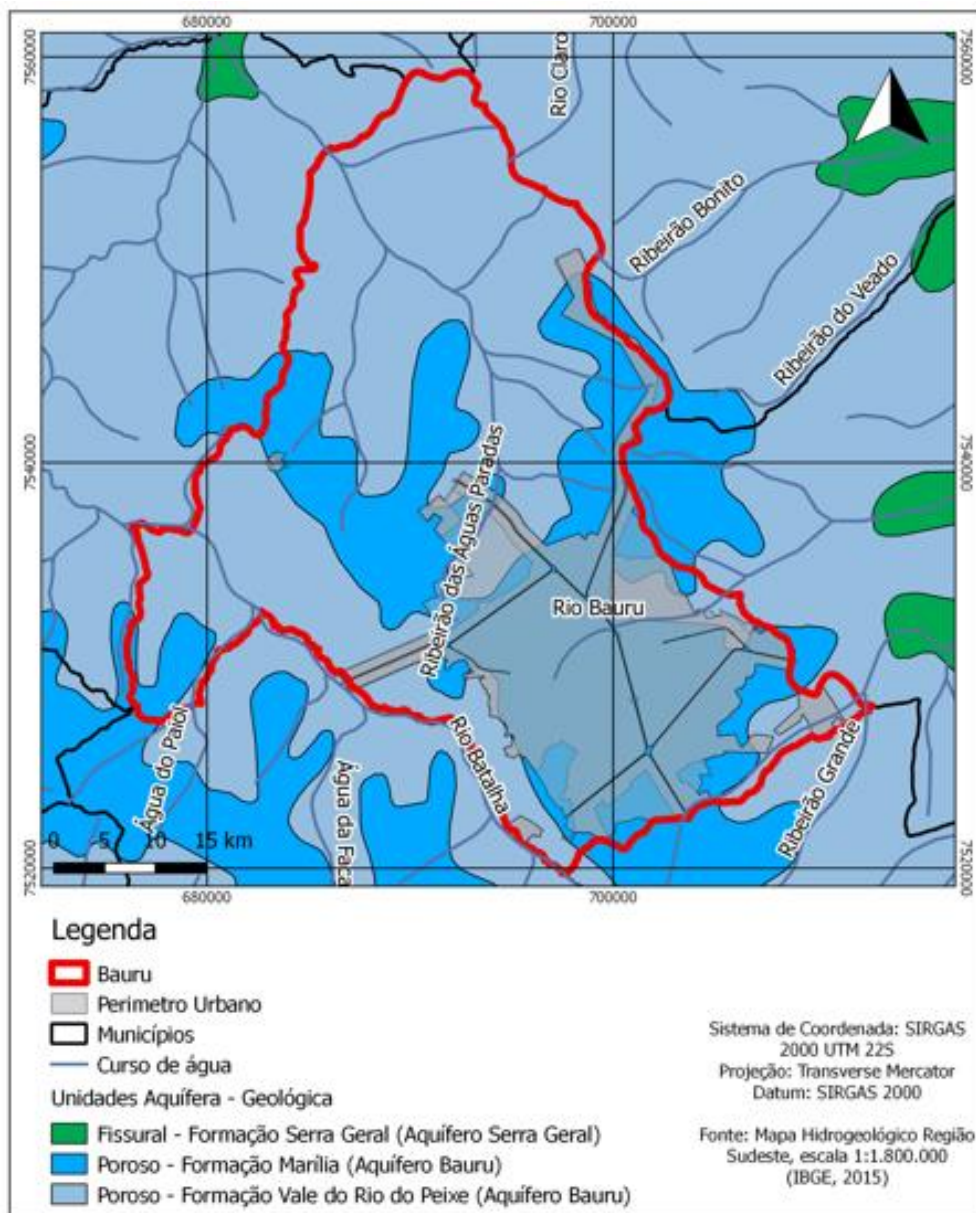


Figura 6 – Mapa Hidrogeológico de Bauru.

3.5 Hidrografia

No município, há duas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), a Bacia Hidrográfica Tietê – Jacaré Leste (UGRHI 13) e a Bacia Hidrográfica Tietê – Batalha Oeste (UGRHI 16), conforme observado na Figura 7. Segundo SHS (2008), a UGRHI 16 corresponde à Bacia Hidrográfica do rio Bauru, que engloba a maior parte da zona urbana do município de Bauru, e a UGRHI 13 corresponde à Bacia Hidrográfica do rio Batalha.

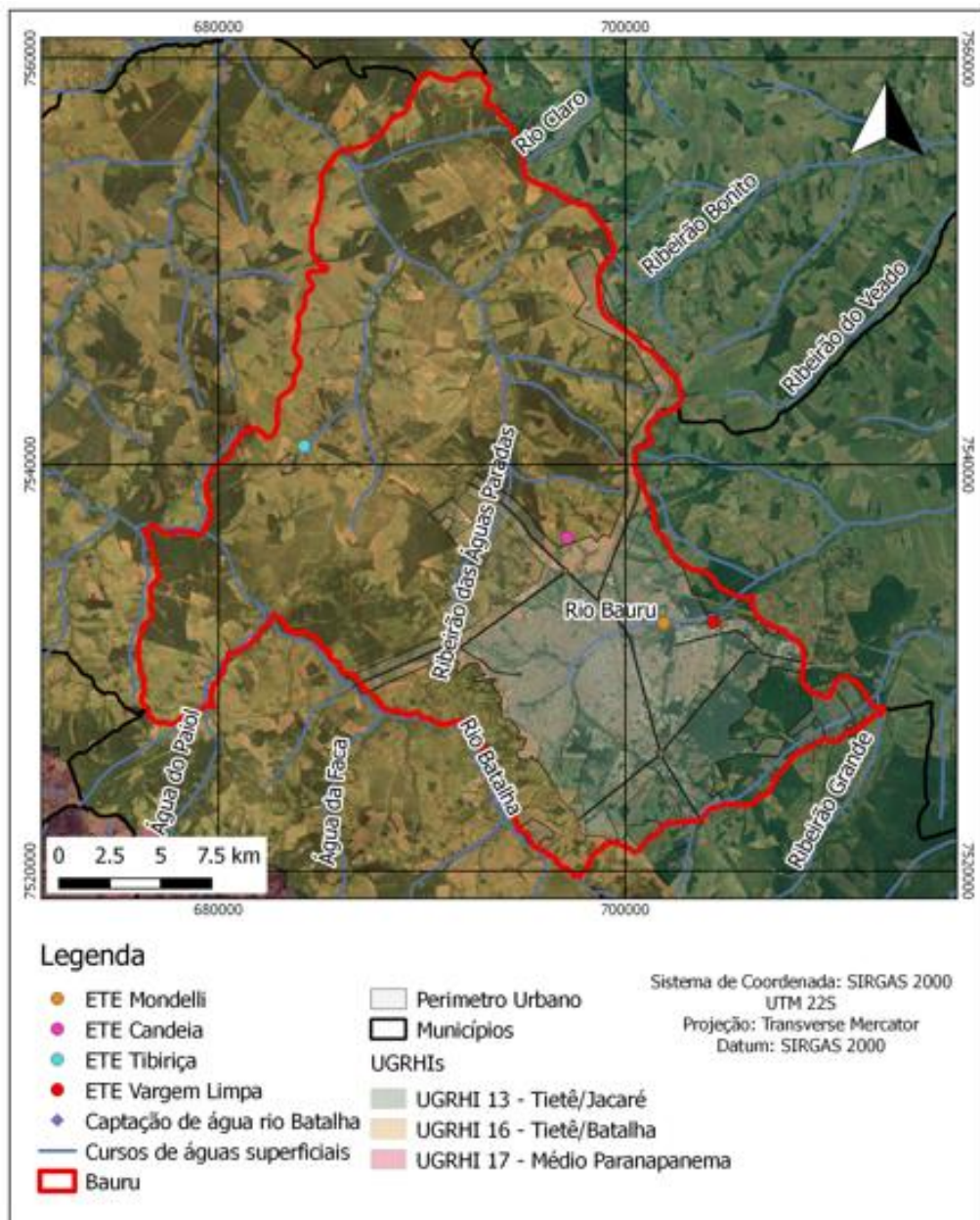


Figura 7 - Mapa das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Bauru, Estações de Tratamento de Esgoto e captação de água para abastecimento da população urbana. Fonte: CETESB (2022a e 2022b) e SNIS (2022).

Os principais rios e ribeirões que estão no município são o rio Bauru, o rio Batalha e o ribeirão da Água Parada (Figura 7), e além desses há afluentes menores. Segundo CETESB (2022a e 2022b), o rio Batalha e o ribeirão da Água Parada se enquadram como corpos hídricos de classe 2, e o rio Bauru como classe 4, de acordo com a resolução CONAMA N° 357 de 2005 e com o Decreto N° 10.755 de 1997.

O relatório da SHS (2008) apresenta a vazão mínima com um tempo de recorrência de 10 anos e duração de 7 dias ($Q_{7,10}$) para o rio Bauru, rio Batalha e o ribeirão da Água Parada. No rio Bauru estimaram o $Q_{7,10}$ em apenas um ponto, no limite do município,

sendo a vazão mínimo obtida de 0,381 m³/s. No rio Batalha as vazões mínimas estimada foram em sete pontos do curso do rio, sendo $Q_{7,10}$ médio = 0,599 m³/s, $Q_{7,10}$ máximo = 1,366 m³/s (a montante do ponto de captação da água) e $Q_{7,10}$ mínimo = 0,131 m³/s (a jusante do ponto de captação da água). No ribeirão da Água Parada as vazões foram estimadas em seis pontos, sendo $Q_{7,10}$ médio = 0,470 m³/s, $Q_{7,10}$ máximo = 1,169 m³/s (a jusante, no limite do município) e $Q_{7,10}$ mínimo = 0,078 m³/s (a montante).

Os três corpos d'água são canais do tipo meandrante, caracterizado como um único canal, com vegetação de mata ciliar e o transbordamento da água no período de cheia. Devido ao regime de fluxo há distinção da margem de erosão e da margem de deposição (GUERRA & CUNHA, 1995). Nas curvas, as seções transversais são assimétricas, sendo a margem externa mais funda e onde predomina erosão, devido ao regime de fluxo ser mais forte. Nas referências bibliográficas consultadas não constam informações sobre os sedimentos fluviais dos principais corpos d'água do município.

3.6 Abastecimento de Água e Coleta e Tratamento de Esgoto

Segundo o SHS (2008), o abastecimento de água do município é feito por captação de água superficial do rio Batalha (48%), passando pela Estação de Tratamento de Água (ETA), e de poços profundos públicos e privados (52%), que captam água do Sistema Aquífero Guarani (SAG), segundo AMPLA (2016a). A ETA Bauru tem uma vazão média de 500 l/s e utiliza o sistema de tratamento convencional, com coagulação, floculação, decantação, filtração e aplicação de cloro e flúor (AMPLA, 2016a). Já a água captada pelos poços passa por um tratamento simplificado com adição hipoclorito de sódio e ácido fluossilícico.

A maior parte do esgoto produzido no município é lançado, sem tratamento, no rio Bauru. Entretanto, no município há 3 Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), apresentadas na Figura 7, sendo: ETE Candeia (capacidade de 5184 m³/dia), ETE Mondelli (unidade privada) e a ETE Tibiriça (capacidade de 864 m³/dia). Além dessas, há a ETE Vargem Limpa em fase de construção, sendo planejada próxima ao ponto de despejo de esgoto no rio Bauru (AMPLA, 2016b). As ETEs Candeia e Tibiriça estão localizadas respectivamente no córrego do Pau d'Alho e córrego Barra Grande, ambos afluentes do ribeirão da Água Parada, e tem pequena capacidade de tratamento, insuficiente para o município, tratando apenas 9,91% do esgoto coletado em 2020, segundo SNIS (2022).

3.7 Qualidade das Águas e Saneamento

Como o objetivo do projeto é selecionar áreas com potencial para a instalação do sistema Filtração de Margem de Rio (FMR), faz-se necessário avaliar a qualidade da água desses corpos d'águas superficiais e dos aquíferos aluviais relacionados.

Considerando os corpos d'água de maior dimensão do município de Bauru, rio Bauru, rio Batalha e ribeirão da Água Parada, buscou-se informações do Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE) sobre a qualidade das águas. Dentre os dados públicos disponibilizados pela DAE, há o Plano Municipal Saneamento Básico, que entre as informações apresentadas estão os dados do Sistema de Abastecimento de Água (AMPLA, 2016a) e do Sistema de Esgotamento Sanitário (AMPLA, 2016b).

O relatório da AMPLA (2016b) apresentou os resultados de coletas de água de 2015 dos corpos superficiais que recebem a água após o tratamento nas ETEs municipais, e comparou com os valores da CONAMA n° 357/2005 para a classe 2. No córrego Pau d'Alho os parâmetros cor, demanda biológica de oxigênio (DBO), nitrogênio amoniacal, fósforo total e coliformes fecais apresentaram concentrações acima da legislação. No córrego Barra Grande, cor, DBO, oxigênio dissolvido (OD), fósforo total e coliformes fecais apresentaram-se acima da legislação.

O relatório da Hirosan (2014) também apresentou resultados analíticos da coleta do dia 10/06/2013 no rio Batalha e no ribeirão da Água Parada. No ribeirão da Água Parada, os parâmetros coliformes termotolerantes, manganês total, ferro dissolvido e DBO apresentaram valores acima da CONAMA n° 357/2005, para a classe 2. No rio Batalha, os parâmetros coliformes termotolerantes e ferro dissolvido estavam acima da legislação.

O relatório Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo de 2020, da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), apontou que há apenas um ponto de monitoramento dentro do município de Bauru e outro ponto a jusante do município, ambos no rio Batalha (Tabela 1). O rio Bauru e o ribeirão da Água Parada não apresentam ponto de monitoramento nos seus cursos, apenas em outros corpos superficiais, pontos a jusante de Bauru.

Tabela 1 - Pontos de monitoramento da Qualidade das Águas Interiores da CETESB nos cursos de água de Bauru.

URGHI	Ponto	Curso D'Água	Cidade
UGRHI 16 – Tietê/ Batalha	BATA 02050 BATA 02300	Rio Batalha Rio Batalha	Bauru Avaí

Fonte: CETESB (2020).

Os pontos BATA 02050 e BATA 02300 apresentaram violações da Classe 2 para turbidez, cor verdadeira, ferro dissolvido, alumínio dissolvido, Escherichia coli e OD, esse apenas no BATA 02050, entre 2015 e 2019 (CETESB, 2020). O relatório também apresenta o Índice de Qualidade das Águas (IQA), que considera o cálculo ponderado de nove parâmetros (coliformes fecais, DBO, pH, nitrogênio total, fósforo total, temperatura, turbidez, resíduo total, OD) da qualidade da água para abastecimento público, e o Índice do Estado Trófico (IET), que classifica o grau de trofia do corpo d'água. O BATA 02050 possui IQA bom na rede básica e regular na captação e IET mesotrófico e supereutrófico. O BATA 02300 possui IQA bom na rede básica e IET oligotrófico e mesotrófico.

Em relação a água subterrânea, não há dados de poços próximos aos corpos superficiais (aquífero aluvial). Alguns dos poços mais distantes dos corpos de água superficial têm dados analíticos da água subterrânea disponíveis para o Projeto SACRE (IC, 2015; IG, 2013; PSAG, 2008; SILVA, 2009). Comparado esses dados com os valores de referência das legislações (CETESB, 2021; MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021; CONAMA, 2009), sabe-se que nos poços próximos ao ribeirão da Água Parada há apenas violação de cádmio (resultados de março de 2015) para a Portaria de Potabilidade nº888/2021. Não há dados para o rio Batalha e próximo ao rio Bauru as concentrações de bário (resultados de fevereiro e abril de 2008), cádmio (resultados de fevereiro e março de 2015), nitrato (resultados de abril de 2008, de junho e dezembro de 2011, de fevereiro de 2015), cromo e níquel (resultados de fevereiro de 2015) estão acima da potabilidade.

4 FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Soluções para os problemas da crise hídrica podem estar relacionadas à gestão dos recursos hídricos e à implementação de técnicas eficientes e de baixo custo, que possibilitem uma maior disponibilidade hídrica para as populações. Uma das técnicas que se enquadram como soluções é a Filtração em Margem de Rio (FMR), que será tratada nesse Trabalho de Formatura (TF). Para a aplicação dessa técnica, é importante entender

suas limitações e as condições necessárias para sua implementação. A seleção de áreas para instalação da FMR pode utilizar interpretações de fotografias aéreas, imagens de satélite e drone e de dados geofísicos. A seguir serão apresentados conceitos teóricos e aplicações do sistema de FMR, de interpretações de fotografias aéreas e de levantamentos geofísicos de eletrorresistividade.

4.1 Filtração em Margem de Rio

Filtração em Margem de Rio (FMR), conhecida em inglês como *River Bank Filtration* (RBF), é uma técnica que utiliza poços produtores, instalados nas margens de corpos superficiais, para bombear água subterrânea e provocar um rebaixamento do nível d'água, diminuindo assim a carga hidráulica ao redor do poço. A partir desse rebaixamento, as diferenças das cargas hidráulicas farão com que a água do corpo superficial infiltre através de seu leito e seja conduzida no sentido do poço produtor. O bombeamento dessa mistura de águas possibilita que durante a infiltração da água superficial no aquífero haja uma redução e diluição das concentrações de parâmetros físicos, químicos e biológicos e, conseqüentemente, uma melhora na qualidade da água. Segundo Ray *et al.* (2002), a atenuação dos contaminantes na água captada pela FMR relaciona-se aos mecanismos de filtragem física, degradação microbiana, troca iônica, precipitação, sorção e diluição. Esses processos ocorrem principalmente em duas zonas: uma nos primeiros decímetros de profundidade de infiltração, na interface rio-aquífero, onde ocorrem as reações biológicas; e a outra na região do aquífero até o poço produtor (Figura 8).

