

Arcos Verde

Engenharia e Consultoria Ambiental

RELATÓRIO TÉCNICO DE OUTORGA

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

CSN CIMENTOS BRASIL S.A.

BARROSO / MG

OUTUBRO DE 2023



CSN

C I M E N T O S

RELATÓRIO TÉCNICO PARA OUTORGA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA
FINS DE REBAIXAMENTO DE NÍVEL DE ÁGUA PARA MINERAÇÃO
CSN
96 Páginas

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO.....	8
2. IDENTIFICAÇÃO DO EMPREENDIMENTO E DOS RESPONSÁVEIS.....	10
2.1. <i>Identificação do empreendedor</i>	<i>10</i>
2.2. <i>Identificação do empreendimento.....</i>	<i>10</i>
2.3. <i>Coordenadas do ponto de uso do recurso hídrico</i>	11
2.4. <i>Identificação da empresa responsável pela elaboração do estudo.....</i>	<i>11</i>
2.5. <i>Identificação da equipe técnica.....</i>	<i>11</i>
3. CARACTERIZAÇÃO E DESCRIÇÃO GERAL DO EMPREENDIMENTO	12
4. MAPA ATUALIZADO DO EMPREENDIMENTO.....	15
4.1. <i>Rota de localização.....</i>	<i>15</i>
4.2. <i>Detalhe do empreendimento.....</i>	<i>18</i>
5. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E ESTRUTURAL.....	20
5.1. <i>Caracterização Geológica em escala regional</i>	<i>20</i>
5.2. <i>Caracterização Geológica em escala local.....</i>	<i>23</i>
5.3. <i>Caracterização Geológica Estrutural</i>	<i>26</i>
6. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO REBAIXAMENTO	28
7. MODELO NUMÉRICO DO FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	32
7.1. <i>Definição do domínio e malha de cálculo</i>	<i>33</i>
7.2. <i>Consideração temporal.....</i>	<i>36</i>
7.3. <i>Definição das condições de contorno.....</i>	<i>36</i>
7.4. <i>Distribuição espacial das unidades hidrogeológicas</i>	<i>37</i>
7.5. <i>Calibração em regime permanente.....</i>	<i>40</i>
7.6. <i>Calibração em regime transiente</i>	<i>47</i>
7.7. <i>Projeções de vazões de bombeamento</i>	<i>59</i>

7.7.1.	Simulação para os planos de lavra do ano 1 ao ano 5	62
7.7.2.	Simulação de máximo rebaixamento	63
7.8.	<i>Avaliação dos impactos sobre os recursos hídricos da região, considerando a interferência na disponibilidade de água para os demais usuários</i>	<i>64</i>
8.	PLANO DE MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO REBAIXAMENTO	71
8.1.	<i>Monitoramento hídrico subterrâneo</i>	<i>71</i>
8.2.	<i>Monitoramento hídrico superficial</i>	<i>73</i>
8.3.	<i>Estimativa de recarga e descarga</i>	<i>75</i>
9.	MAPA DE PONTOS DA REDE DE MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO	81
10.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	84
10.1.	<i>Conclusões</i>	<i>84</i>
11.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXOS		91
	<i>ANEXO I - ANOTAÇÃO DE RESPONSABILIDADE TÉCNICA</i>	<i>92</i>
	<i>ANEXO II - VALORES MENSAIS DAS CARGAS HIDRÁULICAS NOS POÇOS DE MONITORAMENTO (MNM) - JULHO/2001 A JULHO/2022</i>	<i>93</i>
	<i>ANEXO III - VARIAÇÃO MENSAL DA CARGA HIDRÁULICA DOS POÇOS DE MONITORAMENTO - JULHO/2001 A JULHO/2022</i>	<i>94</i>
	<i>ANEXO IV - VALORES DE VAZÕES MENSAIS NA REDE DE MONITORAMENTO SUPERFICIAL</i>	<i>95</i>
	<i>ANEXO V - VARIAÇÃO MENSAL DE VAZÃO NA REDE DE MONITORAMENTO SUPERFICIAL</i>	<i>96</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área Diretamente Afetada pelo empreendimento.	14
Figura 2 - Localização das áreas do empreendimento em Barroso/MG. Fonte: IBGE	16
Figura 3 - Rota de acesso para o empreendimento da CSN Cimentos.....	17
Figura 4 - Mina Capoeira Grande.....	19
Figura 5 - Mapa geológico da região em torno de Barroso, no sudeste de Minas Gerais. Fonte: CPRM, 2014.	22
Figura 6 - Mapa e perfil geológico do entorno da mina de Capoeira Grande. Fonte: RIBEIRO et al., 2002.....	25
Figura 7 - Aerofotografia em escala 1:60.000 com lineamentos nos arredores da Mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia, 2022.	27
Figura 8 - Definição do domínio de cálculo do modelo hidrogeológico no entorno da mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia, 2022.	35
Figura 9 - Representação das unidades hidroestratigráficas existentes na região de interesse do modelo. Fonte: Hidrovia, 2022.	39
Figura 10 - Dispersão dos valores de cargas hidráulicas calculadas e observadas	43
Figura 11 - Potenciometria calculada pelo modelo numérico para o ano de 2011. Fonte: Hidrovia, 2022.....	46
Figura 12 - Evolução da topografia da mina Capoeira Grande entre 2011 e 2022. Fonte: CSN Cimentos. Extraído de Hidrovia, 2022.	49
Figura 13 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PM-01-A. Fonte: Hidrovia, 2022.	50
Figura 14 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PM-03. Fonte: Hidrovia, 2022.	51
Figura 15 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PM-04. Fonte: Hidrovia, 2022.	51
Figura 16 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PM-05. Fonte: Hidrovia, 2022.	52
Figura 17 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PM-06A. Fonte: Hidrovia, 2022.	52
Figura 18 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o Poço da Copasa. Fonte: Hidrovia, 2022.	53
Figura 19 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PB1. Fonte: Hidrovia, 2022.	53
Figura 20 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PB2. Fonte: Hidrovia, 2022.	54

Figura 21 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no córrego Agrião. Fonte: Hidrovia, 2022.	54
Figura 22 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no córrego Cana. Fonte: Hidrovia, 2022.	55
Figura 23 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no córrego Monjolo a jusante. Fonte: Hidrovia, 2022.	55
Figura 24 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no córrego Monjolo a jusante. Fonte: Hidrovia, 2022.	56
Figura 25 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no córrego Praia. Fonte: Hidrovia, 2022.	56
Figura 26 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no sump da mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia, 2022.	57
Figura 27 - Potenciometria calculada pelo modelo numérico para julho/2022. Fonte: Hidrovia, 2022.	58
Figura 28 - Evolução futura da topografia da mina Capoeira Grande. Fonte: CSN.	61
Figura 29 - Vazões de bombeamento mínima, média e máxima calculadas para os planos de lavra futuros da mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia 2022.	63
Figura 30 - Curvas de rebaixamento simuladas para os anos 1 a 5, em função do avanço de lavra da mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia, 2022.	70
Figura 31 - Gráfico resultante do balanço hídrico na bacia do Córrego Cana. Fonte: Hidrovia, 2022.	78
Figura 32 - Gráfico resultante do balanço hídrico na bacia do córrego Agrião. Fonte: Hidrovia, 2022.	79
Figura 33 - Gráfico resultante do balanço hídrico na bacia do córrego Praia. Fonte: Hidrovia, 2022.	79
Figura 34 - Gráfico resultante do balanço hídrico na bacia do córrego Monjolo a montante. Fonte: Hidrovia, 2022.	80
Figura 35 - Gráfico resultante do balanço hídrico na bacia do córrego Monjolo a jusante. Fonte: Hidrovia, 2022.	80
Figura 36 - Localização da rede de monitoramento hídrico no entorno da Mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia, 2022.	82
Figura 37 - Drenagem local com a indicação das regiões de contribuição para as respectivas vazões medidas nos vertedores instalados nos córregos	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização do empreendimento.....	15
Tabela 2 - Correlação entre as unidades litoestratigráficas e hidroestratigráficas.....	28
Tabela 3 -Valores de recarga e de condutividade hidráulica obtidos na calibração permanente.....	42
Tabela 4 - Cotas de nível da água subterrânea associadas aos dispositivos de monitoramento na calibração preliminar.	42
Tabela 5 - Vazões de base calculadas pelo modelo e observadas em campo.....	44
Tabela 6 - Balanço de massa geral do modelo em termos de entradas e saídas de água.....	45
Tabela 7 - Valores de recarga (mm/ano) utilizados na calibração transiente. Fonte: Hidrovia, 2022.....	47
Tabela 8 - Valores de armazenamento obtidos na calibração transiente.....	50
Tabela 9 - Vazões de bombeamento futuro mínima, média e máxima simulada para a mina Capoeira Grande entre os anos 1 ao 5. Fonte: Hidrovia, 2022.	63
Tabela 10 - Vazões de base média monitoradas entre 2001 e 2022. Fonte: Hidrovia, 2022	65
Tabela 11 - Estimativa da redução das vazões de base em função do plano de lavra futuro (m ³ /h). Fonte: Hidrovia, 2022.....	67
Tabela 12 - Estimativa da redução das vazões de base em função do plano de lavra futuro (%). Fonte: Hidrovia, 2022.....	68
Tabela 13 - Rede de monitoramento hídrico na área de influência da mina Capoeira Grande, Barroso/MG. Fonte: Hidrovia, 2022.....	73
Tabela 14 - Características da rede de monitoramento hídrico superficial.....	74
Tabela 15 - Seções fluviométricas e sub-bacias selecionadas para análise dos hidrogramas. Fonte: Hidrovia, 2022.....	77
Tabela 16 - Quantitativo médio do balanço hídrico nas sub-bacias a montante das seções fluviométricas selecionadas. Fonte: Hidrovia, 2022.....	77

1. APRESENTAÇÃO

Este relatório apresenta os dados necessários para o requerimento de Outorga de captação de Água Subterrânea para fins de rebaixamento de nível de água para mineração da CSN Cimentos Brasil, que obteve anteriormente outorga pela portaria 01158 de 20/08/2015 no Processo 18045/2012.

Os dados contidos no presente relatório técnico foram extraídos do estudo denominado AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS DE REBAIXAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA NO DOMÍNIO DE INFLUÊNCIA DA MINA CAPOEIRA GRANDE – MODELO NUMÉRICO DE FLUXO SUBTERRÂNEO, elaborado pela empresa HIDROVIA Hidrogeologia e Meio Ambiente Ltda e apresentado pelo empreendedor em outubro de 2022.

Estudos hidrogeológicos destinados ao entendimento das condições de desaguamento da Mina Capoeira Grande, localizada no município de Barroso/MG, vêm sendo realizados desde o início dos anos 2000, requeridos pela LafargeHolcim Brasil S/A.

Em decorrência das necessidades da empresa em expandir suas áreas de exploração de calcário e de obter a licença de operação e, simultaneamente, conhecer os efeitos de tais atividades no sistema hidrogeológico constituído pelos aquíferos de rochas calcárias, em 2003 foi realizado um estudo de avaliação das condições hidrogeológicas de rebaixamento do nível d'água no domínio de influência da Mina Capoeira Grande, Barroso/MG (HIDROVIA, 2003). Neste estudo foram apresentadas as atividades realizadas com o objetivo de elaborar um modelo conceitual da hidrogeologia do local e um modelo numérico em regime estacionário de modo a simular os impactos do rebaixamento do nível d'água na sua área de influência. Além disso, entre 2005 a agosto de 2013, foram apresentados estudos complementares anualmente, com a recalibração do modelo numérico em regime transiente, utilizando-se os dados de

monitoramento coletados pela LafargeHolcim Brasil S/A. Em 2016, 2019, 2020 e 2021 foi realizada a recalibração do modelo numérico em regime transiente a partir dos dados de monitoramento coletados pela contratante, respectivamente para o período de agosto/2011 a julho/2016, de julho/2016 a agosto/2019, agosto/2019 a agosto/2020 e agosto/2020 a agosto/2021.

O presente trabalho apresenta a continuação dos estudos anteriores, apresentada no estudo da Hidrovia onde é realizada uma revisão do modelo numérico, utilizando-se o software FEFLOW®, que possibilita a melhor adequação do refinamento da malha e das condições de contorno, bem como a recalibração do modelo numérico em regime transiente a partir dos dados de monitoramento coletados pela LafargeHolcim Brasil S/A, de agosto/2021 a julho/2022.

A finalidade do estudo da Hidrovia é apresentar o modelo hidrogeológico computacional, contemplando informações adquiridas, bem como realizar a avaliação dos prováveis impactos nos recursos hídricos subterrâneos decorrentes das atividades de rebaixamento do nível d'água do aquífero carbonático, para os cenários futuros, nas áreas de intervenção e adjacências da Mina Capoeira Grande.

Esta etapa visa subsidiar o processo de solicitação da outorga de rebaixamento, outorgada em momento anterior pela portaria 01158 de 20/08/2015 no Processo 18045/2012.

2. IDENTIFICAÇÃO DO EMPREENDIMENTO E DOS RESPONSÁVEIS

2.1. IDENTIFICAÇÃO DO EMPREENDEDOR

Razão Social: CSN CIMENTOS BRASIL S.A.
CNPJ: 60.869.336/0081-00
Inscrição Estadual: 590732291063
Endereço: Rua Tiradentes, S/N
Bairro: Rosário
CEP: 36.212-000
Telefone: (32) 3359-3383
Responsável Meio Ambiente: Robson Carneiro
E-mail: r.carneiro@csn.com.br

2.2. IDENTIFICAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

Razão Social: CSN CIMENTOS BRASIL S.A.
CNPJ: 60.869.336/0081-00
Inscrição Estadual: 590732291063
Propriedade: Fazenda Capoeira Grande
Matrícula: 856
Área do imóvel: 222,0274 hectares
Nº do recibo do CAR: MG-3105905-
FF0D.1C56.EAF9.47D8.ABFC.2141.AD1B.0491
Bacia Hidrográfica: Rio Grande
Sub-bacia: hidrográfica: Rio das Mortes
Curso d'água mais próximo: Rio das Mortes

2.3. COORDENADAS DO PONTO DE USO DO RECURSO HÍDRICO

Coordenadas	Latitude	Longitude
Geográficas	21° 11' 40" S	43° 59' 42" O
Decimais	-21.194444° S	-43.995000° O
Planas UTM	7656001 m S	604316 m E

DATUM SIRGAS 2000. Fuso 23 k

2.4. IDENTIFICAÇÃO DA EMPRESA RESPONSÁVEL PELA ELABORAÇÃO DO ESTUDO

Empresa: Arcos Verde Comércio e Serviços Ltda.
CNPJ: 25.507.492/0001-37
Endereço: Alameda das Acácias, 386
Bairro: Ernestina Bernardes
Município: Lagoa da Prata – MG
Telefone: (37) 3261-3025
Responsável Técnico pela empresa: Fernando Antonio Sasdelli Gonçalves
Formação Profissional: Engenheiro Agrônomo
Nº do registro: CREA/MG 54.019/D
E-mail de contato: servicos@arcosverde.com.br

2.5. IDENTIFICAÇÃO DA EQUIPE TÉCNICA

Nome	Formação Técnica	Nº do Registro Profissional	Atuação no Projeto
Fernando Antonio Sasdelli Gonçalves	Engenheiro Agrônomo	54.019/D	Coordenação
Débora Bernardes	Engenheira de Minas	180.926/D	Texto

3. CARACTERIZAÇÃO E DESCRIÇÃO GERAL DO EMPREENDIMENTO

A CSN iniciou a produção de cimento em 2009 e hoje está entre as líderes de vendas no Estado do Rio de Janeiro. Em 2015, a fábrica de cimentos localizada em Arcos (MG) começou a operar, elevando a capacidade instalada da companhia para 4,3 milhões de toneladas.

A combinação da escória de alto forno, resultante do processo siderúrgico na Usina Presidente Vargas, e do clínquer, produzido junto à mina de calcário em Arcos, transformaram a CSN em um dos mais competitivos players de cimento do país. A sinergia entre os negócios e a logística integrada das fábricas e dos centros de distribuição estrategicamente localizados permitem oferecer um atendimento diferenciado ao mercado consumidor.

Em 2021, a CSN Cimentos adquiriu os ativos na área de cimentos da franco-suíça LafargeHolcim no Brasil. Atualmente, entre seus ativos, a empresa conta com uma usina siderúrgica integrada; cinco unidades industriais, sendo duas delas no exterior; minas de minério de ferro, calcário, dolomita e estanho; uma forte distribuidora de aços planos; terminais portuários; participações em ferrovias; e participação em quatro usinas hidrelétricas, e está em contínuo processo de expansão.

As atividades da fábrica de cimento em Barroso se iniciam ainda na década de 1950, passando por diversos proprietários até a aquisição pela CSN Cimentos Brasil S.A.

Atualmente, o empreendimento encontra-se em processo de Licenciamento Ambiental Corretivo (LOC), no âmbito do Processo SEI nº 1370.01.0027673/2023-90. As atividades licenciadas nesse processo, conforme a DN COPAM nº 217/2017, são:

- A-02-07-0 Lavra a céu aberto - Minerais não metálicos, exceto rochas ornamentais e de revestimento
- A-05-01-0 Unidade de Tratamento de Minerais - UTM, com tratamento a seco

A Área Diretamente Afetada se refere às áreas de Mina Monjolo, Unidade de britagem, Mina Capoeira Grande e área administrativa e apoio da CSN Cimentos Brasil S/A. sujeitas à recuperação ambiental.

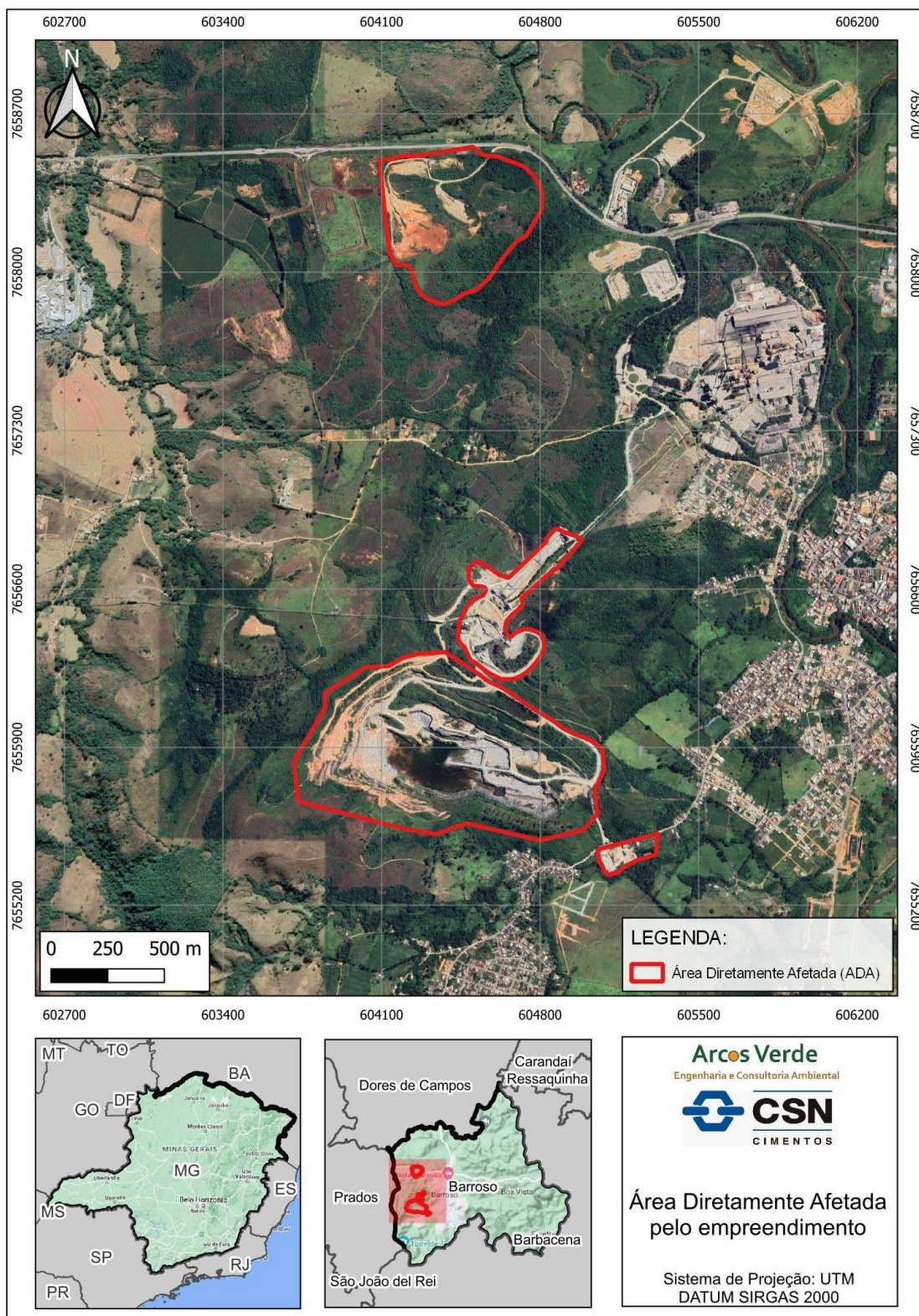


Figura 1 - Área Diretamente Afetada pelo empreendimento.

4. MAPA ATUALIZADO DO EMPREENDIMENTO

4.1. ROTA DE LOCALIZAÇÃO

A CSN Barroso está situada no município de Barroso/MG, a 196 km da capital do estado. A partir de Belo Horizonte, o acesso à CSN Cimentos Brasil S/A – Unidade Barroso é feito pela rodovia federal BR-040, no sentido Rio de Janeiro.

A Tabela 1 apresenta a localização do empreendimento em coordenadas referenciadas ao Datum oficial do Sistema Geodésico Brasileiro e do Sistema Cartográfico Nacional, estabelecido conforme Resolução IBGE nº 01 de 2015 como SIRGAS 2000.

Tabela 1 - Localização do empreendimento.

LOCALIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO					
Município: Barroso			Distrito: MG		
Coordenadas geográficas (DATUM: SIRGAS 2000) Mina Capoeira Grande					
(latitude/longitude)				(X,Y) UTM	
L:	G: - 21o	M: 11'	S: 50.83"	X: 604.880 E	Y: 7.655.665 S
N:	G: -43o	M: 59'	S: 22.39"	Fonte: Google Earth Pro	Ano: 2022
Coordenadas geográficas (DATUM: SIRGAS 200) Mina Capoeira Monjolo					
(latitude/longitude)				(X,Y) UTM	
L:	G: - 21o	M: 10'	S: 20.68"	X: 604.880 E	Y: 7.655.665 S
N:	G: -43o	M: 59'	S: 44.53"	Fonte: Google Earth Pro	Ano: 2022
Bacia Hidrográfica: Rio Grande					
Sub-bacia hidrográfica: Rio das Mortes					
Curso d'água mais próximo: Córrego da Praia/Cana/Monjolo					

Ao chegar em Barbacena, para acessar o empreendimento segue-se pela rodovia BR-265, que conecta Barbacena a São João Del Rei. A partir de São João Del Rei, percorre-se aproximadamente 30 km até chegar em Barroso. A Figura 2 apresenta a localização da propriedade e a rota de acesso às áreas do projeto são apresentadas na Figura 3.

