



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ALEXANDER BARBOSA MACIEL FERREIRA

**MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DE FLUXO DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA NA MINA TABOCA (PRIMAVERA, PA): UMA
ABORDAGEM CONCEITUAL E NUMÉRICA**

Monte Carmelo
2023



ALEXANDER BARBOSA MACIEL FERREIRA

**MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DE FLUXO DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA NA MINA TABOCA (PRIMAVERA, PA): UMA
ABORDAGEM CONCEITUAL E NUMÉRICA**

Trabalho apresentado ao curso de graduação em Geologia da Universidade Federal de Uberlândia como parte da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e requisito para obtenção do título de bacharel em Geologia.

Orientador: William de Souza Santos

Monte Carmelo
2023

MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DE FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA
MINA TABOCA (PRIMAVERA, PA): UMA ABORDAGEM CONCEITUAL E
NUMÉRICA

Trabalho apresentado ao curso de graduação em Geologia da Universidade Federal de Uberlândia como parte da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e requisito para obtenção do título de bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. William de Souza Santos

Monte Carmelo, 29 de maio de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. William de Souza Santos – Orientador
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Prof.^a Dra. Liliane Ibrahim
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Prof. Dr. Felix Nannini

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que foram fundamentais na minha jornada acadêmica e na conclusão do meu TCC. Neste momento especial, quero dedicar minha gratidão a Deus, pois sem Sua orientação e bênçãos, eu não teria chegado tão longe.

À minha amada mãe, Eleusa Ferreira, e ao meu querido pai, Ruy Barbosa, sou imensamente grato pelo apoio incondicional, encorajamento constante e amor inabalável ao longo desses anos. Suas palavras de incentivo e sacrifícios não passaram despercebidos, e sou eternamente grato por tudo que fizeram por mim.

Aos meus estimados professores de graduação, que me guiaram e compartilharam seus conhecimentos, sou profundamente grato. Suas aulas inspiradoras, dedicação e mentoria foram essenciais para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Agradeço por me desafiarem a alcançar meu melhor e por acreditarem em meu potencial.

À minha amada namorada, Francielly, agradeço por todo o apoio emocional, paciência e compreensão durante os momentos de estresse e dedicação intensa ao meu TCC. Sua presença constante ao meu lado me deu forças para persistir e me lembrar da importância de equilibrar minha vida pessoal e acadêmica.

Minha gratidão também se estende à minha família, que sempre me incentivou e me apoiou em todas as etapas da minha jornada educacional. Seu amor e encorajamento foram pilares fundamentais para o meu sucesso.

Gostaria de expressar minha gratidão ao Cristian Bittencourt por me proporcionar a oportunidade na carreira de hidrogeologia. Sua confiança em mim e sua disposição em compartilhar seus conhecimentos têm sido inestimáveis para o meu crescimento profissional.

Não posso deixar de agradecer ao povo brasileiro por custear a universidade pública e possibilitar que jovens como eu tenham acesso à educação de qualidade. Sou imensamente grato por essa oportunidade e espero um dia retribuir à sociedade tudo o que recebi.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos do curso de geologia. Nossa jornada junto foi repleta de desafios, mas também de momentos inesquecíveis. Agradeço por compartilharmos conhecimentos, experiências e risadas ao longo desses anos. Vocês foram uma parte fundamental da minha vida acadêmica.

A todos vocês, expresso minha profunda gratidão. Sem o apoio, encorajamento e amor de cada um, eu não teria sido capaz de chegar até aqui. Sei que minhas palavras não são suficientes para expressar toda a minha gratidão, mas espero que saibam o quanto são importantes para mim. Obrigado do fundo do meu coração.

RESUMO

Esta monografia apresenta um estudo sobre o fluxo de água subterrânea na Mina Taboca (Primavera, PA) por meio do desenvolvimento de modelos conceitual e numérico. Para isso, foram coletados dados em campo fazendo uso de piezômetros, poços de água subterrânea e estações de bombeamento (hidrômetros). Esses instrumentos forneceram informações relevantes para análise do regime hidrogeológico da área de estudo, como o nível de água. Dessa forma, esses dados foram processados utilizando o software FEFLOW, que é capaz de simular o fluxo de água subterrânea, em meios porosos e fraturados. Os resultados obtidos através do processamento desses dados foram utilizados no desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceitual, juntamente com um modelo numérico de fluxo em regime estacionário e transitório. Para avaliar a eficácia dos modelos, foi realizada uma análise estatística da calibração entre os níveis de água simulados e medidos. Dos conjuntos de dados obtidos definiu-se que o cenário 2 é até 27% mais eficiente no rebaixamento do lençol freático na frente de lavra curto prazo. Por fim, o estudo permitiu estimar o fluxo de água da mina para sequenciamento da mesma nos próximos 10 anos, considerando a comparação dos valores observados com os simulados, o que contribui para a compreensão mais aprofundada do comportamento do fluxo das águas subterrâneas na área de estudo e no dimensionamento do deságue da mina.

Palavras-chave: Hidrogeologia, Modelagem Numérica, Mina Taboca, Fluxo de Água Subterrânea.

ABSTRACT

This monograph presents a study on groundwater flow in the Taboca Mine (Primavera, PA) through the development of conceptual and numerical models. For this purpose, field data were collected using piezometers, groundwater wells, and pumping stations (hydrometers). These instruments provided relevant information for the analysis of the hydrogeological regime of the study area, such as the water level. Thus, this data was processed using the FEFLOW software, which is capable of simulating groundwater flow in porous and fractured media. The results obtained from processing this data were used in the development of a conceptual hydrogeological model, along with a numerical model of steady-state and transient flow. To assess the effectiveness of the models, a statistical analysis of the calibration between the simulated and measured water levels was performed. From the obtained data sets, it was determined that scenario 2 is up to 27% more efficient in lowering the water table in the short-term mining front. Finally, the study allowed for estimating the mine's water flow for the next 10 years, considering the comparison of observed and simulated values, which contributes to a deeper understanding of groundwater flow behavior in the study area and the design of mine dewatering.

Keywords: Hydrogeology, Numerical modeling, Taboca Mine, Groundwater flow.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

- Figura 2.1** - Representação esquemática do ciclo hidrológico da água em superfície e subsuperfície, mostrando a relação entre a cobertura vegetal, os elementos climáticos e a circulação da água na natureza. 4
- Figura 2.2** - Representação esquemática do ciclo hidrológico, indicando suas principais etapas: E = evaporação; ET = evapotranspiração; I = infiltração; R = escoamento superficial (deflúvio). 5
- Figura 2.3** - Modelo simplificado de um sistema hidrológico representando uma superfície plana, inclinada, totalmente limitada e impermeável, com uma única saída... 8
- Figura 3.1** – Mapa de localização da Mina Taboca (Primavera – PA). O painel superior destaca localização geográfica da região que compreende tanto a zona urbana quanto a área da mina (quadrante vermelho) dentro do município. O painel inferior apresenta com mais detalhes a área destacada, na qual a unidade da mina está demarcada em azul...
- Erro! Indicador não definido.**
- Figura 3.2** - Localização geográfica e delimitação da Cava 1 da Mina Taboca, utilizada como domínio para os modelos hidrogeológicos desenvolvidos no estudo. A área delimitada na cor laranja representa a região da Cava 1 e a região demarcada em verde corresponde ao domínio do modelo..... 14
- Figura 3.3** - Variação anual da precipitação das estações pluviométricas 47004 (Primavera, barras azuis) e 47006 (São João de Pirabas, barras verdes) para o período de 2006 a 2018. 15
- Figura 3.4** - Média mensal da precipitação (mm) nas estações pluviométricas 47004 (Primavera) e 47006 (São João de Pirabas) para o período de 2006 a 2018. 16
- Figura 3.5** - Perfil geológico do poço PT-1/91-SJP na área urbana de São João de Pirabas, exibindo a estratigrafia da região de estudo. 18
- Figura 3.6** - Perfil geológico da Cava 1..... 19
- Figura 3.7** - Condutos cársticos decimétricos identificados na região da Cava 1. 19
- Figura 3.8** - Modelo hidrogeológico conceitual desenvolvido para a área de estudo. ... 22

Figura 3.9 - Modelo geológico regional em 3D, com representação dos litotipos em diferentes cores. Em vermelho, a camada de Sedimentos Barreiras. Em verde, os Carbonatos Pirabas. Em roxo, o Embasamento Cristalino.....	24
Figura 3.10 - Perfil geológico W-E localizado na área da Cava 1, mostrando a distribuição dos litotipos. Vermelho: Sedimentos Barreiras. Verde: Carbonatos Pirabas. Roxo: Embasamento cristalino.....	24
Figura 3.11 - Modelo Digital de Terreno (MDT) regional obtido a partir do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).	25
Figura 3.12 - Malha de elementos finitos horizontal definida para o modelo de simulação numérica de fluxo FeFlow.....	27
Figura 3.13 - Camada 1 - Nós atribuídos com condições de contorno 'hydraulic-head bc' e 'seepage face' (sem restrição de fluxo aplicada).	28
Figura 3.14 - Gráfico comparativo entre os níveis de água observados e simulados em condições de estado estacionário (pré-mina).....	31
Figura 3.15 - Gráfico comparativo das condições de nível de água observadas e simuladas para o estado estacionário na mina atual.	33
Figura 3.16 - Gráfico comparativo das condições de nível de água observadas e simuladas para o estado transiente na mina atual.	35
Figura 4.1 – Projeção das vazões médias para o Cenário 1 considerando um período de dez anos (2023 a 2033).....	38
Figura 4.2 – Localização dos poços sugeridos no Cenário 2 de simulação do sistema de drenagem da Cava 1 da Mina Taboca. Os pontos amarelos representam os poços propostos para o Cenário 2, incluindo os dois preexistentes.	40
Figura 4.3 - Projeção das vazões médias para o Cenário 2 (cava) em um período de dez anos (de 2023 a 2033).....	41
Figura 4.4 - Projeção das vazões médias para o Cenário 2 (poços perimetrais) de 2023 a 2033.	41
Figura 4.5 – Projeção das vazões médias para o Cenário 2 (drenos horizontais) de 2023 a 2033.	42
Figura 4.6 - Comparação entre as vazões simuladas para os Cenários 1 (cava) e 2 (cava, poços perimetrais e drenos horizontais) durante o período de 2023 a 2033.....	43

Figura 4.7 – Projeção do cone de rebaixamento do nível de água para o Cenário 1. Painel ‘A’: cone de rebaixamento atual no início do ano 1. Painéis ‘B’ e ‘C’: rebaixamento simulado para os anos 5 e 10, respectivamente.	45
Figura 4.8 – Projeção do cone de rebaixamento do aquífero para o Cenário 2. Painel ‘A’: cone de rebaixamento atual no início do ano 1. Painéis ‘B’ e ‘C’: rebaixamento simulado para os anos 5 e 10, respectivamente.	46
Figura 4.9 – Pontos para instalação dos piezômetros sugeridos.	49

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 4.1 – Estimativa de volume médio mensal de bombeamento no Cenário 1, somado à estimativa de água de chuva, considerando uma área de contribuição de 733.000m². 47

Tabela 4.2 – Estimativa de volume de bombeamento médio mensal no Cenário 2, somado à estimativa de água de chuva, considerando uma área de contribuição de 733.000m². 48

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2 OBJETIVOS.....	2
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3.1 Hidrogeologia: conceitos fundamentais	3
3.2 Águas subterrâneas.....	4
3.3 Aquíferos.....	6
3.4 Modelagem hidrogeológica de aquíferos	7
3.4.1 Equação do balanço hídrico	7
3.4.2 Condutividade hidráulica	9
3.4.3 Carga hidráulica.....	9
3.4.4 Vazão (Q).....	10
3.4.5 Transmissividade hidráulica	10
3.4.6 Coeficiente de armazenamento	10
3.5 Elaboração de modelos.....	11
3.5.1 Etapas de modelagem: preparação, calibração e aplicação.....	11
4 METODOLOGIA	12
4.1 Área de estudo.....	12
4.1.1 Clima.....	15
4.1.2 Geologia: regional e local	16
4.2 Modelo Hidrogeológico Conceitual: desenvolvimento e análise.....	20
4.3 Modelo Numérico: desenvolvimento e calibração.....	23
4.3.1 Parâmetros do modelo.....	26
4.3.1.1 Domínio.....	26
4.3.1.2 Malhas e camadas.....	26
4.3.1.3 Condições de contorno	27
4.3.1.4 Unidades Hidrogeológicas	29
4.3.2 Calibração	29
4.3.2.1 Pré-mina	29

4.3.2.2	Mina atual.....	32
4.3.2.3	Modelo transitório	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1	Descrição dos cenários de previsão para o sistema de drenagem	36
5.1.1	Cenário 1: Sistema de deságue exclusivo por meio de uma estação de bombeamento (Sump) instalada no fundo da Cava 1	37
5.1.2	Cenário 2 proposto: Sistema de deságue com estação de bombeamento, drenos horizontais e bateria de poços perimetrais.....	39
5.2	Estimativa das vazões totais: comparação entre os cenários de simulação.....	40
5.3	Análise do cone de rebaixamento para o sistema de deságue da cava.....	43
5.4	Análise do impacto da outorga de bombeamento no sistema de drenagem.....	47
6	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A hidrogeologia é a área da geologia que busca compreender o comportamento e as interações entre a água e o solo, tendo como objetivo a avaliação da qualidade e disponibilidade de água em determinada região (FETTER, 2001). Nesse contexto, a modelagem hidrogeológica é uma ferramenta essencial para a análise de cenários complexos de forma simplificada e controlada, contribuindo para a compreensão dos processos envolvidos (CAVALCANTI, 2002; CARVALHO, 2013; GONÇALVES e VELÁSQUEZ, 2016). Em resumo, a hidrogeologia é uma ciência interdisciplinar que se dedica ao estudo da água subterrânea, abrangendo diversas etapas, como recarga, descarga e fluxo. A compreensão desses processos é fundamental para a gestão dos recursos hídricos e para a preservação da qualidade da água em uma determinada região. Portanto, ressalta-se que a modelagem hidrogeológica surge como uma importante ferramenta para a simulação e análise de cenários complexos, permitindo a compreensão dos processos hidrogeológicos de forma mais precisa e eficiente.

A modelagem hidrogeológica pode ser realizada de diferentes maneiras, principalmente por meio do desenvolvimento de modelos conceituais e numéricos. O modelo conceitual é uma representação simplificada da natureza, que considera as condições e as relações hidrogeológicas de um sistema aquífero sem levar em conta a dimensão temporal (LOUSADA e CAMPOS, 2005). Esse tipo de modelo é importante para a compreensão da estrutura geológica da área de estudo, para a definição das fronteiras do sistema aquífero e para a identificação dos parâmetros hidrogeológicos que influenciam o fluxo da água subterrânea. Por outro lado, o modelo numérico é uma representação matemática do sistema aquífero, que permite a simulação do fluxo da água subterrânea em diferentes condições e escalas temporais (CHANG, 2017). Modelos numéricos têm como característica mais importante a possibilidade de previsão do comportamento do aquífero em diferentes cenários, juntamente com a avaliação dos efeitos da exploração e a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Este trabalho apresenta um estudo sobre o fluxo de água subterrânea da Mina Taboca, localizada no município de Primavera, estado do Pará. A área de estudo foi escolhida levando em consideração sua importância econômica e ambiental, visto que a mina é

responsável por uma significativa extração de minério de calcário, além de possuir uma relevância hidrogeológica por ser uma área cárstica.

Para a realização deste estudo, foram coletados dados *in situ* por meio de instrumentos, tais como piezômetros e estações de bombeamento (hidrômetros), que forneceram informações relevantes para análise do regime hidrogeológico da área de estudo, como o nível de água. Esses dados foram processados utilizando o software FEFLOW, que é capaz de simular o fluxo de água subterrânea em meios porosos e fraturados. Com base nesses resultados, foi desenvolvido um modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo, juntamente com um modelo numérico de fluxo em regime estacionário e transitório. A calibração entre os níveis de água simulados e medidos foi realizada e uma análise estatística foi empregada para avaliar a eficácia dos modelos desenvolvidos. Os resultados obtidos permitiram estimar o fluxo de água subterrânea na mina, considerando a comparação dos valores observados com os simulados. Adicionalmente, essas informações contribuíram para uma compreensão mais aprofundada do comportamento do fluxo das águas subterrâneas na área de estudo.

2 OBJETIVOS

Geral:

- Caracterizar o fluxo de água subterrânea da Mina Taboca por meio do desenvolvimento de modelos conceituais e numéricos para auxiliar na gestão da exploração dos recursos minerais.

Específicos:

- Elaborar uma descrição técnica da área de estudo, considerando dados de clima, aspectos geológicos e características hidrológicas;
- Obter dados piezométricos do aquífero para posterior utilização no desenvolvimento dos modelos;
- Desenvolver um modelo hidrogeológico conceitual considerando as informações obtidas da área de estudo;
- Realizar uma análise estatística dos parâmetros obtidos para a posterior calibração do modelo;

- Desenvolver um modelo numérico transiente para simulação de cenário ideal para dimensionamento da cava da mina Taboca.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Hidrogeologia: conceitos fundamentais

A hidrogeologia é uma subárea da geologia que tem como foco o estudo de águas subterrâneas. Para isso, consideram-se diversos aspectos, tais como sua distribuição, dinâmica e caracterização físico-química (FEITOSA *et al.*, 2008). Nesse contexto, a hidrogeologia envolve conhecimentos em geologia, hidrologia, química, física e matemática, considerando que reservatórios subterrâneos são uma importante fonte de água potável e sua gestão é crucial para a segurança hídrica em diversas regiões do globo.