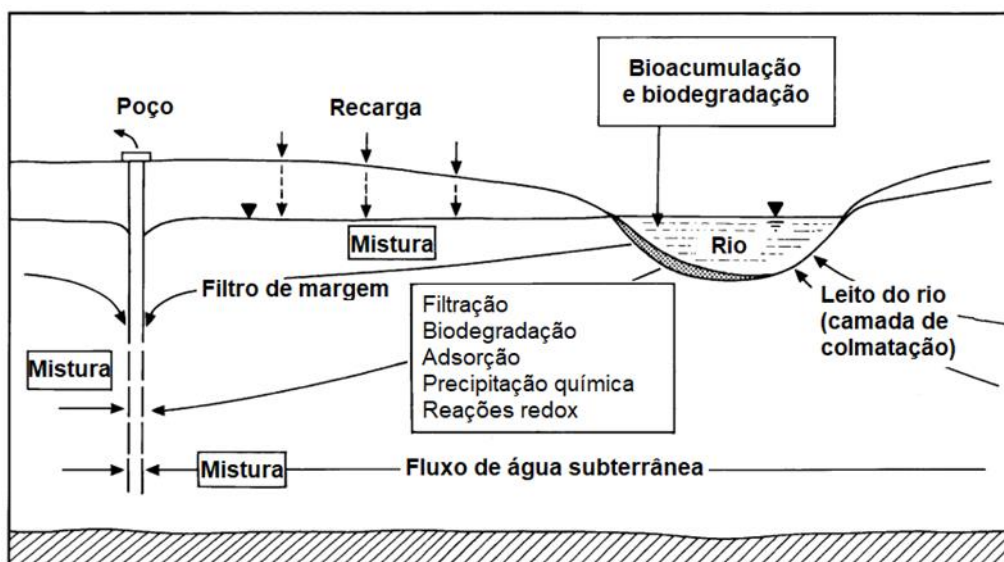


Figura 8 - Esquema do sistema de Filtração em Margem de Rio e os processos associados em cada etapa. Traduzido de Hiscock & Grischek, 2002.

A utilização de poços de monitoramento instalados entre o rio e o poço produtor do sistema permite uma avaliação química da água do rio ao longo do seu fluxo subterrâneo, considerando os processos hidrogeoquímicos que ocorrem dentro do aquífero.

A quantidade de água do rio que infiltra no aquífero depende de alguns fatores, como a distância entre o rio e o poço produtor, a vazão de bombeamento, a variação do nível d'água no rio e as características hidráulicas do aquífero. Segundo Gunkel & Hoffmann (2009), mediante as condições da zona hiporréica, esta região pode atuar como uma barreira física e diminuir a taxa de infiltração, sendo que essa obstrução pode ser causada pela deposição de sedimentos finos, que é a colmatção física; pelo aprisionamento de gases, colmatção mecânica; por reações que ocorrem com mudanças do pH, da temperatura e do potencial redox, colmatção químicos; e devido a presença de organismos, colmatção biológicos (SOARES, 2015).

4.1.1 Critérios para a instalação do sistema de filtração em margem de rio

Para a implantação do sistema de Filtração em Margem de Rio (FMR), aplicam-se alguns critérios, sendo o principal, a existência de um aquífero de materiais inconsolidados próximo a corpos d'águas superficiais. Grischek & Ray (2009) e Romerol-Equivel *et al.* (2016) definiram algumas condições necessárias para a implementação do sistema, relacionando hidrogeologia, hidrologia, composição do fundo dos corpos d'águas superficiais, temperatura das águas e tempo de viagem da água infiltrada até o poço produtor.

Em relação à hidrogeologia dos aquíferos, Grischek & Ray (2009) apontam a necessidade do aquífero ser aluvial, formado por areia e cascalho, sendo, segundo Romerol-Equivel *et al.* (2016), preferencialmente com espessura maior que 10 m e uma condutividade hidráulica entre 10^{-2} e 10^{-4} m/s. Aquíferos influentes apresentam velocidades mais rápidas para tratamento da água, isso porque a zona hiporréica já possui as condições para isso.

Para avaliar as condições de hidrologia, deve-se considerar a dinâmica e o volume de escoamento, a morfologia do canal do rio, o transporte de sólidos e a interação entre o rio e a água subterrânea local (ROMEROL-EQUIVEL *et al.*, 2016). Complementarmente, são consideradas as declividades do leito do rio e a velocidade da água, sendo que geralmente a FMR é aplicada para regiões dos rios com declividade intermediária, em alguns sistemas dos Estados Unidos e da Alemanha a declividade varia entre 20 e 80 cm/km. A velocidade da água, assim como a área da seção transversal (largura e profundidade) do canal e a concentração de sedimentos, relaciona-se com o volume de escoamento.

A declividade e velocidade dos rios podem ter relação com os processos de deposição e erosão que ocorrem no leito do rio. Além desses, a morfologia do canal pode favorecer esse processo, sendo geralmente na parte interna das curvas do rio onde ocorre tanto a deposição quanto a erosão dos sedimentos (GRISCHEK & RAY, 2009).

A infiltração no leito do rio é maior quando a composição do leito é composta por materiais com granulometrias maiores; no entanto, nessas condições o processo de colmatação pode ser mais presente, razão pela qual regiões com misturas de sedimentos são recomendadas (ROMEROL-EQUIVEL *et al.*, 2016).

A temperatura interfere principalmente nos processos de tratamento da água, sendo que com o aumento da temperatura a biodegradação de compostos orgânicos é favorecida, ao passo que a concentração de oxigênio diminui, o que pode levar a um ambiente anóxico e à dissolução de alguns elementos, como ferro e arsênio, necessitando-se posteriormente de um outro tratamento. O equilíbrio entre as temperaturas das águas superficiais e subterrâneas evita a formação de gases e a precipitação de carbonato de cálcio, que poderiam levar à colmatação mecânica e química do leito do rio (ROMEROL-EQUIVEL *et al.*, 2016). A qualidade da água dos rios pode ser considerada para avaliar a efetividade do tratamento do FMR, conforme apresentado por Grischek & Ray (2009), sendo possível

observar de forma clara os resultados nas águas de qualidade inferior, pois as águas que possuem concentrações dentro dos valores de referência requerem menos processos de tratamento.

Outro critério a ser considerado é o tempo de viagem, que dependendo do tempo pode remover compostos orgânicos e biológicos. Segundo Emmendoerfer *et al.* (2021a), vinte cinco dias são necessários para tratar 80% da água e em alguns países Europeus o tempo mínimo de 50 dias.

4.1.2 Configuração do sistema e tipos de poços

A calha e o vale de rios podem apresentar profundidades, larguras e espessuras dos sedimentos do leito variadas, além de composições de leito do rio e aquíferos aluviais de diferentes materiais (granulometria, seleção dos grãos e mineralogia), segundo Grischek *et al.* (2002). Essas características podem influenciar na escolha do melhor tipo de poço e configuração para o sistema de Filtração em Margem de Rio (FMR).

Em relação aos tipos de poços, os poços horizontais (Figura 9A) possuem uma seção filtrante também na horizontal. Nos poços verticais (Figura 9B) as seções filtrantes estão verticais. Ambos os poços são instalados nas margens dos corpos superficiais.

O sistema de FMR pode ser instalado em dois tipos de configuração, sob o leito do rio (Figura 9C), do tipo horizontal e transversais ao rio, sendo geralmente utilizados em locais que permitam uma alta taxa de captação de água (GRISCHEK *et al.*, 2002), ou ao longo do leito do rio (Figura 9D), do tipo vertical (GRISCHEK *et al.*, 2002). O poço produtor pode ser instalado individualmente ou quando o sistema do FMR é instalado ao longo do leito do rio, os poços podem ser agrupados em galerias ou em grupos (Figura 10).

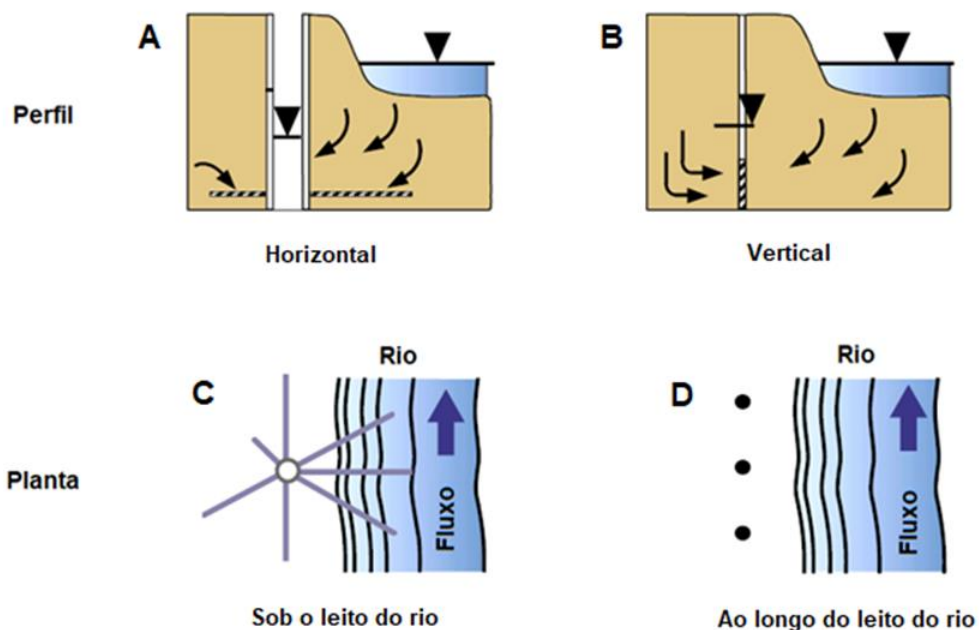


Figura 9 - Configurações e tipos de poços de Filtração em Margem de Rio que podem ser instalados. (A) Vista em perfil do tipo de poço horizontal. (B) Vista em perfil do tipo de poço vertical. (C) Vista em planta da configuração sob o leito do rio. (D) Vista em planta da configuração ao longo do leito do rio. Modificado de Ray *et al.* (2002).

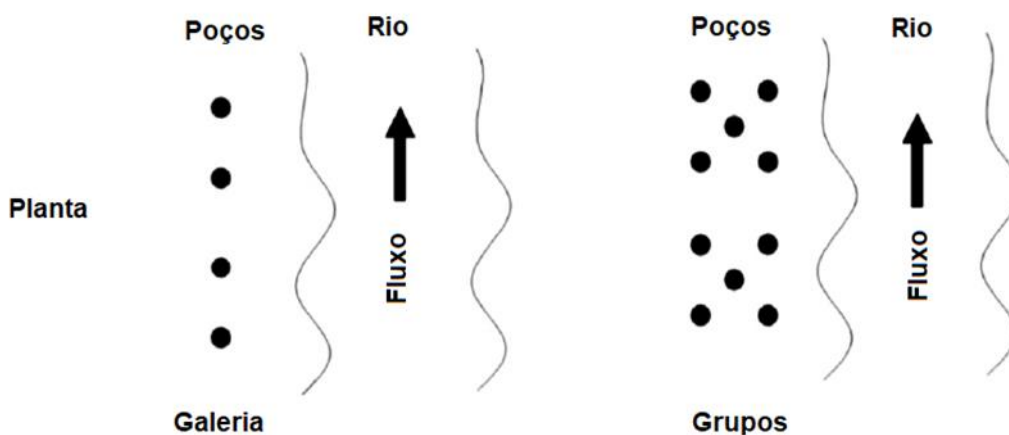


Figura 10 - Configuração vista em planta dos poços ao longo do leito do rio, agrupados em galerias (lado esquerdo) ou em grupos (lado direito). Modificado de Hu *et al.* (2016).

Avaliando essas características, Hunt *et al.* (2002) estabeleceram que em menores espessuras de sedimentos de leito, a configuração sob o leito do rio é mais indicada, pois as seções filtrantes podem ser colocadas no nível mais profundo e se estenderem abaixo do leito do rio, aumentando assim a captação de água. Porém, com o aumento da taxa de infiltração há o risco de colmatção do leito e o processo de mistura das águas e redução das concentrações podem ser perdidos. De modo geral, a capacidade produtiva do sistema

sob o leito do rio é maior, se comparada com a configuração ao longo do rio, (GRISCHEK *et al.*, 2002).

4.2 Interpretação de Fotografias Aéreas para Identificação de Bancos de Sedimentos

A fotointerpretação busca categorizar objetos nas fotografias aéreas ou imagens de satélites a partir da observação e do desenvolvimento de um raciocínio lógico (PANIZZA & FONCESA, 2011). O processo de fotointerpretação passa por três etapas, sendo: identificação, representada por uma simples leitura da foto; determinação, na qual desenvolve-se o processo mental dedutivo ou indutivo; e interpretação, com a correlação entre os elementos da foto e a hipótese interpretativa.

Panizza & Foncesa (2011) apresentaram critérios para a identificação de um objeto, como geometria, tamanho, tonalidade, localização do objeto na paisagem, textura (aspecto superficial) e estrutura (organização dos elementos texturais na foto).

4.3 Técnicas Geofísicas de Eletrorresistividade

A geofísica permite a investigação da subsuperfície por métodos indiretos, através dos contrastes das propriedades físicas, sendo que cada método utiliza propriedades físicas diferentes. Os métodos geoeletricos analisam as respostas do substrato a um campo elétrico, natural ou artificial, através da quantificação da resistividade elétrica ou da condutividade elétrica, pois os materiais geológicos possuem resistividades elétricas diferentes, que dependem de fatores como porosidade, mineralogia, tamanho e forma das partículas sólidas, grau de saturação e as características do fluido que preenche os vazios (GALLAS, 2000; SARAIVA, 2010).

No método da eletrorresistividade, emite-se no solo uma corrente elétrica (I) contínua ou de frequência baixa, de fonte artificial, e esse estímulo é medido por eletrodos próximos. A informação obtida nos eletrodos de potencial é a diferença de potencial (ΔV) e junto com o fator geométrico (K), pode-se obter a resistividade aparente (ρ), utilizando a fórmula a seguir (TELFORD *et al.*, 1990):

$$\rho = K \times (\Delta V) / I$$

Os dados podem ser levantados verticalmente, por Sondagem Elétrica Vertical (SEV), avaliando a distribuição vertical da resistividade em um ponto de interesse, ou horizontalmente, por Caminhamento Elétrico (CE), avaliando variações laterais de

resistividade. Para ambos os levantamentos, SEV ou CE, o arranjo e a distância entre os eletrodos interferem na profundidade e na qualidade dos dados obtidos, sendo que eletrodos separados por uma distância menor tendem a ter resultados mais detalhados e mais rasos. Essas metodologias podem ser aplicadas em diferentes áreas e, na hidrogeologia, é usada para a caracterização de aquíferos e de depósitos de areias e cascalhos, para a delimitação das unidades litológicas, assim como suas profundidades e espessuras, e de plumas de contaminação (GANDOLFO, 2007; GALLAS, 2000).

Existem diferentes arranjos que podem ser utilizados para o levantamento dos dados, dentre eles, estão o arranjo *Schlumberger*, utilizado para a SEV, e o arranjo dipolo-dipolo, utilizado para o CE. O arranjo *Schlumberger* (Figura 11) possui configuração com dois eletrodos de corrente, denominados A e B, e dois eletrodos de potencial, denominados M e N, dispostos em linha. A medida é feita no ponto central (O), sendo esse ponto fixo, e a distância entre MN é mantida até o sinal ficar fraco, quando isso ocorre a distância de abertura de MN aumenta (procedimento chamado de embreagem), sempre seguindo relação de $AB/MN \geq 5$. Os eletrodos A e B são deslocados, aumentando a abertura entre eles, e conforme isso ocorre aumenta a profundidade de investigação, normalmente atingindo entre $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{10}$ da distância de AB, dependendo das características da litologia (SARAIVA, 2010). A distância de abertura entre os eletrodos A e B é a distância L que aumenta conforme as medidas ocorrem (L', L'', etc.).

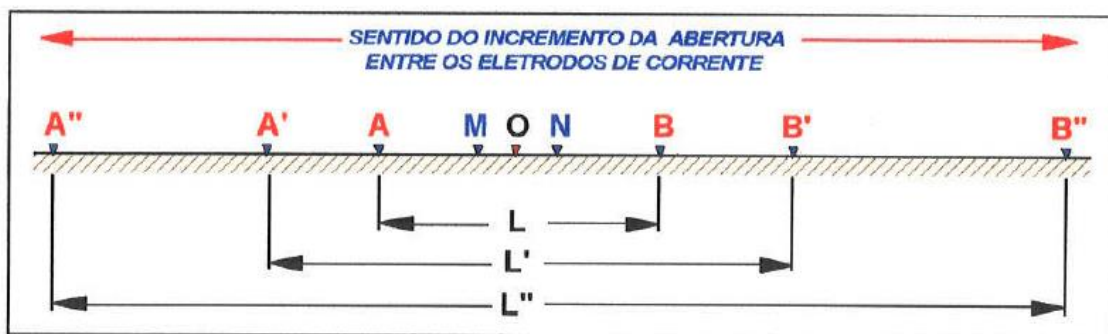


Figura 11 - Arranjo Schlumberger em superfície. Modificado de: Gallas (2000).

Os dados da SEV são representados por uma curva de acordo com a distância dos eletrodos, sendo os dados processados em softwares de inversão, por exemplo o *IPI2win*.

O arranjo dipolo-dipolo também possui sua configuração (Figura 12) com dois eletrodos de corrente (A e B) e dois eletrodos de potencial (M e N), ambos dispostos em linha. Os eletrodos AB e MN são separados por uma distância l_1 e l_2 , respectivamente, sendo usualmente $l_1=l_2$ (SARAIVA, 2010). A distância L, nesse caso, é a abertura entre

os centros dos pares de eletrodos, Ω entre A e B e O entre M e N, e o ponto de medida é no meio de L, sendo que à medida que L aumenta, a profundidade de investigação também aumenta.