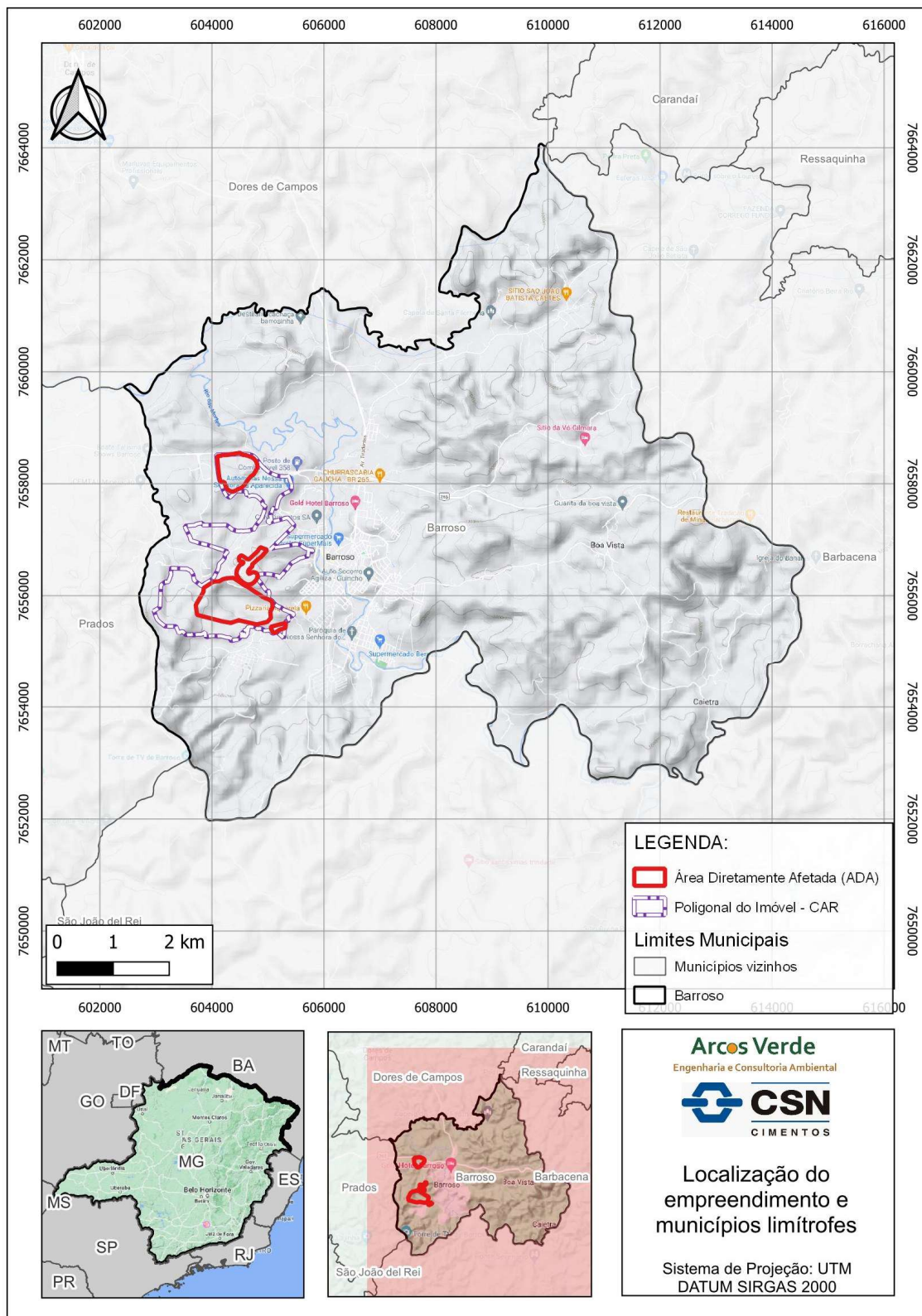


Figura 2 - Localização das áreas do empreendimento em Barroso/MG. Fonte: IBGE

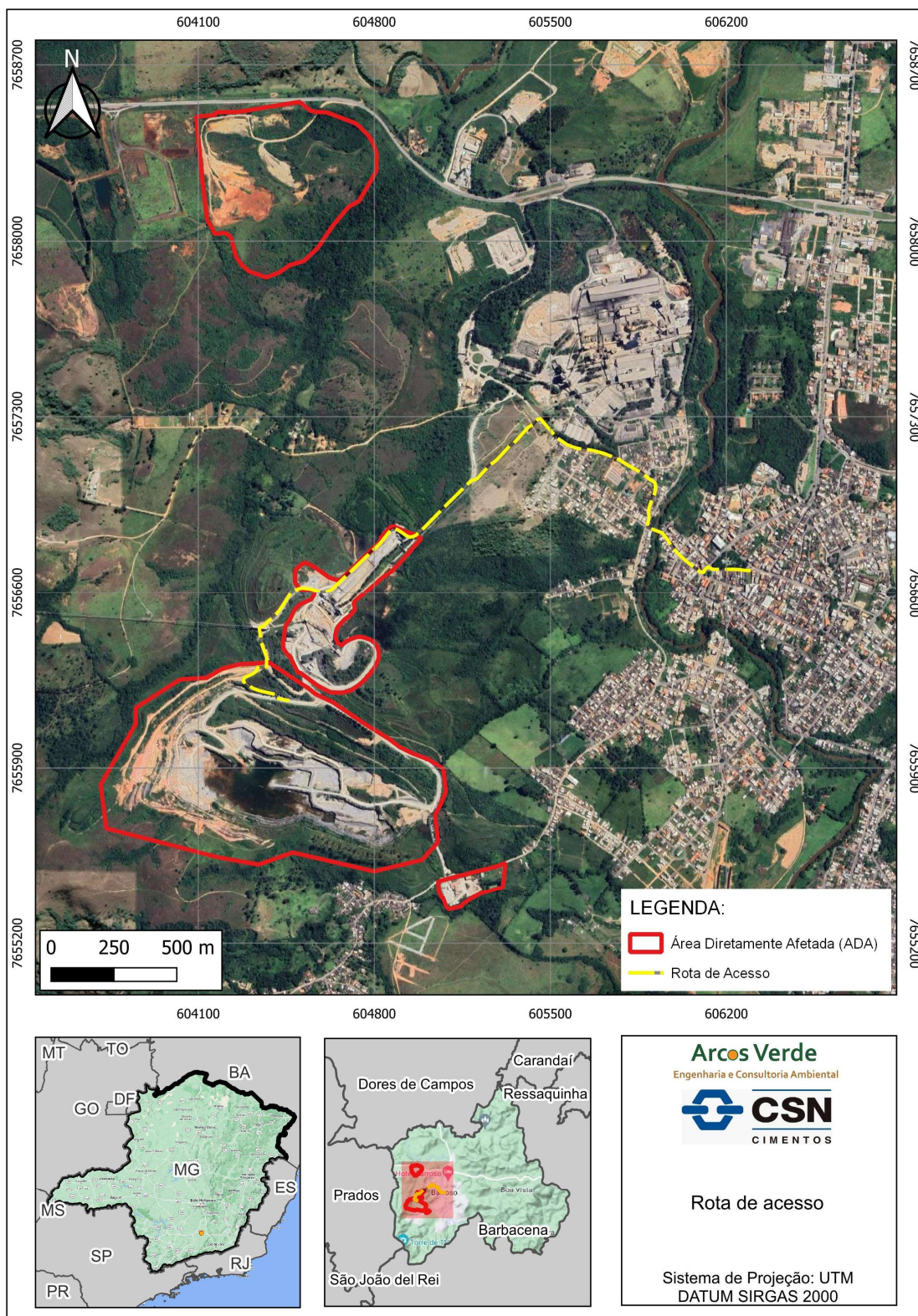


Figura 3 - Rota de acesso para o empreendimento da CSN Cimentos.

4.2. DETALHE DO EMPREENDIMENTO

O ponto de outorga está inserido na Mina Capoeira Grande, que opera desde a década de 50, onde a CSN extrai calcário para sua operação e fabricação de cimento.

Aos longos dos anos, várias ações foram realizadas na Mina Capoeira Grande. Pode-se destacar como principais a revegetação das pilhas de estéril e manutenção das áreas reflorestadas, conforme apresentado em relatório fotográfico com periodicidade semestral, protocolado na SUPRAM Zona da Mata (Figura 4).

As operações de rebaixamento de nível d'água são realizadas mediante bombeamento de águas subterrâneas e pluviais agrupadas no fundo da cava, através da utilização de um *sump*, que pode ser observado na imagem, que retira a água da cava da mina e a lança na drenagem superficial até o córrego da Praia.

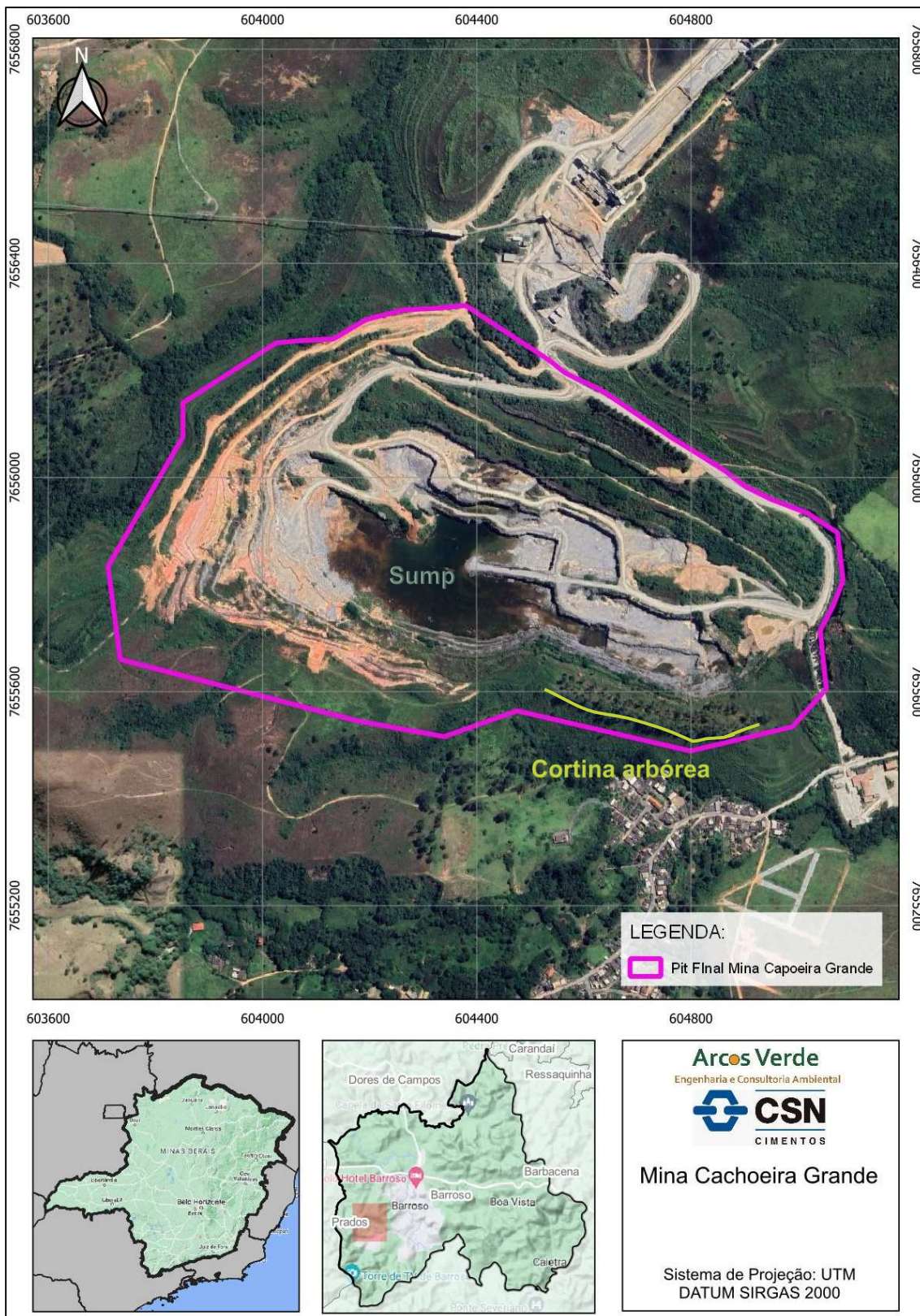


Figura 4 - Mina Capoeira Grande

5. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E ESTRUTURAL

5.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA EM ESCALA REGIONAL

A mina de Capoeira Grande está situada no sudeste do Estado de Minas Gerais, na borda sul do Cráton do São Francisco, onde predominam rochas pré-cambrianas deformadas e metamorfizadas, constituindo um embasamento arqueanopaleoproterozoico e sequências metassedimentares proterozóicas.

Conforme descrito por Ribeiro et. al. (2014), as sequências proterozoicas são limitadas por discordâncias regionais ou intraformacionais que permitem separá-las, na área de estudo, em duas megassequências: São João Del Rei e Carandaí.

A megassequência São João se trata de uma sucessão quartzítica plataformial com cerca de 1000m de espessura. Durante a Orogênese Brasileira a sucessão foi deformada em fácies xisto-verde, o que gerou clivagem ardosiana, cloritóide e cianita, e parcial recristalização das rochas.

A megassequência Carandaí corresponde a uma sucessão de metacalcários e metapelitos filíticos com cerca de 1000m de espessura, que inclui as formações Barroso (rica em calcários), Prados (essencialmente pelítica) e Rio Elvas (biotita xistos/gnaisses). Durante a orogênese brasileira a sucessão foi deformada em fácies xisto-verde, o que gerou clivagem ardosiana e clivagem de crenulação, cristalização de biotita, recristalização e textura de filito na maioria das rochas.

Em geral, o termotectonismo foi fraco e preservou estruturas, texturas e composição das rochas. A deformação principal no embasamento é atribuída ao transamazônico. Ocorreu em condições de fácies xisto-verde/anfibolito baixo e gerou uma foliação principal, predominantemente íngreme, de direção NE-SW.

As sequências proterozoicas ocorrem em um domínio tectônico autóctone de uma faixa móvel gerada na Orogênese Brasileira. Diques máficos cortam unidades do embasamento e as sequências proterozoicas mais antigas. As unidades pré-cambrianas são ainda cortadas por diques máficos mesocenoicos e, localmente, cobertas por depósitos aluviais cenozoicos e por sedimentos fluviais, colúvios e tálus quaternários.

A Figura 5, a seguir, apresentada no relatório de AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS DE REBAIXAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA NO DOMÍNIO DE INFLUÊNCIA DA MINA CAPOEIRA GRANDE – MODELO NUMÉRICO DE FLUXO SUBTERRÂNEO, elaborado pela Hidrovia apresenta o Mapa geológico da região em torno de Barroso.

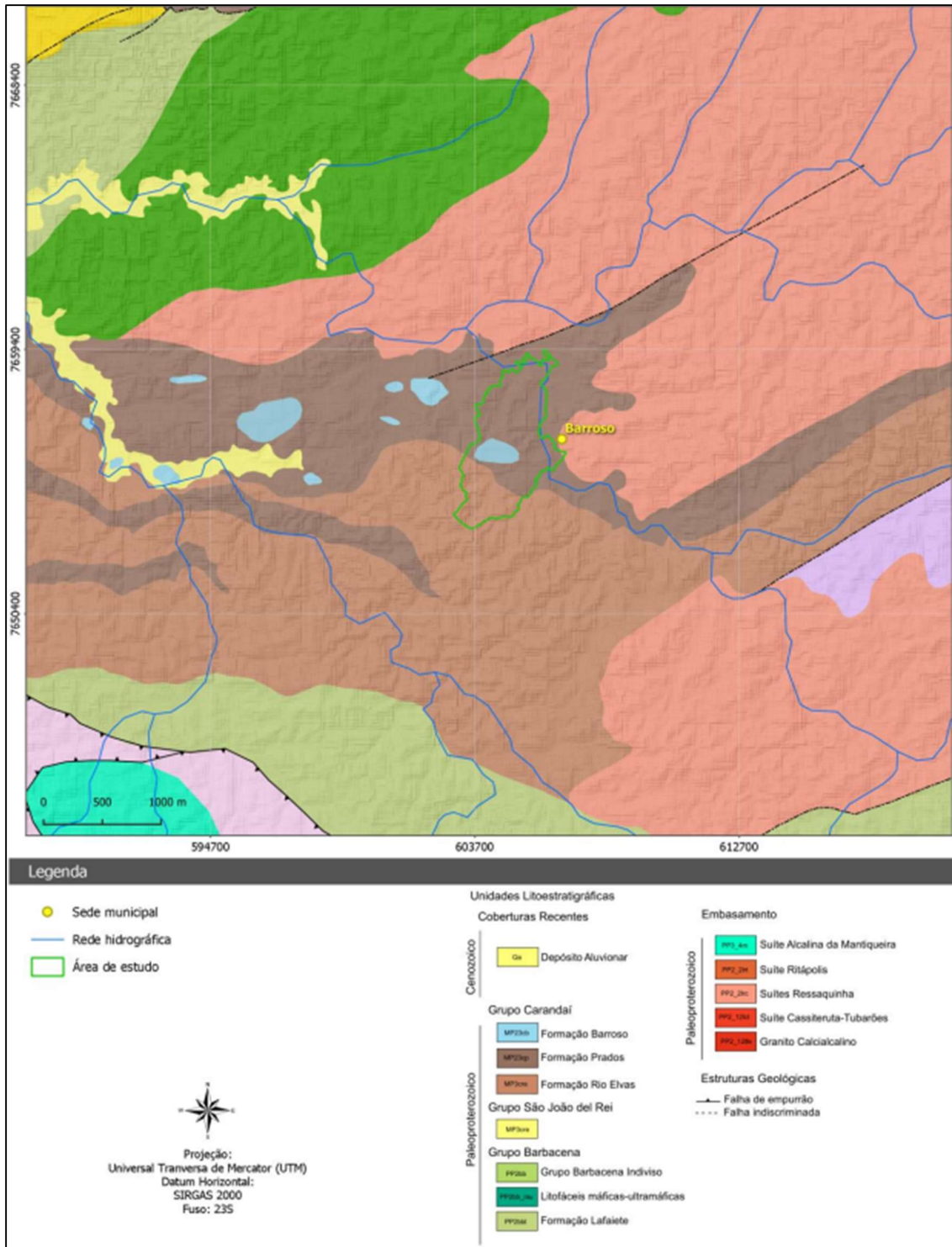


Figura 5 - Mapa geológico da região em torno de Barroso, no sudeste de Minas Gerais. Fonte: CPRM, 2014.

5.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA EM ESCALA LOCAL

Com base nas descrições das sondagens realizadas e em mapeamento geológico de detalhe na área da Mina de Capoeira Grande, foram identificadas as rochas da Formação Barroso - Grupo Carandaí: mica xistos, calcários e cálcio-xisto.

A camada superior, estratigraficamente, é composta pelos mica-xistos marrom avermelhados, totalmente decompostos contendo lentículas sub-centimétricas de quartzo, que afloram nos bancos superiores da parte sul e sudeste da mina. Abaixo dos xistos, em contato brusco, aparece uma camada espessa (até 100 m de espessura) de calcário calcítico ("calcário siderúrgico") cinza médio a claro, calcítico, compacto, com pequenos filmes de mica associada à grafita, textura granoblástica, granulometria fina a média, baixo grau de fraturamento, dureza média e boa reação ao HCl.

Este calcário grada rapidamente no seu limite inferior para um cálcio-xisto ("calcário baixo"), cinza negro, granulação fina a média, rico em filmes biotíticos e em vênulas de quartzo (calcita branca e piritas são secundárias), descontínuas, dobradas na forma de foliações S-C, espaçadas entre si de poucos centímetros, que conferem à rocha um aspecto muito listrado e movimentado. A transição entre as duas rochas se dá pelo aparecimento cada vez mais frequente de intercalações decimétricas do cálcio-xisto, na porção basal do calcário, até que o calcário termine e fique somente o cálcio-xisto. A camada de cálcio-xisto tem espessura que varia de 10 a 70 metros, sendo mais espessa na face norte da mina e menos espessa na parte sul. Na porção central da mina é comum encontrar intercalações de calcário puro com até 20 metros de espessura dentro da camada de cálcio-xistos.

Em resumo, na mina Capoeira Grande afloram duas camadas principais de rochas: um cálcio-xisto no topo e um calcário na base, ambas com atitude média

N50W/30SW. O cálcio-xisto predomina na porção norte da mina e o calcário na porção sul. É comum encontrar intercalações na forma de bancos métricos principalmente na região de contato entre as camadas. Estas intercalações podem ser duplicações estratigráficas de origem sedimentar ou podem ter origem tectônica, causada por dobramentos ou por interposições de lascas de empurrão.

A Figura 6 a seguir, apresentada no relatório de AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS DE REBAIXAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA NO DOMÍNIO DE INFLUÊNCIA DA MINA CAPOEIRA GRANDE – MODELO NUMÉRICO DE FLUXO SUBTERRÂNEO, elaborado pela Hidrovia, apresenta o Mapa e perfil geológico do entorno da mina de Capoeira Grande.