Um dos principais conceitos no âmbito da hidrogeologia envolve a definição de aquífero, que corresponde a uma formação geológica capaz de armazenar e transmitir água subterrânea. Nesse sentido, podem existir diversos tipos de aquíferos, incluindo aquíferos livres, confinados e semiconfinados. Essas categorias se diferenciam pela sua relação com as camadas geológicas ao seu redor (BEAR e VERRUIJT, 1987; FETTER, 2000; MANOEL FILHO, 2000). Outro conceito importante é o do fluxo de água subterrânea, que diz respeito ao processo de movimentação da água, o qual ocorre em direção ao ponto de menor pressão hidráulica do aquífero. Assim, a pressão hidráulica é influenciada pela topografia, a densidade da água subterrânea e a permeabilidade do meio geológico. Portanto, o estudo do fluxo de água subterrânea é fundamental para a avaliação da recarga dos aquíferos e para a gestão dos recursos hídricos (FREEZE e CHERRY, 1979).

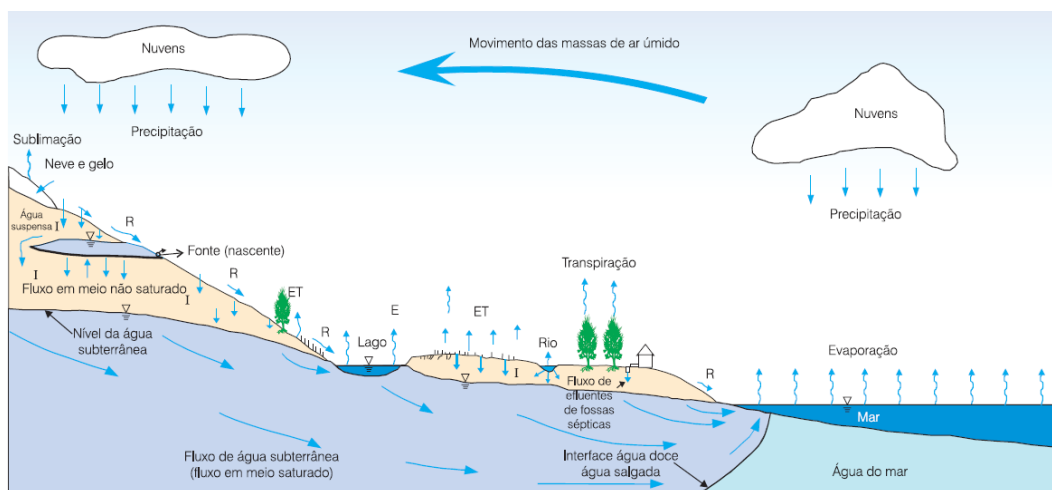
Dessa forma, a gestão de recursos hídricos é um tópico de grande importância na hidrogeologia, uma vez que estes podem ser contaminados por diversas fontes, incluindo atividades antrópicas como a agricultura e a mineração. A avaliação da qualidade da água subterrânea é fundamental para garantir a segurança hídrica e proteger a saúde pública, conforme destacado por Domenico e Schwartz (1998). Portanto, é importante implementar medidas preventivas e de monitoramento para minimizar a contaminação da água subterrânea e manter sua qualidade em níveis adequados para o consumo humano e outras atividades.

3.2 Águas subterrâneas

As águas subterrâneas são um importante componente do ciclo hidrológico terrestre. Neste contexto, os aquíferos subterrâneos têm como principal fonte de recarga o processo de infiltração da água oriunda da superfície do solo para as camadas mais internas deste. Esse processo é influenciado por diversos fatores, dentre eles a cobertura vegetal e as condições climáticas, tais como a umidade relativa do ar e a temperatura. Adicionalmente, o escoamento superficial e subterrâneo também afeta a circulação da água da atmosfera e oceanos para os continentes e vice-versa.

A Figura 2.1 apresenta uma representação esquemática do sistema que governa o ciclo hidrológico. Dessa forma [Feitosa et al. \(2008\)](#) ressaltam que entender a dinâmica da água subterrânea é crucial para gerenciar os recursos hídricos e garantir a segurança hídrica à população.

Figura 2.1 - Representação esquemática do ciclo hidrológico da água em superfície e subsuperfície, mostrando a relação entre a cobertura vegetal, os elementos climáticos e a circulação da água na natureza.

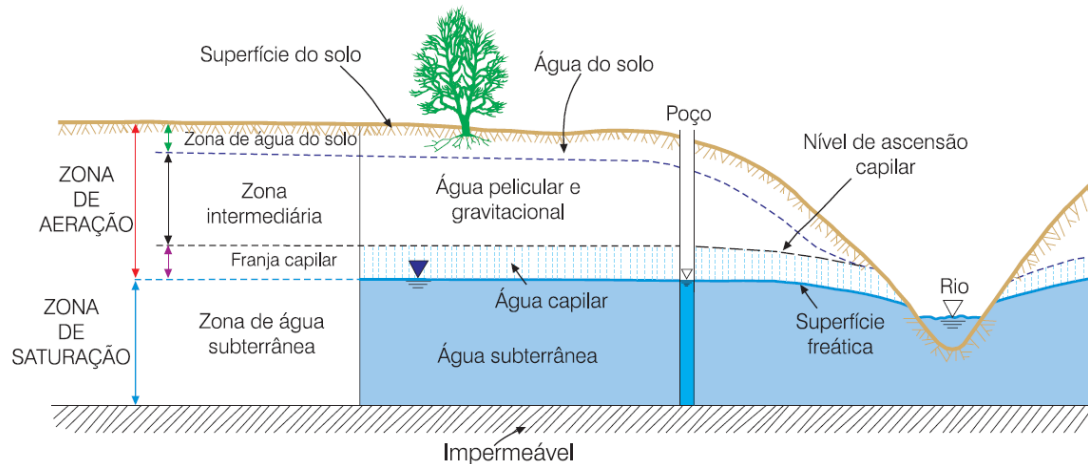


Fonte: [Feitosa et al. \(2008\)](#).

De acordo com [Feitosa et al. \(2008\)](#), quase toda a água subterrânea presente na Terra tem sua origem no ciclo hidrológico, em que a água circula do oceano para a atmosfera e dos continentes de volta para o oceano, de forma superficial e subterrânea.

Na Figura 2.2 apresenta-se uma representação esquemática das principais etapas do ciclo hidrológico, onde identificam-se os processos de evaporação (E), evapotranspiração (ET), infiltração (I) e escoamento superficial (R).

Figura 2.2 - Representação esquemática do ciclo hidrológico, indicando suas principais etapas: E = evaporação; ET = evapotranspiração; I = infiltração; R = escoamento superficial (deflúvio).



Fonte: [Feitosa et al. \(2008\)](#).

O ciclo hidrológico é governado principalmente pela ação da gravidade no solo e no subsolo, tendo também como fator de influência o tipo e a densidade da cobertura vegetal. Outro aspecto que influencia o ciclo hidrológico são os elementos climáticos, os quais podem afetar diretamente a atmosfera e os corpos d'água (rios, lagos, mares e oceanos). Nesse contexto, a temperatura do ar, ventos, umidade relativa do ar (função do déficit de pressão de vapor) e insolação (função da radiação solar) são alguns dos elementos responsáveis pelos processos de circulação da água dos oceanos para a atmosfera em uma dada latitude terrestre.

Ao adentrar na porção subterrânea do solo, a água presente nas formações geológicas é dividida em duas zonas horizontais distintas: a zona saturada e a zona não saturada, também conhecida como zona de aeração. Essas zonas são determinadas em função da proporção de espaço poroso ocupado pela água. Assim, a zona saturada é aquela em que todos os espaços porosos estão preenchidos com água e está situada abaixo do nível freático, que é definido como o ponto geométrico em que a água se encontra sob pressão

atmosférica. Já a zona não saturada é caracterizada por poros parcialmente preenchidos por gases, como o vapor d'água, e se estende da superfície freática até a superfície do terreno (FEITOSA et al., 2008).

A zona não saturada pode ainda ser subdividida em três outras zonas distintas: a zona capilar, que se estende da superfície freática até o limite de ascensão capilar da água e é caracterizada pela variação da espessura em função do tamanho dos poros e da homogeneidade do terreno; a zona intermediária, que se estende do limite da ascensão capilar até o limite do alcance das raízes das plantas; e a zona de água do solo, também conhecida como zona de evapotranspiração, que se encontra entre os extremos radiculares e o limite do terreno e é utilizada pelas plantas para as funções de nutrição e transpiração (FEITOSA et al., 2008).

3.3 Aquíferos

O aquífero é uma formação geológica que possui a capacidade de armazenar e transmitir água em condições naturais (FETTER, 2000). Nesse contexto, aquíferos são um importante tipo de reservatório de água subterrânea e possuem grande relevância para diversos setores, tais como o abastecimento público, a agricultura e a indústria. Além dos aquíferos, existem outros tipos de reservatórios que podem ser encontrados no subsolo, tais como as águas confinadas em rochas porosas não permeáveis, como argila ou folhelho, conhecidas como águas artesianas ou confinadas, dentre outros. A água encontrada nesses reservatórios é pressurizada devido à falta de permeabilidade das camadas rochosas que as cercam e podem emergir naturalmente na superfície através de poços artesianos ou serem bombeadas para o uso. Também podem ser encontradas águas subterrâneas em fraturas de rochas, conhecidas como águas de fratura, que são encontradas em zonas de cisalhamento ou falhas geológicas. Essas águas são frequentemente de baixa qualidade e podem exigir tratamento antes de serem utilizadas.

A classificação dos aquíferos pode ser feita com base em sua capacidade de transmissão de água através das camadas limítrofes e na pressão que atingem (MANOEL FILHO, 2000). O aquífero livre, como o próprio nome sugere, apresenta a superfície de saturação em contato direto com a atmosfera (FETTER, 2000). Já o aquífero confinado encontra-se

enclausurado entre camadas impermeáveis, tanto na parte superior quanto inferior. Nesse caso, a pressão exercida no aquífero pode produzir uma exsudação da água que ultrapasse a superfície rochosa, caracterizando-o como artesiano (BEAR e VERRUIJT, 1987).

O aquífero semiconfinado é aquele que se encontra entre camadas semipermeáveis, ou seja, que não são totalmente resistentes ao fluxo de água. Quando isso ocorre, os aquíferos podem ganhar ou perder água pela drenagem (FEITOSA et al., 2008; BEAR e VERRUIJT, 1987).

Outra classificação de aquífero é o suspenso, que está localizado entre a superfície terrestre e a zona freática. Nesse caso, pode ocorrer que uma camada impermeável ou semipermeável permita a elevação do aquífero acima do nível da água subterrânea, caracterizando-o como suspenso (FETTER, 2000; BEAR e VERRUIJT, 1987).

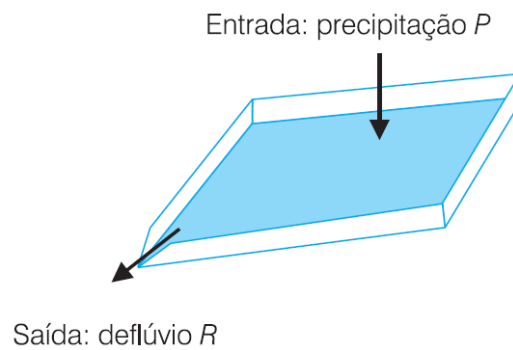
Essas classificações são importantes para entender a dinâmica do fluxo das águas subterrâneas e para a gestão adequada dos recursos hídricos na subsuperfície. Portanto, compreender as características dos aquíferos é fundamental para o desenvolvimento de projetos de exploração e conservação desses recursos, garantindo a disponibilidade de água de qualidade para as gerações presentes e futuras.

3.4 Modelagem hidrogeológica de aquíferos

3.4.1 Equação do balanço hídrico

A equação do balanço hídrico tem como base o princípio da conservação da massa ou princípio da continuidade, que afirma que a diferença entre as entradas e as saídas é igual à variação do armazenamento dentro do sistema. Para exemplificar esse balanço, pode-se considerar um sistema hidrológico simplificado, conforme ilustrado na Figura 2.3. Esse sistema consiste em uma superfície retangular plana, inclinada, totalmente impermeável e fechada lateralmente, com uma única saída. Neste, identifica-se a zona de entrada P (precipitação) e a zona de saída R (deflúvio)

Figura 2.3 - Modelo simplificado de um sistema hidrológico representando uma superfície plana, inclinada, totalmente limitada e impermeável, com uma única saída.



Fonte: [Feitosa et al. \(2008\)](#).

Considera-se nesse sistema a superfície como um plano perfeito sem que existam depressões nas quais a água possa ficar acumulada. Se for então aplicada uma chuva P ao sistema considerado, ocorrerá um escoamento superficial direto R (deflúvio), que poderá ser facilmente medido no ponto de saída. O balanço hídrico para este sistema pode ser representado pela Equação (2.1):

$$P - R = \frac{dS}{dt}, \quad (2.1)$$

onde P representa a entrada (precipitação) por unidade tempo, R é a saída (deflúvio) por unidade de tempo e dS/dt corresponde à variação no armazenamento dentro do sistema por unidade de tempo.

A saída de fluxo só irá ocorrer quando uma quantidade mínima de água se acumular na superfície. Nesse contexto, à medida que a chuva continuar, a quantidade de água retida na superfície, conhecida como detenção superficial, irá aumentar. Quando a chuva parar, a água retida na superfície irá escoar pela saída do sistema. Em condições ideais, toda a água precipitada deve escoar pelo sistema, com exceção de uma pequena quantidade que pode ficar retida por forças elétricas na superfície. Se a evaporação for desprezível, o

escoamento superficial deve ser suficiente para escoar toda a água. (FEITOSA et al., 2008).

3.4.2 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica (K) é um coeficiente que indica a facilidade com que a água pode fluir através de um meio poroso. Esta variável pode ser expressa pela relação entre os parâmetros de porosidade, tamanho, forma e distribuição dos grãos do meio poroso, conforme apresenta-se na Equação (2.2) (FETTER, 2000):

$$K = ki \frac{\rho g}{\mu}, \quad (2.2)$$

onde $ki = Cd$ é a permeabilidade intrínseca do meio poroso [m^2], considerando que C descreve o efeito dos espaços porosos e d é o diâmetro do grão. O termo ρ representa a massa específica do fluido [kg/m^3], g é a aceleração da gravidade [m/s^2] e μ é a viscosidade dinâmica do fluido [$kg/(m \cdot s)$].

3.4.3 Carga hidráulica

A energia potencial da água em um ponto é expressa pela pressão exercida e sua altura em relação a um datum, o que indica a sua carga hidráulica (FETTER, 2000). Essa relação pode ser matematicamente expressa pela Equação (2.3):

$$h = z + \frac{P}{\rho g} \rightarrow h = z + \frac{P}{\gamma}, \quad (2.3)$$

onde z é a cota altimétrica do ponto, P [Pa] é a pressão exercida, ρ [kg/m^3] é a massa específica do fluido, g [m/s^2] é a aceleração da gravidade e o termo $P/\rho g$ corresponde ao peso específico.

3.4.4 Vazão (Q)

A lei de Darcy correlaciona a vazão de escoamento, Q [L^3/T], com os seguintes parâmetros: a área da seção filtrante, A , a diferença de carga hidráulica, h_1-h_2 , e a distância percorrida pelo fluido, L (FETTER, 2000). Essa relação é matematicamente representada pela Equação (2.4):

$$Q = -K \cdot A \frac{(h_1-h_2)}{L}, \quad (2.4)$$

onde K é a condutividade hidráulica [L/T].

Ressalta-se que o sinal negativo na equação indica que o fluxo do fluido ocorre no sentido de maior carga hidráulica para menor carga hidráulica.

3.4.5 Transmissividade hidráulica

A transmissividade hidráulica representa a quantidade de água que um meio poroso pode transmitir, sendo expressa como $T = \mathbf{b}k$. Nesta relação, K é a condutividade hidráulica e \mathbf{b} é a espessura do aquífero.

3.4.6 Coeficiente de armazenamento

O coeficiente de armazenamento é definido como o volume de água que um aquífero pode liberar ou armazenar devido à variação da sua carga hidráulica por unidade de área superficial (FETTER, 2000). Matematicamente, o coeficiente de armazenamento pode ser expresso como $S = \mathbf{b}S_s$, onde \mathbf{b} é a espessura do aquífero e S_s é o armazenamento específico, correspondendo à capacidade que uma rocha reservatório tem em reter ou ceder água.

3.5 Elaboração de modelos

Os modelos são ferramentas que permitem uma representação simplificada de sistemas complexos da natureza, tendo como foco a compreensão das respostas dos sistemas às variações que ocorrem em seus parâmetros (EPA, 2009). No contexto da hidrogeologia, o modelo de fluxo de águas subterrâneas pode ser empregado de duas formas: conceitual e numérico.

O modelo conceitual é estático e representa as condições e relações hidrogeológicas de um sistema aquífero sem levar em consideração a dimensão temporal. A construção de um modelo numérico é baseada na identificação das informações necessárias para descrever um cenário hidrogeológico que melhor reproduza o comportamento do sistema hídrico em questão, incluindo a identificação das fronteiras do modelo, condições de contorno, parâmetros hidrogeológicos, entrada e saídas (FETTER, 2001).

