

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Breno Alexandre Pereira

AVALIAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO E MODELAGEM NUMÉRICA HIDROGEOLÓGICA
DA FORMAÇÃO DE LAGO EM CAVA: O caso da mina de Águas Claras

Belo Horizonte
2024

Breno Alexandre Pereira

AVALIAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO E MODELAGEM NUMÉRICA HIDROGEOLÓGICA
DA FORMAÇÃO DE LAGO EM CAVA: O caso da mina de Águas Claras

Dissertação/tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem de processos hidrológicos

Orientador: Julian Cardoso Eleutério

Belo Horizonte
2024

P436a

Pereira, Breno Alexandre.

Avaliação do balanço hídrico e modelagem numérica hidrogeológica da formação de lago em cava [recurso eletrônico] : o caso da mina de Águas Claras / Breno Alexandre Pereira. – 2024.

1 recurso online (105 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Julian Cardoso Eleutério.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 92-105.

Bibliografia: f. 88-91..

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Balanço hidrológico - Teses. 4. Hidrogeologia - Teses. 5. Minas e mineração - Teses. I. Eleutério, Julian Cardoso. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Avaliação do Balanço Hídrico e Modelagem Numérica Hidrogeológica da Formação de Lago Em Cava: O Caso da Mina de Águas Claras"

BRENO ALEXANDRE PEREIRA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Julian Cardoso Eleutério

Prof. Nilo de Oliveira Nascimento

Profa Stela Dalva Santos Cota

Prof. Rodrigo Sérgio de Paula

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura

Prof. Julian Cardoso Eleutério

Coordenadora

Orientador

Belo Horizonte, 15 de março de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Julian Cardoso Eleuterio, Professor do Magistério Superior**, em 18/03/2024, às 06:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Stela Dalva Santos Cota, Usuário Externo**, em 18/03/2024, às 08:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Sérgio de Paula, Professor do Magistério Superior**, em 18/03/2024, às 13:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nilo de Oliveira Nascimento, Presidente de comissão**, em 14/05/2024, às 16:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 22/06/2024, às 06:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3105234** e o código CRC **B2A94065**.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Julian Cardoso Eleutério por “comprar a ideia” da pesquisa, pelas suas ricas contribuições e detalhada revisão de todo o trabalho, além de sempre apontar uma “luz no fim do túnel”, quando não parecia haver saída alguma.

À Fernanda e à Bella por terem tido paciência e compreensão, aceitando minhas ausências em inúmeros momentos de convivência familiar. E por sempre terem me apoiado durante todo esse percurso. Amo demais vocês duas.

Aos meus pais, que desde sempre me ensinaram a máxima do “mais importante que dar o peixe, é ensinar a pescar”, me mostrando quão transformadora pode ser a educação.

Ao Paulão, *in memoriam*. Seu sorriso faz muita falta e sua presença será sempre sentida.

À equipe IGEO pela ajuda durante o desenvolvimento da pesquisa, seja numa revisão de texto, na elaboração de um mapa ou gráficos e tabelas. Em especial, ao sócio e amigo Mateus de Filippo, que, mesmo sem saber, muito contribuiu com o trabalho.

À turma 2022/1 do mestrado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos pela troca e suporte nos dois anos de pesquisa. Em especial à colega Natália Melo, cujas conversas e brincadeiras tornaram a empreitada mais leve. E ao colega Pedro Andrade, por sua inestimável contribuição na análise da evaporação do lago da área de estudo.

Às colegas Paula Hernandez e Lorryne Silva por suas importantes contribuições e discussões durante o desenvolvimento do modelo numérico, em especial nos testes que foram realizados com o plug-in IfmLake. Agradeço ainda aos profissionais Gisele Kimura e Rogério “Roger” Lucas, da empresa Hidrovia, no ajuste da malha do modelo numérico durante a simulação do enchimento da cava para uso do referido plug-in.

Os autores agradecem a empresa Vale S/A pela disponibilização dos dados a respeito da Mina de Águas Claras (MAC), para o desenvolvimento da pesquisa como um todo. Em especial aos profissionais Fabiano Medanha e Breno Passos.

Às empresas HydroInfo e DHI pelo fornecimento da licença acadêmica para uso do programa Feflow®.

Agradecemos, ainda, às instituições de fomento à pesquisa CAPES, CNPq, FAPEMIG e PRPq/UFMG.

“Essencialmente, todos os modelos estão incorretos, mas alguns são úteis”.

George Box, estatístico inglês.

RESUMO

A atividade de mineração, especialmente como cava a céu aberto, altera significativamente a composição natural do território, gerando diversas consequências, como a formação de cavas que podem alcançar o nível d'água subterrânea. Para possibilitar a continuação da mineração, técnicas de rebaixamento do nível d'água são empregadas, principalmente através da construção e bombeamento de poços tubulares, impactando os fluxos de água subterrânea e os corpos hídricos superficiais relacionados. O descomissionamento dessas atividades minerárias propõe diferentes alternativas para o uso pós-operacional das cavas, tais como a formação de lagos em cavas. Especificamente, a Mina de Águas Claras (MAC) serve como um estudo de caso valioso para esta análise, tendo operado por 29 anos então ter passado à formação subsequente de um lago na cava, nos últimos 24 anos, depois do encerramento das atividades de bombeamento.

O estudo da MAC, que inclui a análise de extensos dados de monitoramento hidrometeorológico e de desenvolvimento de um modelo numérico hidrogeológico visa compreender as limitações e potenciais de modelos computacionais para prever a formação de lagos em cavas de mineração, abordando a contribuição de diferentes variáveis do ciclo hidrológico e a sensibilidade dos parâmetros hidrodinâmicos aplicados.

Essa análise passou por uma discussão sobre a caracterização da área, que definiu as principais unidades hidrogeológicas e o fluxo de água subterrânea, além de estimar os percentuais das componentes do ciclo hidrogeológico que contribuem ao enchimento do lago, que indicou a preponderância do escoamento subterrâneo responsável por 43% do volume acumulado do lago, até o ano de 2023. Por fim, um modelo numérico hidrogeológico foi criado no programa Feflow, para analisar não somente a calibração do modelo numérico do período pré-rebaixamento à situação atual do enchimento do lago, como também uma avaliação da sensibilidade do modelo à calibração apropriada dos parâmetros que governam o fluxo de água subterrânea local e uso de taxas médias de chuva para a recarga dos sistema e investigação do enchimento final do lago. O modelo indicou uma alta sensibilidade do enchimento da cava ao armazenamento empregado para o vazio da cava, bem como para as taxas de chuva que contribuem diretamente ao enchimento do lago.

Além disso, a simulação do enchimento final do lago apontou um prazo final de enchimento entre os anos de 2050 e 2052, quando o lago atinge o ponto de vertimento no Córrego de Águas Claras, na cota 1098 m. Essa previsão, contudo, é bastante sensível à taxa de contribuição da chuva empregada, sendo que para esse resultado foi aplicada uma porcentagem de 40% da chuva média empregada na simulação de 100 anos.

Palavras-chave: Hidrogeologia de mina. Modelos numéricos hidrogeológicos. Desaguamento de mina. Lago de cava.

ABSTRACT

Mining activities, especially open-pit mining, significantly alter the natural composition of the landscape, resulting in various consequences such as the formation of pits that can reach the groundwater level. To enable continued mining, techniques for lowering the groundwater level are employed, mainly through the construction and pumping of borewells, impacting both groundwater flows and related surface water bodies. The decommissioning of these mining activities proposes different alternatives for the post-operational use of the pits, such as the formation of lakes. Specifically, the Mina de Águas Claras (MAC) serves as a valuable case study for this analysis, having operated for 29 years and subsequently transitioning to the formation of a lake in the pit over the past 24 years following the cessation of pumping activities.

The study of MAC, which includes the analysis of extensive hydrometeorological monitoring data and the development of a numerical hydrogeological model, aims to understand the limitations and potentials of computational models for predicting lake formation in mining pits, addressing the contribution of different variables of the hydrological cycle and the sensitivity of applied hydrodynamic parameters.

This analysis underwent a discussion on the characterization of the area, defining the main hydrogeological units and groundwater flow, as well as estimating the percentages of the hydrogeological cycle components contributing to lake filling, which indicated the predominance of groundwater flow responsible for 43% of the accumulated lake volume by the year 2023. Finally, a numerical hydrogeological model was created in the Feflow program, to analyze not only the calibration of the numerical model from the pre-lowering period to the current situation of lake filling, but also an assessment of the model's sensitivity to appropriate calibration of parameters governing local groundwater flow and the use of average rainfall rates for system recharge and investigation of final lake filling. The model indicated a high sensitivity of pit filling to the storage employed for pit voids, as well as to rainfall rates directly contributing to lake filling.

Furthermore, the simulation of final lake filling indicated a final filling period between the years 2050 and 2052, when the lake reaches the spill point at Córrego Águas Claras, at elevation 1098 m. This prediction, however, is highly sensitive to the rainfall contribution rate employed, with a percentage of 40% of the average rainfall used in the 100-year simulation applied for this result.

Keywords: Mine hydrogeology. Hydrogeological numerical models. Mine dewatering. Pit lake.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da MAC e de outras minas ativas e paralisadas no QF. A figura ainda apresenta, em imagens menores, o contexto da área de estudo, sobre o mapa do Brasil e do estado de Minas Gerais. As outras minas identificadas no mapa principal são minas que apresentam contexto hidrogeológico semelhantes àquele apresenta na MAC.	20
Figura 2: Fases de operação da MAC, da implantação à exaustão da operação.	24
Figura 3: (A) Ano de 1973 – Vista geral da mina de Leste para Oeste; (B) Ano de 1986 – Vista da mina de Leste para Oeste (mostrando seção geológica 2200), à época que atingiu o nível d'água do Aquífero Cauê.	25
Figura 4: Vista geral de SE para NW, no final de extração de minério na cava (ano 2000).	27
Figura 5: Ilustração da evolução do enchimento do lago da cava da MAC entre 2004 e 2023.	28
Figura 6: Volume elementar representativo ou VER.	30
Figura 7: Contextualização hidrográfica da área em estudo, com indicação nas imagens menores da Bacia do Rio São Francisco e do Rio das Velhas, aos quais pertencem os cursos d'água que drenam a MAC.	41
Figura 8: Geologia da área da MAC, com a indicação das principais unidades presentes.	43
Figura 9: Seção geológica esquemática da Serra do Curral, com indicação do mergulho das camadas.	44
Figura 10: Período dos dados de monitoramento analisados durante a pesquisa. ...	44
Figura 11: Localização dos pontos de monitoramento na área da MAC que foram utilizados durante a pesquisa.	45
Figura 12: Análise dos dados de chuva da estação Caixa de Areia, que serve como referência ao estudo. Com uma mediana plurianual de 1742 mm, a chuva acontece principalmente entre os meses de outubro a março, como é possível observar pelas medianas mensais.	46
Figura 13: Evolução dos níveis d'água de todos os instrumentos de monitoramento do nível d'água da MAC, separados por tipo de litologia.	47
Figura 14: Evolução da vazão nos pontos de monitoramento dos córregos da área de estudo. (A) Parque das Mangabeiras e (B) Córrego Fazenda.	50

Figura 15: Vazões bombeadas pelos poços tubulares da MAC.....	51
Figura 16: Evolução da cota do nível d'água do lago da cava.	52
Figura 17: Relação entre a cota do nível d'água, área do espelho d'água (A) e volume de água acumulada (B).	53
Figura 18: Taxa média anual de enchimento do lago.....	54
Figura 19: Área de contribuição de escoamento superficial ao lago.	56
Figura 20: Vazões aportadas ao lago a partir do bombeamento do Ribeirão do Prata.	57
Figura 21: Evolução das vazões de contribuição ao enchimento do lago, calculadas para cada componente do ciclo hidrogeológico, com a separação de períodos chuvosos (em branco) e secos (marrom).	58
Figura 22: Volumes acumulados no lago da MAC a partir da contribuição de cada componente do ciclo hidrológico.	58
Figura 23: Balanço geral segundo as taxas de contribuição de cada componente do ciclo hidrológico.	59
Figura 24: Contextualização geológica da área em estudo.....	61
Figura 25: Sentido de fluxo de água subterrânea – pré-rebaixamento.....	62
Figura 26: Sentido de fluxo de água subterrânea – pós-rebaixamento.	64
Figura 27: Limite definido para o modelo numérico da MAC e instrumentos de monitoramento. Nas imagens menores é possível observar a contextualização geográfica da MAC sobre os mapas do Brasil, Minas Gerais e Quadrilátero Ferrífero.	67
Figura 28: Modelo numérico hidrogeológico da MAC. (A) Malha. (B) Condições de contorno. (C) Geologia/Condutividade hidráulica. (D) Instrumentos de calibração. ..	68
Figura 29: Sentido de fluxo de água subterrânea, das cores mais quentes para cores mais frias. (A) pré-rebaixamento. (B) final do rebaixamento. (C) pós rebaixamento.	69
Figura 30: Cenários para análise do enchimento do lago, até o ano de 2022, partindo da premissa onde dados de monitoramento estão cada mais disponíveis, permitindo uma melhor calibração do modelo numérico.....	71
Figura 31: Dados de monitoramento dos instrumentos de calibração do modelo, com indicação da regressão das cotas do nível d'água para período anterior ao início do rebaixamento do nível d'água, representando o período de fluxo de água subterrânea em regime permanente.	72

Figura 32: Comparação entre os cenários simulados para a análise do enchimento do lago.	73
Figura 33: Curva de calibração entre valores de nível d'água observados (ou monitorados, ou reais), eixo X, e calculados pelo modelo numérico, eixo Y.	74
Figura 34: Comparação entre as curvas de evolução do nível d'água durante o rebaixamento do nível d'água, no cenário calibrado (Etapa C). Curvas com marcadores com preenchimento colorido representam os dados observados e as curvas com preenchimento em branco (C) representam os valores calculados pelo modelo.	75
Figura 35: Curva de calibração do enchimento do lago (Cenário D), indicando uma ótima aderência entre o nível d'água real (curva contínua preta) e o resultado calculado pelo modelo numérico (curva com quadrados cinza).	76
Figura 36: Valores acumulados de cada componente no enchimento do lago, segundo o balanço hídrico.	77
Figura 37: Valor acumulado de contribuição do escoamento subterrâneo ao enchimento do lago, calculado pelo modelo numérico.	77
Figura 38: Valor acumulado de contribuição da chuva e escoamento superficial ao enchimento do lago, calculado pelo modelo numérico.	78
Figura 39: Análise da validação do enchimento final do lago. (A) período completo e	80
Figura 40: Simulação da evolução do nível d'água do lago da MAC até enchimento final.	81
Figura 41: Taxa de elevação do lago da cava, durante a simulação do enchimento final.	82
Figura 42: Vazão de extravasamento do lago da cava da MAC.	83
Figura 43: Vazão de extravasamento do lago, segundo MDGEO, VALE (2018).	84
Figura 44: Vazão na região de extravasamento do lago da cava da MAC, com taxa de 56% da chuva sobre o lago.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre os resultados do balanço hidrológico levando em consideração os resultados calculados no presente estudo e aqueles obtidos por Grandchamp (2003).	60
Tabela 2: Comparação entre os cenários de fluxo em regime permanente. Al cenário sem calibração; BIV cenário calibrado.	74
Tabela 3: Valores dos parâmetros ajustados para a cava vazia.	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A: símbolo para área [L²]

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA: Agência Nacional de Águas

ENCH: enchimento do lago da cava da Mina de Águas Claras

H: símbolo para carga hidráulica [L]

IBRAM: Instituto Brasileiro de Mineração

IGAM: Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INA: indicador de nível d'água

L: símbolo para distância [L]

K: símbolo para condutividade hidráulica [L/T]

MAC: Mina de Águas Claras

PERM: permanente, regime de fluxo

PZ: piezômetro

q: fluxo de água subterrânea [L/T]

Q: símbolo de vazão [L³/T]

QF: Quadrilátero Ferrífero

REV: volume elementar representativo, em inglês

RNA: rebaixamento do nível d'água

S: armazenamento específico [-]

T: tempo [T]

T-ENCH: calibração da fase de enchimento do lago, em regime transiente

T-RNA: calibração da fase de rebaixamento do nível d'água da mina, em regime transiente

W: símbolo para definir entrada ou saída de água do sistema [L3/L/T]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO / REVISÃO DA LITERATURA	19
1.1	A Mina de Águas Claras (MAC)	22
1.1.1	Período inicial de exploração – sem rebaixamento (1973 a 1988)	25
1.1.2	Período de rebaixamento (1986 a 2000)	26
1.1.3	Período pós-operação – recuperação de nível freático (2000 a 2023)	27
1.2	Preceitos da Hidrogeologia	28
1.2.1	Equação governante do fluxo de água subterrânea	28
1.2.2	A modelagem de águas subterrâneas	31
1.3	Justificativa	34
1.4	Objetivos	35
1.5	Síntese metodológica	36
1.6	Organização da dissertação	38
2	ANÁLISE HISTÓRICA DOS DADOS DE MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO E DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA CONCEITUAL RELACIONADA AO ENCHIMENTO DO LAGO DA MINA DE ÁGUAS CLARAS	40
2.1	Introdução	40
2.2	Hidrografia da área	41
2.3	Geologia da área	41
2.4	Monitoramento	44
2.4.1	Pluviometria	45
2.4.2	Piezometria	46
2.4.3	Vazões dos cursos d'água	49
2.4.4	Poços de bombeamento	50
2.4.5	Nível d'água do lago	52
2.5	Balanço hidrológico	54
2.6	Caracterização hidrogeológica	60
2.7	Principais resultados	65
3	SENSIBILIDADE DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA HIDROGEOLÓGICA DA FORMAÇÃO DE LAGO EM CAVA: O CASO DA MINA DE ÁGUAS CLARAS	66
3.1	Introdução	66
3.2	Modelo numérico hidrogeológico de fluxo	67
3.3	Cenários de simulação e calibração do modelo	70
3.3.1	Análise dos cenários	72
3.3.2	Análise dos volumes de contribuição ao enchimento do lago	76
3.3.3	Simulação do enchimento do lago	78

3.3.4	Principais resultados	85
4	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	86
5	REFERÊNCIAS.....	88
	APÊNDICE A – CORRELAÇÃO ENTRE ID DOS INSTRUMENTOS E CÓDIGOS DOS MAPAS.....	92
	APÊNDICE B – DADOS DE CHUVA DA ESTAÇÃO CAIXA DE AREIA	93
	APÊNDICE C – APORTE EXTERNO DO RIBEIRÃO DO PRATA PARA A CAVA DE ÁGUAS CLARAS	94
	APÊNDICE D – SEPARAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MONITORAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA POR GRUPO	95
	APÊNDICE E – UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO, COM CONSOLIDAÇÃO DE SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS...96	
	APÊNDICE F – RESUMO DAS INFORMAÇÕES E CONFIGURAÇÕES DO MODELO NUMÉRICO.....	97
	APÊNDICE G – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	103
	APÊNDICE H – RESUMO DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS APLICADOS EM CADA CENÁRIO	104
	ANEXO A – CÓDIGO 10 CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA FINS DE REBAIXAMENTO DE NÍVEL DE ÁGUA PARA MINERAÇÃO	105

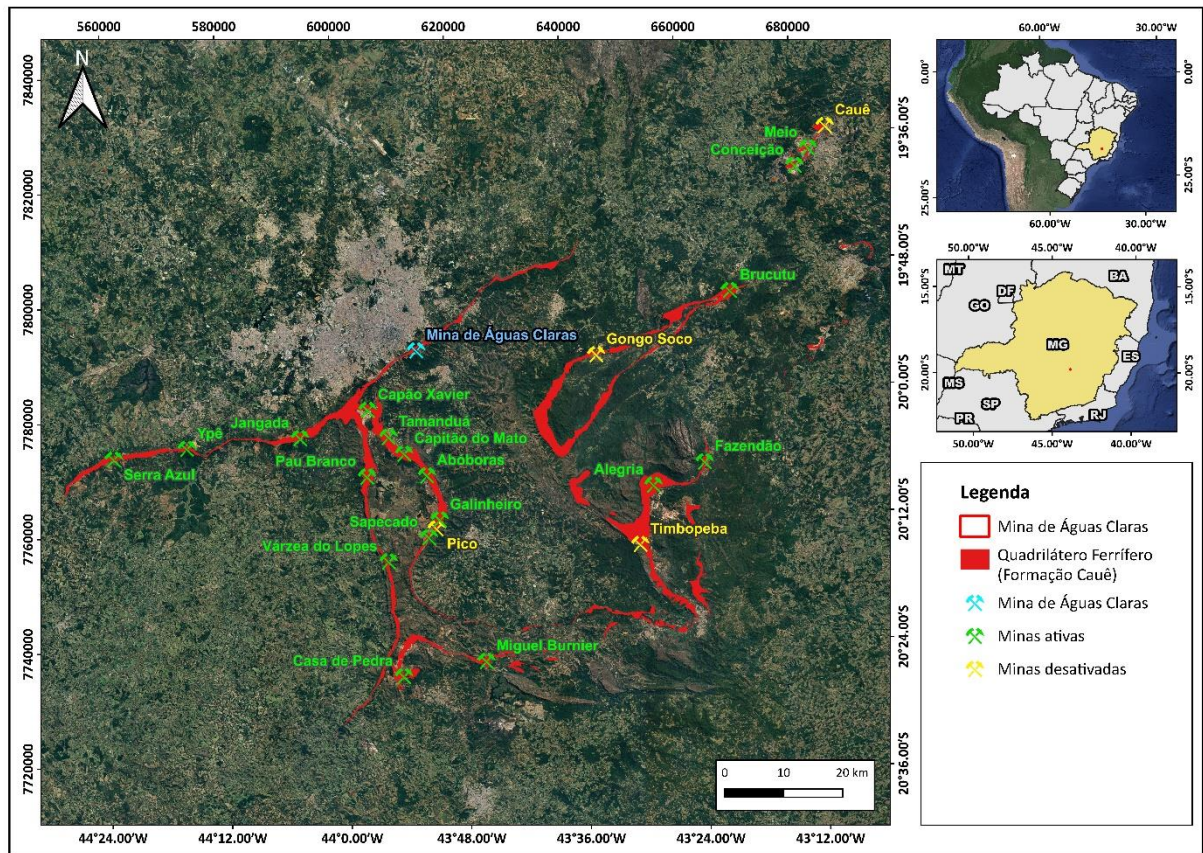
1 INTRODUÇÃO / REVISÃO DA LITERATURA

A atividade de mineração implica alteração da composição natural do território, trazendo passivos de diferentes ordens (LEONARD; LEOGANG, 2018). Dentre esses, quando realizada a céu aberto, a atividade minerária provoca, devido à extração de material, a formação de cavas (STACEY; MARTIN, 2018). Eventualmente essas cavas podem atingir o nível d'água subterrânea, com seu avanço em profundidade, gerando afloramentos de água (BERTACHINI, 1994; GRANDCHAMP, 2003; STACEY; MARTIN, 2018; SZCZEPIŃSKI, 2019; PEKSEZER-SAYIT; YAZICIGIL, 2022). A fim de permitir a continuidade da operação de lavra, são empregadas técnicas de rebaixamento do nível d'água subterrânea, comumente por meio da construção e bombeamento de poços tubulares (BERTACHINI, 1994; GRANDCHAMP, 2003; PEKSEZER-SAYIT; YAZICIGIL, 2022), que possibilitam o aprofundamento das cavas e a retirada de maior quantidade de minério das jazidas exploradas. Esse sistema é particularmente importante em minas de ferro localizadas no Quadrilátero Ferrífero (QF), no Estado de Minas Gerais, (STACEY; MARTIN, 2018; CASTRO; ENDO; GANDINI, 2020) (Figura 1), onde o alvo da mineração, os itabiritos¹ da Formação Cauê (DORR II, 1969), representam também a principal unidade hidrogeológica da região, o Aquífero Cauê (MOURÃO, 2007).

A conseqüente modificação dos fluxos de água subterrânea ocasionada pela operação do sistema de rebaixamento do nível d'água pode causar mudanças significativas no comportamento dos corpos hídricos superficiais da região explorada (BERTACHINI, 1994; MAGALHÃES et al., 2022), alterando vazões na hidrografia relacionada aos sistemas aquíferos impactados (IBRAM; ANA, 2006; PEKSEZER-SAYIT; YAZICIGIL, 2022).

¹ Itabiritos são rochas originadas pelo produto do metamorfismo de rochas sedimentares químicas ricas em hematitas ou magnetitas e sílica, que formam ricos depósitos de ferro (BIONDI, 2003).

Figura 1: Localização da MAC e de outras minas ativas e paralisadas no QF. A figura ainda apresenta, em imagens menores, o contexto da área de estudo, sobre o mapa do Brasil e do estado de Minas Gerais. As outras minas identificadas no mapa principal são minas que apresentam contexto hidrogeológico semelhante àquele presente na MAC.



Fonte: Elaboração do autor. Imagem de satélite: Google Earth. Geologia: Endo (2019).

Na região do QF, as minas começaram a operar os sistemas de rebaixamento do nível d'água a partir da década de 1980 (BERTACHINI, 1994; VALE, 2003; CASTRO; ENDO; GANDINI, 2020) quando passaram a atingir o nível d'água do Aquífero Cauê. Tradicionalmente, o sistema de rebaixamento do nível d'água nas minas de ferro a céu aberto localizadas no QF é formado por poços de bombeamento (STACEY; MARTIN, 2018; PEKSEZER-SAYIT; YAZICIGIL, 2022) que precisam produzir uma vazão superior à recarga e reserva renovável do aquífero. Eventualmente são utilizadas galerias de drenagem ou mesmo drenos horizontais e/ou verticais (READ; BEALE, 2013).

No Brasil, especificamente no estado de Minas Gerais, os órgãos governamentais já legislam sobre a prática do rebaixamento do nível d'água em mineração desde a década de 1990. Tal esforço gerou ferramentas legais como a Outorga do Sistema de Rebaixamento do Nível D'Água em Mineração, o Código 10 (Anexo A) (IGAM,

2023), que estabelece as regras e estudos necessários para que a empresa de mineração possa pleitear a implantação e a operação de um sistema de rebaixamento do nível d'água. No documento é solicitada a apresentação de um relatório técnico no qual deve constar a análise do monitoramento hidro meteorológico da área, estudo de eventuais impactos, métodos de rebaixamento do nível d'água e qual será o uso da água produzida pelo desaguamento da mina. É também solicitado desenvolvimento de modelos numéricos de fluxo de água subterrânea quando eles se aplicarem.

Uma vez cessado o bombeamento dos poços de rebaixamento, ao final da lavra, o aquífero tende a recuperar gradualmente o nível d'água, em função de fatores como a recarga direta, o escoamento superficial e o próprio escoamento subterrâneo que continua a ser convergente à região com as cargas hidráulicas mais baixas na área da mina (GRANDCHAMP, 2003; GAMMONS et al., 2009; WINGLE; SINTON, 2015; HALEY, 2021).

No que concerne ao encerramento de atividades minerárias a céu aberto, diferentes alternativas podem ser adotadas referentes à utilização da cava pós-operação, como, por exemplo, a formação de lagos freáticos (GAMMONS et al., 2009; TUHETERU et al., 2021) ou o enchimento da cava (*“open pit backfill – OPB”*) com rejeitos de mineração (ZHANG et al., 2021) ou com estéril (RIMÉLÉ; DIMITRAKOPOULOS; GAMACHE, 2018). A prática da formação de lagos em antigas minas é comum pelo mundo (MONNINKHOFF et al., 2014; MAEST; PRUCHA; WOBUS, 2020; TUHETERU et al., 2021; HALEY, 2021), especialmente na Austrália, onde existem mais de 1800 cavas abertas e mais de 150 minas com operação abaixo do nível d'água subterrânea (JOHNSON; WRIGHT, 2003; TUHETERU et al., 2021). Tuheteru et al. (2021) também citam a presença de 100 lagos de cava na Polônia, além de outros 30 na Espanha. Os lagos de cava podem servir como fonte de abastecimento industrial ou doméstico, recreação, ou ainda, dependendo da qualidade da água, servir como um ecossistema para peixes e outras espécies da fauna local (GAMMONS et al., 2009).

No contexto da norma que estabelece os critérios para fechamento de uma mina, a resolução 68 de 2021 da ANM (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2021), descreve as obrigações quanto à definição de ações de manutenção e monitoramento das estruturas remanescentes, dentre as quais podemos citar as cavas das minas a

céu aberto. Destarte, uma compreensão do enchimento do lago da cava ao longo do tempo, caso essa seja a opção para o descomissionamento da cava, também nos permitiria compreender o horizonte dos impactos relacionados, antecipar medidas de mitigação e propiciar estratégias mais robustas relacionadas a eventuais usos futuros dessas áreas.

Prever como se dá o aumento do nível d'água em cavas de mineração é fundamental para se proporcionar um planejamento sustentável do descomissionamento da atividade minerária. Ainda que seja uma situação comum, ainda são poucos os trabalhos que buscaram compreender especificamente como se dá o processo de enchimento dos lagos a partir do momento que cessam os bombeamentos ((MONNINKHOFF et al., 2014); (MAEST; PRUCHA; WOBUS, 2020); (HALEY, 2021); (TUHETERU et al., 2021)). Esses estudos se interessaram principalmente em aspectos de qualidade ou da contribuição exclusiva do fluxo de água subterrânea no processo que também incorpora aportes superficiais e a dinâmica do próprio lago.

O processo de enchimento de uma cava após interrupção do bombeamento depende de diversos fatores como as características (hidro)geológicas do substrato, o formato da cava, a evaporação e precipitação (MAEST; PRUCHA; WOBUS, 2020; TUHETERU et al., 2021), dentre outros. O próprio uso da cava, eventualmente a utilizando como deposição de rejeito do processo de beneficiamento do minério, é ainda outro fato a ser levado em consideração (BOZAN et al., 2022).

Dadas essas fontes significativas de incerteza, é pertinente se interrogar se os modelos numéricos são capazes de prever esse processo e sob quais condições. Nesse contexto, a Mina de Águas Claras (MAC), como se verá a seguir, apresenta grande potencial para esse tipo de análise, sendo o objeto de estudo desta pesquisa.

1.1 A Mina de Águas Claras (MAC)

É notório que estudos de caso ricos em monitoramento são raros (MAGALHÃES et al., 2022). Esses dados, contudo, são essenciais para se alimentar modelos hidrogeológicos computacionais e para possibilitar maior compreensão dos processos físicos relacionados e explorar lacunas científicas ainda existentes. Ademais o monitoramento é importante para definir o comportamento do sistema hidrogeológico

frente à operação do sistema de rebaixamento do nível d'água (IBRAM; ANA, 2006; STACEY; MARTIN, 2018).

A Mina de Águas Claras (MAC), localizada no Estado de Minas Gerais, no Brasil (Figura 1), conta com mais de 80 anos de monitoramento contínuo dentro do intervalo de 1940 a 2022², período no qual estão compreendidos: o período de operação da mineração com abertura de uma cava de 350m de profundidade (1973-2000); o período de rebaixamento do aquífero local, que teve sua cota rebaixada de 1165 m a 890 m (1986 - 2000); e o período de recuperação do nível freático e formação do lago após encerramento das atividades e do bombeamento, fazendo com que o nível d'água do aquífero tenha chegado à cota 1073 m, em 2022 (2000-2022).

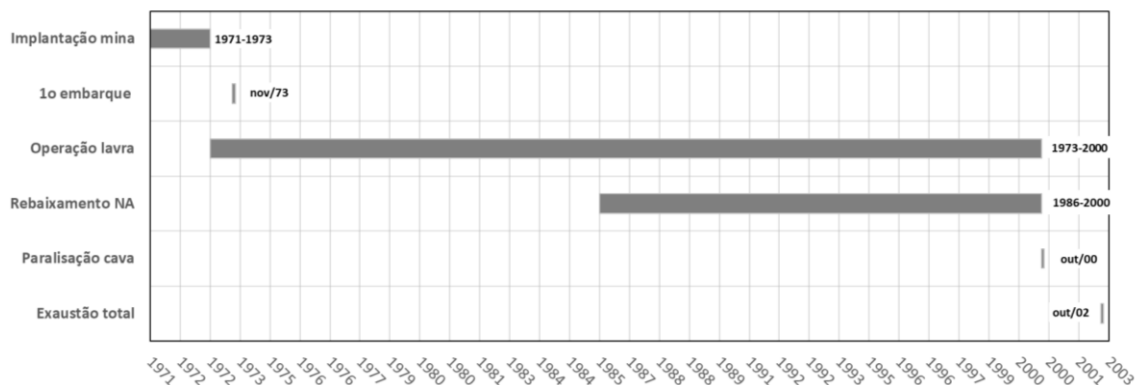
A mina de Águas Claras (MAC) era uma lavra de minério de ferro situada no flanco sudeste da Serra do Curral, no município de Nova Lima, em área limítrofe ao município de Belo Horizonte (Figura 1), que iniciou sua operação em 1973 e implantou o sistema de rebaixamento do nível d'água em 1986, quando a lavra se encontrava próxima à elevação da nascente do córrego Águas Claras (elevação 1165 m) (BERTACHINI, 1994).

Os primeiros estudos da Mina de Águas Claras (MAC) foram desenvolvidos pelo geólogo George Chalmers, em 1904 (VALE, 2003). Durante os setenta anos seguintes, outros trabalhos de prospecção geológica foram desenvolvidos na área, sendo que os últimos deles foram consolidados entre 1958 e o início da década de 1970. A operação da MAC se iniciou em 1971. Em novembro de 1973, o primeiro embarque de minério foi realizado (VALE, 2003). Os estudos hidrogeológicos da área começaram apenas na segunda metade da década de 1980, tendo o sistema de rebaixamento do nível d'água se iniciado em 1986 e se encerrado em 2000, junto com o encerramento da operação de lavra da mina (Figura 2). Ainda que a operação na cava tenha sido paralisada em 2000, a exaustão completa da MAC se deu em 2002. De 2000 a 2002, foram aproveitadas áreas de recorrência da cava principal, acessos e pilhas intermediárias (GRANDCHAMP, 2003), de forma a otimizar ao máximo possível a recuperação de ROM (*run-of-mine*). Adicionalmente, as operações de lavra

² Ainda que a mina tenha entrado em operação em 1973, existem dados de chuva disponíveis na região desde a década de 1940, como registrado pela estação Caixa de Areia, localizada no alto da Serra do Curral.

tiveram início numa cava subsidiária, localizada na área compreendida entre o antigo britador primário e a pilha intermediária de alimentação da planta de beneficiamento, onde uma reserva de hematita havia sido bloqueada (VALE, 2003). Contudo, não houve operação sobre a cava propriamente dita no período.

Figura 2: Fases de operação da MAC, da implantação à exaustão da operação.



Fonte: Elaboração do autor.

Inicialmente utilizando a técnica de trincheiras, o rebaixamento evoluiu para a construção de poços profundos de rebaixamento e o emprego da técnica de pré-rebaixamento, que consiste em se manter o nível d'água subterrânea pelo menos 13 metros abaixo do piso de lavra (BERTACHINI, 1994; VALE, 2003). No ano 2000, o sistema de rebaixamento do nível d'água da MAC foi desativado com o final das operações de lavra no local, quando então o nível d'água se encontrava em torno da cota 890 m (VALE, 2003). A partir de então o nível d'água na cava vem se recuperando e um lago freático artificial foi formado (MDGEO; VALE, 2018).

