

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

GABRIEL HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA

TF-23/20

Caracterização litológica do Sistema Aquífero Bauru, no Município de São José do Rio Preto, através de dados construtivos de poços de produção de água, em contexto de anomalia de cromo na água

Orientadora: Prof. Dra. Veridiana Martins

**SÃO PAULO
2023**

SUMÁRIO

1. RESUMO.....	1
2. ABSTRACT.....	2
3. INTRODUÇÃO.....	3
4. METAS E OBJETIVOS.....	5
5. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	6
5.1 Contexto Geológico Regional.....	6
5.2 Contextualização do Problema.....	11
5.3 Análises Geoestatísticas.....	13
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
7. RESULTADOS OBTIDOS.....	18
8. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	35
9. CONCLUSÕES.....	43
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

1. RESUMO

São José do Rio Preto está localizado na UGRHI 15 (Bacia Hidrográfica do Turvo-Grande), que vem sofrendo com o problema de Cromo nas águas subterrâneas. O estudo desse elemento passou a fazer parte das recomendações do Relatório de Situação do Comitê de Bacia Hidrográfica Turvo-Grande (CBH-TG) e compreender os fatores que influenciam na ocorrência de cromo no Sistema Aquífero Bauru (SAB) deste município é fundamental para auxiliar na gestão deste recurso hídrico. Com o intuito de avançar na compreensão das causas das anomalias de Cromo em São José do Rio Preto e contribuir com a gestão dos recursos hídricos da região, o presente trabalho organizou e verificou a base de dados dos poços de captação adquiridas do projeto intitulado “Geologia e hidrogeoquímica da ocorrência do cromo hexavalente no sistema Aquífero Bauru (SAB) no município de São José do Rio Preto - bacia hidrográfica do Turvo-Grande”, firmado entre a Universidade de São Paulo e a CETESB. Foram realizadas análises geostatísticas iniciais dos dados onde foram calculados variogramas experimentais e ajuste do melhor modelo de variograma que descreve o posicionamento espacial das Formações e litologias de interesse e com isto foi confeccionado um modelo 3D, pelo método de krigagem ordinária, a partir do qual foram geradas seções que contribuíram para interpretações visando correlacionar as anomalias Cromo com as profundidades dos filtros, Formações e Litologias descritas no banco de dados. Com base nos modelos gerados e interpretações realizadas foi observado uma potencial profundidade preferencial do aquífero para a ocorrência de cromo, que se maior investigada e detalhada pode auxiliar na compreensão da anomalia de cromo identificada na região.

Palavras chave: geoestatística, hidrogeologia, geologia, sistema aquífero Bauru.

2. ABSTRACT

São José do Rio Preto is located in UGRHI 15 (Turvo-Grande Hydrographic Basin), which has been experiencing the problem of Chromium in groundwater. The study of this element became part of the recommendations of the Reports of the Turvo-Grande Hydrographic Basin Committee (CBH-TG) and understanding the factors that influence the occurrence of chromium in this county is essential to assist in the management of this resource water. In order to advance in understanding the causes of chromium anomalies in São José do Rio Preto and contribute to the management of water resources in the region, this work organized and verified the database of extraction wells acquired from the project entitled “Geologia e hidrogeoquímica da ocorrência do cromo hexavalente no sistema Aquífero Bauru (SAB) no município de São José do Rio Preto - bacia hidrográfica do Turvo-Grande”, signed between the University of São Paulo and CETESB. Geostatistical analyses of the data were performed, where calculations of experimental variograms were carried out, and the best variogram model describing the spatial positioning of the formations and lithologies of interest was fitted. With this, a 3D model was created, using the ordinary kriging method, from which sections were generated that contributed to interpretations aimed at correlating chromium anomalies with the depths of the filters, formations, and lithologies described in the database. Based on the generated models and interpretations, a potential preferred depth of the aquifer for chromium occurrence was observed, which, if further investigated and detailed, can assist in understanding the chromium anomaly identified in the region.

Palavras chave: geostatistics, hydrogeology, geology, Bauru aquifer system.

3. INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo Hirata et al. (2019), mais de 557 m³/s (17,5 km³/a) são extraídos, principalmente pelo setor privado, através da exploração de 2,5 milhões de poços tubulares, o suficiente para atender a demanda nas cidades e no campo, e movimentar uma economia de R\$ 56 bilhões ao ano. Quanto ao uso da água subterrânea, dentre os poços registrados, destaca-se o uso doméstico (cerca de 46%), seja para consumo, irrigação ou dessedentação animal (CPRM, 2020).

No estado de São Paulo, 52% dos municípios dependem da água subterrânea, especialmente os do noroeste do estado (CETESB, 2022). Segundo Kiang et al. (2016), o Sistema Aquífero Bauru (SAB), nessa região do estado, representa uma das principais fontes de água do recurso subterrâneo para os municípios.

Com base nessa demanda, a necessidade de avaliar a qualidade da água subterrânea vem crescendo. Esse crescimento na demanda também está refletido no aumento de publicações científicas sobre o tema, não só no Brasil, mas também internacionalmente. Entre 1961 e 1970, eram publicados apenas três artigos por ano sobre contaminação de águas subterrâneas (na pesquisa bibliográfica realizada na Scopus por "groundwater AND contamination"). Esse número salta para quinhentos durante a década de 1980 e nos últimos anos tem superado 1500 artigos por ano. Isolando as publicações que envolvem o Brasil, tem-se 853 trabalhos, sendo que até 2003, a média de publicações sobre o tema era abaixo de 10 por ano e apenas após 2006 essa média passou a ser mais de 20 por ano.

As contaminações da água subterrânea, podem ser causadas por ação antrópica, relacionada à atividade comercial/industrial, ou ter causas naturais, como é o caso da anomalia de Cr⁶⁺ no município de Urânia no estado de São Paulo (Bertolo, Marcolan e Bourotte, 2009). A anomalia de Cr⁶⁺ nas águas subterrâneas do município de Urânia (noroeste do estado de São Paulo), que foi identificada pela primeira vez em 1977 e vem sendo estudada desde então (Almodovar, 1995; Almodóvar, 2000; Bourotte et al., 2009; Bertolo et al., 2011a), ocorre nos poços que exploram o SAB. Em trabalhos mais recentes (Bertolo et al., 2011b), foi identificado que a anomalia de cromo tem origem na alteração de diopsídios presentes nas rochas, que liberam Cr³⁺ para a água por meio de uma reação relacionada com a redução de óxidos de Mn, através da qual o Cr³⁺ é oxidado para Cr⁶⁺ e colocado em

solução em ambiente oxidante, com elevado pH (Bertolo, Marcolan e Bourotte, 2009).

Localizado na UGRHI 15 (Bacia Hidrográfica do Turvo-Grande) e com uma população de 447 mil habitantes (IBGE, 2016), São José do Rio Preto (SJRP) vem sofrendo com o problema de cromo nas águas subterrâneas. As águas do SAB proveem 67% do abastecimento público e privado local através de uma rede de mais de 2 mil poços tubulares. Aproximadamente 470 poços cadastrados apresentam análises químicas para cromo, sendo que destes 7% contêm cromo acima do padrão de potabilidade em suas águas (CEPAS, 2021). O estudo desse elemento passou a fazer parte das recomendações do Relatório de Situação do Comitê de Bacia Hidrográfica Turvo-Grande (CBH-TG). Compreender os fatores que influenciam na ocorrência de cromo no SAB deste município é fundamental para auxiliar na gestão deste recurso hídrico.

O intuito deste trabalho de formatura é compilar e avaliar dados geológicos descritos nos perfis construtivos dos poços de captação, com pedidos de outorgas junto ao DAEE (Departamento de Águas e Esgotos), para a construção de perfis litológicos, mapas litológicos em diferentes profundidades e melhorar a caracterização estratigráfica do SAB na região. Este trabalho de formatura gerou um modelo do topo e base da Formação Serra Geral, de uma camada puramente de argilito da Formação Adamantina, e de uma camada rica em argila da Formação Adamantina, sendo elas consideradas mais relevantes no contexto do cromo de origem natural, levando em conta os trabalhos de Bertolo, Marcolan e Bourotte em Urânia.

4. METAS E OBJETIVOS

O presente trabalho tem o objetivo de caracterizar o SAB em São José do Rio Preto e realizar interpretações, quanto a litologia e a ocorrência de cromo na água subterrânea, e discorrer sobre as diferenças ou semelhanças encontradas no município de Urânia, conforme os trabalhos de Marcolan (2009); Bertolo et al. (2009), Bertolo et al. (2011a), Bertolo et al. (2011b); Bourotte et al. (2009).

Sendo assim, para alcançar o objetivo geral são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Organizar e sintetizar as informações geológicas existentes nos perfis construtivos de poços de abastecimento, visando otimizar o banco de dados geológicos do município;
- Sistematizar as informações da estratigrafia do Grupo Bauru, na região de São José do Rio Preto, com base nas Formações definidas na revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru realizada por Fernandes (1998), para comparação com os dados construtivos dos poços;
- Construir mapas de superfícies geológicas, em diferentes profundidades, e seções geológicas (etapa de geoprocessamento), com base no banco de dados construído, fazendo uso de softwares como Qgis, Surfer, Strater;
- Analisar os mapas, seções e modelos gerados e identificar as porções do aquífero com maior potencial de presença de cromo, através da integração dos dados levantados;

5. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

5.1 Contexto Geológico Regional

A Bacia Sedimentar Bauru (BSB) se formou no Neocretáceo em um evento de compensação isostática posterior ao acúmulo das lavas basálticas do Grupo Serra Geral, ocorrido no Cretáceo Inferior e serviu de substrato para a deposição dos sedimentos da bacia. Após a ruptura do continente gondwânico, a bacia se desenvolveu acumulando sedimentos por uma área de aproximadamente 370.000 km², nas atuais regiões ocidental do estado de São Paulo, noroeste do Paraná, leste do Mato Grosso do Sul, no Triângulo Mineiro e no sul de Goiás.

A parte oriental da bacia apresentada na figura 1, compreende cerca de 117.000 km², correspondendo a cerca de 47% do território paulista, segundo Paula e Silva (2003).

As unidades litológicas da BSB foram inicialmente agrupadas nas Formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília (Soares et al; 1980), mas Fernandes (1992) elevou a Formação Caiuá à condição de Grupo, com a Bacia Bauru sendo então composta pelos grupos Caiuá (formações Goio Erê, Rio Paraná e Santo Anastácio) e Bauru (formações Adamantina, Marília e Uberaba e analcimitos Taiúva). Posteriormente, Fernandes (1998) e Fernandes e Coimbra (2000) redefiniram as unidades do Grupo Bauru, substituindo a Formação Adamantina pela Formação Vale do Rio do Peixe. Assim, o grupo Bauru é composto pelas Formações Vale do Rio do Peixe, São José do Rio Preto, Presidente Prudente, Marília, Araçatuba e Uberaba.

Este estudo usou a divisão proposta por Fernandes e Coimbra (2000).

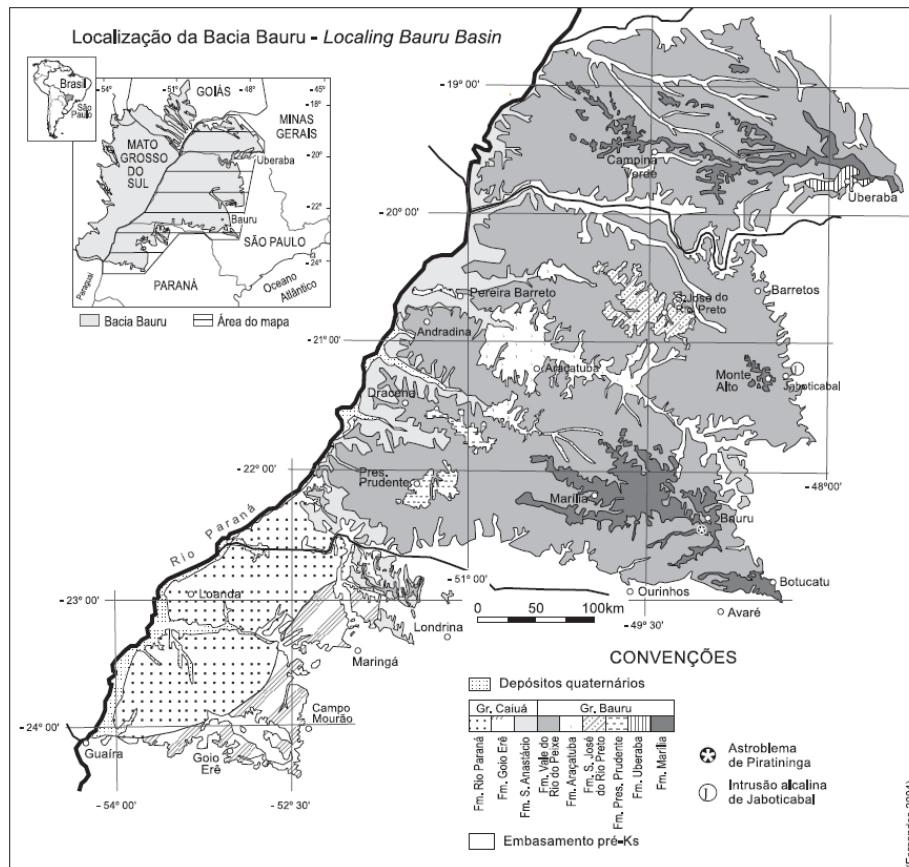


Figura 1 - Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru, retirado de Fernandes (2004).

5.1.1 Grupo Caiuá na área de estudo

Na região de São José do Rio Preto, o Grupo Caiuá é representado pela Formação Santo Anastácio, que se assenta sobre basaltos do Grupo São Bento (Fm. Serra Geral) e tem passagem transicional para o Grupo Bauru.

5.1.1.1 Formação Santo Anastácio

Ocorre sobretudo nas calhas dos baixos vales dos afluentes do rio Paraná, em São Paulo. Esta formação se caracteriza por arenitos quartzosos subarcoseanos, quase sempre maciços, finos a muito finos, pobremente selecionados, com a fração silte subordinada, pequena quantidade de matriz silto-argilosa, os grãos são subangulos a subarredondados e encobertos por uma película de óxido de ferro, que é responsável pela sua cor marrom-arroxeadado claro característica (Fernandes e Coimbra, 2000). Onde a unidade sobrepõe-se aos basaltos da Fm. Serra Geral prevalecem arenitos finos a muito finos com presença de cimentação e nódulos carbonáticos (Almeida et al. 1980).

Restritas ocorrências de estratos silto-argilosos entre as camadas de arenitos maciços podem ocorrer na Formação.

A unidade apresenta contatos transicionais, geralmente interdigitados com as Formações do Grupo Bauru, em regiões onde se deposita diretamente sobre os basaltos da Formação Serra Geral podem se encontrar estratos basais com fragmentos de basalto imersos em arenito imaturo (Fernandes, 1998).

5.1.2 Grupo Bauru na área de estudo

O Grupo Bauru na região de São José do Rio Preto é composto pelas Formações Vale do Rio do Peixe, Araçatuba e São José do Rio Preto.

5.1.2.1 Formação Vale do Rio do Peixe

Constitui o substrato atual de grande parte da região oeste de São Paulo e do Triângulo Mineiro e se trata da Formação mais aflorante na parte leste da Bacia Bauru. A unidade tem espessura média em torno de 100m.

A Formação Vale do Rio do Peixe tem geometria tabular típica e é composta por estratos de espessura submétrica, de arenitos maciços ou estratificados intercalados com lamitos arenosos. Os arenitos são muito finos a finos, marrom-claro rosado a alaranjado, de seleção moderada a boa, com intercalações de siltitos de cores creme a marrom (Fernandes e Coimbra, 2000). Tem aspecto maciço ou estratificação cruzada tabular e acanalada de médio a pequeno porte (Fernandes e Coimbra, 2000).

A Formação Vale do Rio do Peixe repousa diretamente sobre os basaltos da Formação Serra Geral (Grupo São Bento), segundo Fernandes (1998). Passa gradualmente, a oeste e sudoeste, para a Formação Santo Anastácio, encobrindo-a. Para o topo, a Formação Vale do Rio do Peixe tem contato marcado por diastemas com as formações Presidente Prudente e São José do Rio Preto (Fernandes e Coimbra, 2000).

5.1.2.2 Formação Araçatuba

Ocorre na região de Araçatuba (SP), a unidade repousa diretamente sobre basaltos da Formação Serra Geral. Lateralmente, interdigita-se com a Formação Vale do Rio do Peixe, que lhe encobre regionalmente, apresentado na Figura 2. O contato entre as formações Vale do Rio do Peixe e Araçatuba é plano e sem feições de erosão do topo da unidade inferior são observadas alternâncias entre as associações até o domínio da superior (Fernandes e Coimbra, 2000).