Por outro lado, o modelo numérico leva em consideração as relações hidrogeológicas no tempo e no espaço. Para esse tipo de modelo, é utilizado o modelo matemático para fluxo subterrâneo, que é fundamentado na resolução de equações mais complexas que envolvem a variabilidade de parâmetros, caracterizando-os como modelos numéricos computacionais (EATON e BATEMAN, 2020).

A construção de modelos numéricos computacionais requer a aplicação de uma série de procedimentos, que são as etapas de modelagem. Esses procedimentos são denominados de Protocolos de Aplicação de Modelos Matemáticos (PAMM's) (ANDERSON e WOESSNER, 1992). Os PAMM's compreendem nove etapas, que aqui são subdivididas em três fases: preparação, calibração e aplicação (ZHENG e WANG, 1999).

3.5.1 Etapas de modelagem: preparação, calibração e aplicação

A construção de um modelo numérico é uma ferramenta importante na hidrogeologia, pois permite uma melhor compreensão do comportamento de sistemas hídricos a nível subterrâneo (FETTER, 2001). Para isso, é necessário seguir um conjunto de procedimentos conhecidos como Protocolos de Aplicação de Modelos Matemáticos

(PAMM's) (ANDERSON e WOESSNER, 1992). Esses protocolos consistem em nove etapas que podem ser agrupadas em três fases: preparação, calibração e aplicação.

Na fase de preparação, o modelo conceitual da área de estudo é estabelecido com base em dados adquiridos da literatura, do campo ou de bancos de dados abertos. Essas informações são usadas para a identificação das fronteiras do modelo, condições de contorno, parâmetros hidrogeológicos, entrada e saídas (FETTER, 2001).

Já na fase de calibração, o modelo é simulado em ambiente computacional diversas vezes até que os valores calculados dos parâmetros hidrogeológicos sejam equivalentes ou próximos aos valores observados em campo. Isso envolve a determinação e ajuste dos parâmetros hidrogeológicos do modelo, como a condutividade hidráulica e a recarga (ZHENG e WANG, 1999).

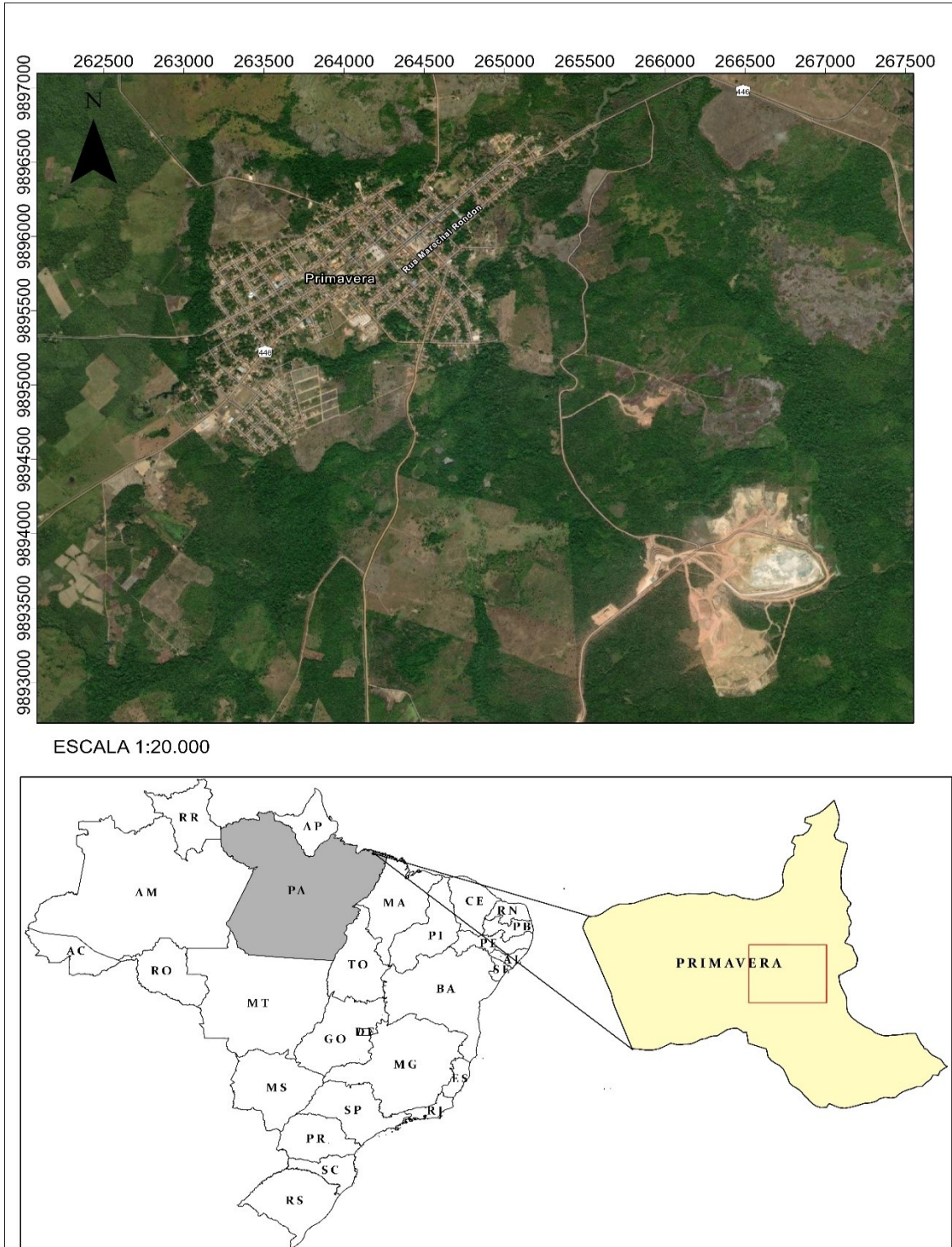
Com o modelo calibrado, é possível realizar a análise dos resultados obtidos na simulação. Isso possibilita uma melhor compreensão do modelo hidrogeológico considerado e a tomada de decisões com base nas informações obtidas.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

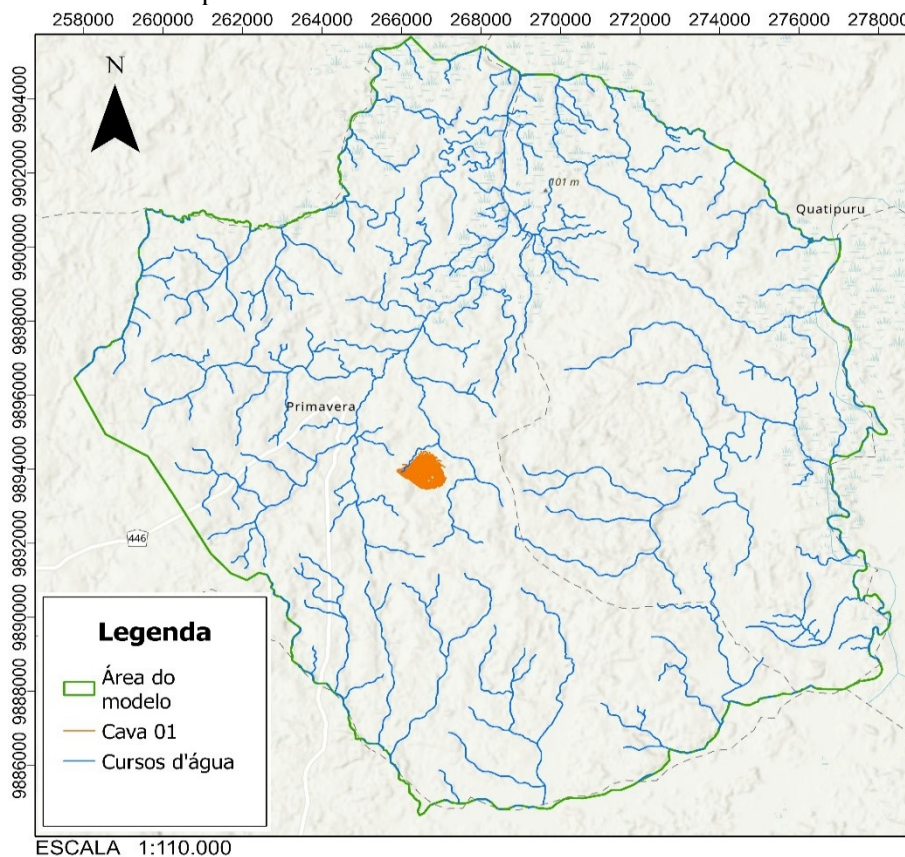
A área de estudo corresponde à Mina Taboca (Cava 1), localizada no município de Primavera, Estado do Pará e atualmente sob concessão da Votorantim Cimentos S.A. Na Figura 3.1 apresenta-se um mapa de localização da área da Mina Taboca. O painel superior mostra a localização do município de Primavera, onde o quadrante em vermelho demarca a região que compreende a zona urbana juntamente com a área da unidade da mina. O painel inferior ilustra em maiores detalhes essa região. Neste, o quadrante em azul demarca a região da unidade da mina.

Figura 3.1- – Mapa de localização da Mina Taboca (Primavera – PA). O painel superior destaca localização geográfica da região que compreende tanto a zona urbana quanto a área da mina (quadrante vermelho) dentro do município. O painel inferior apresenta com mais detalhes a área destacada, na qual a unidade da mina está demarcada em azul.



Conforme mencionado, este trabalho concentrou-se na avaliação da região correspondente à Cava 1 da Mina Taboca. Assim, todas as análises consideraram a localização da cava para a determinação dos limites dos modelos hidrogeológicos desenvolvidos. A Figura 3.2 apresenta a localização geográfica e a delimitação da Cava 1, juntamente com a demarcação do domínio dos modelos desenvolvidos. Ressalta-se que o modelo de águas subterrâneas foi definido para uma área de 20x20 km (27 ha). As bordas do modelo foram estabelecidas ao sul pelo rio dos Cacos, a leste pelo rio Catipuru, ao noroeste pelo rio que divide os municípios de Primavera e São João de Pirabas, e ao nordeste por drenagens menores, muitas delas manguezais. Nessas áreas, cargas hidráulicas constantes foram assumidas.

Figura 3.2 - Localização geográfica e delimitação da Cava 1 da Mina Taboca, utilizada como domínio para os modelos hidrogeológicos desenvolvidos no estudo. A área delimitada na cor laranja representa a região da Cava 1 e a região demarcada em verde corresponde ao domínio do modelo.

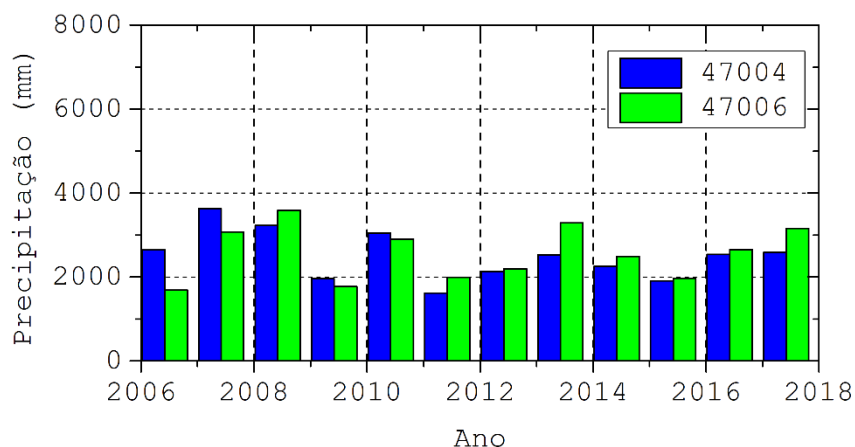


Fonte: O autor.

4.1.1 Clima

Com base nos registros da base de dados HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA, 2005), foram selecionadas duas estações pluviométricas próximas à área de estudo, a saber: 47004 (Primavera) e 47006 (São João de Pirabas). Essas estações foram selecionadas considerando a proximidade da área de estudo e a distância entre elas (9 km). Nesse contexto, a seleção das duas estações pluviométricas próximas à área de estudo teve como intuito obter uma maior precisão na coleta de dados e análise da precipitação na região. Assim, na Figura 3.3 apresentam-se os dados de precipitação obtidos das duas estações para o período de 2006 a 2018, onde as barras azuis e verdes representam, respectivamente, as estações 47004 e 47006. Mediante esses dados, observa-se que a precipitação anual da região nesse período variou entre 1600 mm e 3600 mm.

Figura 3.3 - Variação anual da precipitação das estações pluviométricas 47004 (Primavera, barras azuis) e 47006 (São João de Pirabas, barras verdes) para o período de 2006 a 2018.

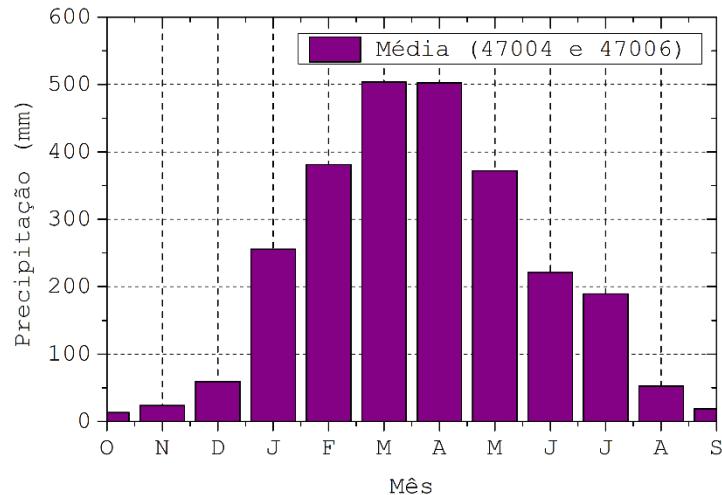


Fonte: O autor.

Os dados de precipitação coletados pelas estações pluviométricas 47004 (Primavera) e 47006 (São João de Pirabas) foram utilizados para calcular a média mensal da precipitação na região durante o período de 2006 a 2018, conforme apresenta-se na Figura 3.4. Nota-se que os meses de março e abril registraram as maiores médias de precipitação

(~500 mm), seguidos pelos meses de fevereiro e maio (~380 mm), janeiro (255 mm), junho (221 mm) e julho (189 mm). Nos demais meses, a precipitação média ficou abaixo de 60 mm.

Figura 3.4 - Média mensal da precipitação (mm) nas estações pluviométricas 47004 (Primavera) e 47006 (São João de Pirabas) para o período de 2006 a 2018.



Fonte: O autor.

4.1.2 Geologia: regional e local

Na área de estudo, os sedimentos Terciários do Grupo Barreiras predominam em superfície, estando esses associados aos Quaternários descritos na literatura como Unidade Pós-Barreiras e depósitos de mangue subjacentes às anteriores. Dessa forma, os sedimentos recentes correspondem a depósitos fluviais com grande acúmulo de seixos, areias de granulação fina a média, e argila escura (coloração cinza a marrom) devido à sua riqueza em matéria orgânica, o que pode estar associado à influência de maré (AB'SÁBER, 2003).

A Unidade Pós-Barreiras é caracterizada por sedimentos amarelados a avermelhados, areno-argilosos a argilo-arenosos, compostos principalmente por grãos de quartzo e frações de silte e argila, com leitos finos de seixos de arenitos ferruginosos. Observam-se, ainda, estruturas de acamamento plano-paralelo, que localmente delineiam suaves ondulações, apresentando formações de lentes. Sua idade foi datada no Quaternário

Pleistocênico, e atribui-se sua formação principalmente a processos eólicos (TATUMI et al., 2008).

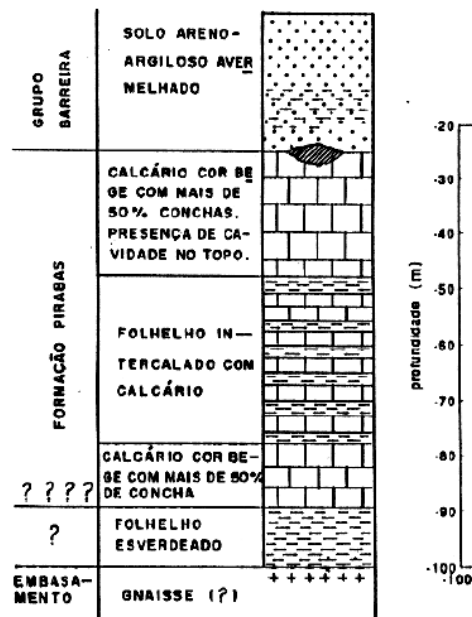
O Grupo Barreiras é constituído por depósitos sedimentares de origem predominantemente continental, embora sedimentos de origem marinha, incluídos neste grupo, tenham sido encontrados no litoral Paraense. Os sedimentos desta formação apresentam características siliciclásticas, sendo constituídos por argilitos, siltitos, arenitos e conglomerados.

A Formação Pirabas, sotoposta ao Grupo Barreiras, é do Mioceno Inferior, constituída por calcários puros e fossilíferos, associados a margas e brechas conglomerativas basais, sobrepostas a gnaisses do embasamento cristalino. As fácies carbonáticas da Formação Pirabas exibem proporções variáveis de grãos siliciclásticos e consistem em biocalcirruditos, calcilitos e margas (ROSSETTI, 2006). A presença de cavidades cársticas foi registrada em poços artesianos perfurados na área urbana de São João de Pirabas (LOPES, 1996), bem como na região de Salinas, Castanhal e Marapanim (IMBIRIBA JUNIOR, 2019).