Desde o início dos anos 2000, além da MAC, algumas minas localizadas no Quadrilátero Ferrífero (QF) têm encerrado suas atividades. Ao menos outras quatro cavas de minério de ferro paralisadas, localizadas no QF, se enquadram nesse grupo (Figura 1): a Mina de Cauê (município de Itabira), cujas atividades foram finalizadas em 2002; e a Mina de Gongo Soco (Barão de Cocais), cujas atividades foram encerradas em 2016, além das cavas do Pico (Itabirito) e de Timbopeba (Ouro Preto). Diversas outras minas em operação dispõem de cavas que futuramente deverão ser objeto de processos de descomissionamento, como por exemplo, mina de Casa de Pedra (CSN), mina Pau Branco (VALLOUREC), mina de Tamanduá (VALE), mina de Capitão do Mato (VALE), mina de Alegria (SAMARCO) (Figura 1), entre outras.

1.1.1 Período inicial de exploração – sem rebaixamento (1973 a 1988)

Entre 1973 (Figura 3 – A) e 1986 (Figura 3 – B), a exploração do minério foi realizada sem rebaixamento do nível freático, apenas com operações de manejo da água superficial, enquanto a lavra ainda operava em flanco, sem cava fechada.

Figura 3: (A) Ano de 1973 – Vista geral da mina de Leste para Oeste; (B) Ano de 1986 – Vista da mina de Leste para Oeste (mostrando seção geológica 2200), à época que atingiu o nível d'água do Aquífero Cauê.



(A)



(B)

Fonte: VALE (2003).

1.1.2 Período de rebaixamento (1986 a 2000)

O rebaixamento do nível de água subterrânea da MAC iniciou-se em 1986, quando a lavra se encontrava próxima à elevação da nascente do córrego Águas Claras (elevação 1165 m). Grandchamp (2003), no entanto, aponta que o nível d'água da Formação Cauê foi atingido ao avançar do banco 1178 m para o de cota 1165 m (a altura dos bancos da mina era de 13 metros), ainda em 1981. Inicialmente utilizando a técnica de trincheiras, o rebaixamento evoluiu para a construção de poços profundos de rebaixamento e o emprego da técnica de pré-rebaixamento, que consiste em se manter o nível d'água subterrânea pelo menos 13 metros abaixo do piso de lavra (BERTACHINI, 1994).

No ano de 1988 iniciou-se a operação do sistema de rebaixamento do nível d'água com uma bateria de poços tubulares profundos (poços da Formação Cauê) para permitir as operações de lavra em cava fechada (BERTACHINI, 1994; GRANDCHAMP, 2003).

O ano de 1995 marcou o início da redução gradual do programa de produção da mina de Águas Claras. O esgotamento da reserva lavrável no fundo da cava principal ocorreu no mês de novembro de 2000, estando a cava principal com formato aproximadamente elipsoide, totalizando 1600 m no sentido Leste-Oeste e 900 m no sentido Norte-Sul.

Com relação à diferença de nível no âmbito da operação, obtida pela diferença entre o nível inferior da cava (cota 890) e marco do Patrimônio (cota 1341), totalizava 451m. O bombeamento foi encerrado em outubro de 2000 (Figura 4).

Figura 4: Vista geral de SE para NW, no final de extração de minério na cava (ano 2000).



Fonte: Vale (2003).

1.1.3 Período pós-operação – recuperação de nível freático (2000 a 2023)

Após a finalização do bombeamento em 2000, iniciou-se a recuperação dos níveis freáticos, e, conseqüentemente, o enchimento de um lago na cava exaurida (Figura 5). Desde então, o nível d'água do aquífero tem subido e o seu monitoramento permite compreender como ocorreu essa evolução no tempo. Segundo estudos geotécnicos realizados na área (FRANCA, 1997), espera-se que esse lago chegará até a cota de offset da cava posicionada em 1100 metros. Em sua configuração final, o Lago de Águas Claras deverá possuir profundidade máxima de aproximadamente 200 m, ocupando uma área superficial de 0.67 km², e acumulando cerca de 54 milhões de m³ de água. Em agosto de 2022, seu espelho d'água já atingiu a cota de 1072,4 metros, representando uma coluna de aproximadamente 182 m, acima da cota de fundo da cava (890 m).

Figura 5: Ilustração da evolução do enchimento do lago da cava da MAC entre 2004 e 2023.



Fonte: Vale (2003) e acervo do autor.

1.2 Preceitos da Hidrogeologia

Ainda que seja possível resgatar até o século V a.C. o estudo da circulação da água no planeta, na forma das primeiras análises com caráter mais científico, foi somente no século XIX d.C. que a hidrologia obteve maiores e mais rápidos avanços (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

1.2.1 Equação governante do fluxo de água subterrânea

No campo mais específico da Hidrogeologia (ou Hidrologia Subterrânea), o ramo da Hidrologia que trata da circulação da água pelo meio subterrâneo, ainda não existia uma lei que governava o estudo do seu fluxo por meios porosos até 1856, quando o engenheiro francês Henry Darcy publicou uma série de experimentos que relacionavam a vazão com o gradiente hidráulico, através de uma constante de proporcionalidade denominada de condutividade hidráulica (DARCY, 1856; CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983) (Equação 1).

$$Q = K * A * \frac{\Delta h}{L} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde

Q = vazão [L³/T]

K = condutividade hidráulica [L/T]

A = área [L²]

H = diferença de carga hidráulica [L]

L = distância [L]

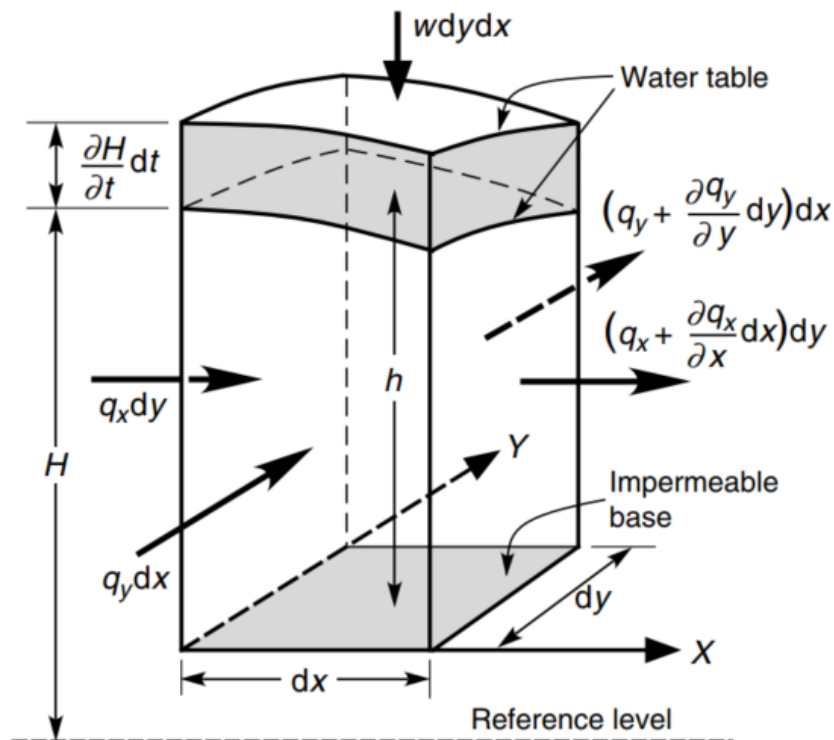
A partir do trabalho de Darcy, diversos outros autores apresentaram relevantes estudos que contribuíram com a evolução do conhecimento acerca dos sistemas hidrogeológicos, dentre os quais podemos citar Dupuit, em 1863, Thiem, em 1870, Theis, em 1935, Jacob, em 1947, e Hantush, em 1964 (FEITOSA, 2008).

Todos os modelos de fluxo de água subterrânea são derivados dos princípios básicos da conservação da massa (Equação da Continuidade), que afirma que a água não é criada ou destruída e a lei de Darcy, que estabelece que as águas subterrâneas fluem de alta para baixa energia potencial (FEITOSA, 2008; ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Para tal análise, normalmente toma-se como referência um volume elementar representativo (REV na sigla em inglês) (

Figura 6). O fluxo de água subterrânea que atravessa o REV pode ser definido pela Equação 2.

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (\text{Equação 2})$$

Figura 6: Volume elementar representativo ou VER.



Fonte: KRESIC (2007).

A fim de respeitar conservação de massa, $O - I = S$, ou seja, o *outflow* (saída) menos o *inflow* (entrada) deverá ser a variação do armazenamento de água subterrânea contida no REV. Ou ainda, escrito de outra forma, segundo as variações de fluxo, a variação total de vazão é igual à variação no armazenamento (S) (Equação 3).

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \Delta S \quad (\text{Equação 3})$$

Eventuais saídas (*sinks*) ou entradas (*sources*) devem ser tomadas como possibilidades de ocorrerem dentro do REV, o que costuma ser representado como W^* , usado com sinal positivo quando é entrada ou negativo quando é saída.

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \pm W^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \Delta S \quad (\text{Equação 4})$$

A Equação 4 pode ser ainda escrita substituindo-se o armazenamento pelo armazenamento específico (S_s) que é o volume de água subterrânea liberado pelo armazenamento por unidade de carga por volume unitário do aquífero, ficando como:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \pm W^* = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Equação 5})$$

Por ser mais difícil de medir o fluxo de água subterrânea, normalmente a Equação 5 é escrita sobre os valores de condutividade hidráulica (K) e carga hidráulica (h) já que, segundo Darcy, o fluxo é o produto de K e a variação de H no espaço. A equação então fica (Equação 6), que é definida como a Equação Geral do Fluxo Subterrâneo.

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(K_x \frac{\delta H}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(K_y \frac{\delta H}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(K_z \frac{\delta H}{\delta z} \right) \pm W = S \frac{\delta H}{\delta t} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde

K = condutividade hidráulica [L/T]

H = carga hidráulica [L]

W = entrada ou saída de água do sistema [L³/L/T]

S = armazenamento específico [-]

t = tempo [T]

1.2.2 A modelagem de águas subterrâneas

Desde meados dos anos 1960, os modelos computacionais hidrogeológicos se tornaram uma das principais ferramentas para análise de sistemas hidrogeológicos (KONIKOW et al., 2007; SZCZEPÍŃSKI, 2019), incluindo questões associadas ao planejamento da operação da mina (SCHWARTZ; CROWE, 1985; GRANDCHAMP, 2003; ARAÚJO; NASCIMENTO; DE BESSA, 2016; HU et al., 2020; COMPÈRE; KERN; BELLENFANT, 2021), para se compreender os efeitos do bombeamento na região e proximidade (MAGALHÃES et al., 2022; PEKSEZER-SAYIT; YAZICIGIL, 2022), e para, por fim, se compreender os efeitos do encerramento do bombeamento quando cessam as atividades minerárias em um território (GRANDCHAMP, 2003; JOHNSON; WRIGHT, 2003; GAMMONS et al., 2009; WINGLE; SINTON, 2015; MCJANNET et al., 2017; MAEST; PRUCHA; WOBUS, 2020).

Os primeiros modelos de simulação de fluxo de água subterrânea datam do início do século XX e consistiam em modelos físicos do tipo caixa de areia ou modelos

analógicos de fluidos viscosos ou elétricos (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983), utilizados principalmente em análises laboratoriais.

O uso inicial de modelos numéricos, ou computacionais, em hidrogeologia foi impulsionado pelo avanço da computação nas décadas de 1960 e 1970. Um código foi escrito por Pinder; Bredehoeft (1968) para resolver equações de fluxo de água subterrânea com método de diferenças finitas, utilizando dados de um ensaio de bombeamento para calibrar os parâmetros do aquífero. Tais resultados foram ainda confrontados com os resultados de um modelo elétrico analógico do mesmo sistema.

Com o surgimento de recursos computacionais mais poderosos, e mais baratos, estudiosos puderam explorar a capacidade de simular e prever o fluxo de água subterrânea e o transporte de contaminantes por meio de modelos numéricos (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

Os modelos computacionais utilizam métodos numéricos para o cálculo e soluções de sistemas de equações diferenciais parciais (EDP's) como a equação geral do fluxo de água subterrânea (Equação 6). Existem diversos programas, pagos ou não, atualmente disponíveis para o modelamento numérico hidrogeológico. Especificamente, no caso do Brasil, os mais comumente utilizados para minerações, baseado na experiência profissional de 21 anos de atuação do autor como consultor nessa área, são o Feflow e o Visual Modflow.

Szczepiński (2019) aponta que o uso de modelos numéricos em mineração possui limitações resultantes das incertezas existentes quanto aos parâmetros hidrogeológicos que são assumidos e às condições de contorno. Dentre essas limitações, pode-se citar a deficiência na identificação de condições hidrogeológicas, e dos dados de precipitação e evaporação, bem como e na análise do enchimento das cavas pós-mineração. Ainda assim, conclui o autor, os modelos “fornecem as informações mais abrangentes sobre os processos de desaguamento e enchimento de cavas, bem como sua influência no meio ambiente”.

Atualmente, os modelos numéricos em hidrogeologia continuam sendo uma ferramenta essencial para a tomada de decisões em gestão de recursos hídricos, avaliação de impactos ambientais e planejamento de uso sustentável das águas

subterrâneas, como atesta inclusive a já mencionada indicação do seu uso em processos de outorga de uso de água subterrânea, por exemplo, no estado de Minas Gerais, onde os modelos numéricos são solicitados quando da entrada do processo de outorga do sistema de rebaixamento do nível d'água em minerações (IGAM, 2023).

Para o cenário de estudos a respeito de simulações de lagos de cava de mineração, alguns trabalhos se destacaram como as simulações numéricas desenvolvidas por Anderson (2002), que aplicaram um alto valor de condutividade hidráulica (100.000 m/dia) para representar o vazio formado no interior da cavas para simulação do enchimento e formação de lago, porém apenas sob regime estacionário. Contudo, esse não é o primeiro trabalho que se utiliza dessa metodologia, já apresentada em Winter (1976), onde a relação de fluxo entre um lago e o aquífero é discutida em simulações bidimensionais.

Mais recentemente, Tuheteru *et al.* (2021) apresentam um estudo acerca das contribuições e trocas entre um lago de cava de uma antiga mina de carvão, na Indonésia, e o sistema hidrogeológico no entorno. Localizada em região equatorial, os autores chegam a resultados que apontam o escoamento direto como principal fator de enchimento do lago (40 a 47% da contribuição total). No entanto, as análises a respeito do fluxo de água subterrânea são feitas apenas no âmbito conceitual, sem uso de modelos numéricos.

1.3 Justificativa

No contexto da norma que estabelece os critérios para fechamento de uma mina, a resolução 68 de 2021 da ANM (2021), descreve as obrigações quanto à definição de ações de manutenção e monitoramento das estruturas remanescentes, dentre as quais podemos citar as cavas das minas a céu aberto. Destarte, uma compreensão do enchimento do lago da cava ao longo do tempo, caso essa seja a opção para o descomissionamento da cava, também nos permitiria compreender o horizonte dos impactos relacionados, antecipar medidas de mitigação e propiciar estratégias mais robustas relacionadas a eventuais usos futuros dessas áreas.

Para o caso específico da MAC, que acaba por ser extrapolado para outras minas com condições semelhantes, questões vêm sendo apontadas a respeito da velocidade de subida do nível d'água no lago e o provável limite dessa subida, dentre outras, todas relevantes para a caracterização do descomissionamento da mina. Grandchamp (2003) desenvolveu sua pesquisa com a avaliação do tempo necessário para o completo enchimento do lago, estimado, na época, entre 15 e 22 anos (enchimento total entre 2017 e 2024). Uma atualização desse estudo com uma nova simulação numérica do enchimento do lago, realizada pelo próprio autor, trouxe a estimativa que o enchimento ocorreria no ano de 2048 (MDGEO; VALE, 2018); sendo essa estimativa superior em 31 anos para a previsão com menor tempo de enchimento de Grandchamp (2003). No entanto, algumas fragilidades já são abordadas no estudo, como as incertezas frente à velocidade que a água subterrânea aflora dentro da cava à medida que o nível médio do aquífero se eleva (sendo esse valor representado numericamente por uma condutividade hidráulica do vazão da cava) e a eventual interferência de estruturas no entorno da cava, como pilhas de estéril (PDE).

Por fim, a escolha da mina de Águas Claras como estudo de caso específico para o desenvolvimento do presente projeto se justifica por se tratar de uma antiga mina com uma grande quantidade de dados disponíveis, o que faz com que seja um estudo de caso muito rico, que nos permite uma série de análises.

1.4 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é analisar as limitações do emprego de modelos computacionais hidrogeológicos na previsão da formação de lagos em cavas, que passaram por rebaixamento do nível d'água para fins de mineração.

Os objetivos específicos da dissertação são apresentados a seguir:

- Quantificar as porcentagens de contribuições das variáveis do ciclo hidrológico à formação do lago;
- Analisar a sensibilidade dos parâmetros hidrodinâmicos quando aplicados ao vazio da cava, definindo ordens de grandeza para a amplitude de valores que melhor se ajustem à calibração do enchimento da cava;
- Estimar o impacto de certos elementos, como disponibilidade de dados de calibração e dados reais de chuva, à melhoria na previsibilidade da simulação de um modelo numérico para análise de enchimento de lago em cava.

1.5 Síntese metodológica

O desenvolvimento metodológico deste trabalho pode ser resumido em cinco etapas fundamentais:

Etapa 1 – Pesquisa bibliográfica: essa etapa compreendeu a realização de uma pesquisa bibliográfica extensa sobre o tema da dissertação, na literatura nacional e internacional, com foco na modelagem numérica aplicada ao rebaixamento de aquífero e simulação de recuperação de nível de água em cavas de mineração.

Etapa 2 – Levantamento de dados: compilação, análise e tratamento de dados pertinentes à área de estudo, dentre os quais cito pluviometria, informações de nível d'água, vazões dos poços de bombeamento, vazões de cursos d'água, mapas topográficos e geologia;

Etapa 3 – Atualização do modelo conceitual: com base nos dados de monitoramento disponibilizados pela VALE, foi realizada uma análise para revisão do modelo hidrogeológico conceitual da área, tomando como base a chuva monitorada pela estação Caixa de Areia (código ANA 1943022), dados de vazão dos poços de rebaixamento, nível d'água dos piezômetros e indicadores do nível d'água e dados de subida do nível d'água do lago. Essa análise permitiu caracterização das principais unidades hidrogeológicas da área, definição do fluxo de água subterrânea e identificação dos pontos de descarga mais relevantes da área.

Etapa 4 – Estimativa do balanço hídrico durante o enchimento do lago: com base em dados diretos da mina e em dados secundários, foi calculado o balanço hídrico da mina durante 22 anos de formação do lago, de 2000 a 2022. A análise foi dividida em:

1. Curva cota x volume: o ponto de partida dessa análise foi a batimetria desenvolvida pela própria Vale que correlacionava o volume, e área do lago, com cota estimadas em função do sólido “vazio” da cava;
2. Chuva direta: a partir da evolução da área do espelho do lago calculada no item anterior, estimou-se a vazão de contribuição da chuva direta ao lago, usando os totais mensais de chuva medidos na estação Caixa de Areia;

3. Bombeamento do Ribeirão do Prata: segundo dados disponibilizados pela Vale e discussão encontrada em Grandchamp (2003), no período de fevereiro de 2002 a junho de 2006, foi lançada na cava uma vazão captada no Ribeirão do Prata, com o intuito de acelerar o processo de enchimento e atingir cota do nível d'água que garantiria maior estabilidade aos taludes da cava;
4. Escoamento superficial: com uma área inferior a 2 km² (1,19 km²), o método racional, conforme proposto por Chow (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988) foi empregado para o cálculo da contribuição do escoamento superficial ao lago. Para tanto, empregou-se um coeficiente de escoamento (C) de 0,49, o volume de chuva mensal que incide sobre o lago da MAC e sua área de contribuição, que vai reduzindo à medida que o nível d'água do lago sobe e o espelho do lago aumenta;
5. Evaporação: a evaporação foi calculada com uso do Google Earth Engine, que permite a obtenção de dados indiretos, como chuva e evaporação, a partir da análise de imagens históricas de satélites, disponíveis na referida plataforma online. Com apoio do colega de mestrado Pedro Lage Andrade, foi utilizado um código computacional para extrair dados mensais de evaporação da área, a partir do GLDAS (Global Land Data Assimilation System) da NASA, que possui cobertura global com resolução de até 1 km, com dados disponíveis desde 1948 (NASA, 2023).
6. Escoamento subterrâneo: o cálculo do escoamento subterrâneo foi feito através da análise do ganho mensal de volume do lago, as entradas (chuva, bombeamento do Ribeirão do Prata e escoamento superficial) e as saída (evaporação). O saldo, positivo ou negativo, representava a contribuição por escoamento subterrâneo do sistema hidrogeológico.

Etapa 5 – Modelo numérico hidrogeológico e simulação de cenários prospectivos: foi desenvolvido um novo modelo numérico para a MAC assumindo premissas definidas quando do trabalho desenvolvido pelo próprio autor, em 2018 (MDGEO; VALE, 2018), no âmbito de um projeto de consultoria. Foram, então, mantidas as estruturas originais desse modelo como limites, geologia e condições de contorno, sendo definida uma nova malha (*mesh*). Para a pesquisa foi utilizado o programa de modelamento

hidrogeológico, com uso de elementos finitos, FEFLOW (DIERSCH, 2014)³, que permite o modelamento numérico do fluxo de água subterrânea em meio saturado e em meio não saturado, já como utilizado em estudos similares (MONNINKHOFF et al., 2014; MDGEO; VALE, 2018; HALEY, 2021). Foram propostos cenários de simulação referentes a diferentes momentos da mina (pré-rebaixamento, rebaixamento do nível d'água e pós-rebaixamento), de forma a se compreender o impacto de elementos incertos da simulação na previsão do rebaixamento do nível d'água e do enchimento do lago. Além desses, foi criado outro cenário para a simulação numérica do enchimento final do lago até seu eventual vertimento, com base em diferentes premissas.

Todos os mapas utilizados no estudo foram elaborados pelo autor desta dissertação (salvo quando indicado na própria figura) com uso do *software* de código aberto QGis, versão 3.20.3-Odense. As imagens de satélite dos mapas foram tomadas a partir do Google Earth (GOOGLE, 2023).

Para o desenvolvimento do modelo numérico de fluxo de água subterrânea da pesquisa, uma licença acadêmica do FEFLOW foi disponibilizada pela DHI/HydroInfo.

1.6 Organização da dissertação

A dissertação foi estruturada de forma a compreender o conteúdo de dois artigos a serem submetidos em periódicos científicos, sendo a dissertação composta por 5 capítulos, contendo:

- (1) Introdução, justificativa, objetivo, síntese metodológica e o arcabouço científico essencial do trabalho;
- (2) Primeiro artigo: Análise histórica dos dados de monitoramento hidrogeológico e desenvolvimento da modelagem hidrogeológica conceitual relacionada ao enchimento do lago da Mina de Águas Claras, compreendendo os resultados das etapas metodológicas 1, 2, 3 e 4;

³ O programa de simulação do fluxo de água subterrânea Feflow (DIERSCH, 2014) utiliza o método de solução por elementos finitos (FEM – *finite element method*). Com trabalhos iniciais que datam dos anos 1940, os primeiros usos do FEM aplicaram-se a estudos de aerodinâmica. Somente a partir dos anos 1960, o FEM passou ser utilizado para problemas de fluxo em meios porosos.

- (3) Artigo 2: Análise de sensibilidade da simulação numérica hidrogeológica da formação de lago em cava na Mina de Águas Caras, contendo o resultado da etapa metodológica 5;
- (4) As principais conclusões e recomendações relacionadas à pesquisa.

2 ANÁLISE HISTÓRICA DOS DADOS DE MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO E DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA CONCEITUAL RELACIONADA AO ENCHIMENTO DO LAGO DA MINA DE ÁGUAS CLARAS

2.1 Introdução

A Mina de Águas Claras (MAC) realizou operação de extração de minério de ferro sobre a Serra do Curral, nos limite dos municípios de Belo Horizonte e Nova Lima, Estado de Minas Gerais (Brasil), entre os anos de 1973 e 2000, mais especificamente 2002, porém nos dois últimos anos não houve operação na cava, tendo sido feita apenas extração em pilhas (VALE, 2003). A MAC é uma das várias minas da região do Quadrilátero Ferrífero (QF) (Figura 1) que é uma província mineral localizada na região central do Estado de Minas Gerais, região famosa pelos expressivos depósitos de minério de ferro e ouro (CASTRO; ENDO; GANDINI, 2020).

A fim de permitir o avanço em profundidade, foi necessária a implantação de um sistema de rebaixamento do nível d'água (BERTACHINI, 1994; GRANDCHAMP, 2003), entre 1986 e 2000. Tal sistema rebaixou o nível d'água do sistema hidrogeológico local da cota 1175 até abaixo de 890 m. Desde o final da operação da mina e, conseqüentemente, do sistema de rebaixamento do nível d'água, o nível d'água da cava tem se recuperado formando um lago (GRANDCHAMP, 2003; MDGEO, 2001).

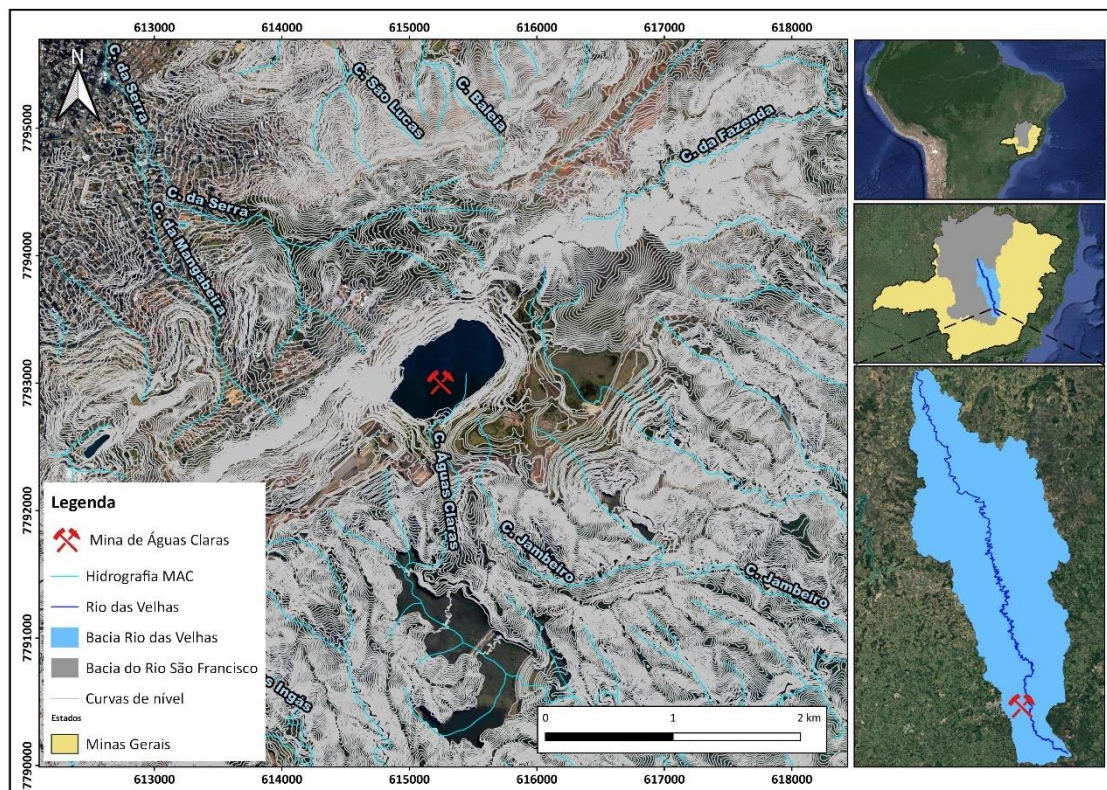
A área da mina conta com 81 anos de monitoramento contínuo dentro do intervalo de 1940 a 2022⁴. Serão aqui apresentados dados e análises referentes à pluviometria, piezometria, vazões dos cursos d'água, vazões dos poços de bombeamento e o monitoramento da elevação da cota do lago da cava. Por fim, uma análise é realizada com enfoque na caracterização hidrogeológica da área da mina e entorno, com definição das unidades hidrogeológicas e fluxo da água subterrânea, além do balanço hídrico do lago da cava durante o seu enchimento.

⁴ Ainda que a mina tenha entrado em operação em 1973, existem dados disponíveis de chuva na região desde a década de 1940.

2.2 Hidrografia da área

Regionalmente, a MAC localiza-se na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, e localmente o empreendimento está inserido na Bacia do Rio das Velhas (Figura 7), afluente da margem direita do Rio São Francisco. Os principais afluentes do Rio das Velhas presentes no entorno na MAC são os córregos Águas Claras, Jambeiro e Ingás, localizados na vertente sudeste da Serra do Curral, e os córregos da Mangabeira, da Serra, Baleia e São Lucas, presentes na vertente noroeste, além do Córrego da Fazenda, que drena a porção nordeste da área.

Figura 7: Contextualização hidrográfica da área em estudo, com indicação nas imagens menores da Bacia do Rio São Francisco e do Rio das Velhas, aos quais pertencem os cursos d'água que drenam a MAC.



Fonte: Elaboração do autor.

2.3 Geologia da área

A mina de Águas Claras situa-se no limite norte do Quadrilátero Ferrífero (Figura 1), que por sua vez localiza-se na borda sul do Cráton São Francisco. Seu embasamento, denominado de Complexo Granito-Gnáissico, é composto por terrenos gnáissos tonalítico-graníticos de idade arqueana (>2,7 Ga), sobrepostos por rochas

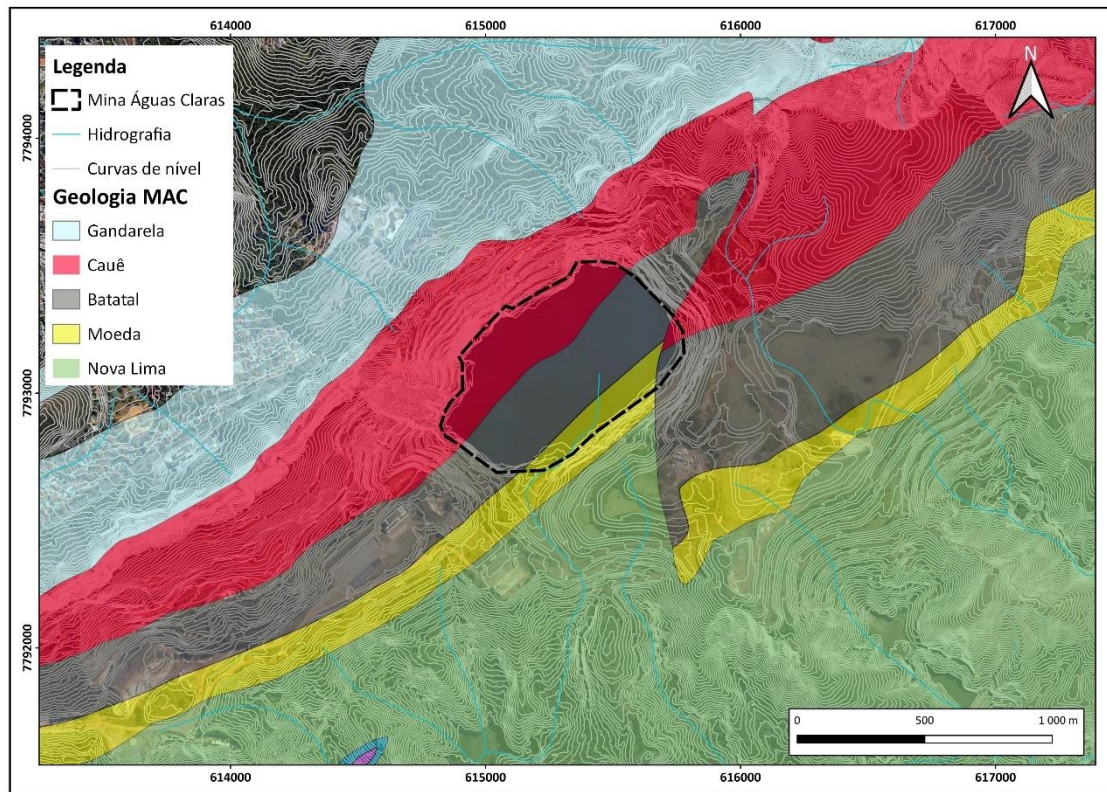
metassedimentares supracrustais, pertencentes aos Supergrupos Rio das Velhas (Arqueano), Minas (Paleoproterozóico) e Espinhaço (Mesoproterozóico).

O Supergrupo Rio das Velhas foi definido por Dorr (DORR II, 1969) como uma sequência “greenstone belt”, Arqueana. Compreende rochas xistosas metassedimentares e metavulcânicas mais antigas que as do Supergrupo Minas. O Supergrupo Rio das Velhas é subdividido em 2 grupos, Grupo Nova Lima e Grupo Maquiné (representado pelas formações Palmital e Casa Forte).

Assentando discordantemente sobre o Supergrupo Rio das Velhas tem-se o Supergrupo Minas, formado por metassedimentos clásticos e químicos, que engloba uma espessa sequência depositada em uma margem continental paleoproterozóica. Foi subdividido por Dorr (DORR II, 1969) em quatro grupos, da base para o topo: Grupo Tamanduá, Grupo Caraça (representado pelas formações Moeda e Batatal), Grupo Itabira (representado pelas formações Cauê e Gandarela) e Grupo Piracicaba (representado pelas formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões, Barreiro e Sabará).

Na área da mina de Águas Claras, posicionada no flanco sudeste da Serra do Curral, ocorrem rochas dos grupos Nova Lima, Caraça e Itabira (Figura 8). Os grupos Piracicaba e Sabará ocorrem no flanco noroeste da Serra. O Grupo Nova Lima está representado na porção sul da área em estudo por uma sequência de xistos e cloritas-xistos bastante alterados (GRANDCHAMP, 2003). O Grupo Caraça, encontra-se subdividido em duas formações subseqüentes (DORR II, 1969): Moeda, constituída por quartzitos finos a grosseiros e lentes de conglomerados e Batatal, constituída por filitos sericíticos e carbonosos. O Grupo Itabira está disposto sobre o Grupo Caraça em contato abrupto ou gradacional e é subdividido por Dorr (DORR II, 1969) em Formação Cauê (itabiritos, itabiritos dolomíticos e corpos de hematita) e Formação Gandarela (dolomitos, filitos e itabiritos dolomíticos).

Figura 8: Geologia da área da MAC, com a indicação das principais unidades presentes.

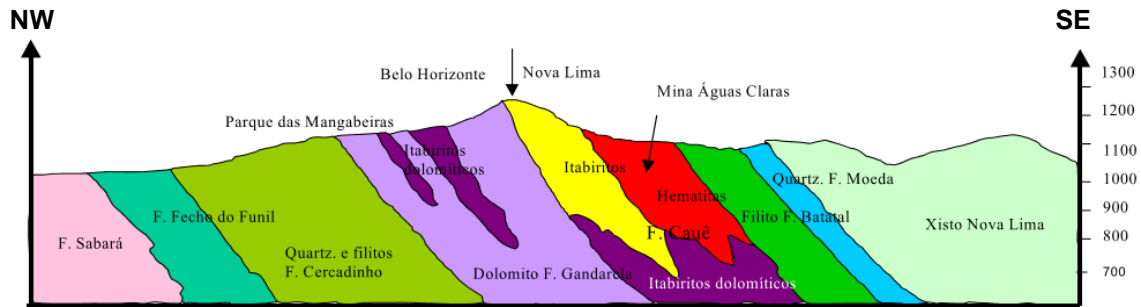


Fonte: Elaboração do autor. Geologia: Endo (2019).