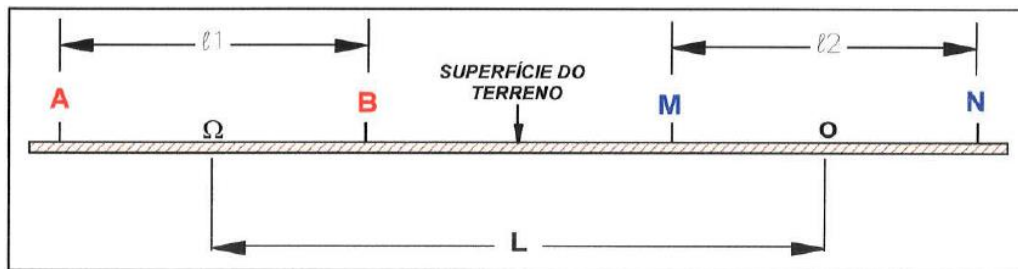


Figura 12 - Arranjo dipolo-dipolo em superfície. Modificado de: Gallas (2000).

Para se obter diferentes medidas e em profundidades diferentes, o procedimento utilizado inicialmente fixa os eletrodos de corrente (AB) e move os eletrodos de potencial (MN) ao longo de uma linha; depois os eletrodos de corrente são deslocados também ao longo da linha, e repetem-se as medições movendo-se os eletrodos de potencial.

Preliminarmente as medidas de resistividade são apresentadas e interpoladas (contornos de isovalores) sob a forma de pseudo-seções (segundo HALLOF, 1957). No entanto, as formas dos contornos dependem das distribuições de resistividades medidas e da geometria da configuração de eletrodos empregada, ou seja, corpos de formas geométricas iguais apresentam pseudo-seções completamente diferentes dependendo do arranjo empregado. A partir dessas medidas são gerados perfis de pseudo-seções e seções modeladas, utilizando softwares como por exemplo o *Res2dinv* e o *Surfer 8*, com diferentes níveis de profundidade, conforme esquematizado na Figura 13. Para obter-se uma seção de resistividade mais precisa, aplicam-se processos de inversão (modelagem) nos dados e esses processos buscam estabelecer um modelo da provável distribuição real dos valores de resistividade em subsuperfície, que em tese, conduzem a uma aproximação razoável do modelo da geologia local.

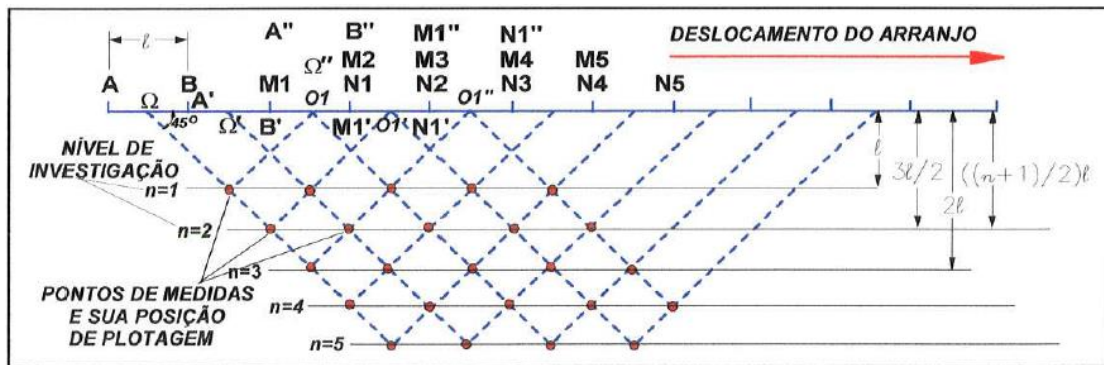


Figura 13 - Representação de um perfil de pseudo-seção gerado em um arranjo dipolo-dipolo. Modificado de Gallas (2000).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Levantamento Bibliográfico

O levantamento bibliográfico foi desenvolvido a partir de artigos científicos, trabalhos acadêmicos e livros de referência, buscando-se informações e dados sobre: características hidrogeológicas, hidrológicas, geológicas e estratigráficas, climáticas, geomorfológicas; avaliação da qualidade da água superficial e subterrânea; e aplicações do sistema de Filtração em Margem de Rio (FMR).

5.2 Identificação de Bancos de Sedimentos a partir da Interpretação de Fotografias Aéreas e Imagens de Satélite e Drone

Nas imagens de satélites e fotografias aéreas, foram observados os cursos de águas superficiais e suas margens, procurando-se áreas em que a cor da margem aparenta ser diferente do entorno (geralmente mais amarelada, cinza ou marrom esverdeado), feições de declívio do relevo e presença de barras de sedimento ao longo do rio. Inicialmente, na identificação dos bancos de sedimentos utilizaram-se imagens de satélites do *Google Earth*, selecionando-se áreas preliminares. Após a seleção, foram empregadas fotografias aéreas disponibilizadas publicamente ou adquiridas pelo Instituto de Pesquisas Ambientais (IPA), que as compartilhou com o Projeto. Dentre as fotografias aéreas consideradas para a interpretação estão:

- Ortofotomosaicos, produtos do levantamento aerofotogramétrico dos anos 2010 e 2011 do Projeto Mapeia São Paulo, com resolução aproximada de 1 m e escala 1:25.000;

- Fotografias aéreas, produtos de levantamento aerofotogramétrico dos anos 1962 do Consórcio Natividade-Vasp-Cruzeiro-Aerofoto em escala 1:25.000.

Após a seleção de potenciais áreas com bancos de sedimentos, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que é uma das instituições públicas que fazem parte do Projeto SACRE, realizou um levantamento aéreo por drone e disponibilizou as imagens ao projeto. Considerando que essas são as imagens mais recentes do rio, elas foram utilizadas para a validação dos bancos de sedimentos previamente selecionados pelas outras fotografias aéreas e para estimar o tamanho dos bancos de sedimentos, junto com as imagens do *Google Earth*.

5.3 Levantamento de Dados Preliminares em Campo

Com as áreas previamente selecionadas, foi realizada uma atividade de campo no município de Bauru, do dia 06 ao 09 de junho de 2022, onde buscava-se avaliar, nas áreas selecionadas: o acesso, tanto para a visita ao banco de sedimento quanto para a entrada de maquinário de perfuração de poço; as condições do entorno; as características texturais, estruturais e mineralogia dos bancos de sedimentos; e se possível, estimativas das velocidades das águas superficiais.

Durante as atividades, foi utilizado aplicativo para a plotagem dos pontos nas áreas visitadas (*Avenza Maps*). Além disso, foi realizada uma avaliação tátil-visual da granulometria dos sedimentos dos bancos visitados. A velocidade das águas superficiais foi estimada a partir do tempo em que um objeto (folhas ou plásticos presentes no local) demorava para se deslocar por uma distância pré-definida, sendo esse tempo medido por um cronômetro. Em campo também foram estimadas as profundidades e as larguras dos corpos superficiais e as dimensões (largura, comprimento e quando possível espessura) dos bancos de sedimentos, utilizando uma trena de fita ou, quando não foi possível medir com a trena, uma estimativa visual. A descrição tátil-visual considerou o material superficial e os obtidos pelo trado manual holandês.

5.4 Levantamento Geofísico

A etapa de levantamento geofísico utilizou as técnicas de caminhamento elétrico (CE) e de sondagem elétrica vertical (SEV). O CE gerou dois perfis de aproximadamente 115 m de extensão utilizando o arranjo dipolo-dipolo com uma distância entre os

eletrodos e o deslocamento de 5m, e foram realizados 6 e 8 níveis de investigação. Os equipamentos utilizados foram o ABEM Terrameter SAS 300B, com uso de cabo multieletrodos com caixa de comutação externa, e o Syscal Pro 48 Switch. Nos dados do CE o processo de inversão foi aplicado usando-se o software *Res2dinv* e as seções modeladas são resultantes de um processo automático de inversão em duas dimensões (2D).

Com a técnica da SEV foram realizadas duas sondagens, para complementar as informações de CE realizada no ponto, sendo considerada uma distância linear de 120 m; o arranjo *Schlumberger*; uma distância inicial de MN/2 (distância entre eletrodos e ponto medido) de 0,5 m e a partir de 20 m MN/2 passou a ser de 2 m (para realização da embreagem); e uma distância AB inicial de 1,5 m e aumentando até 60 m. O equipamento utilizado foi o ABEM SAS 300B. Ambos os equipamentos foram disponibilizados pelo CEPAS|USP e operados por sua equipe técnica.

As SEVs foram interpretadas segundo processos automáticos de inversão onde, a partir dos dados de resistividades e das aberturas AB usadas nos levantamentos, se estabelece um modelo geoeletrico para cada SEV e pode-se correlacioná-lo com a realidade geológica da área estudada. O software empregado para a inversão foi o *IPI2win – Resistivity Sounding Interpretation* (da *Moscow State University*) que efetua uma inversão (modelagem) em uma dimensão (1D).

5.5 Dados de Granulometria do Leito do Corpo D'Água Superficial

Foram coletadas amostras das margens e do centro, considerando suas possíveis variações verticais, nos dias 11 e 12 de novembro de 2022. Para a coleta de sedimento do leito do rio utilizaram-se canos de PVC de diâmetros 2” ou 3” e comprimento de 50 cm a 70 cm; caps com borracha para vedação; trado manual do tipo holandês. Para as amostras nos tubos de PVC, eles foram inseridos nos sedimentos e um cap foi colocado na parte superior do tubo, fazendo a vedação; depois ambos foram retirados do sedimento e outro cap colocado na parte inferior. Quando não foi possível coletar sedimentos dessa forma, realizou-se uma amostragem apenas da porção superficial do sedimento com o trado manual holandês e a amostra condicionada em sacos plásticos.

A análise granulométrica foi realizada no Laboratório de Sedimentologia do Instituto de Geociências (IGc) pelo método de granulometria por difração à laser e utilizando o equipamento *Hydro 2000MU* da *Malvern*. Antes da análise granulométrica,

as amostras foram secadas em estufa a 70°C, de um dia para outro; peneirada em uma malha de 1,0 mm; pesadas, antes e depois do peneiramento; a fração inferior a 1 mm foi quarteada e ¼ foi colocado em água destilada com 5 gotas do dispersante de pirofosfato de sódio 0,1 g/ 100 ml; e depois colocado no equipamento para leitura.

6 RESULTADOS

6.1 Características de Sistemas em Operação de Filtração em Margem de Rio

A Filtração em Margem de Rio (FMR) é utilizada para complementação do sistema de abastecimento de Dusseldorf (Alemanha), desde 1870, e essa técnica é aplicada em diversos lugares do mundo, como em países da Europa, da Ásia e nos Estados Unidos (RAY *et al.*, 2002; ECKERT & IRMASCHER, 2006; GRISCHEK & RAY, 2009; HU *et al.*, 2016; SANDHU *et al.*, 2011). A água captada do FMR é usada para abastecimento de 16% da Alemanha, sendo em Berlim 70% do abastecimento de água a população; 40% da Hungria; 48% da Finlândia; e 50% na França (FREITAS *et al.*, 2018). Na China, a FMR é utilizada mais na porção norte, com mais de 50 sistemas de FMR no rio Amarelo, 15 no rio Hai e rio Luan (HU *et al.*, 2016). Desde 2005, existem oito estações de FMR em estudo na Índia, nos quais a qualidade das águas captadas tem mostrado que o FMR é considerado um método confiável de pré-tratamento da água potável (SANDHU *et al.*, 2011). No Brasil foram implementados sistemas pilotos em Santa Catarina (ROMERO-ESQUIVEL *et al.*, 2016), em Viçosa – MG (EMMENDOERFER *et al.*, 2021b) e em Pernambuco (PAIVA, 2009; EMMENDOERFER *et al.*, 2021b), sendo utilizado como pré-tratamento em parceria com a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

Com o objetivo de comparar as características dos sistemas em operação foi elaborado o Apêndice 1, compilando as informações que constam nas referências bibliográficas. O levantamento dessas informações considerou sistemas dos Estados Unidos, Alemanha, Índia e os sistemas pilotos do Brasil. A partir dessas informações observou-se que há uma diversidade muito grande dos sistemas de FMR pelo mundo, isso porque as características dos locais são distintas e o objetivo da captação pode ser várias, como utilizar a água captada para abastecimento público ou para realizar um pré-tratamento da água. A Tabela 2 apresenta o mínimo e o máximo de algumas características dos sistemas apresentados no Apêndice 1.

Tabela 2 – Mínimo e máximo das características dos sistemas de Filtração em Margem de Rio pelo mundo atualmente.

Características dos sistemas	Mínimo	Máximo	Referência
Distância do poço produtor até o rio (m)	3	> 800	Grischek <i>et al.</i> (2002)
Quantidade de poços	1	> 112	Eckert & Irmacher (2006); Ray <i>et al.</i> (2002)
Profundidade dos poços (m)	1,5	300	Sandhu <i>et al.</i> (2011)
Capacidade máxima (m ³ /s)	29	322.000	Grischek <i>et al.</i> (2002)

Considerando a diversidade nas características dos sistemas FMR, sabe-se o que o FMR pode ser aplicado em diversos locais e com objetivos diferentes, desde que avalie as condições do local e considere-as na hora de definir as características do sistema. Vale comentar que em todos os sistemas FMR apresentados no Apêndice 1 a condutividade hidráulica do aquífero era entre 10^{-3} e 10^{-4} m/s, condizente com o intervalo apontado por Romerol-Equivel *et al.* (2016).

6.2 Avaliação da Qualidade da Água Superficial

Os dados acessados sobre a qualidade da água, apresentado no item 3.6, mostraram que entre os principais cursos de água de Bauru, o rio Bauru tem a pior qualidade, pois o esgoto urbano do município, não tratado, é despejado nele. Por outro lado, o rio Batalha e o ribeirão da Água Parada, mesmo apresentando concentrações acima da CONAMA n° 357 de 2005 para a classe 2, possuem uma melhor qualidade da água, pois o esgoto não é descartado bruto neles.

Em dois afluentes do ribeirão da Água Parada, córregos Pau d'Alho e Barra Grande, estão as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) municipais, que tratam um volume pequeno do esgoto gerado. Com os dados consultados, pode se observar que o tratamento está sendo realizado de forma eficiente e as águas dos córregos não apresentam concentrações destoantes de montante e jusante, em relação às ETES.

A partir das consultas ao Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) descobrimos que não há dados sobre a qualidade da água do rio Bauru ou poços localizados no aquífero aluvial. A qualidade da água superficial e subterrânea não é um critério essencial para a seleção de uma área. Entretanto, o tratamento durante a infiltração da água será influenciado pela sua qualidade.

6.3 Identificação e Seleção de Potenciais Bancos de Sedimentos

A primeira identificação dos bancos de sedimentos foi a partir das imagens de satélite do *Google Earth*. Nessa etapa, inseriu-se o arquivo *shape (shp)* da hidrografia unifilar da CPRM (2019) e identificou-se que os principais corpos d'águas superficiais são rio Bauru, rio Batalha e ribeirão da Água Parada, pois esses recebem mais afluentes das sub-bacias. Seguindo a delimitação desses corpos ao longo do município, foi feita a identificação das áreas com bancos de sedimentos nas margens, e quando necessário consultadas imagens da série histórica, na tentativa de confirmar que o objeto identificado se tratava de um banco de sedimentos. Nessa etapa, foram identificadas 5 áreas com bancos de sedimentos no rio Bauru, 27 no ribeirão da Água Parada e 5 no rio Batalha. Essas áreas foram delimitadas e inseridas em um *shp*.

Na etapa seguinte, usou-se o *shp* supracitado e o ortofotomosaico de 2010, para avaliar se as áreas delimitadas estavam presentes nessas fotografias aéreas e se havia outras não identificadas no *Google Earth*. No rio Bauru, dentre as 5 previamente selecionadas, 2 mantiveram-se, 3 não foram observadas e 9 foram adicionadas. No ribeirão da Água Parada, foram mantidas apenas 3 e acrescentadas 10 novas áreas. No rio Batalha, mantiveram-se 3 e foi acrescentada 1 nova área. Uniram-se as novas áreas com as previamente delimitadas no *Google Earth*, gerando-se um *shp* com mais áreas definidas (Figura 14). Comparando-se as imagens de satélites com as fotografias aéreas de 2010, foi observado que muitos bancos de sedimentos deixaram de existir nesse intervalo de tempo e outros surgiram, provavelmente relacionados ao processo hidrodinâmico do curso de água.