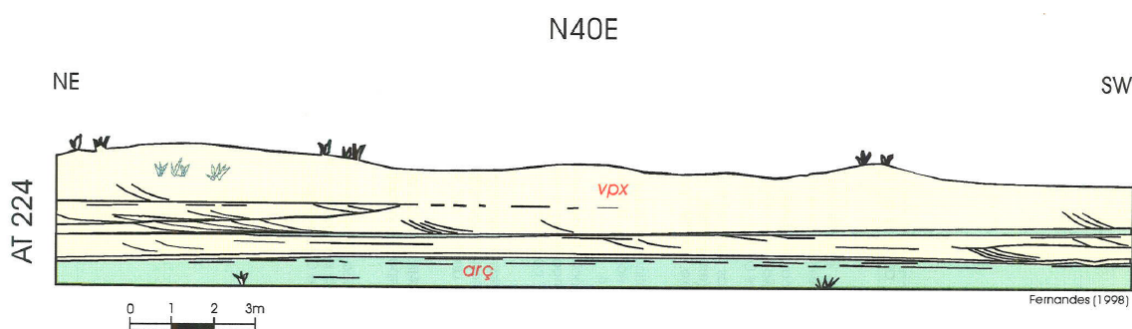


Figura 2 - Contato recorrente entre as Formações Vale do Rio do Peixe e Araçatuba, retirado de Fernandes (1998).

Caracteriza-se por uma sucessão de estratos tabulares silto-arenosos, de aspecto maciço e espessura centimétrica a decimétrica. É constituída por siltitos e arenitos muito finos, de cor cinza-esverdeado típica a cinza claro, com frequente cimentação carbonática que pode formar crostas tabulares horizontais paralelas à estratificação, gretas de ressecção e marcas de raízes são comuns na unidade (Fernandes e Coimbra, 2000).

5.1.2.3 Formação São José do Rio Preto

Ocorre nas cotas mais altas da região da cidade de São José do Rio Preto com espessura máxima de cerca de 60 m. Sobrepõe-se à Formação Vale do Rio do Peixe, como apresentado na Figura 3, em contato transicional a localmente erosivo.

Essencialmente, a unidade é constituída por arenitos finos a muito finos, de cores marrom-claro a bege, seleção moderada a má, com estratificação cruzada acanalada a tabular tangencial na base. São frequentemente conglomeráticos, com frações de areia média e grossa secundárias. Os clastos são nódulos carbonáticos, fragmentos de lamitos e argilitos, e seixos silicosos (Fernandes e Coimbra, 2000).

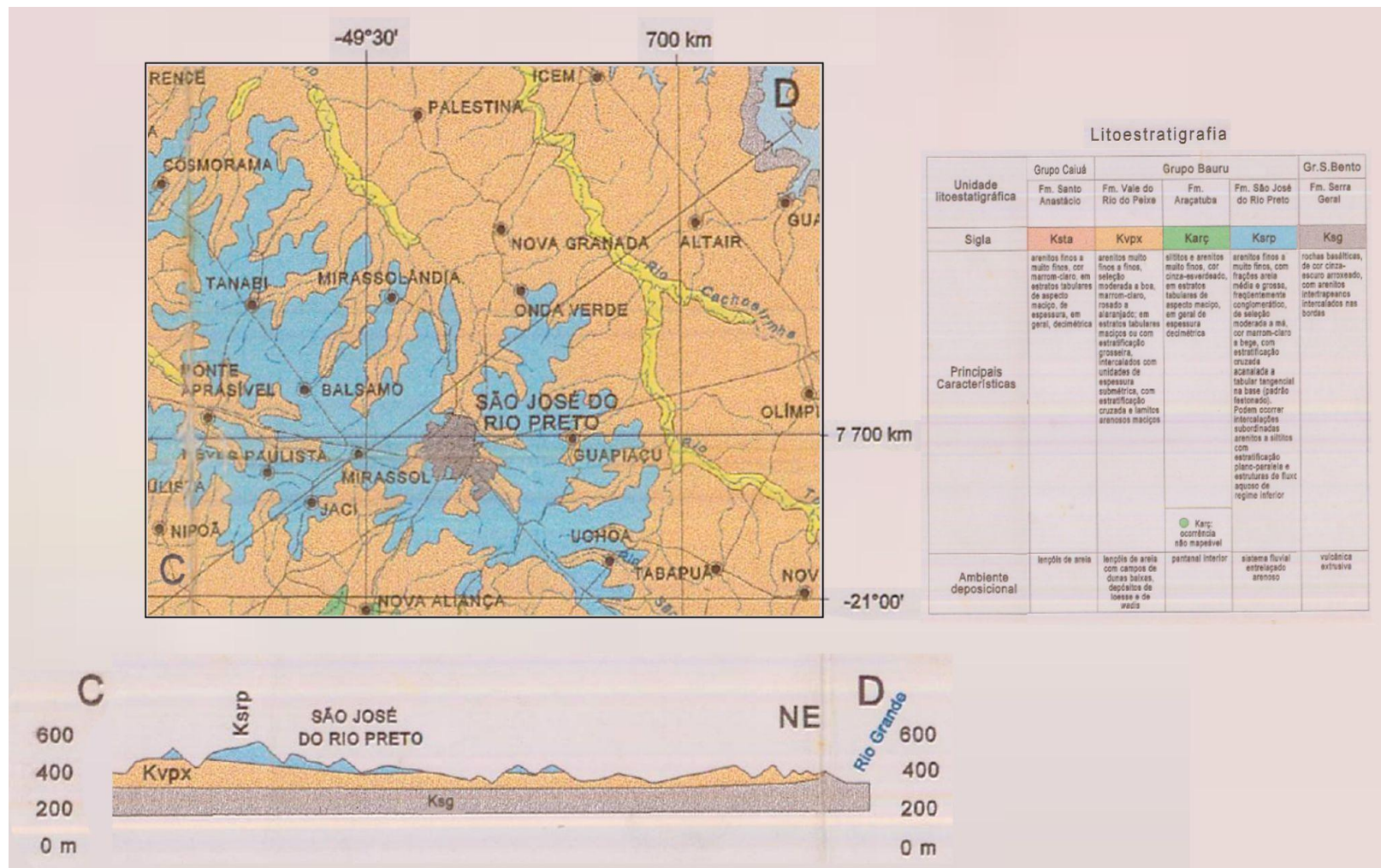


Figura 3 - Mapa litoestratigráfico e seção geológica da região de São José do Rio Preto, modificado de Fernandes (1998).

5.2 Contextualização do Problema

Segundo relatório da qualidade das águas subterrâneas da CETESB (2022), foram detectadas no Sistema a Aquífero Bauru, no período de 2019 a 2021, concentrações de cromo de <0,20 a 86,5 µg/L, ultrapassando o padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde de 50 µg/L.

Trabalhos desenvolvidos em Urânia (Marcolan, 2009; Bertolo et al., 2009, Bertolo et al., 2011a, Bertolo et al., 2011b; Bourotte et al., 2009) indicam que a anomalia de cromo nessa região é de fonte natural e está condicionada pelas características litológicas do aquífero e a interação entre a rocha e a água. Esses autores observaram que, a partir de análises de capacidade de troca catiônica (CTC) das rochas, era possível correlacionar zonas com altas concentrações de sódio adsorvido, com zonas de altas concentrações de sódio e cromo dissolvidos na água.

Foram observadas, no trabalho de Marcolan (2009), estratificações nas concentrações de Cr no aquífero, no qual as porções mais intermediárias e profundas do aquífero apresentam maiores concentrações de Cr⁺⁶ e parecem estar associadas a ambientes de pH e Eh elevados. Também foi proposto por Marcolan (2009) que a fonte mais provável de cromo é o mineral Diopsídio, que apresentou concentrações de até 12.600 ppm de Cr, e por meio de sua dissolução disponibilizaria Cr⁺³ na forma de um hidróxido de ferro e cromo que seguida por uma reação redox, relacionada a redução de óxidos de manganês, oxidaria o Cr⁺³ para o Cr⁺⁶.

Uma considerável concentração de cromo é ainda observada nas capas de argilominerais com óxidos/hidróxidos de ferro que recobrem os minerais da rocha, com teores variando de 220 a 650 ppm. Este cromo provavelmente se encontra adsorvido nestes argilominerais (Marcolan et al., 2008).

São José do Rio Preto se localiza a aproximadamente 160km de Urânia e está inserida no mesmo contexto geológico observado em Urânia. Em São José do Rio Preto foi identificado por Rios et al. (2018), a partir de informações existentes nos cadastros de poços de produção, que há condições hidrogeoquímicas similares às descritas em Urânia, sendo um forte indicativo que a anomalia de Cr⁺⁶ local também pode ter origem natural.

O município de São José do Rio Preto está localizado na porção noroeste do Estado de São Paulo na UGRHI 15 (Bacia Hidrográfica do Turvo-Grande),

apresentada na figura 4. “Nessa UGRHI todos os municípios captam águas subterrâneas para o abastecimento público, sendo que em 86% desses a água para consumo humano vem exclusivamente desse recurso, o que corresponde a 89% da população abastecida por mananciais subterrâneos” (CETESB, 2022).

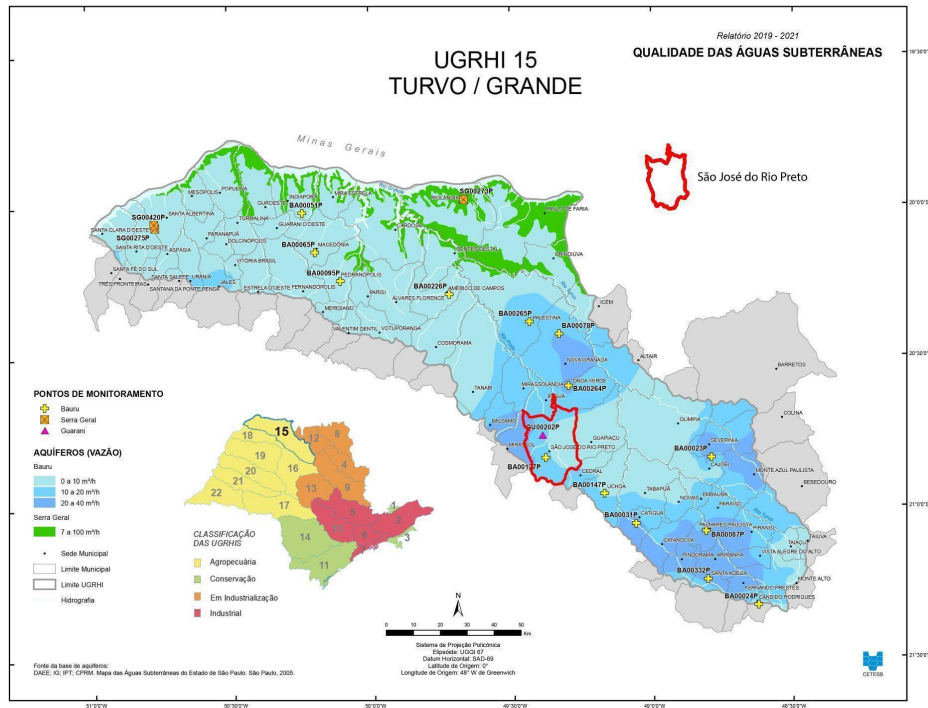


Figura 4 - UGRHI 15 Bacia Hidrográfica do Turvo-Grande, modificado de CETESB (2022).

A área em estudo está inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná, sobre um embasamento composto por derrames basálticos do Grupo Serra Geral, na região afloram as Formações, caracterizadas por Fernandes (1998), Vale do Rio do Peixe e São José do Rio Preto, como apresentado na Figura 5, sendo ambas pertencentes ao Grupo Bauru.

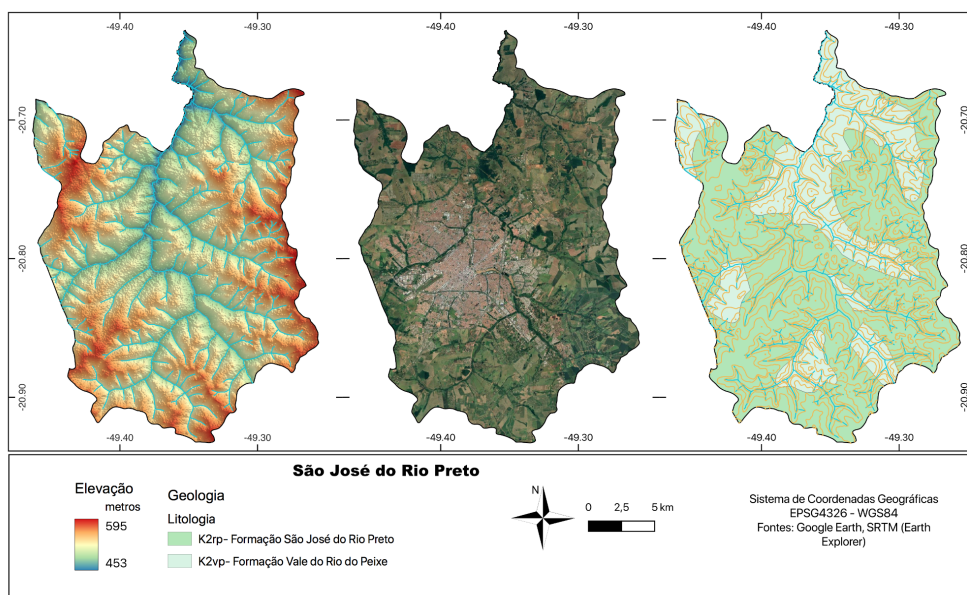


Figura 5 - Mapas de elevação (à esquerda), geológico (à direita) e imagem de satélite de São José do Rio Preto, retirado de CEPAS (2021).

5.3 Análises Geoestatísticas

A geoestatística se utiliza de métodos de predição para estimar variáveis em pontos não amostrados com base em dados pontuais amostrados e é amplamente utilizada na geologia na avaliação de recursos minerais para estimação de recursos

A krigagem é uma função geoestatística de interpolação amplamente utilizada para a estimação das variáveis de interesse, as formas mais comuns da krigagem são a krigagem simples e a krigagem ordinária.

A krigagem ordinária, utilizada neste trabalho, é um método robusto que minimiza a variância do erro, além de ser um interpolador exato. Este método faz uso da correlação espacial existente entre amostras, modelada pela função variograma, que descreve quantitativamente a variação no espaço de um fenômeno regionalizado.

Trabalhos como o de Wiese e Nützmann (2011) utilizaram métodos geoestatísticos para delimitar espacialmente um aquífero utilizando dados de variação de pressão hidráulica em poços de monitoramento em Berlin, Alemanha. Cuiuli (2018) que com base em diversas descrições estratigráficas de poços de monitoramento restaurou, com métodos geoestatísticos, o topo de depósitos argilosos em Calabria, Itália. E Petroni (2021) que utilizou geoestatística para o mapeamento tridimensional de valores de condutividade hidráulica em uma porção do Aquífero Boa Viagem, região metropolitana de Recife.

Os trabalhos supracitados, conjuntamente com o trabalho de Landim e Yamamoto (2013) serviram de base teórica para realização da análise geoestatística e modelagem dos dados das formações.

O uso da geoestatística para a obtenção de mapas de topo de paleo-relevos já foi abordado por Archela, Costa e Raminelli (2013), que realizaram a modelagem geoestatística para reconstrução do paleo-relevo sotoposto à Bacia Sedimentar de Curitiba.

5.3.1 Variograma

A função variograma $2\gamma(h)$ é definida como sendo a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância h , conforme a seguinte expressão (Landim e Yamamoto, 2013):

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\}$$

Equação 1 - Função variograma

onde: $2\gamma(h)$ é a função variograma, n é o número de pares de pontos separados por uma distância h , $Z(x)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x , $Z(x+h)$ é o valor da variável regionalizada no ponto $(x+h)$. Comumente utiliza-se da função semivariograma, que é simplesmente a metade da função variograma.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \cdot \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2$$

Equação 2 - Função semivariograma

Para que o variograma reflita as possíveis características espaciais do fenômeno em estudo, ele deve ser calculado em diversas direções. No caso em que os variogramas são semelhantes em todas as direções o variograma é considerado omnidirecional, ou seja, os dados não apresentam anisotropia. As variáveis apresentam anisotropia quando em diferentes direções os variogramas apresentam diferentes propriedades. O variograma experimental considera a variabilidade estrutural do variograma nas diferentes direções.

O ajuste de uma função matemática ao variograma experimental calculado nas direções de interesse é denominado modelagem de variogramas.

5.3.2 Validação Cruzada

Para checar se a função levantada pelo ajuste do variograma é apropriada e estabelecermos os melhores parâmetros de vizinhança realizou-se a validação cruzada, onde são retirados valores de pontos e os mesmos são estimados de forma a comparar se a função do variograma estima valores iguais ou próximos ao valor real retirado. O resultado ideal de uma validação cruzada seria a reta de regressão estar mais próxima da bissetriz e que a dispersão em torno desta reta fosse mínima ($R^2 = 1$).

5.3.3 Krigagem Ordinária

Após o cálculo dos variogramas experimentais e ajuste do modelo teórico passa-se ao cálculo de estimativas pela técnica da krigagem ordinária. A krigagem é um método que permite estimar o valor desconhecido $Z^*(X_0)$ associado a um ponto, área ou volume, a partir de um conjunto de n dados $\{Z(x_i), i=1,n\}$ disponíveis (Landim e Yamamoto, 2013).