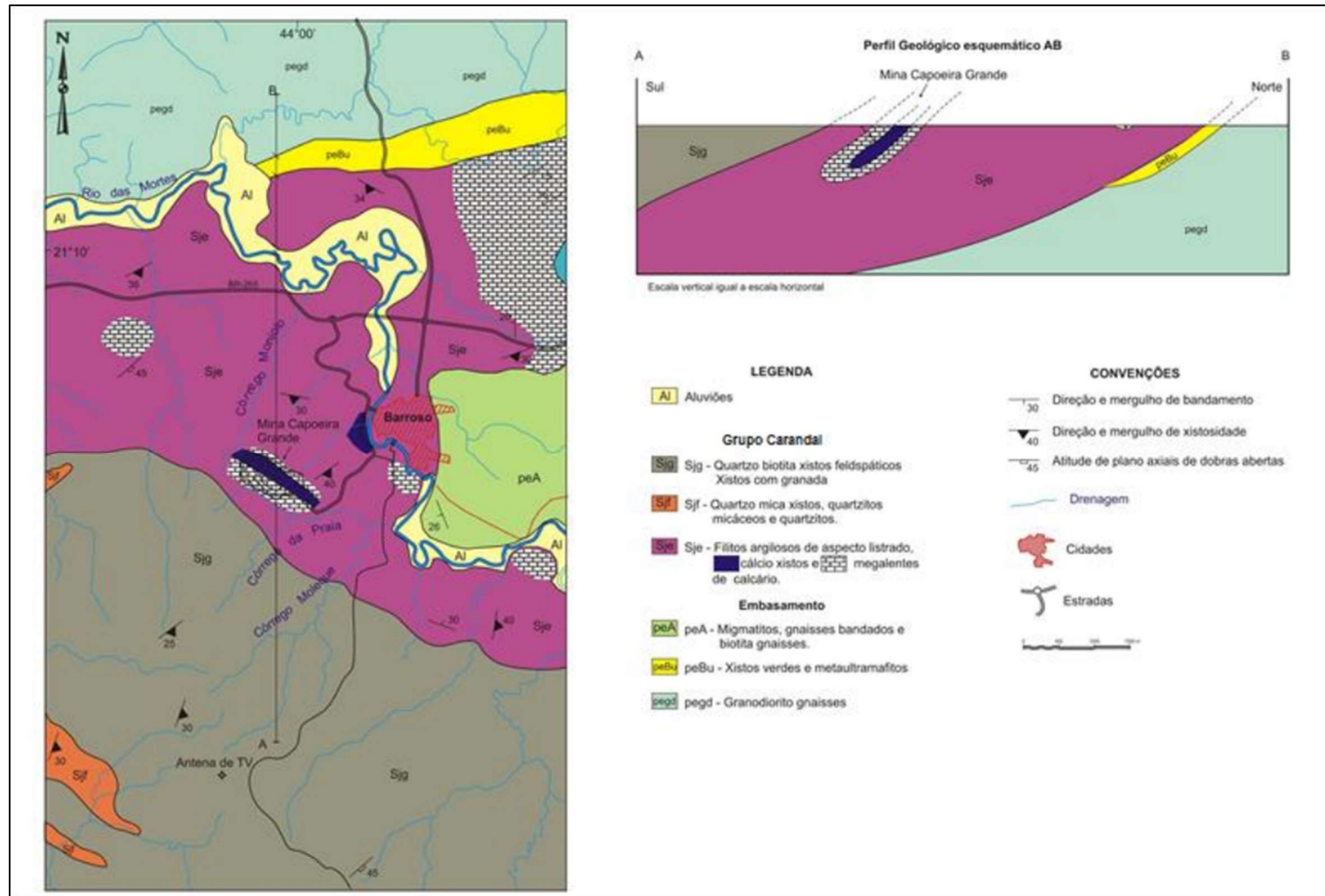


Figura 6 - Mapa e perfil geológico do entorno da mina de Capoeira Grande. Fonte: RIBEIRO et al., 2002.

5.3. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA ESTRUTURAL

As estruturas mais importantes encontradas em Capoeira Grande, do ponto de vista hidrogeológico, são os sistemas de fraturas e os falhamentos.

O mais importante sistema de fraturas tem atitude N50-60E/60-90SE. São fraturas com aberturas milimétricas, sem preenchimento e com frequência de decimétrica a métrica. Este sistema foi observado várias vezes conduzindo água e mostrando surgências em seus planos.

Foram observadas algumas falhas recentes e algumas delas conduziam grandes quantidades de água. O sistema mais importante tem atitude N50-60E/50-30SE, é normal, e foi localmente observado um rejeito de cerca de 1,5 m. Este sistema de falhas, em conjunto com sistema de fraturas, pode ser responsável pela maior surgência da mina, localizada na rampa para o nível de lavra R3, ao lado da bomba principal do referido sistema de drenagem.

Um segundo sistema de falhas, com características transcorrentes, foi identificado pela presença de algumas superfícies espelhadas e estriadas, com atitude N20W/65NE. As estrias são sub-horizontais e o plano contém fibras de quartzo neo-crescidas.

A Figura 7 a seguir, apresentada no relatório de AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS DE REBAIXAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA NO DOMÍNIO DE INFLUÊNCIA DA MINA CAPOEIRA GRANDE – MODELO NUMÉRICO DE FLUXO SUBTERRÂNEO, elaborado pela Hidrovia, apresenta um levantamento dos lineamentos observados, utilizando-se fotografias aéreas nas escalas de 1:60.000 e de 1:30.000.

Considerou-se como lineamento qualquer alinhamento natural de topografia ou drenagem provavelmente causado por um controle estrutural. Nesta figura, as

linhas vermelhas são lineamentos estruturais. A linha azul é o Rio das Mortes. Ressalta-se que os córregos e demais drenagens têm o seu percurso controlado pelas fraturas demarcadas pelos lineamentos. O córrego da Praia e o córrego Monjolo encaixam-se no importante sistema de fratura N30E identificado na mina.

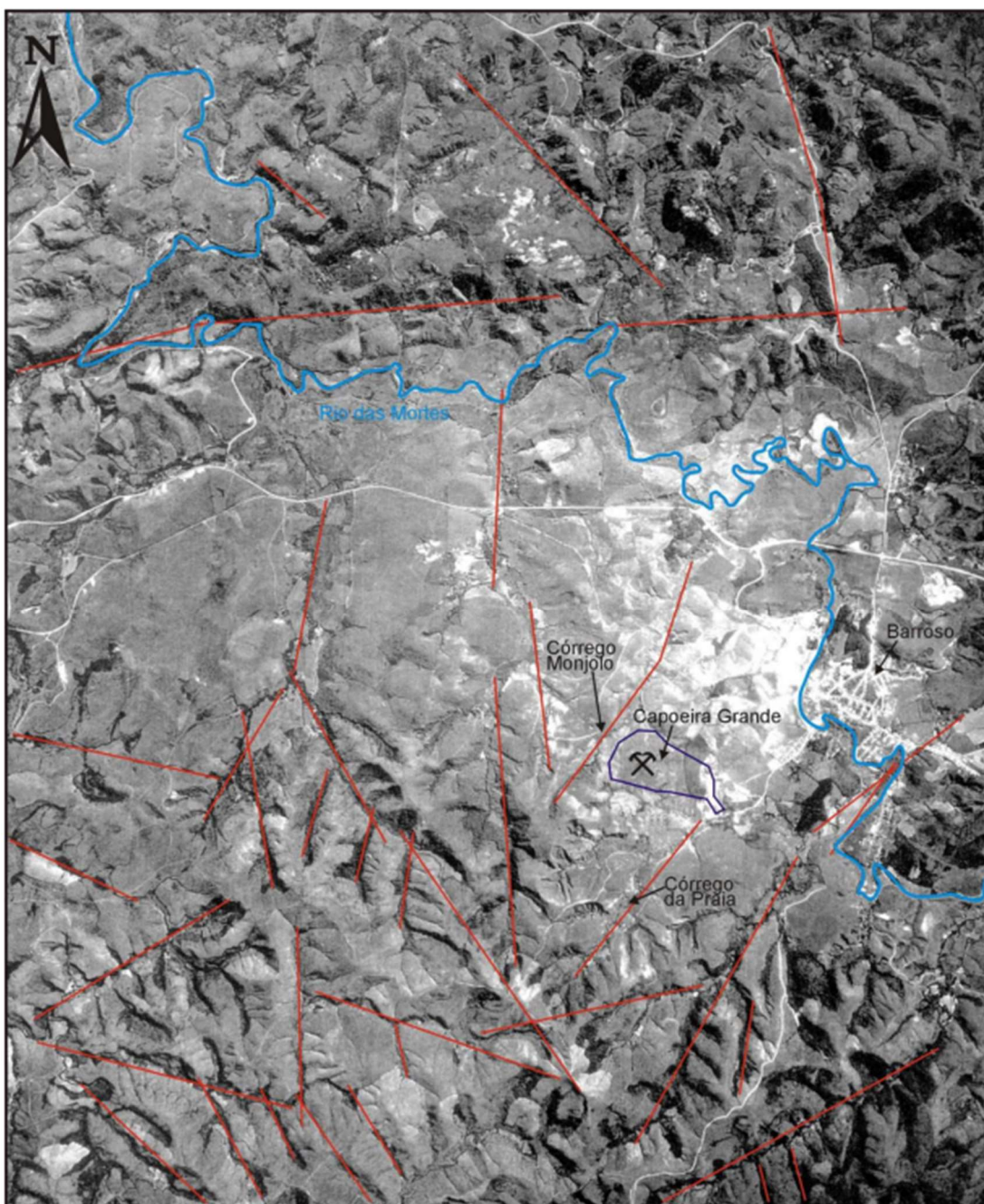


Figura 7 - Aerofotografia em escala 1:60.000 com lineamentos nos arredores da Mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia, 2022.

6. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO REBAIXAMENTO

O modelo conceitual utilizado neste trabalho é baseado no apresentado em Hidrovia Hidrogeologia e Meio Ambiente (2003), não havendo alterações significativas na sua concepção geral. A seguir será realizada uma breve revisão dos aspectos hidrogeológicos mais importantes. A descrição detalhada do modelo hidrogeológico pode ser obtida no relatório supracitado.

Na Mina Capoeira Grande, as formações rochosas presentes estão representadas por rochas filíticas e xistosas na porção basal, as quais sustentam todo o pacote de sedimentos sobrepostos, sejam calcários imediatamente acima, intercalados por cálcio-xistos e, no topo, os materiais de alteração representados pelas coberturas inconsolidadas, provenientes dos produtos de alteração de mica xistos, de coloração avermelhada. A Tabela 2 apresenta a seguir a identificação dos materiais litológicos e sua relação hidroestratigráfica.

Tabela 2 - Correlação entre as unidades litoestratigráficas e hidroestratigráficas

Litoestratigrafia		Unidades Hidroestratigráficas
Grupo	Formação	
Depósitos eluviais, coluviais e aluviais indivisos (coberturas inconsolidadas)		Unidade 1 - Aquífero livre / freático (Porosidade intersticial primária)
Grupo Carandaí	Formação Rio Elvas Biotita xistos	Unidade 2- Aquitarde fraturado (Materiais fissurados com xistosidade e fraturas apertadas, baixos valores de condutividade hidráulica)
	Formação Barroso Calcário calcítico e cálcio-xistos	Unidade 3 - Aquífero Carbonático (porosidade fissural secundária, baixos a médios valores de condutividade hidráulica; elevados localmente)
	Formação Prados Xistos e Filitos	Unidade 4 - Aquiclude (Porosidade secundária desprezível; baixíssimos valores de permeabilidade)

A seguir, são resumidas as principais formações geológicas envolvidas no modelo em questão, correlacionando-se as tipologias aquíferas em função de suas características quanto à permeabilidade e porosidade naturais.

Os xistos e filitos podem ser classificados como um aquíclode, devido à sua porosidade primária inexistente e porosidade secundária de baixa expressividade. Desta forma, em relação às unidades mais permeáveis situadas acima, os filitos podem ser considerados como o limite inferior de fluxo das águas subterrâneas.

O comportamento hidrogeológico da unidade hidroestratigráfica representada pelos calcários e cálcio xistos da Formação Barroso é fundamentado pela presença de fraturas que podem corresponder aos elementos de controle dos fluxos nessa unidade. Esta unidade permite a circulação de água subterrânea através dos planos dessas fraturas, os quais podem se mostrar, em geral, pouco abertos ou mesmo pouco desenvolvidos, dadas as condições de permeabilidade verificadas nas realizações de ensaios de bombeamento e de condutividade hidráulicas nos poços de monitoramento. Os calcários de uma forma geral constituem importantes aquíferos em nível regional.

Contudo, as fraturas são mais frequentes nos cálcio-xistos, e estes foram interpretados como os responsáveis pela predominância dos aportes de fluxos subterrâneos. Assim a conformação estratigráfica envolvendo as duas litologias, cálcio-xistos e calcários, é representada por sub-unidades diferenciadas pela heterogeneidade e anisotropia dos materiais, podendo apresentar valores mais elevados de condutividade hidráulica nos cálcio-xistos.

Os materiais inconsolidados superiores coincidentes aos xistos alterados, os quais se encontram na zona não saturada em sua maior parte, podem se constituir numa sub-unidade à parte, devido à maior presença de material argiloso. Como sub-unidade hidroestratigráfica, caracterizam-se por possuir

baixa permeabilidade, porém com capacidade de armazenamento significativa. Por outro lado, os materiais mais grosseiros que se encontram localizadamente nos vales de drenagem mais desenvolvidos, como na calha do rio das Mortes, apresentam-se como uma sub-unidade distinta, onde os valores de condutividade hidráulica estão relacionados à condição do meio aluvionar em questão, atingindo a ordem de 10^{-4} m/s.

Os sedimentos agrupados sob o nome genérico de cobertura inconsolidada encontram-se predominantemente inseridos na zona não saturada, sendo objeto de análise apenas para sua adoção como material poroso subjacente, onde toda a recarga é processada.

O comportamento hidrogeológico desta unidade é pouco conhecido, mas certamente deve apresentar uma permeabilidade espacialmente variável, devido ao teor de argilas, ao grau de alteração e ao nível de inconsolidação dos materiais, podendo atingir valores de permeabilidade medianos a baixos (10^{-6} a 10^{-8} m/s).

Os controles de fluxo subterrâneo exercidos pelos referidos entes estruturais são, para o caso de Capoeira Grande, fortemente influenciados pela ação do gradiente hidráulico local, o qual induz o fluxo de norte a sul, em descontinuidades associadas aos planos de fraturas e xistosidades. O sistema de fluxos fica governado preferencialmente pelos planos de fraturas, os quais através das interseções com as xistosidades tendem a manter as direções do escoamento para o nível de base local constituído pelo rio das Mortes, a leste e nordeste da área de investigação.

A porção de montante situada ao sul do domínio de investigação é caracterizada por encostas elevadas conformadas sobre rochas xistosas, as quais constituem as cabeceiras das bacias dos córregos Moleque, Praia e Monjolos, configurando a principal zona de recarga do sistema aquífero que drena sob a área da mina

Capoeira Grande. As porções leste, norte e oeste do referido domínio estão delimitadas, respectivamente, pela barreira física representada pela calha de drenagem do rio das Mortes e pela vertente que abriga a calha do córrego Monjolo.

7. MODELO NUMÉRICO DO FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A partir do modelo conceitual, foi construído e calibrado um modelo numérico de fluxo das águas subterrâneas para a área de estudo. O objetivo deste modelo consistiu em representar a condição da dinâmica de circulação hídrica na área de influência do empreendimento para a realização de simulações de cenários futuros e avaliação de impactos.

O estudo de modelagem em regiões fraturadas apresenta algumas limitações, devido à anisotropia (descontinuidades), à heterogeneidade das rochas e à dificuldade em se caracterizar a distribuição das propriedades intrínsecas do ambiente.

Apesar destas dificuldades, assume-se que tanto o escoamento no meio poroso como nas rochas fraturadas é governado pela lei de Darcy, utilizando o método dos meios porosos equivalentes. Em escala regional, a anisotropia e a descontinuidade podem ser simuladas através de ferramentas desenvolvidas para meios porosos, considerando-se sempre a existência de uma alta condutividade para esses planos de escoamento. Ressalta-se ainda que, neste estudo, para a modelagem foi adotado o cálculo da Equação de Richards, a qual representa a variação de fluxo em meios porosos variavelmente saturados. Para tal modelo, foram utilizadas simplificações lineares e adequadas para a representação da relação da carga de pressão e da condutividade hidráulica relativa em função de saturação residual.

Para a melhor adequação dos estudos, optou-se pela utilização do modelo FEFLOW (*Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System*), uma sofisticada ferramenta computacional de simulação do fluxo tridimensional, que proporciona maior flexibilidade no desenho da malha e na introdução de elementos discretos, que possibilitam a representação de fraturas e outras formas de condução e armazenamento de água no sistema. No FEFLOW, a

esses elementos discretos podem-se atribuir diferentes leis que regem o fluxo da água, como as equações de Darcy, Hagen-Poiseuille ou Manning-Strickler.

7.1. DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO E MALHA DE CÁLCULO

Na construção deste modelo foi levada em consideração uma área abrangente o suficiente para incorporar os cursos de água de interesse, uma parcela da área urbana de Barroso e outros atributos e pontos descritos no modelo conceitual.

A discretização da malha, bem como a localização, a extensão e a malha de elementos finitos do modelo estão apresentadas na Figura 8. A malha do modelo incorpora todo o domínio descrito anteriormente, correspondendo a uma área de aproximadamente 12,5 km².

Os seus contornos de norte, nordeste e leste são caracterizados por uma barreira física formada pelo eixo de drenagem do rio das Mortes. Os contornos complementares de sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste são caracterizados, sequencialmente, por barreiras hidráulicas (topográficas) situadas nas partes mais altas do terreno.

Os contornos de topo são definidos pela superfície topográfica dos terrenos e os limites de fundo, pelos níveis mais profundos do embasamento cristalino, considerado impermeável. Verticalmente foi definida uma espessura constante para o modelo hidrogeológico, com 400 metros de espessura.

Buscando maximizar a malha de cálculo, levando em conta a necessidade de maior detalhe em áreas de interesse do modelo e a sua exequibilidade, observa-se na Figura 8 que a malha do modelo foi refinada na área da cava e das principais estruturas de controle de fluxo, como as drenagens, os principais lineamentos e os poços de bombeamento.

Feitos os ajustes necessários, a malha do modelo foi gerada usando a opção *automatic triangle* (SHEWCHUK, 2002), para a geração de prisma triangulares regulares. Os prismas triangulares foram definidos com ângulos iguais ou superiores a 30° e, em média, os lados dos triângulos possuem entre 20 e 60 m nas regiões sem refinamento, aproximadamente 15 m nas regiões adensadas (cava e drenagens) e cerca de 1 m na região dos poços de bombeamento. Desta forma foram discretizados 32.123 elementos para cada uma das 20 camadas, totalizando 642.460 elementos que conformam a malha total.

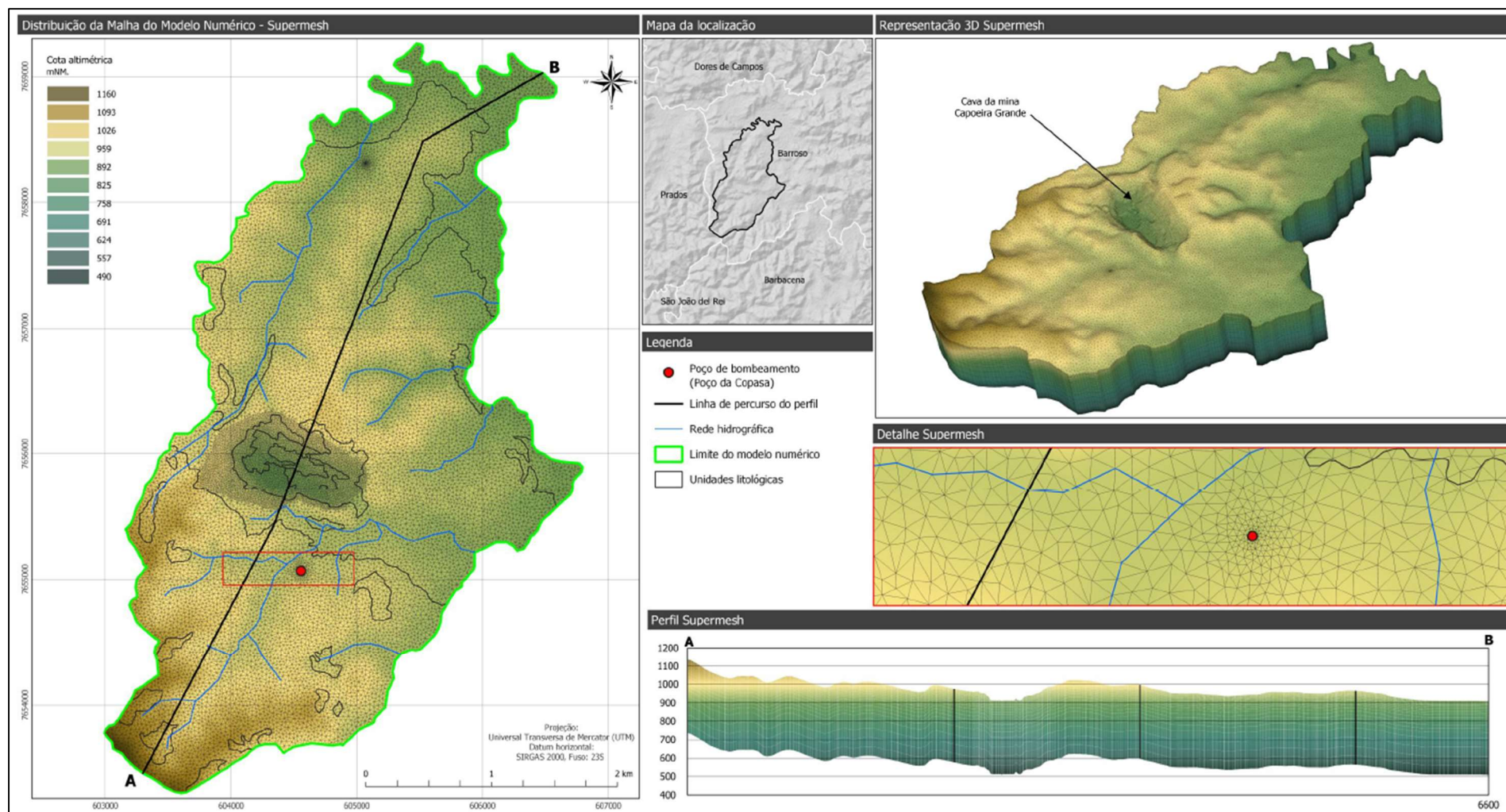


Figura 8 - Definição do domínio de cálculo do modelo hidrogeológico no entorno da mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia, 2022.

7.2. CONSIDERAÇÃO TEMPORAL

O modelo hidrogeológico computacional foi desenvolvido em uma condição temporal transiente, na qual os valores de cargas hidráulicas variam espacialmente e no tempo.

A discretização dos intervalos de tempo (períodos de stress) levou em consideração o período do monitoramento, as variações do nível d'água observadas, o regime pluviométrico, ou a recarga, e o tempo previsto para a operação da mina. A recalibração e atualização do modelo foram realizadas para o período correspondente entre outubro/2011 e julho/2022, como vem sendo realizado nas últimas atualizações. Foram discretizados 44 intervalos de recarga trimestrais. Posteriormente, para a simulação das condições futuras da mina, considerou-se o período de 5 anos (ano 1 ao ano 5), com previsão dos planos de lavras futuros da mina, sendo discretizados períodos de tempos trimestrais.

7.3. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno representam a interação entre o domínio do modelo e o ambiente circundante. Foram utilizados dois tipos de condição de contorno, conforme descrito a seguir:

- Fluxo especificado - Recarga Direta

A recarga direta pela infiltração de águas precipitadas ocorre em todas as porções de bacia consideradas no modelo numérico. Neste estudo, a distribuição das unidades rochosas e de coberturas foi considerada como fator preponderante para a espacialização e efetivação da recarga na área do modelo. Desta forma, a aplicação dessas taxas de recarga seguiu a distribuição das principais unidades geológicas de cobertura na área.

- Carga hidráulica especificada - Cursos de água e sumps

A carga hidráulica especificada foi utilizada para representar as drenagens conectadas ao sistema de fluxo das águas subterrâneas. A malha de elementos finitos do modelo foi projetada para estar em conformidade com a distribuição das principais drenagens identificadas nas bacias de entorno da área de estudo. A condição de contorno de carga hidráulica foi aplicada aos talwegues da camada superficial do modelo e aos sumps das cavas, utilizando-se a especificação de uma condição de restrição de fluxo (constrain), a qual impõe que estas condições de contorno apenas removam água do aquífero quando estas efetivamente interceptam o nível.