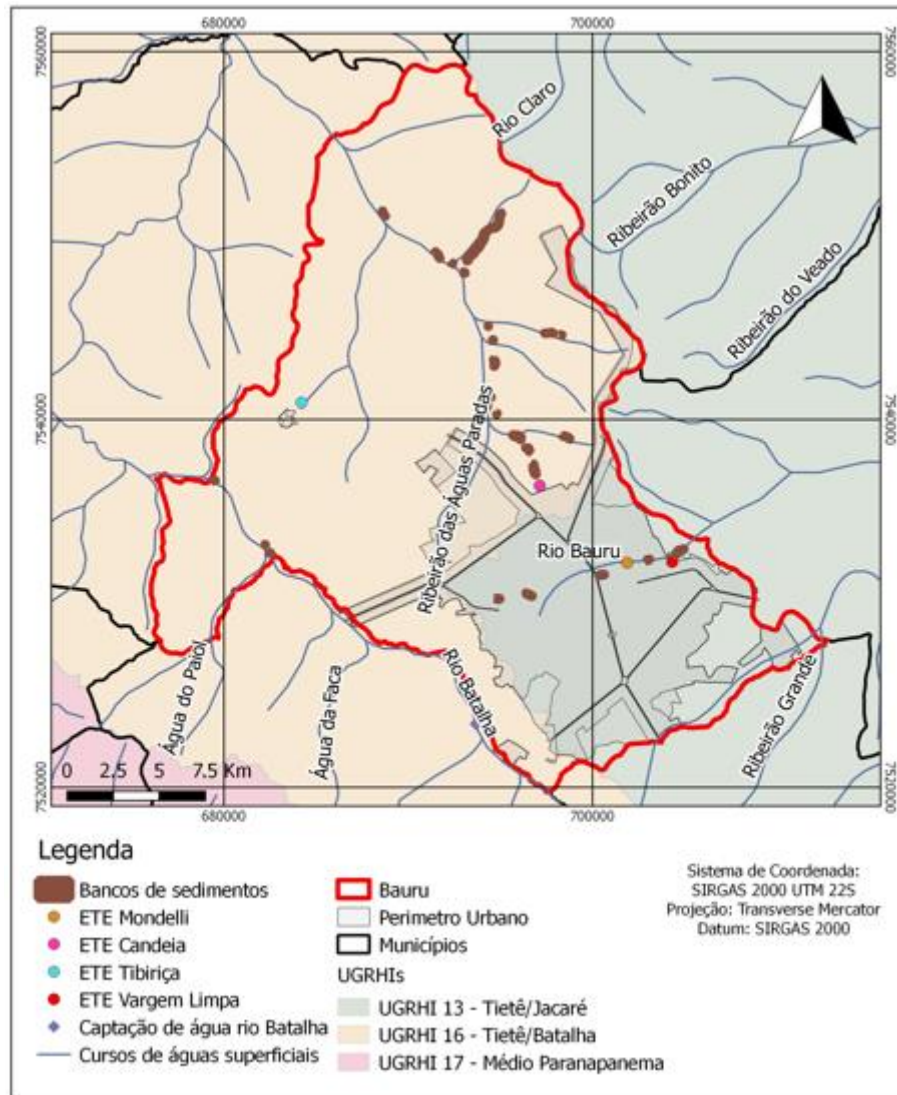


Figura 14 - Mapa com as delimitações dos bancos de sedimentos, gerados a partir de imagens do *Google Earth* e fotografias aéreas de 2010, da EMPLASA.

Para avaliar os bancos de sedimentos que estavam presentes há mais tempo, empregaram-se as fotografias aéreas de 1962, comparando-as com o *shp* das áreas delimitadas com o *Google Earth* e as fotografias de 2010. Em relação ao rio Bauru, as fotografias de 1962 permitiram identificação clara do canal do rio e uma zona de várzea, na época sem ou com pouca ocupação antrópica (Figura 15).

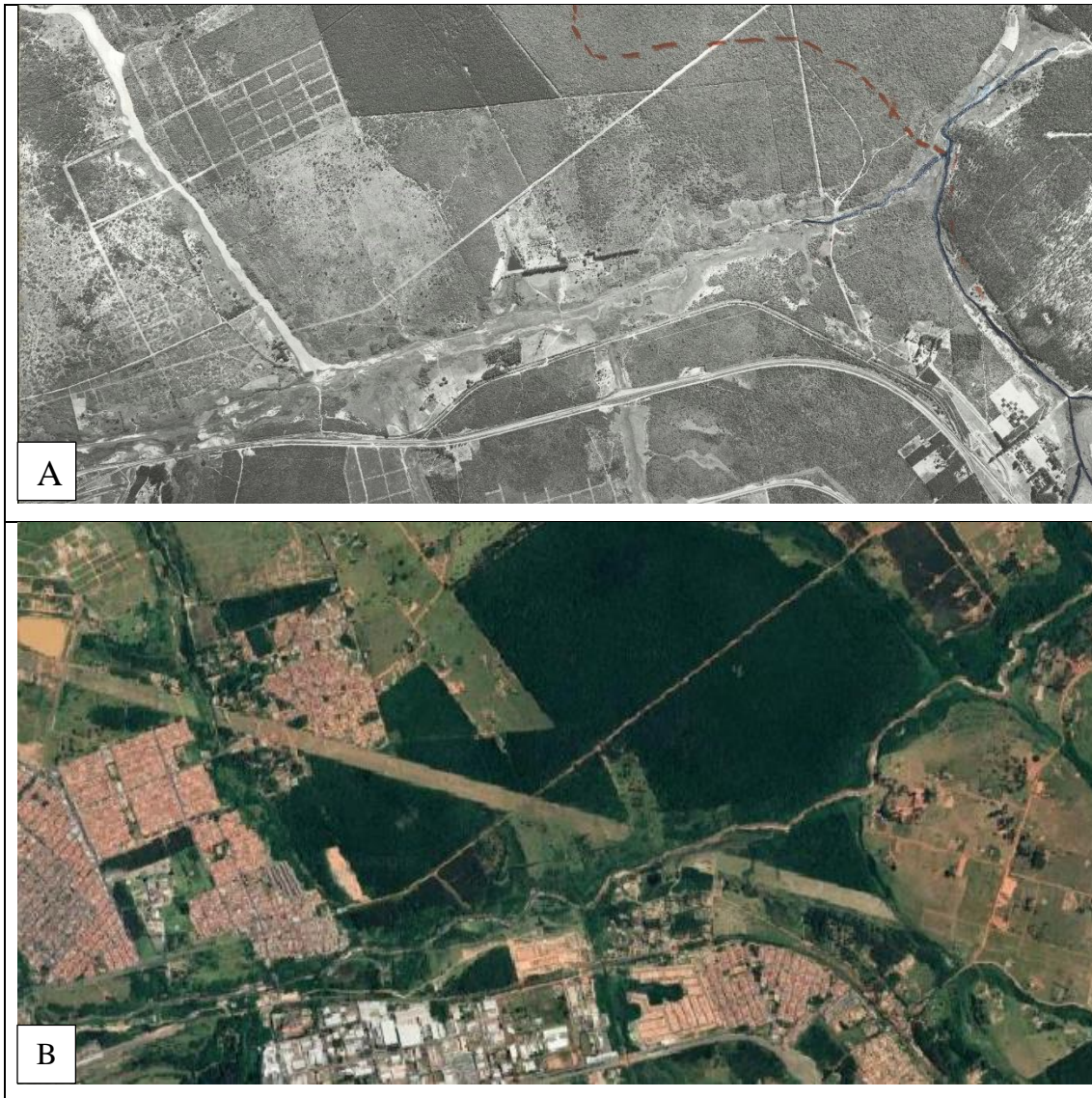


Figura 15 - Comparação de parte do rio Bauru através de fotografia aérea de 1962 do Consórcio Natividade-Vasp-Cruzeiro-Aerofoto (A) com imagem de satélite do *Google Earth* atual (B).

No ribeirão da Água Parada e no rio Batalha, as fotografias não evidenciaram a existência de bancos de sedimentos, mas de modo geral a morfologia do curso de água se manteve parecida.

Além dessas imagens e fotografias citadas, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) captou através de drone, imagens de 8 áreas, sendo essas no rio Batalha e no rio Bauru, pois eram os corpos d'água superficial mais próximo da zona urbana. Essas imagens foram utilizadas para estimar as dimensões dos bancos de sedimentos e identificar outros bancos de sedimentos ao longo dos rios. Para o dimensionamento das áreas no ribeirão da Água Parada foram utilizadas as imagens do *Google Earth*.

6.4 Reconhecimento das Áreas Pré-selecionadas

A partir das áreas previamente selecionadas, com as imagens do *Google Earth* e as fotografias aéreas de 2010, foi realizada uma atividade de campo com o intuito de se avaliar o acesso, as condições do entorno, a granulometria dos bancos de sedimentos e as estimativas das velocidades das águas superficiais, quando possíveis.

Durante as atividades foram visitadas 10 áreas, sendo 4 no rio Bauru, 4 no ribeirão da Água Parada e 2 no rio Batalha (Figura 16). As informações obtidas em campo foram sintetizadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Informações levantadas durante as atividades de campo, para reconhecimento das áreas previamente selecionadas.

Curso de água	Ponto	Velocidade	Granulometria	Largura rio (m)	Profundidade rio (m)
Rio Bauru	1	0,625 m/s	Areia fina bem selecionada	-	0,15 a 3,0
Rio Bauru	2	-	-	1,5 a 8,0	-
Rio Bauru	3	0,410 m/s	Variando entre porções com areia fina bem selecionada e porções de areia fina a grossa	-	0,05 a 0,10
Ribeirão da Água Parada	4	0,800 m/s	Areia fina bem selecionada	Aprox. 3,0	0,15 a 2,0
Rio Bauru	5	-	-	-	-
Ribeirão da Água Parada	6	0,700 m/s	Areia fina bem selecionada	Aprox. 6,0	0,15 a 0,5
Ribeirão da Água Parada	7	0,580 m/s	Areia muito fina a fina	Aprox. 8,0	0,12
Ribeirão da Água Parada	8	-	Areia fina bem selecionada	-	-
Rio Batalha	9	0,330 m/s	Sem amostra	14,0	2,0
Rio Batalha	10	0,210 m/s	Areia fina bem selecionada	1,5	1,5

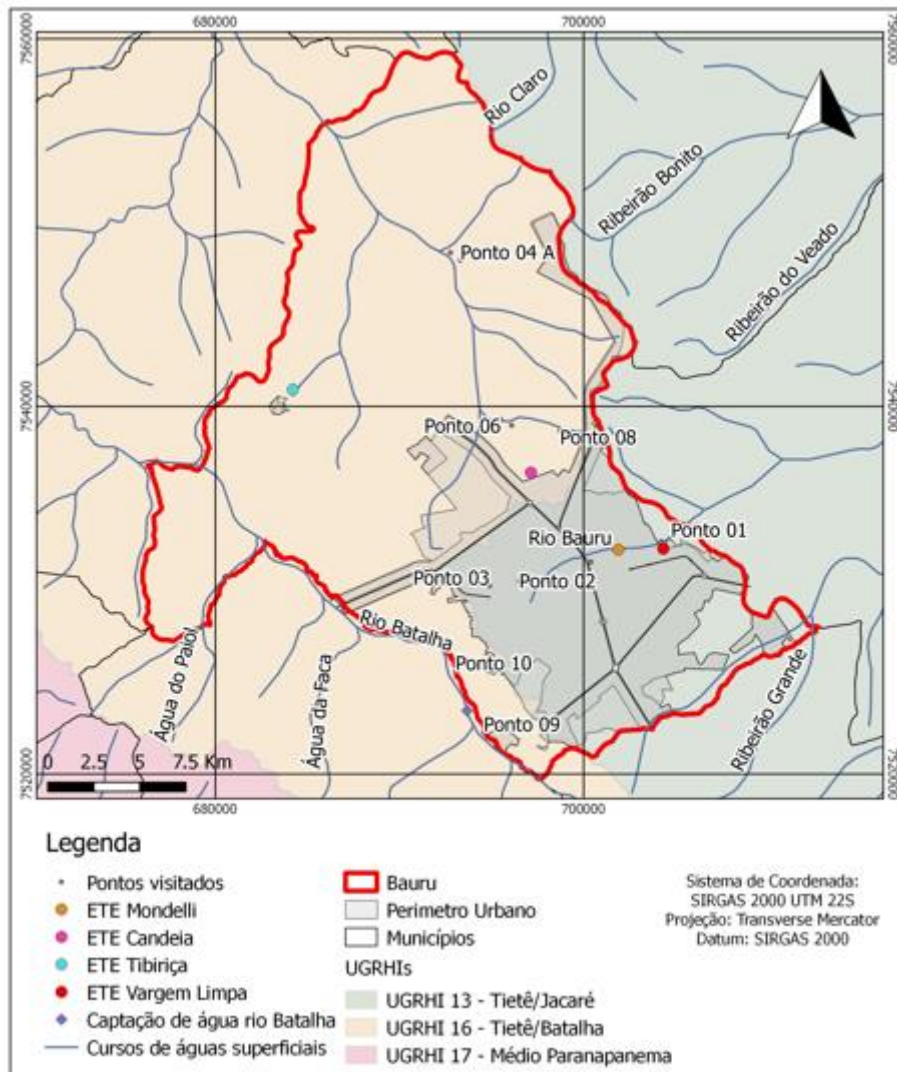


Figura 16 - Mapa dos pontos visitados durante as atividades de campo.

Dentre os pontos visitados durante as atividades de campo, apenas dois apresentaram acesso adequado para visitas frequentes e entrada de equipamentos de perfuração, ausência de odor no local, ausência de produto líquido imiscível (fase livre) ou resíduo sólido no local, denominados de Ponto 06 (Figura 17A) e Ponto CPA (Figura 17B), equivalente ao Ponto 01. O nome do Ponto CPA é devido à dragagem de areia no local pela Empresa CPA. Ressaltando que as áreas, dos dois pontos, são propriedades particulares.

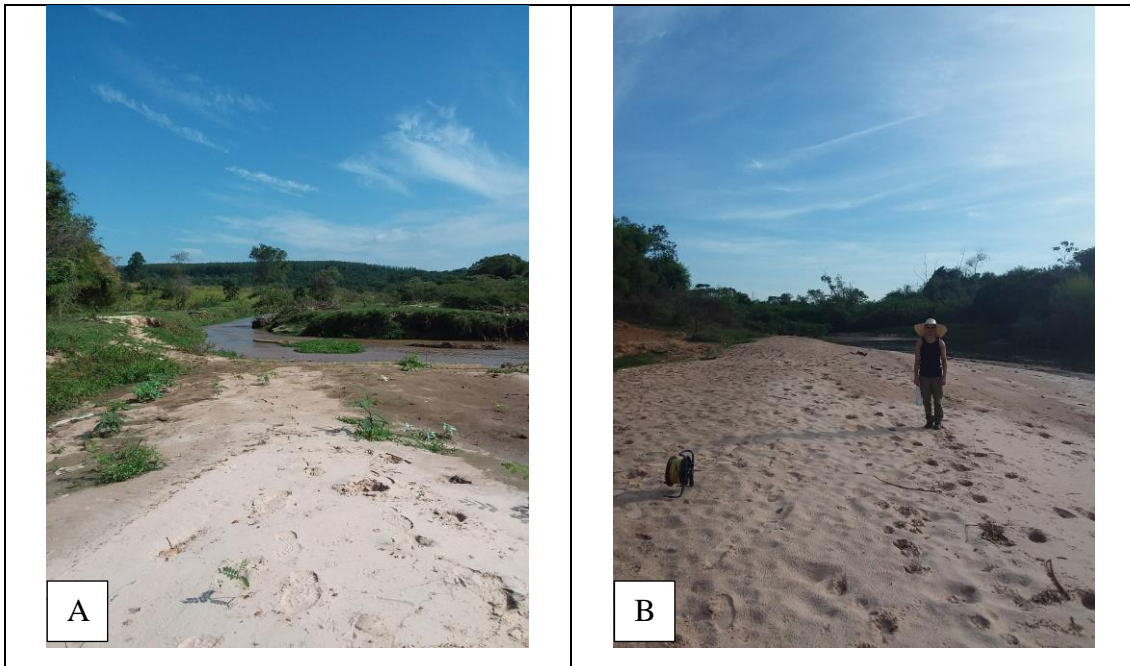


Figura 17 - Fotografias dos bancos de sedimentos do Ponto 06 (A) e Ponto CPA (B), tiradas durante as atividades de campo.

Nas demais áreas não havia acesso e isso impossibilitou a chegada aos bancos de sedimentos delimitados, não sendo realizadas visitas nesses locais. O rio Batalha não apresentou nenhuma área de bancos de sedimentos com acesso para a instalação do sistema de Filtração de Margem de Rio (FMR) dentro do município de Bauru, além de que a mata ciliar do rio é bem fechada e preservada.

A obtenção das imagens de drone pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) no rio Batalha e rio Bauru foi acompanhada durante essa atividade de campo.

6.5 Caminhamento Elétrico e Sondagem Elétrica Vertical nas Áreas Preliminares

Devido à dificuldade de se encontrar áreas acessíveis e em condições adequadas, foram realizados os caminhamentos elétricos (CE) em apenas dois pontos visitados (Ponto CPA – rio Bauru e Ponto 06 – ribeirão da Água Parada), apresentados na Figura 18 e na Figura 19.