O estimador poderá ser obtido como uma combinação linear dos dados disponíveis, conforme (Landim e Yamamoto, 2013), onde $Z^*(X_0)$ é o valor estimado para o local X_0 não amostrado; $Z(X_i)$ é o valor obtido por amostragem no campo; n é o número de amostras vizinhas e λ_i são os pesos aplicados em cada $Z(X_i)$ ou seja, ponderadores obtidos pela resolução do sistema linear de equações:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i)$$

Equação 3 - Função da krigagem

O sistema de Krigagem Ordinária tem solução única se o modelo de variograma for válido.

A localização espacial das Formações após o processo de krigagem foi utilizada para gerar um modelo geológico regional e avaliar a correlação entre a concentração de Cr e profundidade dos filtros.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

O software escolhido para armazenar, gerir e tratar os dados, amplamente utilizado na fase inicial do projeto, foi o Microsoft Excel. O banco de dados utilizado está relacionado ao projeto intitulado “Geologia e hidrogeoquímica da ocorrência do cromo hexavalente no sistema Aquífero Bauru no município de São José do Rio Preto - bacia hidrográfica do Turvo-Grande”, realizado através do convênio 062138 (Projeto FUSP 3413), firmado entre a Universidade de São Paulo e a CETESB, tendo a Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo (FUSP) como interveniente.

As informações que compõem o banco de dados utilizado foram retiradas de dados cadastrais de poços de monitoramento/captação, disponíveis em base de dados de projetos anteriores e sistemas de informações geológicas (SIG) como SIAGAS e DAEE.

Após a aquisição dos dados foi realizado um controle de qualidade das informações obtidas através do qual foram removidas duplicatas, correções e ajustes de coordenadas, conversão de datums se necessário e adequação de descrições litológicas a um padrão estratigráfico único da Bacia Bauru, adotando o trabalho de Fernandes (1998) e Fernandes e Coimbra (2000).

Além do enquadramento nas Formações descritas por Fernandes (1998), os dados foram separados entre camadas formadas por basalto, arenito/siltito, argilito e arenito/siltito argiloso. Optou-se por realizar essa subdivisão por três razões listadas a seguir:

- Isolar as camadas com maior presença de argilominerais, camadas que potencialmente favorecem a presença do cromo no aquífero, segundo Marcolan (2009);
- Devido a falta de detalhamento da litologia em algumas das sondagens;
- Polimento do banco de dados, de forma a sintetizar as descrições geológicas prolixas, como no exemplo do log do ponto SJRP0222 (Figura 6).

00N_USP	Coord X	Coord Y	Perf_Geol_d e	Perfil_geol_ ate	LITOLOGIA
SJRPO222	665.310,00	7.692.160,00	50,00	66,00	Arenito de coloração esbranquiçada, granulometria de fina a muito fina, grãos sub-angulares com pouco teor de matriz carbonática.
SJRPO222	665.310,00	7.692.160,00	66,00	70,00	Arenito de coloração marrom claro, granulometria de fina a muito fina, grãos sub-angulares.

00N_USP	Coord X	Coord Y	Perf_Geol_d e	Perfil_geol_ ate	LITOLOGIA_Pa dronizada
SJRPO222	665.310,00	7.692.160,00	50,00	70,00	Arenito/Siltito

Figura 6 - Ajuste do banco de dados tendo como referência o conteúdo de argila nas camadas.

Foi realizada uma interpretação geoestatística inicial, com base nas seguintes características: i) presença de argilominerais e litologia (basalto, arenito/siltito, argilito e arenito/siltito argiloso); ii) enquadramento na subdivisão de Fernandes (1998); iii) profundidade dos filtros; e iv) concentração de cromo. Nesta fase inicial foram analisados histogramas, boxplots e estatísticas descritivas como média, mediana, moda, além da análise das medidas de assimetria e curtose, de forma a compreender melhor a distribuição espacial das litologias e Formações.

Após o tratamento dos dados, foi realizada a krigagem das unidades geológicas no software Isatis, de forma a gerar um modelo geológico da região, para facilitar a interpretação dos topos e bases das Formações de interesse e gerar um modelo geológico tridimensional do local, de onde foram retiradas seções geológicas em cortes que englobam pontos com presença de cromo acima dos Valores de Referência para o metal (50 µg/L).

Com estas seções geológicas geradas, foram feitas correlações entre Formação, litologia padronizada com base na presença de argila, presença de filtros e concentração de cromo. Assim, foram identificadas as porções do aquífero com maior probabilidade de ocorrência do cromo.

7. RESULTADOS OBTIDOS

O levantamento bibliográfico ajudou na melhor compreensão da Geologia Regional e o contexto em que se insere o SAB no município de São José do Rio Preto. As bibliografias levantadas relacionadas a geoestatística e modelagem auxiliaram durante o processamento e análise dos dados.

A organização e adequação do banco de dados se mostrou desafiadora, visto que há 2406 poços registrados no banco de dados e parte deles não apresenta algumas informações como coordenadas que estão erradas ou não estão localizadas no município, portanto, revisões foram realizadas continuamente desde o início do trabalho. Destes 2406 poços registrados, 36 deles não apresentam coordenadas registradas nos dados oficiais e 73 se encontram fora do município de São José do Rio Preto, mesmo após conferência das coordenadas junto aos registros oficiais dos poços (fichas fotografadas). Sendo assim, o banco de dados a ser analisado contém 2297 poços.

Na figura 7, pode-se observar que a distribuição espacial dos poços apresenta uma área com escassez de dados nas porções oriental e sul e um detalhamento maior na porção central do município.

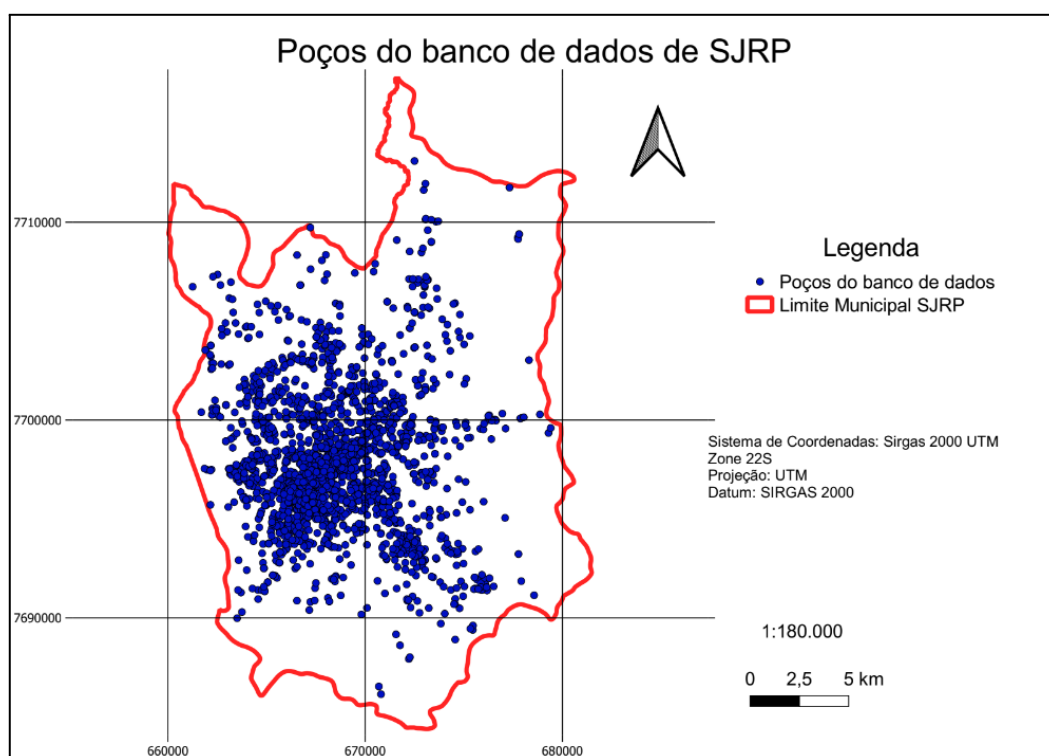


Figura 7 - Distribuição espacial dos poços contidos no banco de dados.

No entanto, apesar do grande número de registros, muitos deles não contêm a informação mais relevante para a análise litoestratigráfica da região que são as descrições geológicas. Dentre os 2297 poços com registros dentro do município de São José do Rio Preto, apenas 414 apresentam descrições geológicas. Quanto a descrição geológica registrada, alguns poços apresentam um grande detalhamento e outros uma descrição sucinta e generalizada das litologias encontradas na perfuração, como por exemplo o poço SJRP0174 que apresenta de 18 a 144m a seguinte descrição geológica “Arenitos pertencentes à Formação Adamantina”, sendo assim, foi realizada uma subdivisão para avaliar o grau de detalhamento das descrições dos poços, onde foram separados com base nas compartimentações descritivas da seguinte maneira:

Poços com 3 compartimentações = considerados como classe “Ruim”

Poços com 4 a 6 compartimentações = considerados como classe “Ok”

Poços com 7 a 9 compartimentações = considerados como classe “Boa”

Poços com 10 ou mais compartimentações = considerados como classe “Ótima”

As descrições dos poços de qualidade “Ok” e “Ruim” (Figura 8) se mostraram mais atrapalhar do que agregar na informação do modelo devido a falta de informação e diminuir o peso do processamento dos dados, logo, optou-se por removê-los.

00N_USP	Coord X	Coord Y	Perf_Geol_de	erfil_geol_at	LITOLOGIA	LITOLOGIA_Padr onizada	Grupo_ou_Formacao Original	Grupo_ou_Formacao Interpretado	Qualidade da descrição geológica
SJRP0174	676.000,00	7.692.008,00	0	18	Solo areno argiloso, vermelho	Solo	Formação Adamantina	Formação São José do Rio Preto	Ruim
SJRP0174	676.000,00	7.692.008,00	18	144	Arenitos pertencentes a Formação Adamantina	Arenito/Siltito	Formação Adamantina	Formação Vale do Rio do Peixe	
SJRP0174	676.000,00	7.692.008,00	144	183	Arenitos pertencentes a Formação Santo Anastácio	Arenito/Siltito	Formação Santo Anastácio	Formação Santo Anastácio	

Exemplo de poço com descrição geológica “Ruim” SJRP0174.

00N_USP	Coord X	Coord Y	Perf_Geol_de	erfil_geol_at	LITOLOGIA	LITOLOGIA_Padr onizada	Grupo_ou_Formacao Original	Grupo_ou_Formacao Interpretado	Qualidade da descrição geológica
SJRP0211	675.546,00	7.692.053,00	0	30	Lato solo avermelhado.	Solo	Formação Adamantina	Formação Vale do Rio do Peixe	Ok
SJRP0211	675.546,00	7.692.053,00	30	138	Arenitos pertencentes a Formação Adamantina	Arenito/Siltito	Formação Adamantina	Formação Vale do Rio do Peixe	
SJRP0211	675.546,00	7.692.053,00	138	164	Arenitos pertencentes a Formação Santo Anastácio	Arenito/Siltito	Formação Santo Anastácio	Formação Santo Anastácio	
SJRP0211	675.546,00	7.692.053,00	164	164,2	Basalto alterado, cinza chumbo.	Basalto	Formação Serra Geral	Formação Serra Geral	

Figura 8 - Exemplo de poço com descrição geológica “Ok” SJRP0211.

Sendo assim, restaram 97 poços com descrições boas e ótimas distribuídas principalmente pela área central, oeste e noroeste da região de estudo, como se observa na Figura 9. As regiões nordeste, leste e sul apresentam uma escassez de dados.

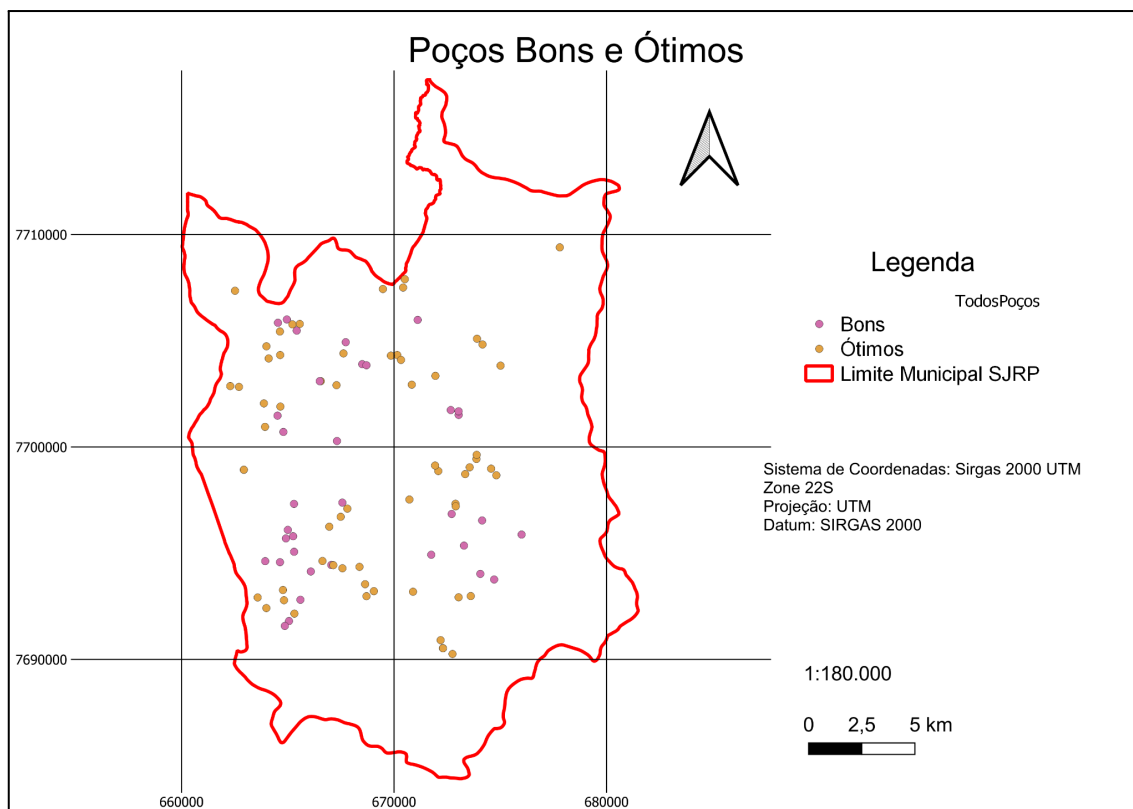


Figura 9 - Poços registrados que apresentam descrição geológica satisfatória para análise.

A classificação dos dados nas Formações segundo Fernandes e Coimbra (2000) levou em conta as descrições das Formações pelos autores e os dados descritos nos relatórios de sondagens.

A descrição predominante das Formações observadas nos logs se inicia com a Formação São José do Rio Preto sobreposta à Formação Vale do Rio do Peixe, seguida pela Formação Santo Anastácio e na base das sondagens ocorre a Formação Serra Geral (Figura 10). Em alguns locais foi observado o contato direto da Formação Vale do Rio do Peixe com a Formação Serra Geral. Abaixo da Formação Serra Geral foram sinalizadas ocorrências das Formações Botucatu/Pirambóia, no entanto, tais Formações não foram levadas em consideração neste estudo.

Destaca-se a presença da Formação Santo Anastácio, que segundo a seção apresentada na bibliografia consultada (Figura 3), não ocorreria na região. No entanto, foram levadas em consideração as descrições litológicas e o enquadramento na Formação descritos nos logs originais. No caso da Formação Araçatuba foram encontrados poucos registros descontínuos nos logs originais e tais registros em sua descrição litológica não batiam com o referencial teórico da Formação, siltitos e arenitos muito finos de cor cinza-esverdeado típica, sendo assim, optou-se por retirar as poucas ocorrências registradas da Formação Araçatuba. No entanto, ressalta-se que quando ocorriam, tais registros se encontravam na base da Formação Vale do Rio do Peixe e topo da Formação Santo Anastácio, região que poderá ser melhor detalhada em estudos futuros.