No município de Castanhal-PA ocorre uma camada de calcarenito friável creme amarelado com vestígios fósseis disseminados com profundidade de 105 metros, sotoposto a uma camada de argila cinza escura, piritosa, cujo quimismo de caráter ácido da água promove a dissolução dos componentes químicos da rocha carbonática, gerando feições típicas de armazenamento e circulação cárstico-fissurais. Os sedimentos terció-quaternários Barreiras-Pirabas na região estão assentados sobre um embasamento cristalino pré-cambriano, que na região é relatado como rochas gnáissicas (IMBIRIBA JUNIOR, 2019).

A Figura 3.5 apresenta um perfil geológico do poço PT-1/91-SJP, localizado na área urbana de São João de Pirabas, e que mostra a estratigrafia da região em estudo (LOPES, 1996).

Figura 3.5 - Perfil geológico do poço PT-1/91-SJP na área urbana de São João de Pirabas, exibindo a estratigrafia da região de estudo.



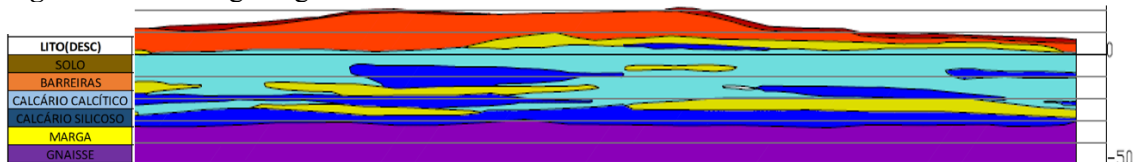
Fonte: [Lopes \(1995\)](#).

Na região das cavas, a Formação Barreiras é constituída por arenitos finos a siltitos-argilosos, com profundidades que variam aproximadamente de 1 a 20 metros devido à erosão do terreno. A Formação Pirabas, por sua vez, apresenta calcários calcícos a silicosos, com aspecto maciço e fossilíferos de granulação fina a grossa. Ambas as formações possuem porosidade primária visivelmente observada, com ocorrência de lentes de margas no interior da formação. Na área em estudo, a espessura média da Formação Pirabas é de 30 metros, sendo que a base da formação é marcada por uma predominância de calcários silicosos e marcas com espessura média de 5-10 metros. O embasamento cristalino, composto por rochas gnáissicas, está localizado abaixo desta formação ([LCT-EPUSP, 2015](#)).

As Figuras 3.6 e 3.7 apresentam informações relevantes sobre a área da cava, especificamente, o perfil geológico da Cava 1 e os condutos na região da cava. Por meio das imagens, é possível identificar feições cársticas localizadas na porção superior da Formação Pirabas, seguindo a tendência regional. Essas feições possuem dimensões que

variam de decimétricas a métricas e estão localizadas a alguns metros abaixo do nível estático original, no lado oeste da cava. Além das cavidades encontradas na abertura da cava, foram identificadas dolinas, que são feições de subsidência do terreno, associadas aos processos cársticos (SILVA, 2020).

Figura 3.6 - Perfil geológico da Cava 1.



Fonte: O autor.

Figura 3.7 - Condutos cársticos decimétricos identificados na região da Cava 1.



Fonte: O autor.

Este conjunto de informações contribui para a compreensão das características geológicas da área em estudo e é de grande relevância para o avanço do conhecimento sobre a região. A Formação Pirabas, em particular, apresenta grande potencial para estudos geológicos mais aprofundados e para o desenvolvimento de pesquisas em áreas como petróleo e gás, por exemplo.

4.2 Modelo Hidrogeológico Conceitual: desenvolvimento e análise

A elaboração do modelo conceitual é uma etapa crucial para a posterior modelagem numérica do aquífero. Desta forma, o modelo conceitual consiste em uma representação simplificada da área a ser estudada, incluindo informações sobre as características físicas, tais como topografia, clima, hidrografia, solos, geologia e hidrogeologia, além do domínio do modelo e das condições de contorno. Assim, a preparação do modelo conceitual envolve a criação do conceito hidrogeológico de um sistema de água subterrânea, estimativa das zonas de recarga e descarga e a elaboração do balanço hídrico para estimar a recarga de água subterrânea. A construção do modelo também tem como objetivo organizar os dados associados para uma análise mais eficiente (ANDERSON e WOESSNER, 1992). É importante salientar que este modelo deve ser continuamente atualizado à medida que novas informações forem adquiridas (BREDEHOEFT, 2005), especialmente se as informações geológicas e hidrogeológicas regionais e específicas da área estudada forem escassas.

Para que um modelo hidrogeológico conceitual de um sistema aquífero carbonático/cárstico seja completo e preciso, é necessário que alguns componentes sejam considerados (KLIMCHOUK, 2018). Entre esses componentes, destacam-se:

- Geometria do sistema aquífero, que inclui a composição, extensão, espessura e identificação de possíveis aquíferos intercalados;
- Condições de contorno controladas por níveis de água, fluxos e limites sem fluxo;
- Tipos de aquíferos/regimes de fluxo, tais como confinado, semi-confinado, não confinado (freático) ou suspensos;
- Entradas e saídas de água (caracterização para estimativa de recarga e descarga do aquífero);
- Direções gerais do fluxo de águas subterrâneas;
- Parâmetros hidráulicos derivados das propriedades do aquífero, como porosidade e permeabilidade;
- Descrições de porosidade secundária, como fraturas e falhas, para melhorar o movimento simulado das águas subterrâneas (KLIMCHOUK, 2018).

Com base nas características litológicas das formações na região, estas foram classificadas de acordo com sua capacidade de armazenar e transmitir água (aquífero-aquitardo-aquifugo). Dentro desse contexto, é importante destacar que os aquíferos são formações geológicas que permitem a circulação de água através de poros, fraturas ou características de dissolução. Esses processos naturais permitem que a água seja armazenada no subsolo e possa ser utilizada de maneira sustentável. Aquitardos são unidades com baixa capacidade de transmissão de água subterrânea e constituem, na maioria das vezes, barreiras parciais ao fluxo (FETTER, 2001). Aquicludes são rochas que não transmitem água, possuindo características de meios impermeáveis. Nesta categoria, foram identificadas as unidades descritas a seguir (TODD e MAYS, 2004).

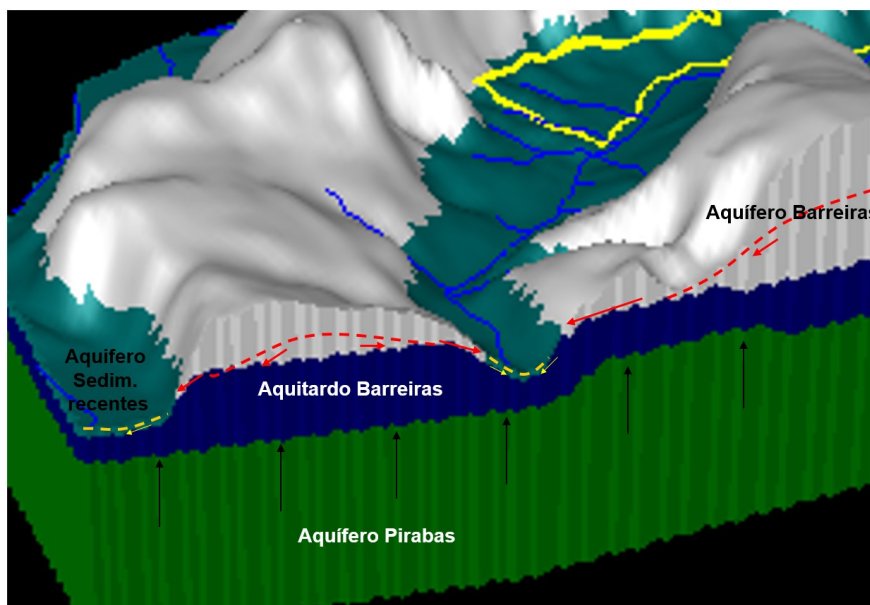
Os sedimentos recentes e arenosos e siltosos do Grupo Barreiras foram identificados como aquíferos livres de porosidade primária. Por serem formações de espessura restrita, são considerados aquíferos de baixo potencial de armazenamento. A recarga ocorre de maneira homogênea em toda a área de estudo, e as zonas de descarga são as nascentes e igarapés.

Foram observadas características de aquitardos/aquicludes nos sedimentos argilosos e margas presentes tanto no Barreiras quanto no Pirabas. Em meio a blocos estruturais, a quantidade de água é reduzida significativamente devido às características impermeáveis dessas unidades. O aquitardo Barreiras, localizado na base da formação Barreiras, gera um confinamento no aquífero Pirabas. Adicionalmente, as margas não foram consideradas como sistemas independentes, uma vez que se comportam como lentes na área e apresentam descontinuidade.

Os carbonatos da Formação Pirabas são catalogados como aquíferos confinados de tripla porosidade (poros, fraturas e vazios). A camada confinante possivelmente representa o extrato de sedimentos argilosos presente na base do grupo Barreiras e das próprias lentes de margas internas do aquífero Pirabas.

A Figura 3.8 apresenta um bloco diagrama ilustrando o modelo conceitual desenvolvido neste trabalho, com os três sistemas de fluxo propostos.

Figura 3.8 - Modelo hidrogeológico conceitual desenvolvido para a área de estudo.



Fonte: O autor.

O primeiro sistema, chamado de Sistema de Fluxo Raso Sedimentos Recentes, é localizado nos fundos de vales e representa o Aquífero Livre relacionado aos Sedimentos Recentes provenientes da erosão do Grupo Barreiras. As linhas de fluxo deste sistema vão do início das encostas em direção aos rios, sendo representadas pelas linhas amarelas na Figura 3.8.

O segundo sistema, denominado de Sistema de Fluxo Raso Aquífero Barreiras, também é local e está relacionado às zonas mais elevadas, ilustrado pelas linhas de cor vermelha na Figura 3.8. Este sistema corresponde ao Aquífero Livre Barreiras, com direção de fluxo das partes mais elevadas dos morros para sua meia encosta, onde estão presentes diversas nascentes. Sua base está limitada pelo Aquitardo Barreiras, que controla seu fluxo, na maior parte acentuado em sua zona de contato. Como ambos os sistemas são livres, eles compartilham a mesma superfície freática, que tem direção preferencial de oeste para leste na área.

O terceiro sistema é o Sistema de Fluxo Profundo Pirabas, que corresponde ao Aquífero Semi-confinado a confinado Pirabas. Este sistema exerce pressão variada sobre o Aquitardo Barreiras. No entanto, devido à falta de dados de nível piezométrico atuais,

não é possível definir o gradiente hidráulico e a direção de fluxo nos sistemas aquíferos no momento.

É importante ressaltar que na porção sudoeste da área de estudo, que é topograficamente mais elevada, a superfície potenciométrica também é mais elevada, distribuindo as linhas de fluxo em várias direções.

4.3 Modelo Numérico: desenvolvimento e calibração

Com base em suas características geológicas e hidrogeológicas, os litotipos presentes na área de estudo foram agrupados em três unidades hidroestratigráficas semelhantes, conforme se detalha a seguir:

- Sedimentos Barreiras: Aquitardo
- Carbonatos Pirabas: Aquífero
- Embasamento cristalino: Aquífero

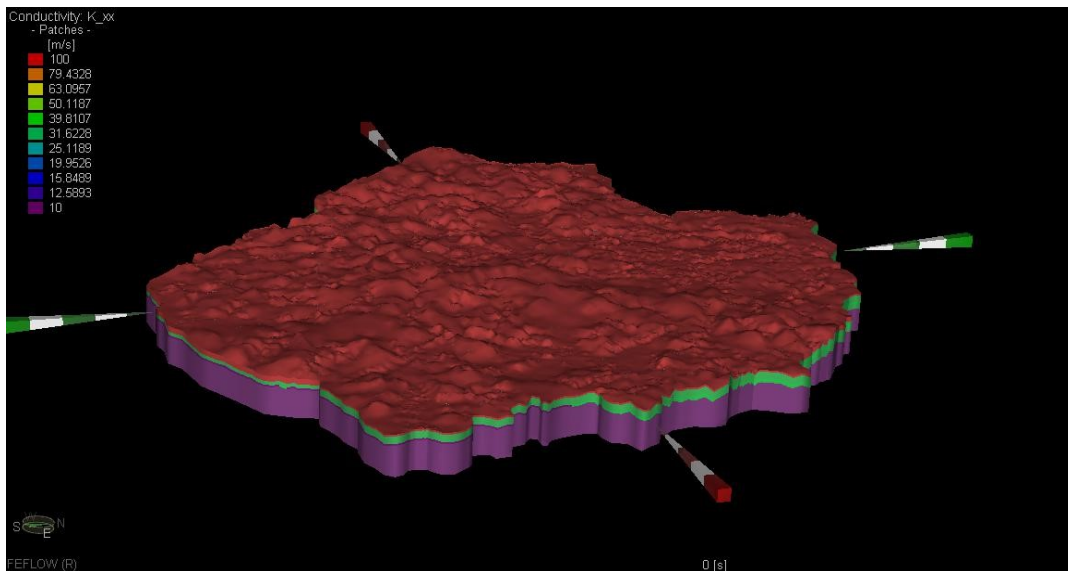
Os contatos Barreiras/Pirabas/Embasamento foram fornecidos pela Votorantim Cimentos e importados do modelo geológico atualizado. Nas partes externas, foi realizada uma extrapolação das camadas usando-se a tendência da superfície de contato e algumas sondagens para poços artesanais na região.

O Feflow é um software de modelagem numérica de fluxo de águas subterrâneas amplamente utilizado na pesquisa em hidrogeologia ([DHI-WASY, 2021](#)). Neste trabalho, o software foi empregado no desenvolvimento do modelo numérico de fluxo para investigar o comportamento hidrodinâmico da área de estudo. Dessa forma, a abordagem de elementos finitos utilizada pelo Feflow permitiu a discretização do domínio de modelagem em pequenas partes, permitindo a resolução numérica das equações de fluxo e transporte de massa.

As Figuras 3.9 e 3.10 ilustram o modelo geológico regional e o perfil geológico W-E localizado na área da Cava 1, respectivamente. A Figura 3.9 apresenta o modelo geológico regional em 3D no software Feflow, no qual os litotipos foram representados em diferentes cores. Em vermelho, a camada de Sedimentos Barreiras. Em verde, os Carbonatos Pirabas. Em roxo, o Embasamento Cristalino. Já a Figura 3.10 mostra o perfil

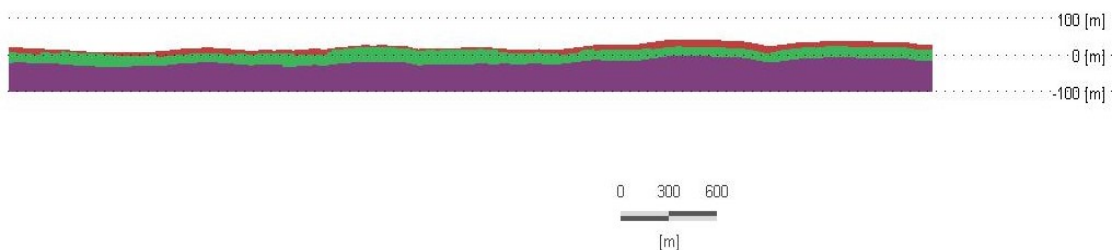
geológico W-E na área da Cava 1, destacando a distribuição dos litotipos. A camada de Sedimentos Barreiras é representada em vermelho, os Carbonatos Pirabas em verde e o Embasamento Cristalino em roxo.

Figura 3.9 - Modelo geológico regional em 3D, com representação dos litotipos em diferentes cores. Em vermelho, a camada de Sedimentos Barreiras. Em verde, os Carbonatos Pirabas. Em roxo, o Embasamento Cristalino.



Fonte: O autor.

Figura 3.10 - Perfil geológico W-E localizado na área da Cava 1, mostrando a distribuição dos litotipos. Vermelho: Sedimentos Barreiras. Verde: Carbonatos Pirabas. Roxo: Embasamento cristalino.