De origem terciária/quaternária as cangas recobrem parcialmente a região. São formadas por fragmentos de itabirito e ou hematita cimentados por limonita. Sua espessura é variável, desde alguns centímetros até alguns metros. Já os depósitos de fluxo de detritos são formados por areias, seixos e blocos de hematita, itabirito, canga, dolomitos, quartzito e filito, geralmente cimentados por limonita. Esses depósitos ocupam o talvegue das principais drenagens da Serra do Curral, sendo muitas vezes confundidos com os depósitos de canga.

Do ponto de vista estrutural, a Serra do Curral apresenta-se como um extenso homoclinal invertido, ou seja, com as sequências mais antigas sobrepostas às mais novas (Figura 9). A foliação corresponde a um plano orientado na direção N52E, mergulhando 42° para sudeste. Ocorrem zonas de transcorrências de extensão decamétricas, geralmente paralelas à foliação e em alguns casos com zonas de brechação. Regionalmente também são observados falhamentos de alto ângulo com rejeitos na horizontal e zona de brechação associada. Estes são geralmente ortogonais à foliação.

Figura 9: Seção geológica esquemática da Serra do Curral, com indicação do mergulho das camadas.

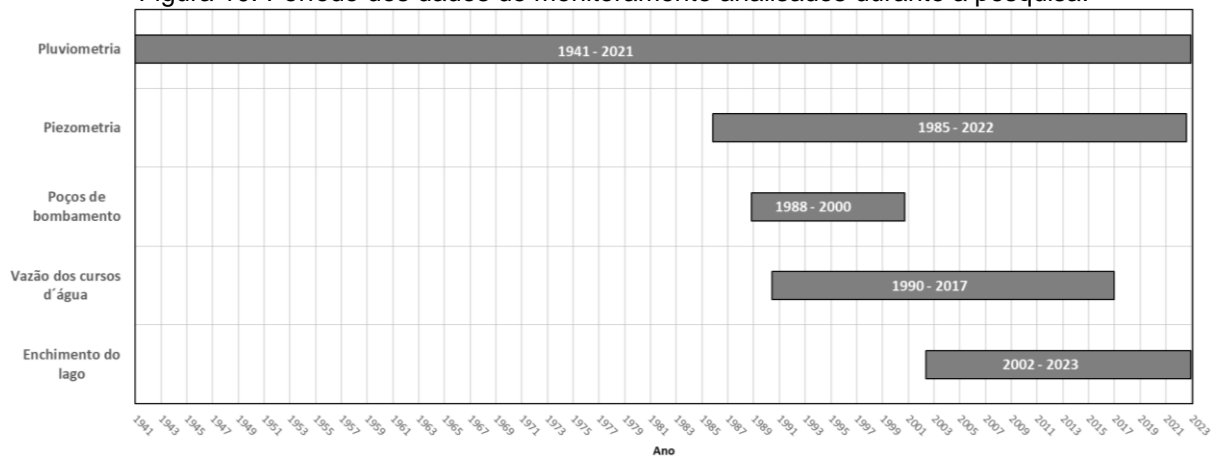


Fonte: Grandchamp (2003).

2.4 Monitoramento

Na área de estudo existem dados disponíveis desde 1941 (pluviometria), porém os dados específicos da mina começam em meados da década de 1980 (Figura 10). O monitoramento deste trabalho foi consolidado com os dados disponíveis até dezembro de 2022.

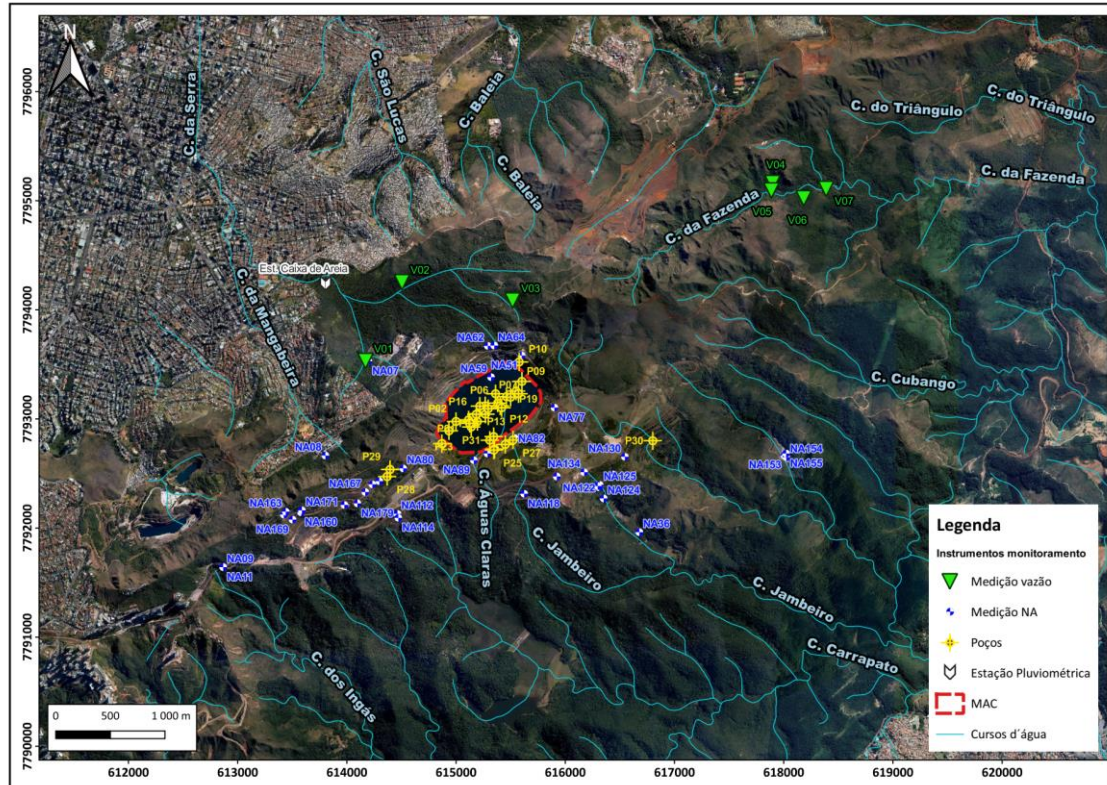
Figura 10: Período dos dados de monitoramento analisados durante a pesquisa.



Fonte: Elaboração do autor.

Os dados de monitoramento da área incluem pluviometria (um pluviômetro), piezometria (182 Pzs e INAs), vazão de cursos d'água (22 vertedouros) e poços de bombeamento (27 poços tubulares), num total de 232 pontos de controle (Figura 11). Para fins de simplificação da imagem, o nome dos instrumentos foi reduzido a um código. No Apêndice A é apresentada a correlação desse código com os nomes corretos dos instrumentos, conforme serão trabalhados nas análises a seguir.

Figura 11: Localização dos pontos de monitoramento na área da MAC que foram utilizados durante a pesquisa



Fonte: Elaboração do autor.

2.4.1 Pluviometria

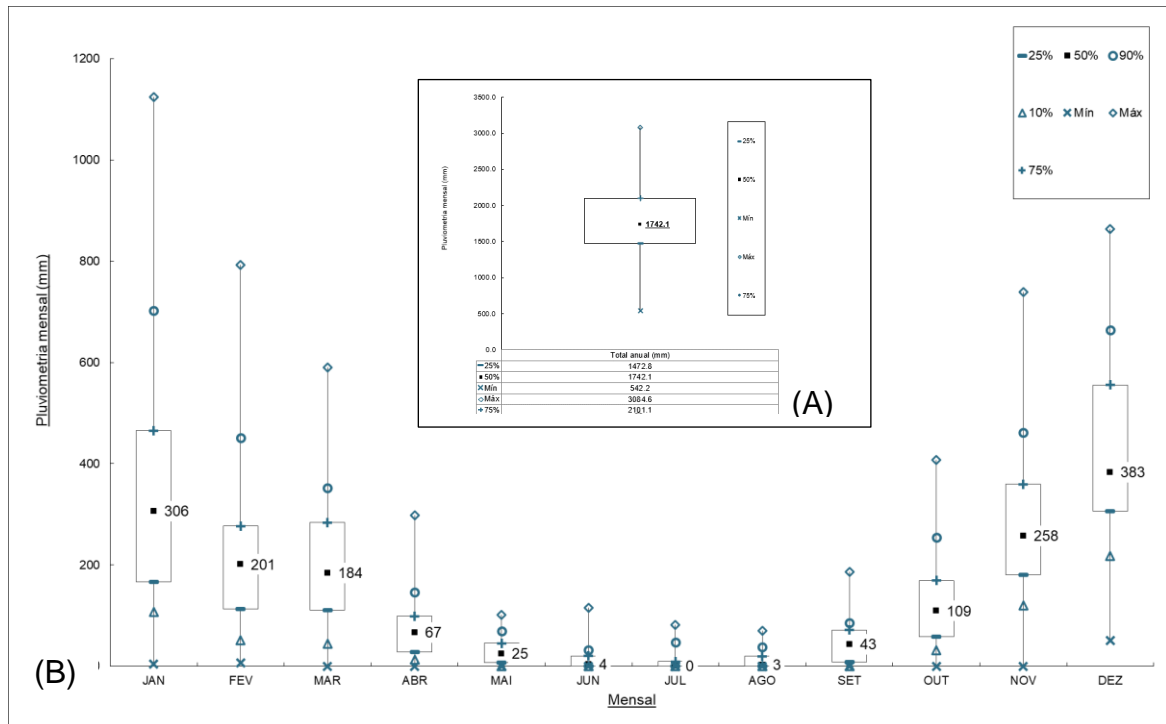
Na área de estudo, o registro de precipitação mais extenso, desde dezembro de 1940, é dado pela estação denominada Caixa de Areia (código 01943022 – coord. UTM 613803, 7794240), pertencente à Agência Nacional das Águas (ANA), e operada pelo Serviço Geológico do Brasil CPRM⁵. A tabela do Apêndice B apresenta os dados de monitoramento da precipitação mensal na área em estudo, com médias, medianas, mínimas e máximas mensais, ressaltando que essas estatísticas foram calculadas com base apenas nos anos hidrológicos e sequências completos. Na referida tabela são destacados os registros *outliers*.

A Figura 12 apresenta uma síntese da precipitação plurianual (A), e dos valores mensais (B). Com uma mediana de 1742 mm/ano, a chuva na região da MAC

⁵ Para completar eventuais falhas no registro de leituras da estação Caixa de Areia, foram utilizadas medições realizadas em uma estação do INMET, localizada na região central de Belo Horizonte, (estação Raja Gabaglia 83587).

apresenta dois períodos distintos, um chuvoso de outubro a março, e um seco, de abril a setembro.

Figura 12: Análise dos dados de chuva da estação Caixa de Areia, que serve como referência ao estudo. Com uma mediana plurianual de 1742 mm, a chuva acontece principalmente entre os meses de outubro a março, como é possível observar pelas medianas mensais.



Fonte: Elaboração do autor.

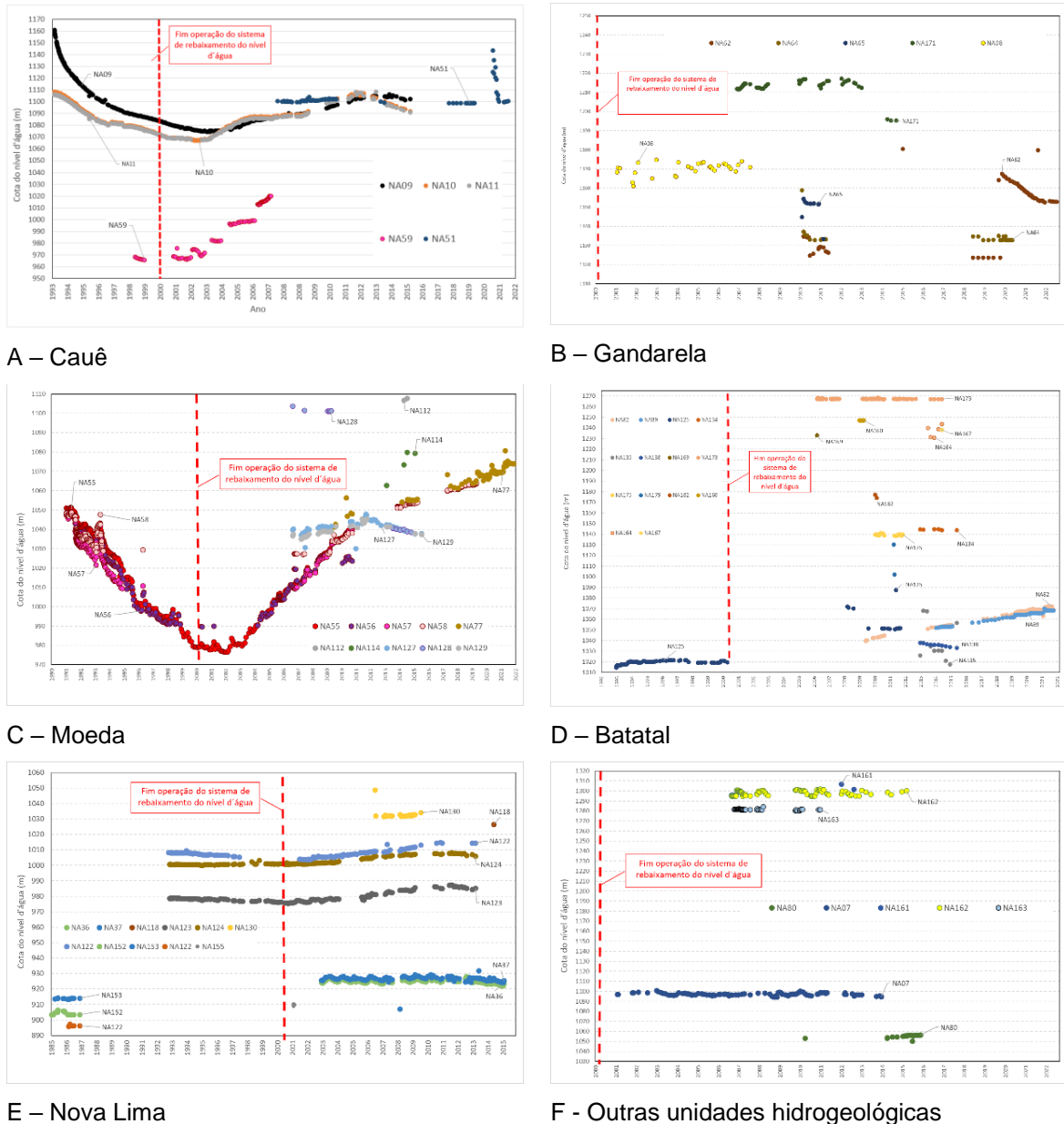
2.4.2 Piezometria

A região da Mina de Águas Claras possui cadastro de 170 instrumentos de monitoramento do nível d'água subterrânea, sendo 129 piezômetros (PZs) e 41 indicadores de nível d'água (INAs). Dentre estes, 25 PZs e 5 INAs não possuem registros de nível d'água. Os demais (140) possuem ao menos um dado registrado. Muitos instrumentos possuem série de dados muito curta devido a condições adversas (instrumento danificado, seco, sem acesso, e/ou destruído). A Figura 11 apresenta a localização dos instrumentos de monitoramento do nível d'água.

Desse total, 50 instrumentos apresentam informação de nível d'água do substrato geológico natural da área. Uma divisão desses instrumentos foi feita com base no tipo de litologia que monitoram (Figura 13). Essa distinção foi realizada através da consolidação de dados contidos nas planilhas originais, furos de sondagem e o

modelo geológico da MAC (Apêndice A). A Figura 13 apresenta a evolução do nível d'água de todos os instrumentos presentes na área em estudo, que apresentam registros entre os anos de 1985 e 2022, separados por litologia.

Figura 13: Evolução dos níveis d'água de todos os instrumentos de monitoramento do nível d'água da MAC, separados por tipo de litologia.



Fonte: Elaboração do autor.

A maior parte dos dados de monitoramento do nível d'água é iniciado após outubro de 1991, aproximadamente 3 anos depois do início da operação do sistema de rebaixamento.

Um total de 46 instrumentos foi responsável pelo monitoramento do nível d'água na região da Formação Cauê, cujos dados mais antigos datam de março de 1993, 5 anos após o início da operação dos poços de rebaixamento (1988). Desses, cinco instrumentos possuem registro das leituras. O nível d'água nos instrumentos mantém a tendência de rebaixamento do nível d'água por mais 2 anos, aproximadamente, após o bombeamento dos poços ter sido interrompido, o que é explicado pelo reequilíbrio das cargas hidráulicas do aquífero, em especial na cava.

O instrumento com registro dos dados mais completo para a Formação Cauê é o multicâmara NA-09/NA-10/NA-11 (Figura 13 – A), localizados na cabeceira do Córrego dos Ingás. Esses instrumentos apresentam-se influenciados tanto pelo desaguamento da mina, evidenciado no gráfico entre os anos de 1991 e 2001 (aprox. 90 metros de rebaixamento – NA-09), quanto pelo processo de recuperação do nível d'água subterrâneo, notado entre os anos de 2002 e 2013 (aprox. 30 metros de recuperação – NA-09). A partir desse ano, os instrumentos voltam a apresentar tendência de rebaixamento do nível d'água, que deve estar associado à recessão hídrica que a região sudeste passou nesse período (2012-2015), uma vez que não havia mais poços de bombeamento ativos na mina.

Importante notar como alguns instrumentos também associados à Formação Cauê, como o NA61 (Figura 13 – A), que, mesmo próximo à cava, não se apresentem sensibilizados pela elevação do nível d'água do lago. Possivelmente a causa está no fato de ser uma região de itabiritos dolomíticos menos permeáveis.

Diferentemente da Formação Cauê, os instrumentos da Formação Gandarela não são sensibilizados pelo rebaixamento do nível d'água da cava da MAC (Figura 13 – B). Tal comportamento relaciona-se ao fato de a Formação Gandarela ser constituída por dolomitos, que são rochas pouco permeáveis.

Devido à sua proximidade com a cava, bem como pelo fato de também existirem poços de bombeamento nos quartzitos da Formação Moeda, parte dos instrumentos dessa unidade também apresentam rebaixamento do nível d'água (Figura 13 – C). O piezômetro multicâmara NA55/NA56/NA57/NA58 é o instrumento com maior registro de dados para a Formação Moeda, com leituras de outubro de 1991 a dezembro de 2015.

Ainda que conte com 23 instrumentos monitorando o nível d'água na Formação Batatal, os dados de nível d'água dessa unidade são esparsos e pouco consistentes (Figura 13 – D). Assim como ocorre na Formação Gandarela, os filitos da Formação Batatal também não são sensibilizados pelo sistema de rebaixamento do nível d'água.

Formado por xistos impermeáveis, o Grupo Nova Lima possui 12 instrumentos que monitoram o nível d'água. Nenhum deles é sensibilizado pelo rebaixamento do nível d'água (Figura 13 – E). O Grupo Nova Lima representa uma condição de contorno e limite para o fluxo de água subterrânea na área da MAC.

Com uma menor quantidade de instrumentos, os piezômetros e medidores de nível d'água da Formação Cercadinho e unidades de cobertura (canga, lateritas, solo) foram reunidos. A Figura 13: – F apresenta a evolução do nível d'água para o único instrumento que monitora a Formação Cercadinho (NA07) e os instrumentos da cobertura.

A Figura 13 – G apresenta a evolução do nível d'água para os instrumentos que monitoram o nível d'água nas pilhas de estéril. Observa-se que os dados disponíveis são apenas do período pós-fim operação do sistema de rebaixamento do nível d'água.

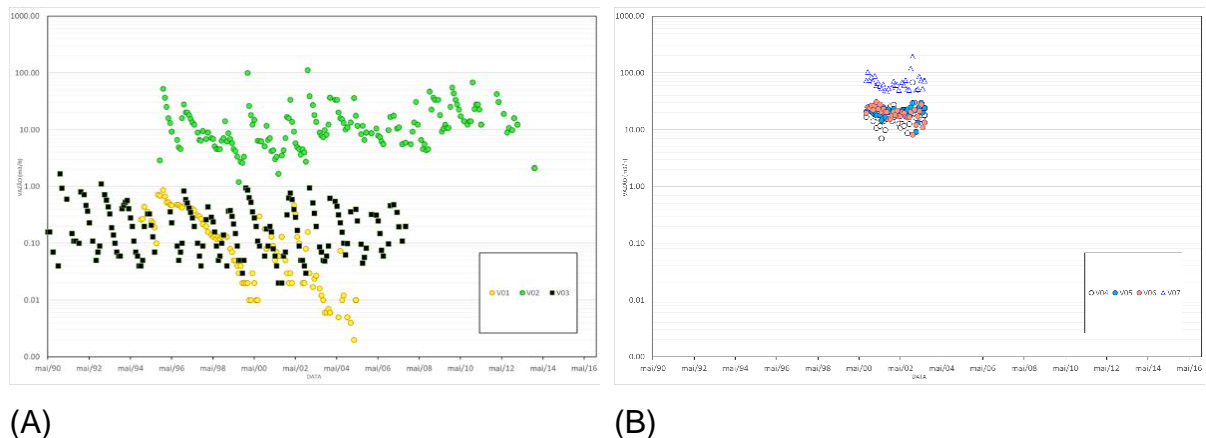
2.4.3 Vazões dos cursos d'água

A VALE possui um cadastro com 26 pontos de medições de vazão no entorno da Mina de Águas Claras. Contudo, apenas seis possuem dados sobre as vazões de cursos d'água naturais que não sofreram interferência antrópica, seja por barragens ou pilhas de estéril. A Figura 14 apresenta o resultado geral da evolução das vazões medidas pelos instrumentos dos córregos e nascentes.

Ao analisar sob o olhar de descarga das unidades aquíferas, as vazões do Córrego Fazenda representam a saída do Aquífero Cauê no extremo nordeste da área de estudo, chegando a vazões entre 50 e 60 m³/h (V07). Os instrumentos no Parque das Mangabeiras indicam vazões de saída do Aquífero Cercadinho (aproximadamente 10 m³/h), separado hidráulicamente do Aquífero Cauê pelos dolomitos do Aquitardo Gandarela.

A maioria dos pontos de monitoramento mostra oscilações associadas apenas à variação sazonal, e parece não terem sido influenciados pelo desaguamento da cava da Mina de Águas Claras. Apenas o ponto V01, na região do Parque das Mangabeiras, apresenta redução de suas vazões, o que, provavelmente, também não está associado ao rebaixamento do nível d'água, em função da localização do ponto, contexto hidrogeológico (Formação Gandarela, que não é sensibilizado pelo rebaixamento ou recuperação do nível d'água - Figura 13 – B) e pelo fato de que a tendência de diminuição da vazão continua mesmo após o encerramento do bombeamento. Mesmo quando analisamos os dados de monitoramento do nível d'água, já é observada a recuperação do nível d'água em 2003, até em pontos mais distantes da cava, como o piezômetro NA09.

Figura 14: Evolução da vazão nos pontos de monitoramento dos córregos da área de estudo. (A) Parque das Mangabeiras e (B) Córrego Fazenda.



Fonte: Elaboração do autor.

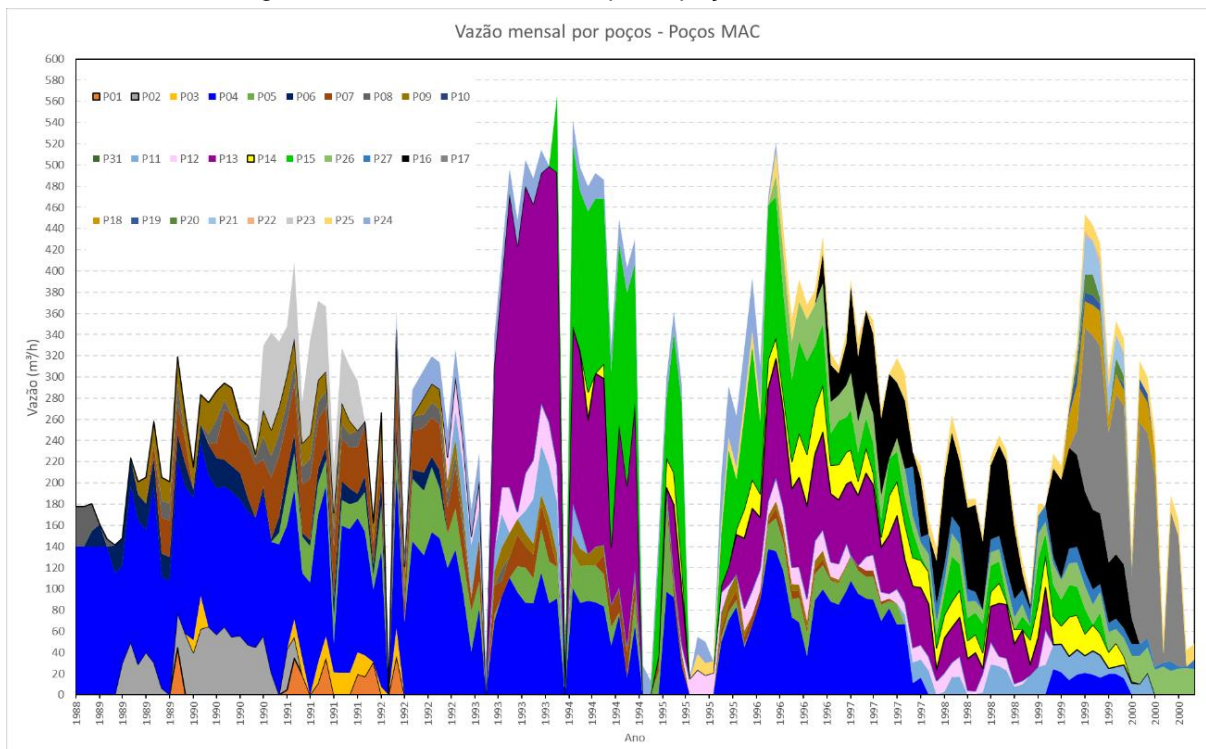
2.4.4 Poços de bombeamento

Na região da MAC, um total de 32 poços de bombeamento operaram de 1988 a 2000 (Figura 10). Sobre o Aquífero Cauê foram instalados 23 poços, enquanto os outros 9 poços foram perfurados no Aquífero Moeda (Figura 11).

Foram bombeados 27 Mm³ (27.000.000 m³) de água, permitindo o rebaixamento total de cerca de 275 metros (entre as elevações 1165 e 890 metros), representando uma taxa de rebaixamento de aproximadamente 21 m/ano e um volume de mais de 90 mil metros cúbicos de água por metro rebaixado.

Em todo o período de operação do sistema de rebaixamento, foi explotada uma vazão total média de 278 m³/h. Importante notar que com a operação do sistema de rebaixamento do nível d'água da MAC, o fluxo de água subterrânea se alterou, passando a convergir para a cava onde, devido à área de interferência gerada pelos poços de bombeamento, as cargas hidráulicas são mais baixas. A vazão máxima do sistema de rebaixamento foi alcançada em dezembro de 1993 quando os poços bombearam cerca de 565 m³/h. A Figura 15 mostra a evolução gráfica do bombeamento realizado na MAC para os poços destinados ao rebaixamento do nível d'água.

Figura 15: Vazões bombeadas pelos poços tubulares da MAC.



Fonte: Elaboração do autor.

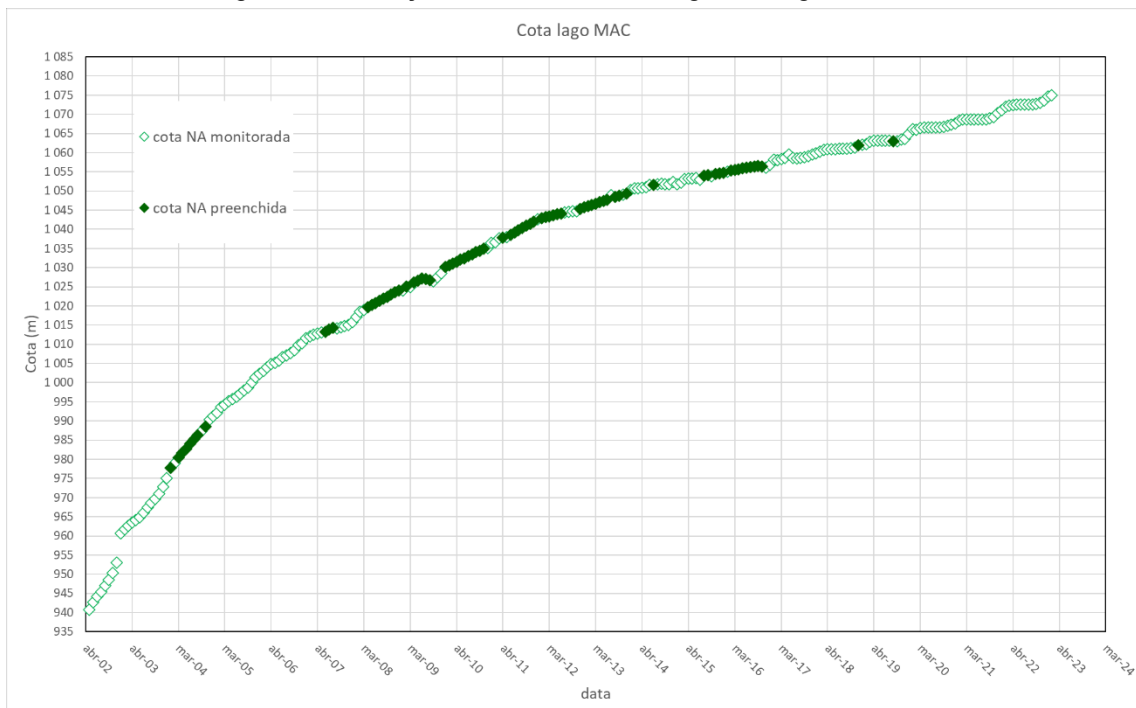
Com uma vazão de produção oscilando entre 300 m³/h e 600 m³/h, de 1989 a 1993 o nível d'água da cava da mina foi rebaixado da cota 1113 metros para a cota 1020 metros, sendo que, no referido período, a produção de água subterrânea atingiu o valor de 8,5 milhões de metros cúbicos (BERTACHINI, 1994). Ressalta-se que não existem registros de monitoramento do bombeamento nos poços instalados no Aquífero Moeda. No entanto, em outubro de 2000 estes poços explotaram cerca de

30208.50 m³ de água, o que representa uma vazão global de aproximadamente 40 m³/h.

2.4.5 Nível d'água do lago

O monitoramento da elevação do nível d'água na cava da mina foi iniciado em agosto de 2001. O controle da cota do lago foi executado diariamente, geralmente às oito horas da manhã, até o mês de outubro de 2002, quando então esse controle passou a ser semanal (GRANDCHAMP, 2003), e até maio de 2007, quando passou a ser mensal. Na Figura 16, encontra-se apresentada a evolução do monitoramento da cota do nível d'água da cava. Para aqueles períodos sem monitoramento, foi realizado um preenchimento de dados com base na curva de enchimento, tomados manualmente pela tendência da curva.

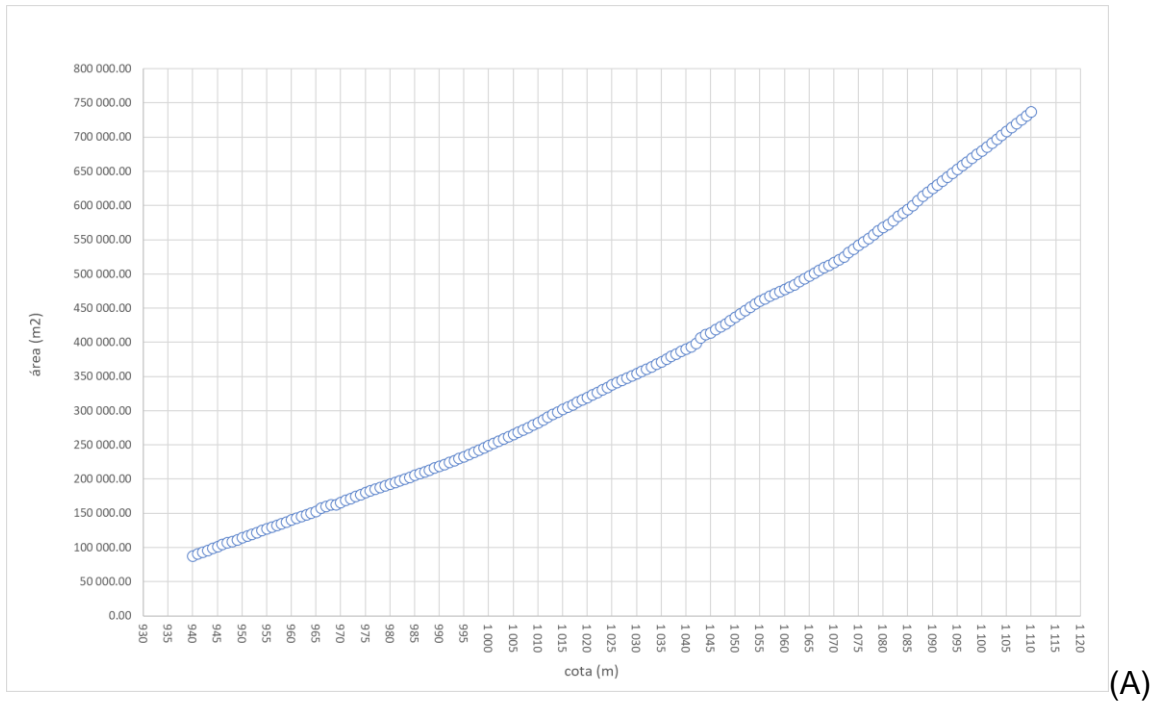
Figura 16: Evolução da cota do nível d'água do lago da cava.



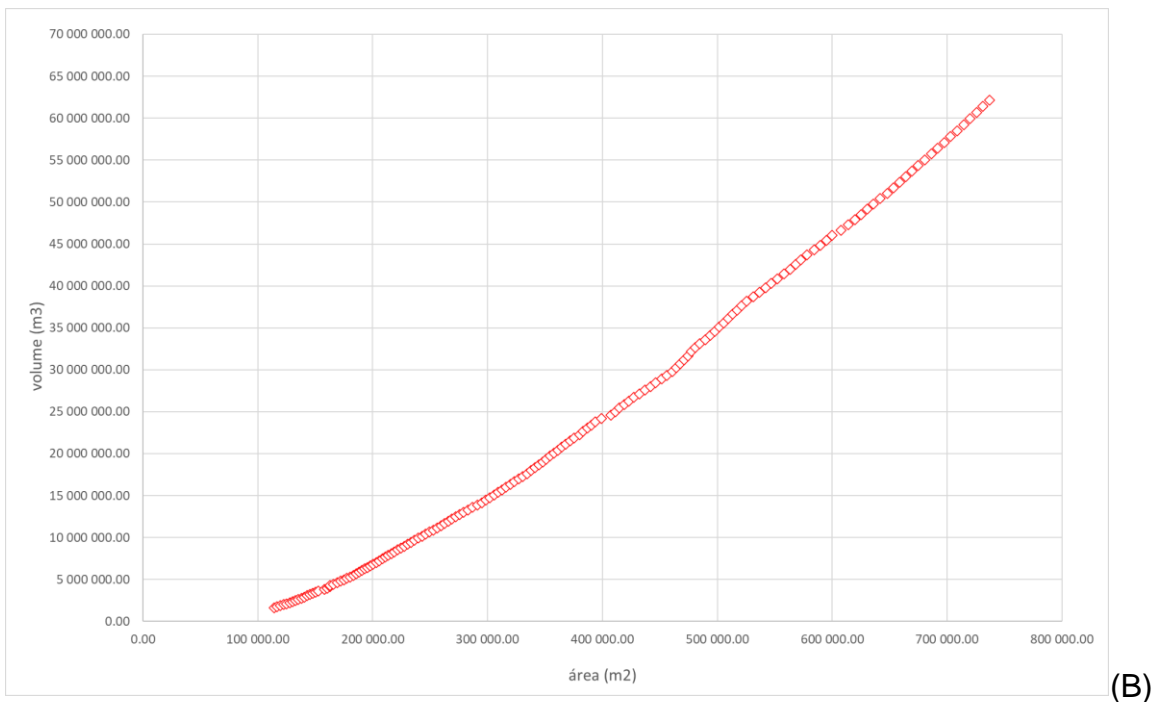
Fonte: Elaboração do autor.