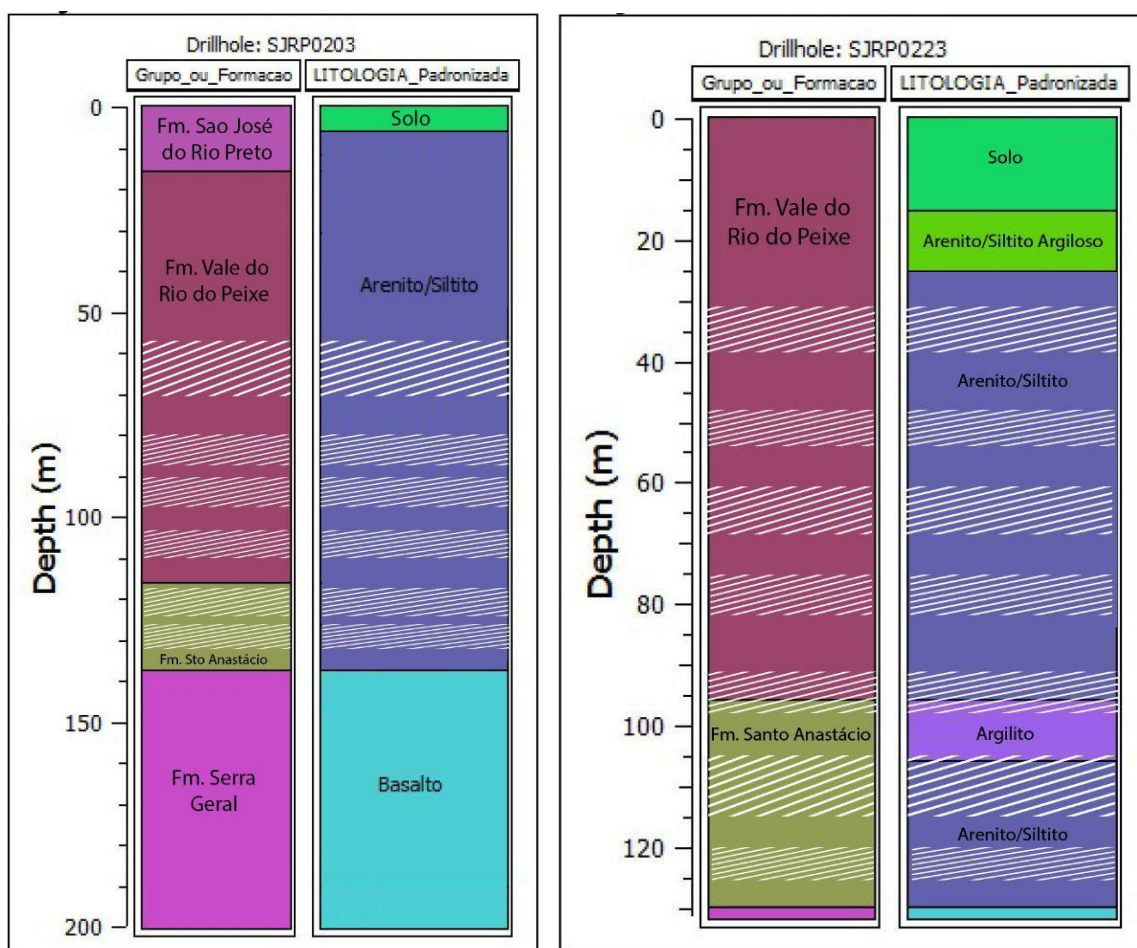


Figura 10 - Log da sondagem SJRP0203 (ocorrência de Cr acima do V.I 0,064 mg/L) e log da sondagem SJRP0223 (ocorrência de Cr abaixo do V.I 0,03).

Dentre as Formações analisadas a Formação São José do Rio Preto, está presente nas cotas mais altas da região de São José do Rio Preto e a base da Formação apresenta profundidades mínimas de 12m, máximas de 48m com mediana de 25,73m e moda de 28m a 32m ocorrendo em 61 dos 97 poços analisados como se pode observar no histograma da Figura 11.

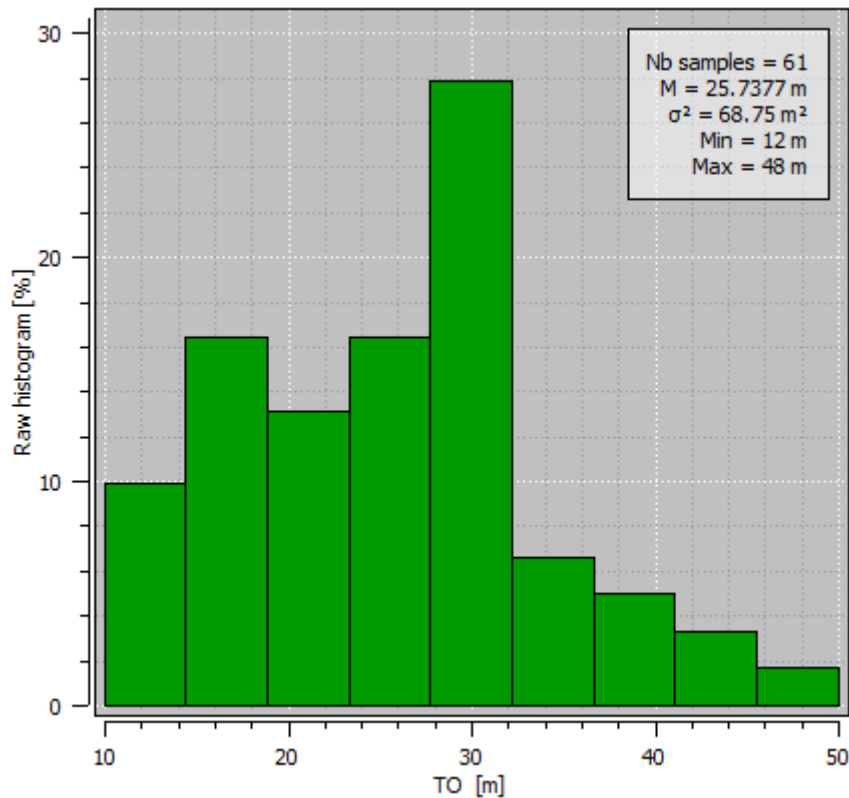


Figura 11 - Histograma de frequência da base da Formação São José do Rio Preto.

A Formação Vale do Rio do Peixe é a mais presente na região, descrita em 96 dos 97 poços analisados, e está aflorante em 36% dos pontos analisados. Quando não aflora, o topo da unidade se encontra na base da Formação São José do Rio Preto, descrita anteriormente. A base da Formação tem profundidades mínimas e máximas bem amplas descritas com 62 e 191m, respectivamente, e apresenta uma mediana de 119,45m como descrito pelos histogramas apresentados na Figura 12.

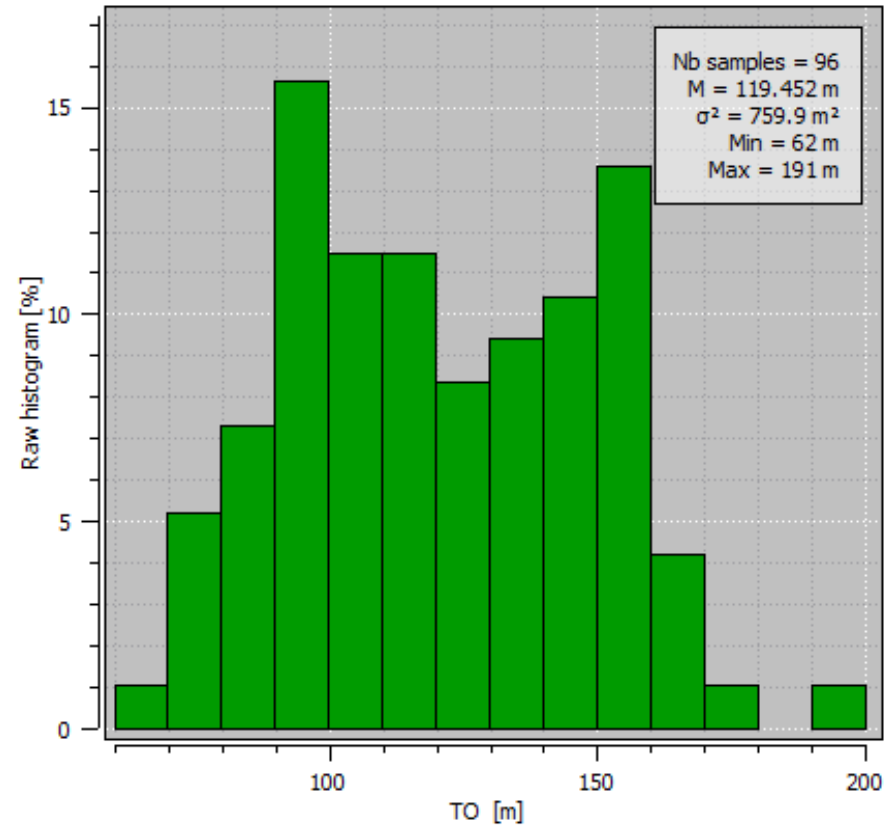
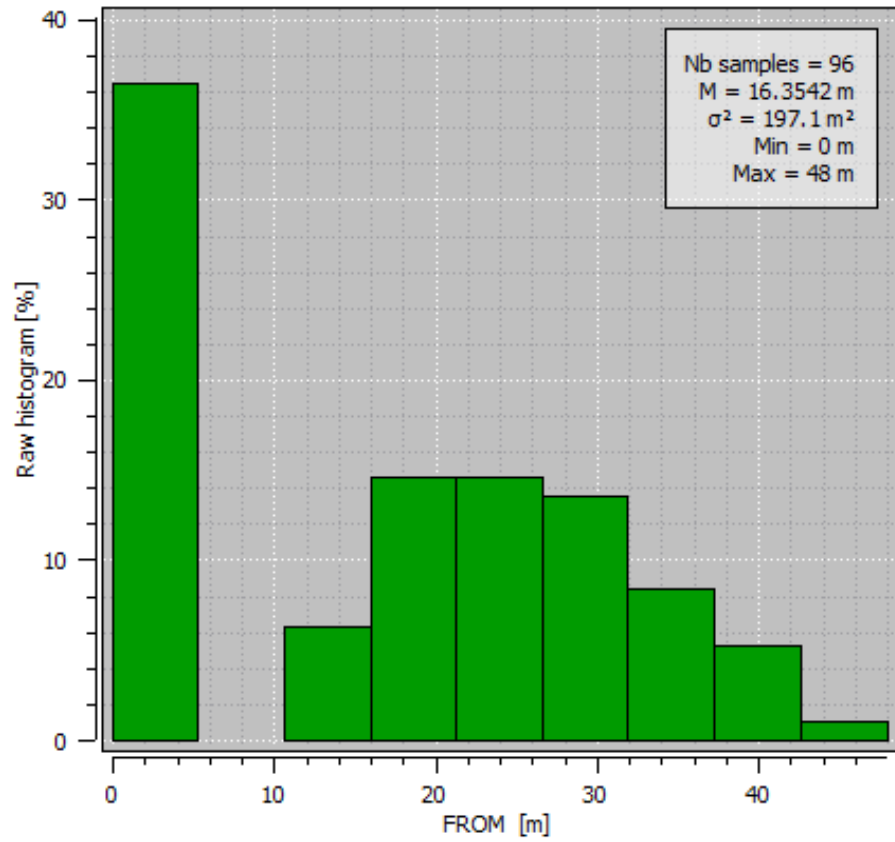


Figura 12 - Histograma de frequência do topo (esquerda) e da base (direita) da Formação Vale do Rio do Peixe.

A Formação Santo Anastácio é a segunda mais presente na região, descrita em 89 dos 97 poços analisados e apresenta seu topo na base da Formação Vale do Rio do Peixe, descrita anteriormente. A base da Formação tem profundidades mínimas de 95m e máximas de 243m, e apresenta uma mediana de 166,15m (Figura 13).

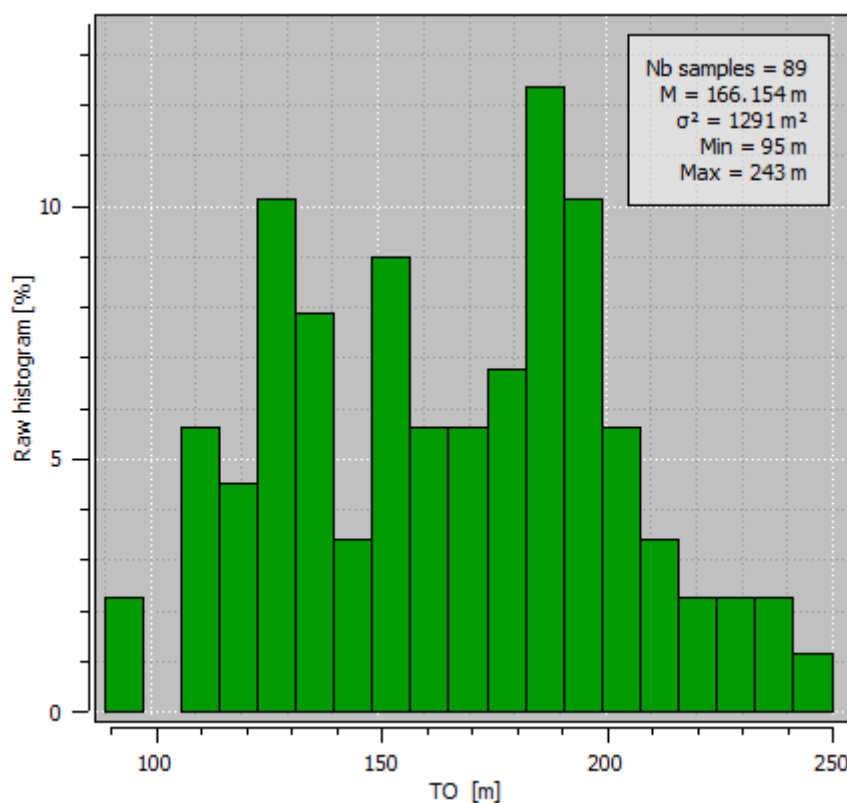


Figura 13 - Histograma de frequência da base da Formação Santo Anastácio.

Por fim, a Formação Serra Geral apresenta seu topo na base da Formação Santo Anastácio, descrita anteriormente, e continua até o final de grande parte das sondagens.

Quanto a distribuição das litologias, as camadas compostas puramente de argila (argilitos) e camadas ricas em argilas (arenito/siltito argiloso) apresentaram uma distribuição com uma leve assimetria positiva, o que é esperado para a variável analisada, e com base no histograma do topo e base das camadas supracitadas foram observadas duas profundidades preferenciais para a ocorrência de argilominerais, sendo uma delas entre 10 e 20m e a segunda entre 90 e 100m, esta segunda coincidente com as bases menos profundas da Formação Santo Anastácio. A distribuição das camadas ricas em argila e argilitos apresentou um desvio padrão de 133,5 e um coeficiente de variação de 1,38 (Figura 14).

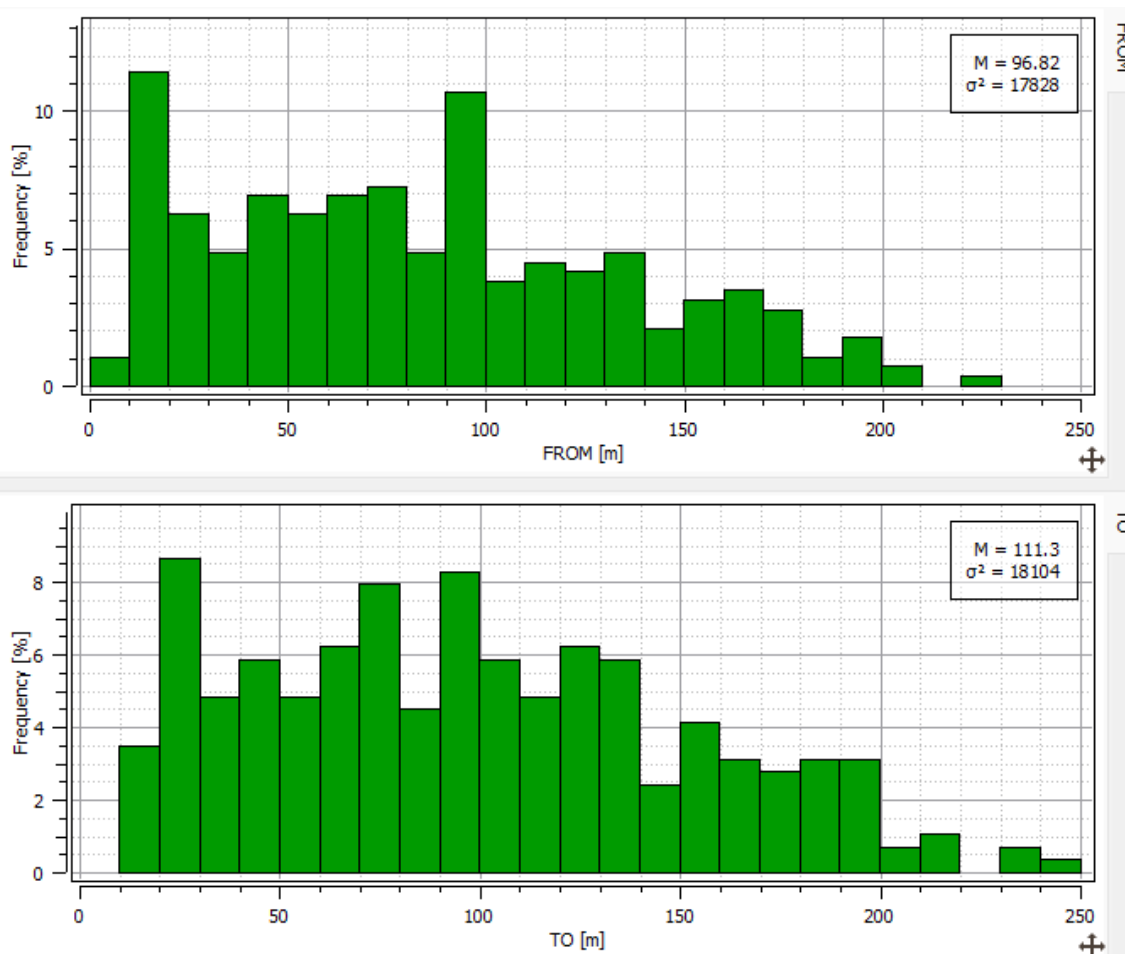


Figura 14 - Histograma de frequência do topo (acima) e da base (abaixo) das ocorrências das litologias classificadas como “argilitos” e “arenitos/siltitos argilosos”.