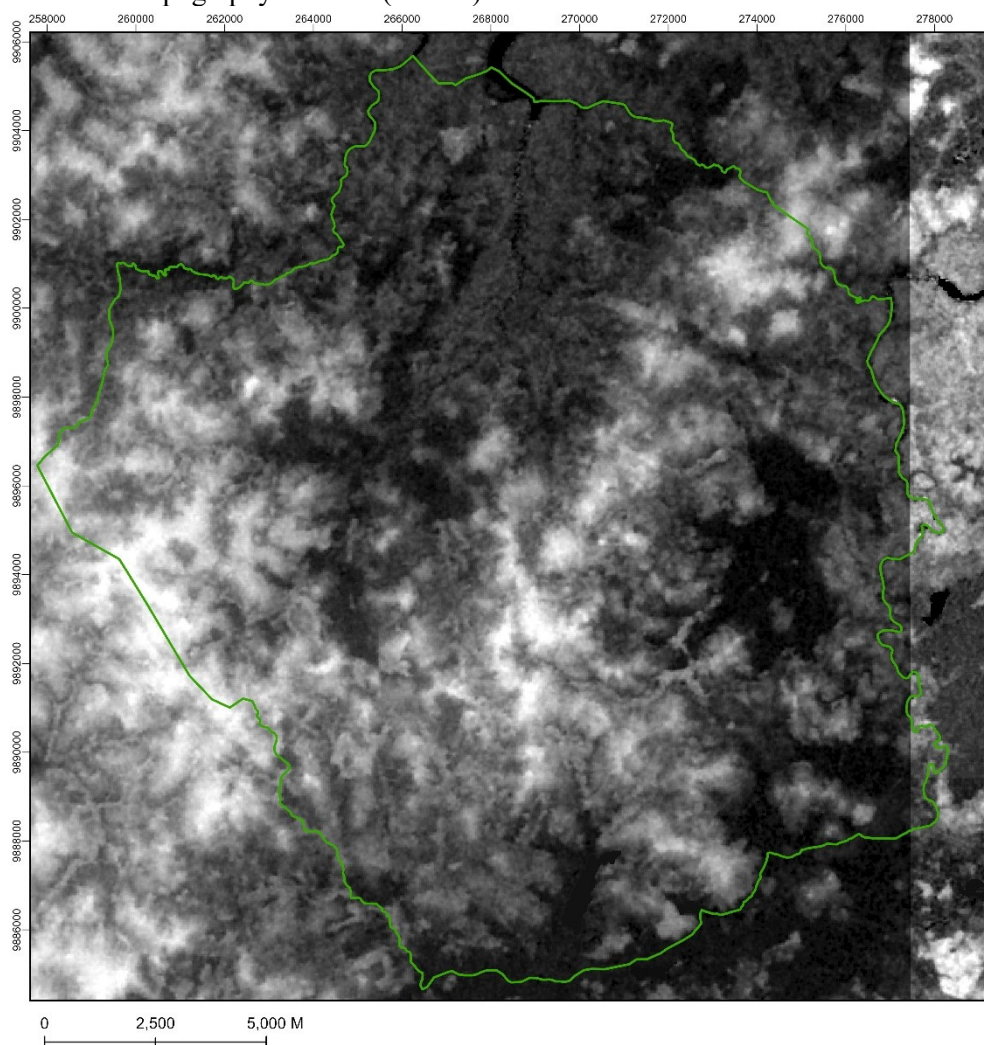
Fonte: O autor.

Ressalta-se que o modelo geológico representa uma versão simplificada de uma área naturalmente complexa. As principais divisões deste modelo são baseadas nas unidades

regionais descritas em [CPRM \(2014\)](#). As unidades são formações geológicas compostas principalmente por filitos, margas, cascalhos, solos e dolomitos (cársticos e rocha sã).

Para a configuração regional da superfície do solo, foram utilizados dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução de 30 metros, incluindo as áreas SRTMS01W047, SRTMS02W047, SRTMS01W048 e SRTMS02W048. A Figura 3.10 apresenta o modelo digital de terreno (MDT) regional gerado para a área de estudo.

Figura 3.11 - Modelo Digital de Terreno (MDT) regional obtido a partir do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).



Fonte: O autor.

4.3.1 Parâmetros do modelo

4.3.1.1 Domínio

O domínio do modelo de águas subterrâneas é definido pelas condições de contorno que generalizam as entradas e saídas de água do sistema. A área do modelo é de 20x20 km, com uma superfície de 27 ha. As bordas do modelo foram definidas pelas seguintes características geográficas: ao sul pelo rio dos Cacos, a leste pelo rio Catipuru, noroeste por um rio que divide os municípios de Primavera e São João de Pirabas e a nordeste por drenagens menores, incluindo manguezais. Nessas áreas, serão consideradas cargas hidráulicas constantes.

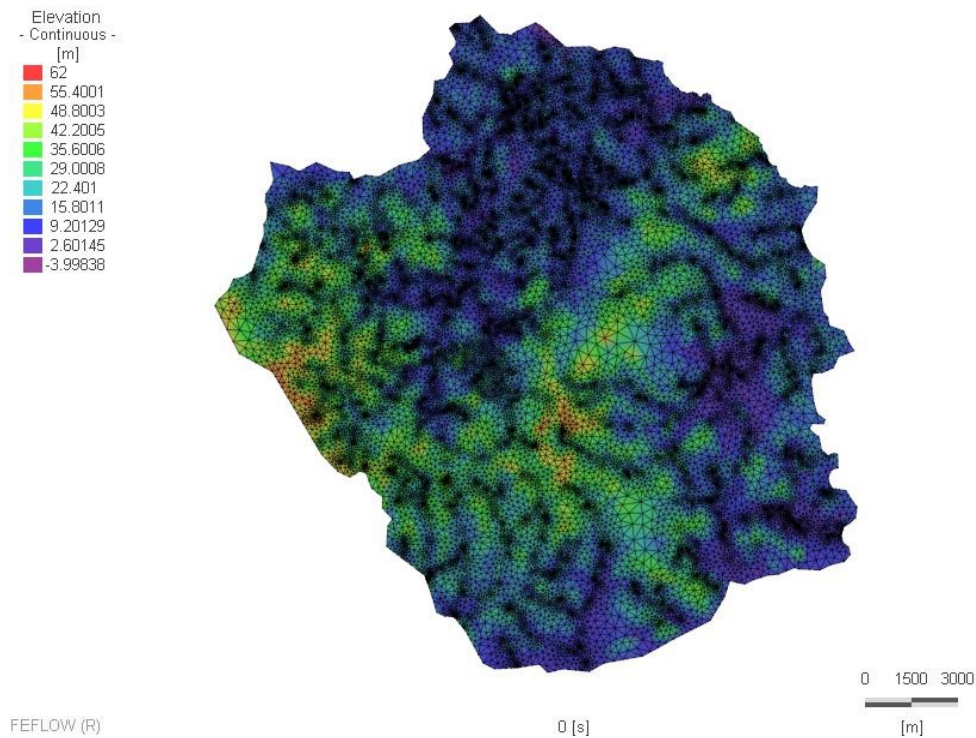
4.3.1.2 Malhas e camadas

O ajuste de malhas e camadas foi feito por meio das seguintes etapas:

- Geração da malha triangular de elementos finitos para toda a área do modelo;
- Discretização horizontal do domínio do modelo em uma malha de elementos finitos de elementos triangulares e verticalmente pela definição de camadas;
- Criação de uma única malha de modelo para todos os estágios do modelo: desde o modelo de estado estacionário das condições atuais até os modelos transitórios de calibração e preditivo;
- Inclusão do resultado da calibração pré-mineração como condição inicial para os modelos transitórios;
- Utilização de uma grade de modelo contendo 1.702.7001.825 elementos e 892.398 nós.

A Figura 5 apresenta a malha de elementos finitos horizontais definidos para o modelo no software FeFlow. Um nível de refinamento mais elevado da malha foi definido para a zona da mina, enquanto uma resolução de malha mais fina foi estabelecida em torno dos principais recursos, como setores de poços e cursos de água. Nas áreas externas à mina, o nível de refinamento foi reduzido para aumentar a eficiência das simulações do modelo.

Figura 3.12 - Malha de elementos finitos horizontal definida para o modelo de simulação numérica de fluxo FeFlow.



Fonte: O autor.

4.3.1.3 Condições de contorno

As condições de contorno são um componente essencial na conceituação de um sistema de águas subterrâneas, representando as entradas e saídas de água do sistema. A seleção dos limites do domínio de modelagem e a prescrição das condições dos limites são fundamentais para desenvolver um modelo que se ajuste à área de estudo.

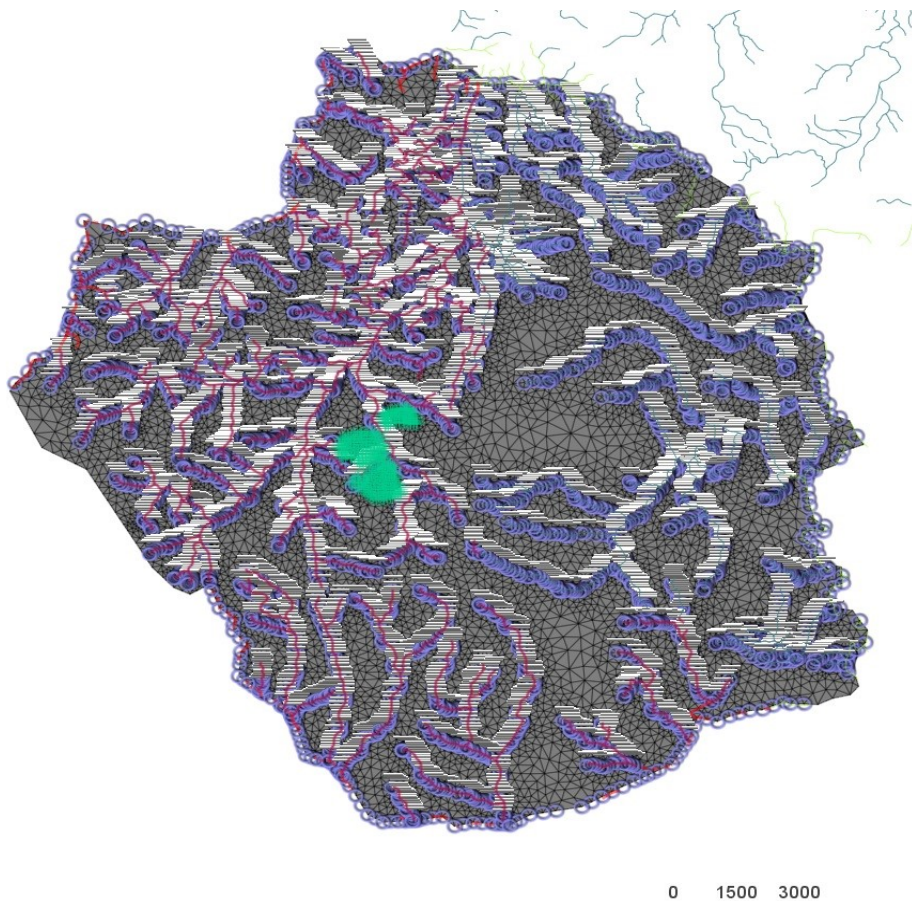
Após a definição da malha, as condições de contorno foram atribuídas à estrutura do modelo para representar as condições hidráulicas nos limites e dentro do seu domínio para condições prescritas, como zonas de descarga de águas subterrâneas, poços e drenagem da mina. As condições de contorno no limite externo do domínio do modelo foram constantes ao longo dos modelos permanentes e transitórios. No entanto, as condições de contorno internas, especialmente aquelas relacionadas aos poços, cursos

d'água e galerias subterrâneas, variaram para as diferentes simulações com base nas condições prescritas.

As fronteiras externas do modelo foram definidas por corpos de água locais. Para estes locais, foram atribuídas condições de contorno do tipo *hydraulic-head bc*, onde a carga é constante e conhecida. Para locais definidos como descarga de águas subterrâneas, como fundos de vale, nascentes e lagoas, foram atribuídas condições de contorno do tipo *seepage face*, que permite a descarga de água do modelo quando o nível de água calculado no nó for maior que a sua cota topográfica.

A Figura 3.13 ilustra os locais dos nós determinados como *hydraulic-head bc* na parte externa e *seepage face* na parte interna do modelo.

Figura 3.13 - Camada 1 - Nós atribuídos com condições de contorno 'hydraulic-head bc' e 'seepage face' (sem restrição de fluxo aplicada).



Fonte: O autor.

4.3.1.4 Unidades Hidrogeológicas

Após a construção da malha de elementos finitos e a atribuição das condições de contorno e recarga, o próximo passo na construção do modelo foi a definição e a atribuição das unidades hidrogeológicas à grade do modelo. No software FeFlow, as unidades hidrogeológicas são utilizadas para controlar a atribuição das propriedades hidráulicas, tais como permeabilidade, anisotropia e valores de armazenamento. Cada unidade de hidrogeologia representa uma unidade distinta com valores únicos, e em conjunto com as condições de contorno, controlam o comportamento do sistema de águas subterrâneas, como a direção do fluxo, gradientes e níveis de resposta à tensão transitória.

A definição das diferentes unidades de hidrogeologia baseou-se na representação conceitual da mina, da hidrogeologia e nas variações potenciais nas propriedades hidráulicas no domínio do modelo. Na construção do modelo hidrogeológico conceitual, presume-se que os principais fatores de controle são a geologia heterogênea e a deformação secundária dessas unidades, bem como a intensidade e profundidade da carstificação.

4.3.2 Calibração

4.3.2.1 Pré-mina

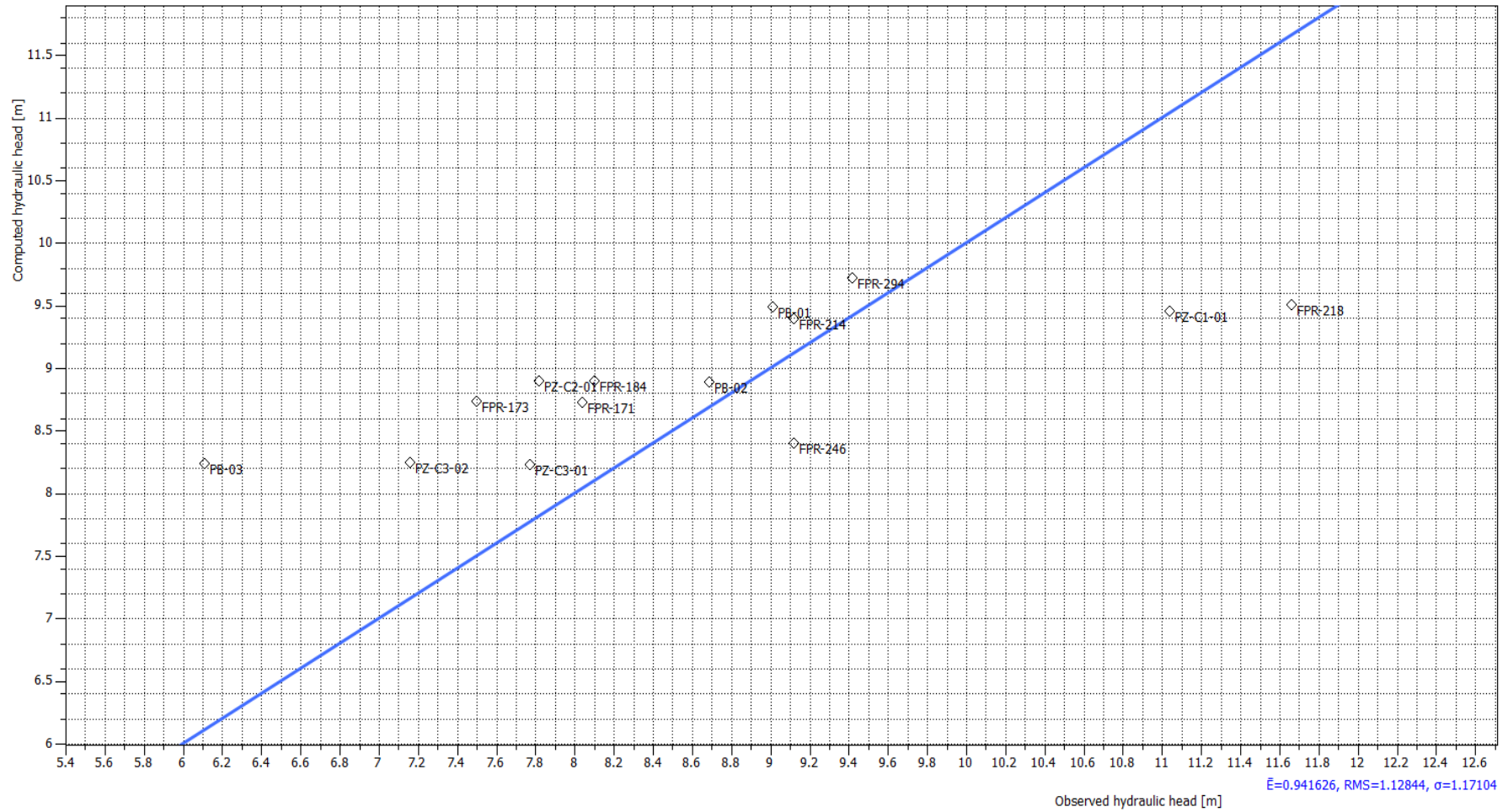
O processo de calibração foi realizado com base em parâmetros observados em campo e alinhado com o modelo hidrogeológico conceitual revisado e aprovado pela Votorantim Cimentos ([HYDROKARST, 2021](#)). Os resultados obtidos consistem em estatísticas de calibração para os níveis de água simulados versus medidos e estimativas de fluxo de base do córrego Taboca, com base nos valores observados versus simulados.

A calibração foi conduzida até que uma diferença razoável fosse alcançada entre os níveis de água medidos nos piezômetros selecionados e os níveis de água simulados. Nesse contexto, ressalta-se que considerou-se uma boa calibração como um valor de erro quadrático médio (RMS) inferior a 10%.

Durante o processo de calibração, o parâmetro de condutividade hidráulica foi ajustado, mantendo as relações gerais estabelecidas no desenvolvimento do modelo conceitual. A

análise foi conduzida com base em 14 piezômetros distribuídos conforme a Figura 3.14. Na melhor calibração, obteve-se um valor de RMS de 1%, considerado excelente.

Figura 3.14 - Gráfico comparativo entre os níveis de água observados e simulados em condições de estado estacionário (pré-mina).