7.4. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

A avaliação dos materiais geológicos encontrados na região de estudo, vistos sob o aspecto da semelhança do comportamento hidráulico (armazenamento e condução de água subterrânea), resultou na definição de seis unidades hidrogeológicas distintas, quais sejam: 1) depósitos aluviais; 2) colúvio n1, formado pelos depósitos elúvio-coluvionares indivisos do solo, menos condutivos; 3) colúvio n2, também formado pelos depósitos elúvio-coluvionares indivisos do solo, porém mais condutivos; 4) rochas carbonáticas (calcário); 5) cálcio-xisto; e 6) embasamento cristalino, composto pelo quartzo-biotita xisto e filito fraturado.

A distribuição espacial tridimensional das seis unidades hidrogeológicas, associadas aos litotipos locais, foi acomodada no domínio de cálculo do modelo computacional utilizando-se de seções geológicas, verticais e horizontais, geradas a partir dos resultados dos furos de sondagem. O arranjo final resultante da distribuição espacial das unidades, no domínio de cálculo do modelo hidrogeológico computacional, pode ser visto na Figura 9.

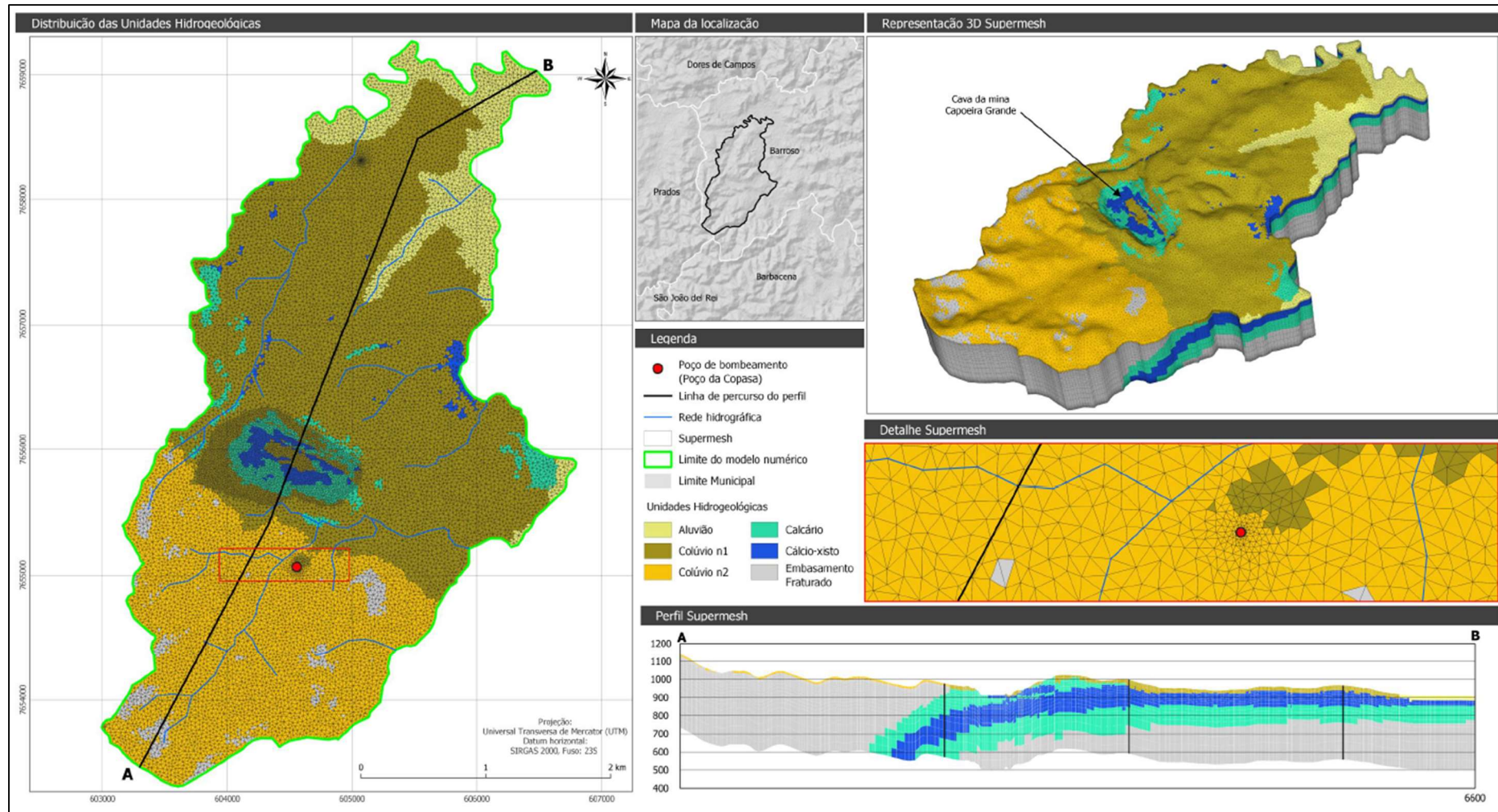


Figura 9 - Representação das unidades hidroestratigráficas existentes na região de interesse do modelo. Fonte: Hidrovia, 2022.

7.5. CALIBRAÇÃO EM REGIME PERMANENTE

A calibração em regime permanente foi conduzida por meio de uma abordagem iterativa, manual, de tentativa e erro, sendo utilizados os níveis de água medidos nos poços de monitoramento. Nesta abordagem, as cargas hidráulicas resultantes foram comparadas àquelas observadas em campo para outubro de 2011 e os parâmetros de entrada do modelo foram reajustados para alcançar uma melhor concordância com as condições observadas. Assim, o procedimento de calibração do modelo envolveu o ajuste de valores de condutividade hidráulica e/ou recarga para fazer com que esses estejam dentro de um intervalo de erro aceitável tendo como referência os valores medidos em campo

Neste contexto, os resultados de calibração do modelo são avaliados usando medidas estatísticas baseadas no resíduo de calibração, quais sejam:

- Erro médio (ME): representa a média de todos os resíduos. Este parâmetro pode ser enganoso porque a soma de valores residuais negativos e positivos pode ser igual a zero. O erro médio deve fornecer uma indicação se os resíduos são tendenciosamente positivos ou negativos.
- Erro médio absoluto (MAE): representa a média dos valores absolutos de todos os resíduos. Este parâmetro será maior do que o erro médio e fornece a média de erro associada com cada ponto de calibração no modelo.
- Raiz do erro quadrado médio (RMS): representa a raiz quadrada da soma dos quadrados de todos os valores residuais. A quadratura dos resíduos aumenta a ponderação para que um resíduo pequeno seja considerado na estatística global de calibração.
- Raiz do erro quadrado médio normalizado (NRMS): representa o RMS dividido pela diferença entre a maior e menor carga hidráulica observada no modelo.

Valores de NRMS próximos ou inferiores à 10% podem indicar boa correlação do conjunto de dados e é considerado uma das medidas aplicadas para atestar uma boa calibração de modelos numéricos quanto à variação das cargas hidráulicas locais (Anderson e Woessner, 1992). Importante ressaltar que não há diretrizes estabelecidas na literatura com relação à magnitude aceitável do NRMS, porque a aceitabilidade da calibração depende diretamente do objetivo da modelagem (ANDERSON et al., 2015).

Outro aspecto importante da calibração é o balanço de massa do modelo, que revela os quantitativos de entrada e saída de água do sistema aquífero. Este balanço é particularmente importante para a avaliação preditiva dos possíveis impactos no fluxo de base local. Neste caso, espera-se que a diferença entre as entradas e saídas de água do modelo seja próxima de zero, revelando, assim, boas condições de convergência numérica.

As taxas de recarga utilizadas estão representadas a partir de percentuais relativos da precipitação, conforme distribuição apresentada na Tabela 3. Estes percentuais foram obtidos durante as calibrações do modelo, buscando ajustar os valores dos níveis d'água bem como as vazões de base nos córregos, sendo os valores efetivos de recarga estabelecidos de acordo com os dados de precipitação correspondentes ao período adotado. A precipitação média de referência para o ano de 2011 é da ordem de 1.396 mm/ano, considerando os dados da estação pluviométrica da mina Capoeira Grande. O valor calibrado oscila entre 5% e 7% da precipitação média anual e é compatível com os valores estimados pelo método de separação dos escoamentos superficial e subterrâneo, apresentado no capítulo anterior.

O modelo se mostrou bastante sensível à variação das condutividades hidráulicas, sendo a melhor distribuição de valores de calibração obtida apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de recarga e de condutividade hidráulica obtidos na calibração permanente

Unidade Hidrogeológica	Recarga		Condutividade (m/s)		
	(mm/ano)	(%)	Kx	Ky	Kz
Aluvião	70	5	6 x 10 ⁻⁵	6 x 10 ⁻⁵	6 x 10 ⁻⁵
Colúvio n1	70	5	1 x 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁶
Colúvio n2	98	7	3 x 10 ⁻⁶	3 x 10 ⁻⁶	3 x 10 ⁻⁶
Calcário	70	5	3 x 10 ⁻⁷	3 x 10 ⁻⁷	3 x 10 ⁻⁸
Cálcio-xisto	70	5	2 x 10 ⁻⁷	2 x 10 ⁻⁷	2 x 10 ⁻⁷
Embasamento fraturado	84	6	8 x 10 ⁻⁸	8 x 10 ⁻⁸	8 x 10 ⁻⁸

Como mencionado anteriormente, para a calibração deste cenário foram tomados os níveis d'água dos instrumentos em outubro de 2011. Os resultados obtidos para a calibração dos níveis d'água em regime permanente estão apresentados na Tabela 4 e podem ser observados no gráfico da Figura 10. Juntamente com os níveis também se analisaram as vazões de descarga nas drenagens, onde os resultados obtidos foram comparados com os valores médios, máximos e mínimos do período seco de 2011, buscando uma vazão modelada próxima à vazão de base, ajustando-se os valores de recarga. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Cotas de nível da água subterrânea associadas aos dispositivos de monitoramento na calibração preliminar.

Instrumentos	SIRGAS 2000, 23S			Nível d'água (m)	
	UTM-E (X)	UTM-N (Y)	Obs.	Cal.	Cal. - Obs.
PM-01-A	605075	7655309	939,5	945,4	5,9
PM-03	605456	7656556	924,4	925,2	0,9
PM-04	605100	7657150	926,8	927,0	0,3
PM-05	604180	7656634	943,7	944,7	1,0
PM-06A	603886	7655549	955,3	955,3	0,0
POÇO DA COPASA	604556	7655067	940,3	940,5	0,2
PB1	604533	7655110	942,7	950,3	7,6
PB2	604588	7655067	949,1	950,0	0,9

O gráfico de calibração resultante é apresentado na Figura 10, ilustrando a dispersão das cargas hidráulicas observadas (eixo x) e simuladas (eixo y) para os pontos alvo de calibração.

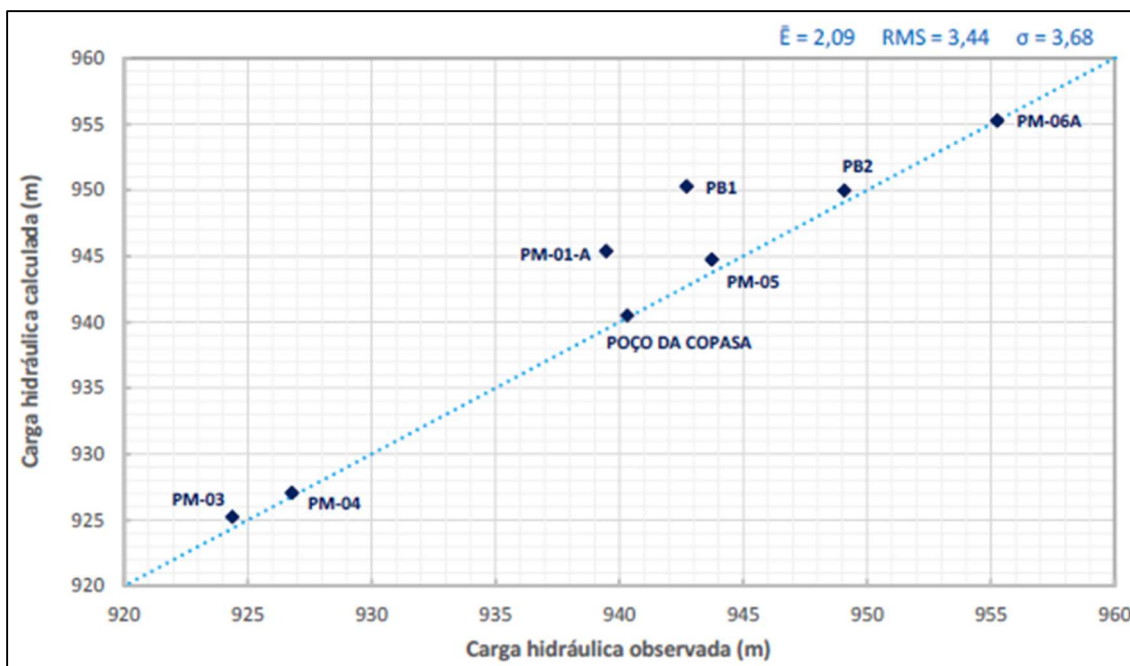


Figura 10 - Dispersão dos valores de cargas hidráulicas calculadas e observadas

As estatísticas de calibração para as medidas de cargas hidráulicas apresentadas na Figura 10 são explicadas a seguir:

- Raiz do erro quadrado médio (RMS) = 3,4 m. O RMS é semelhante a um desvio padrão, fornecendo uma medida do grau de dispersão sobre a linha de melhor ajuste. Este valor indica que a maioria das cargas calculadas nos pontos de controle se distanciou até 3,0 m do valor observado.
- Erro médio absoluto = 3,7 m. Este valor indica se os níveis médios de água calculados são maiores ou menores do que os observados (idealmente deveria ser perto de 0).
- Desvio padrão = 2,1 m. O erro médio absoluto é uma medida do desvio médio entre os níveis de água observados e simulados.

O valor de NRMS (*Normalized Root Mean Square*) é obtido usando o valor da diferença entre as cargas hidráulicas (máxima e mínima) registradas nos pontos de observação, neste caso, 955,3 mNM (PM-06A) e 924,4 mNM (PM-03) e o valor RMS, da seguinte forma:

$$\text{NRMS} = \text{RMS} / (955,3 - 924,4) = 3,44 / 30,9 = 11,1\%$$

Este nível de erro pode ser considerado satisfatório para um modelo com a dimensão e abrangência do caso em questão e corresponde à melhor situação de calibração encontrada, apresentando os valores mais próximos de ajuste de cargas hidráulicas.

Tabela 5 - Vazões de base calculadas pelo modelo e observadas em campo

Instrumentos	Vazão período seco (m³/d)			
	Obs. Mín.	Obs. Med.	Obs. Máx.	Cal.
Cór. Cana	0,0	35,3	90,0	2,4
Cór. Agrião	54,0	74,2	102,0	83,8
Cór. Praia	168,0	486,8	988,8	302,1
Cór. Monjolo Montante	16,8	32,5	66,0	17,6
Cór. Monjolo Jusante	28,8	58,2	114,0	58,2
Sump da mina	81,0	292,7	614,4	575,6

De forma geral, as vazões calculadas apresentaram-se próximas aos intervalos de valores medidos, com exceção das vazões onde está situado o vertedouro do Córrego Cana, apresentando uma vazão calculada muito inferior à média da vazão observada. Destaca-se também que os picos de vazão observados na seção fluviométrica do córrego Praia, ao longo dos períodos de estiagem, podem estar condicionados ao esgotamento sanitário do bairro homônimo e, portanto, tais valores não foram representados pela calibração do modelo numérico de fluxo.

O resultado geral de balanço de massa do modelo também se mostrou bastante condizente com as premissas adotadas no modelo conceitual e com as condições de contorno consideradas no modelo numérico. Na Tabela 6 estão mostrados os valores de entrada e saída de água do modelo, conforme sua calibração. A diferença entre as parcelas hídricas analisadas, equivalente a zero, indica a boa convergência dos dados.

Tabela 6 - Balanço de massa geral do modelo em termos de entradas e saídas de água

Condição de Contorno	Balanço (m³/d)	
	Entradas	Saídas
Recarga	2662,6	
Drenagens		-2040,5
Cava		-575,6
Poços		-46,5
Total	2662,6	-2662,6

Nota: valores obtidos na calibração do modelo numérico

Na Figura 11 é apresentado o mapa potenciométrico calculado para a condição de outubro de 2011.

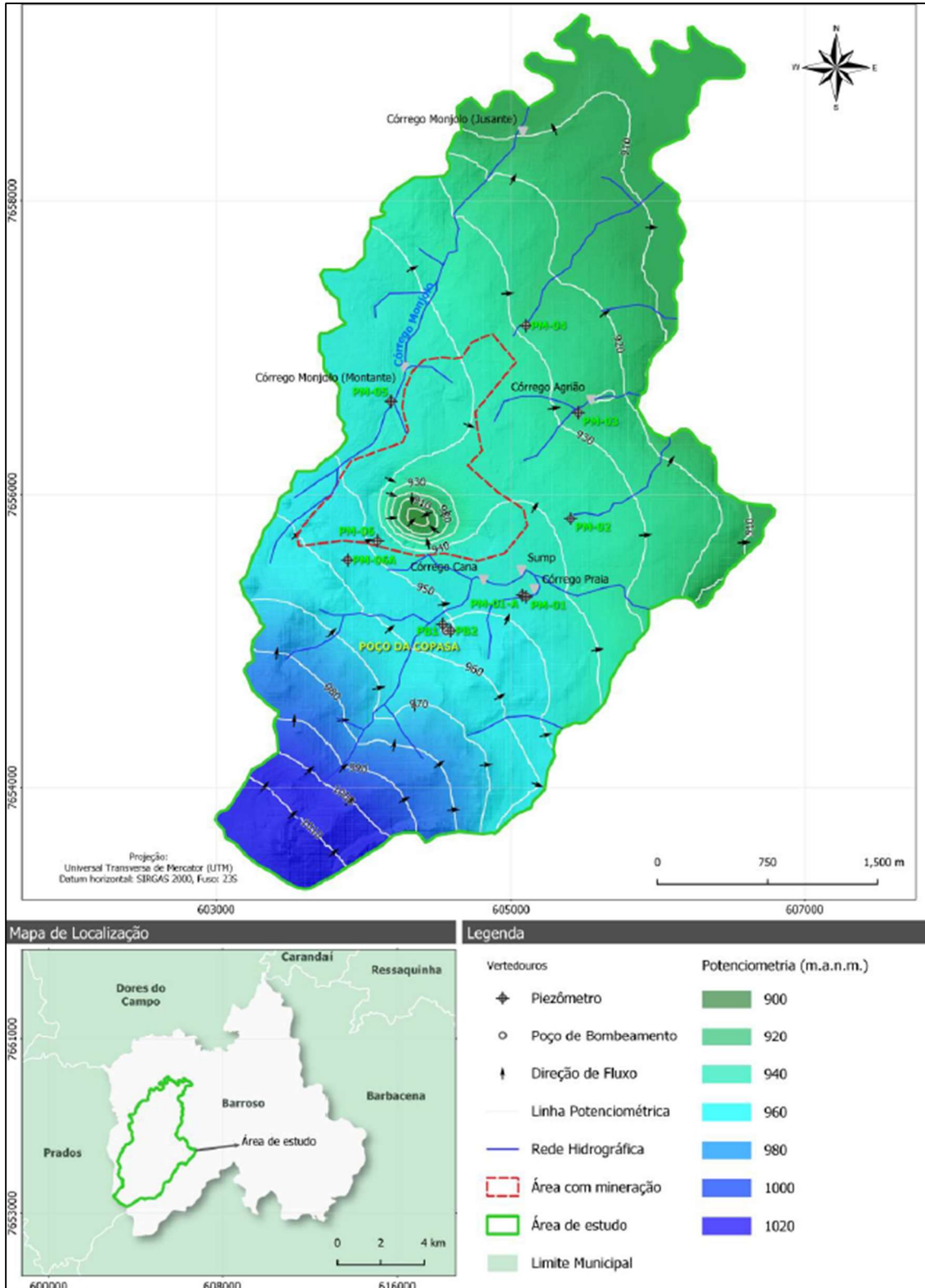


Figura 11 - Potenciometria calculada pelo modelo numérico para o ano de 2011. Fonte: Hidrovia, 2022.

7.6. CALIBRAÇÃO EM REGIME TRANSIENTE

A calibração em regime transiente foi estabelecida de forma a representar a evolução das cargas hidráulicas e vazões de descarga subterrâneas na área de interesse desde as condições de outubro/2011 até julho/2022. Ou seja, a calibração em regime transiente simula o gradativo deságue das cavas na área de estudo.

Como condição inicial da calibração em regime transitório, foram utilizados os resultados obtidos na calibração em regime permanente. O passo inicial da simulação representa a data de 01/10/2011 (dia 0). O período final da calibração se dá na data de 31/07/2022 (dia 3956).

A recarga foi configurada para variar trimestralmente, sendo capaz de diferenciar os períodos secos e chuvosos, de acordo com a precipitação anual registrada no pluviômetro da estação da mina Capoeira Grande. Para tanto, foram mantidos os percentuais de recarga estabelecidos na calibração em regime estacionário, conforme apresentado na Tabela 7. As lacunas nos registros pluviométricos da estação da mina Capoeira Grande (código BO 031 1P1) foram preenchidas a partir da série histórica da estação climatológica de Barroso (código 2143006), visto que ambas estão próximas entre si e encontram-se localizadas em região climática e altitude semelhante. Nos períodos com ausência de registro pluviométrico de ambas as estações foram atribuídos os valores referentes aos totais mensais da série histórica Capoeira Grande, de setembro de 2002 a novembro de 2020.