Com base nos histogramas, nota-se que todas as Formações avaliadas apresentam uma distribuição normal ou aproximadamente à normal, o que é esperado para grande parte das variáveis aleatórias. As camadas com presença de argilominerais estão bem distribuídas em toda extensão das sondagens com um foco entre 10-20m e outro a 90-100m.

Após a análise geoestatística inicial, foi realizada a regularização das amostras em bancadas de 5m e retiradas das duplicatas, de forma a obter amostras representativas, gerando dados mais homogêneos e de maior facilidade de interpretação.

Para o cálculo de variogramas experimentais foi analisado o mapa base (Figura 15), no qual foram definidos os valores das direções a serem analisadas, como

campo geométrico, valor do passo, tolerância do passo, tolerância angular e número de passos (Tabela 1).

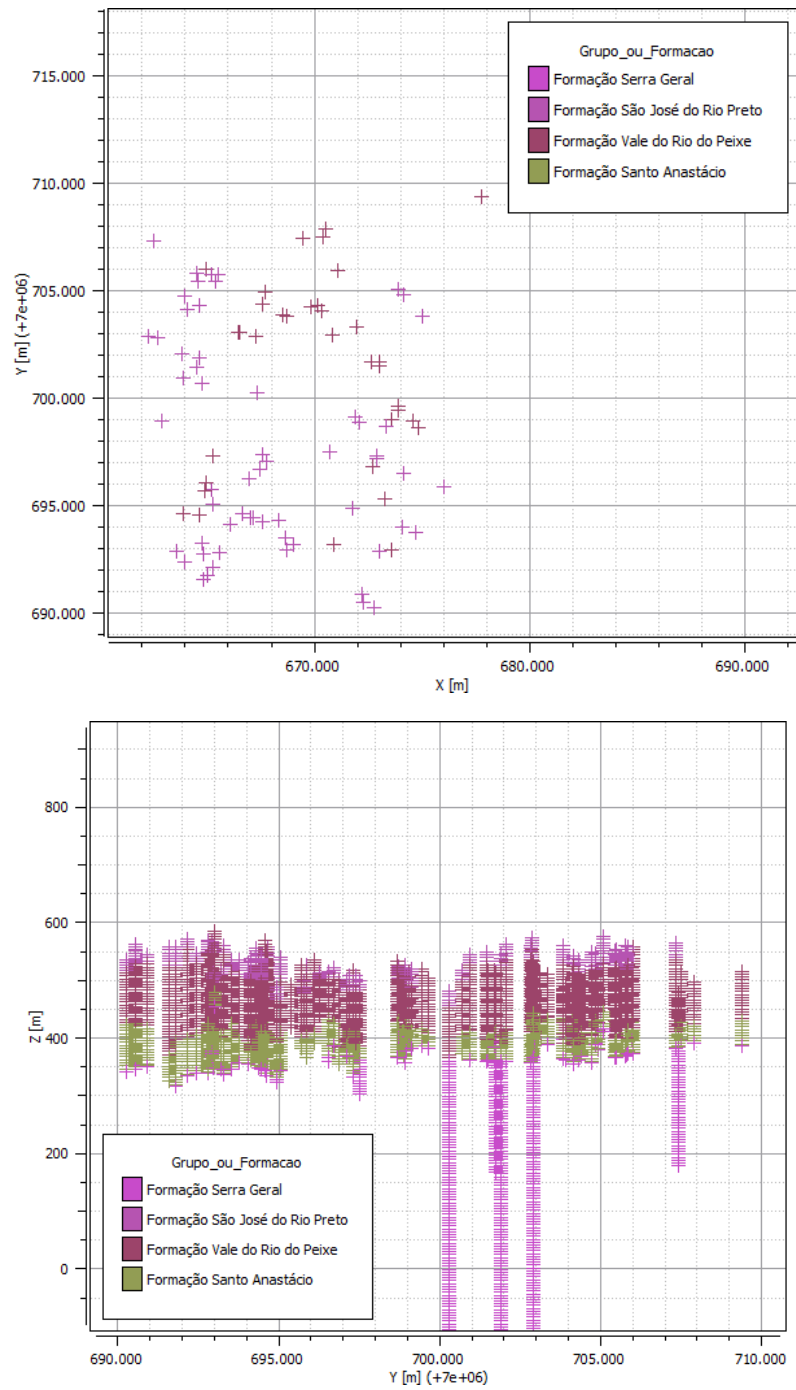


Figura 15 - Mapa base (X-Y a acima e Y-Z a abaixo).

Tabela 1 - Parâmetros retirados após a análise dos mapas base.

Direção	Tolerância Angular	Domínio (m)	Campo Geométrico (m)	Valor de passo (m)	Tolerância do passo	nº de passos
0° (North)	22,5°	17800	8900	800	50%	23
45°	22,5°	21400	10700	1000	50%	22
90° (East)	22,5°	14000	7000	500	50%	28
315°	22,5°	18250	9125	850	50%	22
Vertical	N/A	62	31	5	50%	12,4

Com base nestes parâmetros foram gerados os modelos teóricos de variograma, para as 5 direções principais, apresentados na Figura 16, nos quais se observa uma anisotropia mista e que o par de direções N45° e N315° é mais representativo do domínio pelo maior campo geométrico, estrutura melhor definida e maior quantidade de pares, como pode ser visto nas curvas logo abaixo do variograma.

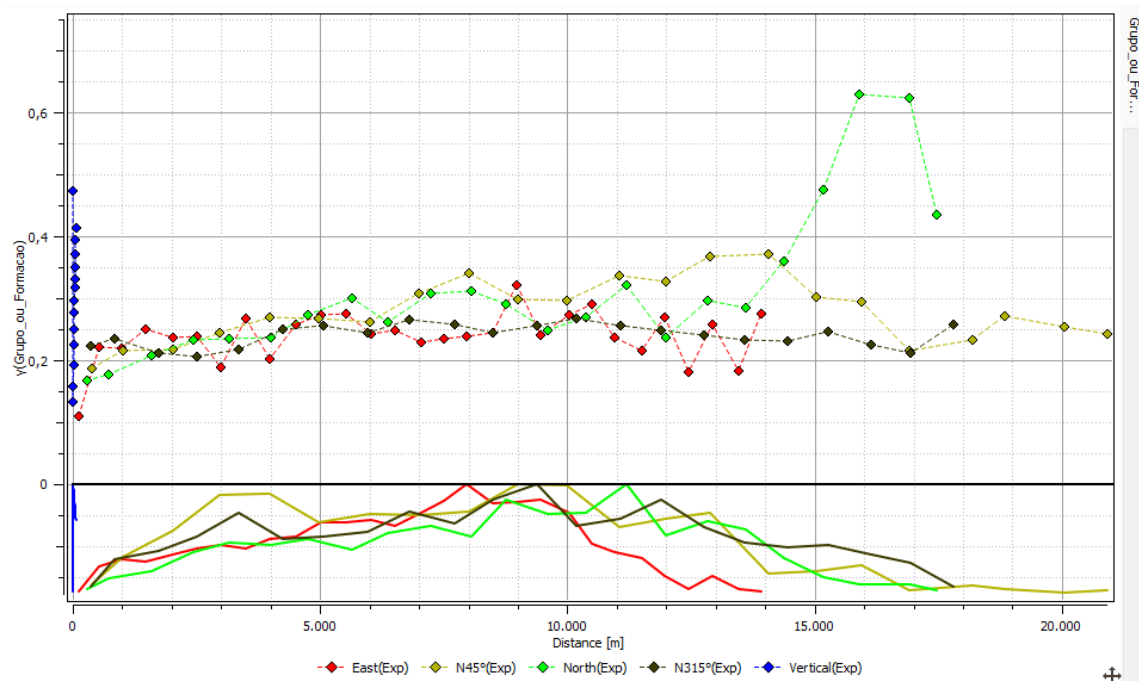


Figura 16 - Variograma experimental das 5 direções avaliadas e curvas do número de pares consultados (embaixo).

Para os cálculos futuros de estimativa se faz necessário o ajuste de uma função matemática contínua, que descreva a correlação espacial do fenômeno estudado. Isso é feito pelo ajuste iterativo, variando os parâmetros do variograma, até que se atinja uma função teórica que satisfaça o variograma experimental calculado.

O ajuste do modelo de variograma utilizado foi um ajuste realizado pelo próprio software Isatis.neo Mining (versão 2023.08), considerado adequado para as direções principais analisadas. O ajuste e os parâmetros do ajuste são apresentados na Figura 17.

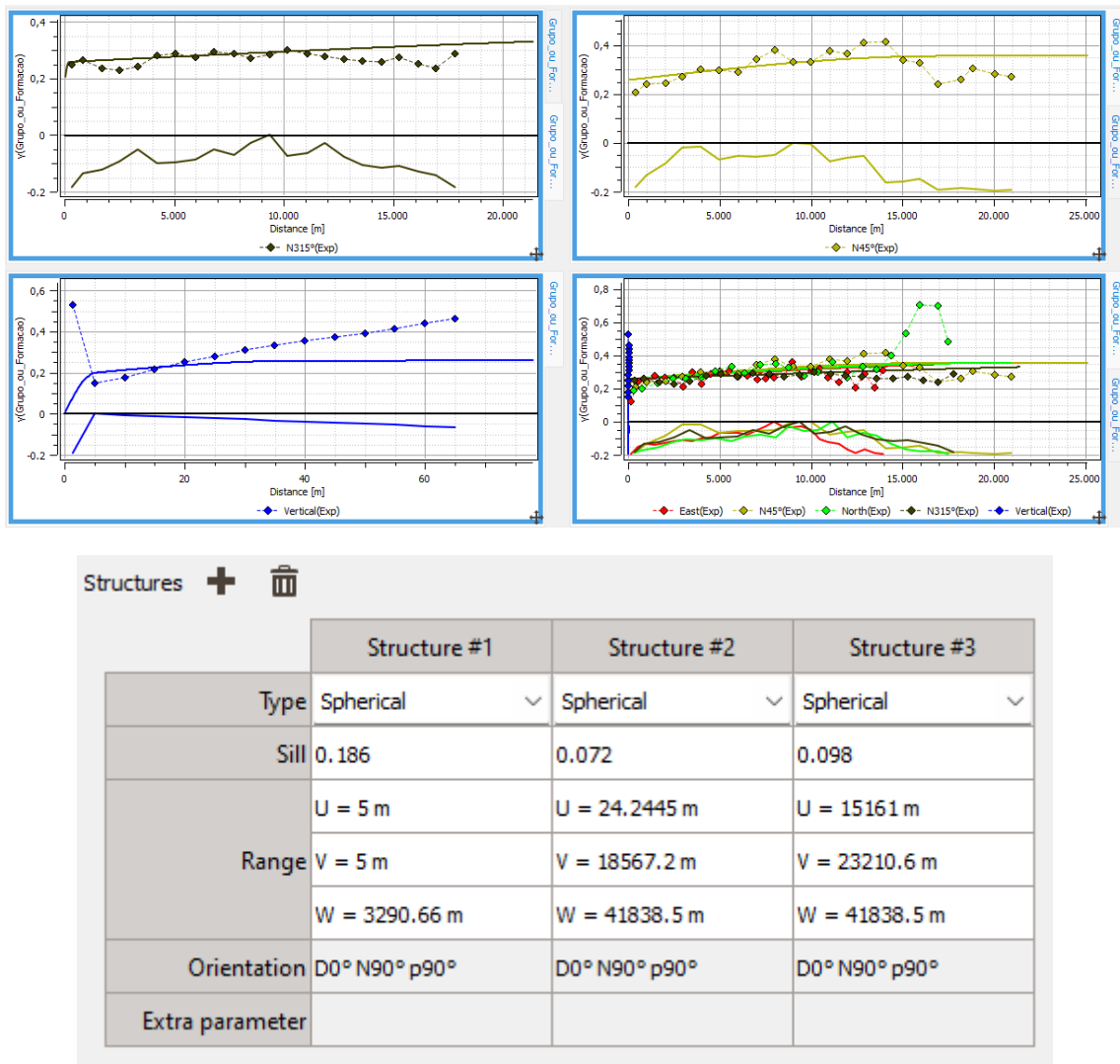


Figura 17 - Ajuste do modelo teórico de variograma para as direções N315° (gráfico superior esquerdo), N45° (gráfico superior direito) e vertical (gráfico inferior esquerdo) e parâmetros de ajuste utilizados nos variogramas.

Após o ajuste do modelo de variograma, foi realizada a validação cruzada, na qual se estima a localização de um ponto de dado eliminando-se o valor do mesmo do conjunto de pontos, para avaliar a acurácia do modelo estimado. O variograma, ajustado com base nos melhores parâmetros de vizinhança encontrados, apresentou um coeficiente de correlação (ρ) de 0,98 e um desvio padrão de 1,31, no qual foram estimadas 3611 amostras e 3320 apresentaram resultados satisfatórios. O resultado da validação cruzada é apresentado nos gráficos da Figura 18.

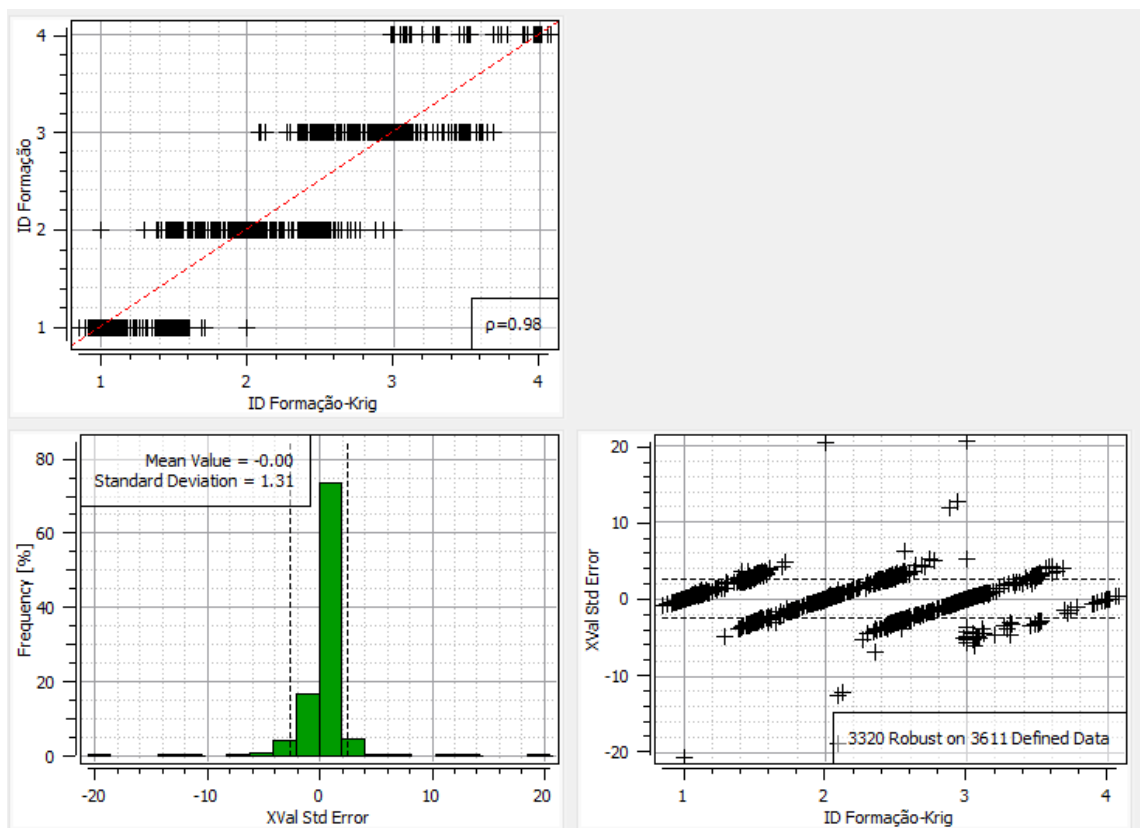


Figura 18 - Resultados da validação cruzada para o ajuste do variograma das Formações, gráfico superior esquerdo (1) correlação do valor estimado, eixo x com valor real eixo Y, gráfico inferior esquerdo (2) correlação do desvio padrão e frequência dos dados, gráfico inferior direito (3) correlação entre o desvio padrão para os valores estimados.

Para as litologias classificadas com base na presença de argilominerais, foi obtido um coeficiente de correlação (ρ) de 0,92 e um desvio padrão de 0,87, no qual foram estimadas 3882 amostras e 3793 apresentaram resultados satisfatórios.

Com base na validação cruzada, foram obtidos os melhores parâmetros possíveis do elipsóide de busca da vizinhança para a realização da krigagem, apresentados na Figura 19.