Análise batimétrica realizada pela empresa proprietária da MAC apresenta a relação entre cota, área do espelho do lago e volume acumulado, como está indicado na Figura 17.

Figura 17: Relação entre a cota do nível d'água, área do espelho d'água (A) e volume de água acumulada (B).



(A)



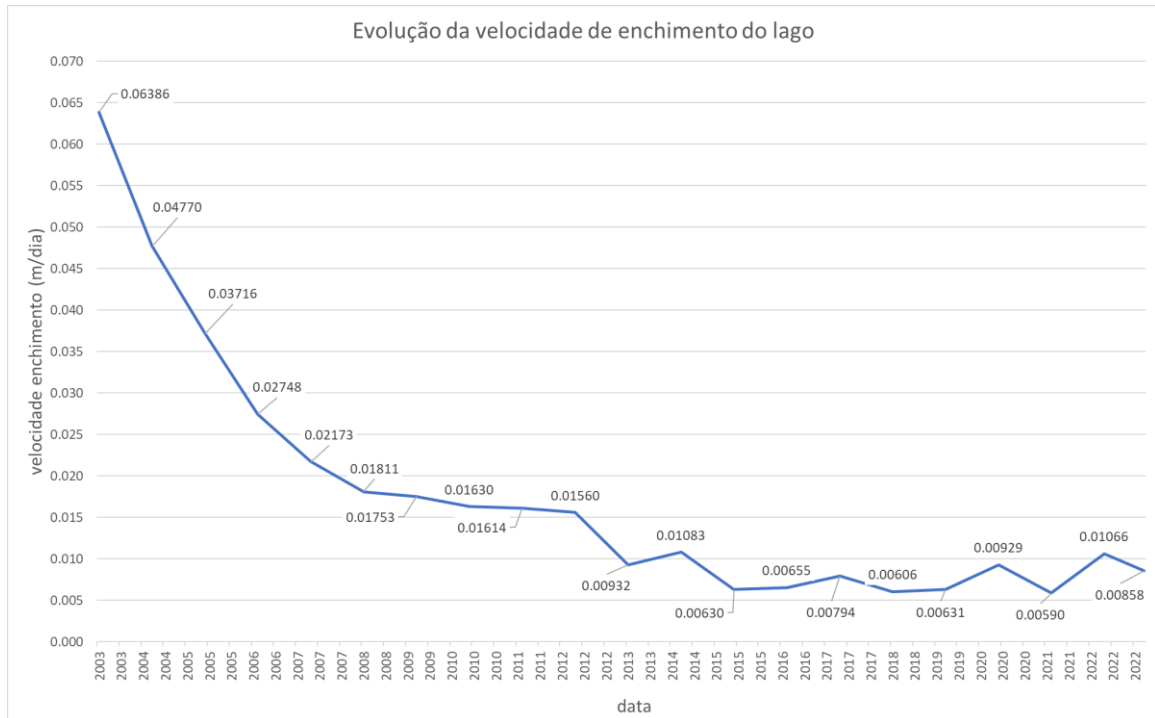
(B)

Fonte: Elaboração do autor.

Baseada na evolução do nível d'água do lago, a taxa máxima de enchimento pôde ser observada no ano de 2003 (aproximadamente 6 cm/dia), e desde então nota-se uma redução gradual, até uma estabilização em torno de 1 cm/dia (Figura 18). Esse

comportamento é esperado, uma vez que devido ao formato de um cone invertido da cava, à medida que se eleva o lago, é necessário um volume maior de água para elevar a cota em 1 metro.

Figura 18: Taxa média anual de enchimento do lago.



Fonte: Elaboração do autor.

2.5 Balanço hidrológico

Os dados apresentados anteriormente permitiram analisar o balanço hidrológico do lago da MAC, com o cálculo das componentes que contribuem com a formação do lago, a saber:

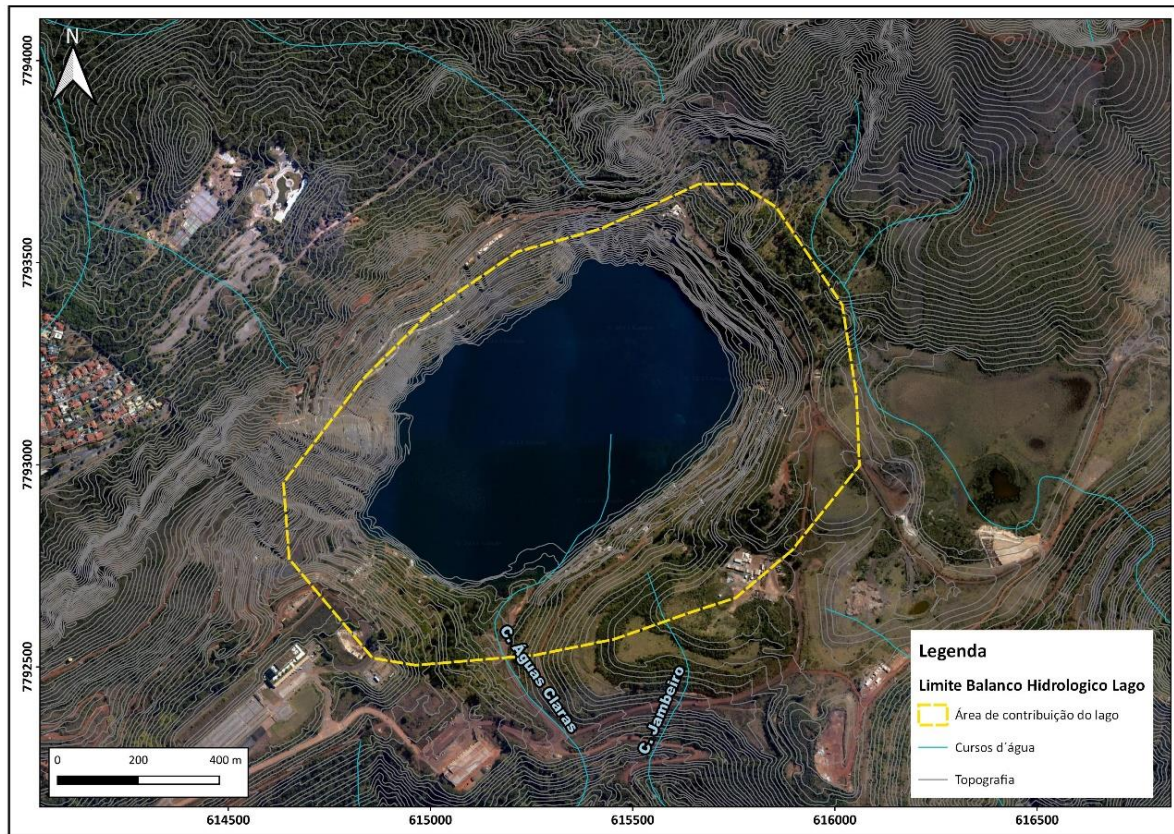
- Entradas: Chuva direta (P), Escoamento superficial (Pe), Bombeamento Ribeirão do Prata (B), Escoamento Subterrâneo (Esub);
- Saídas: Evaporação (Ev).

Para o cálculo da vazão de chuva direta, utilizou-se a área do espelho d'água do lago (Figura 17 – A), multiplicada pelo monitoramento de chuva (total mensal) da estação Caixa de Areia (Figura 12).

O escoamento superficial foi obtido com uso do método racional (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988) para extrapolação dessa componente (em m³/s) a partir da chuva (mm/h) e área de contribuição (ha), relacionadas por uma constante C (adimensional), definida como coeficiente de escoamento, que é uma função do tipo de terreno (Equação 7). A área de contribuição ao lago foi calculada em 1.186.356,90m², 1,19 km² ou 118,64 ha (Figura 19), definida manualmente tomando por base a topografia no entorno do lago. Em virtude da elevação do nível d'água, a cada mês, foi reduzida a área do espelho d'água. Foi utilizado um coeficiente de escoamento de 0,49, representando terrenos naturais, com pouca cobertura vegetal e inclinação do terreno superior a 7%.

$$Q = \frac{(C * i * A)}{360} \quad \text{(Equação 7)}$$

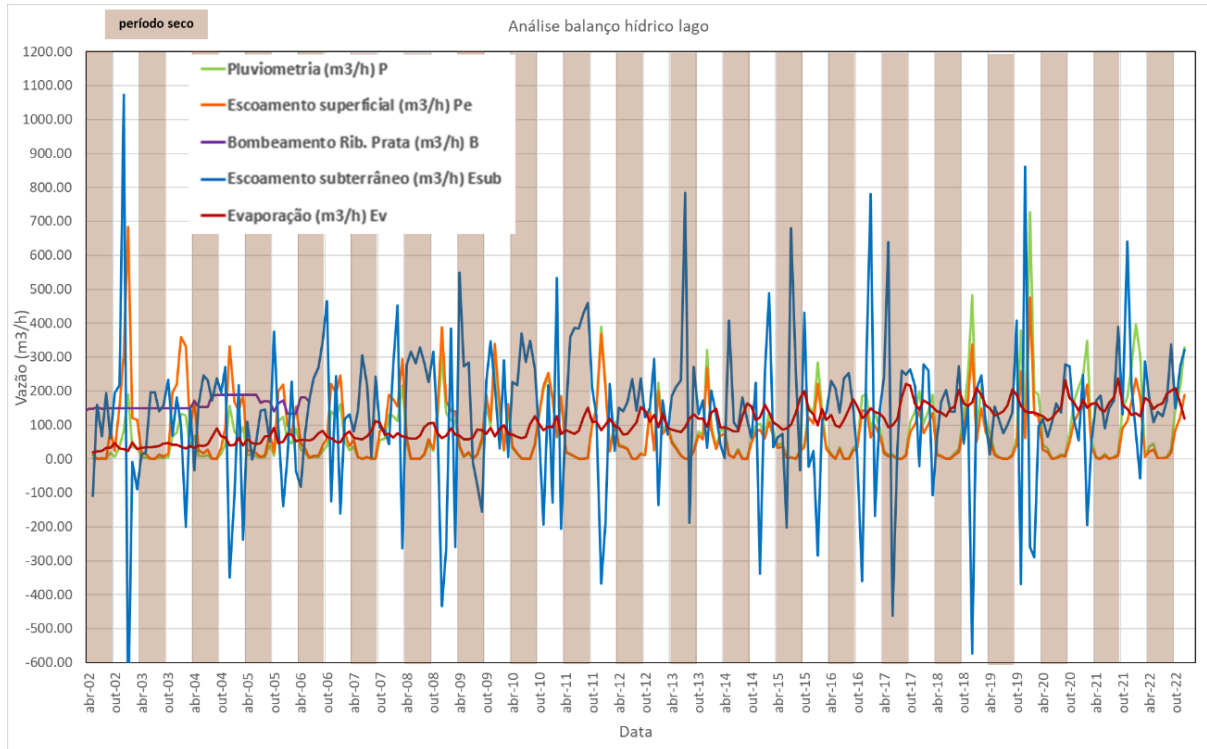
Figura 19: Área de contribuição de escoamento superficial ao lago.



Fonte: Elaboração do autor.

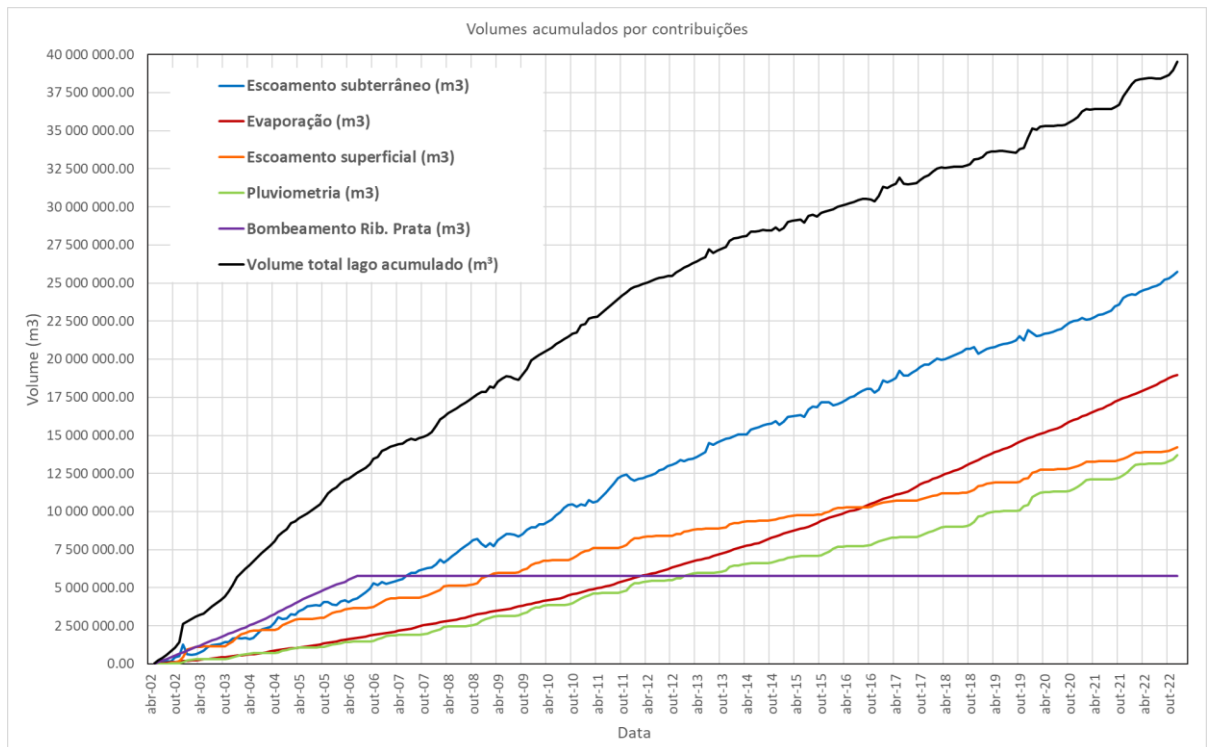
Uma fonte externa de contribuição ao lago foi utilizada entre 2002 e 2006, sendo a água captada no Ribeirão do Prata bombeada direto para o lago a uma taxa de cerca de $220 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figura 20), bombeada 16 horas por dia, segundo Grandchamp (2003).

Figura 21: Evolução das vazões de contribuição ao enchimento do lago, calculadas para cada componente do ciclo hidrogeológico, com a separação de períodos chuvosos (em branco) e secos (marrom).



Fonte: Elaboração do autor.

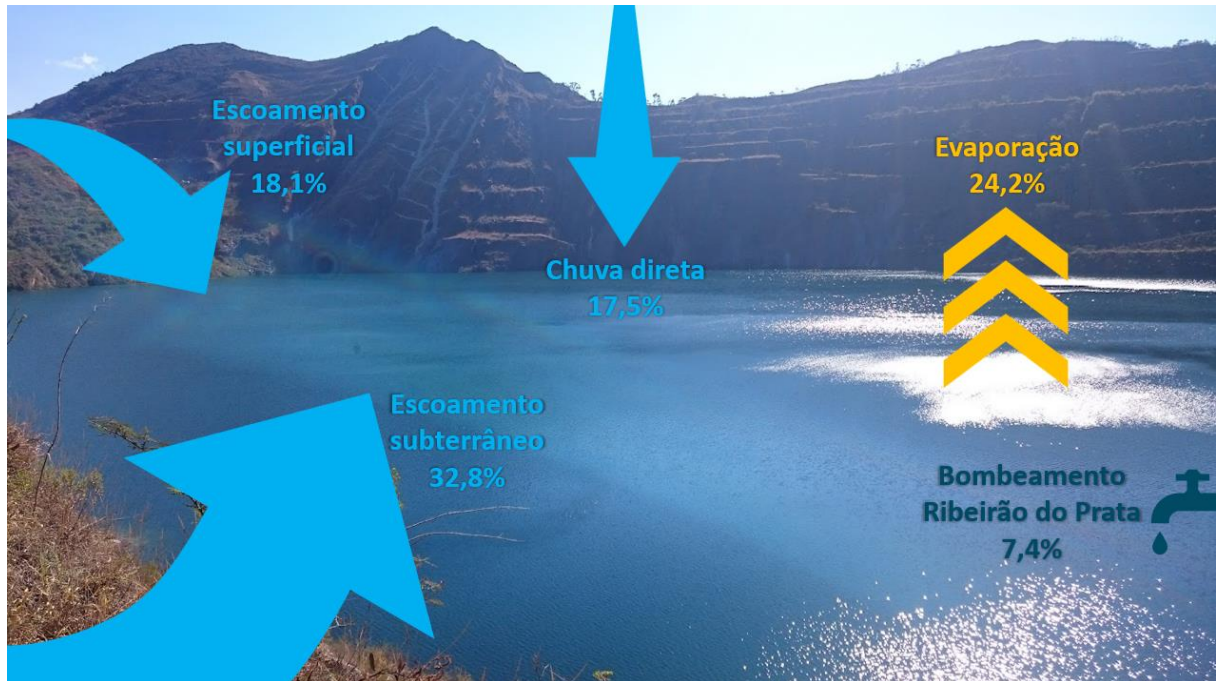
Figura 22: Volumes acumulados no lago da MAC a partir da contribuição de cada componente do ciclo hidrológico.



Fonte: Elaboração do autor.

A partir dos volumes acumulados foi possível chegar à porcentagem de relevância de cada componente dentro do balanço hidrológico final, como apresentado na Figura 23.

Figura 23: Balanço geral segundo as taxas de contribuição de cada componente do ciclo hidrológico.



Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados obtidos no presente estudo apresentam certa aderência aos resultados encontrados por Grandchamp (2003) (Tabela 1), que mostrou que do total de água acumulada na cava até dezembro de 2002, cerca de 63% foi proveniente do aporte de água subterrânea, 20% do escoamento superficial, 12% de aporte decorrente da água captada no Ribeirão do Prata (entre 2002 e 2006), e 5% devido à precipitação direta.

Tabela 1: Comparação entre os resultados do balanço hidrológico levando em consideração os resultados calculados no presente estudo e aqueles obtidos por Grandchamp (2003).

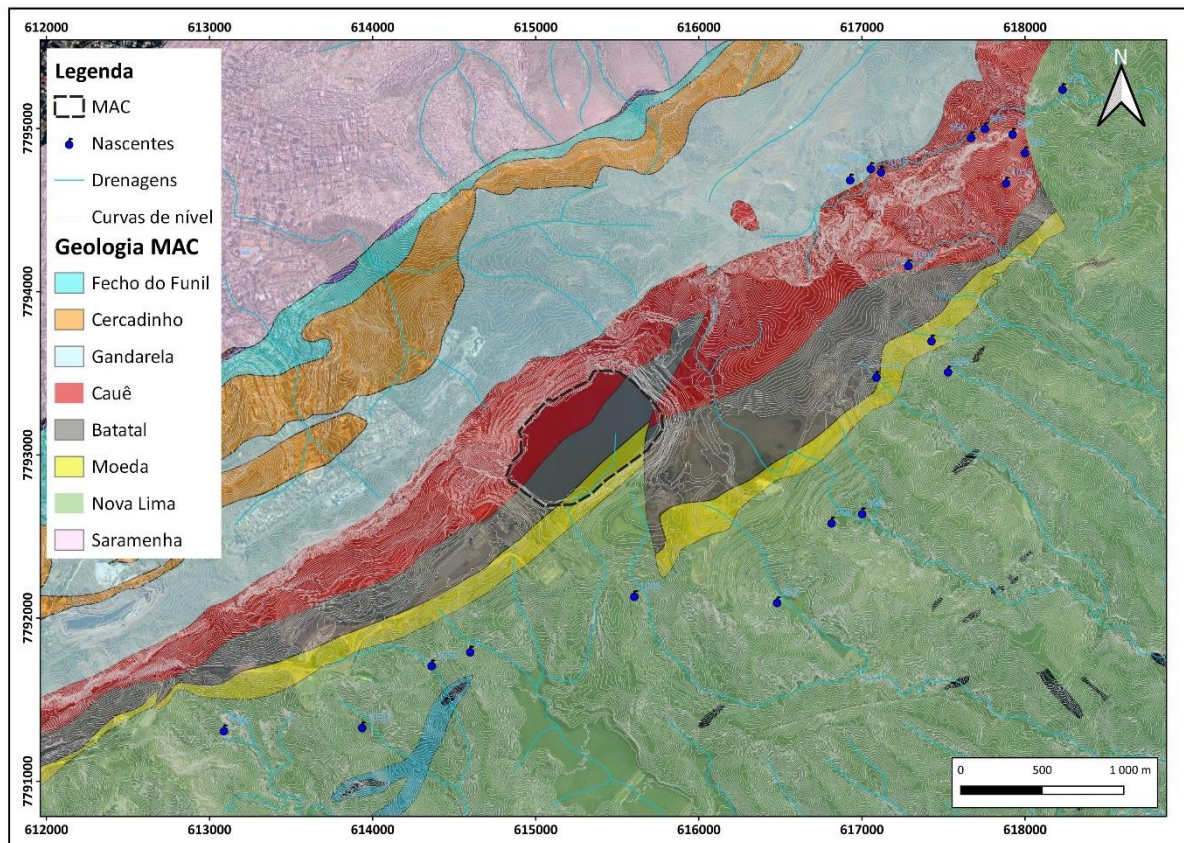
Componente balanço hidrológico	Pereira (2024)	Grandchamp (2003)
Bombeamento Rib. do Prata	10%	12%
Pluviometria	23%	5%
Escoamento superficial	24%	20%
Escoamento subterrâneo	43%	63%

Fonte: Elaboração do autor.

2.6 Caracterização hidrogeológica

Na área de estudo, o principal aquífero é o denominado Aquífero Cauê (BERTACHINI, 1994; MOURÃO, 2007), formado por, segundo Grandchamp (2003), itabiritos e hematitas da Formação Cauê. A Formação Cauê compreende a unidade hidrogeológica na qual ocorria a lavra do minério de ferro da antiga Mina de Águas Claras (Figura 24).

Figura 24: Contextualização geológica da área em estudo.



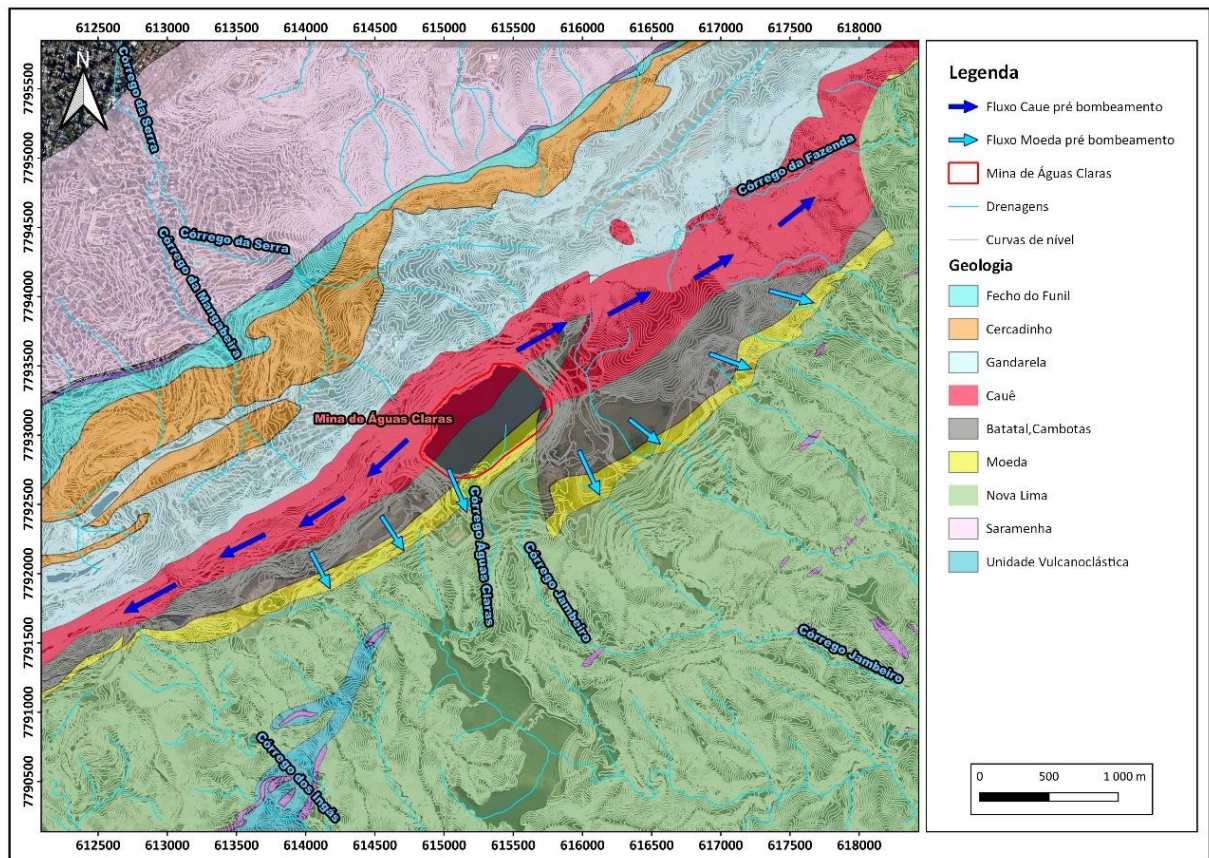
Fonte: Elaboração do autor. Geologia: Endo (2019).

As rochas do Aquífero Cauê formam um sistema aquífero confinado entre os filitos da formação Batatal (capa), itabiritos dolomíticos (lapa e porção nordeste da mina), itabiritos compactos (lapa) e dolomitos da formação Gandarela (lapa). O sistema aquífero é do tipo semiconfinado, heterogêneo e anisotrópico, com porosidade intersticial e de fraturas (BERTACHINI, 1994). A porosidade intersticial é decorrente da própria gênese do minério de ferro e está mais desenvolvida onde a lixiviação dos itabiritos dolomíticos foi mais intensa. Segundo Bertachini (1994), a lixiviação sobre as rochas do Aquífero Cauê é o principal responsável pelo desenvolvimento do minério friável de alto teor de ferro. Em determinações de laboratório foram encontrados valores da porosidade total das hematitas friáveis de até 50%, e ensaios em campo apresentaram valores para a porosidade eficaz na faixa de 10% a 15%. As hematitas compactas comportam-se como meio fraturado, com baixa capacidade de armazenamento, mas com elevada permeabilidade. O Aquífero Cauê encontra-se encaixado, ou limitado, por diferentes formações hidroestratigráficas, conforme apresentado na Figura 24.

Para as unidades hidrogeológicas presentes na área, a principal fonte de entrada de água se dá pela recarga originada pela taxa de infiltração efetiva das águas da chuva sobre o terreno, em toda a extensão da Serra do Curral.

O modelo conceitual aqui proposto estabelece que, devido à topografia local, a área da MAC opera como um divisor de águas subterrâneas, onde toda a água que aí infiltra migra parte para nordeste, em direção ao Córrego Fazenda, e parte flui para com sentido sudoeste, em direção ao Córrego Mutuca (Figura 25), mais à sudoeste da área do estudo e não presente na figura citada. Contudo, especificamente a respeito desse fluxo no limite sudoeste da área, à luz dos dados disponíveis, não é possível ser tão conclusivo quanto àquele que é definido no limite nordeste.

Figura 25: Sentido de fluxo de água subterrânea – pré-rebaixamento.



Fonte: Elaboração do autor. Geologia: Endo (2019).

Secundariamente, temos outras unidades aquíferas da área. No caso das coberturas de canga e laterita, o fluxo é unicamente descendente contribuindo com a recarga das unidades sotopostas. Para o Aquífero Moeda (quartzitos), a recarga se dá como no

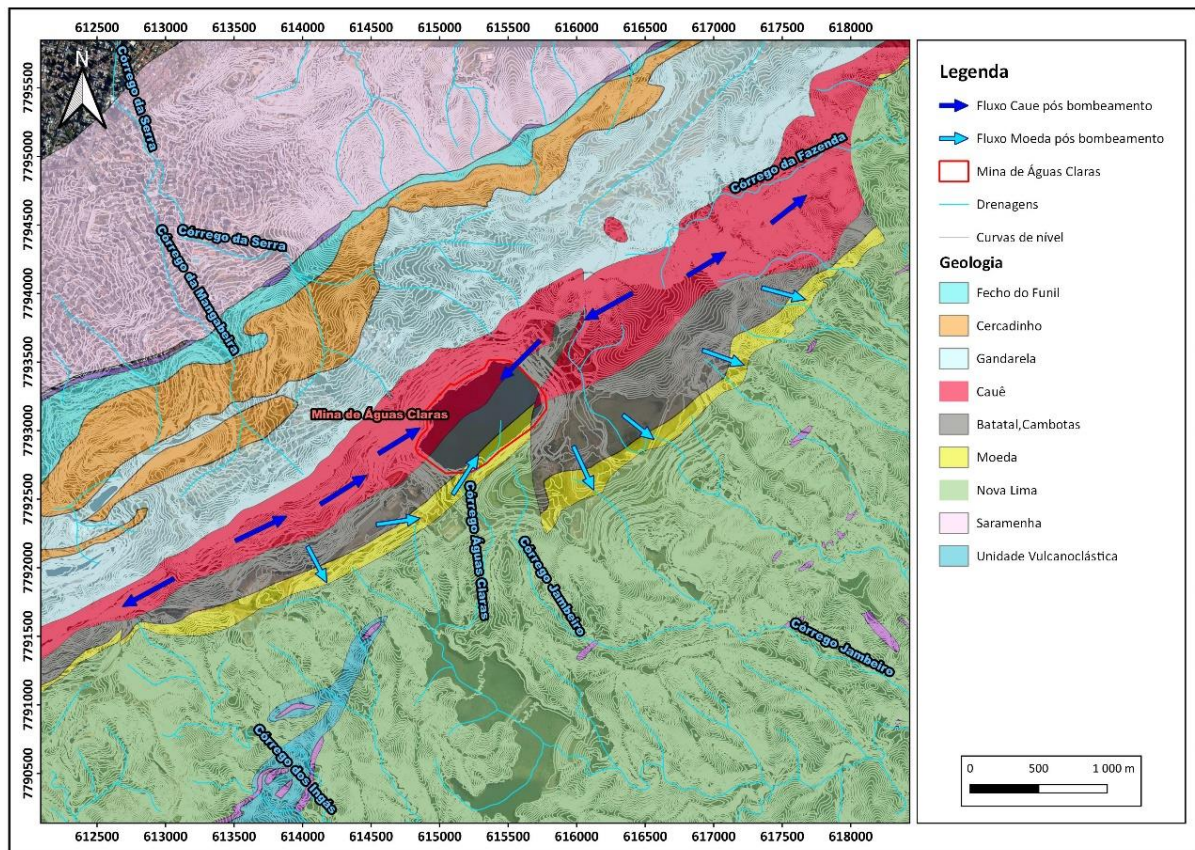
Aquífero Cauê, porém a descarga acontece nos córregos da face sudeste da Serra do Curral.

Mourão (2007) descreve o papel dos filitos da Formação Batatal, por sua baixa permeabilidade, como limitador ao fluxo de água subterrânea, favorecendo o acúmulo da água subterrânea nas litologias das unidades Cauê e Gandarela, caracterizando o mesmo como um aquífero (MAGALHÃES et al., 2022).

Ainda presentes na área podem ser apontados o Aquífero Gandarela, localmente carstificado e fissural, e o Aquífero Nova Lima, formado por xistos impermeáveis (MAGALHÃES et al., 2022).

Após 1988, quando se dá início à operação do sistema de rebaixamento do nível d'água, parte desse fluxo é invertido com sentido direcionado ao interior da cava da MAC (Figura 26), onde a cota do nível d'água rebaixado indica uma carga hidráulica mais baixa para o sistema aquífero, passando a ser área de descarga.

Figura 26: Sentido de fluxo de água subterrânea – pós-rebaixamento.



Fonte: Elaboração do autor. Geologia: Endo (2019).

Considerando as condições originais de fluxo de água subterrânea, em período anterior à implantação do sistema de rebaixamento do nível d'água da MAC, (GRANDCHAMP, 2003) considera que os principais pontos de descarga do Aquífero Cauê sejam:

- Córrego Fazenda e galerias de pesquisa, à nordeste da área de estudo;
- Córrego Águas Claras, na região central. Foi consumido em sua integralidade pela cava da mina
- Nascente da Água Quente, no Córrego da Mutuca, no extremo sudoeste da Serra do Curral. Esse ponto se encontra mais à sudoeste da área de estudo, indicando uma continuidade do fluxo da água subterrânea nesse sentido. Contudo, como já comentado, existem incertezas a respeito do sentido de fluxo nesse local.

A tabela do Apêndice E sintetiza as principais características das unidades hidrogeológicas da área de estudos.

2.7 Principais resultados

A seguir são resumidos os principais resultados da primeira parte do trabalho elaborado no âmbito desta pesquisa:

1. A MAC possui extenso registro de monitoramento, em especial, de pluviometria (de 1940 a 2022), de rebaixamento (de 1991 a 2000) e de recuperação de nível do lago (de 2000 a 2023) o que permitiu uma análise robusta do comportamento do sistema hidrogeológico local.
2. A interpretação a respeito da hidrogeologia da área da MAC é convergente com o que foi abordado em outros estudos sobre a hidrogeologia do Quadrilátero Ferrífero, confirmando o Aquífero Cauê como a principal unidade hidrogeológica local, além de confirmar seu isolamento hidráulico de outras unidades, como o Aquitardo Batatal.
3. O balanço hídrico calculado para o período de 2000 a 2022 do enchimento do lago permitiu calcular que a principal contribuição se dá pelo escoamento subterrâneo (43%), enquanto o escoamento superficial, chuva direta e o bombeamento realizado a partir do Ribeirão do Prata contribuem, respectivamente, com 24%, 23% e 10%. A evaporação representaria 24,2% em uma análise geral, onde ela fosse tomada como componente do balanço.

3 SENSIBILIDADE DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA HIDROGEOLÓGICA DA FORMAÇÃO DE LAGO EM CAVA: O CASO DA MINA DE ÁGUAS CLARAS

3.1 Introdução

A Mina de Águas Claras operou uma atividade de extração de minério de ferro sobre a Serra do Curral, entre os anos de 1971 e 2000. Ao final da operação da mina e, conseqüentemente do sistema de rebaixamento do nível d'água, que operou a partir de 1986, foi decidido, pela empresa proprietária, que na cava se formaria um lago, em detrimento a outros possíveis usos.

Tomando por base outras análises já realizadas para a área de estudo, como análise do balanço hidrológico e proposição de um modelo hidrogeológico conceitual⁶, foi desenvolvido um modelo numérico que permitisse o estudo do enchimento do lago da MAC. Para tal, por meio de simulações numéricas hidrogeológicas, são realizados diferentes testes referentes à representação da cava de mineração no modelo hidrogeológico e à calibração dos cenários, para se compreender o quão sensível são os resultados prospectivos relacionados aos parâmetros hidrodinâmicos, como condutividade hidráulica e armazenamento, e componentes do ciclo hidrológico que contribuem ao enchimento da cava.