Tabela 7 - Valores de recarga (mm/ano) utilizados na calibração transiente. Fonte: Hidrovia, 2022

Período	Data		N. dias	Recarga (mm/ano)		
	Inicial	Final		R1 (5% P)	R2 (6% P)	R3 (7% P)
Chuvoso	01/10/2011	31/12/2011	91	43,3	52,0	60,6
	01/01/2012	31/03/2012	90	49,6	59,5	69,4
Seco	01/04/2012	30/06/2012	90	9,7	11,6	13,5
	01/07/2012	30/09/2012	91	1,7	2,1	2,4
Chuvoso	01/10/2012	31/12/2012	91	21,6	25,9	30,2
	01/01/2013	31/03/2013	89	44,7	53,7	62,6
Seco	01/04/2013	30/06/2013	90	12,2	14,7	17,1

Período	Data		N. dias	Recarga (mm/ano)		
	Inicial	Final		R1 (5% P)	R2 (6% P)	R3 (7% P)
	01/07/2013	30/09/2013	91	5,5	6,6	7,7
Chuvoso	01/10/2013	31/12/2013	91	21,0	25,2	29,4
	01/01/2014	31/03/2014	89	12,6	15,1	17,6
Seco	01/04/2014	30/06/2014	90	5,2	6,2	7,3
	01/07/2014	30/09/2014	91	4,9	5,8	6,8
Chuvoso	01/10/2014	31/12/2014	91	24,0	28,8	33,6
	01/01/2015	31/03/2015	89	30,1	36,1	42,1
Seco	01/04/2015	30/06/2015	90	5,8	6,9	8,1
	01/07/2015	30/09/2015	91	8,7	10,4	12,1
Chuvoso	01/10/2015	31/12/2015	91	18,1	21,7	25,3
	01/01/2016	31/03/2016	90	38,9	46,7	54,5
Seco	01/04/2016	30/06/2016	90	5,4	6,4	7,5
	01/07/2016	30/09/2016	91	2,7	3,2	3,7
Chuvoso	01/10/2016	31/12/2016	91	14,2	17,1	19,9
	01/01/2017	31/03/2017	89	15,3	18,3	21,4
Seco	01/04/2017	30/06/2017	90	6,8	8,2	9,5
	01/07/2017	30/09/2017	91	0,3	0,4	0,4
Chuvoso	01/10/2017	31/12/2017	91	29,9	35,9	41,8
	01/01/2018	31/03/2018	89	28,8	34,6	40,4
Seco	01/04/2018	30/06/2018	90	2,9	3,5	4,1
	01/07/2018	30/09/2018	91	11,3	13,6	15,8
Chuvoso	01/10/2018	31/12/2018	91	28,2	33,8	39,5
	01/01/2019	31/03/2019	89	25,0	30,0	35,0
Seco	01/04/2019	30/06/2019	90	4,7	5,7	6,6
	01/07/2019	30/09/2019	91	0,3	0,4	0,4
Chuvoso	01/10/2019	31/12/2019	91	28,2	33,8	39,4
	01/01/2020	31/03/2020	90	48,2	57,9	67,5
Seco	01/04/2020	30/06/2020	90	3,8	4,5	5,3
	01/07/2020	30/09/2020	91	0,9	1,1	1,2
Chuvoso	01/10/2020	31/12/2020	91	26,4	31,7	37,0
	01/01/2021	31/03/2021	89	32,7	39,3	45,8
Seco	01/04/2021	30/06/2021	90	2,9	3,4	4,0
	01/07/2021	30/09/2021	91	5,0	6,1	7,1
Chuvoso	01/10/2021	31/12/2021	91	32,3	38,7	45,2
	01/01/2022	31/03/2022	89	23,5	28,2	32,9
Seco	01/04/2022	30/06/2022	90	5,7	6,8	7,9
	01/07/2022	31/07/2022	30	0,5	0,6	0,7

Outra condição de contorno configurada para variar ao longo do tempo foi a projeção das cavas, com inserção das cargas hidráulicas de fundo da cava, como representação do bombeamento no sump para todos os anos avaliados (2011 a 2022), conforme topografias fornecidas pela LafargeHolcim Brasil S/A (Figura 12).

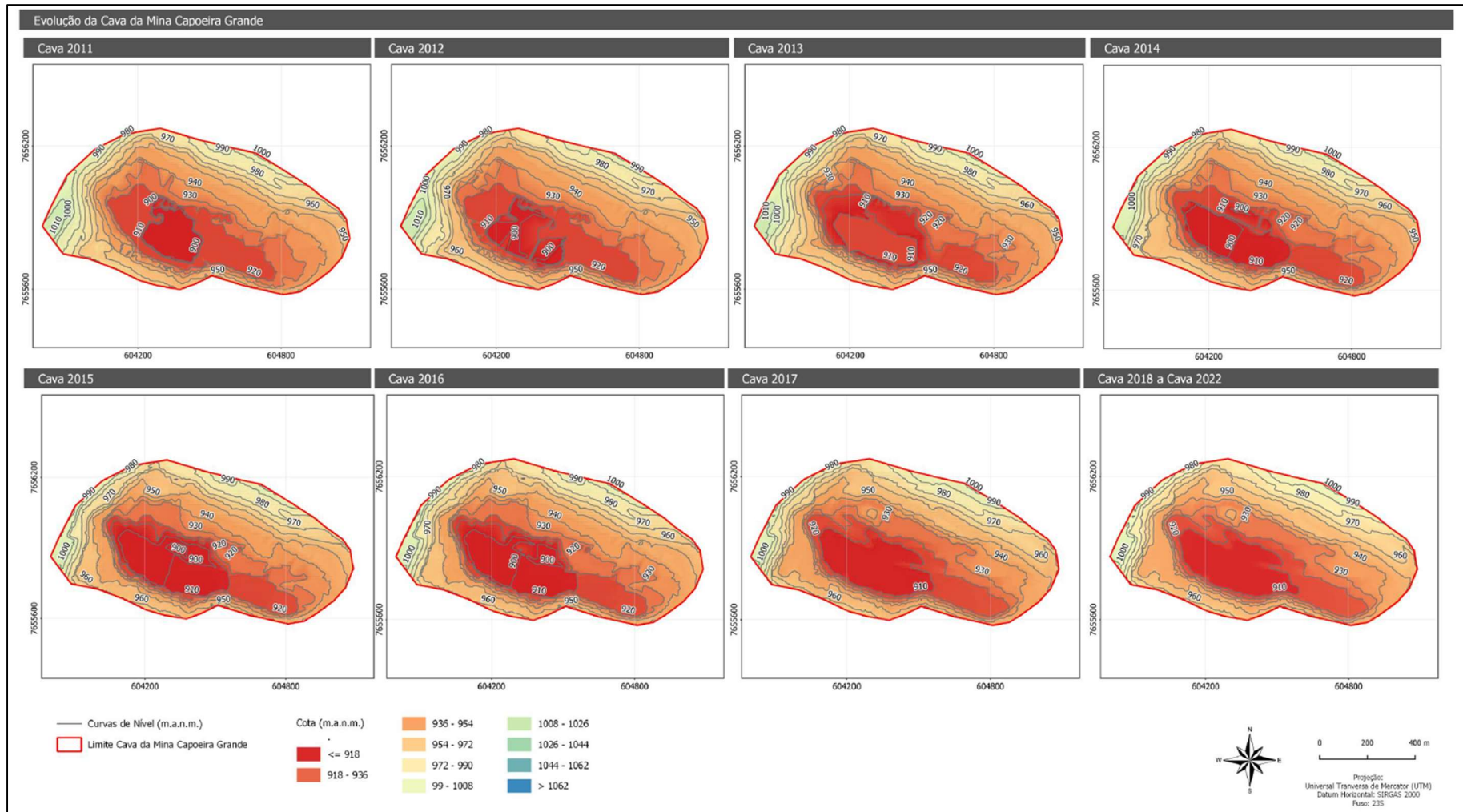


Figura 12 - Evolução da topografia da mina Capoeira Grande entre 2011 e 2022. Fonte: CSN Cimentos. Extraído de Hidrovia, 2022.

A calibração em regime transiente buscou estabelecer os parâmetros de armazenamento específico (Ss) e porosidade efetiva (Sy). Os valores obtidos na calibração são apresentados na Tabela 8. A condutividade hidráulica foi mantida conforme valores obtidos na calibração em regime permanente.

Tabela 8 - Valores de armazenamento obtidos na calibração transiente

Unidade Hidrogeológica	Armazenamento	
	Sy	Ss (1/m)
Aluvião	0,01	1e-5
Colúvio n1	0,01	1e-5
Colúvio n2	0,01	1e-5
Calcário	0,001	1e-5
Calcio-xisto	0,001	1e-5
Embasamento	0,001	1e-5

A calibração em regime transiente foi verificada comparando-se as variações temporais nos dados observados e calculados de carga hidráulica, monitorados nos instrumentos, bem como de vazão de descarga nas principais drenagens monitoradas. Nos gráficos a seguir (Figura 13 a Figura 20) são apresentados os valores calculados e observados de carga hidráulica.

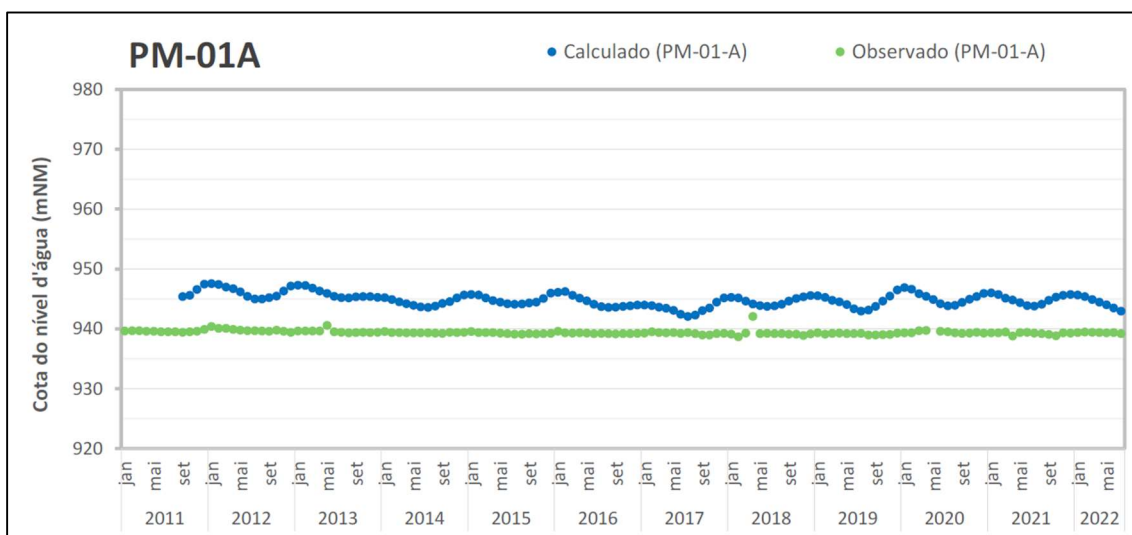


Figura 13 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PM-01-A. Fonte: Hidrovia, 2022.

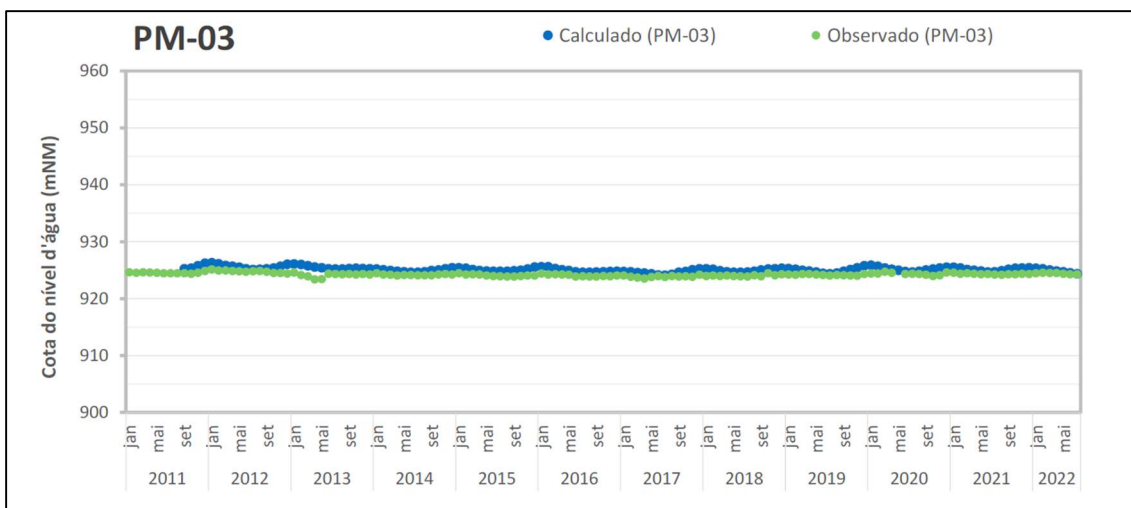


Figura 14 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PM-03. Fonte: Hidrovia, 2022.

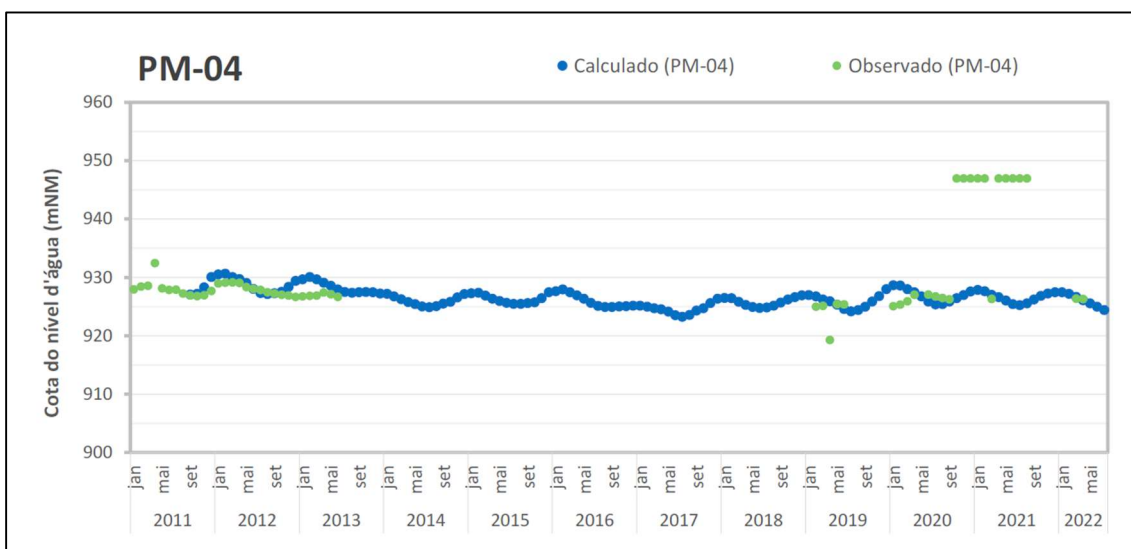


Figura 15 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PM-04. Fonte: Hidrovia, 2022.

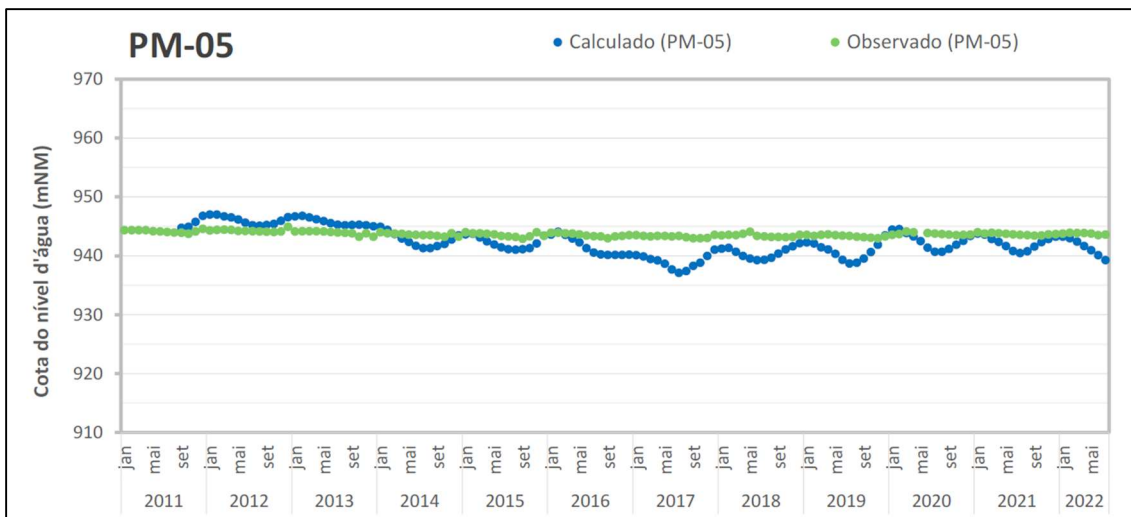


Figura 16 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PM-05. Fonte: Hidrovia, 2022.

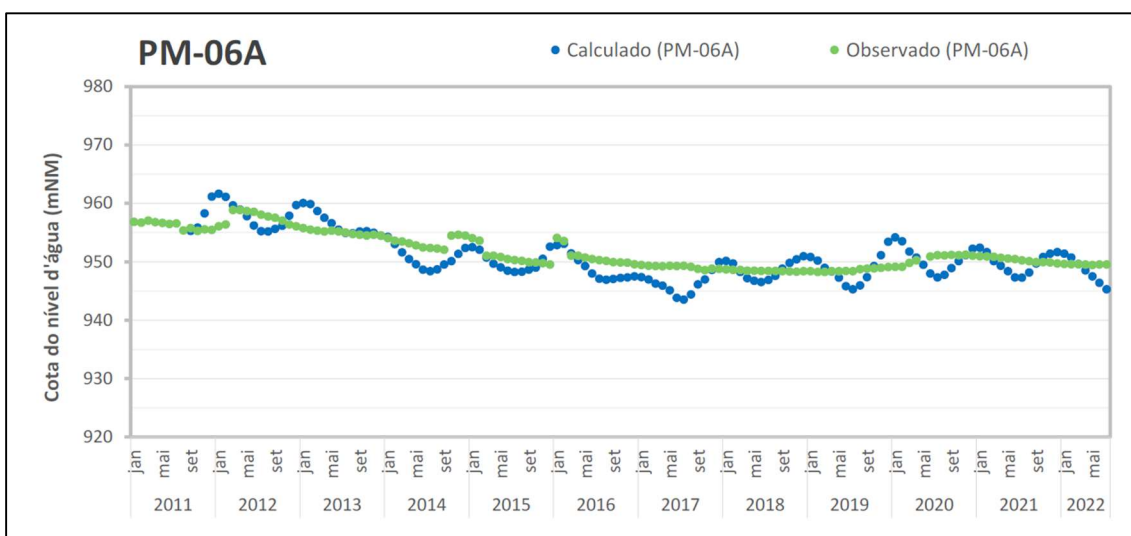


Figura 17 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PM-06A. Fonte: Hidrovia, 2022.

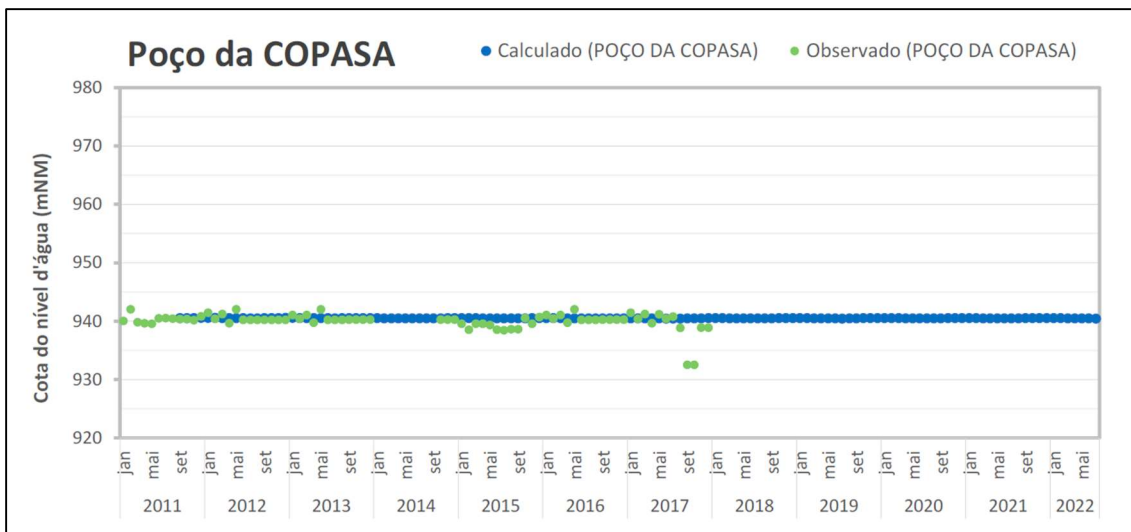


Figura 18 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o Poço da Copasa. Fonte: Hidrovia, 2022.

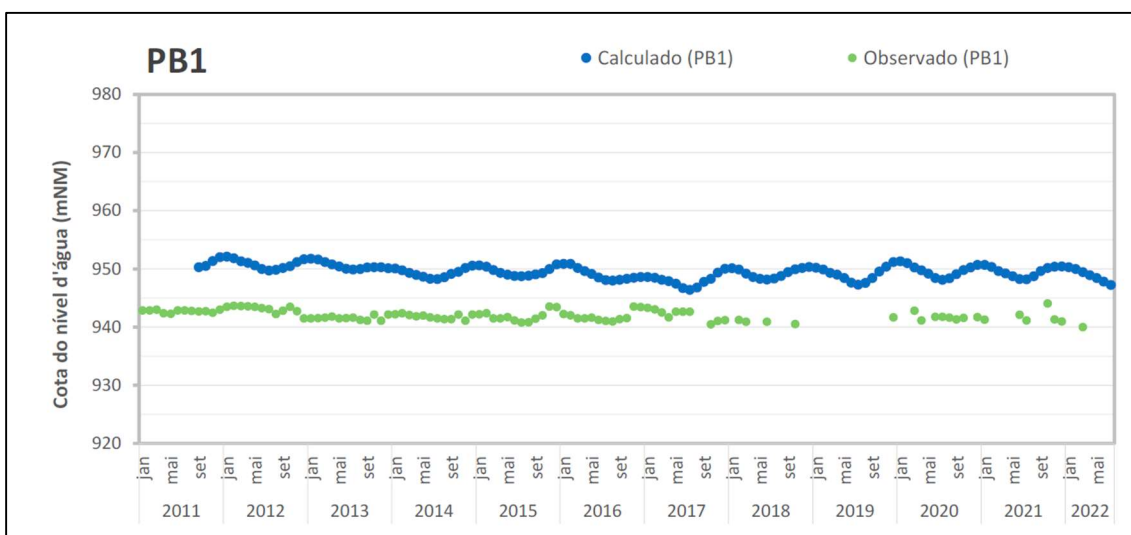


Figura 19 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PB1. Fonte: Hidrovia, 2022.