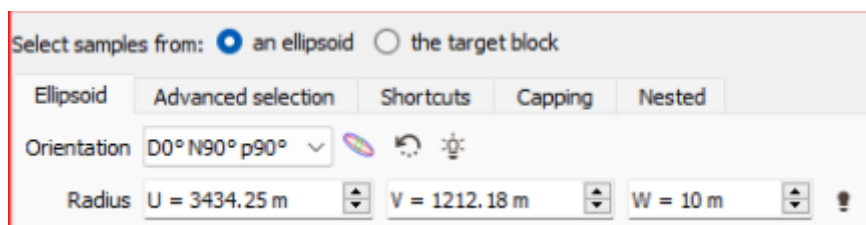
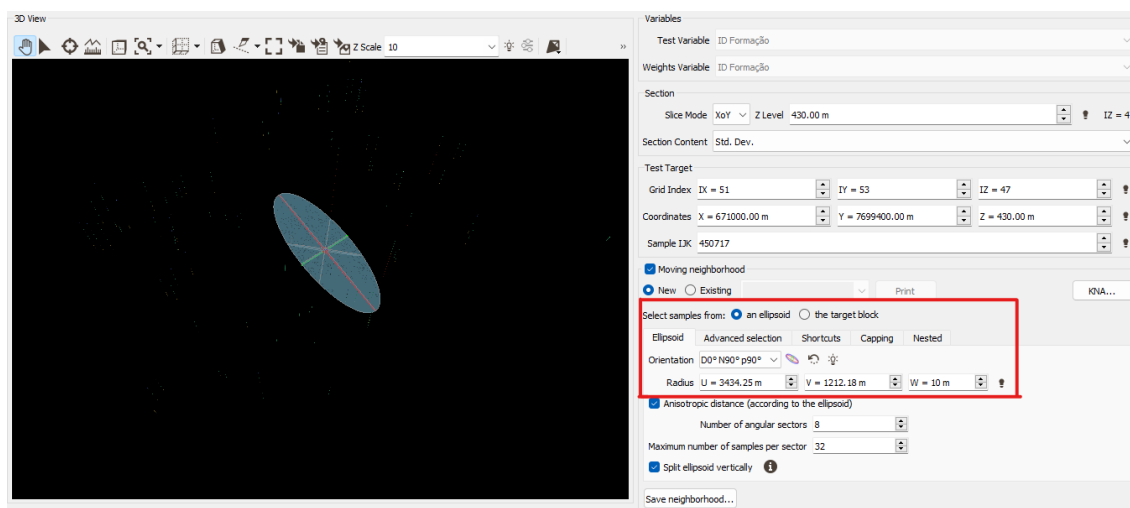


Figura 19 - Elipsóide de busca e vizinhança e parâmetros utilizados.

Com os modelos de variogramas ajustados e vizinhança definida, foi definido o modelo de blocos antes da krigagem, para delimitar as dimensões da krigagem. O modelo de blocos levou em conta os limites horizontais (X,Y) até onde há pontos amostrais e no eixo vertical levou em consideração a base das sondagens e a Formação Serra Geral, formação esta última que não é o foco principal do trabalho.

O modelo de blocos estabelecido foi de um grid com 200x200x5m e o nº de células foi de 100x105x85. A área do grid em relação aos limites municipais é apresentada na Figura 20. Ressalta-se que algumas sondagens mais profundas não foram incluídas no grid, pois são formadas exclusivamente por basaltos da Formação Serra Geral.

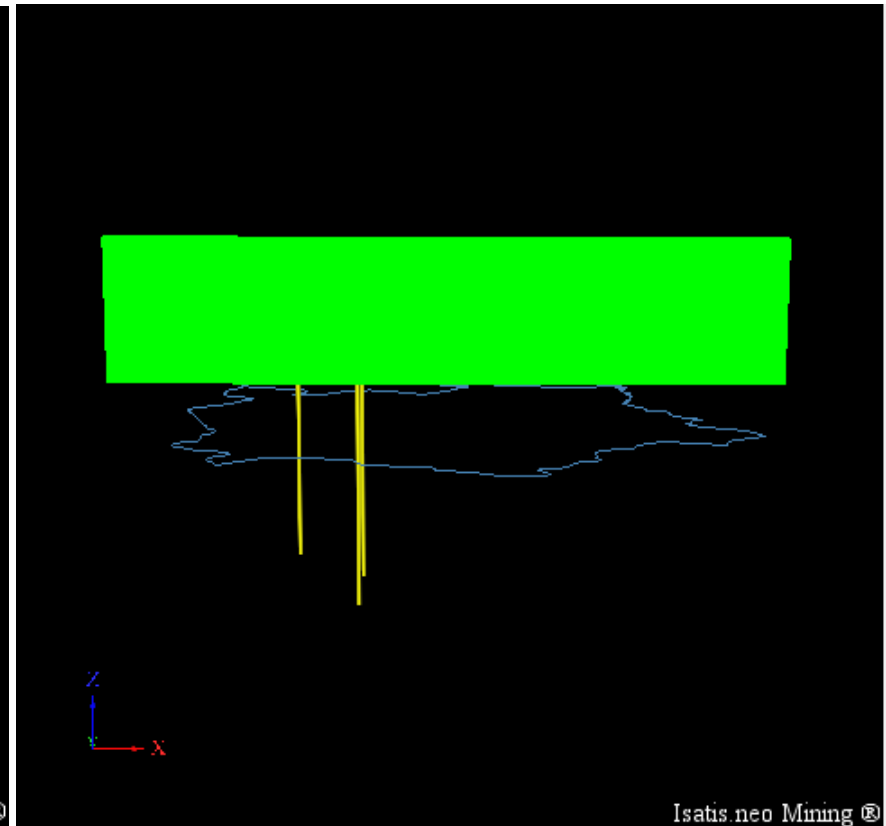
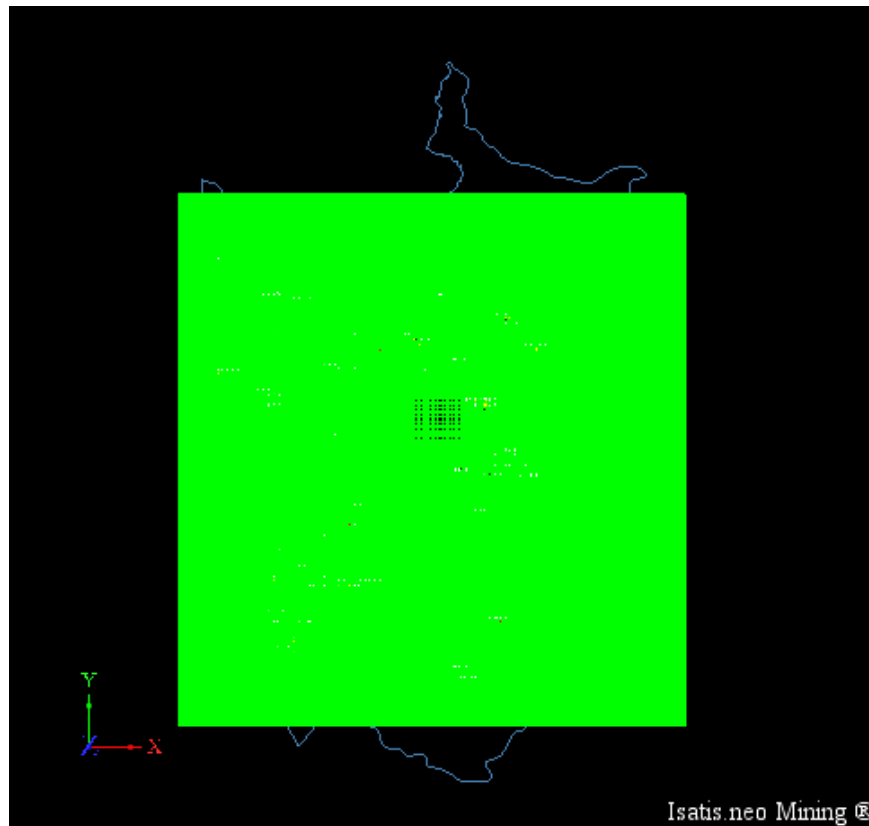
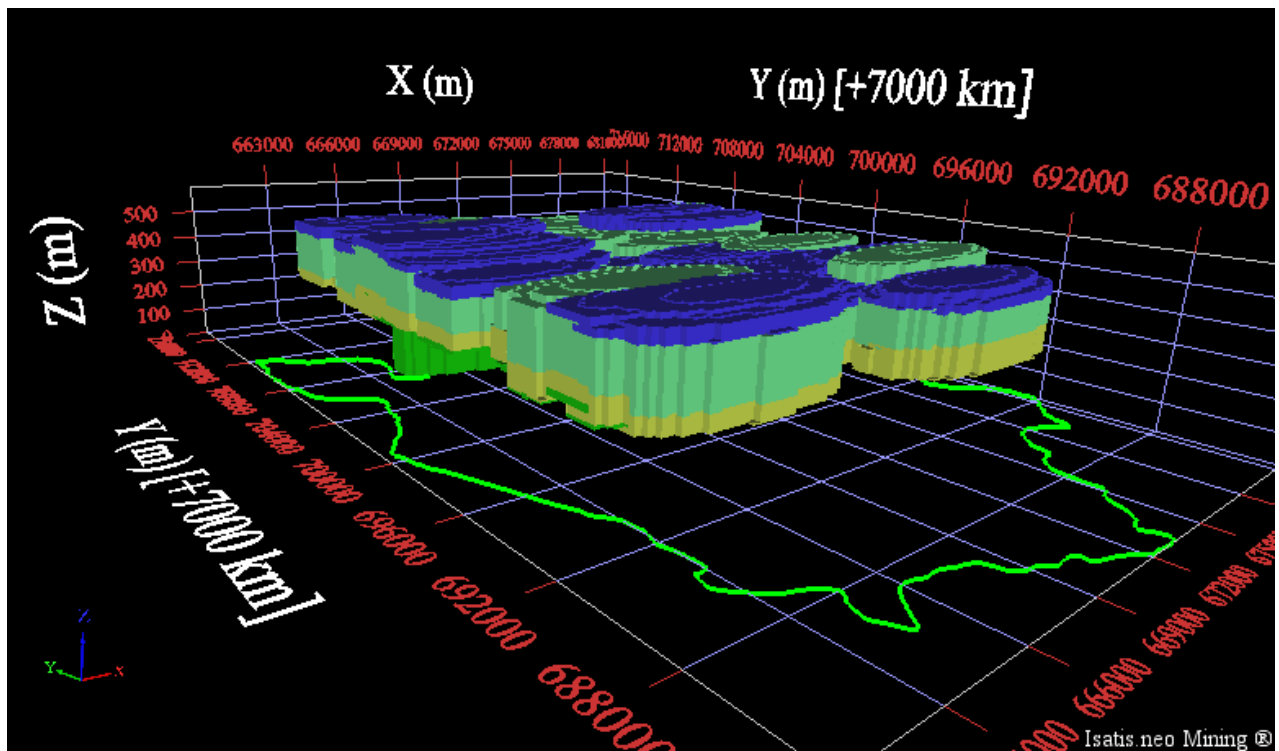


Figura 20 - Grid do modelo de blocos estabelecido.

Com todos os parâmetros apresentados foi realizada a krigagem dos dados das Formações e Litologias, os modelos gerados são apresentados nas Figura 21 e 22, respectivamente. Ressalta-se que, para o modelo das litologias, foi aplicado um filtro para aparecerem somente as litologias de maior interesse descritas nas sondagens como argilitos e arenitos/siltitos argilosos.



- Fm. Serra Geral
- Fm. Santo Anastácio
- Fm. Vale do Rio do Peixe
- Fm. São José do Rio Preto

Figura 21 - Modelagem das formações.

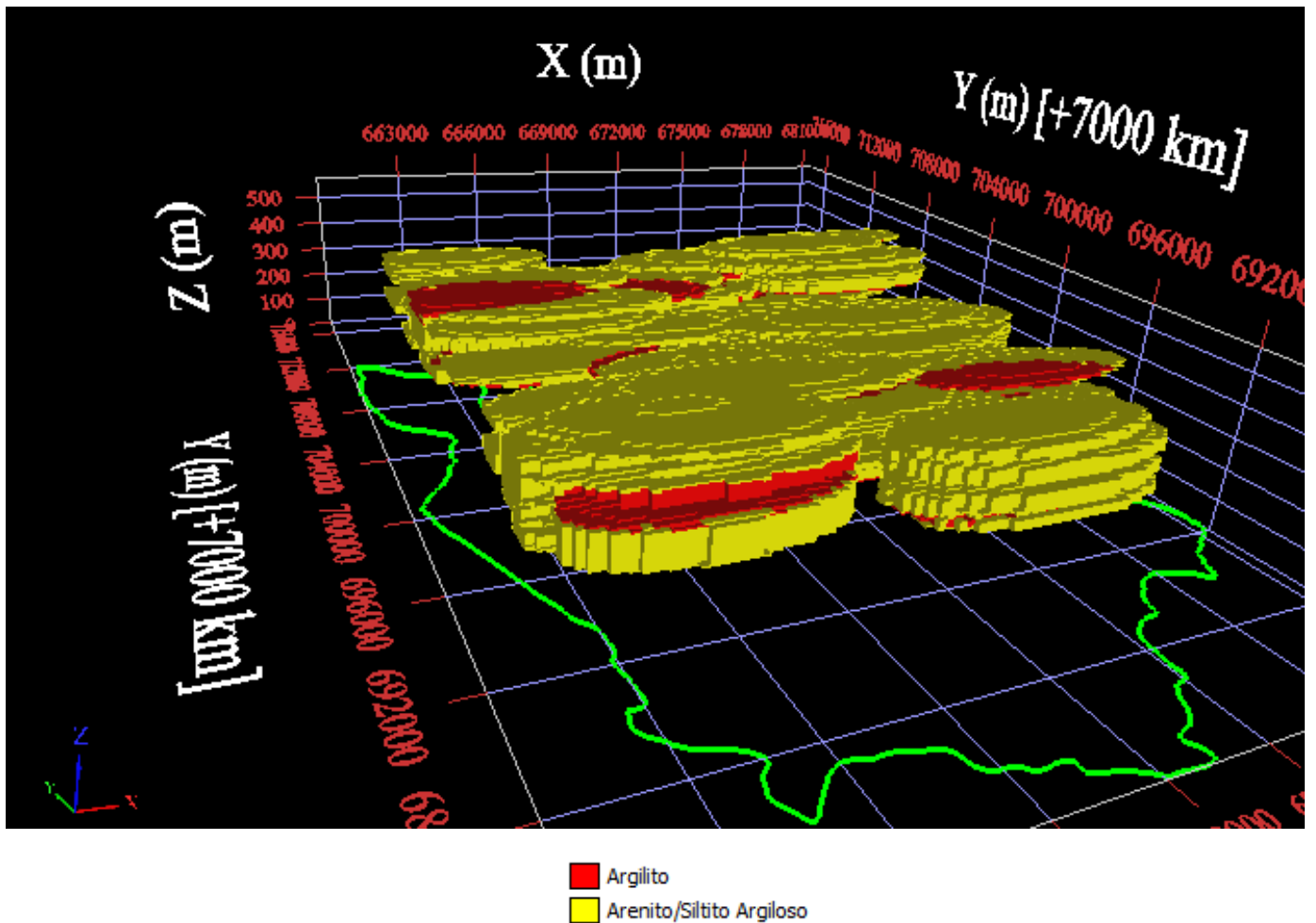


Figura 22 - Modelagem das litologias, em vermelho argilitos e em amarelo arenitos/siltitos argilosos.

A principal dificuldade durante a realização do presente trabalho foram as verificações e ajustes do banco de dados juntamente com as análises e interpretações das Formações com base em litologias muitas vezes com pouco detalhamento.

O volume de dados também foi algo desafiador e foi necessário reduzir o tamanho amostral devido à escassez de tempo para verificação dos dados. O ajuste e verificação do banco de dados ocorreu até a primeira quinzena de outubro, quando se optou por reduzir o número de amostras analisadas, para ao menos proporcionar uma modelagem com um nível menor de detalhamento, que pudesse ser comparada com o posicionamento dos filtros nos poços e as concentrações de Cromo no aquífero.

8. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base no modelo gerado observou-se o empilhamento das seguintes Formações, do topo para base, Formação São José do Rio Preto, Formação Vale do Rio do Peixe, Formação Santo Anastácio e por fim Formação Serra Geral.

Inicialmente nota-se que grande parte das sondagens se encontra entre as Formações Santo Anastácio e Vale do Rio do Peixe, entre as cotas de aproximadamente 500m e 375m. As Formações avaliadas apresentam uma estratificação horizontal com pouca variação vertical, apresentadas nas Figuras 23 e 24. Ressalta-se que apesar de representados contatos bruscos entres as Formações, a bibliografia indica que tais contatos são graduais com exceção do contato entre a Formação Santo Anastácio e a Formação Serra Geral.