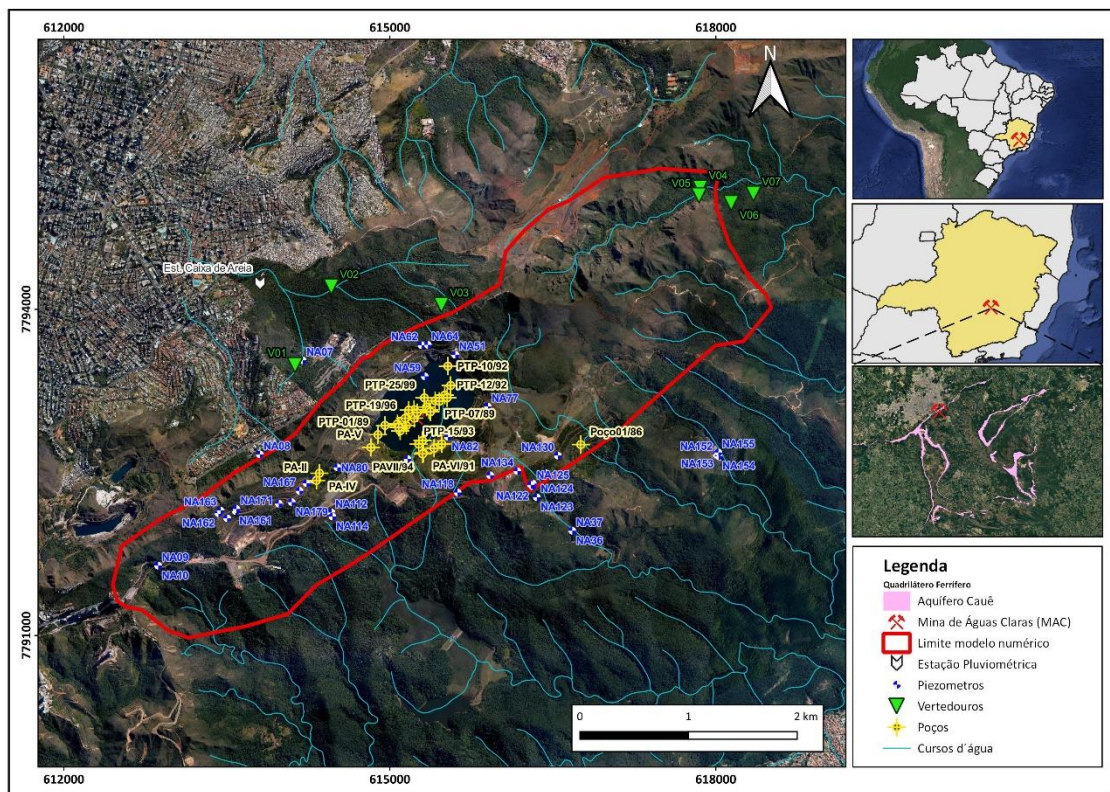
Os modelos são representações simplificadas do mundo real com o objetivo de entender seu comportamento, fundado em teorias relevantes e em hipóteses. Ou, como citado por Diersch (2014), “modelos são abstrações de sistemas reais”. Assim, são baseados em premissas e idealizações utilizadas para representar e destacar os principais processos em detrimento de outros secundários. Segundo autores, como Anderson et al. (2002), certas incertezas estão relacionadas a parâmetros hidrodinâmicos, como a condutividade hidráulica, que representam o vazio da cava. Por isso, compreender os fatores que influenciam a robustez dessas simulações é fundamental para subsidiar estudos futuros e auxiliar o planejamento pós-mineração.

⁶ Tais análises dizem respeito a outros estudos desenvolvidos no âmbito dessa própria pesquisa, como discutido no Artigo I ou Capítulo 2 dessa dissertação.

3.2 Modelo numérico hidrogeológico de fluxo

Na área de estudo, o principal aquífero é o denominado Aquífero Cauê, formado por, segundo Grandchamp (2003), itabiritos e hematitas da Formação Cauê (MOURÃO, 2007; MAGALHÃES et al., 2022; ANDRADE, 2023). A tabela do Apêndice E apresenta os parâmetros hidrogeológicos associados às unidades hidrogeológicas da área de estudos. Baseando-se nos limites estabelecidos pela hidrogeologia da área do estudo (Figura 27), o modelo numérico de fluxo de água subterrânea foi definido para uma área de aproximadamente 10 km², que compreende as principais unidades hidrogeológicas locais, bem como os principais pontos de descarga do sistema aquífero.

Figura 27: Limite definido para o modelo numérico da MAC e instrumentos de monitoramento. Nas imagens menores é possível observar a contextualização geográfica da MAC sobre os mapas do Brasil, Minas Gerais e Quadrilátero Ferrífero.

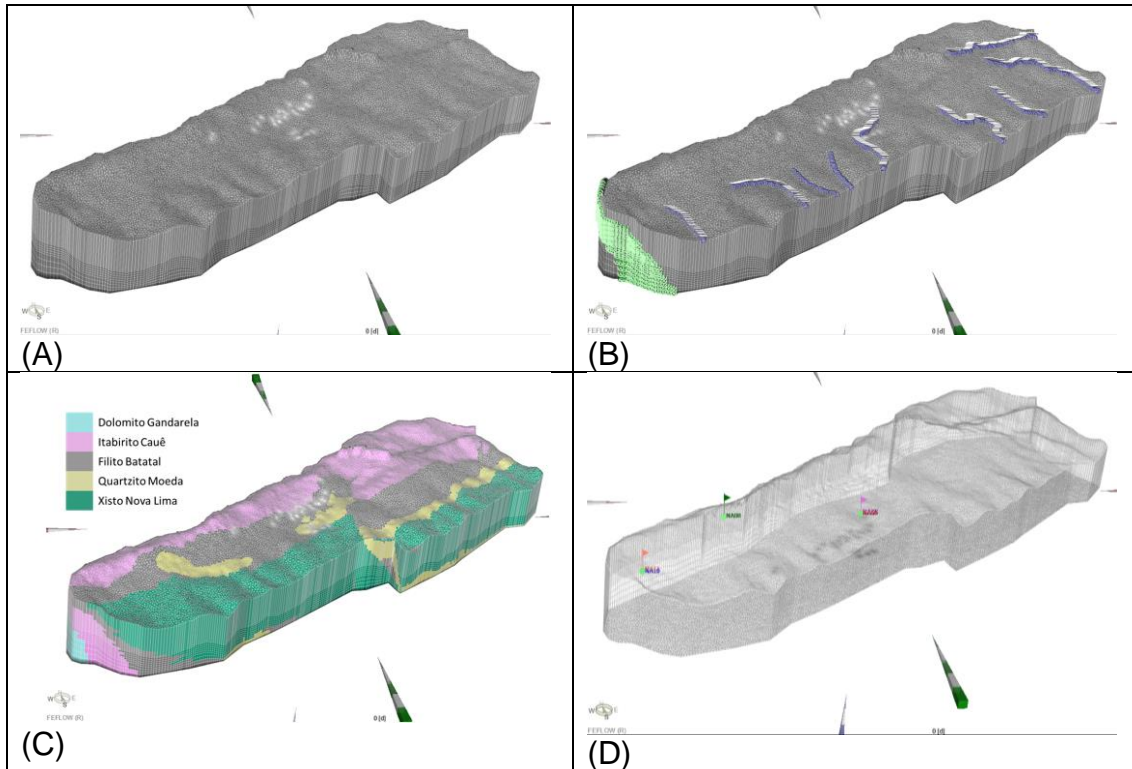


Fonte: Elaboração do autor.

O modelo numérico de fluxo de água subterrânea da MAC foi desenvolvido com uso do programa FEFLOW (TREFRY; MUFFELS, 2007). O modelo geológico utilizado (Figura 28) foi obtido com base no modelo conceitual apresentado no Capítulo 2. A

descrição das características do modelo, como a malha, parâmetros e condições de contorno, são apresentados no Apêndice F.

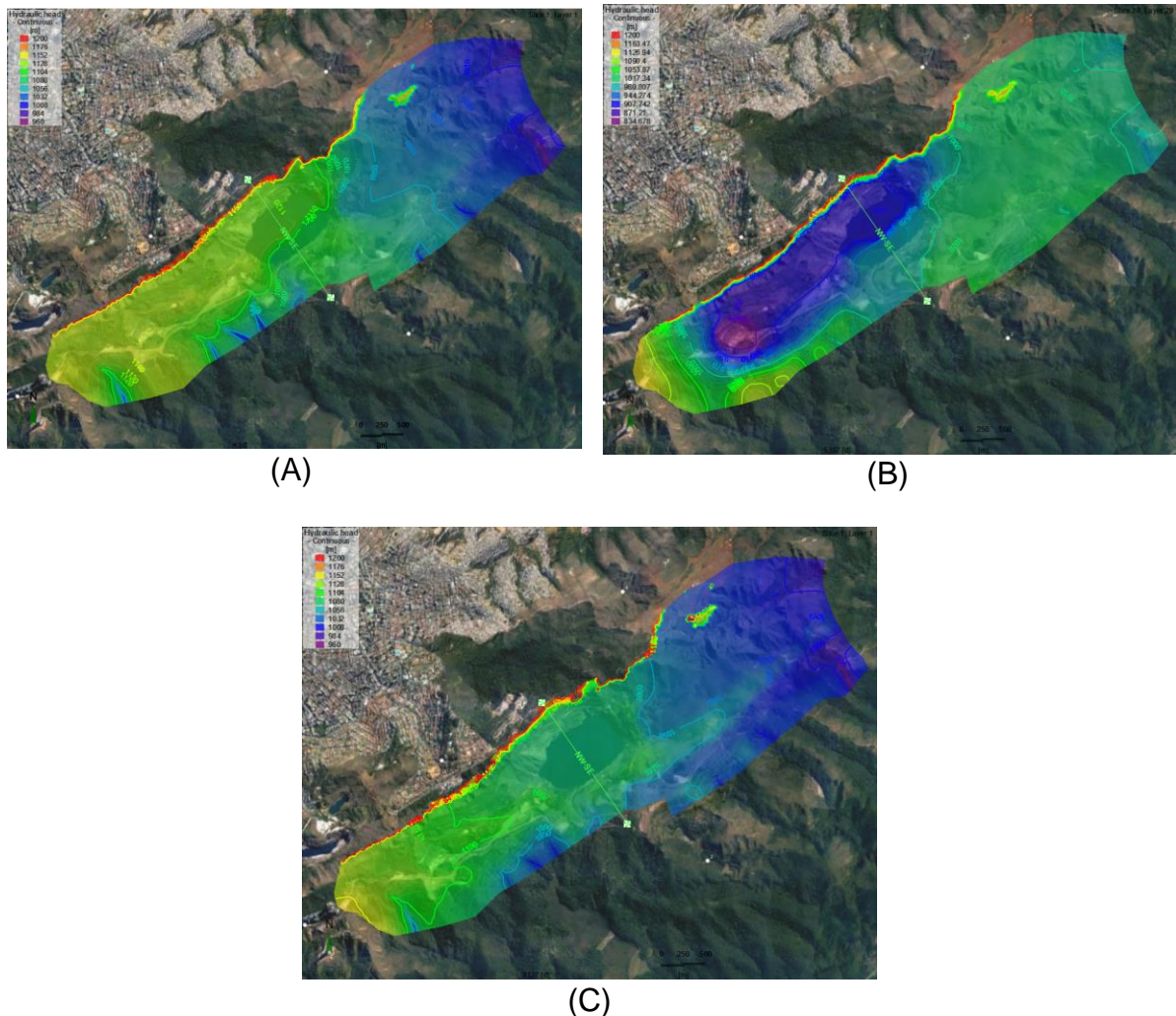
Figura 28: Modelo numérico hidrogeológico da MAC. (A) Malha. (B) Condições de contorno. (C) Geologia/Condutividade hidráulica. (D) Instrumentos de calibração.



Fonte: Elaboração do autor.

Três momentos distintos da mina são modelados: (a) a situação anterior à atividade minerária (pré-rebaixamento); (b) o momento referente ao rebaixamento de nível d'água; (c) o período de formação do lago devido ao retorno do equilíbrio do sistema aquífero, após encerramento das atividades da mina e do sistema de rebaixamento do nível d'água. Em relação às direções de fluxo, observamos três períodos na Figura 29, de A até C, que representam, respectivamente, os três momentos já mencionados. Nas imagens, as cores mais quentes (vermelho) indicam cargas hidráulicas mais altas, e zonas com cores mais frias (azul) indicam áreas de descarga, com cargas hidráulicas mais baixas.

Figura 29: Sentido de fluxo de água subterrânea, das cores mais quentes para cores mais frias. (A) pré-rebaixamento. (B) final do rebaixamento. (C) pós rebaixamento.



Fonte: Elaboração do autor.

A primeira imagem (Figura 29 – A) indica direções de fluxo que representam o sistema aquífero sem interferência, retratando o momento (a), pré-rebaixamento. Para as unidades hidrogeológicas presentes na área, a principal fonte de entrada de água se dá pela recarga originada pela taxa de infiltração efetiva das águas da chuva sobre o terreno, em toda a extensão da Serra do Curral.

O modelo conceitual proposto no Capítulo 2 estabelece que, devido à topografia local, a área da MAC opera como um divisor de águas subterrâneas, onde toda a água que aí infiltra migra parte para nordeste, em direção ao Córrego Fazenda, e parte flui para sentido sudoeste, em direção ao Córrego Mutuca. O modelo numérico, contudo, apresenta divergência quanto a essa interpretação. No esforço da calibração, a

porção sudoeste acabou representando entrada de água do modelo ao invés de saída (Figura 29 – A). Essa resposta do modelo, no entanto, não invalida a análise anterior, apenas aponta uma incerteza a respeito do fluxo de água subterrânea nessa porção da área de estudo. Tanto no modelo conceitual quanto no modelo numérico são representadas a região do Córrego Fazenda, no limite nordeste do modelo, como descarga do sistema hidrogeológico.

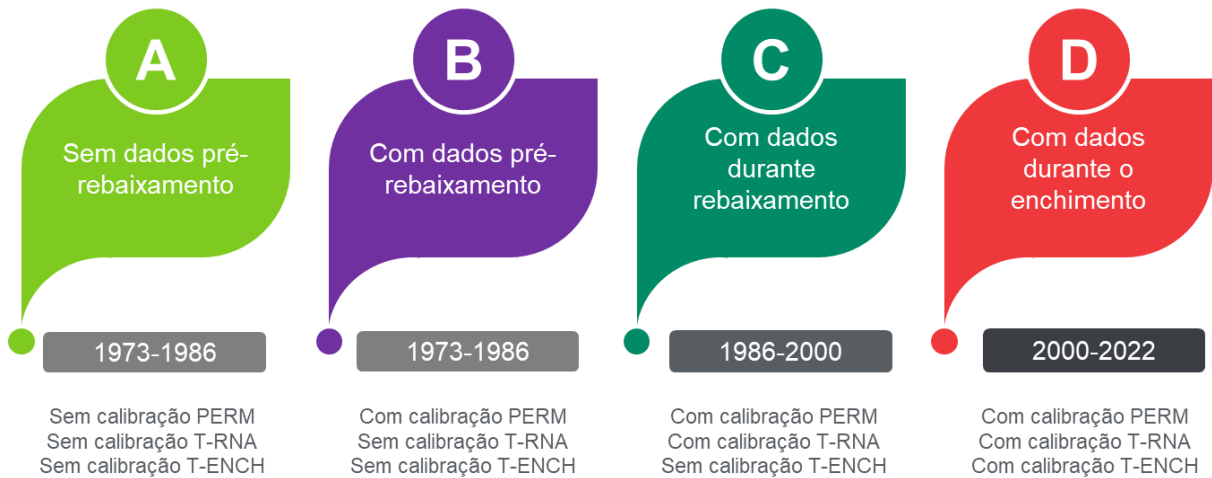
Durante o período de rebaixamento do nível d'água, momento (b), existe uma redução da carga hidráulica na região da cava que promove inversão do fluxo da água subterrânea, convergindo-o à cava (Figura 29 – B). A cava, através do sistema de rebaixamento do nível d'água passa a ser área de descarga do sistema.

No período pós-rebaixamento, a partir de 2000, o modelo numérico indica a recuperação do nível d'água na cava (Figura 29 – C), com cargas hidráulicas já mais altas que a bacia do Córrego Fazenda.

3.3 Cenários de simulação e calibração do modelo

Dado que o intuito desse tipo de simulação é preditivo, foram formulados diferentes conjuntos de cenários de simulação referentes ao momento de operação da mina, de forma a se compreender o impacto de elementos incertos da simulação na previsão do enchimento do lago. Esses conjuntos de cenários partem de uma premissa na qual os dados de monitoramento se tornam cada vez mais completos permitindo o desenvolvimento de um modelo numérico cada vez mais robusto, frente a calibrações mais eficientes. Começam com um primeiro conjunto, em que se considera a falta de dados específicos para a calibração no período de pré-rebaixamento e avançam até que tenham dados suficientes para calibrar o enchimento do lago (Figura 30), passando, ou não, pela avaliação da calibração do rebaixamento do nível d'água. Assim é possível simular uma possível previsão do enchimento da cava frente à falta de dados e como a aquisição dessas informações tornam o modelo melhor em sua previsão final.

Figura 30: Cenários para análise do enchimento do lago, até o ano de 2022, partindo da premissa onde dados de monitoramento estão cada mais disponíveis, permitindo uma melhor calibração do modelo numérico.



Fonte: Elaboração do autor.

Em todos os quatro cenários foi simulado o enchimento do lago da MAC, entre 2000 e 2022. Contudo, para cada um foram tomados por bases diferentes valores para os parâmetros hidrodinâmicos que constituem o sistema hidrogeológico local. No Cenário A, foram utilizados valores condutividade hidráulica, armazenamento e recarga para as litologias presentes na área e para o vazio da cava a partir de referências bibliográficas (Apêndice E). Em outras palavras, nenhum parâmetro foi calibrado, simulando um período pré-rebaixamento quando ainda não haveria dados para uma calibração adequada do modelo numérico. O Cenário B representa uma evolução na análise do enchimento da cava, a partir da possibilidade de calibração da condutividade hidráulica e recarga das litologias com base em dados de monitoramento pré-rebaixamento. O armazenamento das rochas e a contribuição da chuva diretamente sobre a cava (recarga) são ajustadas no Cenário C, que incorpora a calibração da fase de rebaixamento do nível d'água. No Cenário D, já é analisado o enchimento do lago a partir da calibração completa do modelo numérico, sendo ajustados a condutividade hidráulica e armazenamento que representam o vazio da cava. No Apêndice H é apresentada uma tabela que resume os valores dos parâmetros utilizados, destacando, em verde, a alteração feita a cada cenário.

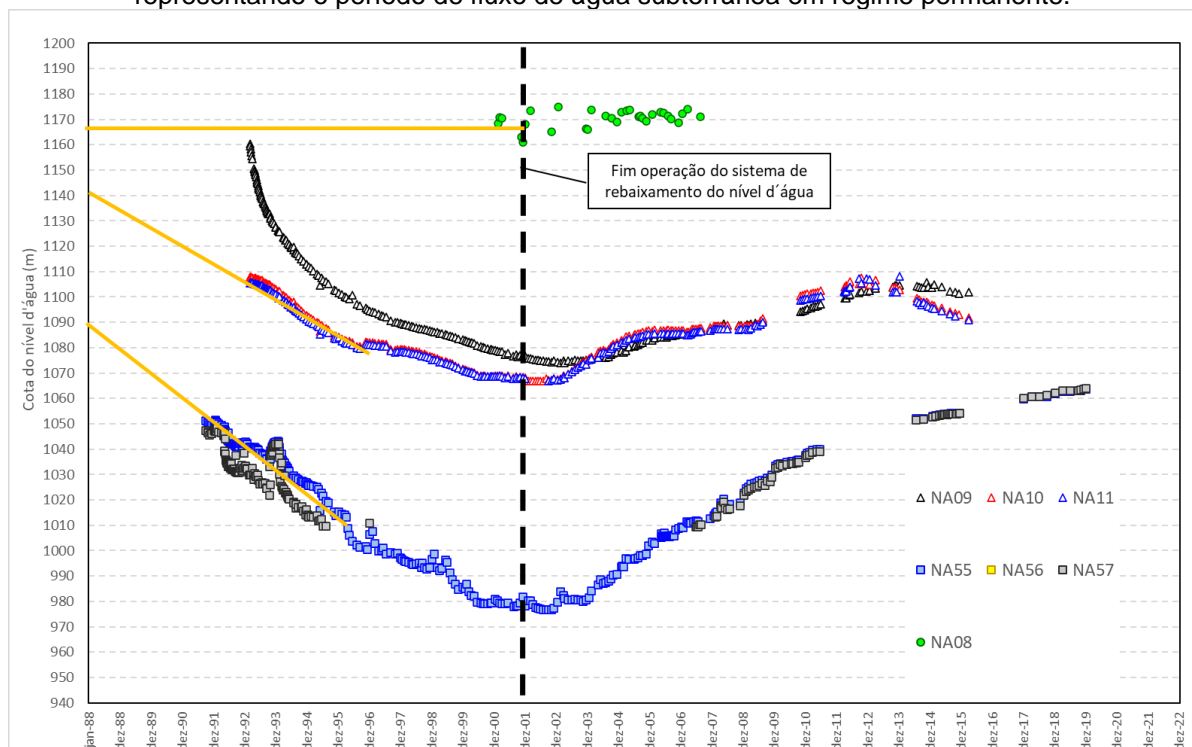
A calibração do modelo numérico tomou como referência o nível d'água medido em instrumentos de monitoramento da mina (Capítulo 2) (Figura 27), tomando como referências as análises estatísticas R2, PBIAS, NSE, NRMS, dentre outros (MORIASI

et al., 2015) (Apêndice G). Para tanto são comparados os dados de nível d'água monitorados pelos instrumentos da mina (O_i - dados observados) e os valores calculados pelo modelo numérico para cada um desses mesmos pontos (C_i – valores calculados).

3.3.1 Análise dos cenários

Ainda que exista um registro considerável de monitoramento do nível d'água na região da mina, boa parte dele ocorre após o início da operação do sistema de rebaixamento do nível d'água, o que dificulta seu uso para o cenário de fluxo estacionário. A premissa assumida na pesquisa foi uma projeção do nível d'água pré-rebaixamento a partir de instrumentos com monitoramento durante o rebaixamento do nível d'água, como indicado por retas na cor laranja, na Figura 31.

Figura 31: Dados de monitoramento dos instrumentos de calibração do modelo, com indicação da regressão das cotas do nível d'água para período anterior ao início do rebaixamento do nível d'água, representando o período de fluxo de água subterrânea em regime permanente.

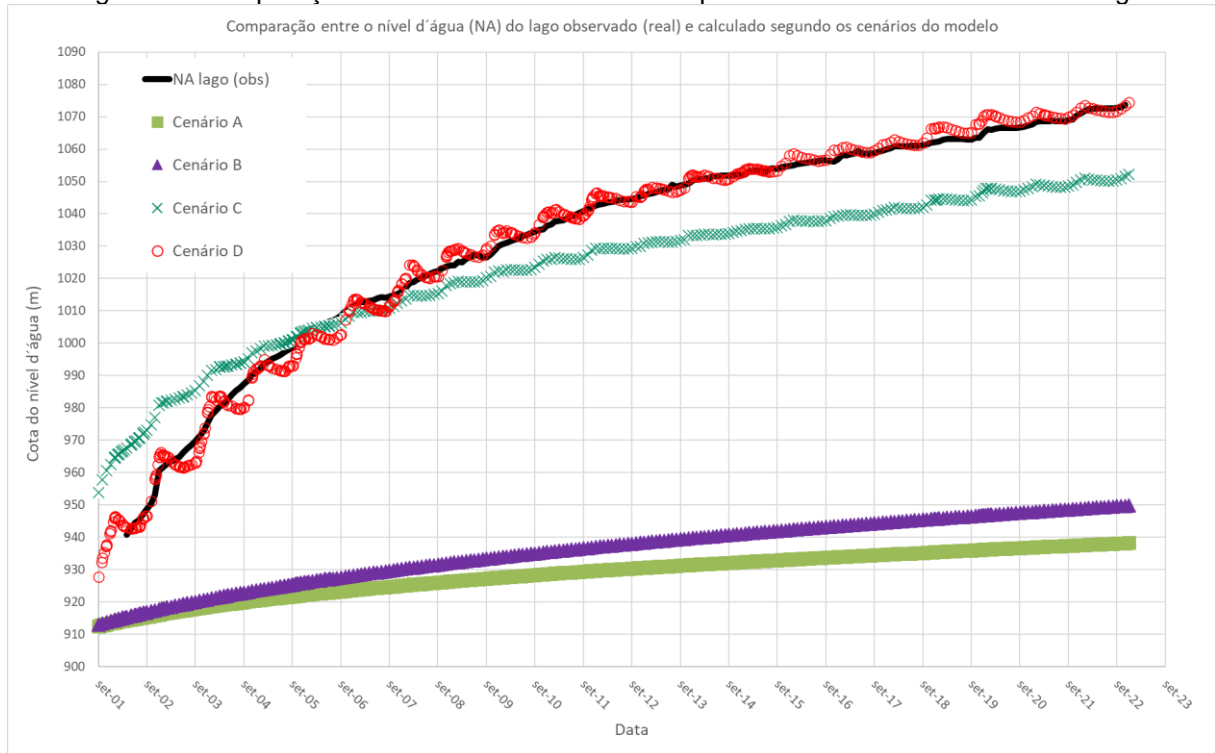


Fonte: Elaboração do autor.

A análise da função preditiva do modelo numérico foi realizada comparando-se o resultado da curva de enchimento do lago da cava a partir de um instrumento inserido no modelo que virtualmente representaria a evolução da cota do nível d'água do lago, tomada a partir da batimetria realizada pela empresa VALE (Capítulo 2). A Figura 32

compara a evolução real do lago com as etapas A (sem calibração permanente), B (com calibração permanente) e C (com calibração do permanente e transiente). Constatase que a não utilização de dados para calibração do período pré-rebaixamento inviabiliza qualquer análise de previsão do enchimento, por trazer uma resposta díspar, indicando redução do nível d'água quando, na verdade, ocorre a elevação. Já a calibração em regime permanente, ainda que não apresente a convergência esperada entre dados observados e calculados pelo modelo, indica uma melhor aproximação do comportamento esperado. A calibração em regime transiente, no entanto, não apresenta uma melhoria notável.

Figura 32: Comparação entre os cenários simulados para a análise do enchimento do lago.



Fonte: Elaboração do autor.

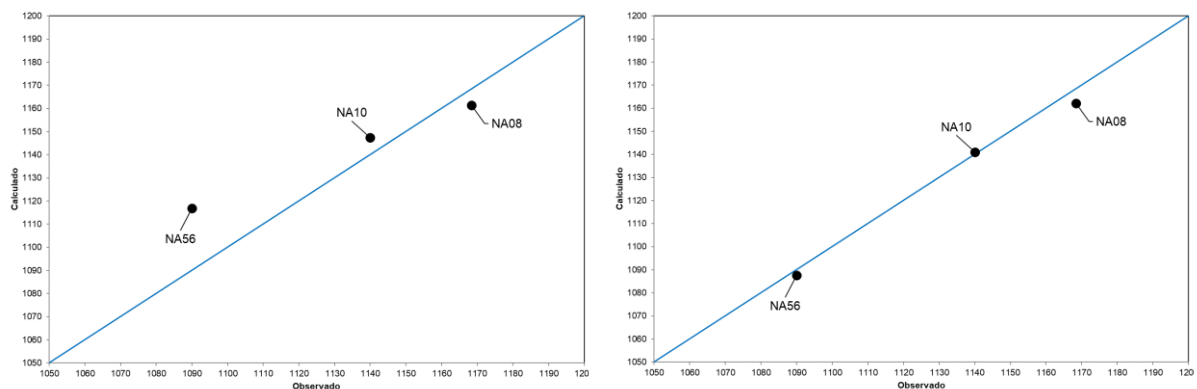
A comparação entre as Etapas A e B foi realizada segundo os parâmetros estatísticos assumidos como premissa da pesquisa, como apresentado na Tabela 2, que indica melhores resultados na Etapa B, quando foram utilizados dados de referência para a calibração do nível d'água do modelo numérico (Figura 33). O esforço de calibração é realizado alterando parâmetros do modelo numérico, como condutividade hidráulica, armazenamento e taxa de recarga.

Tabela 2: Comparação entre os cenários de fluxo em regime permanente. AI cenário sem calibração; BIV cenário calibrado.

Versão	Descrição	Média		Desvio padrão		Medidas de performance da calibração					
		Observado	Calculado	Observado	Calculado	R ²	PBIAS	NSE	RMS	NRMS	EAM
PERM AI	Permanente sem calibração (parâmetro de bibliografia)	1132.8	1141.9	32.4	18.6	100%	-0.8%	74%	16.6	21%	13.7
PERM BIV	Permanente com calibração	1132.8	1130.2	32.4	31.4	99%	0.2%	99%	3.9	5%	3.2

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 33: Curva de calibração entre valores de nível d'água observados (ou monitorados, ou reais), eixo X, e calculados pelo modelo numérico, eixo Y.



AI – Regime permanente sem calibração

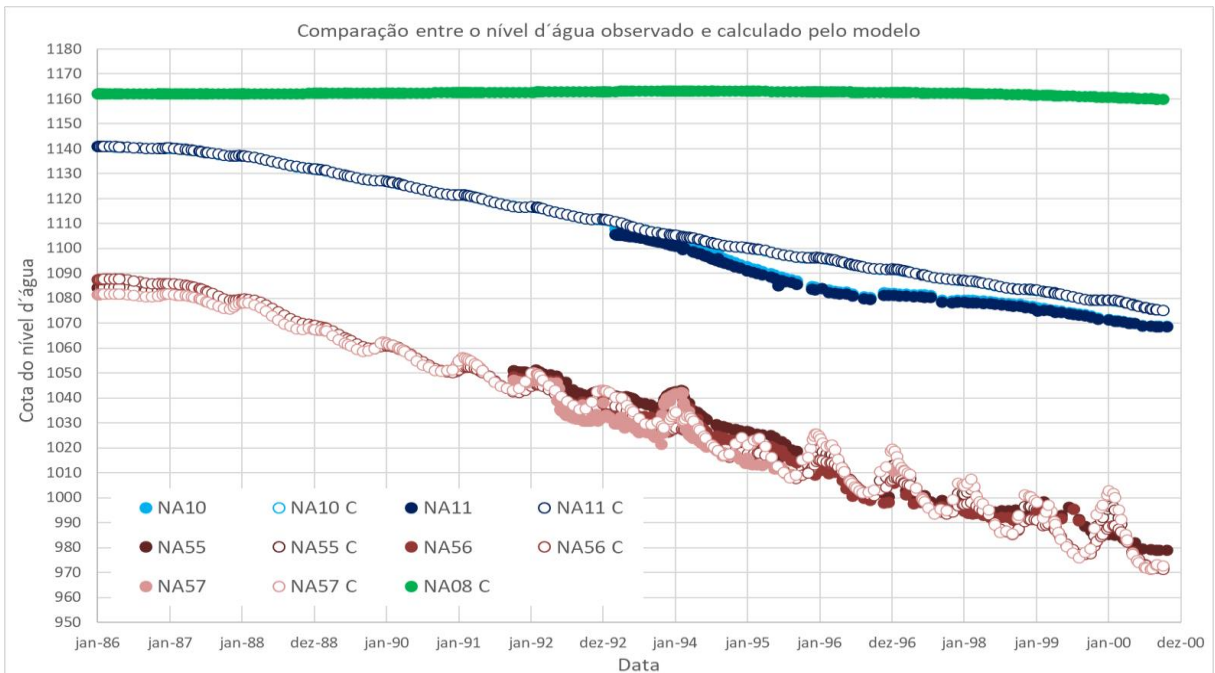
BIV – Regime permanente calibrado

Fonte: Elaboração do autor.

Para a análise da calibração do modelo durante a fase de rebaixamento do nível d'água, foi realizada uma comparação entre os dados observados em instrumentos localizados na área da mina com a resposta calculada pelo modelo numérico, como indicado na Figura 34, que apresenta a resposta das curvas da Etapa C, com a devida calibração do rebaixamento do nível d'água em regime transiente, compreendendo o período de 1986 a 2000.

A avaliação da resposta do modelo numérico ao enchimento do lago foi realizada removendo do modelo todos os elementos que produziram o rebaixamento do nível d'água e inserindo outros que influenciaram o enchimento, como o bombeamento do Ribeirão do Prata para a cava (GRANDCHAMP, 2003). O lançamento da água do Prata foi representado no modelo como um poço de injeção no fundo da cava.

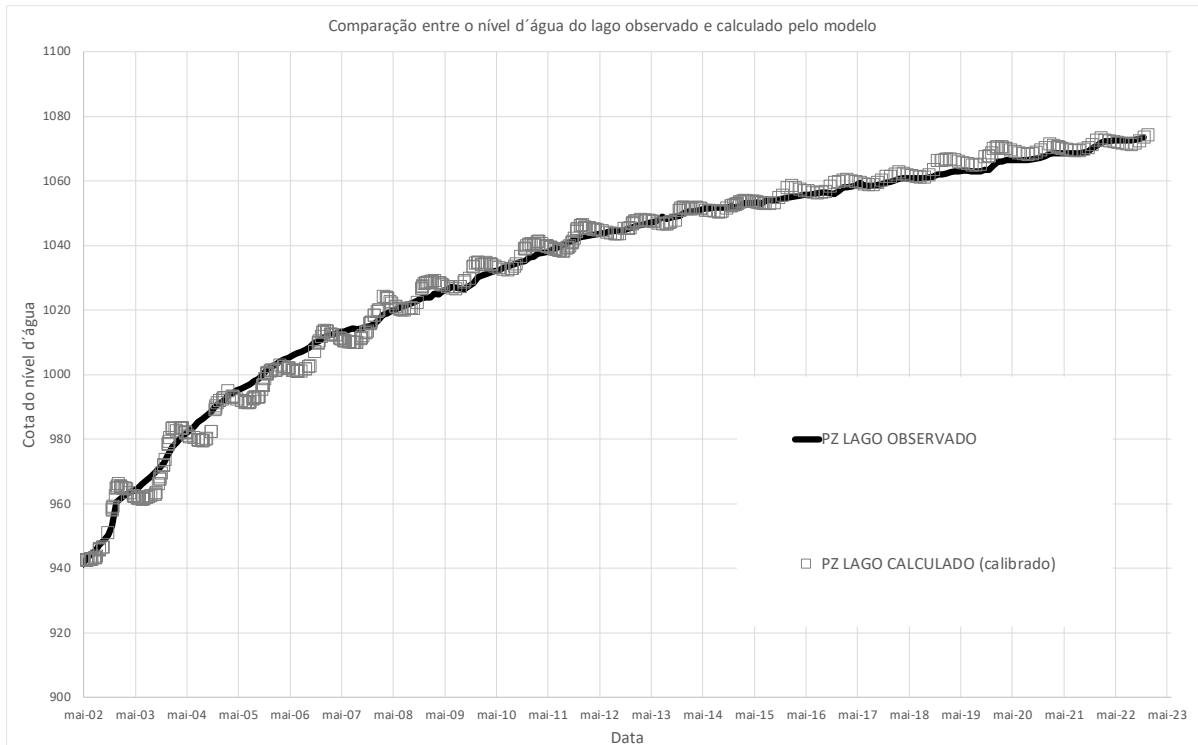
Figura 34: Comparação entre as curvas de evolução do nível d'água durante o rebaixamento do nível d'água, no cenário calibrado (Etapa C). Curvas com marcadores com preenchimento colorido representam os dados observados e as curvas com preenchimento em branco (C) representam os valores calculados pelo modelo.