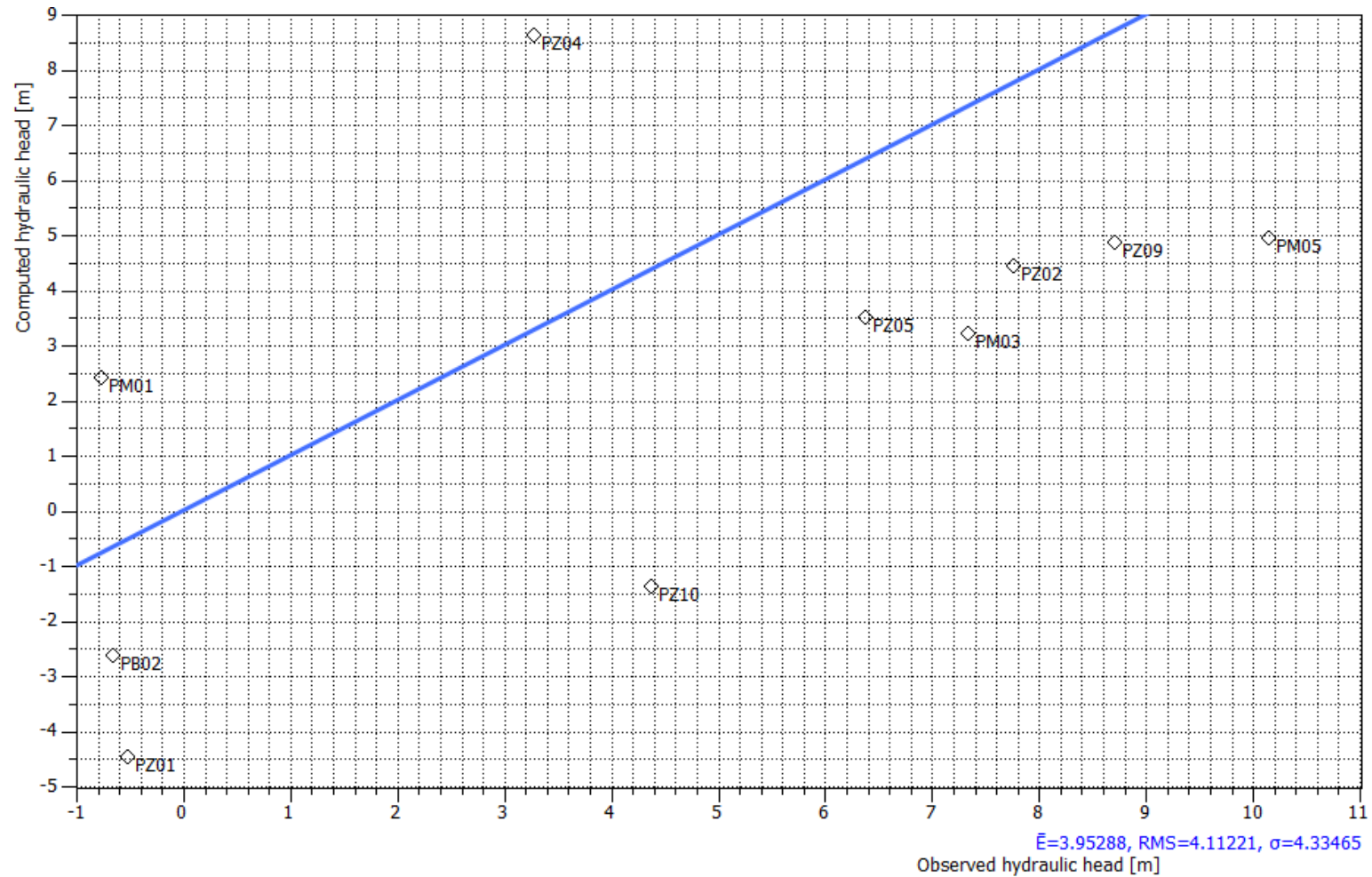
Fonte: O autor.

4.3.2.2 Mina atual

Realizou-se a revisão da calibração do modelo em estado estacionário da mina atual, utilizando-se de informações de nível e vazões monitorados nesta etapa de campo, levando em consideração as interferências da mina nas condições atuais. A calibração foi balizada priorizando-se parâmetros observados em campo e alinhada com o modelo hidrogeológico conceitual revisado e aprovado pela empresa Votorantim (HYDROKARST, 2021).

Os resultados apresentados consistem em estatísticas de calibração para os níveis de água simulados versus medidos e estimativas de fluxo de base bombeado da mina no período seco com base nos valores observados versus simulados. Durante a calibração, o parâmetro da condutividade hidráulica foi ajustado, mantendo-se as relações gerais estabelecidas no desenvolvimento do modelo conceitual. Para análise, foram considerados 14 piezômetros distribuídos de acordo com a Figura 3.15. Na melhor calibração, obteve-se um valor de RMS de 4,1%, considerado excelente.

Figura 3.15 - Gráfico comparativo das condições de nível de água observadas e simuladas para o estado estacionário na mina atual.



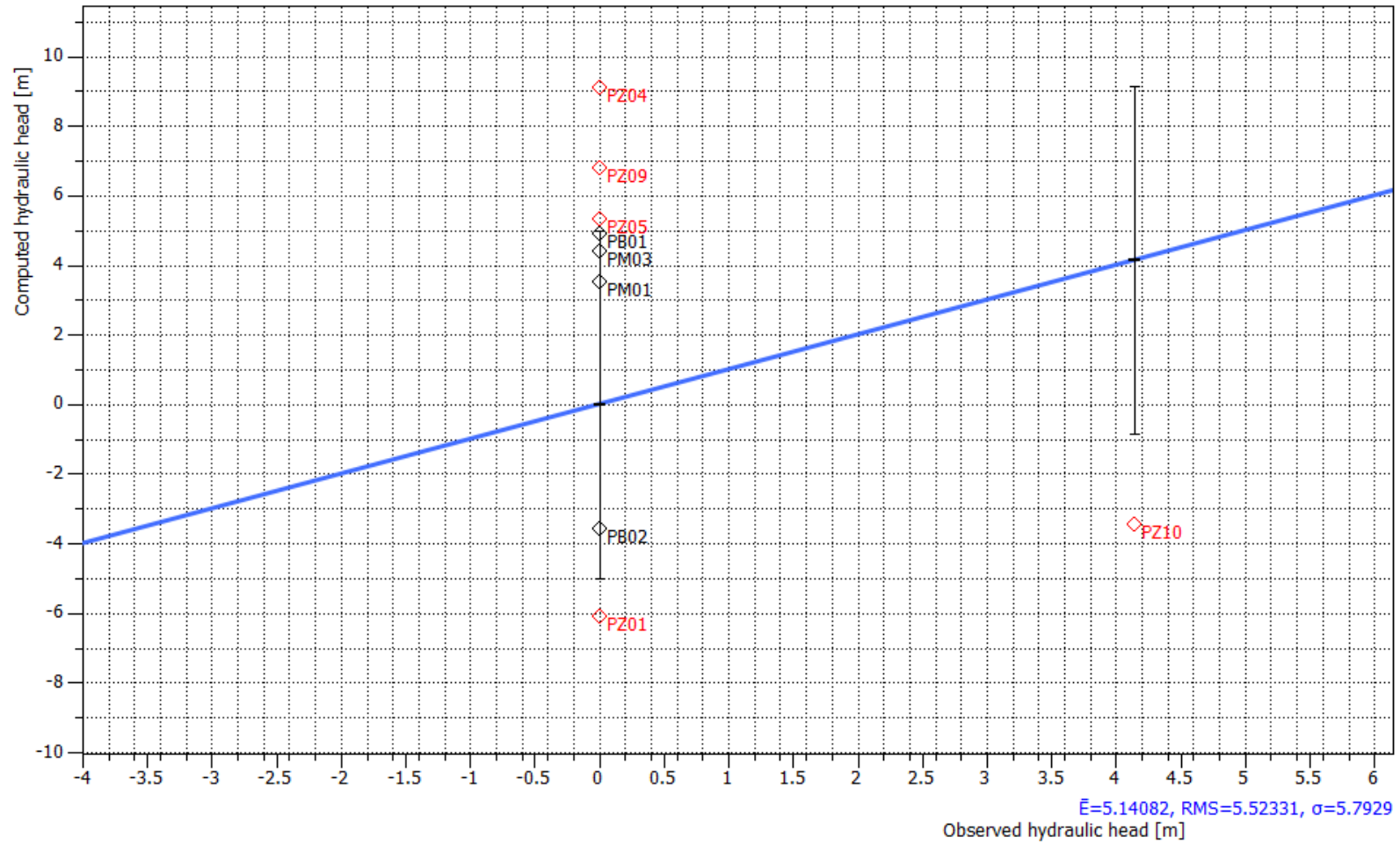
Fonte: O autor.

4.3.2.3 Modelo transitório

Realizou-se a revisão da calibração do modelo em estado transitório, com base em informações dos níveis obtidas através do ensaio de aquífero ao longo de 60 dias. Durante esse período, foram realizados ensaios de aquíferos em dois poços de bombeamento e piezômetros nas proximidades. A calibração priorizou a balização de parâmetros observados em campo e foi alinhada com o modelo hidrogeológico conceitual revisado e aprovado pela empresa Votorantim ([HYDROKARST, 2021](#)).

Os resultados obtidos incluem estatísticas de calibração para os níveis de água simulados versus medidos, bem como estimativas de fluxo de base bombeado da mina no período seco com base nos valores observados versus simulados. Na calibração, o parâmetro da condutividade hidráulica foi ajustado, mantendo as relações gerais estabelecidas no desenvolvimento do modelo conceitual. Foram considerados 9 piezômetros distribuídos de acordo com a Figura 3.16. Na melhor calibração, obteve-se um valor de RMS de 5,5%, considerado confiável. Com relação às vazões bombeadas pela mina, o fluxo de base obtido através da análise do hidrograma foi de aproximadamente $86\text{m}^3/\text{h}$ ($2.071\text{m}^3/\text{d}$). Assim, a vazão e o fluxo de base para a mina atual foram de $86\text{m}^3/\text{h}$.

Figura 3.16 - Gráfico comparativo das condições de nível de água observadas e simuladas para o estado transiente na mina atual.



Fonte: O autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados da comparação entre o sistema atual de deságue da Cava 1 da Mina Taboca (Cenário 1) e um sistema proposto com o intuito de implementar melhorias na estrutura de deságue da mina (Cenário 2). Para tanto, utilizou-se o sistema atual como parâmetro de comparação para o Cenário 2, que foi elaborado por meio de simulações realizadas com o modelo desenvolvido. Ao considerar o Cenário 1 como base de comparação, foi possível analisar e avaliar as diferenças em relação ao sistema proposto, identificando as vantagens e desvantagens de cada cenário. Dessa forma, apresentam-se os resultados das simulações realizadas para ambos os cenários, destacando as principais diferenças encontradas em relação ao comportamento de vazão, cone de rebaixamento, fluxo e controle de outorga. Adicionalmente, as simulações futuras foram realizadas considerando um período de 10 anos (2023 - 2033). Os resultados detalhados dessas análises estão apresentados nas seções a seguir, permitindo uma melhor compreensão sobre qual sistema seria mais adequado para atender às necessidades da mina, considerando a evolução temporal da estrutura geológica diante das atividades realizadas.

5.1 Descrição dos cenários de previsão para o sistema de drenagem

Esta seção apresenta detalhes sobre os Cenários 1 e 2 utilizados na comparação para determinar o sistema de deságue mais viável para a Cava 1. Inicialmente, foram realizadas doze simulações preditivas para determinar qual seria o cenário proposto (Cenário 2). Com base nas análises realizadas, foi selecionado o cenário mais viável, que será apresentado em detalhes nesta seção. É importante destacar que esta análise se concentra exclusivamente no cenário selecionado, sem abordar os cenários descartados.

Os cenários estudados são descritos a seguir:

- Cenário 1: descreve as condições atuais de deságue da Cava 1. Essas condições foram usadas como ponto de partida no modelo para simular o comportamento da estrutura de deságue nos próximos 10 anos. Assim, o sistema representado pelo Cenário 1 consiste exclusivamente de uma estação de bombeamento (Sump) localizada no fundo da Cava 1. É importante ressaltar que o sistema de

escoamento via Sump é muito utilizado no processo de drenagem de atividades de mineração, e por isso foi incorporado ao sistema proposto neste trabalho (EDRAKI et al., 2005; CAHYADI et al., 2020; CARNEIRO et al., 2021).

- Cenário 2: corresponde ao sistema proposto para implementação na Cava 1 da Mina Taboca. Este sistema utiliza uma combinação de tecnologias, tais como estação de bombeamento (Sump), 18 drenos horizontais de 100 metros e uma bateria de 16 poços perimetrais instalados ao redor da cava. Esta solução permite um fluxo de deságue mais eficiente e abrange uma área maior do que o sistema atual (Cenário 1), garantindo assim um melhor controle e gestão da operação de deságue.

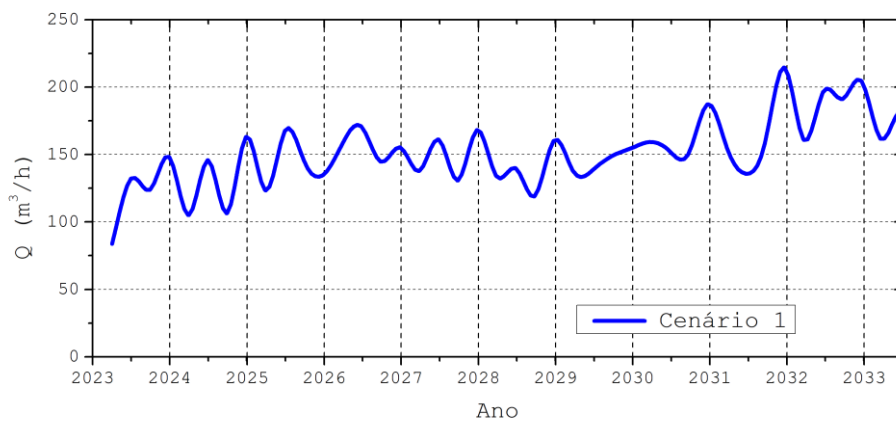
5.1.1 Cenário 1: Sistema de deságue exclusivo por meio de uma estação de bombeamento (Sump) instalada no fundo da Cava 1

O Cenário 1 descreve o atual sistema de drenagem utilizado na Cava 1. Neste sistema, há somente uma estação de bombeamento e um reservatório, conhecido como Sump, instalado no fundo da cava. Dessa forma, a água acumulada nas frentes de lavra é drenada por meio da força da gravidade e direcionada para o reservatório do Sump. Além disso, a água coletada das frentes de lavra se mescla à água da chuva que entra na cava, resultando em um volume total que é direcionado para a superfície por meio de estações de bombeamento.

Uma das principais vantagens desse sistema é a possibilidade de tratamento e reutilização das águas residuárias, pois ele evita que a água acumulada interfira no processo de extração mineral. Dessa forma, ao ser bombeada para a superfície, a água pode ser tratada e armazenada, contribuindo significativamente para a redução do impacto ambiental e para a utilização racional dos recursos hídricos disponíveis (OLIVEIRA e CRUZ, 2001). O processo permite também que a água seja tratada antes de ser reutilizada em outras atividades, tais como irrigação, lavagem de equipamentos e áreas de trabalho, entre outras. Isso gera um impacto positivo na economia de água e na preservação do meio ambiente, além de ocasionar em melhorias no balanço hídrico da unidade da Mina Taboca (FARIA et al., 2016; CASTRO et al., 2018).

Na Figura 4.1, apresenta-se a variação temporal das vazões médias resultantes da projeção do Cenário 1, realizado por meio do modelo numérico desenvolvido especificamente para este estudo. O modelo utilizou as informações referentes às características do sistema atual de drenagem da Cava 1, as quais foram incluídas como condições iniciais para a simulação. O eixo vertical do gráfico representa a vazão, Q , em m^3/h . O eixo horizontal representa o intervalo temporal da projeção, abrangendo um período de 10 anos (2023 a 2033).

Figura 4.1 – Projeção das vazões médias para o Cenário 1 considerando um período de dez anos (2023 a 2033).



Fonte: O autor.

Com base nos resultados obtidos, é possível observar que as vazões totais de bombeamento de águas subterrâneas apresentam um aumento significativo ao longo do tempo. Ao final do primeiro ano, a vazão total é estimada em $84 m^3/h$, enquanto que ao final do décimo ano essa vazão aumenta para $143 m^3/h$. Esses resultados representam um aumento de 70,24% na vazão total. Com o aumento das vazões, é possível que ocorra uma sobrecarga no sistema atual, prejudicando o processo de extração mineral e impactando negativamente o meio ambiente. Portanto, a utilização de tecnologias de tratamento e reutilização da água pode ser uma alternativa viável para minimizar o consumo de água e a geração de efluentes na mineração, promovendo a sustentabilidade do setor.