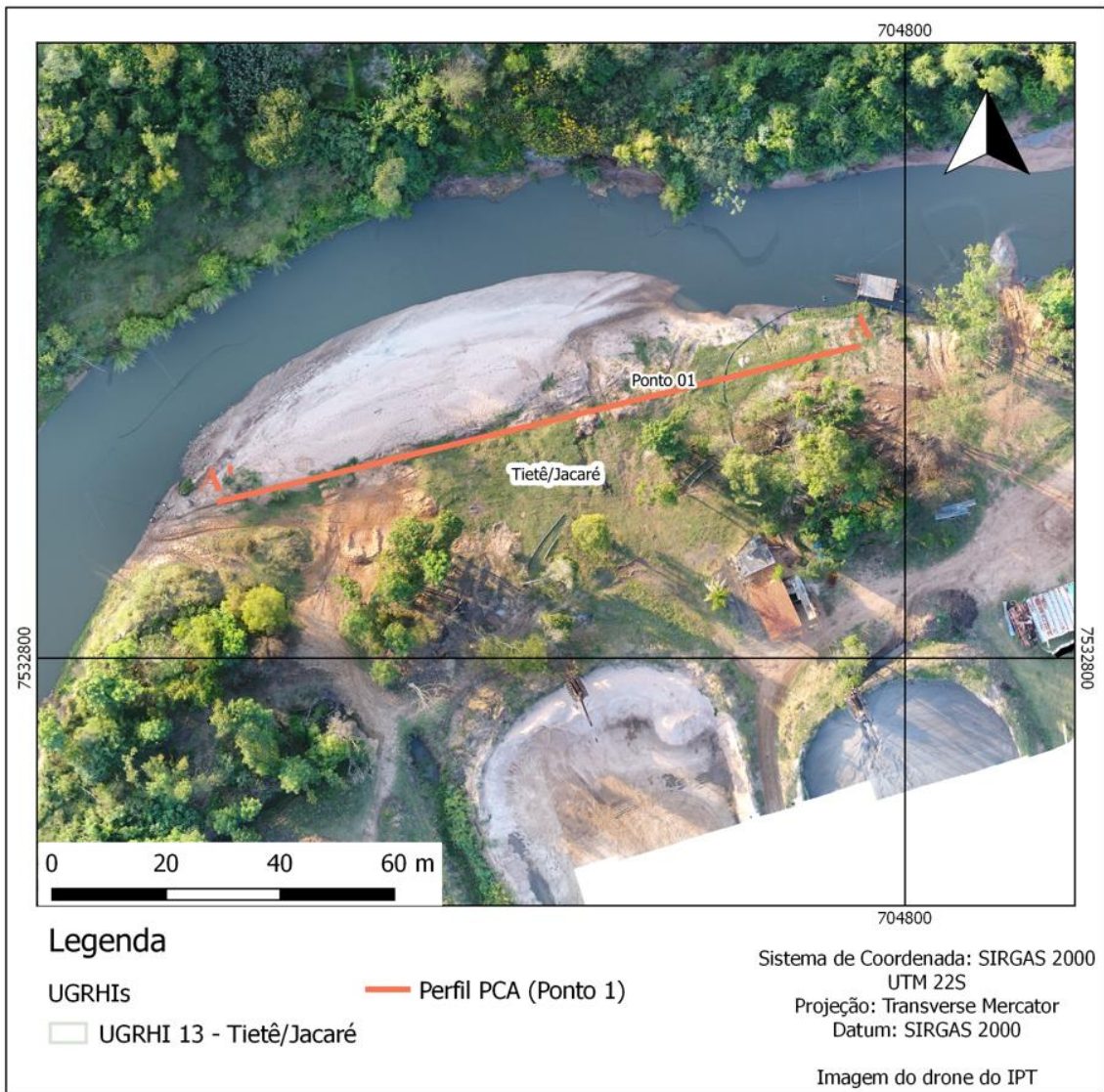


Figura 18 - Mapa com o Perfil CPA e as imagens do drone do IPT.

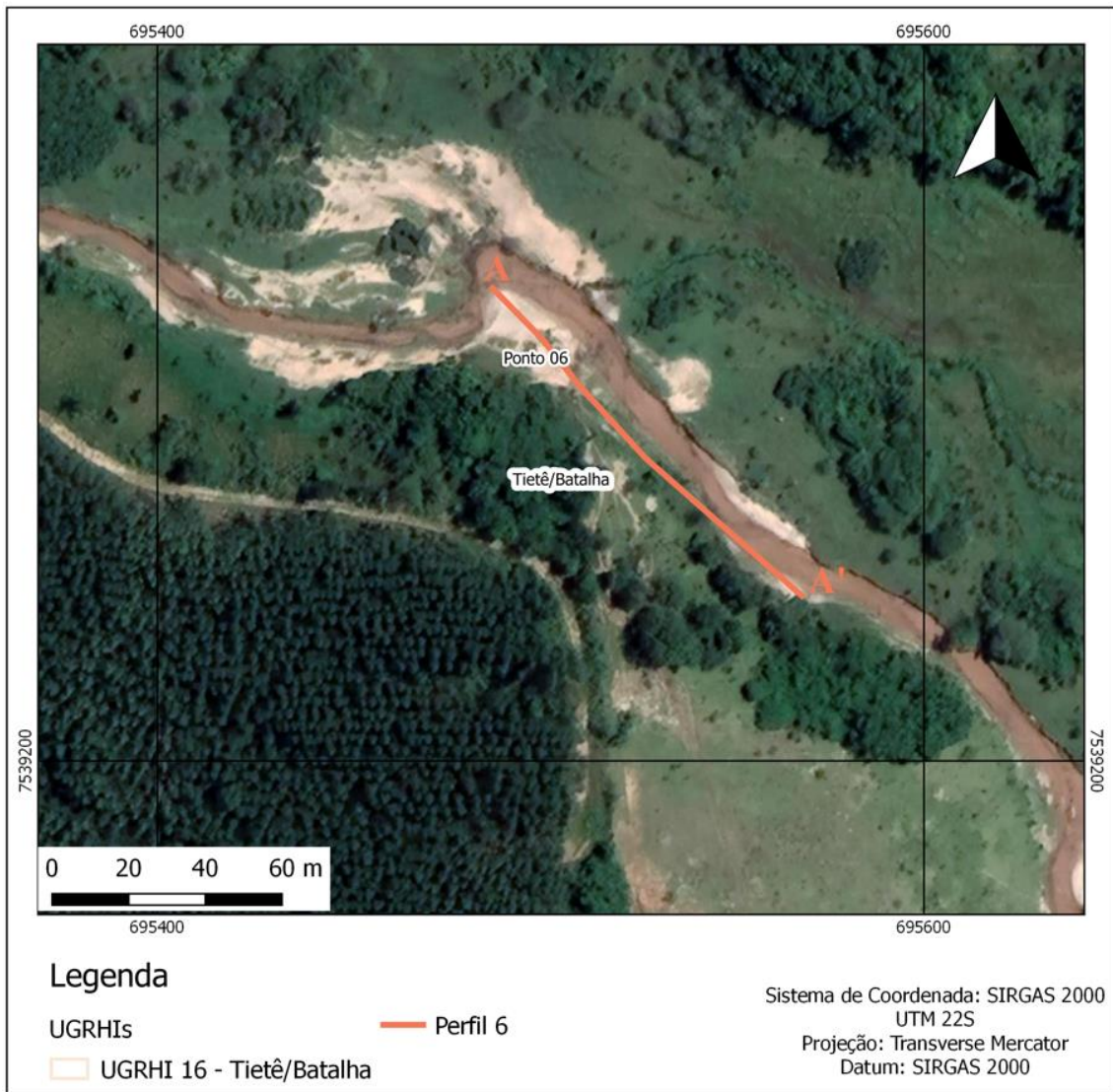


Figura 19 - Mapa com o Perfil 6 e as imagens do *Google Earth*.

Os resultados do CE são apresentados em duas pseudo-seções, que são os dados brutos obtidos em campo e que foram plotados segundo Hallof (1957), e duas seções modeladas. As pseudo-seções e seções modeladas foram interpoladas pelo software *Surfer 8* (da *Golden Software*). Os dados das seções modeladas foram obtidos com a inversão (modelagem) no *Res2DInv* e exportado na forma de arquivo XYZ (X=coord. modelada de distância; Y=coord. modelada de profundidade e Z=resistividade modelada).

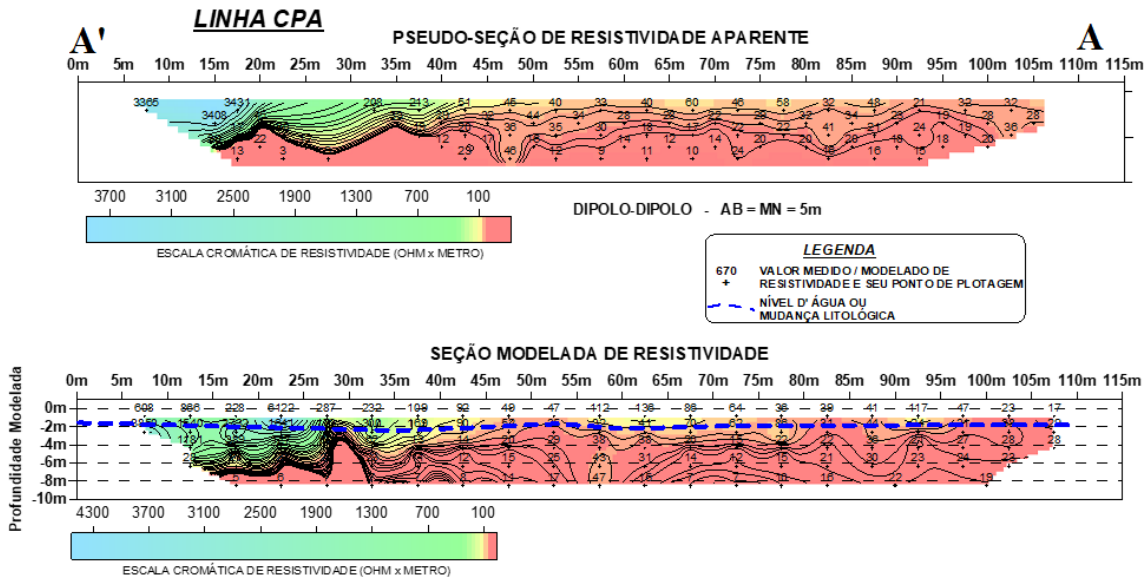


Figura 20 - Pseudo-seção e seção modelada da resistividade do Ponto CPA, segundo Hallof (1957) e pelo software Res2DInv. Ambas interpoladas pelo Surfer 8.

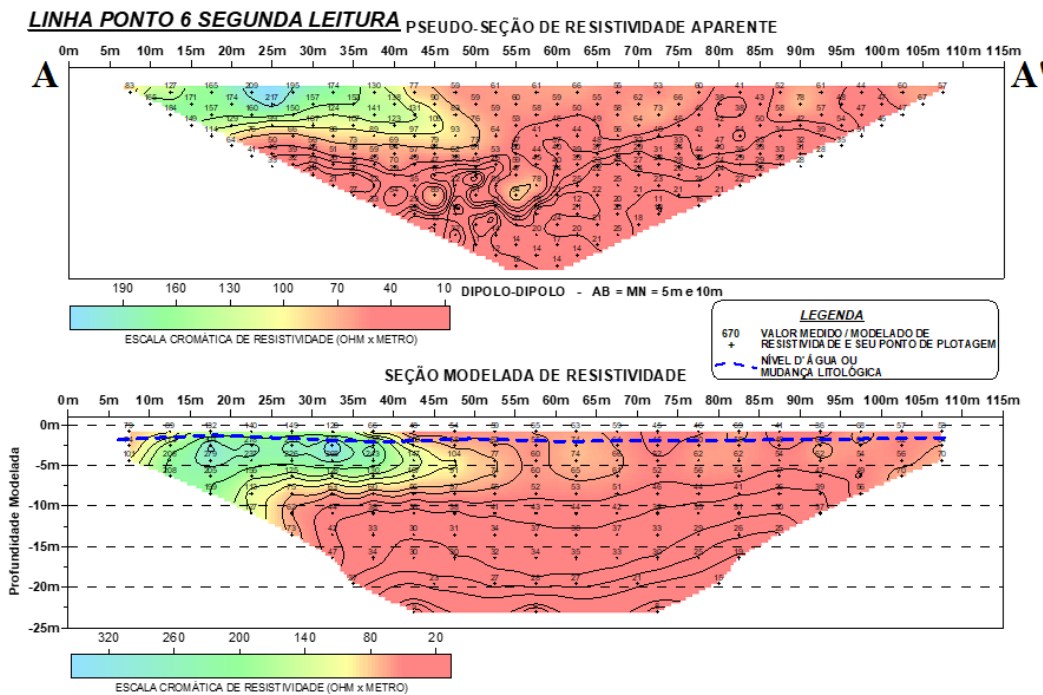


Figura 21 - Pseudo-seção e seção modelada da resistividade do Ponto 6, segundo Hallof (1957) e pelo software Res2DInv. Ambas interpoladas pelo Surfer 8.

A partir da seção modelada do Ponto CPA (Figura 20) observamos que a camada superficial, de até 2 m de profundidade, possui uma maior resistividade e a partir dela uma camada mais homogênea com resistividade menor (inferior a 100 $\Omega.m$). O nível d'água (NA) interpretado foi próximo a 2 m. Importante comentar que, a porção à leste do CE (primeira parte ao lado esquerdo na pseudo-seção, de 0 m até 45 m) há poucos dados obtidos e com baixa qualidade, possivelmente sendo esse o motivo pela alta

resistividade nessa parte da pseudo-seção. Além disso, a partir da informação da visita de campo, essa área do CE passou por alteração antrópica e tem constante movimentação de veículos e maquinários no local. A profundidade máxima de dados para a pseudo-seção do Ponto CPA foi de 8 m.

Na outra seção modelada (Figura 21), do Ponto 6, observou-se uma camada superficial de até 8 m em que a resistividade varia de 150 a 50 Ω .m e na parte esquerda da pseudo-seção (entre 0 m e 45 m) também possui uma resistividade maior, superior a 100 Ω .m, sendo essa porção o banco de sedimentos arenoso e seco, nas demais partes a vegetação rasteira estava presente. O NA obtido também foi próximo a 2 m e a profundidade de dados obtidos chegou a 23 m.

Posterior a esse levantamento, foram realizadas duas SEVs (Figura 23 e Figura 24) no Ponto CPA, para complementação dos dados e melhor detalhamento dos estratos em subsuperfície. A localização das SEVs é apresentada na Figura 22, sendo a SEV 1 na mesma posição que o CE do Ponto CPA.

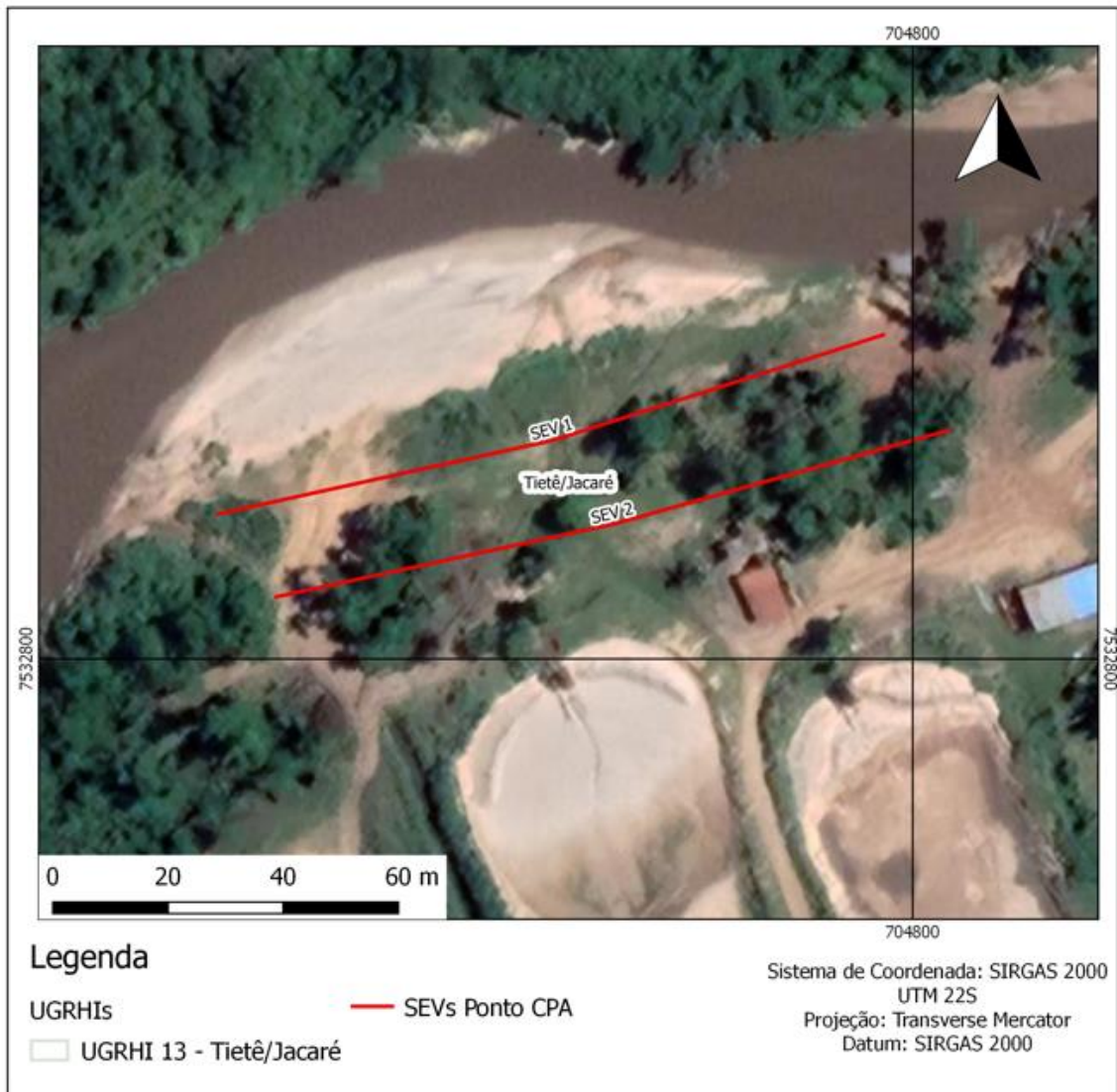


Figura 22 - Localização das Sondagens Elétricas Verticais (SEV) no Ponto CPA

Na SEV 1 (Figura 23), a partir do tratamento dos dados no software de inversão, obtiveram-se três estratos diferentes, sendo os dois primeiros (0 a 8 m e o outro de 8 a 25 m) com menor resistividade que o terceiro, estrato consideravelmente mais resistivo e cujo topo inicia em 25 m.