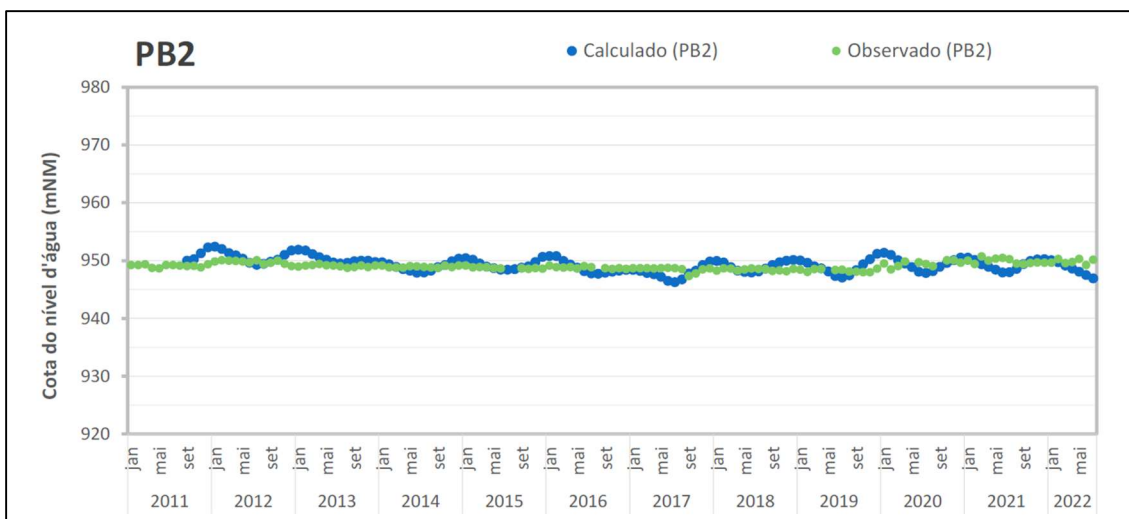


Figura 20 - Evolução do nível d'água observado e calibrado para o instrumento PB2. Fonte: Hidrovia, 2022.

Nos gráficos da Figura 21 a Figura 26 foram avaliadas as vazões subterrâneas calculadas no modelo e comparadas às vazões totais monitoradas. É importante ressaltar que durante a calibração buscou-se ajustar os valores calculados aos valores mínimos monitorados, os quais representam melhor a parcela de contribuição subterrânea.

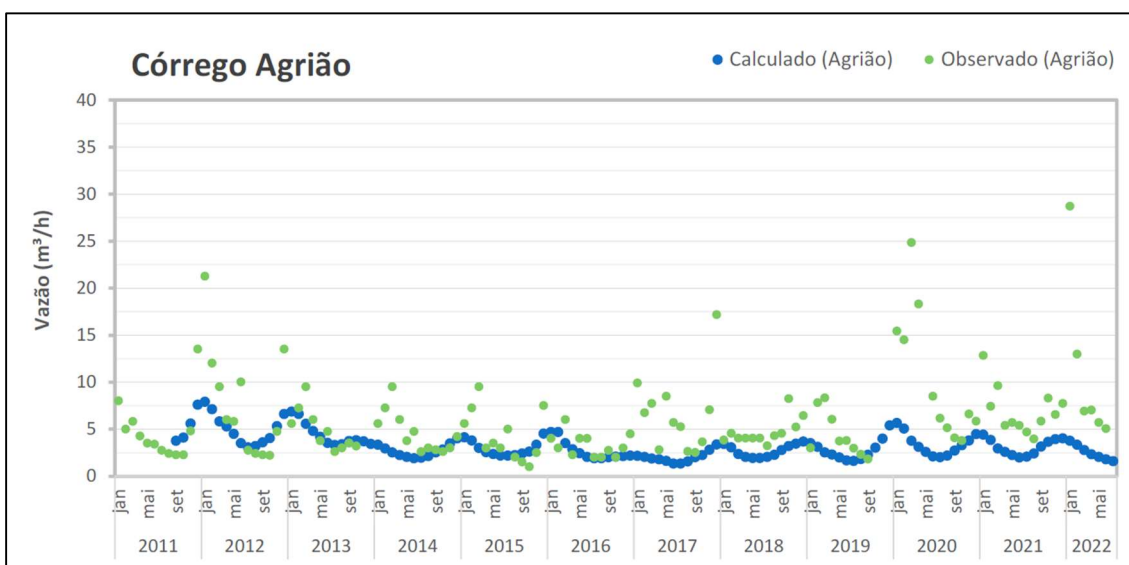


Figura 21 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no córrego Agrião. Fonte: Hidrovia, 2022.

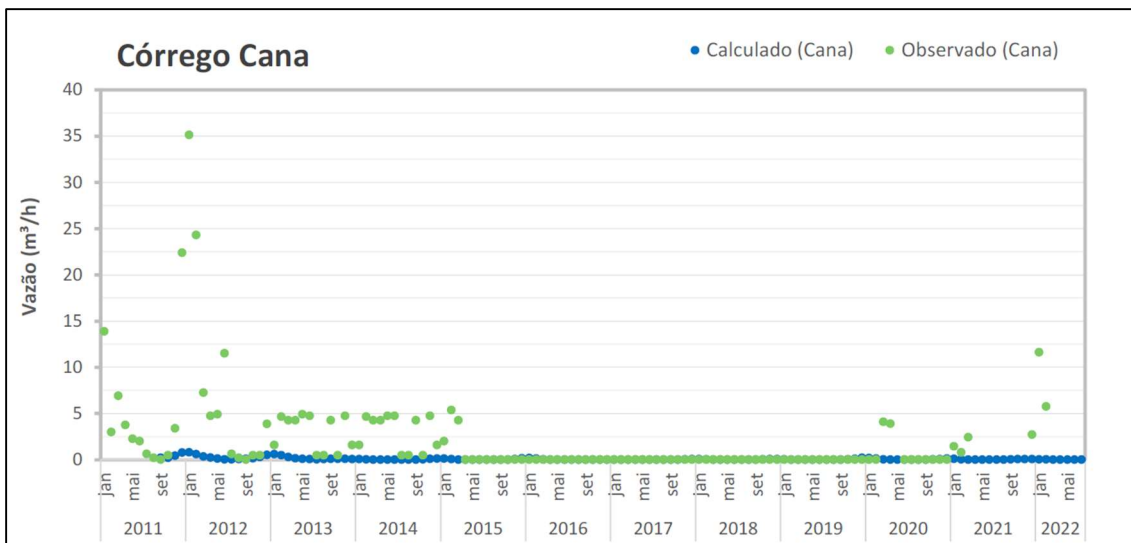


Figura 22 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no córrego Cana. Fonte: Hidrovia, 2022.

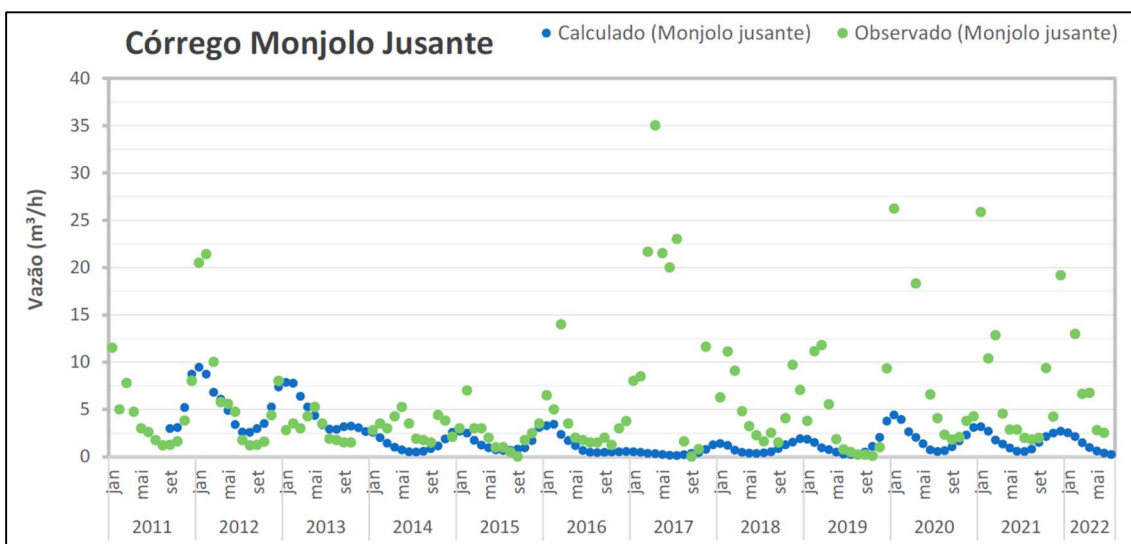


Figura 23 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no córrego Monjolo a jusante. Fonte: Hidrovia, 2022.

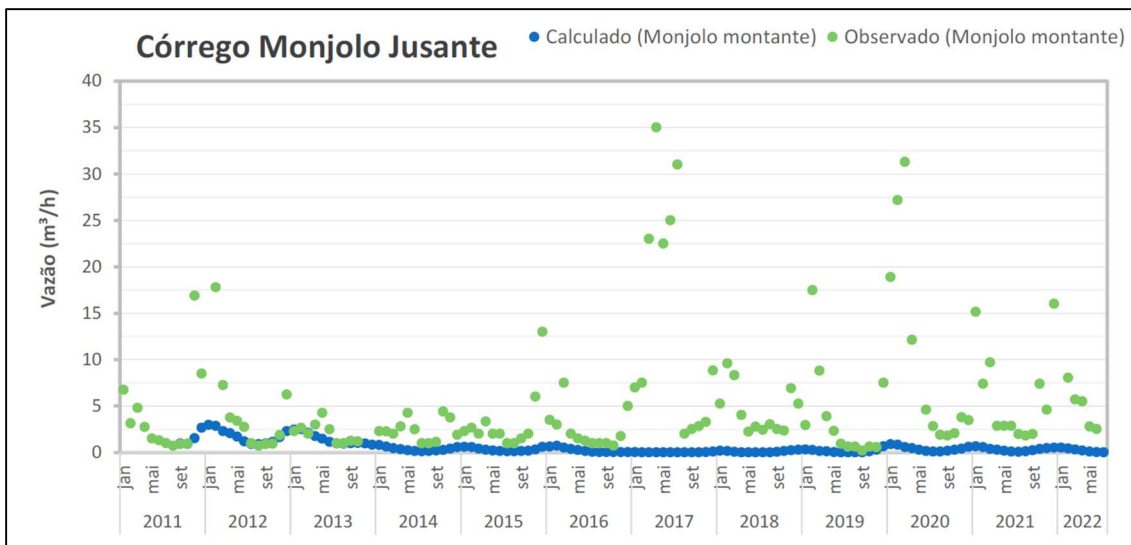


Figura 24 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no córrego Monjolo a jusante. Fonte: Hidrovia, 2022.

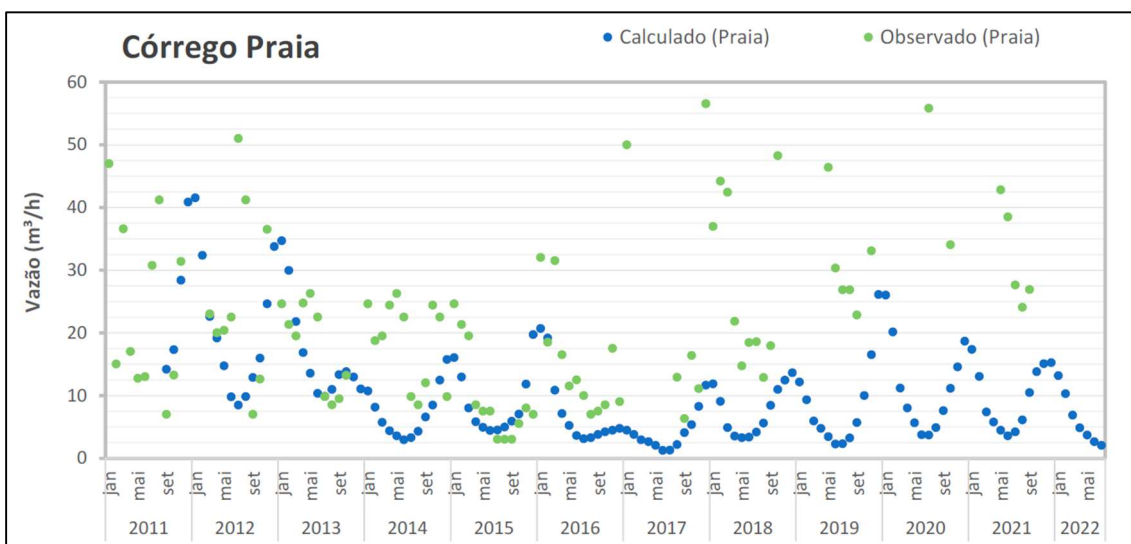


Figura 25 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no córrego Praia. Fonte: Hidrovia, 2022.

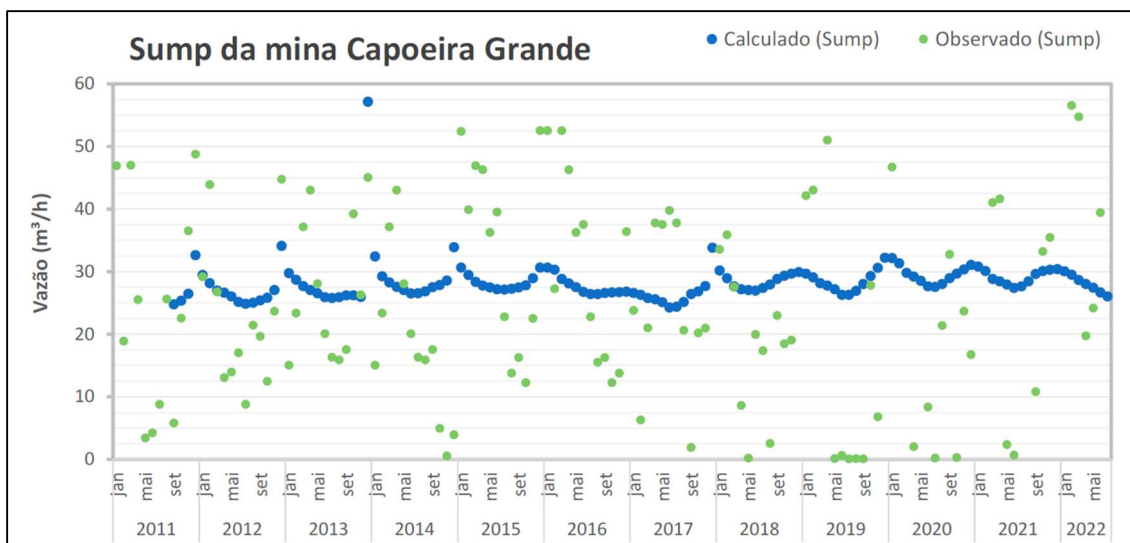


Figura 26 - Evolução das vazões subterrâneas calculadas e das vazões totais monitoradas no sump da mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia, 2022.

Observa-se que os valores das vazões de desagüamento calculados se encontram próximos aos valores máximos monitorados. Os picos de bombeamento monitorados estão associados aos períodos chuvosos e conseqüentemente ao bombeamento de água de chuva e das águas subterrâneas, enquanto os calculados pelo modelo buscam representar apenas os bombeamentos equivalentes à parcela de água subterrânea. No entanto, ressalta-se que os volumes utilizados para abastecer caminhões-pipa para umectação de vias e britador, não são computados no monitoramento.

De uma forma geral, os resultados obtidos refletem o comportamento dos instrumentos monitorados e dos fluxos regionais, assumindo-se que o modelo está calibrado e adequado para a realizações de simulações futuras. Na Figura 27 é apresentada a potenciometria final da calibração transiente (jul/2022), representando a condição atual.

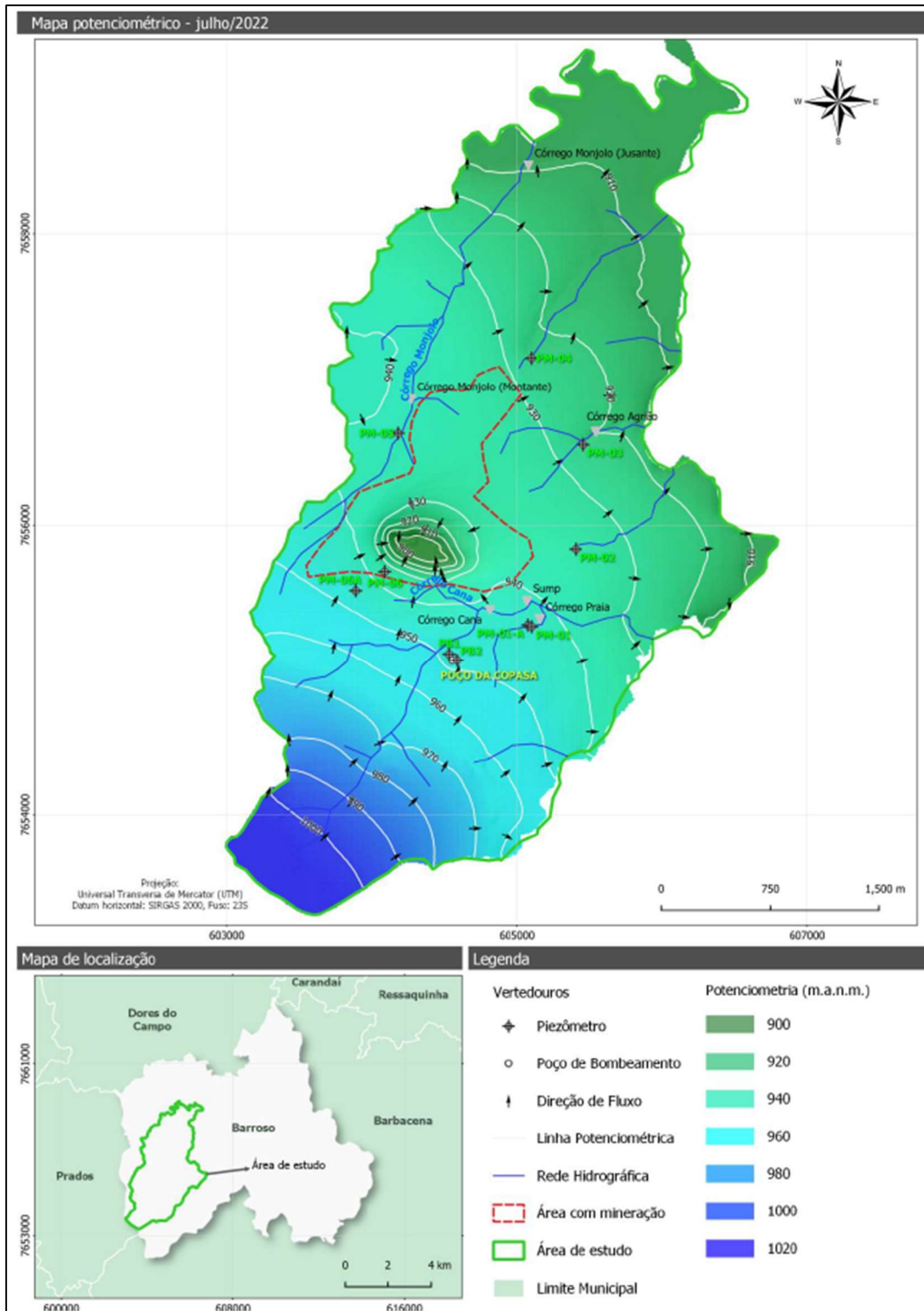


Figura 27 - Potenciomtria calculada pelo modelo numérico para julho/2022. Fonte: Hidrovia, 2022.

7.7. PROJEÇÕES DE VAZÕES DE BOMBEAMENTO

Antes das análises das simulações, é importante ressaltar que o modelo numérico é uma simplificação da realidade e não representa de forma totalmente fiel a complexidade dos fenômenos naturais. A qualidade dos resultados depende da qualidade dos dados de entrada, os quais incorporam incertezas associadas à interpretação geológica, ao conhecimento das propriedades hidráulicas do meio, bem como das falhas e lacunas no monitoramento das vazões e carga hidráulica. No entanto, os modelos matemáticos de fluxo, quando bem construídos e calibrados, são as ferramentas mais robustas para as análises hidrogeológicas, sendo capazes de fornecer resultados relevantes sobre as condições dinâmicas de fluxo hídrico, possibilitando uma análise preditiva mais assertiva.

Portanto, partindo do conhecimento das simplificações adotadas, esse recurso tem se mostrado um importante aliado para avaliação de impactos nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, auxiliando na tomada de decisões e no direcionamento das investigações hidrogeológicas. Assim, os resultados dos modelos numéricos devem ser interpretados como tendências e os valores numéricos, apresentados como ordens de grandeza desses impactos, devem ser confirmadas a partir dos dados coletados por monitoramento contínuo. Uma vez calibrado o modelo, as simulações de desaguamento da mina Capoeira Grande foram realizadas em duas etapas distintas, a saber:

- Simulação em regime transiente para os planos de lavra do ano 1 ao ano 5; e
- Simulação em regime permanente para a cava final.

Para tais simulações, ajustou-se a configuração do fundo de cava, conforme o sequenciamento anual, por meio da seleção de nós e da aplicação de carga constante com restrição de fluxo ($Q < 0$) em cotas correspondentes ao fundo de cada plano de lavra. Ressalta-se que a condição numérica de restrição de fluxo

permite que a carga constante em um determinado nó ocorra somente quando a cota do nível d'água do aquífero for superior à cota daquele nó, funcionando assim como um dreno, removendo a água do aquífero e permitindo mensurar o volume necessário de bombeamento. Conforme os dados recebidos, a cava atual encontra-se na cota 898 mNM e permanecerá nesta cota durante os próximos 5 anos, expandindo-se lateralmente, como apresentado na Figura 28.

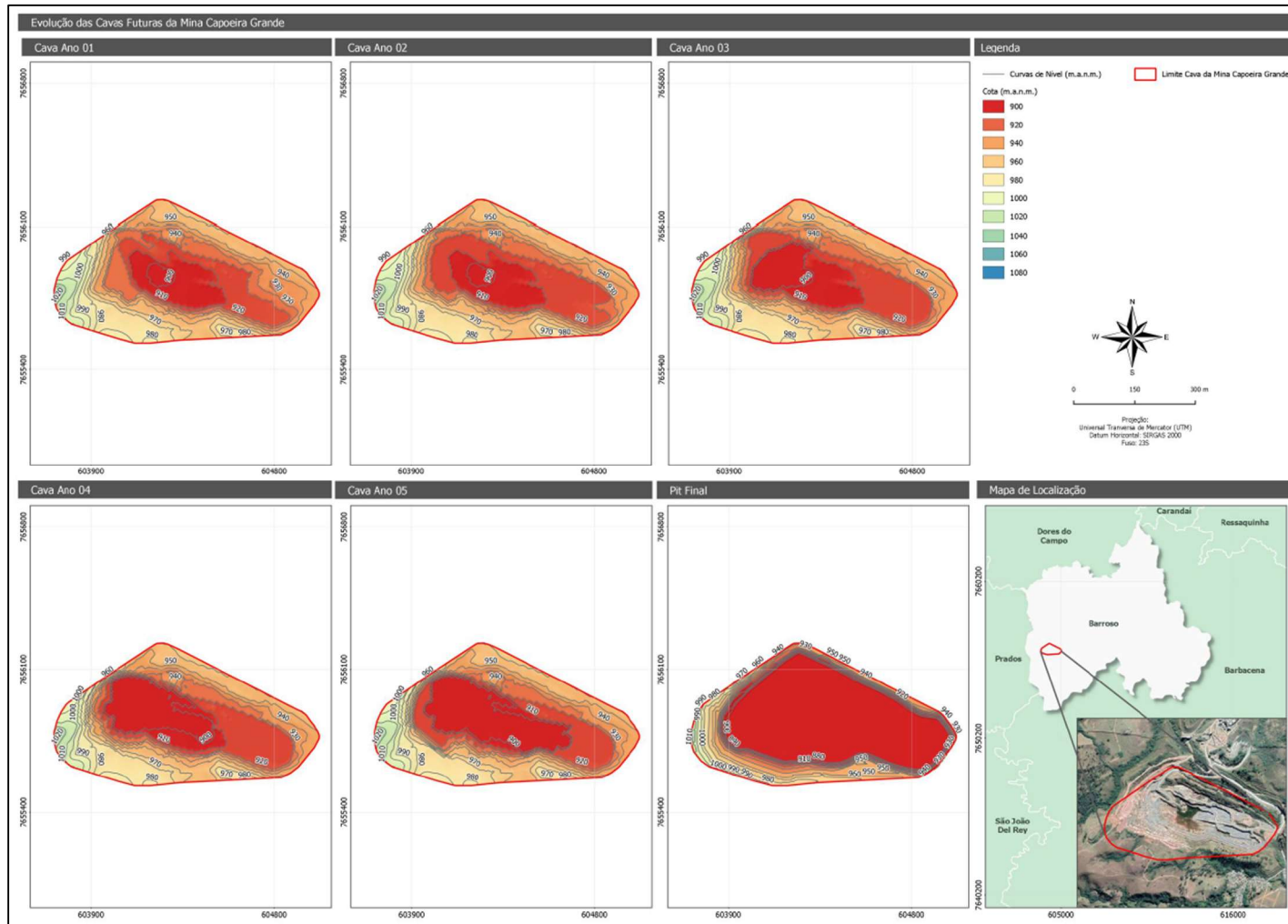


Figura 28 - Evolução futura da topografia da mina Capoeira Grande. Fonte: CSN.