5.1.2 Cenário 2 proposto: Sistema de deságue com estação de bombeamento, drenos horizontais e bateria de poços perimetrais

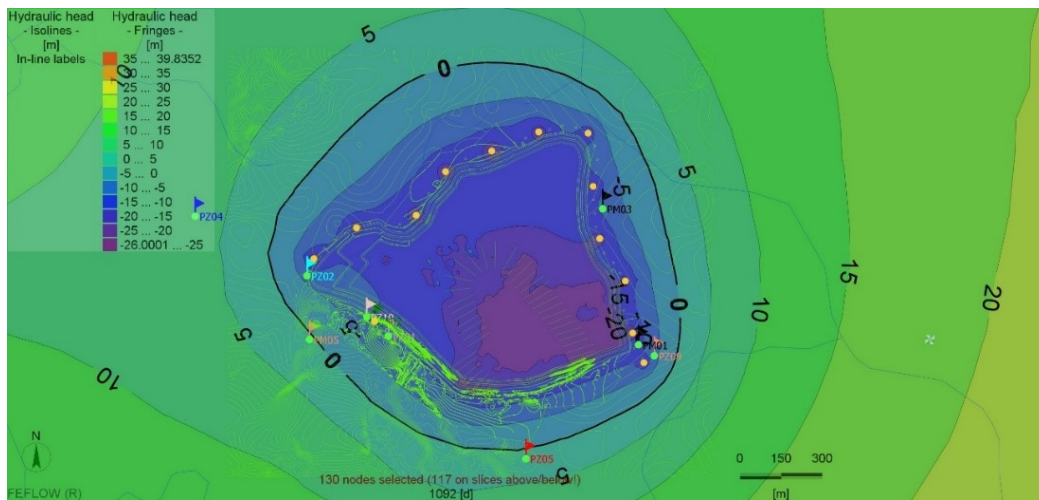
Na presente seção, apresentam-se os resultados do sistema de drenagem proposto para as águas subterrâneas na Cava 1 da Mina Taboca, com o objetivo de melhorar a performance do sistema existente por meio da introdução de novos elementos estruturais. Para isso, foram incorporadas diversas técnicas, incluindo uma estação de bombeamento, drenos horizontais e uma bateria de poços perimetrais.

Assim como no sistema atual, o método proposto utiliza a técnica de drenagem por gravidade, visando minimizar a interferência do fluxo de água na operação da mina. Dessa forma, a água coletada nas frentes de lavra é conduzida para o Sump, juntamente com a água dos drenos horizontais, a fim de controlar o volume total de água no sistema. A mistura das águas subterrâneas interceptadas com a água da chuva que entra na cava é bombeada para a superfície, permitindo um melhor controle do volume total de água.

Para garantir a efetividade do deságue no interior da cava a médio e longo prazo, propõe-se também, por meio de análises dos parâmetros do modelo, a instalação de uma bateria de 16 poços no perímetro NW-N-NE-E da Cava 1, sendo 14 novos e 2 existentes. A bateria de poços perimetrais é um elemento fundamental na garantia da efetividade do deságue no interior da cava a médio e longo prazo, contribuindo para a manutenção dos níveis de água adequados e prevenindo possíveis danos causados pelo acúmulo excessivo de água (CONNELLY e GIBSON, 1985; TZAMPOGLOU e LOUPASAKIS, 2018).

A Figura 4.2 ilustra a disposição dos poços na região da Cava 1, onde os pontos amarelos correspondem às localizações geográficas dos poços sugeridos para o Cenário 2. Nesse contexto, a disposição dos poços sugeridos foi planejada para garantir uma melhor eficiência no processo de drenagem das águas subterrâneas na área da Mina Taboca. Adicionalmente, a escolha da localização dos poços sugeridos foi baseada em diversos fatores, tais como a topografia da região, a posição das frentes de lavra e a direção do fluxo de água subterrânea. Além disso, foram levados em consideração aspectos relacionados à segurança e à preservação ambiental, com o intuito de minimizar o impacto da atividade de mineração na região.

Figura 4.2 – Localização dos poços sugeridos no Cenário 2 de simulação do sistema de drenagem da Cava 1 da Mina Taboca. Os pontos amarelos representam os poços propostos para o Cenário 2, incluindo os dois preexistentes.

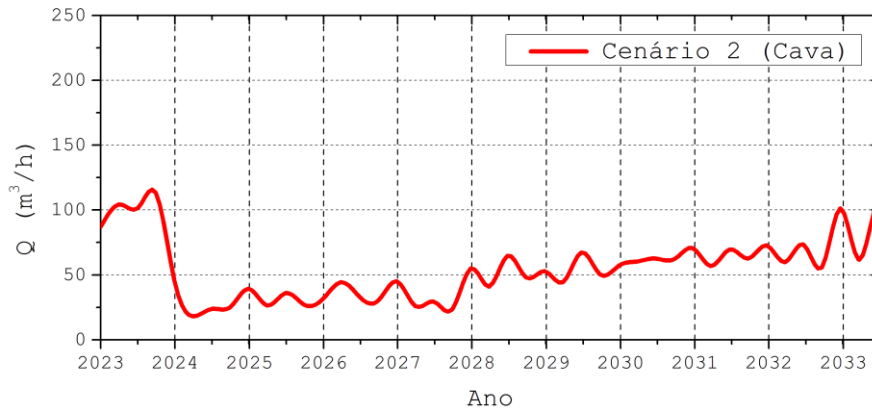


Fonte: O autor.

5.2 Estimativa das vazões totais: comparação entre os cenários de simulação

A Figura 4.3 apresenta as vazões médias projetadas para o Cenário 2, considerando o período de 2023 a 2033 e utilizando o modelo numérico desenvolvido, que considera o sistema de bombeamento da Cava 1 como condição inicial. Os resultados mostram que o sistema proposto é mais estável do que o sistema atual de deságue da Mina Taboca, como pode ser visto na Figura 4.1, que apresenta uma variação de aproximadamente 100 m³/h ao longo de um ano. Já no cenário proposto, a variação de fluxo do início do primeiro ao fim do décimo ano é menor, sendo aproximadamente 20 m³/h.

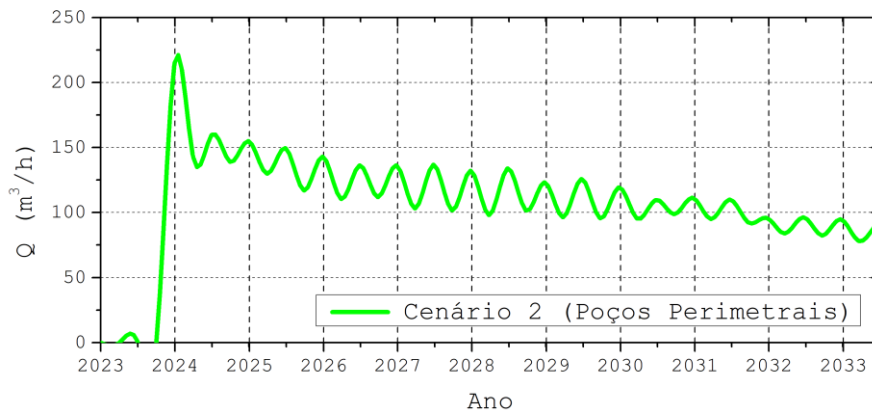
Figura 4.3 - Projeção das vazões médias para o Cenário 2 (cava) em um período de dez anos (de 2023 a 2033).



Fonte: O autor.

A Figura 4.4 ilustra a projeção das vazões médias considerando o Cenário 2, que envolve a instalação de poços perimetrais, no período de 2023 a 2033. De acordo com os resultados apresentados, nota-se um aumento significativo nas vazões no início do primeiro ano, alcançando um pico de cerca de 220 m³/h, e que gradualmente decresce ao longo do tempo, até se aproximar de 100 m³/h ao final do décimo ano.

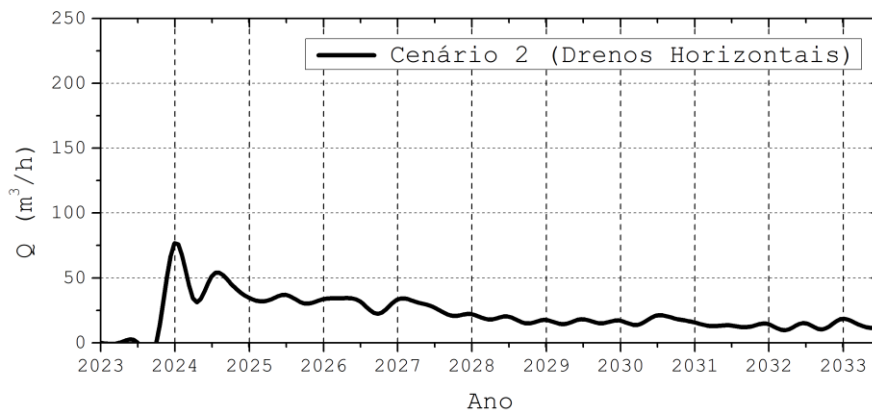
Figura 4.4 - Projeção das vazões médias para o Cenário 2 (poços perimetrais) de 2023 a 2033.



Fonte: O autor.

Na Figura 4.5, apresenta-se a projeção das vazões médias no Cenário 2, que inclui a implementação de drenos horizontais, para o período de 2023 a 2033. De acordo com os resultados, é observado um aumento significativo na vazão no primeiro ano, atingindo o limite de 75 m³/h. No entanto, a vazão diminui gradualmente com o passar do tempo, ficando abaixo de 25 m³/h ao final do décimo ano.

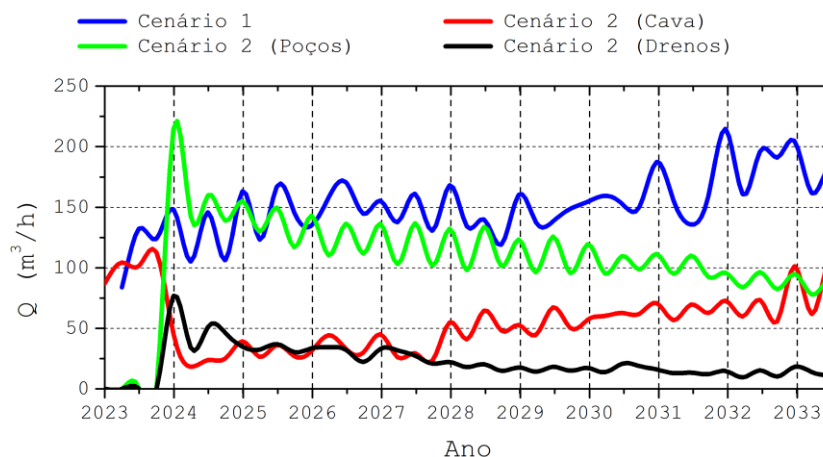
Figura 4.5 – Projeção das vazões médias para o Cenário 2 (drenos horizontais) de 2023 a 2033.



Fonte: O autor.

A Figura 4.6 apresenta a comparação das vazões totais de bombeamento de águas subterrâneas nos Cenários 1 e 2 ao longo do tempo. Conforme os resultados obtidos através de simulações preditivas com base em dados coletados no local e modelos matemáticos apropriados para cada componente do sistema de deságue proposto, é possível verificar que as vazões totais de bombeamento de águas subterrâneas no final do primeiro ano no Cenário 2 serão de 337 m³/h, e no final do décimo ano serão de 167 m³/h. Para os drenos horizontais, a vazão total média esperada no final do primeiro ano é de 77m³/h (2m³/h por dreno), enquanto para os poços perimetrais, a vazão total média esperada é de 215m³/h (13m³/h por poço) no final do primeiro ano e de 85m³/h (5m³/h por poço) no final do décimo ano. Essas informações são de extrema importância para o planejamento e operação eficiente do sistema de deságue, garantindo a sustentabilidade ambiental e econômica da mina.

Figura 4.6 - Comparação entre as vazões simuladas para os Cenários 1 (cava) e 2 (cava, poços perimetrais e drenos horizontais) durante o período de 2023 a 2033.



Fonte: O autor.

A variação na vazão de água ao longo do tempo no Cenário 2 pode estar relacionada a diversos fatores, tais como a estrutura hidrogeológica da área em estudo, a capacidade de armazenamento de água no solo, o clima e as condições meteorológicas ao longo do período de análise, bem como o próprio funcionamento das estruturas de deságue em si (BEVEN e GERMANN, 1982). A vazão pode ter aumentado no primeiro ano devido à diminuição da pressão hidrostática no solo e ao aumento da infiltração de água causados pela instalação dos drenos horizontais (MALIVA et al., 2006). No entanto, ao longo do tempo, as condições hidrológicas podem ter mudado, levando a uma diminuição na vazão devido à redução da água disponível na rocha e a possíveis mudanças na estrutura geológica.

5.3 Análise do cone de rebaixamento para o sistema de deságue da cava

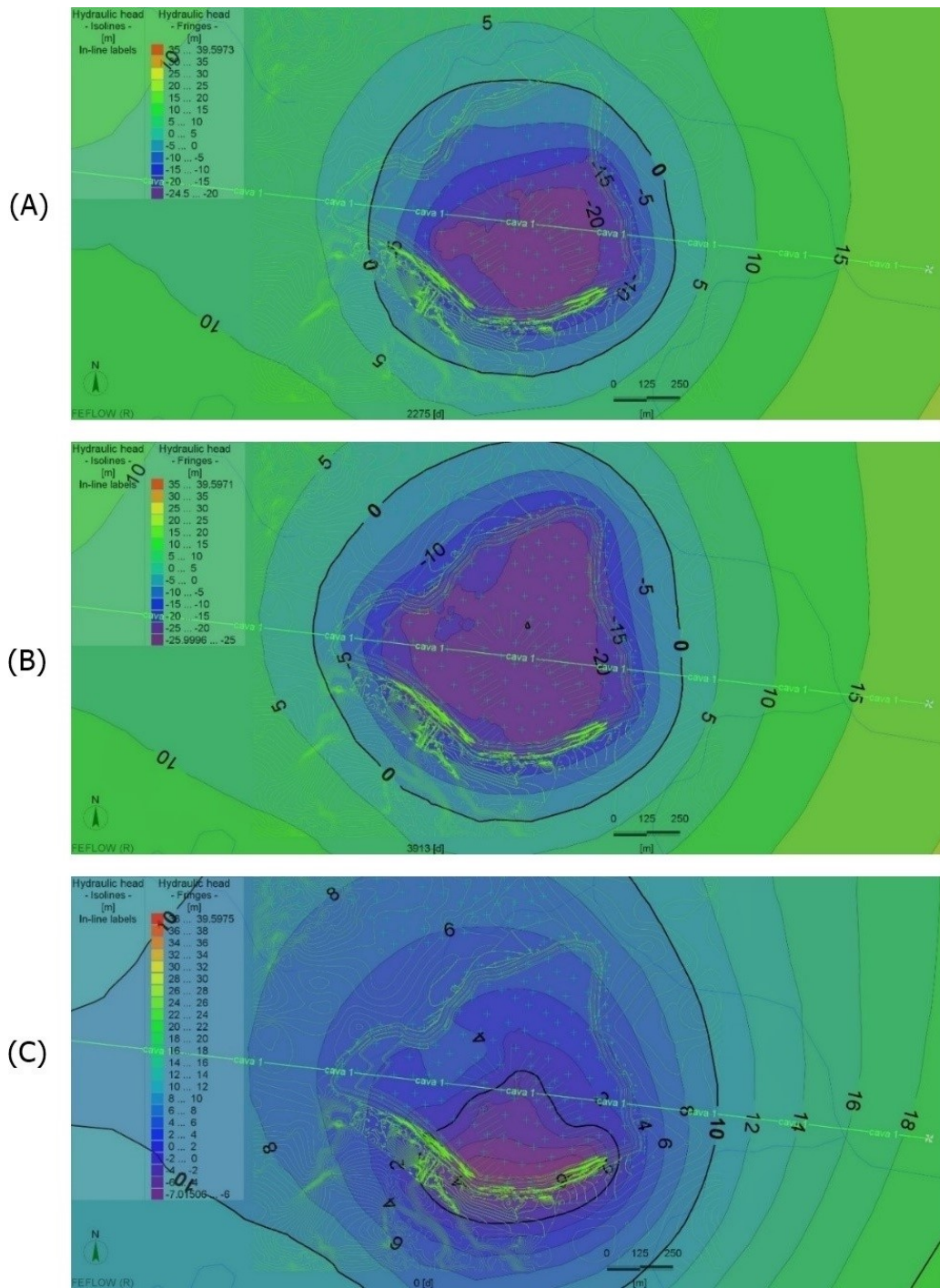
As Figuras 4 e 5 apresentam a evolução temporal das isolinhas de carga hidráulica (m) do cone de rebaixamento do aquífero da Mina Taboca, considerando os dois cenários de simulação: o Cenário 1, atual, e o Cenário 2 proposto. Nesse contexto, foram realizadas simulações por meio de modelagem hidrogeológica, utilizando dados geológicos e

hidrológicos da área de estudo. Essas simulações consideraram a operação da mina nos próximos 10 anos e as possíveis interferências no fluxo de água subterrânea.

Diante dos resultados apresentados, ressalta-se que o rebaixamento de aquífero ocorre quando a captação de água subterrânea supera a sua recarga, provocando a diminuição do nível da água no aquífero (BARLOW e LEAKE, 2012; BEAR, 1972). As figuras mostram o cone de rebaixamento final para cada cenário, indicando o nível máximo de rebaixamento em cada um deles. Observa-se que o rebaixamento máximo é previsto para o Cenário 2, que considera uma maior captação de água subterrânea do que o Cenário 1. Assim, o Cenário 2 se destaca como o melhor para a redução do lençol freático nas frentes de lavra da Mina Taboca. Este cenário considera 16 poços perimetrais e drenos horizontais no final da Cava 1, o que resulta no maior nível de rebaixamento do aquífero.