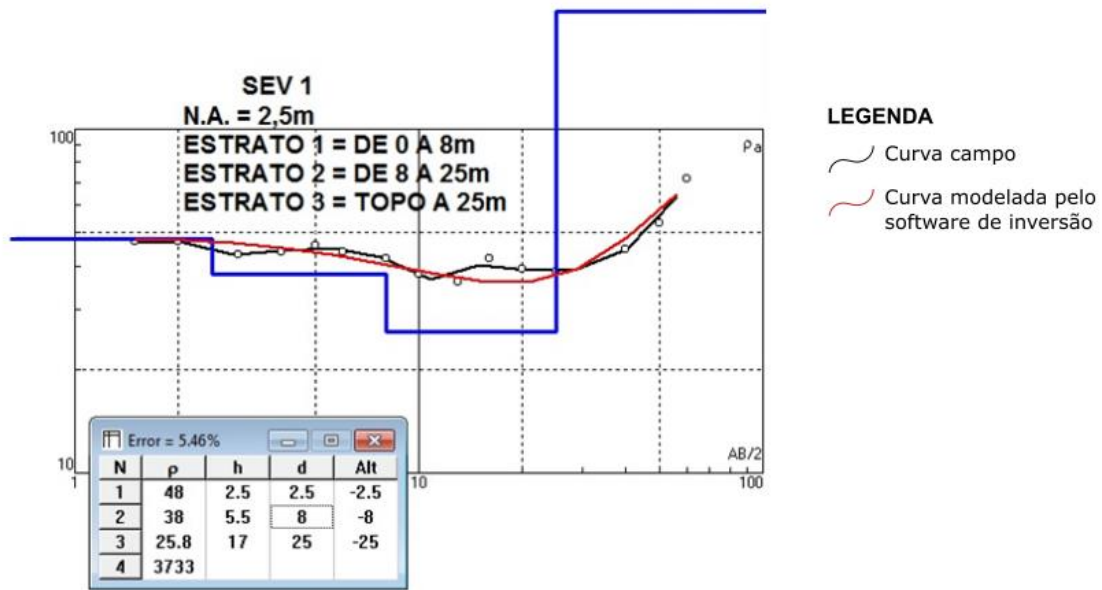


Figura 23 - Curva de resistividade aparente da SEV 1 do Ponto CPA, elaboradas no software de inversão *IPI2win*.

Na SEV 2 (Figura 24), os mesmos três estratos da SEV1 estão presentes, com uma ligeira diferença da primeira metragem para as demais. Em ambas as SEVs os NAs obtidos foram de aproximadamente 2,50 m, o que se aproxima do nível d'água obtido no CE para o Ponto CPA.

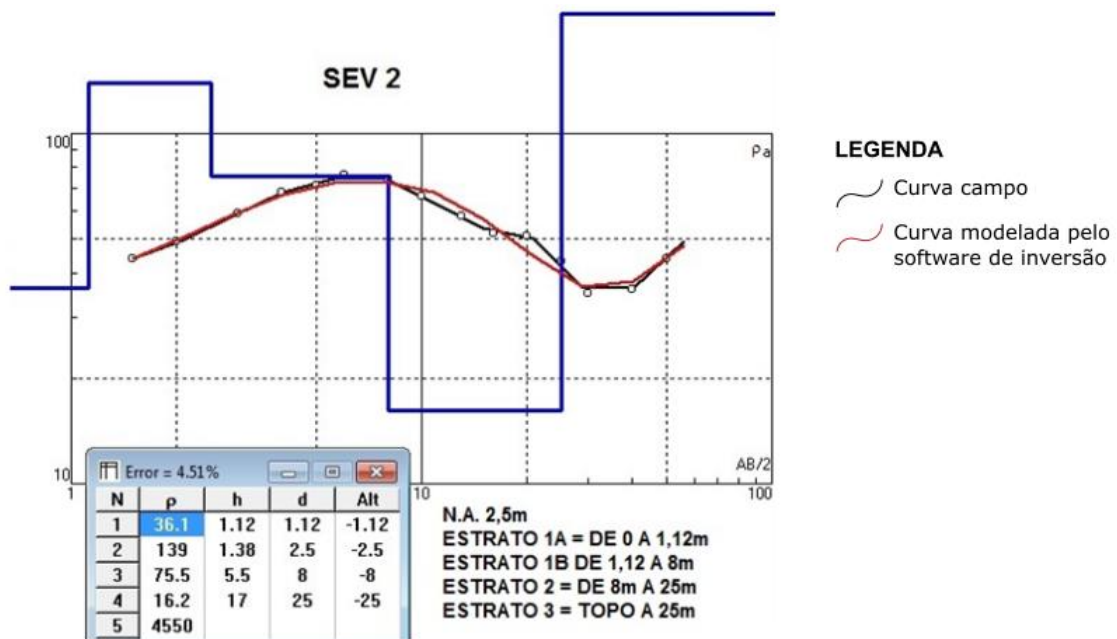


Figura 24 - Curva de resistividade aparente da SEV 2 do Ponto CPA, elaboradas no software de inversão *IPI2win*.

6.6 Granulometria do Leito do Rio Bauru e Ribeirão da Água Parada

Considerando as áreas preliminares selecionadas e os levantamentos geofísicos, as coletas de sedimentos de leito foram realizadas no rio Bauru, próximo ao Ponto CPA (Figura 25), e no ribeirão da Água Parada, próximo ao Ponto 6 (Figura 26). No rio Bauru as amostras foram coletadas na margem interna, sendo 6 amostras espaçadas em três partes da curva e 3 pontos sentido margem interna-centro, até aproximadamente 8 m da margem. A água apresentava odor forte e coloração escura. Na parte mais próxima da margem interna a espessura da lâmina d'água era de 0,5 m, porém, conforme se adentrava no rio sentido margem externa, a profundidade aumentava, impossibilitando o acesso e a coleta de amostra. A relação das identificações das amostras e das quantidades de análises feitas são apresentadas na Tabela 4.

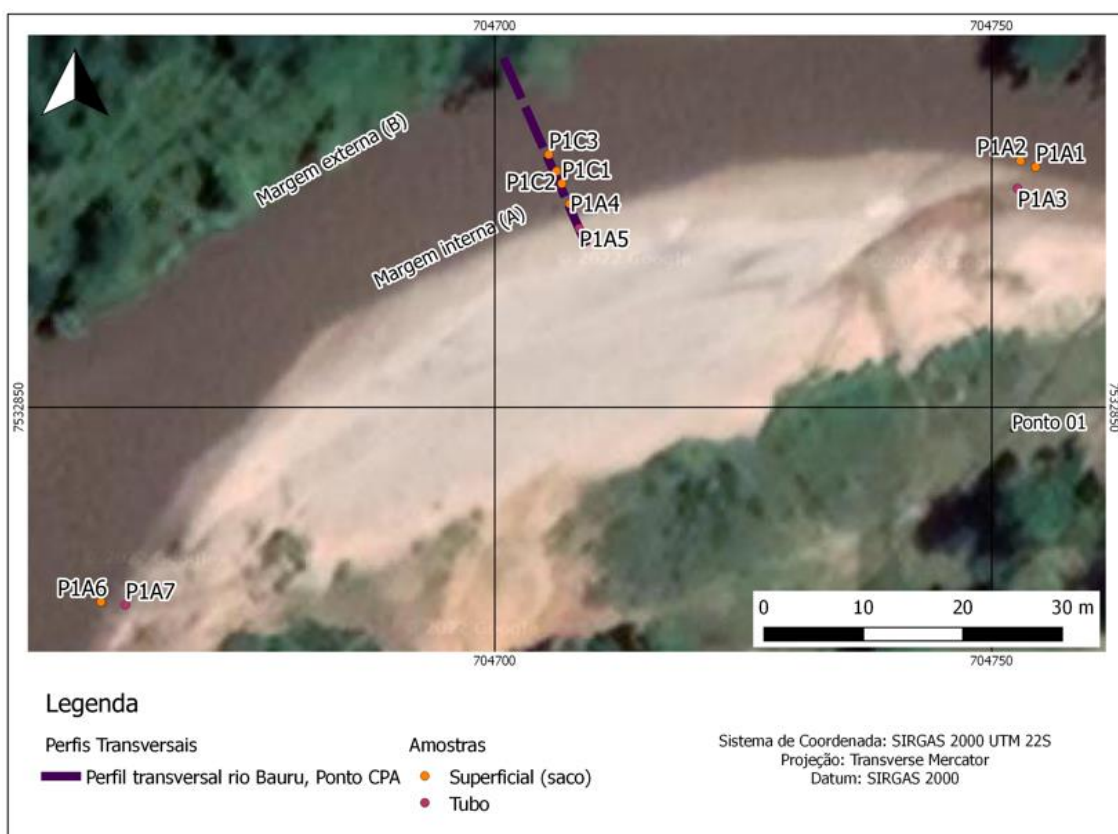


Figura 25 – Localização das amostras de sedimento de leito do rio Bauru, próximo ao Ponto CPA.



Figura 26 - Localização das amostras de sedimento de leito do ribeirão da Água Parada, próximo ao Ponto 6.

Tabela 4 - Informações do local, quantidade de amostra coletada e analisada do rio Bauru, próximo ao Ponto CPA.

Ponto	Local	Tipo de amostra	Espessura	Quantidade de amostra	Quantidade de análise granulométrica
P1A1	Margem interna	Saco	-	1	1
P1A2	Margem interna	Saco	-	1	-
P1A3	Margem interna	Tubo	25 cm	3	2 (topo e base)
P1A4	Margem interna	Saco	-	1	1
P1A5	Margem interna	Tubo	20 cm	4	2 (topo e base)
P1A6	Margem interna	Saco	-	1	1
P1A7	Margem interna	Tubo	15 cm	2	2 (topo e base)
P1C1	Centro	Saco	-	1	1
P1C2	Centro	Saco	-	1	1
P1C3	Centro	Saco	-	1	1

No ribeirão da Água Parada foram 10 amostras, sendo três perfis transversais ao rio e três partes da curva, coletando margem interna, centro e margem externa. A relação das identificações das amostras e das quantidades de análises feitas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Informações do local, quantidade de amostra coletada e analisada do ribeirão da Água Parada, próximo ao Ponto 06.

Ponto	Local	Tipo de amostra	Espessura	Quantidade de amostra	Quantidade de análise granulométrica
P6A1	Margem interna	Saco	-	1	-
P6A2	Margem interna	Tubo	35 cm	6	2 (topo e base)
P6B1	Centro	Tubo	25 cm	5	2 (topo e base)
P6C1	Margem externa	tubo	30 cm	6	2 (topo e base)
P6A3	Margem interna	Saco	-	1	1
P6B2	Margem externa	Tubo	-	1	1
P6C2	Centro	Tubo	-	1	1
P6A4	Margem interna	Tubo	20 cm	5	2 (topo e base)
P6B3	Centro	Tubo	35 cm	6	2 (topo e base)
P6C3	Margem externa	Tubo	40 cm	7	2 (topo e base)

Para análise granulométrica por difração à laser considerou a fração inferior à 1 mm, sendo a fração superior à 1 mm pesada e calculada a porcentagem em relação a amostra. As porcentagens da faixa granulométrica e a descrição dos sedimentos são apresentadas no Apêndice 2.

No Ponto CPA, avaliam-se as porcentagens ao longo da margem interna em três partes (Figura 27) e um perfil transversal perpendicular à curva (Figura 28). Em todas as amostras, a granulometria predominante é areia de fina a grossa e a mineralogia quartzo, além de minerais pesados em menor quantidade. A margem interna a montante (amostras P1A6 e P1A7), mesmo contendo frações finas (silte e argila), é a porção que apresenta sedimentos com granulometria maiores de acordo com observações em campo e no resultado do peneiramento com malha de 1,0 mm (8,34% e 31,84%). O meio da curva, onde foi posicionado o perfil transversal (P1A4 e P1A5), é a porção com maior variedade granulométrica, pois as porcentagens da fração superior 1,0 mm é maior a montante e menor a jusante. Nessa porção também se observa uma diferença da amostra do topo (superficial), com proporções maiores de silte e argila, com a da base (a uma profundidade de 15 cm), com proporções menores. Na porção a jusante (P1A2 e P1A3), as frações encontradas foram apenas areia fina a grossa.

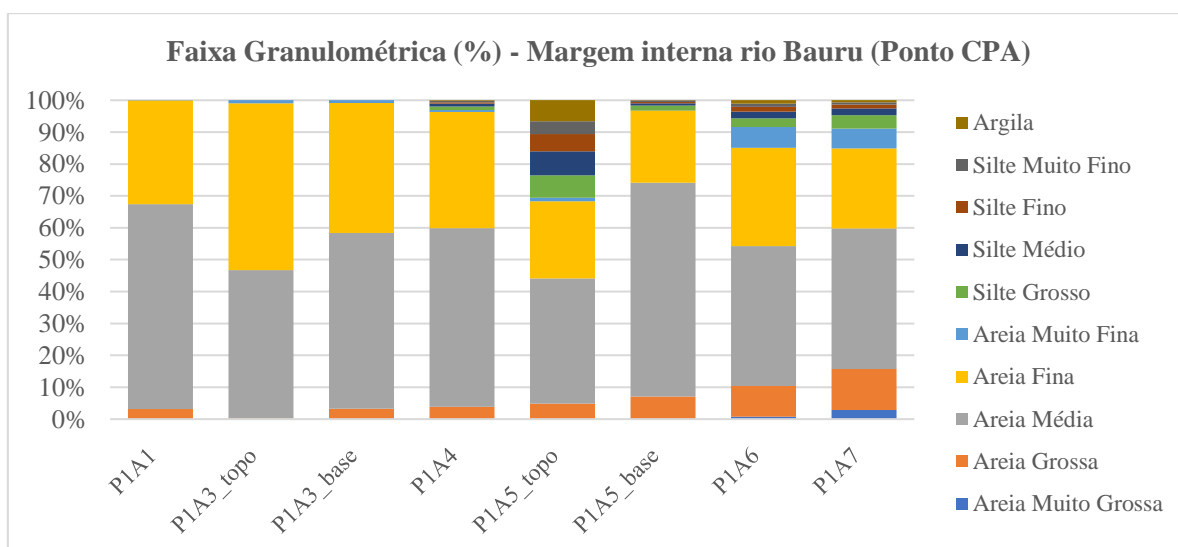


Figura 27 - Porcentagem das faixas granulométricas na margem interna do rio Bauru no Ponto CPA, sendo os dados obtidos por análise granulométrica por difração à laser.

Avaliando as amostras do perfil transversal do Rio Bauru, a diversidade granulométrica ocorre nas margens. Conforme as amostras se aproximam do centro do corpo d'água, não há variação granulométrica, predominando apenas areia fina a grossa.

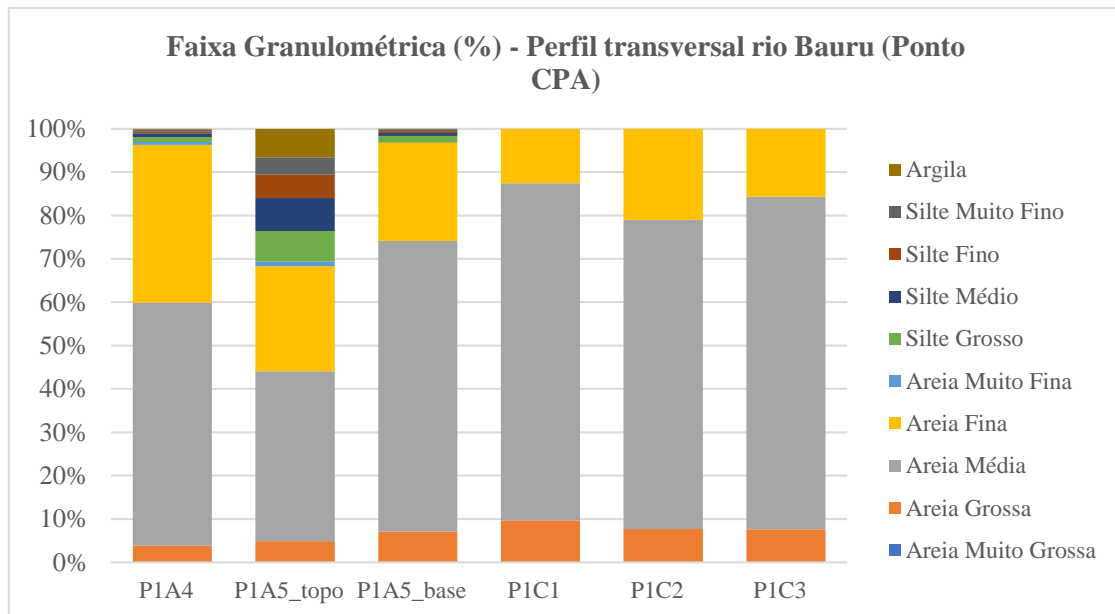


Figura 28 - Porcentagem das faixas granulométricas do perfil transversal da curva no Ponto CPA, do rio Bauru, sendo os dados obtidos por análise granulométrica por difração à laser.

Utilizando o Diagrama de Hjulstrom (1935), considerando a velocidade da água do rio em 62,5 cm/s e o tamanho das partículas em maior proporção, areia fina e média, nessa porção do rio Bauru o processo fluvial predominante é o de deposição.

No ribeirão da Água Parada foram feitos três perfis transversais (Figura 26), para avaliar margens e centro em partes diferentes do corpo de água. Avaliando os resultados das análises granulométricas (Figura 29), os três perfis têm como frações granulométricas predominante areia fina a média, sendo que em todas as amostras há uma porcentagem de até 10% de areia grossa e mineralogia composta predominantemente por quartzo com baixa presença de minerais pesados. As variações granulométricas e porcentagem de finos (silte e argila) ocorrem na margem externa no perfil transversal a jusante da curva (P6B1), sendo cerca de 20% de finos na amostra da base, porcentagens inferiores a 3% no perfil transversal 1 e apenas na amostra do topo da margem externa (P6B3) no perfil transversal 2. As frações granulométricas maiores que 1,0 mm ocorrem em porcentagens inferiores a 2,25%, sendo que a maior porcentagem desse material encontram-se na margem externa do perfil transversal 1.