Para a pit final está previsto que o fundo da cava atingirá a cota de 870 mNM. No entanto, atualmente não há previsão de quando a cava poderá atingir a situação final e, portanto, sua simulação não foi realizada em regime transiente.

7.7.1. SIMULAÇÃO PARA OS PLANOS DE LAVRA DO ANO 1 AO ANO 5

Para se avaliar a necessidade de expansão do sistema de rebaixamento ao longo do tempo, conforme o sequenciamento de lavra para os anos 1, 2, 3, 4 e 5, foi realizada a simulação de fluxo em regime transiente. Os valores de condutividade hidráulica e armazenamento calibrados foram mantidos durante as simulações.

A simulação foi realizada por um período de 1825 dias, tendo a condição final da calibração transiente como ponto de partida. A recarga foi configurada a partir de uma discretização temporal trimestral e os valores de recarga adotados correspondem às médias mensais da série histórica do pluviômetro da mina Capoeira Grande (código BO 031 1P1), relacionados com os percentuais de recarga estabelecidos para cada unidade hidrogeológica na calibração em regime permanente.

Os desaguamentos associados à evolução dos planos de lavra para os anos 1 ao 5 são apresentados na Tabela 9 e graficamente na Figura 29. Ressalta-se que as vazões de desaguamento simuladas consideram a recarga e o armazenamento geológico.

Tabela 9 - Vazões de bombeamento futuro mínima, média e máxima simulada para a mina Capoeira Grande entre os anos 1 ao 5. Fonte: Hidrovia, 2022.

Plano de lavra	Vazão de desaguamento (m ³ /h)		
	Mínima	Média	Máxima
Ano 1	27,6	30,3	42,5
Ano 2	28,5	30,4	32,5
Ano 3	32,6	56,2	141,3
Ano 4	37,9	57,5	205,7
Ano 5	38,5	51,5	90,7

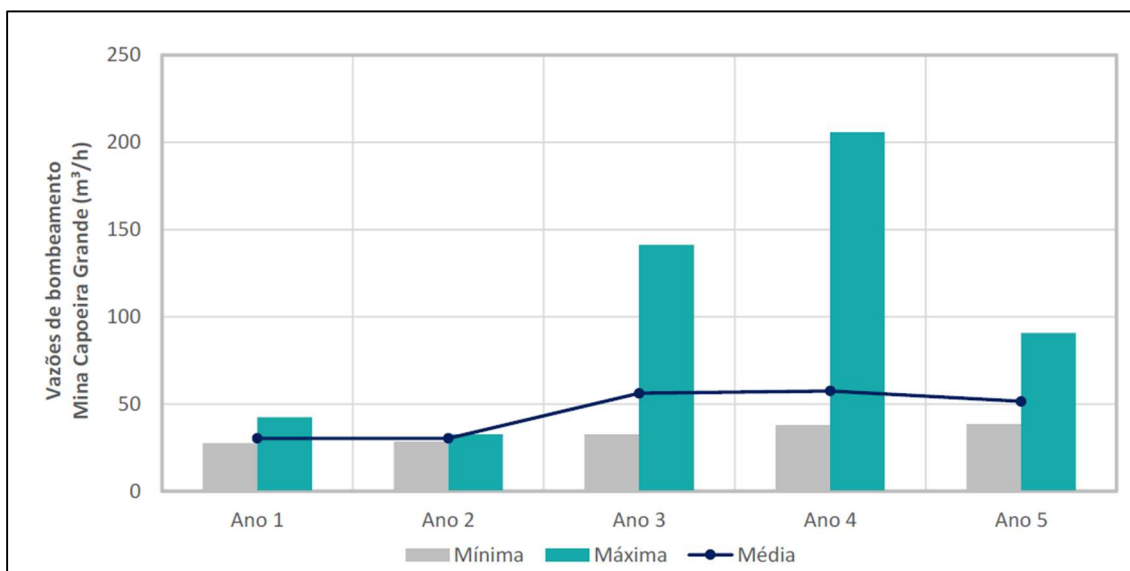


Figura 29 - Vazões de bombeamento mínima, média e máxima calculadas para os planos de lavra futuros da mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia 2022.

É importante ressaltar, que as vazões de rebaixamento calibradas no modelo transiente se aproximam dos valores máximos monitorados no sump. Desta forma, as vazões calculadas nas simulações também podem corresponder às vazões de pico dos anos simulados.

7.7.2. SIMULAÇÃO DE MÁXIMO REBAIXAMENTO

O prognóstico de máximo rebaixamento foi realizado em regime permanente, mantendo-se constantes todos os parâmetros hidrodinâmicos apresentados no item 5.5. Além disso, foi implementado o plano de lavra final da mina Capoeira Grande a partir da seleção de nós e da aplicação de condição de contorno de carga constante com restrição de fluxo ($Q < 0$) nas cotas do fundo da cava.

Em simulações realizadas em regime permanente, é importante destacar que os cálculos das vazões de bombeamento efetuados pelo modelo consideram somente a água proveniente da recarga, sem levar em consideração aportes diretos de água superficial e água do armazenamento geológico. Por isso, os valores calculados se referem às vazões mínimas de bombeamento esperadas para que haja o desaguamento das cavas, e tais vazões de bombeamento podem ser maiores, a depender do volume aportado diretamente por água superficial proveniente da precipitação.

Em regime permanente, do ponto de vista de impacto ambiental, os resultados apresentam uma situação de máximo impacto, com o máximo cone de rebaixamento já estabilizado. Desta forma, o principal objetivo da simulação em regime permanente é a avaliação dos impactos e não a estimativa de vazão de desaguamento. A simulação de desaguamento da cava final reflete uma condição de produção de água na ordem de 75 m³/h.

7.8. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS DA REGIÃO, CONSIDERANDO A INTERFERÊNCIA NA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA PARA OS DEMAIS USUÁRIOS

O prognóstico de impactos foi realizado a partir de avaliação das alterações das vazões nos pontos de monitoramento e da comparação dos valores de carga hidráulica resultantes da calibração em regime transiente (2022) com os cenários de simulação, em todos os pontos do modelo, avaliando a extensão dos impactos devido ao desaguamento. A análise de impactos nos recursos hídricos foi realizada em duas etapas distintas, a saber:

- Estimativa do impacto já produzido por meio da análise dos dados dos instrumentos de monitoramento hidrométrico, de 2001 até o presente; e,
- Estimativa numérica do impacto produzido pelos planos de lavra futuros.

Em relação às vazões de base nos córregos monitorados, o impacto pretérito pode ser estimado por meio dos instrumentos de monitoramento, de 2001 até o presente. Na Tabela 10 é apresentado um resumo das vazões médias do período seco medidas em campo. Conforme observado, o escoamento de base dos córregos Agrião e Monjolo (nos trechos a montante e a jusante) tem apresentado uma boa resposta ao regime pluviométrico da região, com incremento de vazão nos anos com maior incidência de chuva. Cabe ressaltar que houve um aumento da média histórica das precipitações, entre 2019 e 2021, comparado ao período de escassez hídrica, observado na região sudeste do Brasil a partir de 2012. Essa maior precipitação resultou em uma recarga mais expressiva nessas localidades, garantido maiores fluxos de base no período de seca.

Com base no histórico de vazão dos cursos d'água e nos valores médios calculados para o período seco, não são observados efeitos significativos decorrentes das operações de desaguamento da cava entre 2001 e 2022 no escoamento de base dos córregos Agrião e Monjolo.

Tabela 10 - Vazões de base média monitoradas entre 2001 e 2022. Fonte: Hidrovia, 2022

Data do monitoramento	Vazões médias do período seco (m³/h)				
	Córrego Agrião	Córrego Cana	Córrego Monjolo Jusante	Córrego Monjolo Montante	Córrego Praia
2001	2,5	0,4	0,6		58,9
2002	4,0	2,0	3,3		90,4
2003	4,7	2,6	4,1		106,4
2004	5,2	5,5	5,5		29,5
2005	6,0	6,4	5,5		21,2
2006	4,1	7,6	2,2	2,9	12,5
2007	3,3	6,7	2,1	1,3	16,1
2008	2,9	5,7	2,3	1,4	13,4
2009	3,5	3,0	3,1	2,0	16,3
2010	3,4	2,1	2,8	1,8	16,8
2011	3,1	1,4	2,4	1,3	20,8
2012	4,8	3,6	3,4	2,1	27,3

Data do monitoramento	Vazões médias do período seco (m³/h)				
	Córrego Agrião	Córrego Cana	Córrego Monjolo Jusante	Córrego Monjolo Montante	Córrego Praia
2013	3,9	3,2	3,0	2,1	16,6
2014	3,7	3,1	3,0	2,1	17,2
2015	3,0	0,0	1,3	1,9	5,4
2016	2,8	0,0	2,0	1,3	10,8
2017	4,0	0,0	12,2	14,5	39,1
2018	4,0	0,0	2,6	2,8	17,3
2019	3,7	0,0	1,6	1,5	51,9
2020	7,4	0,4	5,4	3,9	96,3
2021	7,8	0,0	5,1	1,7	7,9
2022	3,2		2,5	2,3	11,7

Em medições realizadas a partir de julho de 2015, é possível observar ausência de fluxo no córrego Cana, ocorrendo apenas em períodos pós chuvas, onde o fluxo tem sua contribuição mantida pelo escoamento superficial. Essa interrupção do fluxo em períodos de estiagem ocorre possivelmente em função de dois fatores: a diminuição da precipitação a partir de 2012, em conjunto com o rebaixamento do nível d'água subterrâneo, especialmente a sul da cava, onde a série de monitoramento dos instrumentos PM-06 e PM-06A, situados próximos à cabeceira do córrego Cana, demonstra uma curva descendente, em função da diminuição do nível d'água subterrâneo local.

As operações de rebaixamento de nível d'água durante todo o período monitorado foram realizadas mediante bombeamento de águas subterrâneas e pluviais agrupadas no fundo da cava, através da utilização de um sump, que retira a água da cava da mina e a lança na drenagem superficial até o córrego da Praia. O escoamento registrado neste curso d'água está condicionado ao direcionamento das águas bombeadas no lago da cava e, portanto, há uma grande variação desses volumes, já que o bombeamento não é contínuo. Assim, os dados de vazão registrados no ponto de monitoramento do córrego Praia apresentam maior dispersão, pois recebem as águas bombeadas pelo sump e também estão sujeitos a interferências antrópicas da comunidade residente em seu entorno, tanto através de captações de água como lançamento de efluentes em seu leito. O que se observa na realidade, através dos dados de monitoramento, é que as vazões monitoradas indicam um aumento nos anos

com maior índice pluviométrico (2019 e 2020) e uma tendência de diminuição nos anos seguintes (2021 e 2022), porém não é possível afirmar que haja impactos relativos ao bombeamento do sump devido aos fatores intervenientes mencionados acima.

Quanto ao prognóstico dos impactos futuros, foi realizada a comparação dos valores de carga hidráulica e de fluxo de base entre os resultados de diferentes cenários de simulação, avaliando a profundidade do rebaixamento e a extensão dos impactos devido ao desaguamento.

Ressalta-se que por se tratar de um ambiente fissural, as avaliações numéricas dos impactos nas vazões apresentam maiores incertezas e devem ser tomadas com ressalvas, uma vez que são realizadas simplificações do meio fissural, tratado como um meio poroso.

Para a avaliação dos impactos futuros, foi utilizada uma simulação de referência, em regime permanente, equivalente ao cenário atual da cava da mina Capoeira Grande. Tal simulação de referência, bem como as simulações futuras, foram padronizadas conforme calibração permanente, sendo cada simulação diferenciada apenas pelo plano de lavra em questão. Essa padronização na recarga e no regime estacionário para as simulações busca uma base comum para comparação, permitindo avaliar a variação das cargas hidráulicas e de vazões nos pontos de monitoramento provocadas exclusivamente pelo desaguamento para atendimento da expansão da cava. Na Tabela 11, é apresentada a redução prevista nas vazões de base nos pontos de monitoramento e na Tabela 12 é apresentada a redução em termos percentuais.

Tabela 11 - Estimativa da redução das vazões de base em função do plano de lavra futuro (m³/h). Fonte: Hidrovia, 2022

Plano de lavra	Redução no desaguamento dos córregos (m ³ /h)				
	Córrego Monjolo Montante	Córrego Monjolo Jusante	Córrego Praia	Córrego Cana	Córrego Agrião
Ano 1	-0,01	-0,02	-0,03	0,00	-0,01
Ano 2	-0,01	-0,02	-0,03	0,00	-0,01

Ano 3	-0,21	-0,58	-2,20	0,00	-0,41
Ano 4	-0,21	-0,81	-2,95	0,00	-0,70
Ano 5	-0,21	-0,88	-3,33	0,00	-0,89
Cava final	-0,21	-1,47	-8,95	0,00	-2,87

Tabela 12 - Estimativa da redução das vazões de base em função do plano de lavra futuro (%). Fonte: Hidrovia, 2022.

Plano de lavra	Redução no desaguamento dos córregos (m³/h)				
	Córrego Monjolo Montante	Córrego Monjolo Jusante	Córrego Praia	Córrego Cana	Córrego Agrião
Ano 1	-1%	-1%	0%	0%	0%
Ano 2	-1%	-1%	0%	0%	0%
Ano 3	-11%	-25%	-3%	0%	-8%
Ano 4	-11%	-35%	-4%	0%	-14%
Ano 5	-11%	-38%	-4%	0%	-17%
Cava final	-11%	-64%	-12%	0%	-56%

Em relação às previsões futuras dos impactos nas vazões de base, nota-se que os córregos Cana e Monjolo Montante, já na calibração apresentam o escoamento subterrâneo próximo de zero ou zero. Desta forma, nas simulações estes córregos se mantêm com fluxos desprezíveis de contribuições subterrâneas.

Por outro lado, os córregos Praia, Agrião e Monjolo jusante deverão ter suas vazões de base reduzidas gradualmente, acompanhando o avanço de lavra da mina, com percentuais de redução de 12%, 56% e 64%, respectivamente, para o cenário da cava final em relação ao cenário atual.

Além do fluxo de base, outra forma de avaliar os impactos provocados pelo avanço de lavra é através da avaliação e comparação dos valores de carga hidráulica entre os cenários simulados. Esse tipo de análise busca representar a extensão do rebaixamento do nível d'água provocado pelo desaguamento da cava. Na Figura 30, a seguir, é possível observar os rebaixamentos simulados para cada cenário de plano de lavra em relação ao cenário atual.

Vale ressaltar que a expansão da cava, nos cenários futuros, ocorre apenas lateralmente com o avanço de lavra e a cota de fundo da cava permanece em 898 mNM durante os próximos 5 anos.

Considerando as nascentes cadastradas na região pela HIDROVIA (2003), bem como os instrumentos de monitoramento de nível d'água, verificou-se que o desaguamento dos dois primeiros anos do avanço de lavra praticamente não implica em rebaixamento de nível d'água, além da condição atual. Contudo, a partir do avanço de lavra do ano 3, a extensão do rebaixamento se estenderia a oeste da cava avançando afora do domínio modelado, em direção à cabeceira do córrego da Embira. Para o cenário simulado com o plano de lavra do ano 5, o desaguamento necessário implicaria em um rebaixamento de nível d'água cuja extensão interceptaria os pontos MJ-02, CA-01, PM-05, PR-08, PM-06A, PR-07 e PR-06. Conforme apresentado na Figura 30, observa-se também que a extensão do rebaixamento não prevê impacto no Poço de abastecimento da COPASA.

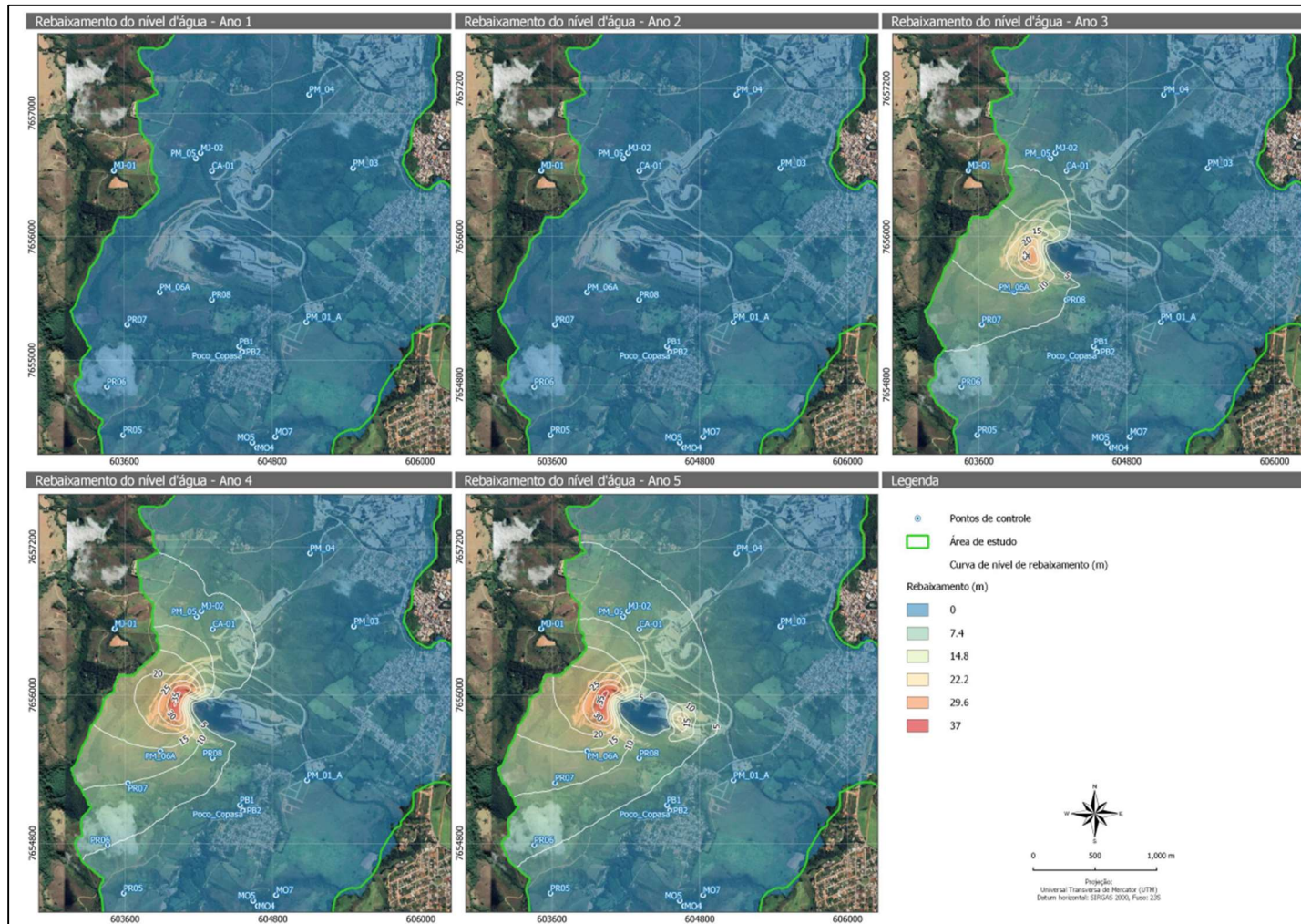


Figura 30 - Curvas de rebaixamento simuladas para os anos 1 a 5, em função do avanço de lavra da mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia, 2022.

8. PLANO DE MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO REBAIXAMENTO

8.1. MONITORAMENTO HÍDRICO SUBTERRÂNEO

A rede de monitoramento hídrico subterrâneo permite investigar a dinâmica de fluxos na bacia aquífera delimitada através da observação sistemática das cargas hidráulicas. A rede atual é composta pelo poço artesiano da COPASA/MG, que vem atendendo a demanda do Bairro Praia, e 10 poços de monitoramento relacionados na Tabela 13. A localização destes dispositivos é apresentada na Figura 36. Ressalta-se que o monitoramento do nível d'água foi interrompido nos dispositivos PM-01 (desde outubro/09), PM-02 (desde setembro/08), PM-04 (de junho/13 a fevereiro/19) e o PM-06 (desde julho/08) em função de problemas técnicos e do avanço da lavra.

A Tabela do Anexo II apresenta os dados do monitoramento das águas subterrâneas, com os valores mensais das cargas hidráulicas em cada piezômetro. As Figuras no Anexo III apresentam as oscilações mensais das cargas hidráulicas nos piezômetros instalados, bem como os valores da precipitação mensal, para o período de monitoramento hidrogeológico entre agosto/2001 e julho/2022, salvo nos piezômetros que tiveram seu monitoramento interrompido em anos anteriores, como é o caso dos piezômetros PM-01, PM-02, PM-04 e PM-06.