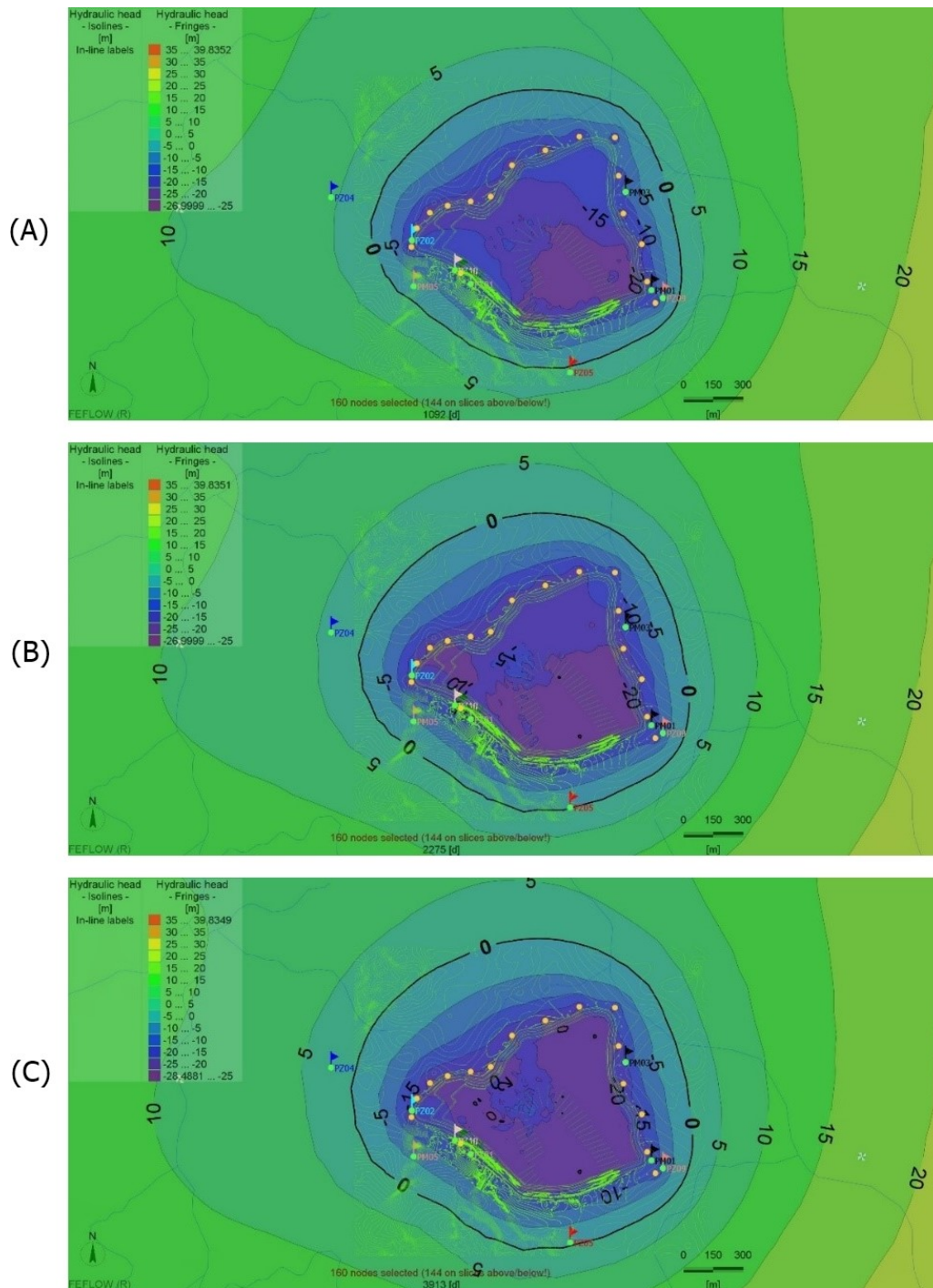
As simulações também permitem estimar a vazão de água subterrânea captada pela mina, indicando o potencial de interferência da operação da mina no fluxo de água subterrânea da região. Essa informação é importante para o gerenciamento de risco e a adoção de medidas preventivas, visando minimizar os impactos ambientais e garantir a sustentabilidade da operação da mina (TUCCI, 2001).

Figura 4.7 –Projeção do cone de rebaixamento do nível de água para o Cenário 1. Painel ‘A’: cone de rebaixamento atual no início do ano 1. Painéis ‘B’ e ‘C’: rebaixamento simulado para os anos 5 e 10, respectivamente.



Fonte: O autor.

Figura 4.8 – Projeção do cone de rebaixamento do aquífero para o Cenário 2. Painel ‘A’: cone de rebaixamento atual no início do ano 1. Painéis ‘B’ e ‘C’: rebaixamento simulado para os anos 5 e 10, respectivamente.



Fonte: O autor.

5.4 Análise do impacto da outorga de bombeamento no sistema de drenagem

A Mina Taboca é uma importante fonte de exploração mineral na região, contando atualmente com uma outorga para rebaixamento de água subterrânea com volume máximo anual de 8.777.520,00 m³/ano.

Para garantir que os volumes de bombeamento não ultrapassem os limites da outorga, foram realizadas estimativas das vazões totais esperadas, considerando os volumes previstos de águas de chuvas e desague de águas subterrâneas nos Cenários 1 e 2.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam informações detalhadas sobre os volumes médios de bombeamento esperados nos Cenários 1 e 2, respectivamente. Conforme os resultados obtidos, em ambos os cenários os volumes previstos de águas de chuvas e desague de águas subterrâneas não ultrapassam 40% do volume anual outorgado.

Tabela 4.1 –Estimativa de volume médio mensal de bombeamento no Cenário 1, somado à estimativa de água de chuva, considerando uma área de contribuição de 733.000m².

Mês	Precipitação (m³/h)	Vazão (m³/h)	Soma (m³/h)
Outubro	13	143	156
Novembro	24	143	167
Dezembro	59	143	202
Janeiro	256	143	399
Fevereiro	382	143	525
Março	504	143	647
Abril	503	143	646
Mai	372	143	515
Junho	222	143	365
Julho	190	143	333
Agosto	53	143	196
Setembro	19	143	162
Média anual (m³/h)	216	143	359
Total anual (m³)	1,89 x 10⁶	1,25 x 10⁶	3,14 x 10⁶

Fonte: O autor.

Tabela 4.2 –Estimativa de volume de bombeamento médio mensal no Cenário 2, somado à estimativa de água de chuva, considerando uma área de contribuição de 733.000m².

Mês	Precipitação (m³/h)	Vazão (m³/h)	Soma (m³/h)
Outubro	13	174	187
Novembro	24	174	198
Dezembro	59	174	233
Janeiro	256	174	430
Fevereiro	382	174	556
Março	504	174	678
Abril	503	174	677
Mai	372	174	546
Junho	222	174	396
Julho	190	174	364
Agosto	53	174	227
Setembro	19	174	193
Média anual (m³/h)	216	174	390
Total anual (m³)	1,89 x 10⁶	1,52 x 10⁶	3,42 x 10⁶

Fonte: O autor.

É importante destacar que a eficiência do sistema de rebaixamento de água subterrânea deve ser monitorada continuamente para garantir a sustentabilidade do aquífero e evitar ultrapassar os limites da outorga. Assim, recomenda-se a instalação de dois novos piezômetros para complementar a malha piezométrica e monitorar o rebaixamento do aquífero na porção norte da Cava 1, onde atualmente não há instrumentos de monitoramento.

A Figura 4.9 mostra os pontos sugeridos para instalação dos piezômetros. Nesse sentido, é fundamental observar que a instalação dos novos piezômetros deve seguir as melhores práticas de instalação e usar equipamentos adequados para garantir a precisão e confiabilidade dos dados (CHAPUIS, 1989). Ressalta-se que os dados de nível de água coletados pelos piezômetros devem ser registrados quinzenalmente e analisados para avaliar se as metas de rebaixamento estão sendo atingidas. Além disso, é necessário que os locais de instalação dos piezômetros sejam escolhidos com base em anomalias

geofísicas previamente identificadas, visando obter informações adicionais sobre o comportamento hidrogeológico da região.

Figura 4.9 – Pontos para instalação dos piezômetros sugeridos.



Fonte: O autor.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo apresentar os resultados de um estudo sobre a modelagem hidrogeológica do fluxo de água subterrânea da Mina Taboca, localizada no município de Primavera, estado do Pará. Para isso, foi desenvolvido um modelo numérico, que permitiu a avaliação do comportamento das águas subterrâneas na mina. Esse modelo é fundamentado em uma abordagem conceitual e numérica, que permitiu a análise das características e propriedades dos aquíferos. Assim, com base nas informações obtidas, foi possível propor um sistema de drenagem que visa minimizar os impactos ambientais decorrentes da exploração mineral, bem como garantir a sustentabilidade do empreendimento a longo prazo. Para tanto, foram realizados estudos detalhados sobre o fluxo de água na área da mina, a fim de identificar as principais fontes de água subterrânea e seu comportamento ao longo do tempo.

As conclusões deste estudo são apresentadas a seguir:

- Observou-se que as vazões totais de bombeamento de águas subterrâneas no sistema atual da mina (Cenário 1) apresentaram um aumento significativo ao longo do tempo. Ao final do primeiro ano, a vazão total foi estimada em 84 m³/h, enquanto que ao final do décimo ano, essa vazão aumentou para 143 m³/h. Esses resultados indicam um aumento de 70,24% na vazão, o que reforça a necessidade de se buscar medidas para garantir a sustentabilidade a longo prazo do sistema de drenagem da Mina Taboca.
- Com o aumento das vazões no Cenário 1, há risco de sobrecarga no sistema atual, prejudicando a extração mineral e o meio ambiente. Técnicas de tratamento e reutilização de água podem minimizar o consumo de água e efluentes na mineração, promovendo a sustentabilidade da mina. Portanto, recomenda-se avaliar a viabilidade dessas operações de mineração e considerar a implantação do sistema proposto (Cenário 2).
- O sistema de deságue proposto apresentou maior estabilidade em comparação com o sistema atual da Mina Taboca, conforme evidenciado pelos resultados. A Figura 4.1 demonstra que o sistema atual apresenta variações de aproximadamente 100 m³/h ao longo de um ano, enquanto que no cenário proposto a variação é menor, em torno de 20 m³/h do início do primeiro ao fim do

décimo ano, representando uma diminuição de 80% na variação do fluxo de deságue.

- A vazão total média esperada para os drenos horizontais no final do primeiro ano é de $77\text{m}^3/\text{h}$ ($2\text{m}^3/\text{h}$ por dreno), enquanto para os poços perimetrais é de $215\text{m}^3/\text{h}$ ($13\text{m}^3/\text{h}$ por poço). Já no final do décimo ano, a vazão total média esperada para os poços perimetrais é de $85\text{m}^3/\text{h}$ ($5\text{m}^3/\text{h}$ por poço) e a vazão total de bombeamento de águas subterrâneas no Cenário 2 é de $167\text{m}^3/\text{h}$. Esses resultados são essenciais para o planejamento e operação eficiente do sistema de deságue, visando garantir a sustentabilidade ambiental e econômica da unidade.
- Vários fatores podem influenciar a variação na vazão de água no Cenário 2, incluindo a estrutura hidrogeológica, o clima, as condições meteorológicas e o funcionamento das estruturas de deságue. Estudos anteriores sugerem que a instalação dos drenos horizontais pode ter aumentado a vazão no primeiro ano, mas ao longo do tempo as condições hidrológicas podem mudar, levando a uma redução da vazão devido à diminuição da disponibilidade de água no solo e possíveis mudanças na estrutura geológica.
- O Cenário 2 foi o que apresentou o maior nível de rebaixamento do aquífero, sendo até 27% mais eficiente no rebaixamento do lençol freático na frente de lavra. Nesse contexto, ressalta-se que esse cenário mostrou ser o melhor para redução do lençol freático nas frentes de lavra de curto a longo prazo na Mina Taboca. Esses resultados ressaltam a importância do gerenciamento adequado dos recursos hídricos subterrâneos, evitando a exploração excessiva e garantindo a sustentabilidade desses importantes reservatórios de água.
- As estimativas de vazões totais esperadas nos Cenários 1 e 2 mostraram que os volumes de bombeamento na Mina Taboca estão dentro dos limites da outorga, evitando impactos negativos no aquífero. Dessa forma, o monitoramento contínuo da eficiência do cone de rebaixamento do aquífero é essencial para garantir a sustentabilidade da exploração mineral e evitar ultrapassar os limites da outorga. Adicionalmente, a instalação de novos piezômetros na porção norte da cava pode contribuir significativamente para o monitoramento do rebaixamento do aquífero e a sustentabilidade da operação da unidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SÁBER, A. (2003). Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial. ISBN 978-85-7480-355-1.
- ANA (2005). HidroWeb: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- ANDERSON, M.P. & WOESSNER, W.W. (1992). Applied Groundwater Modeling—Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, Inc.
- BARLOW, P. M., & LEAKE, S. A. (2012). Streamflow Depletion by Wells—Understanding and Managing the Effects of Groundwater Pumping on Streamflow. US Geological Survey, Reston, VA. Open-File Report 2012-1162.
- BEAR, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. ISBN: 978-0444103235.
- BEAR, J., & VERRUIJT, A. (1987). Modeling groundwater flow and pollution. Springer Science & Business Media.
- BEVEN, K. J., & GERMANN, P. (1982). Macropores and water flow in soils. Water Resources Research, 18(5), 1311-1325. doi: 10.1029/WR018i005p01311.
- BREDEHOEFT, J. (2005). The conceptualization model problem—surprise. Hydrogeology Journal, 13(1), 37-46. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0430-5>
- CAHYADI, T. A., SARAGIH, I. R., AJI, D. P. W., SUYONO, S., WINDA, W., and RACHMAT, M. (2020). Optimization of Sump drying with alternatives concept at coal open mine PT Bukit Asam South Sumatra. 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON EARTH SCIENCE, MINERAL, AND ENERGY. doi:10.1063/5.0007077.
- CARNEIRO, B. M., FAJARDO, K. C. B., FONSECA, M. M., FREITAS, P. M. C. (2021). Pluvial Drainage System: a case study on the determination of flows for the dimensioning of devices in an iron production implantation work. Research, Society and Development, v.10, n.16, p.e295101623790. doi:10.33448/rsd-v10i16.23790.

CASTRO, M. F., MACHADO, N. R. S., FERREIRA, R. A., LIMA, H., & MIRANDA, J. F. (2018). Uso sustentável da água diante da recessão hídrica na Samarco Mineração S.A. In Anais do 19º Simpósio de Mineração (ABM Week). São Paulo, SP, Brasil.

CHAPUIS, R. P., & SABOURIN, L. (1989). Effects of installation of piezometers and wells on groundwater characteristics and measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(4), 604–613. doi:10.1139/t89-073

CONNELLY, R. J., & GIBSON, J. (1985). Dewatering of the open pits at Letlhakane and Orapa diamond mines, Botswana. *International Journal of Mine Water*, 4(3), 25–41. doi:10.1007/bf02551567.

DHI-WASY. (2021). FEFLOW - Finite Element subsurface FLOW system. Retrieved September 20, 2021, from <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>.

DOMENICO, P. A., & SCHWARTZ, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons.

EATON, B. C., & BATEMAN, K. J. (2020). *Environmental hydrology*. CRC Press.

EDRAKI, M., GOLDING, S. D., BAUBLYS, K. A., and LAWRENCE, M. G. (2005). Hydrochemistry, mineralogy and sulfur isotope geochemistry of acid mine drainage at the Mt. Morgan mine environment, Queensland, Australia. *Applied Geochemistry*, 20(4), 789–805. doi:10.1016/j.apgeochem.2004.11.004.

EPA. (2009). *Guidance on selecting a remedial alternative*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/remedytech/guidance-selecting-remedial-alternative>

FARIA, D. G., CARVALHO, M. M. O., ANDRADE, L. H., TAVARES, D. M. P., & FERREIRA, R. P. M. (2016). Minimização do consumo de água e de geração de efluentes na mineração de ouro. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Fortaleza, Ceará, Brasil.

FEITOSA, F. A. N., COSTA, M. S. S., & Barbosa, S. M. (2008). Análise da variação do ciclo hidrológico na região semiárida do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 1(2), 109-125.

FETTER, C. W. (2001). Applied hydrogeology (Fourth ed.). Prentice Hall.

HYDROKARST, 2021. UNIDADE PRIMAVERA – REVISÃO DO MODELO CONCEITUAL. s.l.:s.n.

IMBIRIBA JUNIOR, M. (2019). Estudo hidrogeológico do aquífero Pirabas na cidade de Salinópolis, NE do Pará. 2019. 165 f. Dissertação (Mestrado em recursos hídricos) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.

LCT-EPUSP. (2015). Caracterização de rochas carbonáticas. In: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.

LOPES, E. S. (1996). Investigação por eletroresistividade de ambientes cársticos no município de São João de Pirabas - PA. 1996. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, Curso de Pós-Graduação em Geofísica.

MALIVA, R. G., GUO, W., & MISSIMER, T. M. (2006). Aquifer storage and recovery: recent hydrogeological advances and system performance. *Water Environ Res*, 78(13), 2428-2435. doi: 10.2175/106143006x123102.

OLIVEIRA, A. P. & LUZ, A. B. (2001). Recursos hídricos e tratamento de águas na mineração. *Série Tecnologia Ambiental*, 24. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. ISBN 85-7227-139-2. ISSN 0103-7374