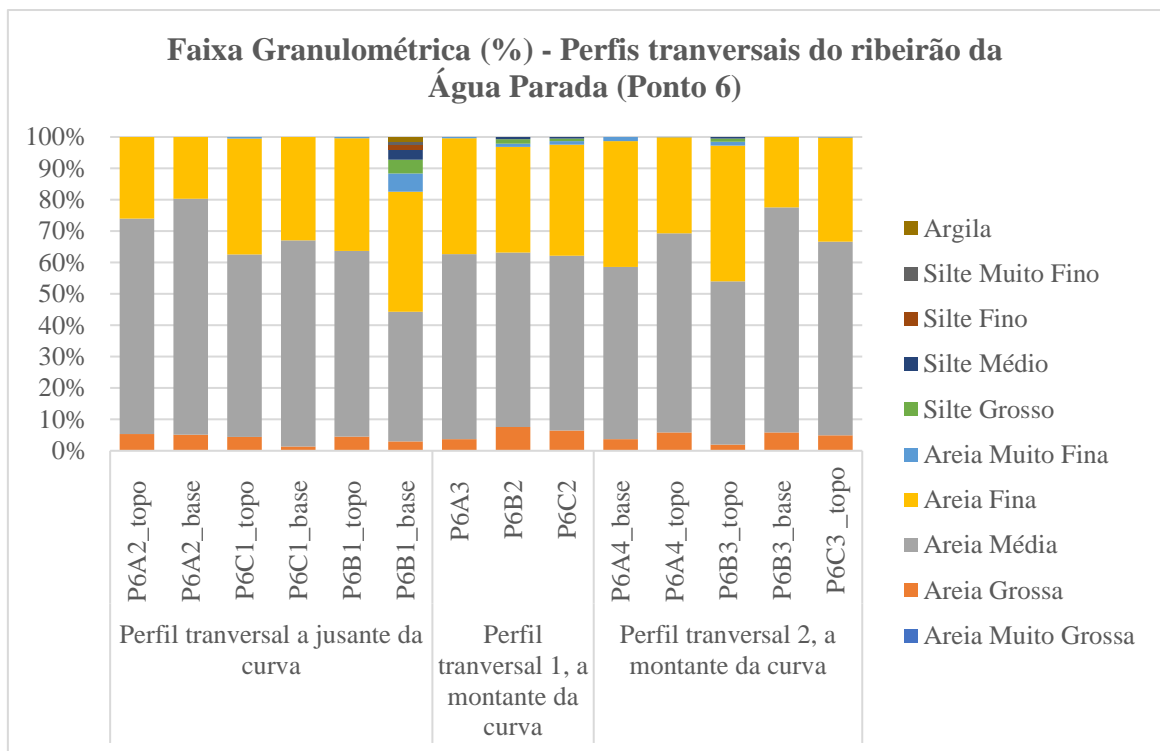


Figura 29 - Porcentagem das faixas granulométricas dos perfis transversais da curva no Ponto 6, do ribeirão da Água Parada, sendo os dados obtidos por análise granulométrica por difração à laser.

A partir do Diagrama do Hjulstrom (1935), nessa porção do ribeirão da Água Parada ocorre o processo fluvial de deposição, considerando a velocidade da água do ribeirão em 70,0 cm/s e o tamanho das partículas em maior proporção, areia fina e média.

7 DISCUSSÃO

Considerando as características climáticas, sabe-se que no período chuvoso o volume precipitado no município é significativamente superior ao da estiagem, podendo influenciar no volume e na velocidade das águas e dos sedimentos fluviais transportados. Essa possível diferença nas características hidrológicas podem permitir uma remobilização dos sedimentos do leito e assim diminuir as chances de colmatação por processos físicos e mecânicos (GRISCHEK & RAY, 2009).

A geomorfologia predominante do município, exceto pelas planícies aluviais, é de planalto, que por definição não apresentam grandes elevações e declividades do relevo.

Em relação à hidrogeologia, embora a Figura 6 apresente o rio Bauru em contato com a Unidade Aquífera da Formação Marília e o ribeirão da Água Parada com a Unidade Aquífera da Formação do Vale do Rio do Peixe, ambos os corpos d'água superficiais estão sobre aquíferos aluviais não caracterizados, já que não foram mapeados pelo IBGE

(2015). Porém, esses aquíferos são os de maior interesse para o estudo, pois estão em contanto com os corpos d'água superficiais e neles estão a zona hiporréica (GRISCHEK & RAY, 2009).

A escolha dos corpos d'água superficiais considerou os cursos de maior ordem, ou seja, os que tem confluência com mais tributários. No município de Bauru foram escolhidos três corpos para serem alvos de estudo: ribeirão da Água Parada, rio Bauru e rio Batalha.

O ribeirão da Água Parada flui pela zona rural do município de Bauru. Por isso, os bancos de sedimentos localizam-se em áreas mais afastadas. A partir das análises químicas consultadas, sabe-se que mesmo recebendo água da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), a água do ribeirão encontra-se abaixo das concentrações estabelecidas para rios de Classe 2, exceto para coliformes termotolerantes, manganês total, ferro dissolvido e demanda biológica de oxigênio (DBO).

O rio Bauru corta a zona urbana do município e recebe esgoto bruto e resíduos sólidos, possuindo forte odor em grande parte de sua extensão. Destaca-se que mesmo recebendo o esgoto bruto, não foram encontradas análises químicas da água do rio dentro do município de Bauru em nenhuma das instituições pesquisadas (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB; Departamento de Água e Esgoto de Bauru - DAE; Agência Nacional de Água e Saneamento Básico - ANA) ou em artigos acadêmicos.

O rio Batalha, localizado no limite entre os municípios de Bauru e Piratininga, já é utilizado para captação de água para o abastecimento. Ele está localizado na zona rural, porém alguns trechos são próximos da zona urbana. A água possui concentrações acima da Classe 2 para os parâmetros coliformes termotolerantes, turbidez, cor verdadeira, ferro dissolvido, alumínio dissolvido, *Escherichia coli* e oxigênio dissolvido.

Considerando a baixa qualidade da água do rio Bauru em relação a do ribeirão da Água Parada e o rio Batalha, a instalação da Filtração em Margem do Rio (FMR) no rio Bauru possibilitaria avaliar a redução e a diluição dos parâmetros físicos, químicos e biológicos de forma clara através do monitoramento da água antes e depois do tratamento.

Utilizando fotografias aéreas e imagens de satélite identificou-se bancos de sedimentos para visita e avaliação das condições de acesso e entorno, visando áreas que poderiam ser acessadas por maquinários de perfuração de forma segura. As áreas visitadas

do rio Batalha possuem mata ciliar e uma larga zona de várzea. Portanto, nenhum dos bancos de sedimentos observados se apresentaram como opções viáveis para a continuidade do estudo.

No rio Bauru, dentre as áreas visitadas uma era próxima à empresa de dragagem de areia no rio (Empresa CPA), área no qual apresentou condições de acesso, segurança e dimensões adequadas para a realização do estudo (Ponto CPA). No ribeirão da Água Parada, dos bancos de sedimentos visitados mais próximos da zona urbana do município, escolheu-se o Ponto 6 para dar continuidade ao estudo.

Durante o levantamento de dados preliminares em campo foram estimadas as profundidades, larguras e velocidades dos dois corpos d'água superficiais. As velocidades estimadas em ambos os corpos foram semelhantes. Porém, próximo ao Ponto CPA (rio Bauru) a lâmina d'água (profundidade) é mais espessa (entre 0,5 m e 3,0 m) do que no ribeirão da Água Parada. Com isso, o volume de escoamento é maior no rio Bauru, uma característica favorável para a instalação da FMR no Ponto CPA.

Foram realizados os levantamentos geofísicos de caminhamento elétrico (CE) nos dois pontos mencionados (Ponto CPA e Ponto 6), buscando caracterizar variações laterais e verticais dos bancos de sedimento. Os resultados desses levantamentos permitiram estimar o nível d'água a uma profundidade de 2 m para ambos os pontos, além de indicar uma resistividade maior nas porções mais arenosas e secas do banco de sedimento ou em porções que passaram por uma alteração antrópica. Apesar disso, os bancos apresentaram-se com resistividade homogenia nas demais partes, de acordo com as profundidades atingidas.

Para complementar os dados, foram realizadas duas sondagens elétricas verticais (SEV) no Ponto CPA, caracterizando o sedimento até 25 m de profundidade e obtendo três camadas geoeletricas distintas. Não se sabe se essa variação geoeletrica representa variações de diferentes litotipos. Entretanto, sabe-se que a resistividade a partir de 25 m de profundidade é mais elevada do que em porções superiores (mais rasas). Para relacionar os dados geofísicos com os possíveis litotipos, foi proposta uma sondagem com *Hollow Stem Auger*. Porém, o banco de sedimento encontra-se em uma área particular e, apesar das tentativas de contato com o proprietário para a autorização da atividade, não houve retorno, impossibilitando essa etapa.

Dentre os critérios para a instalação do sistema de FMR estão as informações sobre os sedimentos do leito do rio. Nos dados consultados não havia informações sobre os sedimentos fluviais dos corpos d'água em estudo. Por isso, surgiu-se a necessidade de coleta de amostras de sedimento de leito para avaliação granulométrica e da heterogeneidade dos materiais. Os resultados permitiram observar que nos dois corpos d'água as amostras têm 70% da fração granulométrica areia fina a média, exceto por uma amostra do rio Bauru (P1A5_topo no centro na margem interna). Além disso, a porcentagem das amostras com granulometria superior a 1,0 mm foi menor que 5%, salvo amostras a montante da curva no rio Bauru, também na margem interna (P1A6 e P1A7). A partir do Diagrama do Hjulstrom (1935), da velocidade da água (obtida em campo) e dos resultados granulométricos nos dois corpos d'água, nota-se que o processo fluvial predominante é a deposição.

Uma observação relevante é que devido à dragagem próxima ao Ponto CPA, no rio Bauru, o sedimento é removido por processos antrópicos e isso colabora para uma renovação dos sedimentos do leito.

A seleção de áreas para instalação de FMR requer a identificação de bancos de sedimentos ao longo dos corpos d'água superficiais. Para isso, é necessário a interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélite ou drone espaçadas temporalmente. A utilização de dados geofísicos de eletrorresistividade é interessante para compreensão e estimativa dos litotipos em subsuperfície. Entretanto, dados obtidos por métodos diretos (como sondagens) são necessários para a complementação e correlação das informações. Além disso, os dados do levantamento bibliográfico (características hidrogeológicas, hidrológicas, geológicas e estratigráficas, climáticas, geomorfológicas e avaliação da qualidade da água superficial e subterrânea) não apresentam informações específicas e na maioria das vezes abrangem escalas maiores do que a área de estudo, possuindo um nível de detalhe inferior e informações mais generalizadas.

8 CONCLUSÕES

A técnica de Filtração em Margem de Rio (FMR) tem se mostrado, nas aplicações pelo mundo, uma opção de tratamento da água superficial, devido à redução e à diluição dos parâmetros físicos, químicos e biológicos, e dependendo das condições, tem potencial

para contribuir no abastecimento de água a população, portanto torna-se interessante para os municípios que sofrem com a crise hídrica. Bauru é um município que sofre com os impactos da crise hídrica e a escassez dos recursos hídricos.

O desenvolvimento desse Trabalho de Formatura (TF) levantou informações sobre os principais corpos d'águas superficiais do município de Bauru, sobre os bancos de sedimentos nas margens desses corpos e sobre a técnica FMR, visando selecionar possíveis áreas para a instalação do sistema FMR dentro do município. Dentre os resultados e interpretações, há duas áreas selecionadas que foram estudadas, o Ponto CPA e o Ponto 6, respectivamente no rio Bauru e no ribeirão da Água Parada. Embora ambos os pontos apresentem condições para um projeto piloto de FMR, o Ponto CPA é o mais interessante, devido a espessura da lâmina d'água, possibilidade de remobilização do sedimento do leito e apresentar características de uma qualidade da água inferior. O Ponto CPA é um ponto interessante para avaliar o tratamento e a dissolução dos parâmetros físicos, químicos e biológicos. Considerando essas condições locais e os tipos de poços, o poço do tipo vertical é mais adequado, pois o tempo de infiltração e tratamento da água seria maior do que o do tipo horizontal. O ribeirão da Água Parada, embora apresentasse uma melhor qualidade da água, sua lâmina d'água fina permitiria um volume menor de captação de água e maior probabilidade de colmatação, devido homogeneidade dos sedimentos do leito e menos chance de remobilização.

Os impasses para o desenvolvimento do projeto e seleção da área foram que no rio Bauru é descartado o esgoto sem tratamento; o Ponto CPA está em propriedade particular de difícil comunicação com o proprietário do local; o ribeirão da Água Parada está localizado mais distante da zona urbana e o acesso não está tão acessível quanto o Ponto CPA; a vazão do ribeirão da Água Parada é inferior ao do rio Bauru, sendo sua lâmina d'água delgada; e os outros bancos de sedimentos não possuem acesso ou condições adequadas para a instalação do sistema FMR.

Considerando uma continuidade no estudo, idealmente seria necessário realizar um monitoramento da água do rio Bauru; um diálogo com os proprietários dos locais visando parcerias; sondagens para descrição litológicas das camadas geológicas identificadas; e instalação de poços de monitoramento para avaliação das características hidráulicas dos aquíferos aluviais próximos aos pontos.

9 REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA), 2021, Atlas Água: segurança hídrica do abastecimento urbano, Brasília-DF, p. 330.
- Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA), 2017, Atlas Esgoto: Despoluição de Bacias Hidrográficas, Brasília-DF, p. 88.
- Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA), ©2021, Outros Sistemas Hídricos - Cantareira: <https://www.ana.gov.br/sar/outros-sistemas-hidricos/cantareira> (acessado Maio 2022).
- AMPLA Consultoria de Planejamento, 2016a, Plano Municipal Saneamento Básico, Produto 3: Diagnóstico Técnico-Participativo dos Serviços de Saneamento Básico, Tomo II – Sistema de Abastecimento de Água, Agosto de 2016, p. 272.
- AMPLA Consultoria de Planejamento, 2016b, Plano Municipal Saneamento Básico, Produto 3: Diagnóstico Técnico-Participativo dos Serviços de Saneamento Básico, Tomo III – Sistema de Esgotamento Sanitário, Agosto de 2016, p. 220.
- Bauru, 2021, Prefeitura decreta Emergência Hídrica no Município de Bauru e DAE anuncia medidas de enfrentamento: <https://www2.bauru.sp.gov.br/materia.aspx?n=39570> (acessado Maio 2022).
- Christofolletti, A., 1981, Geomorfologia Fluvial: Volume 1 – O canal fluvial, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo – SP, p. 313.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747> (acessado Maio 2022).
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução CONAMA nº 409, de 28 de dezembro de 2009, dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp->

content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acs.pdf (acessado Maio 2022).

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Decisão de Diretoria nº 125/E, de 09 de dezembro de 2021: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/DD-125-2021-E-Atualizacao-dos-Valores-Orientadores-paa-solo-e-aguas-subterraneas.pdf> (acessado Junho 2022).

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), 2020, Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo, Série Relatório ISSN 0103 4103, São Paulo, p. 243.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), 2022a, Mapas Temáticos do Enquadramento dos Corpos Hídricos: Mapa da Hidrografia conforme Decreto 10.557/77 – UGRHI 13: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2016/04/UGRHI13.pdf> (acessado Agosto 2022).

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), 2022b, Mapas Temáticos do Enquadramento dos Corpos Hídricos: Mapa da Hidrografia conforme Decreto 10.557/77 – UGRHI 16: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2016/04/UGRHI13.pdf> (acessado Agosto 2022).

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Serviço Geológico do Brasil, 2004, Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – escala 1:1.000.000, Sistema de Informações Geográficas, Programa Geologia do Brasil, Brasília – DF.

Eckert, P., Irmscher, R., 2006, Over 130 years of experience with Riverbank Filtration in Dusseldorf, Germany: Journal of Water Supply Research and Technology – AQUA, v. 55, nº 4, p. 283-291, doi: 10.2166/aqua.2006.040.

Emmendoerfer, M. L., Martins, M., Pizzolatti, B. S., Soares, M. B. D., Signori, A. M., Sens, A. M, Luiz, M., 2021a, A review of seventeen years of bank filtration in Brazil: results, benefits and challenges - Part 1: state of Santa Catarina. Revista DAE, São Paulo, v. 69, nº. 233, p. 130 – 148, doi:10.36659/dae.2021.082.

Emmendoerfer, M. L., Martins, M., Pizzolatti, B. S., Soares, M. B. D., Signori, A. M., Sens, A. M, Luiz, M., 2021b, A review of seventeen years of bank filtration in Brazil: results, benefits and challenges - Part 2: states of Pernambuco and Minas Gerais. Revista DAE, São Paulo, v. 69, nº. 233, p. 149 – 163, doi:10.36659/dae.2021.083.