Fonte: Elaboração do autor.

A Figura 35 apresenta o resultado da calibração com a curva de enchimento calculada pelo modelo numérico, na Etapa D, quando foram ajustados os parâmetros do modelo, especialmente aqueles relacionados à cava vazia, como indicado na Tabela 3. Os valores do armazenamento específico (S_s), assim como a taxa de água de chuva que entra no modelo, foram particularmente sensíveis para o resultado da calibração. Valores mais altos de S_s tornavam a elevação do nível d'água no lago muito lenta, mesmo efeito gerado por baixas contribuições de água de chuva.

Figura 35: Curva de calibração do enchimento do lago (Cenário D), indicando uma ótima aderência entre o nível d'água real (curva contínua preta) e o resultado calculado pelo modelo numérico (curva com quadrados cinza).



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 3: Valores dos parâmetros ajustados para a cava vazia.

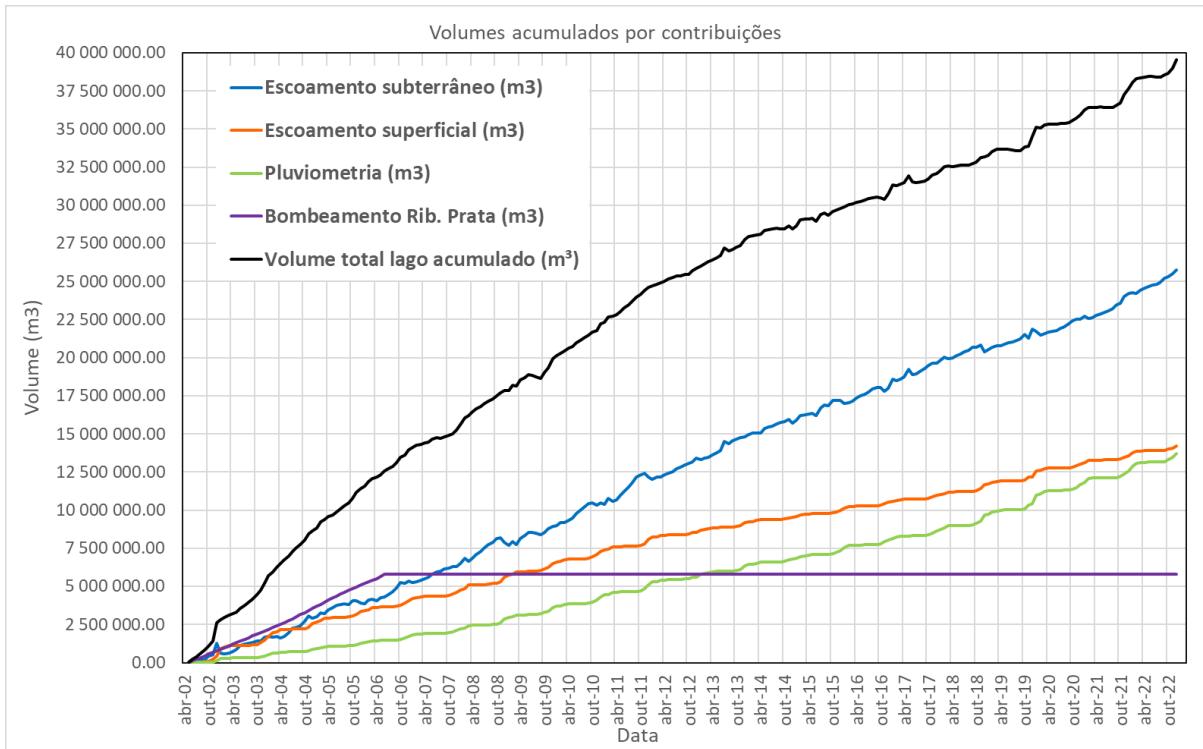
Parâmetro	Valor
Condutividade hidráulica ($K_x=K_y=K_z$)	100 m/dia
Coefficiente de armazenamento (S_y)	0,001
Armazenamento específico (S_s)	0,001

Fonte: Elaboração do autor.

3.3.2 Análise dos volumes de contribuição ao enchimento do lago

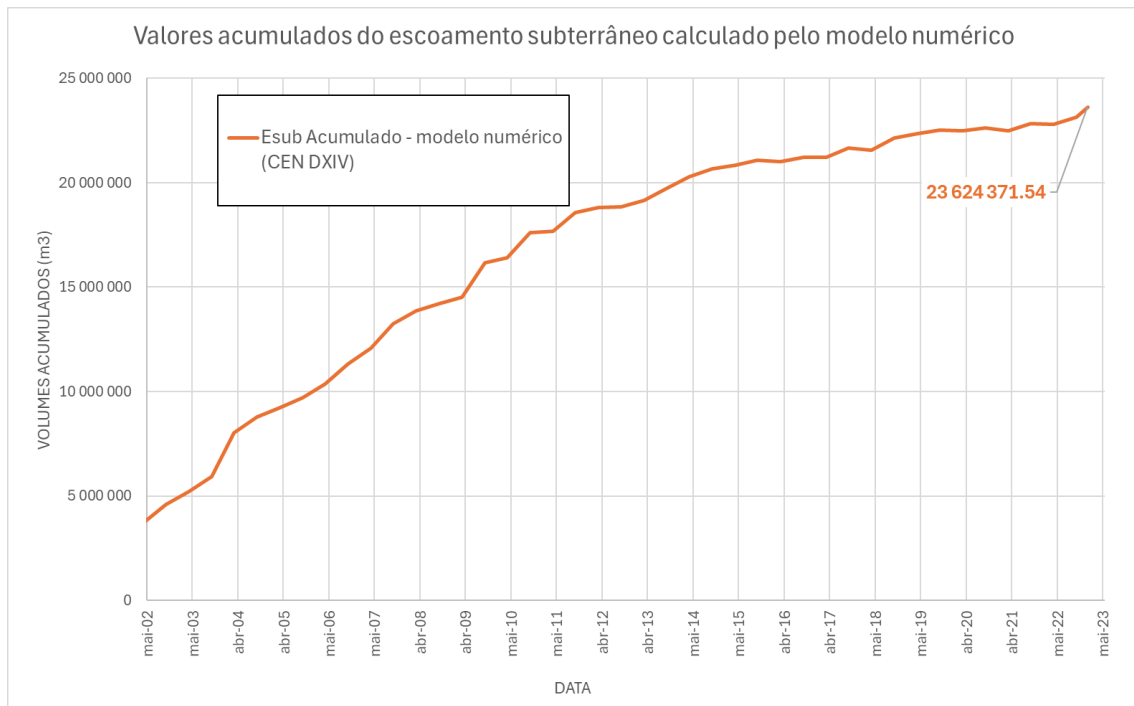
A partir do cenário calibrado do enchimento do lago (Etapa D) foi possível extrair os valores de contribuição do sistema hidrogeológico (escoamento subterrâneo) ao enchimento do lago. Comparando o total acumulado calculado pelo balanço hídrico (Figura 36), 25.753.678,47 m³, com o do modelo numérico (23.624.371,54 m³) (Figura 37), observamos um desvio de 8%. Esse resultado indica uma boa aproximação entre os resultados calculados pelos dois métodos para a contribuição de água subterrânea ao enchimento.

Figura 36: Valores acumulados de cada componente no enchimento do lago, segundo o balanço hídrico.



Fonte: Elaboração do autor.

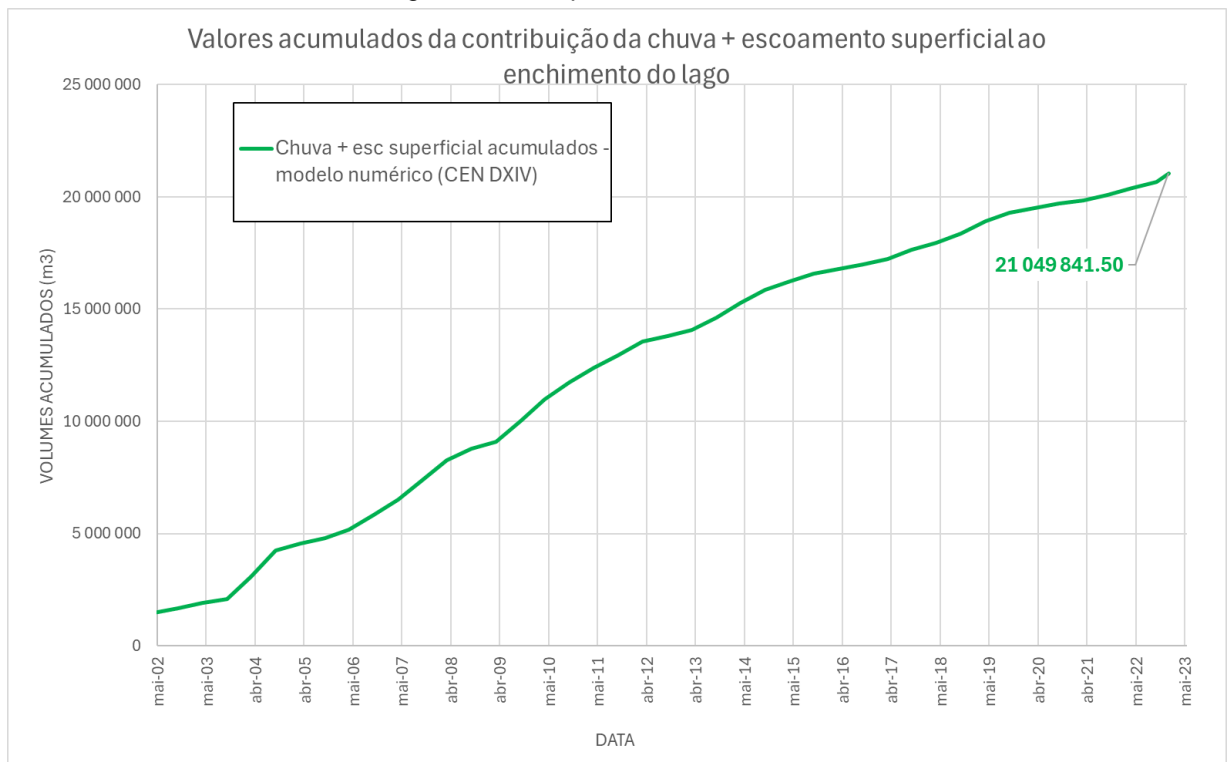
Figura 37: Valor acumulado de contribuição do escoamento subterrâneo ao enchimento do lago, calculado pelo modelo numérico.



Fonte: Elaboração do autor.

Analogamente, foi analisada também a contribuição da componente de incidência direta da chuva ao lago. O programa de modelamento numérico hidrogeológico não permite fazer a distinção do escoamento superficial do total de contribuição, por isso essa componente é tomada como a soma da chuva direta mais o escoamento superficial (Figura 38). No caso da comparação ao volume calculado pelo balanço de massa $27.916.753,26 \text{ m}^3$, o valor do modelo fica 25% menor. Essa diferença pode estar relacionada ao fato de que a evaporação não é representada como uma componente específica no modelo numérico e ela deveria ser descontada do total que entra. O modelo pode então estar compensando essa perda por evaporação. Ainda que seja o caso, a diferença dos valores, algo em torno de 8 milhões de m^3 , estaria subestimada frente ao total que foi calculado no balanço hidrológico.

Figura 38: Valor acumulado de contribuição da chuva e escoamento superficial ao enchimento do lago, calculado pelo modelo numérico.



Fonte: Elaboração do autor.

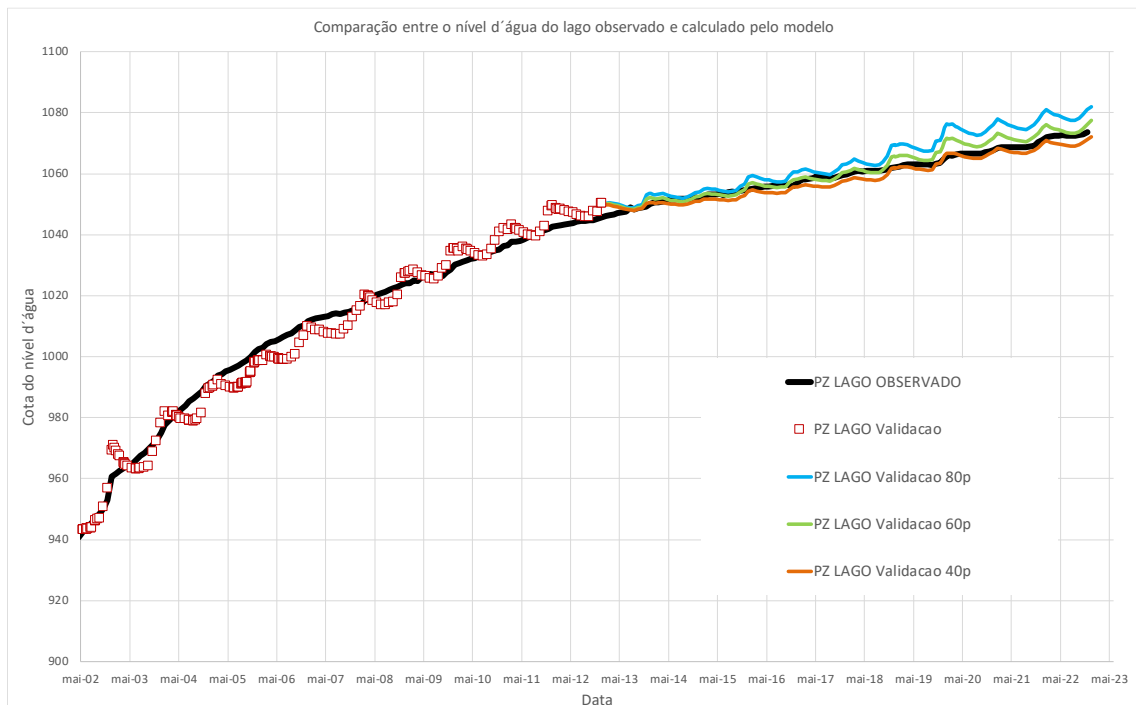
3.3.3 Simulação do enchimento do lago

Após as devidas calibrações do enchimento do lago da cava, até dezembro de 2022, foi desenvolvido um cenário para a simulação do seu enchimento final. Segundo definido pelo offset da cava, região de cota mais baixa no limite da cava, ele encontra-se no ponto de vertimento do Córrego Águas Claras, na elevação 1098 m.

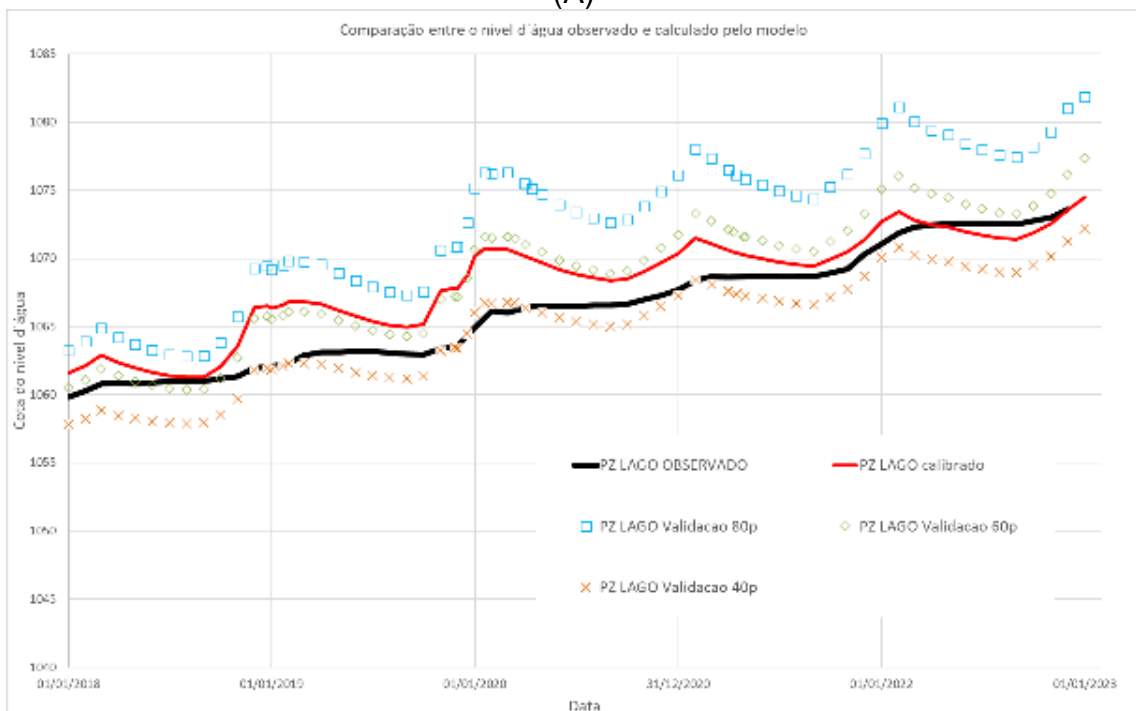
No modelo numérico, foi então definida uma condição de contorno do tipo *seepage* com essa cota indicando a região de extravasamento do lago, realizando uma simulação de enchimento pelo período de 100 anos, a fim de verificar se seria o suficiente para indicar a estabilização o nível d'água do lago, o que definiria o final do seu enchimento.

Previamente à simulação do enchimento final, foram realizados testes para definição das condições que melhor se aplicariam para a recarga nesse cenário futuro. Esse exercício de validação foi feito reduzindo-se o período de calibração do enchimento até 2012 e utilizando os dados observados do nível d'água do lago, até 2022, como uma simulação para validar a calibração. A validação foi feita variando a taxa de entrada de água de chuva sobre o lago, de 80%, 60% e 40% da chuva real. Analisando-se os resultados apresentados na Figura 39, constatamos que a partir da calibração reduzida, feita no período de 2000 a 2012 (quadrados vermelhos na imagem A), a taxa de contribuição de chuva que melhor converge com os dados reais (linha preta), no período de 2012 a 2023, é de 40% (40p – cruces na cor laranja na imagem B).

Figura 39: Análise da validação do enchimento final do lago. (A) período completo e (B) últimos quatro anos.



(A)



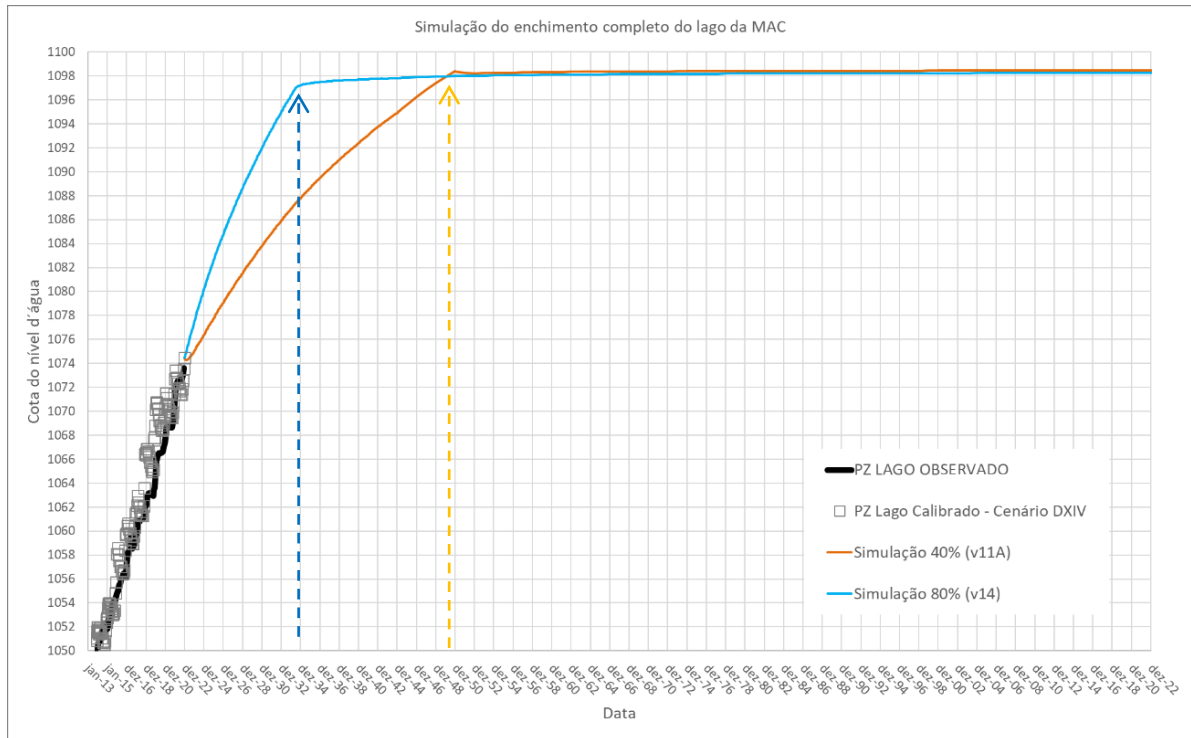
(B)

Fonte: Elaboração do autor.

A partir da validação do valor 40% de taxa de entrada de água de chuva, foi possível observar a simulação completa do enchimento do lago (Figura 40), em que se nota uma estabilização do nível d'água do lago em, aproximadamente, 2050. No gráfico é

ainda possível observar uma comparação com um cenário onde a taxa de entrada de água da chuva sobre o lago é o dobro do simulado (80%), quando se atingiria uma estabilização mais rápida, por volta do ano de 2036.

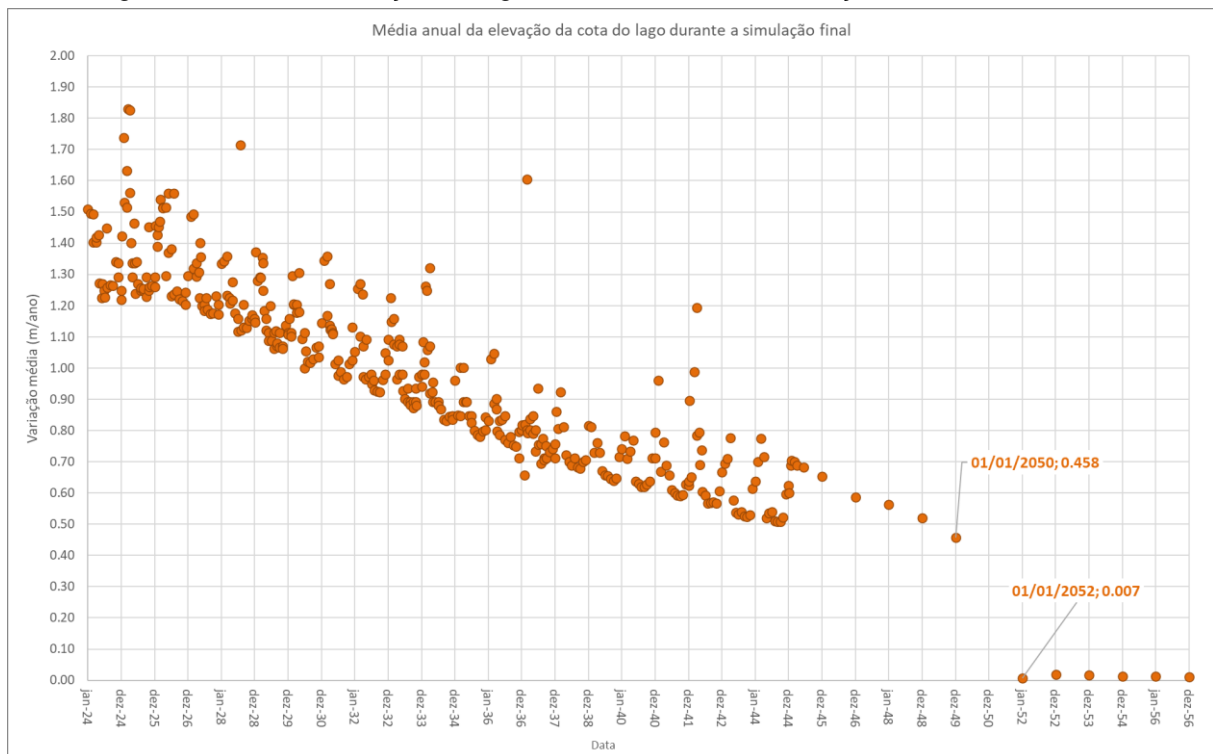
Figura 40: Simulação da evolução do nível d'água do lago da MAC até enchimento final.



Fonte: Elaboração do autor.

Para uma melhor avaliação da estabilização do nível d'água do lago foi calculada a taxa média anual de enchimento, com 40% da chuva, como apresentado na Figura 41. Observa-se que a taxa decresce continuamente até 2052, quando os valores atingem uma estabilidade, com valores abaixo de 1 cm por ano.

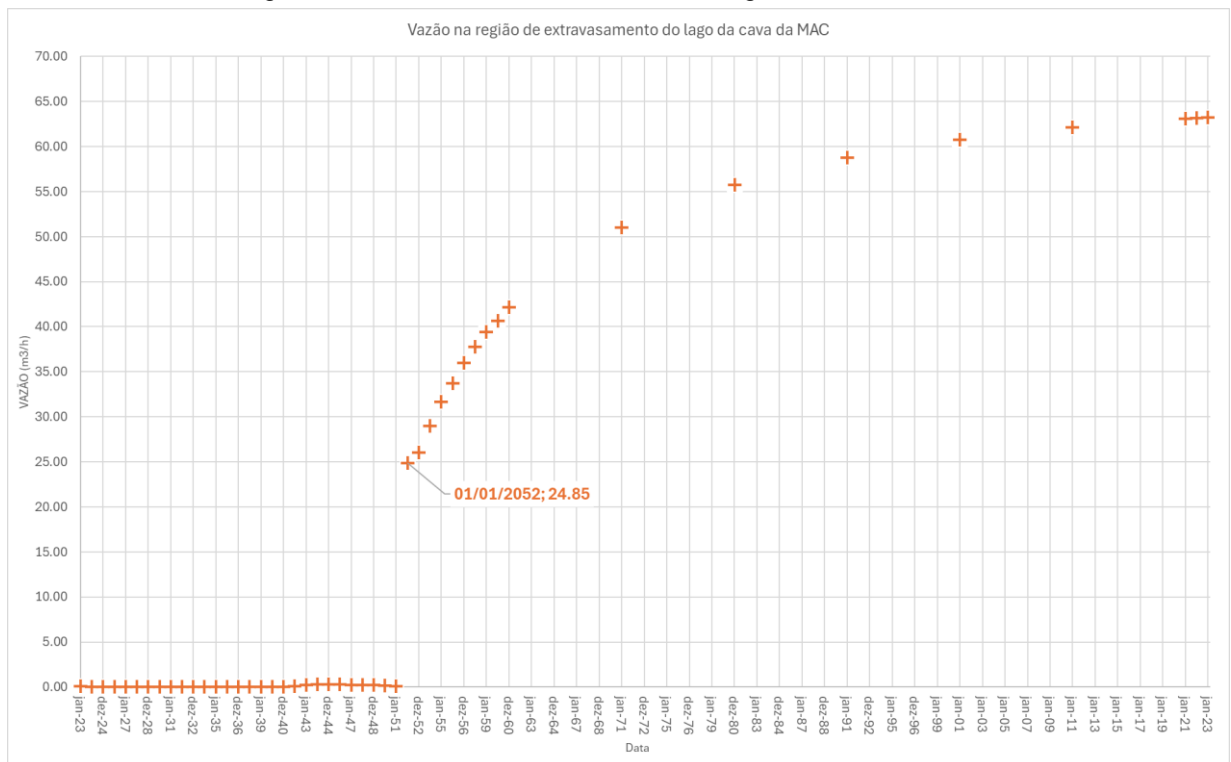
Figura 41: Taxa de elevação do lago da cava, durante a simulação do enchimento final.



Fonte: Elaboração do autor.

Condições de contorno foram definidas em nós (nodes) na região do extravasamento do lago para avaliar o momento em que a água começaria a verter para a calha do Córrego Águas Claras. A resposta dessa análise (Figura 42) confirma o extravasamento e momento de estabilização da cota do nível d'água do lago, entre 1950 e 1952.

Figura 42: Vazão de extravasamento do lago da cava da MAC.



Fonte: Elaboração do autor.

A título de comparação, em trabalho anterior realizado sobre a simulação do enchimento da MAC (MDGEO; VALE, 2018), foi obtido resultado que indicava início do extravasamento por volta do ano de 2048 (Figura 43). Nesse estudo, foi empregada uma taxa de 56% sobre a pluviometria média da região. Caso essa mesma taxa fosse aplicada ao modelo desenvolvido nesta pesquisa, o extravasamento se iniciaria por volta do ano de 2043 (Figura 44).

Figura 43: Vazão de extravasamento do lago, segundo MDGEO, VALE (2018).

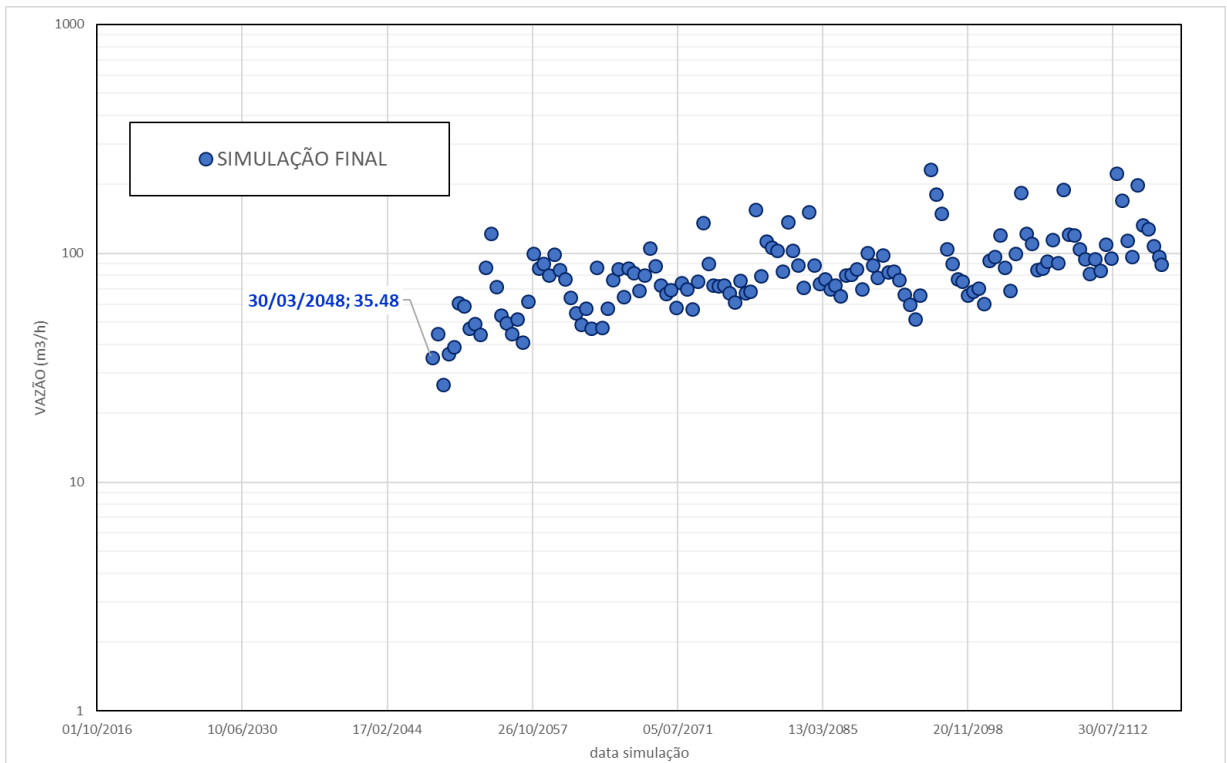
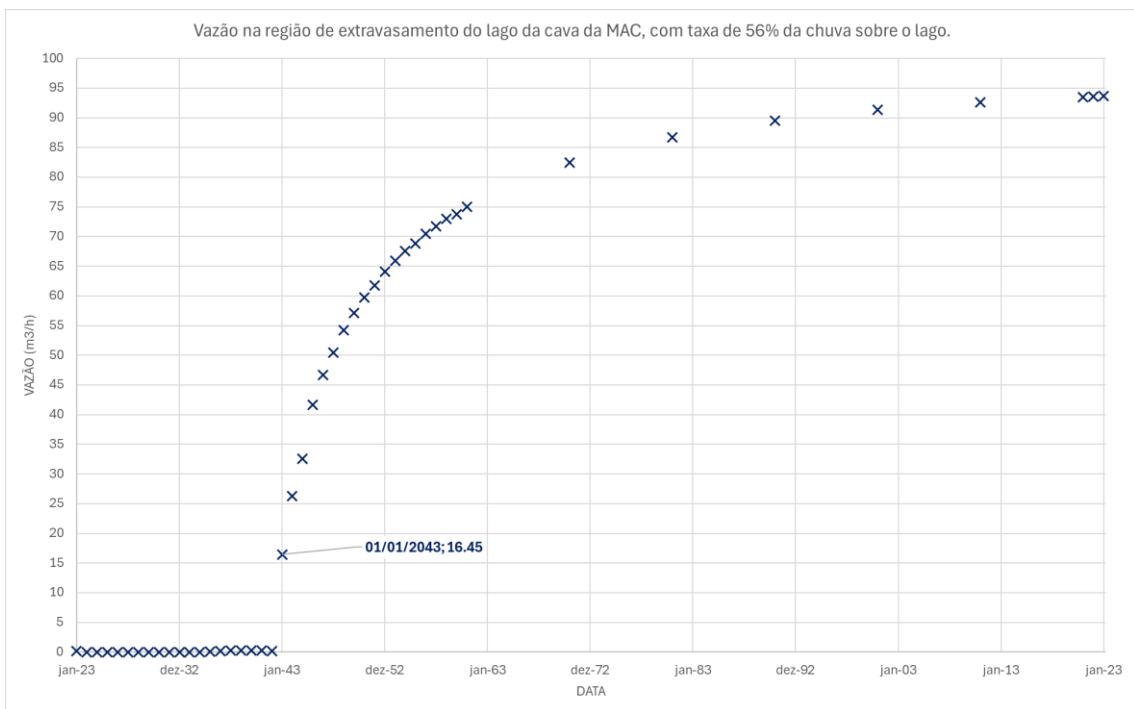


Figura 44: Vazão na região de extravasamento do lago da cava da MAC, com taxa de 56% da chuva sobre o lago.

Fonte: Elaboração do autor.



Fonte: Elaboração do autor.

3.3.4 Principais resultados

Essa parte final do trabalho traz como principais resultados:

1. A definição de etapas de análise do modelo numérico desenvolvido para a MAC, com diferentes conjuntos de dados para uso em calibração, indicou a importância da calibração do período pré-rebaixamento para uma análise fidedigna do enchimento do lago da cava.
2. Apenas a calibração do pré-rebaixamento, no entanto, não é suficiente para conseguir uma versão do modelo que represente adequadamente o enchimento do lago até dezembro de 2022, que foi o limite dos dados utilizados para a calibração;
3. O modelo calibrado indica que o enchimento final, e o consequente extravasamento na região do Córrego Águas Claras, acontecerá entre 2050 e 2052. Contudo, o modelo é bastante sensível à taxa de contribuição da chuva que é empregada para a área da cava. Taxas maiores indicariam um enchimento mais rápido.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O conjunto de informações disponível sobre o monitoramento hidro meteorológico do local, que remonta aos anos 1940, tornam a Mina de Águas Claras (MAC) um interessante recurso para análise de um sistema hidrogeológico associado ao Aquífero Cauê, principal unidade hidrogeológica na região do Quadrilátero Ferrífero (QF), no Estado de Minas Gerais, Brasil.