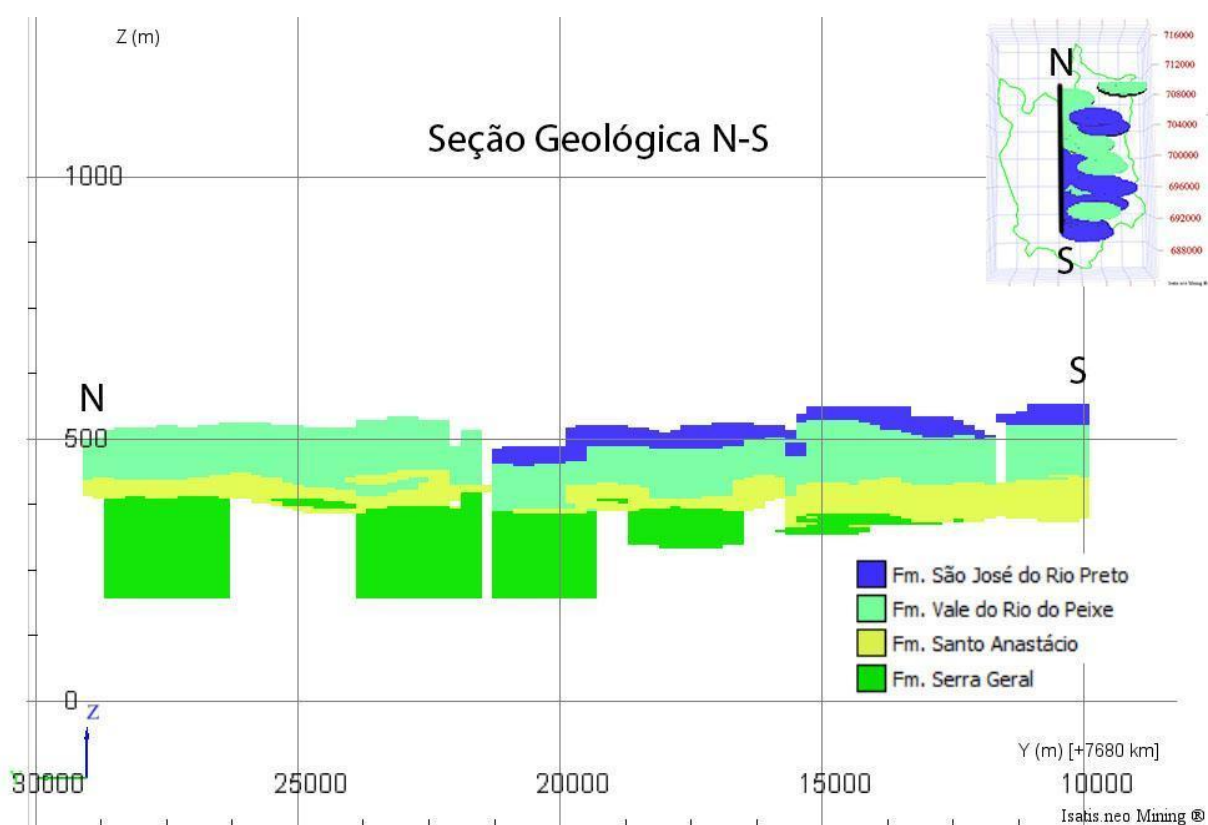


Figura 23 - Seção Geológica N-S.

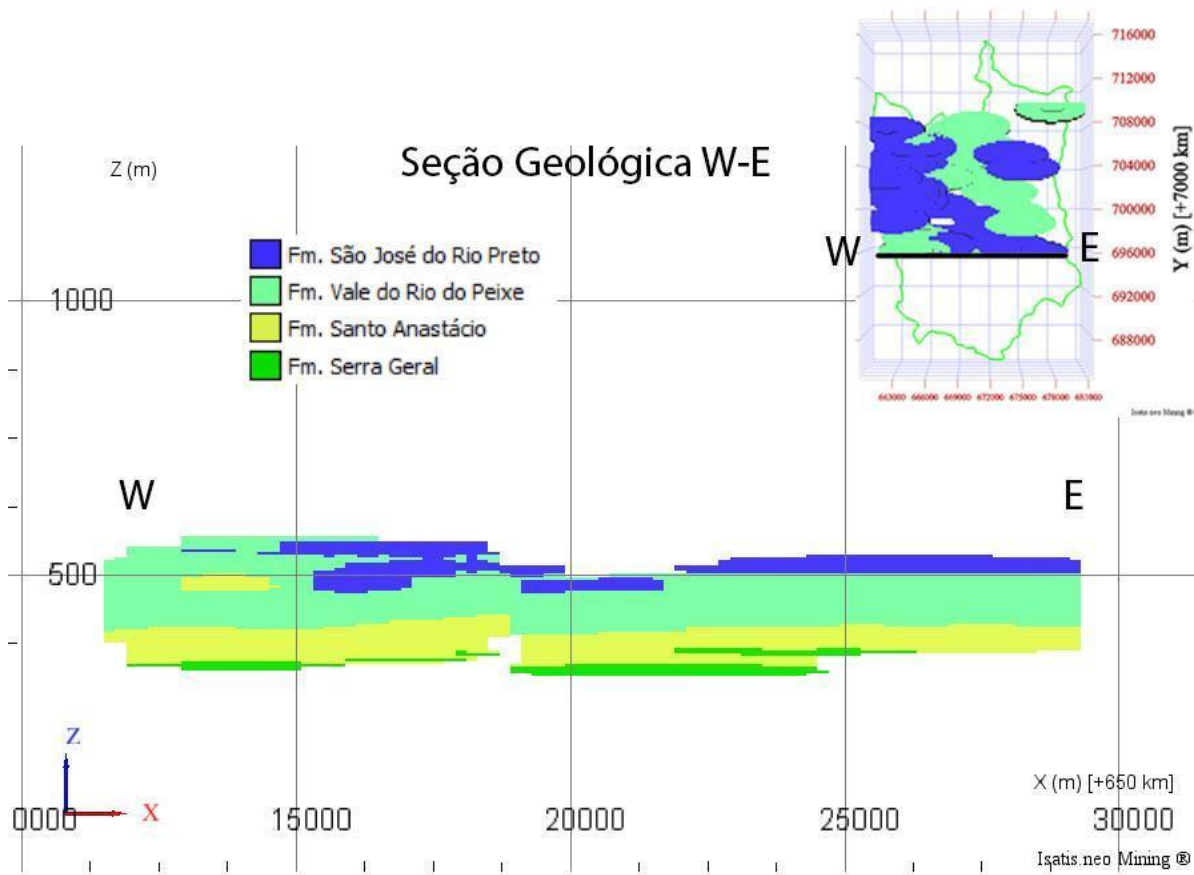


Figura 24 - Seção Geológica E-W.

Quanto às litologias, observou-se uma boa distribuição da categoria Arenitos/Siltitos Argilosos por toda a região e entre as cotas 500 e 375 m, como pode ser observado nas figuras 25 e 26. A presença de camadas descritas como puramente argilitos são mais raras e ocorrem em três profundidades preferenciais, aproximadamente nas cotas de 500m na Formação Vale do Rio do Peixe, 375m na Formação Santo Anastácio e em 437,5m no contato das Formações supracitadas.

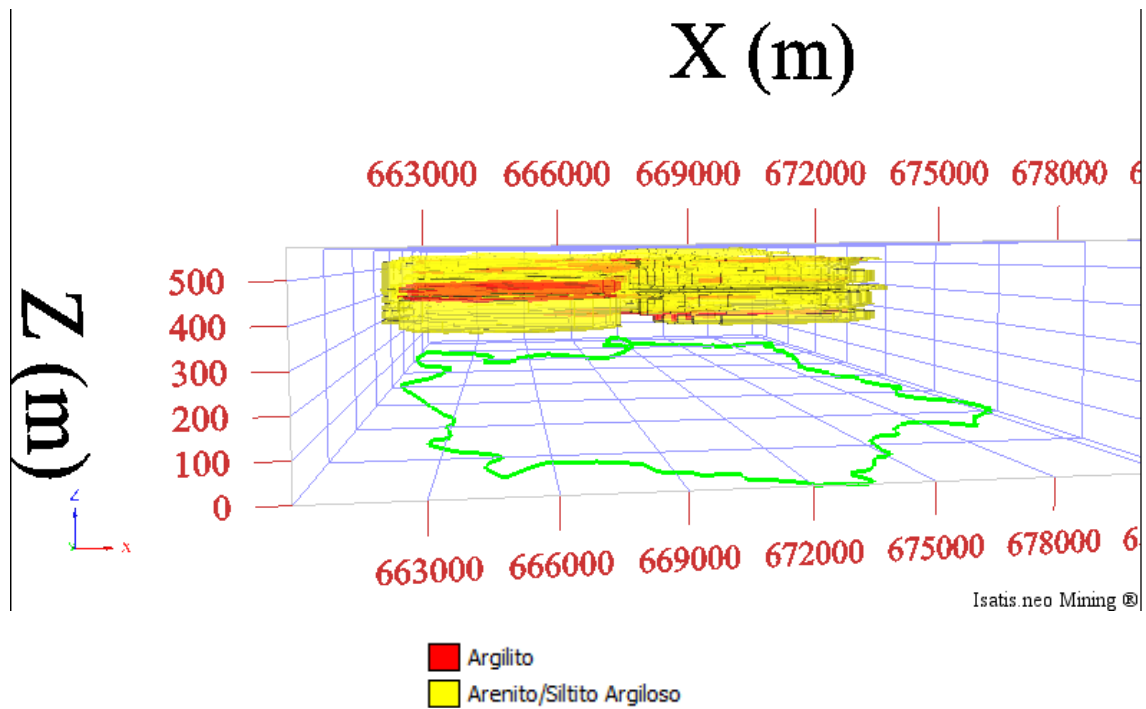


Figura 25 - Vista sul das camadas modeladas ricas em argilominerais.

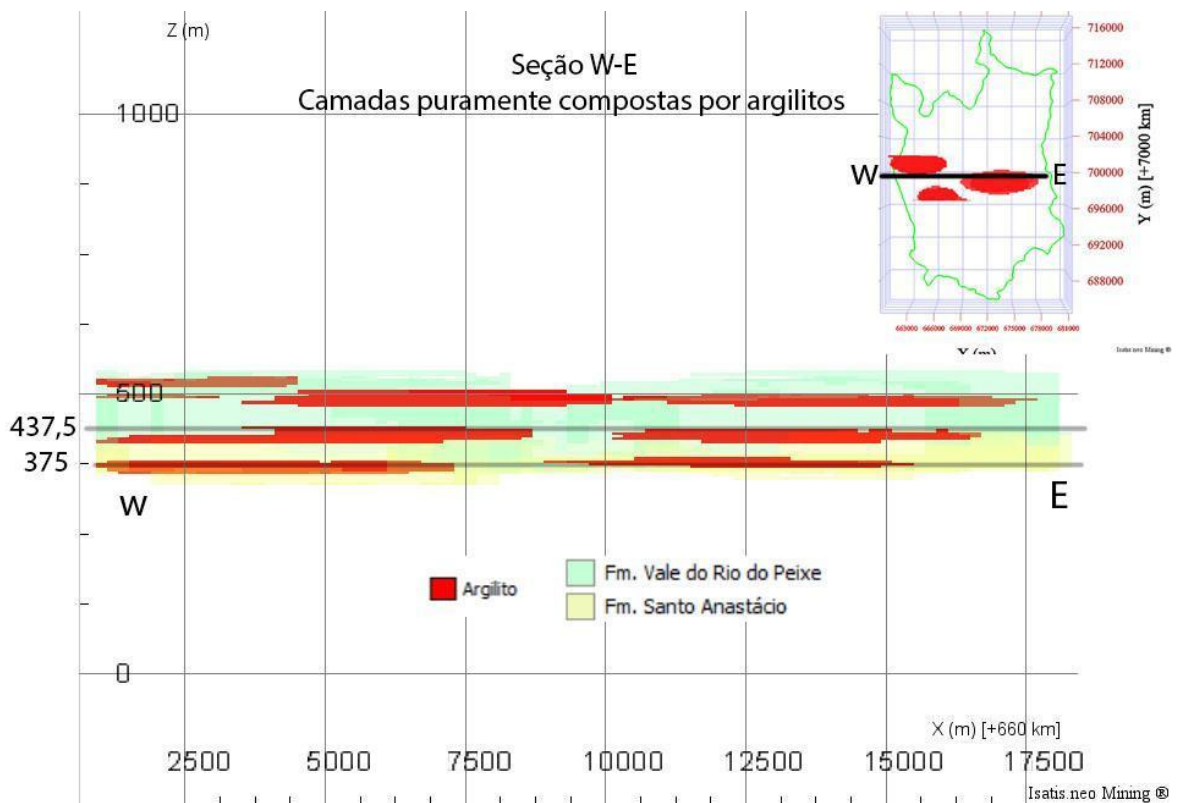


Figura 26 - Seção W-E das camadas descritas como puramente argilitos.

Visando correlacionar a presença de cromo com as litologias e Formações modeladas, foram plotados no modelo os poços e filtros (Figura 27), sendo

categorizados pelas concentrações de Cromo, em amarelo concentrações abaixo de 50 µg/L e em vermelho concentrações maiores ou iguais a 50 µg/L. Destaca-se que os poços mais profundos não apresentam anomalia de Cromo e tem filtros nas Formações Pirambóia/Botucatu abaixo da Formação Serra Geral.

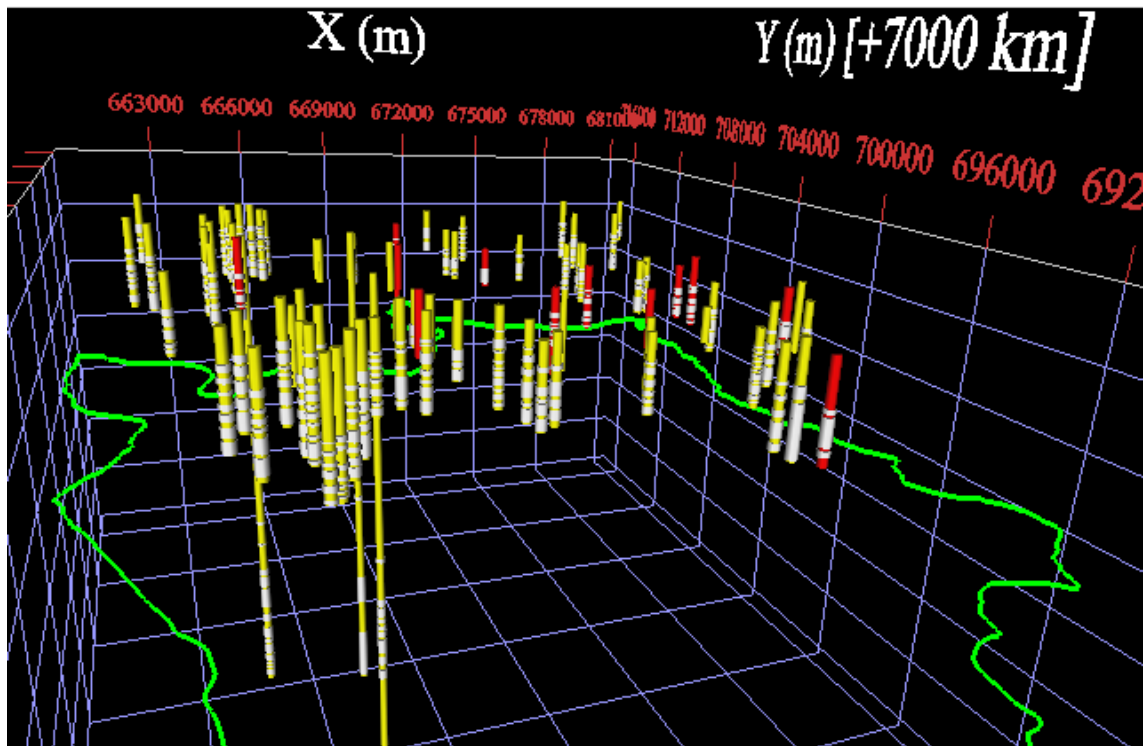


Figura 27 - Plotagem dos poços com teores de Cromo acima dos valores orientadores em vermelho, abaixo dos valores orientadores em amarelo e filtros em branco.

Com base na distribuição espacial da anomalia de Cromo foi realizada uma seção geológica cortando os poços que detectaram a anomalia (Figura 28), na qual se observa que há uma potencial correlação entre poços com anomalias de cromo e camadas puramente de argilitos da Formação Santo Anastácio.