- Fernandes, L.A., Coimbra, A.M., 2000, Revisão Estratigráfica da Parte Oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo), *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, nº 4, p. 717 – 728.
- Freitas, J.B. de A., Cabral, J.J. da S. P., Paiva, A.L.R. de, Santos, S.N. dos, Silva, N.B. do N., 2018, A técnica de Filtração em Margem: histórico de aplicação no mundo e experiências brasileiras, *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 4, nº 1, p. 165 – 175.
- Gallas, J.D.F., 2000, Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental, Tese de Doutorado: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- Gandolfo, O.C.B., 2007, Um Estudo do Imageamento Geométrico na Investigação Rasa, Tese de Doutorado: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Griseck, T., Ray, C., 2009, Bank filtration as managed surface - groundwater interaction: *International Journal of Water*, v. 5, nº 2, p. 125-139, doi:10.1504/IJW.2009.028722.
- Griseck, T., Schoenheinz, D., e Ray, C., 2002, Siting and Design Issues for Riverbank Filtration Schemes: *Riverbank Filtration – Improving Source-Water Quality*, v. 43, cap. 14, p. 291–302, doi:10.1007/0-306-48154-5_15.
- Guerra, A.J.T., Cunha, S.B.da, 1995, *Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos*, 2ª Ed., Rio de Janeiro – RJ, p.472.
- Gunkel, G., Hoffmann A., 2009, Bank filtration of rivers and lakes to improve the raw water quality for drinking water supply, *Water Purification: Air, Water and Soil Pollution Science and Technology Series*, Nova Iorque, EUA, chapter 13, p. 137-169.
- Hallof, P. G., 1957, On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements: Cambridge, MIT, Ph.D. thesis.
- Hidrosan, 2014, Plano Diretor de Água do Município de Bauru – SP, Volume 1: Diagnóstico Qualitativo, Quantitativo, Técnico e Operacional do Sistema Existente - TOMO III – Levantamento de dados sobre os mananciais superficiais, Outubro de 2014, Bauru, p. 90.
- Hirata, R., Suhugusoff, A.V., Marcellini, S.S., Vilar, C.P., Marcellini, L., 2019, A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento, Brasília-DF, Trata Brasil, p. 35.

- Hiscock, K.M., Grischek, T., 2002, Attenuation of groundwater pollution by bank filtration: *Journal of Hydrology*, v. 266, n° 3-4, p. 139-144, doi:10.1016/S0022-1694(02)00158-0.
- Hu, B., Teng, Y., Zhai, Y., Zuo, R., Li, J., Chen, H., 2016, Riverbank filtration in China: A review and perspective, *Journal of Hydrology*, v. 541, p. 914 – 927.
- Hunt, H., Schubert, J., e Ray, C., 2002, Conceptual Design of Riverbank Filtration Systems: Riverbank Filtration – Improving Source-Water Quality.: v. 43, cap. 1, 19–27 p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2002, Mapa de Clima do Brasil – escala 1:5.000.000, Rio de Janeiro-RJ.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2018, Carta Geomorfológica – escala 1:250.000, Rio de Janeiro-RJ.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2020, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017, Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário, Rio de Janeiro-RJ, p. 124.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), 2021, Mapa de Estações. <https://mapas.inmet.gov.br/>. (acessado Agosto 2022).
- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A., França, A.B., 2007, Bacia do Paraná, In: *Cartas Estratigráficas - Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p.265-287.
- Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), Secretaria Nacional de Saneamento (SNS), 2021, Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021, Brasília-DF, p. 223.
- Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), Secretaria Nacional de Saneamento (SNS), 2022©, Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento, Brasília-DF: <http://snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-setor-saneamento> (acessado Julho 2022).
- Ministério da Saúde (MS), Portaria GM/MS nº 888, de 4 de Maio de 2021, dispõem sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade:

https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html
(acessado Maio 2022).

- Paiva, A.L.R. de, 2009, O Processo de Filtração em Margem e um Estudo de Caso no Rio Beberibe, Tese de Doutorado: Recife, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências.
- Panizza, A. de C., Fonseca, F. P., 2011, Técnicas de Interpretação Visual de Imagens, GEOUSP - Espaço e Tempo, São Paulo, nº 30, p. 30 – 43.
- Ramos, B., 2013, Conheça os diferentes métodos de tratamento de água: Portal EBC: <https://memoria.ebc.com.br/noticias/meio-ambiente/2013/03/contaminantes-novos-incentivam-novos-tratamentos-para-a-agua> (acessado Maio 2022).
- Ray, C., Grischek, T., Schubert, J., Wang, J., Speth, T., 2002, A perspective of Riverbank filtration: Journal of American Water Works Association, v. 94, nº 4, p. 149-260.
- Ribeiro, A.G., 1993, As Escalas do Clima, Boletim de Geografia Teorética, v. 23, nº 46, p. 288-294.
- Rocha, S.F., Marques, E.A.G., 2016, Caracterização Hidrogeológica de um Sistema de Filtração em Margem de Lago, Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, v. 39, nº 1, p. 133 – 141.
- Romero-Esquivel, L.G., Pizzalatti, B.S., Sens, M.L., 2016, Potencial de Aplicação da Filtração em Margem em Santa Catarina, Brasil: Interciência, v. 41, nº 11, p. 740-747.
- Sandhu, C., Kumar, P., Grischek, T., Ray, C., 2011, Potential for Riverbank filtration in India, Clean Techn Environ Policy, V. 13, p. 295 – 316, doi 10.1007/s10098-010-0298-0.
- Saraiva, F.A., 2010, Avaliação de Métodos Geofísicos no Comportamento Espacial em Plumas de Neocrochorume, Tese de Doutorado: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Setzer, J., 1966, Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo, Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai, São Paulo, p. 61.

SHS – Consultoria e Projetos de Engenharia, 2008, Diagnostico Ambiental e dos Recursos Hídricos do Município de Bauru – SP, contrato nº 4.294/04 e processo nº 37.456/03, Volume de Texto.

Soares, M., Pizzolatti, B.S., Sens, M.L., 2019, Estudo Hidrogeológico Preliminar para a Avaliação do Potencial de Colmatação do Sedimento das Margens da Lagoa do Peri e do Canal Sangradouro – Florianópolis – Santa Catarina – para a Implantação da Técnica da Filtração em Margem, Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, v. 42, nº 4, p. 46 - 55.

Soares, M., 2015, The Influence of High Infiltration Rates, Suspended Sediment Concentration and Sediment Grain Size on River and Lake Bed Clogging, Technischen Universität Berlin.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., 1990, Applied geophysics, University Press, 2ª Ed., p. 770.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2019, World Water Assessment Programme (WWAP): Leaving No One Behind, Paris, p. 186.

APÊNDICE 1

Características de alguns exemplos de Sistema de Filtração em Margem de Rio em operação pelo mundo

Características de alguns exemplos de Sistema de Filtração em Margem de rio em operação pelo mundo.

Informações		Poço Produtor						Corpo de Água Superficial				Aquífero				Clima	Referência	
		Quantidade/ Tipo	Capacidade máxima (m³/d)	Profundidade (m)	Profundidade da seção filtrante (m)	Distância do rio (m)	Tempo de viagem (dias)	Nome do corpo de Água Superficial	Descarga (m³/s)	Largura/ Profundidade (m)	Sedimento do leito	Tipo	Condutividade hidráulica (m/s)	Espessura (m)	Material			
Estados Unidos	SWCA, California	5H, 7V	322.000	-	24 a 30	0 a 75	5	Russo	<2,8 a >1.400	15 a 90/-	Areia	Não confinado	2,4 E-04 a 4,3 E-04	8 a 26	Areia e cascalho	Subtropical	Grischek et al. (2002)	
	Boardman, Oregon	2H	87.000	-	15 a 15,6	3 a 18	<1	Columbia	6.370 a 7.080	4.000/3	Silte a areia	Não confinado a semiconfinado	3,70E-03	15	Areia e cascalho; Homogêneo	Temperado	Grischek et al. (2002)	
	Lincoln, Nebraska	2H, 44V	132.000	-	12 a 18	<30 a >800	<7 a >14	Platte	<50 a 3.680	300/1,5	Areia	Não confinado a semiconfinado	1,40E-03	21 a 26	Areia e cascalho; Algumas lentes de argila	Temperado	Grischek et al. (2002)	
	Cedar Rapids, Iowa	2H, 53V	128.500	-	18 a 24	9 a 245	2 a 17	Cedar	4 a 2.025	225/2,5 a 3	Areia	Não confinado a confinado	1,5 E-4 a 1,1 E-3	15 a 20	Areia fina a média em cascalho; Lentes de silte e argila grosso	Temperado	Grischek et al. (2002)	
	Louisville, Kentucky	1H	76.000	-	24 a 30	<30 a 84	2 a 5	Ohio	6.300 a >28.000	600/10	Areia	Não confinado	6,00E-04	0 a 40	Areia e cascalho com silte e argila; Cascalho grosso e seixos	Temperado	Grischek et al. (2002)	
	Somersworth, New Hampshire	2V, 1V	5.300	-	12 a 16,5	46,00	<55	Salmon Falls	-	12/-	Areia a cascalho	semiconfinado	4,30E-04	15	Areia com alguns cascalhos; Lentes finas de silte	Temperado	Grischek et al. (2002)	
Alemanha	Dresden, Tolkewitz	71V	40.000	-	15 a 19	80 a 180	25 a 50	Elba	120 a 1.200	120/2	Cascalho grosso	Não confinado	1 E-3 a 2 E-3	10 a 13	Areia e cascalho; Homogêneo	Temperado	Grischek et al. (2002)	
	Meissen, Siebeneichen	3V	6.000	-	12 a 17	100 a 150	50 a 100	Elba	120 a 1.200	140/2	Cascalho	Não confinado	1 E-3 a 2 E-3	15 a 20	Areia média e grossa; Poucas lentes finas de areia	Temperado	Grischek et al. (2002)	
	Torgau, Ost	42V	150.000	-	32 a 52	300	80 a 300	Elba	120 a 1.200	130/2	Cascalho	Não confinado	6 E-4 a 2 E-3	40 a 55	Areia média e grossa; Poucas lentes de silte	Temperado	Grischek et al. (2002)	
	Dusseldorf, Flehe	12H, > 100V	-	-	-	70	-	Rena	2.200	-	-	-	-	-	-	-	Temperado	Eckert & Irmascher (2006); Ray (2002)
Índia	Haridwar	X	33.000	7 a 10	-	15 a 110	2 a >100	Ganga	-	-	-	-	-	-	-	-	Tropical	Sandhu et al. (2011)
	Patna	V	>3500	150 a 300	-	9 a 236	-	Ganga	-	-	-	-	-	-	-	-	Subequatorial	Sandhu et al. (2011)
	Srinagar	V	259-518	32 a 86	-	47 a 390	-	Alaknanda	-	-	-	-	-	-	-	-	Subtropical	Sandhu et al. (2011)
	Lago Nainital	V	24.100	22 a 37	-	5 a 84	8 a 30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Subequatorial ou Subtropical	Sandhu et al. (2011)
	Dehradun	H	140-430	1,5 a 2	-	Abaixo do leito	2 a 4 (minutos)	Bandal	-	-	-	-	-	-	-	-	Subequatorial ou Subtropical	Sandhu et al. (2011)
	Muzaffar	V	29-300	8 a 15	-	68	-	Nagar Kali	-	-	-	-	-	-	-	-	Subequatorial ou Tropical	Sandhu et al. (2011)
	Mathura	H	2.400	15,5 a 18	-	Abaixo do leito	1,5 a 3	Yamuna	-	-	-	-	-	-	-	-	Subequatorial ou Tropical	Sandhu et al. (2011)
Ahmedabad	H	110.000	10 a 11	-	Abaixo do leito	-	Sabarmati	-	-	-	-	-	-	-	-	Subequatorial	Sandhu et al. (2011)	
Brasil	Lago Pari	1V	-	12	-	-	-	Lago Pari	-	-/4,2	Areia fina a média	-	1,5 E-4	-	-	-	Subtropical	Romero-Esquivel et al. (2016)
	Rio Beberibe	1V	-	30	6,0 a 12,0 e 24,0 a 30,0	20	-	Rio Beberibe	-	6/-	Areia grossa e cascalho	-	3 E-4	-	-	-	Tropical	Paiva (2009)

APÊNDICE 2

Resultados da análise granulométrica, por difração a laser, e descrição dos sedimentos

Resultados da análise granulométrica, por difração a laser, e descrição dos sedimentos.

Corpo de Água Superficial	Localização	Amostra	Porcentagem > 1,0 mm (%)	Resultados de Análise Granulométrica por Difração a Laser										Estatísticas da Distribuição Granulométrica (phi) - Pearson								Descrição da amostra	
				Faixa Granulométrica (%)										Incluindo Material Pelítico				Excluindo Material Pelítico					
				Areia					Silte					Argila	Diâmetro Médio	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	Diâmetro Médio	Desvio Padrão	Assimetria		Curtose
				Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina	Grosso	Médio	Fino	Muito Fino											
-0,5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	9														
1410	707	354	177	88	44	22	11	5,5	2														
Rio Bauru	Margem interna	P1A1	0,58	0,00	3,13	64,27	32,52	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,857	0,436	0,043	2,56	1,857	0,436	0,043	2,56	Sem vegetação; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; e < 1 arredondado	
		P1A3_topo	1,03	0,00	0,23	46,46	52,36	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,102	0,433	0,026	2,561	2,102	0,433	0,026	2,561	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subarredondado e < 1 arredondado e bem arredondado	
		P1A3_base	0,79	0,00	3,24	55,19	40,68	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,953	0,5	0,076	2,431	1,953	0,5	0,076	2,431	Sem vegetação; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
		P1A4	2,84	0,00	3,85	56,06	36,38	0,64	1,12	0,92	0,39	0,48	0,17	2,029	0,853	3,341	20,004	1,91	0,493	0,074	2,51	Sem vegetação; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege médio; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
		P1A5_topo	4,91	0,00	4,85	39,24	24,20	1,14	7,00	7,60	5,41	4,00	6,56	3,3	2,384	1,239	3,461	1,883	0,574	0,471	3,73	Sem vegetação; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege - marrom; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado; em ambas as partes tem torrão de argila que não foi moído subanguloso	
		P1A5_base	1,48	0,00	7,07	67,06	22,71	0,00	1,52	0,65	0,47	0,45	0,06	1,845	0,829	3,602	21,636	1,724	0,449	0,069	2,611	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subarredondado e < 1 arredondado	
		P1A6	8,34	0,78	9,67	43,87	30,77	6,55	2,65	2,12	1,54	1,02	1,03	2,276	1,393	2,27	9,398	1,936	0,727	0,382	2,791	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege - marrom; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
	P1A7	31,84	2,88	12,83	44,09	25,10	6,17	4,22	2,17	1,21	0,66	0,66	2,143	1,356	1,985	8,181	1,814	0,779	0,508	3,006	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege médio; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado		
	Centro	P1C1	0,47	0,10	9,58	77,78	12,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,592	0,399	0,014	2,613	1,592	0,399	0,014	2,613	Sem vegetação; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege médio; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
P1C2		0,59	0,00	7,67	71,36	20,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,695	0,436	0,048	2,542	1,695	0,436	0,048	2,542	Sem vegetação; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado		
P1C3		1,06	0,04	7,55	76,72	15,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,645	0,401	0,013	2,609	1,645	0,401	0,013	2,609	Sem vegetação; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado		
Ribeirão da Água Parada	Margem interna	P6A2_topo	0,17	0,00	5,31	68,64	26,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,769	0,436	0,009	2,565	1,769	0,436	0,009	2,565	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subarredondado e < 1 arredondado e bem arredondado		
		P6A2_base	0,00	0,00	5,12	75,19	19,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,712	0,397	0,01	2,615	1,712	0,397	0,01	2,615	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subarredondado e < 1 arredondado e bem arredondado	
	Margem Externa	P6B1_topo	0,40	0,00	4,55	59,13	35,96	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,883	0,488	0,029	2,518	1,883	0,488	0,029	2,518	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subarredondado e < 1 arredondado e bem arredondado	
		P6B1_base	0,00	0,00	2,99	41,31	38,22	5,84	4,38	3,24	1,60	1,12	1,30	2,532	1,427	2,247	8,78	2,096	0,623	0,372	2,879	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege-marrom; gran. > 1 subarredondado e < 1 arredondado e bem arredondado	
	Centro	P6C1_topo	0,63	0,00	4,38	58,23	36,88	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,897	0,493	0,052	2,502	1,897	0,493	0,052	2,502	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subarredondado e < 1 arredondado e bem arredondado	
		P6C1_base	0,04	0,00	1,33	65,77	32,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,883	0,389	0,024	2,606	1,883	0,389	0,024	2,606	Sem vegetação; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subarredondado e < 1 arredondado e bem arredondado	
	Margem interna	P6A3	0,38	0,00	3,73	58,90	36,98	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,901	0,48	0,057	2,493	1,901	0,48	0,057	2,493	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
	Margem externa	P6B2	2,25	0,00	7,56	55,64	33,61	1,09	1,39	0,72	0,00	0,00	0,00	1,916	0,7	1,644	8,89	1,852	0,547	0,112	2,484	Presença de raízes e folhas; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege médio; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
	Centro	P6C2	0,19	0,00	6,45	55,68	35,40	1,16	0,85	0,46	0,00	0,00	0,00	1,92	0,64	1,353	8,198	1,88	0,539	0,098	2,477	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
	Margem interna	P6A4_topo	0,11	0,00	3,67	54,88	40,16	1,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,951	0,515	0,105	2,439	1,951	0,515	0,105	2,439	Sem vegetação; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
		P6A4_base	0,11	0,00	5,83	63,43	30,66	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,811	0,475	0,034	2,517	1,811	0,475	0,034	2,517	Sem vegetação; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
	Margem Externa	P6B3_topo	0,25	0,00	1,97	52,05	43,22	1,20	1,03	0,53	0,00	0,00	0,00	2,051	0,603	1,645	9,713	2,005	0,485	0,072	2,523	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp, msc; coloração bege claro; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
		P6B3_base	0,19	0,00	5,82	71,78	22,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,728	0,422	0,026	2,58	1,728	0,422	0,026	2,58	Sem vegetação; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
	Centro	P6C3_topo	0,23	0,00	4,97	61,66	33,16	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,847	0,479	0,059	2,507	1,847	0,479	0,059	2,507	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado	
P6C3_base		0,12	0,00	3,94	57,05	38,36	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,918	0,499	0,075	2,441	1,918	0,499	0,075	2,441	Pouca presença de raízes; Minerais: qtz (predomínio), máficos, fdp; coloração bege claro; gran. > 1 subanguloso a subarredondado e < 1 arredondado		