Esses dados de monitoramento confirmam que o efeito do rebaixamento do nível d'água fica restrito ao Aquífero Cauê, onde se posicionam a maioria dos poços tubulares de rebaixamento, enquanto os instrumentos posicionados sobre outras unidades hidrogeológicas como o Aquitardo Batatal não são sensibilizados pelo rebaixamento do nível d'água.

O balanço hídrico calculado para o período de 2000 a 2022 do enchimento do lago permitiu concluir que a principal contribuição se dá pelo escoamento subterrâneo (43%), enquanto o escoamento superficial, chuva direta e o bombeamento realizado a partir do Ribeirão do Prata contribuem, respectivamente, com 24%, 23% e 10%.

O modelo numérico de fluxo de água subterrânea desenvolvido para a MAC mostrou-se como uma ferramenta adequada, com uma boa aderência para a análise do enchimento do lago durante o período de outubro de 2000 a dezembro de 2022. Isso foi constatado, não apenas com o ajuste da curva de calibração do nível d'água do lago da cava, como também com os valores calculados pelo modelo para as contribuições ao enchimento do lago do escoamento subterrâneo, a saber, chuva e escoamento superficial. Quando esses últimos resultados são comparados àqueles calculados com o balanço hídrico observa-se também uma boa convergência de resultados. Confirmou-se ainda que o método da “cava vazia” é uma opção apropriada para a representação da evolução do enchimento do lago de uma cava, sendo importante se atentar aos parâmetros hidrodinâmicos atribuídos ao vazio da cava; no caso da MAC, ele se mostrou particularmente sensível ao parâmetro de armazenamento.

Quando comparamos os diferentes cenários desenvolvidos para o modelo da MAC, a calibração do rebaixamento do nível d'água no período pré-rebaixamento, com fluxo

de água subterrânea em regime permanente, traz mais ganho à análise do enchimento do lago que a calibração do período de rebaixamento, em regime transiente. De todo modo, o esforço de adequação dos parâmetros hidrodinâmicos do modelo numérico, como condutividade hidráulica, armazenamento e recarga durante o período pós-rebaixamento, de 2000 a 2022, é que realmente permite desenvolver o modelo numérico como ferramenta que permite a análise do enchimento final do lago.

Quanto à análise do enchimento final do lago da MAC, o modelo indica tempos diferentes para o enchimento final, a depender da taxa de contribuição da chuva, que é empregada para a área da cava. Com taxas equivalentes a 80%, o extravasamento deve ocorrer por volta de 2036, enquanto taxas de 40%, mais adequadas segundo a validação do modelo, indicam que o extravasamento na região do Córrego Águas Claras acontecerá em 2052. Caso fosse empregada a taxa utilizada por MDGEO, VALE (2018), 56%, o extravasamento aconteceria em 2043, cinco anos antes do que foi previsto nesse estudo. Essa incerteza a respeito da mais adequada taxa de precipitação que poderia ser empregada na simulação do enchimento poderia suscitar novo estudo a respeito de uma análise de probabilidade sobre essa variável.

Outra pesquisa interessante que poderia ser feita seria uma comparação entre os resultados obtidos com a simulação de “cava vazia” e simulação feita com uso do plug-in do Feflow, lfmLake (DHI-WASY GMBH, 2016). Segundo o site da fabricante do programa, o lfmLake é um plug-in que permite integrar lagos dentro de um modelo numérico. De uma forma genérica, o In-Flight Modification (IFM) plug-in refere-se a um algoritmo acoplado a outros programas que permite a modificação ou ajuste de parâmetros desse modelo enquanto a simulação está em execução. Em outras palavras, é a capacidade de fazer alterações dinâmicas e em tempo real nos elementos do modelo durante a execução da simulação. No caso, o lfmLake calcula a evolução do nível d'água do lago a partir dos fluxos internos, recebidos ou cedidos pelo lago ao sistema hidrogeológico, além de alterar a área do lago dependendo da cota do nível d'água e elevação topográfica do terreno. O plug-in pode ser obtido gratuitamente no site da DHI (DHI, 2024).

5 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. RESOLUÇÃO ANM No 68, DE 30 DE ABRIL DE 2021., 30 abr. 2021.
- ANDERSON, M. P.; HUNT, R. J.; KROHELSKI, J. T.; CHUNG, K. Using High Hydraulic Conductivity Nodes to Simulate Seepage Lakes. *Ground Water*, v. 40, n. 2, p. 117–122, mar. 2002.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Second edition ed. London; San Diego, CA: Academic Press, 2015.
- ANDRADE, I. B. Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco oeste do Sinclinal Moeda - Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação de mestrado—Instituto de Geociências: Universidade Federal de Minas Gerais, 2023.
- ARAÚJO, E. E. DE; NASCIMENTO, G. C. S.; DE BESSA, V. Modelamento hidrogeológico regional em LEAPFROG/FEFLOW da região de Vazante, MG. p. 10, 2016.
- BERTACHINI, A. C. Hidrogeologia e desaguamento da mina de Águas Claras. *Revista ABAS*, p. 10, 1994.
- BIONDI, J. C. *Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros*. 1. ed. São Paulo/SP: Oficina de Textos, 2003. v. 1
- BOZAN, C.; WALLIS, I.; COOK, P. G.; DOGRAMACI, S. Groundwater-level recovery following closure of open-pit mines. *Hydrogeology Journal*, v. 30, n. 6, p. 1819–1832, set. 2022.
- CASTRO, P. DE T. A.; ENDO, I.; GANDINI, A. L. *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. 1. ed. Belo Horizonte/MG: 3i Editora, 2020. v. 1
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. [s.l: s.n.].
- COMPÈRE, F.; KERN, G.; BELLENFANT, G. A 3D Feflow hydrogeological Uranium underground mine Model, France. p. 6, 2021.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. *Hidrologia Subterrânea*. 2a. ed. Barcelona, Espanha: Ed. Omega, 1983. v. 1
- DARCY, H. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. 1856.
- DHI. IFMLAKE PLUG-IN. Disponível em: <<https://www.mikepoweredbydhi.com/download/mike-by-dhi-tools/groundwaterandporousmediatools/ifmlake%20plugin>>.

DHI-WASY GMBH (ED.). IfmLake Plug-In., 2016. Disponível em: <<https://www.mikepoweredbydhi.com/download/mike-by-dhi-tools/groundwaterandporousmediatools/ifmlake%20plugin>>. Acesso em: 20 jan. 2024

DIERSCH, H.-J. G. FEFLOW. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

DORR II, J. V. N. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: Geological Survey Professional Paper. [s.l.] USGS, 1969.

ENDO, I. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil, 2019.

FEITOSA, F. A. C. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. rev. e ampl ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FRANCA, P. Analysis of slope stability using limit equilibrium and numerical methods with case examples from the Águas Claras Mine, Brazil. Tese de Doutorado—Queen's University, Department of Mining Engineering, Kingston: [s.n.].

GAMMONS, C. H.; HARRIS, L. N.; CASTRO, J. M.; COTT, P. A.; HANNA, B. W. Creating Lakes from Open Pit Mines: Processes and Considerations, Emphasis on Northern Environments. Canadá: Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 2826, 2009.

GOOGLE. Google Earth. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>.

GRANDCHAMP, C. A. P. Estudo da recuperação do Aquífero Cauê e do enchimento da cava na mina de Águas Claras, Serra do Curral, município de Nova Lima, MG. Dissertação de mestrado—Belo Horizonte/MG: IGC - UFMG, 2003.

HALEY, D. F. Simulating the Evolution of End Pit Lake Development During Mine Reclamation. p. 2, 2021.

HU, L.; Zhang, M.; YANG, Z.; FAN, Y.; LI, J.; WANG, H.; LUBALE, C.; JIANGUO, W. Estimating dewatering in an underground mine by using a 3D finite element model. PLOS ONE, v. 15, n. 10, p. e0239682, 29 out. 2020.

IBRAM; ANA. A Gestão Recursos Hídricos e a Mineração. [s.l: s.n.].

IGAM. Formulários e termos de referência para elaboração de processos de Outorga.

JOHNSON, S. L.; WRIGHT, A. H. Mine void water resource issues in Western Australia. East Perth, W.A.: Water and Rivers Commission, 2003.

KONIKOW, L.; REILLY, T.; BARLOW, P.; VOSS, C. Capítulo 23 - Groundwater Modeling. Em: The Handbook of Groundwater Engineering. 2nd. ed. Boca Raton, FL: Jacques W. Delleuer, 2007.

KREŠIĆ, N. Hydrogeology and groundwater modeling. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

KUCHLING, K.; CHORLEY, D.; ZAWADZKI, W. Hydrogeological Modeling of Mining Operations at the Diavik Diamonds Project. *Environmental Issues and Management of Waste in Energy and Mineral Production*, p. 8, 2000.

LEONARD, L.; LEBOGANG, T. Exploring the Impacts of Mining on Tourism Growth and Local Sustainability: The Case of Mapungubwe Heritage Site, Limpopo, South Africa: The Case of the Mapungubwe Heritage Site, Limpopo, South Africa. *Sustainable Development*, v. 26, n. 3, p. 206–216, Maio 2018.

MAEST, A.; PRUCHA, R.; WOBUS, C. Hydrologic and Water Quality Modeling of the Pebble Mine Project Pit Lake and Downstream Environment after Mine Closure. *Minerals*, v. 10, n. 8, p. 727, 18 ago. 2020.

MAGALHÃES, C. C. DE C.; MELO, M.; GUIGUER, N.; PAULA, R. S. The Cauê Aquifer on the eastern limb of the Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in the western Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 52, n. 4, p. e20220005, 2022.

MCJANNET, D.; HAWDON, A.; VAN NIEL, T.; BOADLE, D.; BAKER, B.; TREFRY, M.; REA, I. Measurements of evaporation from a mine void lake and testing of modelling approaches. *Journal of Hydrology*, v. 555, p. 631–647, dez. 2017.

MDGEO. Relatório do modelo numérico de simulação do fluxo d'água subterrâneo da Mina de Águas Claras e adjacências., 2001.

MDGEO; VALE. Modelo numérico de fluxo de água subterrânea da mina de Águas Claras e simulação do enchimento do lago. Belo Horizonte/MG: Relatório técnico interno R-VALE739-02-MN-RF, 2018.

MONNINKHOFF, B.; ALTENKIRCH, N.; LUO, J.; CLAUSNITZER, V. Analyzing the Effects of Groundwater Influenced Flooding of a Large Abandoned Mining Area in Eastern Germany. p. 6, 2014.

MORIASI, D. N.; GITAU, M. W.; PAI, N.; DAGGUPATI, P. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, v. 58, n. 6, p. 1763–1785, 30 dez. 2015.

MOURÃO, M. A. A. Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese de Doutorado—Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

NASA. Land Data Assimilation System. Disponível em: <<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas>>.

PEKSEZER-SAYIT, A.; YAZICIGIL, H. Assessment of Dewatering Requirements and Dewatering Well Design for an Open Pit Coal Mine in Central Anatolia. *Mine Water and the Environment*, v. 41, n. 3, p. 748–763, set. 2022.

PINDER, G. F.; BREDEHOEFT, J. D. Application of the Digital Computer for Aquifer Evaluation. *Water Resources Research*, v. 4, n. 5, p. 1069–1093, out. 1968.

READ, J. R. L.; BEALE, G. Guidelines for evaluating water in pit slope stability. Collingwood: CSIRO publ, 2013.

RIMÉLÉ, M.; DIMITRAKOPOULOS, R.; GAMACHE, M. A stochastic optimization method with in-pit waste and tailings disposal for open pit life-of-mine production planning. Resources Policy, v. 57, p. 112–121, ago. 2018.

SCHWARTZ, F. W.; CROWE, A. S. Simulation of changes in ground-water levels associated with strip mining. Geological Society of America Bulletin, v. 96, n. 2, p. 253, 1985.

STACEY, P.; MARTIN, D. (EDS.). Guidelines for open pit slope design in weak rocks. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2018.

SZCZEPIŃSKI, J. The Significance of Groundwater Flow Modeling Study for Simulation of Opencast Mine Dewatering, Flooding, and the Environmental Impact. Water, v. 11, n. 4, p. 848, 23 abr. 2019.

TREFRY, M. G.; MUFFELS, C. FEFLOW: A Finite-Element Ground Water Flow and Transport Modeling Tool. Groundwater, v. 45, n. 5, p. 525–528, set. 2007.

TUHETERU, E. J. et al. Water Balance of Pit Lake Development in the Equatorial Region. Water, v. 13, n. 21, p. 3106, 4 nov. 2021.

VALE. Mina de Águas Claras (MAC) - Histórico e Informações Técnicas. Belo Horizonte/MG: Relatório interno, 2003.

WINGLE, W. L.; SINTON, P. A Pit-Lake Module for FEFLOW. MODFLOW and More 2015: Modeling a Complex World - IGWMC, p. 5, 2015.

WINTER, T. C. Numerical Simulation Analysis of the Interaction of Lakes and Ground Water. [s.l.] United States Department of Interior - Geological Survey, 1976.

ZHANG, Q.; ZHANG, B.; CHEN, Q.; WANG, D.; GAO, X. Safety Analysis of Synergetic Operation of Backfilling the Open Pit Using Tailings and Excavating the Ore Deposit Underground. Minerals, v. 11, n. 8, p. 818, 28 jul. 2021.

APÊNDICE A – CORRELAÇÃO ENTRE ID DOS INSTRUMENTOS E CÓDIGOS DOS MAPAS

PZs/INAs	ID MAPA	PZs/INAs	ID MAPA	PZs/INAs	ID MAPA	Vertedouros	ID MAPA	Poços	ID MAPA
MACATPZ001	NA01	MACCVMPZ361	NA62	MACG2PZ005	NA123	MACATTMMI041	V01	PTP-01/89	P01
MACATPZ002	NA02	MACCVMPZ362	NA63	MACG2PZ006	NA124	MACATTMMO032	V02	PTP-02/88	P02
MACATPZ003	NA03	MACCVMPZ363	NA64	MACG2PZ009	NA125	MACATTMMO033	V03	PTP-03/89	P03
MACATPZ004	NA04	MACCVMPZ364	NA65	MACG2PZ010	NA126	MACATTMMO034	V04	PTP-04/88	P04
MACATPZ005	NA05	MACCVMPZ365	NA66	MACG2PZ011	NA127	MACATTMMO035	V05	PTP-05/90	P05
MACATPZ006	NA06	MACCVMPZ366	NA67	MACG2PZ012	NA128	MACATTMMO036	V06	PTP-06/88	P06
MACATTMNA030	NA07	MACCVMPZ367	NA68	MACG2PZ013	NA129	MACATTMMO037	V07	PTP-07/89	P07
MACATTMNA045	NA08	MACCVMPZ368	NA69	MACG2PZ014	NA130	MACATTMMO038	V08	PTP-08/88	P08
MACATTMPZ046	NA09	MACCVMPZ369	NA70	MACG2PZ015	NA131	MACATTMMO046	V09	PTP-09/89	P09
MACATTMPZ047	NA10	MACCVMPZ370	NA71	MACG2PZ016	NA132	MACATTMMO047	V10	PTP-10/92	P10
MACATTMPZ048	NA11	MACCVMPZ371	NA72	MACG2PZ017	NA133	MACATTMMO049	V11	PTP-12/92	P11
MACB5DANA01	NA12	MACCVMPZ372	NA73	MACG2PZ018	NA134	MACATTMMT039	V12	PTP-13/92	P12
MACB5DANA02	NA13	MACCVMPZ373	NA74	MACG2PZ019	NA135	MACATTMMT040	V13	PTP-14/92	P13
MACB5DANA03	NA14	MACCVMPZ374	NA75	MACG2PZ020	NA136	MACB5MI006	V14	PTP-15/93	P14
MACB5DANA04	NA15	MACCVMPZ375	NA76	MACG2PZ021	NA137	MACB5MI007	V15	PTP-16/93	P15
MACB5DANA05	NA16	MACCVMPZ376	NA77	MACG2PZ022	NA138	MACB5MT005	V16	PTP-19/96	P16
MACB5DANA06	NA17	MACCVMPZ377	NA78	MACG2PZ023	NA139	MACB5MT022	V17	PTP-20/99	P17
MACB5DAPZ01	NA18	MACCVMPZ378	NA79	MACG3APZ001	NA140	MACB8MI001	V18	PTP-21/99	P18
MACB5NA020	NA19	MACCVMPZ379	NA80	MACG3APZ002	NA141	MACG2MI018	V19	PTP-22/99	P19
MACB5NA021	NA20	MACCVMPZ380	NA81	MACG3APZ003	NA142	MACG2MI019	V20	PTP-23/99	P20
MACB5NA022	NA21	MACCVMPZ381	NA82	MACG3APZ004	NA143	MACG2MT020	V21	PTP-24/99	P21
MACB5NA023	NA22	MACCVMPZ382	NA83	MACG3APZ005	NA144	MACG3MT001	V22	PTP-25/99	P22
MACB5PZ007	NA23	MACCVMPZ384	NA84	MACG3APZ006	NA145			PA-V	P23
MACB5PZ008	NA24	MACCVMPZ385	NA85	MACG3PZ001	NA146			PA-VI/91	P24
MACB5PZ009	NA25	MACCVMPZ386	NA86	MACG3PZ002	NA147			PAVII/94	P25
MACB5PZ010	NA26	MACCVMPZ387	NA87	MACG3PZ003	NA148			PTP-17/95	P26
MACB5PZ011	NA27	MACCVMPZ388	NA88	MACG3PZ004	NA149			PTP-18/95	P27
MACB5PZ012	NA28	MACCVMPZ389	NA89	MACG3PZ005	NA150				
MACB5PZ013	NA29	MACCVMPZ390	NA90	MACG3PZ006	NA151				
MACB5PZ014	NA30	MACCVMPZ391	NA91	MACG4NA002	NA152				
MACB5PZ015	NA31	MACCVMPZ392	NA92	MACG4NA003	NA153				
MACB5PZ016	NA32	MACCVMPZ393	NA93	MACG4NA004	NA154				
MACB5PZ017	NA33	MACCVMPZ394	NA94	MACG4NA006	NA155				
MACB5PZ018	NA34	MACCVMPZ395	NA95	MACG4PZ001	NA156				
MACB5PZ019	NA35	MACCVMPZ396	NA96	MACG4PZ002	NA157				
MACB7APZ001	NA36	MACCVMPZ397	NA97	MACG4PZ003	NA158				
MACB7APZ002	NA37	MACCVMPZ398	NA98	MACG4PZ004	NA159				
MACB7APZ003	NA38	MACCVMPZ399	NA99	MACLONA057	NA160				
MACB7APZ004	NA39	MACCVMPZ400	NA100	MACLONA058	NA161				
MACB7BNA001	NA40	MACCVMPZ401	NA101	MACLONA059	NA162				
MACB7BNA002	NA41	MACCVMPZ402	NA102	MACLONA060	NA163				
MACB7BNA003	NA42	MACCVMPZ403	NA103	MACLONA061	NA164				
MACB7BNA004	NA43	MACFG00007	NA104	MACLONA062	NA165				
MACB7BNA005	NA44	MACGONA001	NA105	MACLONA063	NA166				
MACB7BPZ001	NA45	MACGONA002	NA106	MACLONA064	NA167				
MACB8BNA001	NA46	MACGONA003	NA107	MACLOPZ061	NA168				
MACB8BNA002	NA47	MACGONA005	NA108	MACLOPZ062	NA169				
MACB8BNA003	NA48	MACG0PZ008	NA109	MACLOPZ063	NA170				
MACB8BNA004	NA49	MACG0PZ009	NA110	MACLOPZ064	NA171				
MACB8BNA005	NA50	MACG1PZ001	NA111	MACLOPZ065	NA172				
MACCVMNA360	NA51	MACG-1PZ001	NA112	MACLOPZ066	NA173				
MACCVMPZ351	NA52	MACG1PZ002	NA113	MACLOPZ067	NA174				
MACCVMPZ352	NA53	MACG-1PZ002	NA114	MACLOPZ068	NA175				
MACCVMPZ353	NA54	MACG1PZ003	NA115	MACLOPZ069	NA176				
MACCVMPZ354	NA55	MACG1PZ004	NA116	MACLOPZ070	NA177				
MACCVMPZ355	NA56	MACG1PZ005	NA117	MACLOPZ071	NA178				
MACCVMPZ356	NA57	MACG1PZ006	NA118	MACLOPZ072	NA179				
MACCVMPZ357	NA58	MACG1PZ007	NA119	MACLOPZ073	NA180				
MACCVMPZ358	NA59	MACG1PZ008	NA120	MACLOPZ074	NA181				
MACCVMPZ359	NA60	MACG2NA001	NA121	MACLOPZ075	NA182				
MACCVMPZ360	NA61	MACG2NA004	NA122						

APÊNDICE B – DADOS DE CHUVA DA ESTAÇÃO CAIXA DE AREIA

Anos	Precipitação Mensal												Total anual (mm)
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
1941	4.00	99.60	121.50	121.70	34.20	2.40	48.00	0.00	67.20	88.70	176.70	219.00	983.00
1942	374.20	145.00	261.80	118.80	4.50	4.20	0.00	2.00	76.10	138.70	241.20	478.90	1845.40
1943	565.00	212.60	276.40	23.00	8.60	19.60	0.00	35.60	47.00	187.40	182.60	554.60	2112.40
1944	256.80	334.60	352.00	67.50	3.20	0.50	0.00	0.30	5.00	168.40	184.80	366.80	1739.90
1945	698.00	159.90	511.40	228.00	29.40	30.50	0.00	0.40	45.80	229.90	362.60	788.70	3084.60
1946	217.80	43.20	274.30	183.20	12.20	5.00	0.00	0.00	62.20	58.50	364.90	202.00	1423.30
1947	391.20	123.20	589.80	14.20	3.40	0.00	4.00	39.20	8.20	34.40	80.00	822.60	2110.20
1948	136.60	603.50	335.40	38.60	0.00	0.00	0.00	0.00	8.00	138.60	475.20	863.90	2599.80
1949	1124.10	425.20	30.20	18.60	8.20	20.40	0.00	0.00	0.00	43.60	493.00	698.80	2862.10
1950													
1951	440.00	793.20	430.80	32.20	8.20	4.00	0.00	0.00	4.20	66.20	24.40	309.00	2112.20
1952	759.60	580.80	432.00	91.20	0.00	22.60	0.00	8.20	114.00	480.40	256.40	2745.20	
1953	32.60	244.80			0.00	0.00	0.00	0.00					579.80
1954	83.00	55.80	154.80	0.40	23.40	0.00	0.00	0.00	0.00	34.00	252.00	198.10	801.50
1955	317.00	95.00	4.80	41.60	101.00	0.20	0.00	0.00	0.00	163.80	242.90	722.90	1689.20
1956	27.00	125.20	242.80	0.60	57.80	115.60	6.20	15.60	0.00	24.80	129.60	550.20	1295.40
1957	213.60	361.00	220.00	107.20	73.00	12.20	0.00	0.00	10.40		320.00		504.80
1958	340.80	96.40	26.20	92.90	25.20	0.20	78.00	6.00	47.20	164.80	114.00	420.20	1411.90
1959	306.20	18.00											
1960													
1961													
1962	486.00	253.00	125.40	96.40	2.20	20.60	8.00	0.40	50.20	152.40	143.20	567.00	1904.80
1963	105.40	192.00	2.00	14.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.40	107.40	95.00	542.20
1964	499.30	391.10	121.60	22.20	29.20	26.40	78.20	4.00	0.00	343.40	387.50	462.70	2365.60
1965	345.40	450.80	283.60	39.40	31.00	0.00	0.00	37.00	59.20	282.00	256.80	293.00	2078.20
1966	510.60	203.30	165.87	21.69	45.20	0.00	0.00	0.00	42.20	257.60	334.80	578.60	2159.86
1967	296.40	549.40	230.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	89.00	364.80	438.20	1972.80
1968	205.20	738.60	349.80	84.00	18.20	0.00	0.00	26.00	68.60	405.10	387.20	373.40	2656.10
1969	406.20	246.60	234.60	36.00	16.00	31.00	16.20	20.40	34.80	407.10	465.20	558.80	2472.90
1970	745.00	224.20	76.20	159.20	8.40	6.00	42.40	42.20	186.00	361.20	386.00	306.00	2542.80
1971	158.00	254.00	299.60	101.00	42.00	106.00	4.00	4.00	74.60	234.80	739.40		2436.70
1972	96.10	171.70	183.60	75.80	9.20	0.00	59.30	4.60	39.60	165.60	416.40	337.80	1559.70
1973	161.60	156.60	283.50	31.00	27.10	31.20	0.00	0.00	40.20	119.20	397.00	291.60	1539.00
1974	192.50	45.80	260.30	114.80	25.00	17.40	0.00	7.00	3.00	162.50	125.00	375.20	1328.50
1975	206.00	290.50	35.00	28.00	94.70	12.60	50.70	0.00	21.00	105.20	458.20	117.10	1419.00
1976	112.60	144.80	82.40	9.70	25.10	0.00	61.20	24.60	99.70	222.70	261.80	328.80	1373.40
1977	490.80	11.00	181.90	114.20	2.00	2.00	5.20	1.70	75.60	26.60	169.30	232.30	1312.60
1978	386.30	438.90	103.40	79.90	99.20	0.00	81.50	2.70	39.60	157.20	323.40	272.70	1984.80
1979	470.80	769.00	212.70	77.40	85.60	0.00	30.40	39.80	76.90	58.90	272.70	344.20	2438.40
1980	469.50	124.10	47.40	298.00	0.50	30.50	0.30	3.10	19.60	50.40	249.60	504.10	1797.10
1981	369.40	70.80	157.80	45.20	11.90	54.00	0.00	30.80	5.60	158.40	625.20	397.30	1926.40
1982	419.30	72.71	362.30	29.56	0.00	0.00	4.40	3.60	14.20	72.70	114.50		
1983	722.50	260.40	342.00	165.70	92.70	8.00	44.30	5.20	86.10	169.40		464.90	
1984	74.10	6.10	80.00	48.50	8.20	0.00	4.20	60.80	87.10	44.20	186.10	607.10	1206.40
1985	910.50	277.80	440.60	24.20	51.50	3.40	0.00	6.40	45.00	77.10	271.10		
1986	241.70	118.80	95.40	52.40	64.00	7.00	38.80	41.60	10.40		230.40	559.20	1459.70
1987	213.10	57.20	305.20	104.20	38.40	54.30	5.60	1.90	76.00	52.50	167.60	639.40	1715.40
1988	278.60	273.10	167.50	107.60	44.80	1.60	0.00	0.00	76.00	74.10	149.70	294.60	1467.60
1989	150.50	219.00	189.70	1.50	2.60	54.20	46.80	33.00	87.00	197.00	299.30	564.80	1845.40
1990	116.20	206.40	119.10	91.90	48.60	0.60	18.30	69.80	45.20	115.60	198.40	217.00	1247.10
1991	808.00	175.00	197.60	91.40	30.90	0.00	0.00	0.00	68.20	61.80	201.60	457.40	2091.90
1992	643.50	180.00	46.20	82.40	45.80	0.00	3.50	18.20	0.00	98.20	284.60	595.70	1998.10
1993	276.80	224.10	114.60	218.60	1.00	26.60	0.00	4.40	72.40	165.40	35.60	339.60	1479.10
1994	359.10	39.60	352.00	78.40	46.00	9.00	0.00	0.00	3.40	74.80	233.30	305.00	1500.60
1995	99.20	239.60	258.40	99.40	25.40	4.60	0.00	0.00	75.20	261.80	246.20	629.30	1939.10
1996	245.20	174.60	292.20	37.90	19.10	2.20	2.50	17.90	70.10	108.60		316.60	
1997	506.70	92.40	153.50	160.00	49.00	30.00	1.00	1.00	82.20	82.50	176.00	163.60	1649.90
1998	238.00	276.30	107.80	97.90	86.20	2.60	0.00	45.70	45.40	202.00	334.70	274.10	1710.70
1999	216.73	90.60	248.00	90.40	6.20	2.30	1.40	0.00	56.30	89.30	321.30	355.50	1478.03
2000	438.00	288.50	143.30	47.10	6.40	0.00	2.70	19.50	66.00	47.70	327.52	357.60	1744.32
2001	138.50	87.40	112.00	29.20	52.70	0.00	14.00	46.40	79.10	138.10	526.95	511.10	1735.45
2002	339.10	325.60	109.80	25.60	17.70	0.00	3.60	1.80	117.80	34.20	216.10	451.50	1642.80
2003	994.70	158.50	167.40	26.40	22.20	0.00	0.00	20.60	11.60	22.00	282.50	329.80	2035.70
2004	542.80	473.50	136.60	266.50	38.60	26.20	41.60	0.00	0.00	52.60	143.70	524.30	2236.40
2005	264.70	203.60	299.60	37.50	41.90	26.00	10.60	19.60	122.40	28.80	314.10	358.20	1727.00
2006	161.60	114.90	255.80	74.70	51.20	7.60	16.80	17.00	63.80	101.90	358.60	327.80	1551.70
2007	418.20	121.90	65.40	91.90	10.00	0.10	9.50	0.00	3.10	141.70	143.40	324.00	1329.20
2008	306.00	250.60	514.00	108.60	1.00	0.00	0.00	27.30	98.80	53.40	258.50	688.40	2306.60
2009	304.00	228.90	249.10	69.20	12.70	36.00	0.20	23.10	107.70	339.70	195.90	620.70	2187.20
2010	283.40	44.40	298.60	65.80	31.50	2.90	0.00	0.00	80.50	253.30	389.30	475.60	1925.30
2011	340.30	110.60	351.60	38.30	26.80	12.70	0.00	0.00	6.00	193.80	269.60	715.00	2064.70
2012	402.90	41.40	201.20	73.80	69.00	54.30	0.00	0.50	28.20	20.90	264.60	50.40	1207.20
2013	400.00	132.40	183.90	92.30	61.80	18.40	0.00	0.00	43.30	140.30	113.30	547.70	1733.40
2014	171.20	52.60	139.20	144.30	23.40	6.90	50.10	2.70	1.80	97.30	158.90	176.80	1025.20
2015	122.70	204.50	134.90	66.20	75.90	5.00	9.30	0.00	43.00	73.00	247.70	219.20	1201.40
2016	461.20	223.70	61.70	23.00	0.00	55.40	0.00	1.60	47.10	68.80	288.10	303.90	1534.50
2017	135.40	190.20	145.70	36.00	17.90	19.50	0.00	0.00	19.70	168.60	213.20	309.40	1255.60
2018	162.00	198.80	292.00	23.60	16.00	0.00	2.50	24.60	43.00	201.30	369.40	734.80	2068.00
2019	107.60	295.90	174.10	114.70	25.20	8.70	0.00	0.00	19.30	91.50	551.70	137.85	1526.55
2020	1065.60	273.70	277.20	59.90	45.20	2.10	6.90	19.70	15.10	109.10	235.50	307.60	2417.60
2021	351.20	451.65	78.60	5.80	2.50	21.80	0.00	7.80	20.70	207.20	247.77	390.57	1785.59
2022	551.51	386.32	13.10	49.29	63.19	3.77	3.77	7.92	40.17	201.42	283.34	447.40	2051.18
													outliers
													Média Total Anual (mm)
Minimas	4.00	6.10	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.90	24.40	50.40	542.20
Máximas	1124.10	793.20	589.80	298.00	101.00	115.60	81.50	69.80	186.00	407.			

**APÊNDICE C – APORTE EXTERNO DO RIBEIRÃO DO PRATA PARA A CAVA DE
ÁGUAS CLARAS**

DATA	Q (m ³ /h)	DATA	Q (m ³ /h)	DATA	Q (m ³ /h)
01/02/2002	224.61	03/02/2003	225.03	04/08/2004	280.30
30/03/2002	207.97	01/07/2003	223.00	02/09/2004	283.54
30/04/2002	220.41	01/08/2003	223.00	29/07/2005	248.50
03/06/2002	228.83	01/09/2003	223.00	31/08/2005	257.00
02/07/2002	220.41	01/10/2003	223.00	21/09/2005	254.00
01/08/2002	223.35	03/11/2003	223.00	26/10/2005	211.00
02/09/2002	225.03	05/01/2004	223.00	21/11/2005	246.00
30/09/2002	225.03	01/03/2004	223.00	14/12/2005	260.00
01/11/2002	225.03	01/04/2004	223.00	04/01/2006	199.30
02/12/2002	225.03	15/04/2004	255.60	13/04/2006	272.00
03/01/2003	225.03	10/05/2004	230.00	30/06/2006	254.00

APÊNDICE D – SEPARAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MONITORAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA POR GRUPO

Cauê	Gandarela	Moeda	Batatal	Nova Lima	Cercadinho	Barragem	Pilha
MACATPZ001	MACATTMNA045	MACCVMPZ354	MACCVMPZ381	MACB7APZ001	MACATTMNA030	MACB5DANA01	MACG0NA001
MACATPZ002	MACCVMPZ361	MACCVMPZ355	MACCVMPZ389	MACB7APZ002	Cobertura	MACB5DANA02	MACG0NA002
MACATPZ003	MACCVMPZ362	MACCVMPZ356	MACCVMPZ390	MACG1PZ006	MACCVMPZ378	MACB5DANA03	MACG0NA003
MACATPZ004	MACCVMPZ363	MACCVMPZ357	MACFG00007	MACG1PZ007	MACLONA058	MACB5DANA04	MACG0NA005
MACATPZ005	MACCVMPZ364	MACCVMPZ376	MACG0PZ008	MACG2NA004	MACLONA059	MACB5DANA05	MACG0PZ009
MACATPZ006	MACLOPZ064	MACG-1PZ001	MACG1PZ001	MACG2PZ005	MACLONA060	MACB5DANA06	MACG1PZ002
MACATTMPZ046		MACG-1PZ002	MACG1PZ003	MACG2PZ006		MACB5DAPZ01	MACG1PZ004
MACATTMPZ047		MACG2PZ011	MACG2PZ009	MACG2PZ014		MACB5NA020	MACG1PZ005
MACATTMPZ048		MACG2PZ012	MACG2PZ018	MACG4NA002		MACB5NA021	MACG1PZ008
MACCVMNA360		MACG2PZ013	MACG2PZ019	MACG4NA003		MACB5NA022	MACG2NA001
MACCVMPZ351			MACG2PZ022	MACG4NA004		MACB5NA023	MACG2PZ010
MACCVMPZ352			MACG3PZ005	MACG4NA006		MACB5PZ007	MACG2PZ015
MACCVMPZ353			MACG4PZ003			MACB5PZ008	MACG2PZ016
MACCVMPZ358			MACLONA057			MACB5PZ009	MACG2PZ017
MACCVMPZ359			MACLONA061			MACB5PZ010	MACG2PZ020
MACCVMPZ360			MACLONA064			MACB5PZ011	MACG2PZ021
MACCVMPZ365			MACLOPZ061			MACB5PZ012	MACG2PZ023
MACCVMPZ366			MACLOPZ062			MACB5PZ013	MACG3APZ001
MACCVMPZ367			MACLOPZ066			MACB5PZ014	MACG3APZ002
MACCVMPZ368			MACLOPZ068			MACB5PZ015	MACG3APZ003
MACCVMPZ369			MACLOPZ072			MACB5PZ016	MACG3APZ004
MACCVMPZ370			MACLOPZ073			MACB5PZ017	MACG3APZ005
MACCVMPZ371			MACLOPZ075			MACB5PZ018	MACG3PZ001
MACCVMPZ372						MACB5PZ019	MACG3PZ002
MACCVMPZ373						MACB7APZ003	MACG3PZ003
MACCVMPZ374						MACB7APZ004	MACG3PZ004
MACCVMPZ375						MACB7BNA001	MACG3PZ006
MACCVMPZ377						MACB7BNA002	MACG4PZ001
MACCVMPZ379						MACB7BNA003	MACG4PZ002
MACCVMPZ380						MACB7BNA004	MACG4PZ004
MACCVMPZ382						MACB7BNA005	
MACCVMPZ384						MACB7BPZ001	
MACCVMPZ385						MACB8BNA001	
MACCVMPZ386						MACB8BNA002	
MACCVMPZ387						MACB8BNA003	
MACCVMPZ388						MACB8BNA004	
MACCVMPZ391						MACB8BNA005	
MACLONA062							
MACLONA063							
MACLOPZ063							
MACLOPZ065							
MACLOPZ067							
MACLOPZ069							
MACLOPZ070							
MACLOPZ071							
MACLOPZ074							

APÊNDICE E – UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO, COM CONSOLIDAÇÃO DE SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

Unidade hidrogeológica	Litoestratigrafia	K (m/d)		Porosidade (%)		Recarga (% da precipitação anual)		Caraterísticas
		mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	
Aquífero Nova Lima ⁽²⁾⁽³⁾	xistos e filitos com intercalações de formação ferrífera bandada do Grupo Nova Lima	0.000009	0.0009	1	2.5	5	20	Constitui um meio de permeabilidade muito pobre, apresentando fluxo e armazenamento de água restrito, associado majoritariamente a descontinuidades na rocha (fraturas, juntas, foliação, falhas) devido a essa característica pode ser considerado uma barreira hidráulica na região.
Aquífero Moeda ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	quartzitos e quartzitos ferruginosos da Formação Moeda	0.0003	0.86	2.00	15.8	10	20	Esse aquífero possui características hidrodinâmicas variadas em função das suas propriedades físicas. Quando as rochas estão compactas e maciças apresentam apenas permeabilidade secundária (meio fraturado), com baixa porosidade. Neste caso a condutividade hidráulica estará diretamente relacionada ao grau de faturamento da rocha. Quando friáveis, apresentam-se em geral com melhores características aquíferas, possuindo uma boa porosidade e permeabilidade primária de interstícios, e secundária, proveniente da alteração do quartzito são.
Aquitardo Batatal ⁽²⁾⁽³⁾	filitos da Formação Batatal	0.00001	0.004	0.25	0.75	0	5.8	Caracterizados como aquícludes ou aquípardos, uma vez que, igualmente às rochas do Grupo Nova Lima, apresentam baixa transmissividade, fluxo e armazenamento de água restritos, representando também uma barreira para o fluxo d'água subterrânea
Aquífero Cauê ⁽¹⁾⁽²⁾	hematitas da Formação Cauê	0.009	8.6	3.1	35.3	38.4	41	Trata-se da presença de itabiritos diversos (goethíticos, anfibolíticos e carbonáticos) e corpos de hematitas, predominantemente da Formação Cauê. Tais litotipos ocorrem como rochas friáveis a compactas, constituindo um sistema aquífero misto, com dupla porosidade, granular e fissural. Em geral, e comparativamente às outras unidades, apresentam valores mais altos de porosidade efetiva, recarga e condutividade hidráulica.
Aquitardo Gandarela ⁽²⁾⁽³⁾	dolomitos e itabiritos dolomíticos da Formação Gandarela	0.00086	0.400	1.5	14.2	15	25	Possuem características hidrodinâmicas relacionadas ao seu grau de carstificação. De maneira geral, no Quadrilátero Ferrífero são poucos os casos conhecidos em que os dolomitos desenvolveram carstificação. Por isso os dolomitos nesta região são classificados em geral como aquícludes e/ou aquípardos.