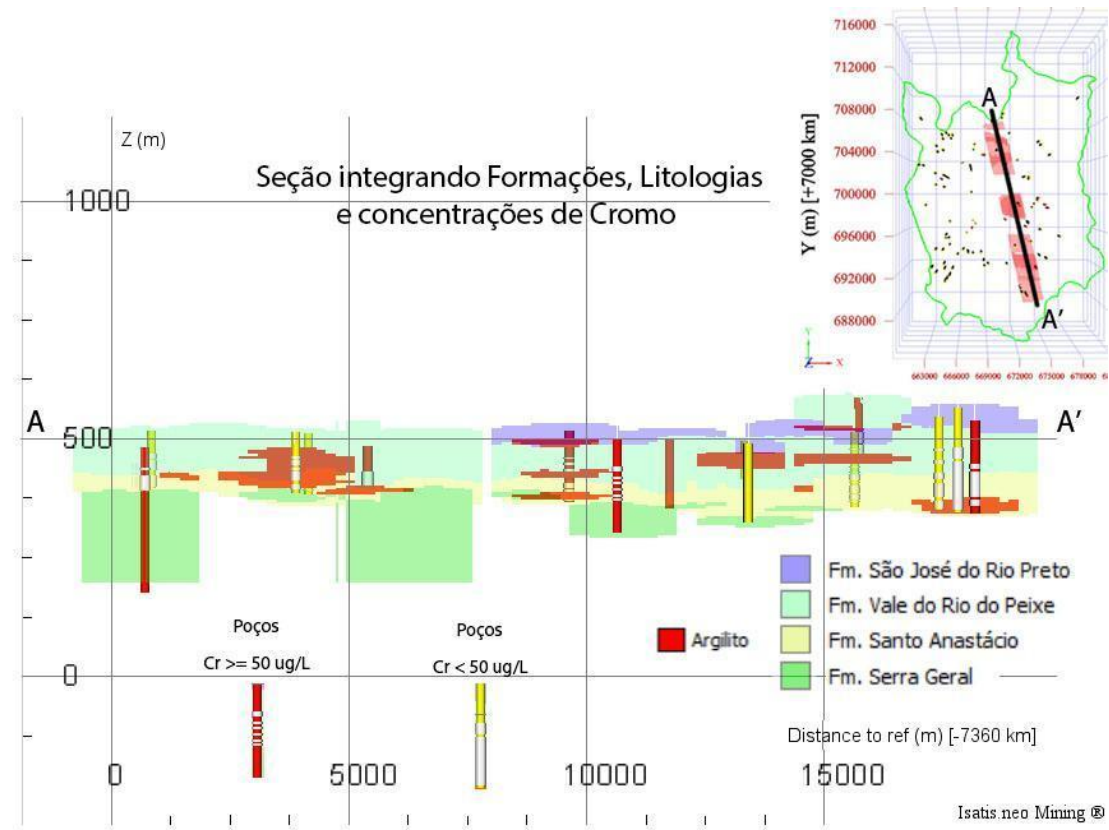


Figura 28 - Integração dos dados das Formações, ocorrências de argilitos e concentrações de cromo.

No entanto, a correlação hipotética levantada não é totalmente precisa, como no caso do poço SJRP0225, que apresenta filtros em uma espessa camada descrita como sendo composta por quase que puramente argilitos do topo da Formação Santo Anastácio e da Formação Vale do Rio do Peixe e mesmo assim não apresenta anomalia de cromo. A 1,7 km do poço supracitado há uma anomalia de cromo no poço SJRP0361 que apresenta filtro logo acima de uma camada de argilitos da Formação Santo Anastácio, um fator que poderia justificar a ausência da anomalia de cromo no poço 0225 seria a maior quantidade de filtros em profundidades diferentes (Figura 29), o que dilui a concentração final do cromo na amostragem.

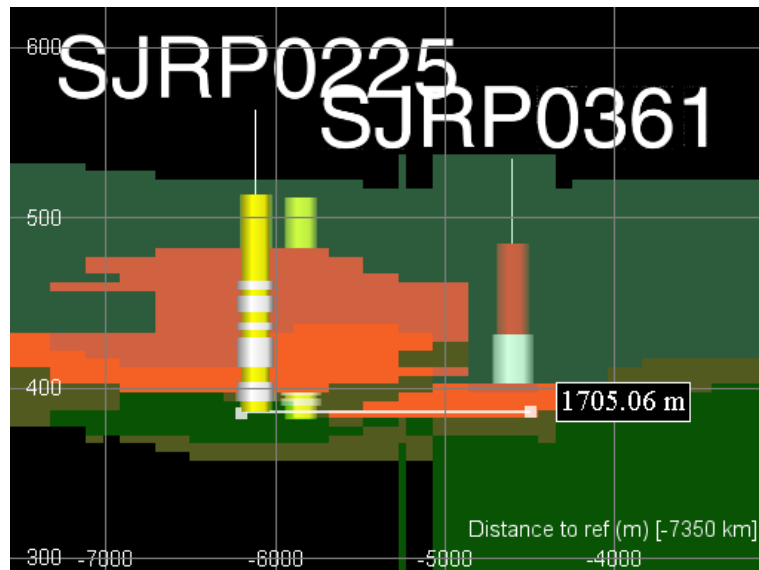


Figura 29 - Par de poços SJRP0225 e SJRP0361.

Analisando os demais poços da seção, notou-se que nem todos os poços que possuem filtros na interface Formação Santo Anastácio - base da Formação Vale do Rio do Peixe apresentam anomalia de cromo. No entanto, todos poços que apresentam anomalia de cromo apresentam filtros quase que predominantemente nestas regiões. A presença de argilitos em tais regiões não é fator predominante para a ocorrência da anomalia de cromo, como observado no par de poços SJRP0201 e SJRP0203 (Figura 30), já que em um deles foram descritos argilitos e no outro não, e mesmo assim os dois apresentaram anomalias do metal. Ressalta-se que ambos apresentam filtros em profundidades similares.

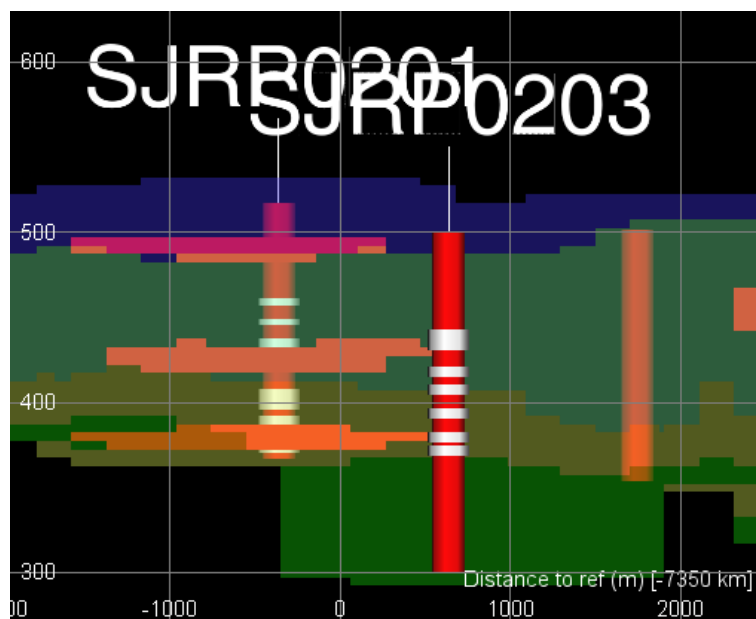


Figura 30 - Par de poços SJRP0201 e SJRP0203.

Outra ocorrência interessante observada na seção de integração dos dados foi a correlação entre os poços SJRP2308, SJRP0317 e SJRP0377 (Figuras 31 e 32), que apresentam profundidades similares, filtros em profundidades similares e apenas um deles apresentou anomalia de cromo. Nota-se que o poço que apresentou anomalia de cromo (SJRP0377) apresenta filtros mais concentrados no topo da Formação Santo Anastácio e base da Formação Vale do Rio do Peixe, enquanto os outros dois poços possuem filtros mais esparsos entre as duas Formações.

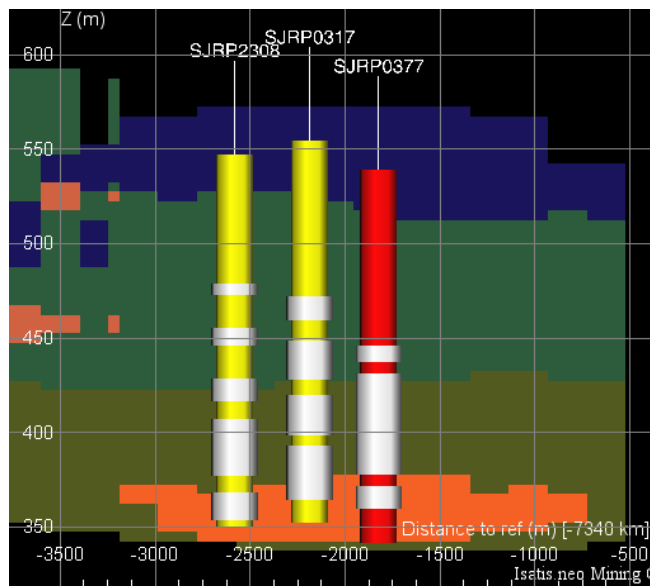


Figura 31 - Par de poços SJRP2308, SJRP0317 e SJRP0377.

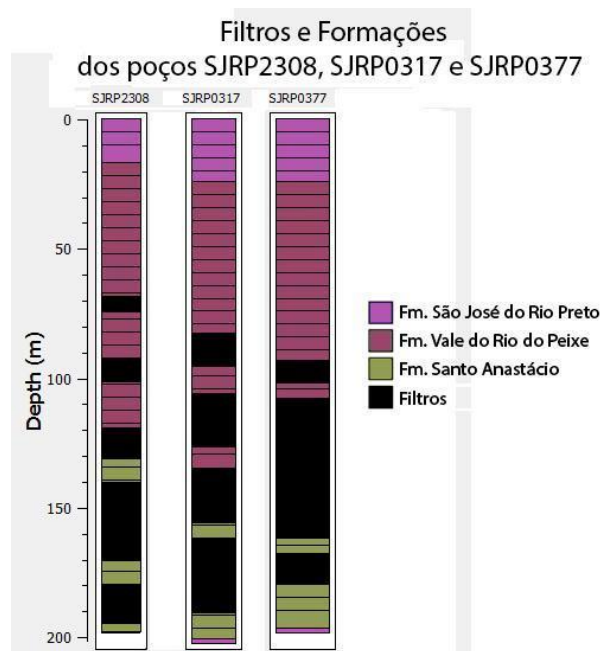


Figura 32 - Filtros dos pares de poços SJRP2308, SJRP0317 e SJRP0377.

A partir dos modelos gerados, observou-se que há potenciais indícios de uma profundidade preferencial para a ocorrência de cromo na região, entre as Formações Santo Anastácio e base da Formação Vale do Rio do Peixe (porções intermediárias a profundas do aquífero), no entanto, não é possível concluir categoricamente que a ocorrência de cromo se limita a tal região, sem avaliar o comportamento hidrogeoquímico do aquífero. Em Urânia a ocorrência de cromo predomina nas porções intermediárias a profundas do aquífero, associadas a ambientes de pH e Eh elevados, se as condições hidrogeoquímicas de São José do Rio Preto, nas profundidades supracitadas forem similares às observadas em Urânia reforça os indícios observados apenas com base nas descrições litológicas.

9. CONCLUSÕES

A partir dos modelos gerados, observou-se que todos os poços que apresentam anomalia de cromo apresentam filtros concentrados predominantemente na interface Formação Santo Anastácio e base da Formação Vale do Rio do Peixe. Nos poços que apresentaram um filtro nesta interface, mas também com outros filtros em diversas profundidades do aquífero, não foram encontradas anomalias de cromo, possivelmente pela diminuição da concentração de cromo devido a mistura de águas de diferentes porções do aquífero com menos cromo.

Não é possível concluir categoricamente que o aquífero entre as Formações Santo Anastácio e base da Formação Vale do Rio do Peixe contém a anomalia de cromo observada na região, no entanto, o presente estudo traz indicativos de que estudos detalhados devem incluir tal região. Um dos problemas observados no decorrer do estudo foi que os poços de captação analisados possuem uma grande quantidade de filtros distribuídos em diversas profundidades do aquífero, o que dificulta interpretações precisas quanto a profundidades preferenciais para a ocorrência de cromo.

Sendo assim, com base nos resultados e interpretações apresentadas neste trabalho há potenciais indícios de uma profundidade preferencial para a ocorrência de cromo na região, nas partes intermediárias a profundas do aquífero. No entanto, não é possível concluir que a ocorrência de cromo se limita a tais profundidades sem avaliar o comportamento hidrogeoquímico do aquífero.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. A., Stein, D. P., Melo, M. S., Bistrichi, C. A., Ponçano, W. L., Hasui, Y., Almeida, F. F. M., 1980, Geologia do Oeste Paulista e área fronteiriças dos estados de Mato Grosso do Sul e Paraná. Anais Sociedade Brasileira de Geologia, v. 5, p. 2799-2812.
- Almodovar, M.L.N., 1995, Estudo da anomalia de cromo nas águas subterrâneas da região noroeste do Estado de São Paulo. São Paulo [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências,, 101 p.
- Archela, E., Costa, S.C., Raminelli, J.A, 2013, Aplicação de modelagem geoestatística por krigagem para mapeamento do relevo exposto e do paleo-relevo sotoposto à Bacia Sedimentar de Curitiba (PR). Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 14, p. 69-79.
- Bertolo, R. A., Marcolan, L. N. O., Bourotte, C., 2009, Relações água-rocha e a hidrogeoquímica do cromo na água subterrânea de poços de monitoramento multiníveis em Urânia, SP, Brasil. Geologia USP. Série Científica, v. 9, p. 47-62.
- Bertolo, R., Bourotte, C., Hirata, R., Marcolan, L., Sracek, O., 2011a, Geochemistry of natural chromium occurrence in a sandstone aquifer in Bauru Basin, São Paulo State, Brazil. Applied Geochemistry, v. 26, p. 1353-1363.
- Bertolo, R., Bourotte, C., Marcolan, L., Oliveira, S., Hirata, R., 2011b, Anomalous content of chromium in a Cretaceous sandstone aquifer of the Bauru Basin, state of São Paulo, Brazil. Journal of South American Earth Sciences, v. 31, p. 69-80.
- Bourotte, C., Bertolo, R. A., Almodovar, M. L. N., Hirata, R., 2009, Natural occurrence of hexavalente chromium in a sedimentar aquifer in Urânia, State of São Paulo, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências (Impresso), v. 81, p. 227-242.
- CEPAS - Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas USP, 2021, Relatório Parcial 2 - Geologia e Hidrogeoquímica da Ocorrência do Cromo Hexavalente no Sistema Aquífero Bauru no Município de São José do Rio Preto - Bacia Hidrográfica do Turvo-Grande, Relatório CEPAS, São Paulo, 35p (inédito).
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2022, Relatório da qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2019-2021:

<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2023/03/QualidadeAguasSubterraneas-2019-2021_F.pdf> (acessado Abril/2023).

- CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2020, Relatório SIAGAS 2020: coleta, consistência, armazenamento e difusão de informações hidrogeológicas. Rio de Janeiro: CPRM, 35 p.
- Cuiuli, E. 2018. Quick analysis of the characteristic hydrogeological parameters of an aquifer, using empirical formulas and the implementation of the clay substrate map: the case study of the shallow aquifer of the S. Eufemia Lamezia plain (Central Calabria - Italy). *Italian Journal of Groundwater*, v. 7 no. 4, p. 61 - 71.
- Fernandes, L.A. 1992. A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 129p.
- Fernandes, L.A., 1998, Estratigrafia e Evolução Geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil). São Paulo [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 206 p.
- Fernandes, L.A., 2004, Mapa litoestratigráfico da parte oriental da bacia bauru (PR, SP, MG), escala 1:1.000.000. *Boletim Paranaense de Geociências*, n. 55, p. 53-66.
- Fernandes, L.A., Coimbra, A.M., 2000, Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). *Revista Brasileira de Geociências*, Vol. 30, p. 717-728.
- Hirata, R., Suhogusoff, A. V., Marcellini, S. S., Villar, P. C., Marcellini, L., 2019, As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Instituto Trata Brasil, CEPAS|USP, 2019. 64 p.
- IBGE, 2016, Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2016. Diretoria de Pesquisas - DPE - Coordenação de População e Indicadores Sociais - COPIS.
- Kiang, C. H., Stradioto, M. R., Silva, F. P. E., 2016, Tipos hidroquímicos do Sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo, *Águas Subterrâneas*, 30(2), p. 224–245, <<https://doi.org/10.14295/ras.v30i2.28005>>
- Landim, P.M.B., Yamamoto, J.K., 2013, *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos, 215 p.

- Marcolan, L., 2009, Investigação Hidrogeoquímica do cromo no Aquífero Adamantina no Município de Urânia - SP. São Paulo [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 85 p
- Marcolan, L., Bourotte, C., Bertolo, R., 2008, Estratificação das Concentrações de Cromo Hexavalente nas Águas Subterrâneas do Aquífero Adamantina, Município de Urânia, SP, Brasil. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15º, Natal, RN, Anais, <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23697>>.
- Ministério da Saúde, 2021, Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de Maio de 2021: Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. <https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.htm> (acessado em Abril 2023).
- Paula e Silva, F. 2003. Geologia de Subsuperfície e Hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 166p.
- Petroni, C.R, 2021, Geoestatística aplicada no mapeamento tridimensional de valores de condutividade hidráulica estimados por sonda HPT. São Paulo [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 94 p
- Rios, A. P., Martins, V., Chinen, V. S., Bourotte, C. 2018. Estudo De Ocorrências De Cromo No Sistema Aquífero Bauru Em São José Do Rio Preto, SP. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 20º, Campinas, SP, Anais, <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29434>>.
- Soares P.C.; Landim P.M.B.; Fúlfaro V.J.; Sobreiro Neto A.F. 1980. Ensaio de caracterização do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. Rev. Bras. Geociências, 10(3): 177-185
- Wiese, B.; Nützmannt, G., 2011, Calibration of spatial aquitard distribution using hydraulic head changes and regularisation. Journal of Hydrology, v. 408, p. 54-66.