(1) (MOURÃO, 2007)

(2) (CASTRO; ENDO; GANDINI, 2020)

(3) (MAGALHÃES et al., 2022)

APÊNDICE F – RESUMO DAS INFORMAÇÕES E CONFIGURAÇÕES DO MODELO NUMÉRICO.

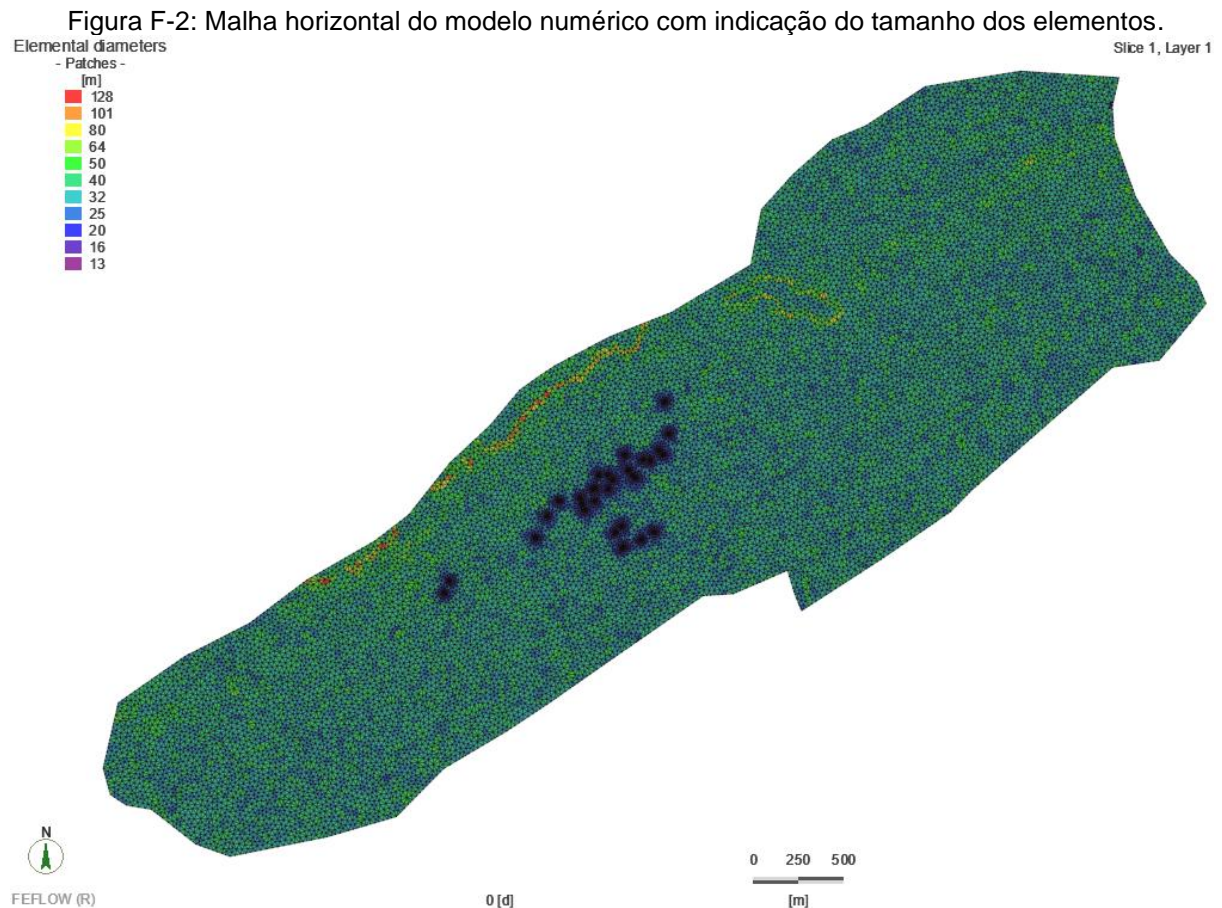
O modelo numérico foi desenvolvido sobre uma malha triangular tridimensional de elementos finitos, com um total de 726.674 nós e 1.391.755 elementos, sendo 19.123 nós e 37.615 elementos por slice/camada, como apresentado na Figura F-1. A malha foi ajustada de forma a melhorar sua qualidade e eliminar possíveis instabilidades numéricas (violação de Delaunay, ângulo dos triângulos).

Figura F-1: Resumo das características do modelo numérico.

Problem summary	
Property	Value
▼ Problem Class	
Description	Separate flow process
Type	Unsaturated
Projection	3D unsaturated aquifer
Time Class	Transient flow
Time Stepping	Forward Euler/Backward Euler (FE/BE) predictor-corrector
Upwinding	No upwinding
Total number of species	0
Number of chemical species	0
▼ Mesh	
Number of Dimensions	3
Nodes per Element	6
Element Type	Triangular prism
Mesh Elements	1391755
Mesh Nodes	726674
▼ Problem Geometry	
▼ Global Origin	
X	612450.213097428 [m]
Y	7789612.17649181 [m]
Width	6059.12 [m]
Height	4315.32 [m]
Depth	935 [m]
Vertical Exaggeration	1 : 1
Number of Layers	37
Number of Slices	38
Elements per Layer	37615
Nodes per Slice	19123
▼ Mesh Quality	
Interior Holes	0
Obtuse-angled triangles	0.2% > 120°, 16.8% > 90°
Delaunay-violating triangles	0.0%
▼ Domain Area and Volume	
Total Area	9.93664e+06 [m ²]
Total Volume	6.88352e+09 [m ³]

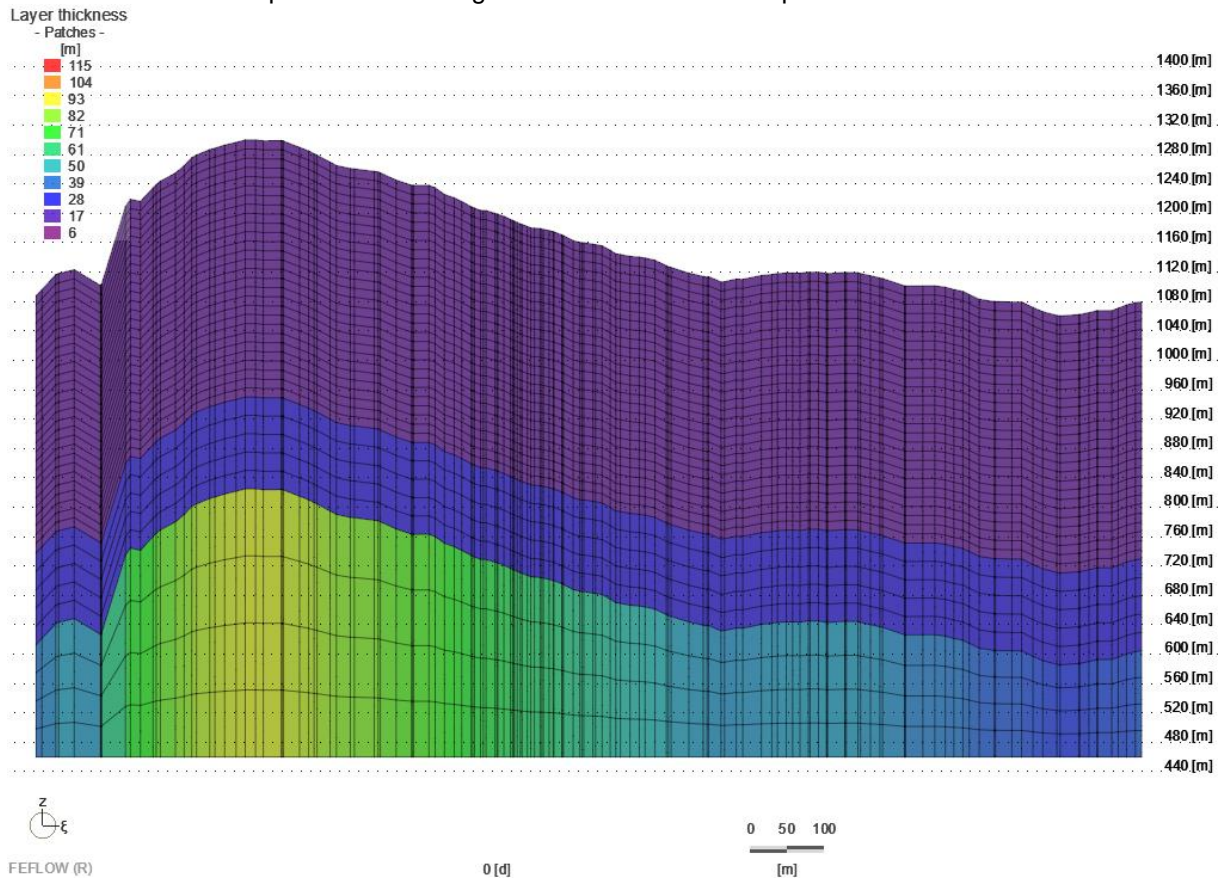
Buscou-se criar uma malha com refinamento suficiente para representar com aderência o fluxo de água subterrânea na área de estudo, sendo que mais de 98% dos elementos possuem diâmetro menor que 50 m, num polígono do modelo que

possui 9,94 km². Um maior refinamento foi ainda feito na região dos poços de rebaixamento, a fim de evitar superestimar o efeito do seu bombeamento, como indicado na Figura F-2.



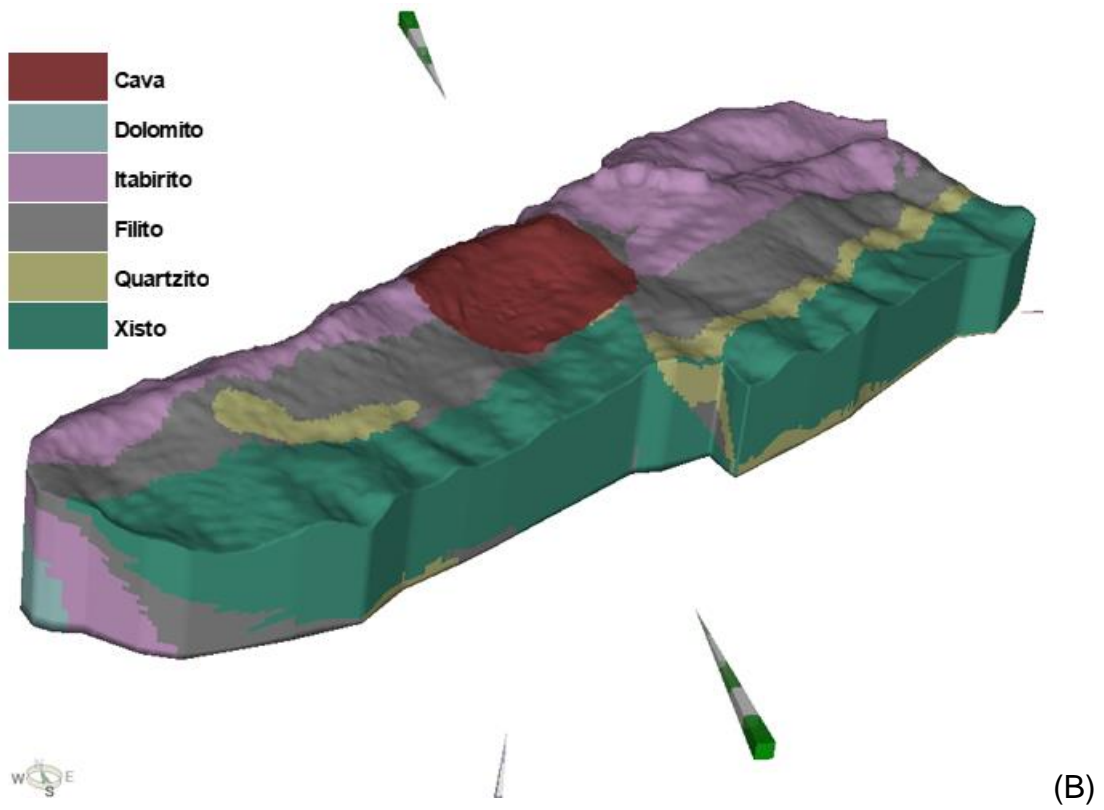
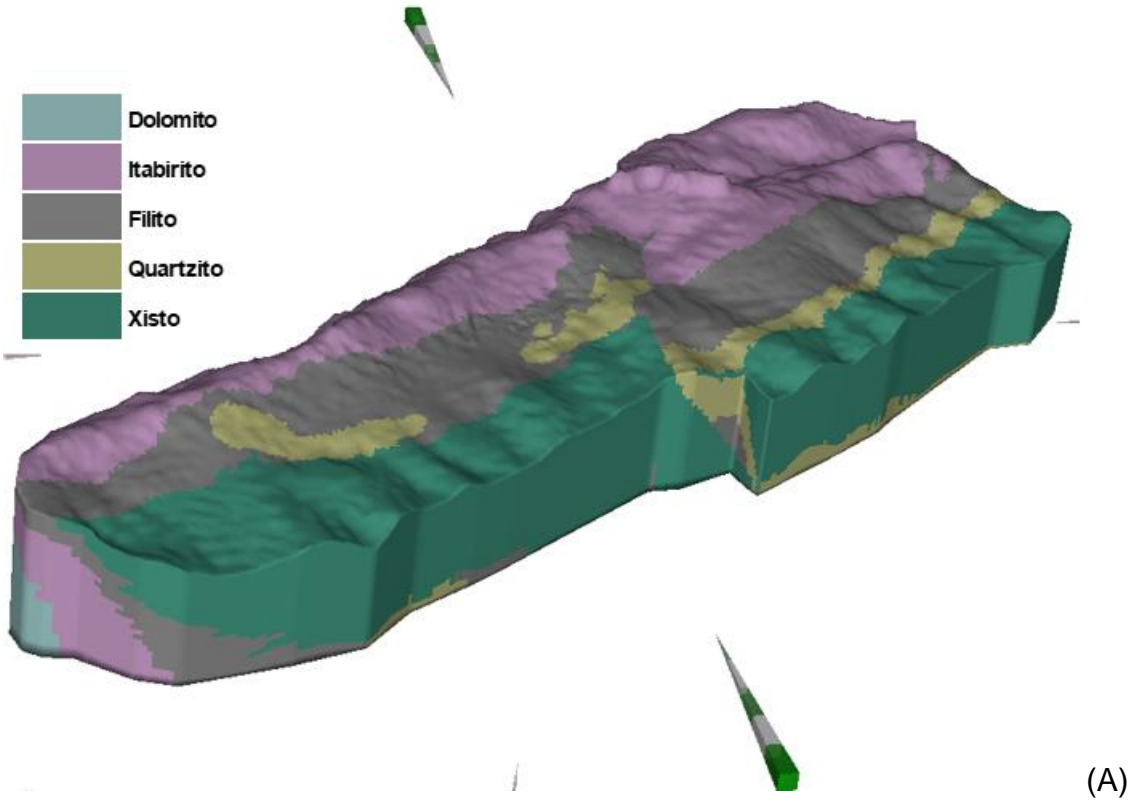
Verticalmente o modelo possui 37 camadas e 38 slices, sendo que as 28 camadas superiores possuem espessura de 13 metros, como a altura dos bancos da cava, seguidos por 5 camadas de 25 metros e as camadas inferiores com espessuras variadas, atingindo a cota mínima de 460 metros (Figura F-3). O topo do modelo foi definido com base na topografia do período anterior ao início da operação da mina.

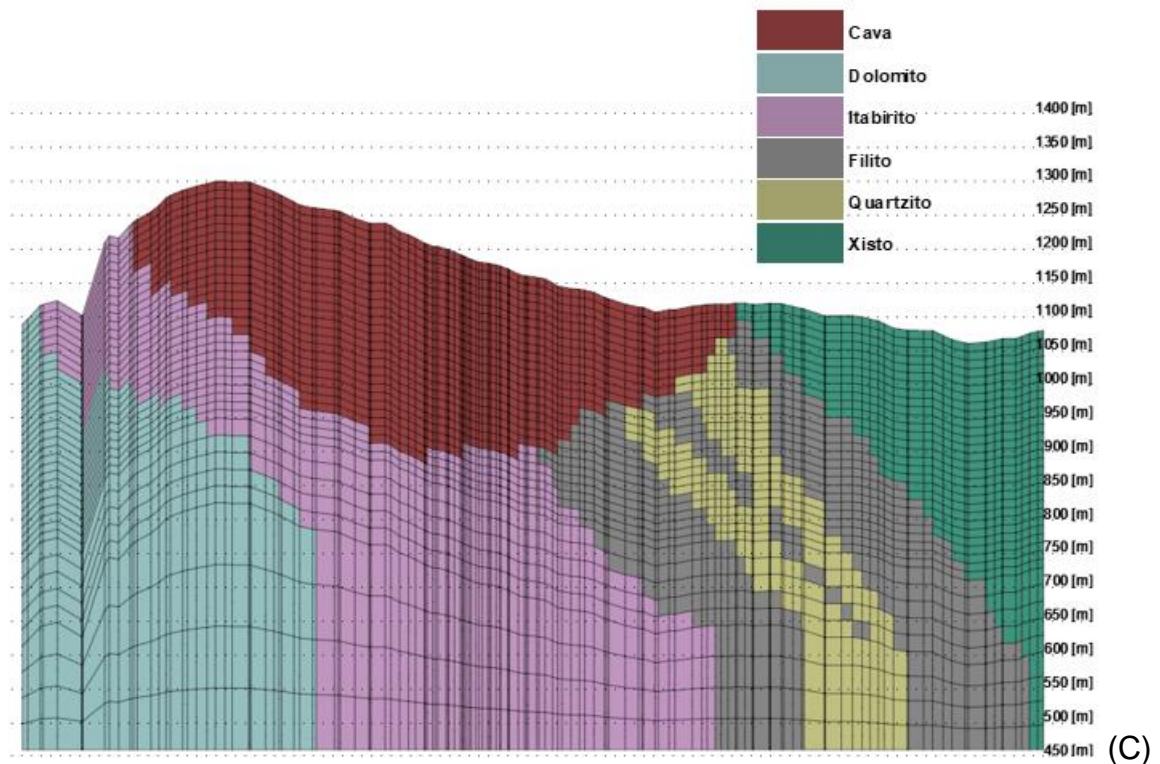
Figura F-3: Malha vertical do modelo numérico com suas respectivas espessuras, de camadas superiores mais delgadas a camadas mais espessas no fundo.



Sobre essa malha foram atribuídas as propriedades hidrodinâmicas, como condutividade hidráulica e armazenamento, a partir do modelo geológico disponibilizado pela VALE, que foi desenvolvido no programa Leapfrog (Figura F-4). A contribuição direta da água de chuva sobre as unidades hidrogeológicas e cava, ou recarga, também se deu segundo a geologia da área, com cada unidade respondendo a uma percentagem específica de recarga.

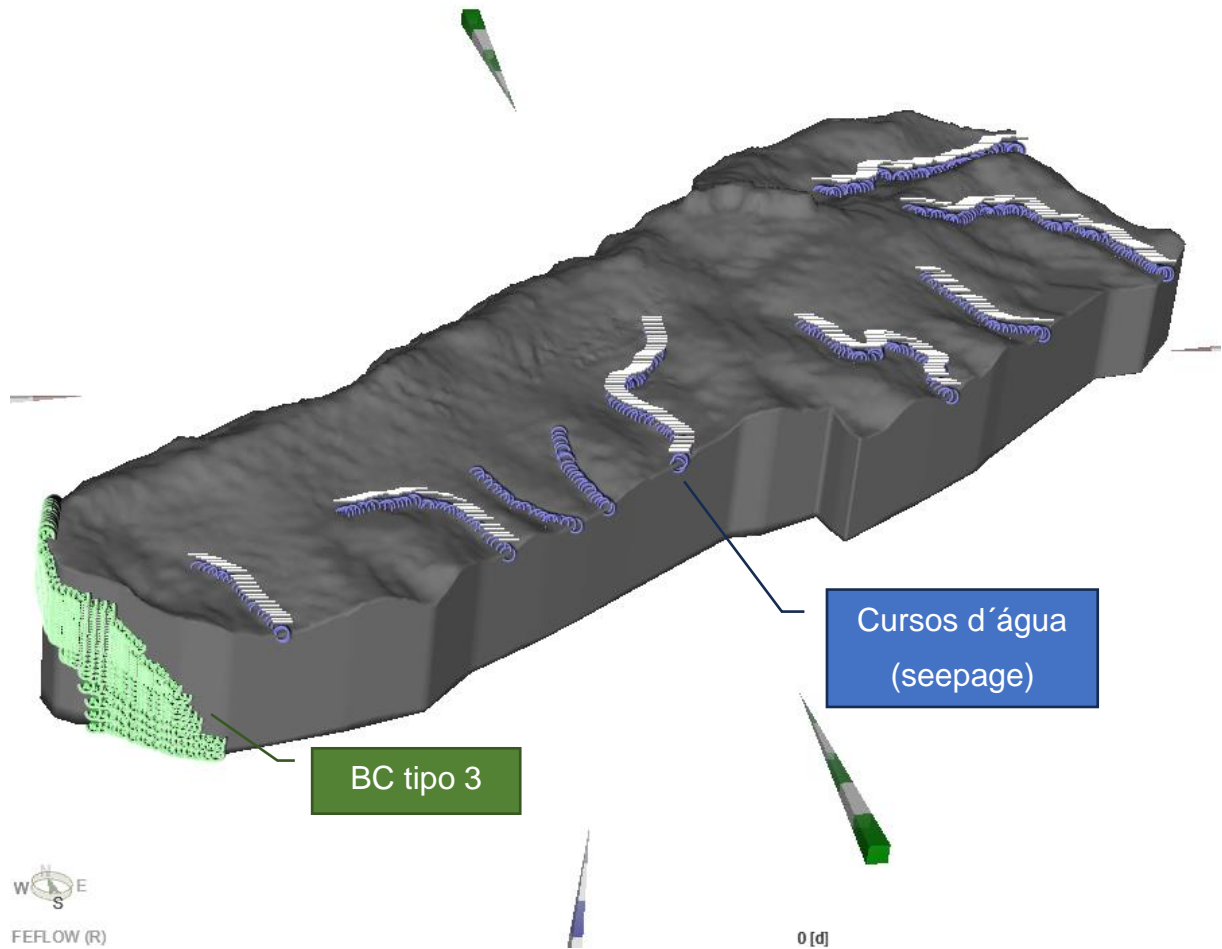
Figura F-4: Modelo geológico da área de estudo, que serviu de base para distribuição das propriedades hidrodinâmicas. (A) Período pré-operação; (B) Com a cava; (C) Perfil vertical com cava.





Condições de contorno (BC) foram empregadas para representar os cursos d'água na área de estudo (como *seepage*), bem como a continuidade do sistema hidrogeológico para região sul/sudoeste (como condições de contorno do tipo 3 – *Fluid Transfer BC*). Para o período de operação do sistema de rebaixamento do nível d'água (regime transiente) foram também inseridas condições de contorno do tipo *seepage* para representar os poços de bombeamento que operaram na MAC. Foi feita essa opção em detrimento ao uso de BC do tipo *Multilayer Well* por conta da falta de instabilidade numérica do modelo, quando esse último era empregado.

Figura F-4: Cursos d'água e continuidade do sistema hidrogeológico.



Foi utilizada a simulação do fluxo de água subterrânea em meio saturado e não saturado com incorporação de parâmetros para a Equação de Richard. No caso foram empregadas curvas *Splines* de saturação e de condutividade relativa para representar a relação de saturação e pressão na zona não saturada.

APÊNDICE G – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Parâmetro	Descrição	Equação	Amplitude	Valor ótimo	Alvo
R2	Coefficiente de determinação	$\left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(C_i - \bar{C})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}} \right]^2$	0 a 1	1	> 0.85
PBIAS	Percentual de viés (<i>Percent bias</i>)	$\frac{\sum_{i=1}^n O_i - C_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100$	$-\infty$ a ∞	0	< 3.0
NSE	Coefficiente de Nash-Sutcliffe (<i>Nash-Sutcliffe efficiency</i>)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	$-\infty$ a 1	1	> 0.85
RMS (ou RMSE ou RMSE)	Resíduo médio quadrático (<i>Root mean square error/deviation</i>)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - C_i)^2}$	0 a ∞	0	-
RSR	RMSE normalizado pelo desvio padrão do valores observados (<i>RMSE-observations standard deviation ratio</i>)	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - C_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}$	0 a ∞	0	-
NRMS	RMSE normalizado pela amplitude dos valores observador	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - C_i)^2}}{O_{max} - O_{min}}$	0 a ∞	0	< 10%
EAM	Erro absoluto médio (<i>MAE - mean absolute error / ARM - absolute residual mean</i>)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - C_i $	0 a ∞	0	13.0

APÊNDICE H – RESUMO DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS APLICADOS EM CADA CENÁRIO

Cenário	Descrição	Parâmetro	Dolomito	Filito	Quartzito	Xisto	Itabirito argiloso	Itabirito goethítico	Itabirito compacto	Itabirito dolomítico	Itabirito friavel	Hematita friavel	Cava	
Cenário A	Sem calibração. Todos os parâmetros tomados a partir de referências bibliográficas.	Kx (m/d)	0.00500	0.0005	0.08	0.0005	0.05	0.225	0.1	0.01000	0.5	1	1000	
		Ky (m/d)	0.00500	0.0005	0.08	0.0005	0.05	0.225	0.1	0.01000	0.5	1	1000	
		Kz (m/d)	0.00500	0.0005	0.08	0.0005	0.05	0.225	0.1	0.01000	0.5	1	1000	
		Ss (1/m)	0.00100	0.002	0.015	0.0001	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.00250	0.0025	0.0025	0.900
		Sy (-)	0.10	0.2	1.5	0.01	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.900
		Recarga (mm/ano)	350	88	263	88	701	701	701	701	350	701	701	dobro de cada litologia
Recarga (%)	20%	5%	15%	5%	40%	40%	40%	40%	20%	40%	40%			
Cenário B	Com calibração em regime permanente (pré-bombeamento). Calibradas a condutividade hidráulica e recarga das litologias. Parâmetros para o vazios da cava tomados a partir de referências bibliográficas.	Kx (m/d)	0.00053	0.0075	0.45	0.0075	0.01	0.01	1.5	0.01000	1.5	2.85	1000	
		Ky (m/d)	0.00053	0.0075	0.45	0.0075	0.01	0.01	1.5	0.01000	1.5	2.85	1000	
		Kz (m/d)	0.00053	0.0075	0.45	0.0075	0.01	0.01	1.5	0.01000	1.5	2.85	1000	
		Ss (1/m)	0.0025	0.0045	0.0045	0.0045	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.900
		Sy (-)	0.25	0.045	0.045	0.045	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.900
		Recarga (mm/ano)	325	95	350	75	500	500	500	325	500	500	500	dobro de cada litologia
Recarga (%)	19%	5%	20%	4%	29%	29%	29%	19%	29%	29%				
Cenário C	Com calibração em regime permanente (pré-bombeamento) e regime transiente (fase de rebaixamento). Calibrado o armazenamento das litologias. Calibrada a recarga da cava.	Kx (m/d)	0.00053	0.0075	0.45	0.0075	0.01	0.01	0.75	0.00053	1.5	2.85	1000	
		Ky (m/d)	0.00053	0.0075	0.45	0.0075	0.01	0.01	0.75	0.00053	1.5	2.85	1000	
		Kz (m/d)	0.00053	0.0075	0.45	0.0075	0.01	0.01	0.75	0.00053	1.5	2.85	1000	
		Ss (1/m)	0.00125	0.002925	0.0045	0.0045	0.003375	0.003375	0.000703125	0.00125	0.00047	0.0009	0.900	
		Sy (-)	0.25	0.036	0.045	0.045	0.045	0.045	0.1875	0.25	0.125	0.25	0.900	
		Recarga (mm/ano)	325	95	350	75	500	500	500	325	505	505	1132.365	
Recarga (%)	19%	5%	20%	4%	29%	29%	29%	19%	29%	29%	65%			
Cenário D	Com calibração em regime permanente (pré-bombeamento), regime transiente (fase de rebaixamento e fase de recuperação do nível d'água). Calibrados os parâmetros do vazio da cava.	Kx (m/d)	0.00053	0.0075	0.45	0.0075	0.225	0.225	0.75	0.00053	1.5	2.85	100	
		Ky (m/d)	0.00053	0.0075	0.45	0.0075	0.225	0.225	0.75	0.00053	1.5	2.85	100	
		Kz (m/d)	0.00053	0.0075	0.45	0.0075	0.225	0.225	0.75	0.00053	1.5	2.85	100	
		Ss (1/m)	0.00	0.0000975	0.0045	0.0045	0.003375	0.003375	0.0007	0.00125	0.00047	0.0009	0.001	
		Sy (-)	0.25	0.0012	0.045	0.045	0.05	0.05	0.1875	0.25	0.125	0.25	0.001	
		Recarga (mm/ano)	331	70	226	70	505	505	505	331	505	505	taxa variável	
Recarga (%)	19%	4%	13%	4%	29%	29%	29%	19%	29%	29%				

ANEXO A – CÓDIGO 10 CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA FINS DE REBAIXAMENTO DE NÍVEL DE ÁGUA PARA MINERAÇÃO

1

Instruções para elaboração de processo de outorga

CÓDIGO 10

CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA FINS DE REBAIXAMENTO DE NÍVEL DE ÁGUA PARA MINERAÇÃO

1. Instruções para o preenchimento do formulário

- Preencher os itens de **1 a 9 e 14** do **Formulário Técnico – Água Subterrânea**¹;
- Utilizar a **Tabelas de Apoio**¹ para o preenchimento dos campos do formulário;
- No item **7** deve ser informada a finalidade do uso do recurso hídrico;
- Os itens **10 a 13** não devem ser preenchidos para o modo de uso “Rebaixamento de nível para Mineração”;
- No item **14** devem ser informadas as coordenadas correspondentes a um ponto médio do sistema de rebaixamento. A vazão requerida corresponde à vazão máxima projetada do sistema.

2. Instruções para elaboração do relatório técnico

- Caracterização e descrição geral do empreendimento;
- Mapa atualizado do empreendimento;
- Caracterização geológica e estrutural, em escala regional e local;
- Mapa geológico-estrutural, em escala de detalhe, da área de influência do rebaixamento;
- Modelo hidrogeológico conceitual da área de influência do rebaixamento;
- Modelo numérico do fluxo de água subterrânea com as projeções de vazões de bombeamento e a avaliação dos impactos sobre os recursos hídricos da região, considerando a interferência na disponibilidade de água para os demais usuários;
- Descrição do uso da água no empreendimento, com a caracterização de todas as fontes de abastecimento, finalidades e vazões;
- Mapa hidrogeológico-estrutural, em escala de detalhe, da área de influência do rebaixamento;
- Plano de monitoramento hidrogeológico da área de influência do rebaixamento (pluviometria, fluviometria, piezometria, hidroquímica, etc.), contemplando os pontos e os instrumentos de medição, a periodicidade e a metodologia de tratamento de dados;
- Mapa de pontos da rede de monitoramento hidrogeológico;
- Perfis litológicos-constitutivos de poços de bombeamento e monitoramento;
- Interpretação dos dados de monitoramento hidrogeológico quali-quantitativo;
- Plano de uso da água subterrânea proveniente do rebaixamento contemplando as finalidades, vazões e formas de adução;
- Projeto detalhado do sistema de rebaixamento de nível de água, contemplando as estruturas de desaguamento, níveis de água e vazões projetadas ao longo do tempo;
- Descrição detalhada das estruturas/equipamentos que compõem o sistema de rebaixamento (poços tubulares, drenos, bombas, etc.);
- Inventário de pontos de água subterrânea na área do rebaixamento e seu entorno, com a caracterização detalhada de nascentes, poços tubulares, manuais e de monitoramento;
- Inventário de usuários de águas superficiais e subterrâneas na área do rebaixamento e seu entorno, com a caracterização detalhada do tipo de captação e suas características, finalidade de uso e vazão estimada.

¹ Documentos disponíveis em <http://www.igam.mg.gov.br/outorga/formularios>