Através destes gráficos, verifica-se que nos 8 poços de monitoramento instalados nas adjacências do domínio de investigação de Capoeira Grande (PM-01, PM-01-A, PM-02, PM-03, PM-04, PM-05, PM-06 e PM-06-A), ocorrem oscilações de carga hidráulica natural do aquífero carbonático, correlacionadas às variações pluviométricas sazonais. Nos PMs-01 e 04, foi observada inclusive

uma tendência de elevação das cotas piezométricas, notadamente a partir do início de 2005, possivelmente relacionada a um aumento das taxas de recarga devido à maior precipitação desta estação chuvosa em relação às demais no período monitorado. O PM-06 é único poço onde é verificada uma tendência constante de diminuição das cargas hidráulicas ano após ano, porém neste poço também se observa o efeito do aumento das cargas hidráulicas em função das fortes chuvas registradas na estação chuvosa do final de 2004 e início de 2005. Esta observação corrobora as previsões qualitativas do modelo numérico realizado, onde o PM-06 seria o poço de monitoramento que apresentaria o maior rebaixamento no seu nível d'água médio com relação aos demais, com uma redução de nível de aproximadamente 20 m entre 2001 e 2008, acompanhado do PM-06-A, cujos níveis reduziram cerca de 6 m, entre 2009 e 2020. Verifica-se uma alteração anômala no comportamento do PM-02 a partir de julho de 2007, havendo um súbito aumento das cargas hidráulicas neste mês, que é normalmente seco, seguido de uma diminuição de valores nos meses chuvosos. Este comportamento sugere um possível comprometimento da estrutura do poço, tal como uma obstrução dos filtros. Como esse poço de monitoramento se localiza em terreno de terceiros, é possível que ele tenha sido danificado, o que comprometeu a qualidade das leituras. O nível d'água nos poços de monitoramento PM-03 e PM-05 apresenta comportamento estável ao longo do período monitorado, não indicando interferência da cava.

Os pontos PB1 e PB2 encontram-se situados 800 m a sul da cava e apresentam em seus registros de monitoramento piezométrico uma sutil diminuição do nível d'água, sobretudo a partir de 2013. Tal comportamento pode estar associado ao início do período de estiagem plurianual, representado pelo menor índice pluviométrico em relação à média histórica, bem como à exploração de água por meio do poço de bombeamento Praia (COPASA), não sendo observada influência direta do bombeamento realizado na cava (HIDROVIA, 2018).

Tabela 13 - Rede de monitoramento hídrico na área de influência da mina Capoeira Grande, Barroso/MG.

Fonte: Hidrovia, 2022.

Nome	Tipo	SIRGAS 2000, 23S		Elevação (mNM)	Período de monitoramento	Frequência dos dados
		UTM-E (X)	UTM-N (Y)			
Praia (COPASA)	Poço de bombeamento	604579	7655113	952,4	fev/2002 a out/2002	Quinzenal
					nov/2002 a dez/2017	Mensal
PM-01	Poço de monitoramento	605158	7655350	939,7	jul/2001 a out/2002	Quinzenal
					nov/2002 a out/2009	Mensal
PM-02	Poço de monitoramento	605449	7655877	952,4	jul/2001 a out/2002	Quinzenal
					nov/2002 a set/2008	Mensal
PM-03	Poço de monitoramento	605501	7656601	922,0	jul/2001 a out/2002	Quinzenal
					nov/2002 a jul/2022	Mensal
PM-04	Poço de monitoramento	605145	7657196	937,2	jul/2001 a out/2002	Quinzenal
					nov/2002 a abr/2022	Mensal
PM-05	Poço de monitoramento	604225	7656679	947,0	jul/2001 a out/2002	Quinzenal
					nov/2002 a jul/2022	Mensal
PM-06	Poço de monitoramento	604133	7655724	963,1	jul/2001 a out/2002	Quinzenal
					nov/2002 a jul/2008	Mensal
PB-01	Poço de monitoramento	604577	7655155	946,1	jul/2001 a out/2002	Quinzenal
					nov/2002 a mar/2022	Mensal
PB-02	Poço de monitoramento	604632	7655112	955,1	jul/2001 a out/2002	Quinzenal
					nov/2002 a jul/2022	Mensal
PM-01A	Poço de monitoramento	605137	7655360	939,2	jan/2009 a jul/2022	Mensal
PM-06A	Poço de monitoramento	603944	7655573	976,5	jan/2009 a jul/2022	Mensal

Em anexo serão apresentados os valores mensais das cargas hidráulicas e a variação mensal da carga hidráulica nos poços de monitoramento (mNM) - julho/2001 a julho/2022, disponíveis no estudo realizado pela Hidrovia.

Em síntese, nos resultados apresentados nota-se uma sutil elevação das cargas hidráulicas até meados de 2011 em alguns instrumentos, seguido por um leve rebaixamento do nível d'água até os dias de hoje, período que também coincide, grosso modo, com a sequência de anos com precipitação abaixo da média desde 2013.

8.2. MONITORAMENTO HÍDRICO SUPERFICIAL

O plano inicial de controle dos volumes que escoam nos córregos de interesse para o estudo hidrogeológico foi introduzido a partir da instalação de 5 calhas Parshall, situadas nas sub-bacias dos córregos Praia, Agrião, Cana, Monjolo e no Sump da mina Capoeira Grande, respectivamente. Além destes, em outubro de 2005 foi instalada mais uma calha Parshall no córrego Monjolo imediatamente a jusante da área da Mina Capoeira Grande, de modo a atender à condicionante número 4 da análise de processo de renovação de outorga para rebaixamento de águas subterrâneas na mina (IGAM, 20/06/05).

O mapa apresentado na Figura 37 mostra a localização destes pontos e suas respectivas bacias. A Tabela 14 apresenta as coordenadas e áreas das sub-bacias monitoradas. O monitoramento de vazão nestes pontos ocorreu com frequência diária de agosto/2001 a outubro/2002, semanal de outubro/2002 a abril/2015, quinzenal de maio/2015 a julho/2017 e semanal a partir dessa data até os dias de hoje.

Estes pontos representam todos os locais de interesse na identificação das descargas que escoam pela área de entorno do empreendimento minerário da LafargeHolcim Brasil S/A, sendo importantes para a tomada de informações a respeito das relações entre as taxas de infiltração, escoamento superficial e recarga dos aquíferos. Estas informações são importantes também para o reconhecimento dos regimes hídricos no entorno da área da mineração, os quais possam servir de balizamento a futuras comparações entre os dados coletados no momento e as implicações das taxas de bombeamento a profundidades mais acentuadas, correspondentes ao término das operações de exploração do minério e de aprofundamento da cava.

Tabela 14 - Características da rede de monitoramento hídrico superficial

Ponto de medição	SIRGAS 2000, 23S UTM E (x)	UTM N (y)	Elevação (mNM)	Área de drenagem (km ²)	Período de monitoramento
Córrego Cana	604812	7655414	924	0,176	ago/2001 a jun/2022

Ponto de medição	SIRGAS 2000, 23S UTM E (x)	UTM N (y)	Elevação (mNM)	Área de drenagem (km²)	Período de monitoramento
Sump da mina	605070	7655477	934	0,996	ago/2001 a jun/2022
Córrego Agrião	605544	7656643	910	0,528	ago/2001 a jun/2022
Córrego Praia	605156	7655350	941	2,586	ago/2001 a jun/2022
Córrego Monjolo (Jusante)	605081	7658468	943	2,373	ago/2001 a jun/2022
Córrego Monjolo (Montante)	604269	7656865	949	0,687	nov/2005 a jun/2022

A Tabela apresentada no Anexo IV traz um resumo das vazões mensais medidas nos córregos no período de agosto/2001 a junho/2022. Conforme ilustram os gráficos do Anexo V, de uma forma geral, os dados apontam uma estreita correspondência das variações de vazão com o regime pluviométrico local. Isto se manifesta graficamente, através dos aumentos dos valores de descarga nos períodos úmidos, com picos associados aos meses de dezembro a março, sendo mais suavizados nos meses de abril a setembro.

Cabe uma ressalva quanto aos dados registrados no controle das vazões do Sump da Mina Capoeira Grande, tratados neste item relativo ao monitoramento superficial em função do tipo de dispositivo instalado. Os valores anotados correspondem às captações provenientes do bombeamento que se mantém ativo para proporcionar o acesso das máquinas aos níveis inferiores da cava, menos o volume utilizado para abastecer caminhões-pipa para umectação de vias e britador.

8.3. ESTIMATIVA DE RECARGA E DESCARGA

De particular interesse para os estudos hidrogeológicos está a estimativa da recarga, pois mantém a disponibilidade hídrica dos sistemas aquíferos, sendo primordial para a elaboração de modelos de fluxo subterrâneo.

Diversos fatores alteram a dinâmica de infiltração das águas, desde os diferentes tipos litológicos, uso e ocupação do solo, declividade do terreno até a intensidade das chuvas e da irradiação solar, que influenciam nos escoamentos superficiais, nas interceptações e na evapotranspiração. Dada a heterogeneidade dos materiais litológicos na área de estudo e as suas distintas potencialidades à recarga, a quantificação da água que circula em um sistema aquífero pode ser pouco compreendida e até mesmo falseada, para mais ou para menos.

Diante deste contexto, buscou-se realizar a análise dos hidrogramas, em nível de sub-bacias, nas seções fluviométricas avaliadas, para estimar as parcelas correspondentes aos escoamentos hídricos superficial e subterrâneo. A partir de métodos de separação de escoamento é possível identificar em um hidrograma a parcela da vazão que se origina do escoamento superficial, bem como aquela porção que advém do escoamento subterrâneo. Filtros numéricos ou digitais podem ser utilizados para separar hidrogramas em suas componentes superficial e subterrânea, de forma aproximada. Um exemplo é o filtro de Eckhardt (2005), utilizado neste trabalho. Algumas vantagens desse método se devem à sua simplicidade de aplicação e a disponibilidade dos dados necessários para o uso da técnica. No entanto, ao longo do tempo diversos métodos foram propostos para a separação do escoamento, incluindo os trabalhos desenvolvidos por Lyne e Hollick (1979), Chapman (1991), Chapman e Maxwell (1996) e Collischonn e Fan (2013).

Neste estudo os procedimentos de separação de escoamento consistem na aplicação de uma rotina configurada em ambiente Visual Basic no Excel, a partir da qual é possível: construir um hidrograma para cada ano hidrológico utilizando-se os registros das descargas, identificar os períodos de recessão em cada ano para todas as estações, calcular o melhor valor para as constantes de ajustamento dos tipos de materiais existentes na bacia em análise e, por fim, realizar a separação dos escoamentos subterrâneo e superficial.

Importante ressaltar que a frequência espaçada de monitoramento, bem como a descontinuidade e distintos períodos de monitoramento das sub-bacias geram limitações nas interpretações dos resultados. Lacunas no registro de descarga aumentam o nível de incertezas em relação ao cômputo das parcelas do balanço hídrico, podendo omitir os picos de vazão esperados pelo aumento das chuvas ao longo das séries temporais. Assim, a ausência de valores de vazões máximas no registro fluviométrico revela uma tendência em superestimar as parcelas de perdas por evapotranspiração e por eventuais usos, e subestimar os volumes de escoamento superficial. Os percentuais de escoamento hídrico subterrâneo apresentam menor influência nos intervalos de pico dos hidrogramas, visto que a maior parcela tende a escoar superficialmente por deflúvio.

As seções de controle selecionadas e as informações utilizadas na análise dos hidrogramas se encontram na Tabela 15, a seguir. O quantitativo médio do balanço hídrico nas sub-bacias e uma síntese gráfica das parcelas da precipitação, dos escoamentos superficial e subterrâneo e da evapotranspiração estão esquematizados na Tabela 16 e na Figura 31 a Figura 35, nessa ordem.

Tabela 15 - Seções fluviométricas e sub-bacias selecionadas para análise dos hidrogramas. Fonte: Hidrovia, 2022.

Sub-bacia/Curso d'água	Período analisado	Área da bacia (km ²)
Córrego Cana	2001/2002 – 2011/2012	0,18
Córrego Agrião	2001/2002 – 2020/2021	0,53
Córrego Praia	2001/2002 – 2020/2021	2,59
Córrego Monjolo montante	2006/2007 – 2017/2018	0,69
Córrego Monjolo jusante	2001/2002 – 2017/2018	2,37

Tabela 16 - Quantitativo médio do balanço hídrico nas sub-bacias a montante das seções fluviométricas selecionadas. Fonte: Hidrovia, 2022.

Instrumento	Pluviometria (m ³ /h)	Escoamento superficial (m ³ /h)	Escoamento subterrâneo (m ³ /h)	Perdas hídricas (m ³ /h)
Córrego Cana	29,4	3,9	3,4	22,1
Córrego Agrião	83,2	2,1	3,6	77,5
Córrego Praia	407,5	36,3	26,5	344,7
Córrego Monjolo montante	110,6	2,9	2,0	105,6
Córrego Monjolo jusante	374,1	3,3	2,9	367,9

Conforme mostram os resultados da análise dos hidrogramas e do balanço hídrico, os valores de escoamento subterrâneo encontrados variam entre 1% e 11% da precipitação atmosférica nas sub-bacias avaliadas, apresentando valor médio de 5%. Importante reforçar que solos de textura argilosa, como os que ocorrem no domínio de abrangência deste estudo, possuem baixa permeabilidade, impedindo que a infiltração de água ocorra de forma efetiva nas camadas subsuperficiais do solo e dificultando o processo de recarga dos aquíferos em profundidade.

Observa-se também que, em geral, os percentuais de perdas hídricas, correspondentes à diferença entre a pluviometria anual média e o valor do escoamento total médio, se mantêm próximo de 90% em relação à precipitação anual monitorada. Vale salientar, no entanto, que, para a definição correta do valor da evapotranspiração e das contribuições subterrâneas, devem ser computados os usos de água específicos de cada sub-bacia para a situação atual.

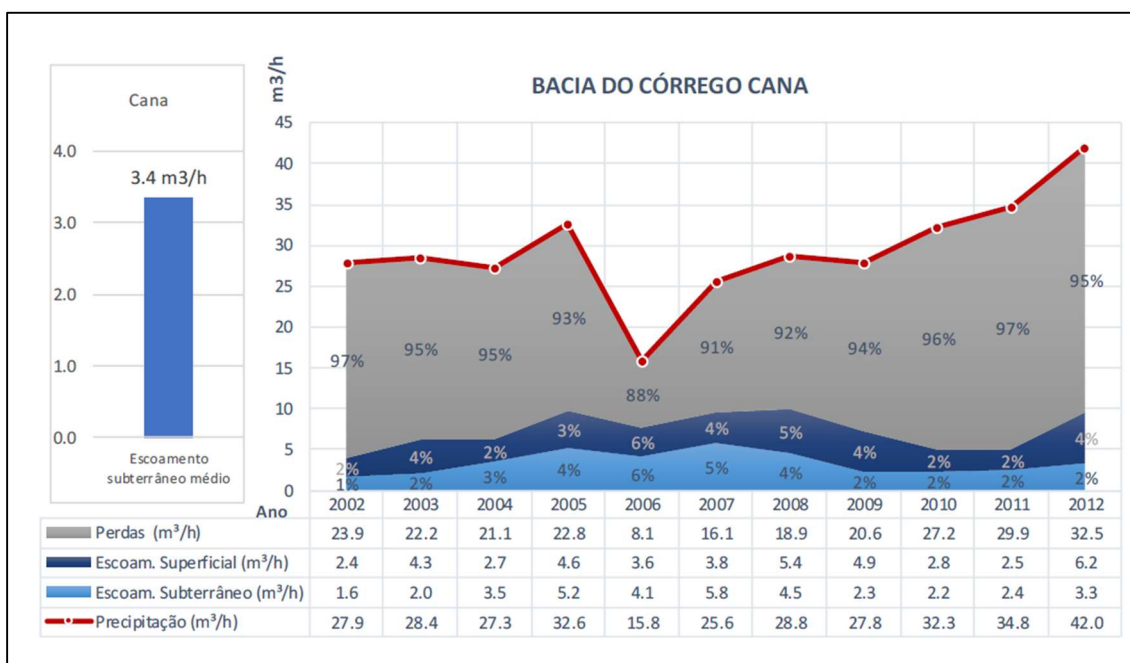


Figura 31 - Gráfico resultante do balanço hídrico na bacia do Córrego Cana. Fonte: Hidrovia, 2022.

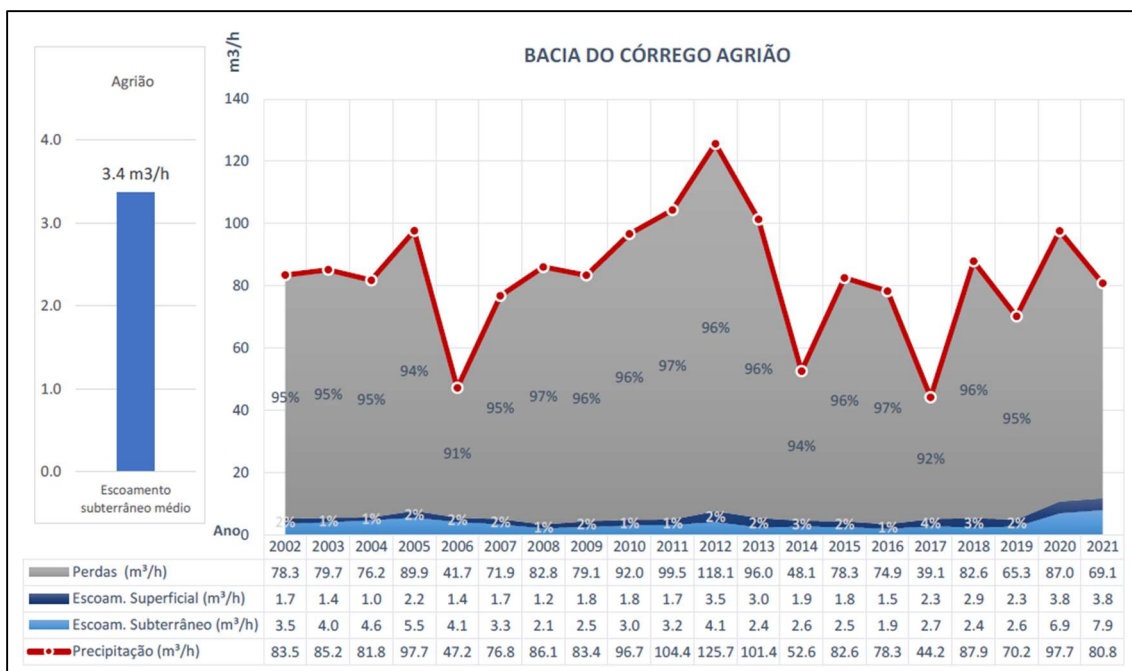


Figura 32 - Gráfico resultante do balanço hídrico na bacia do córrego Agrião. Fonte: Hidrovia, 2022.

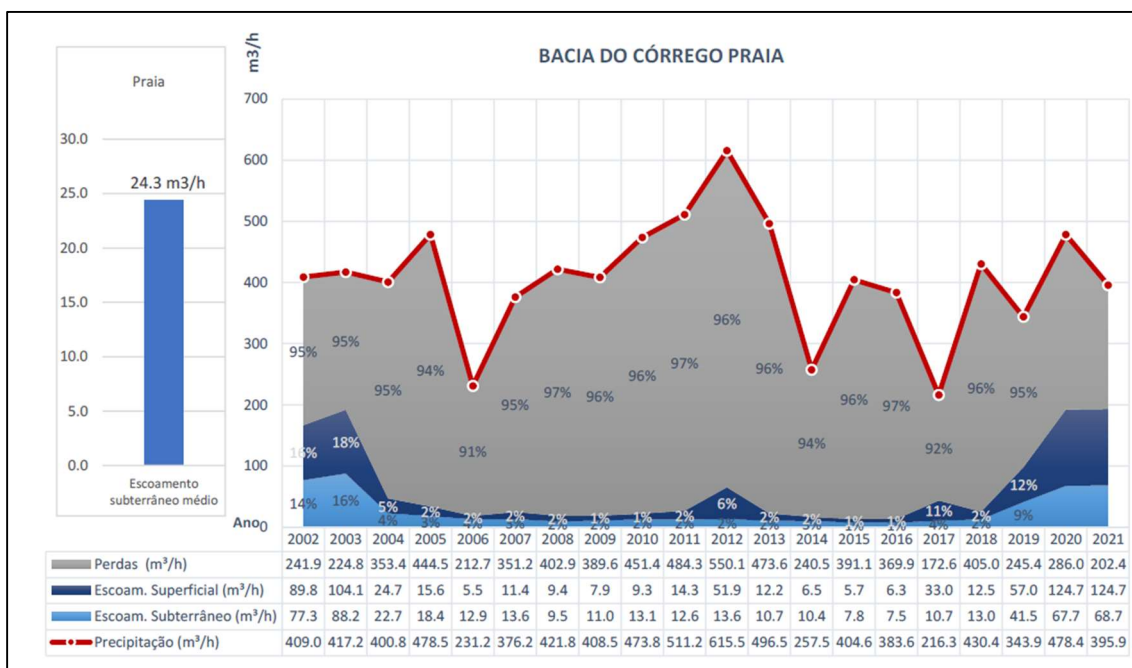


Figura 33 - Gráfico resultante do balanço hídrico na bacia do córrego Praia. Fonte: Hidrovia, 2022.

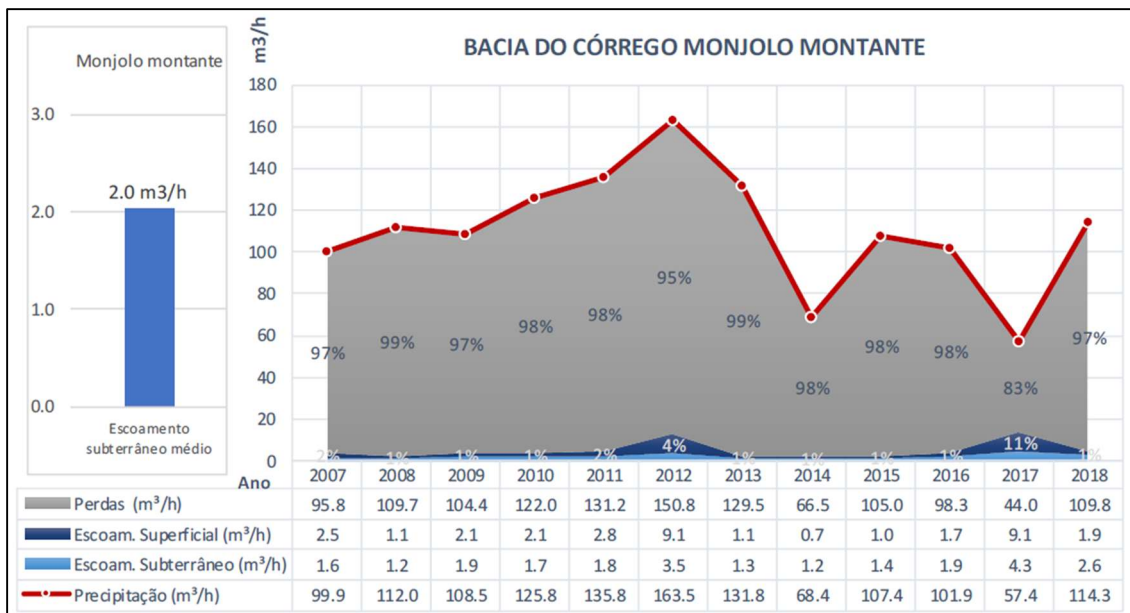


Figura 34 - Gráfico resultante do balanço hídrico na bacia do córrego Monjolo a montante. Fonte: Hidrovia, 2022.

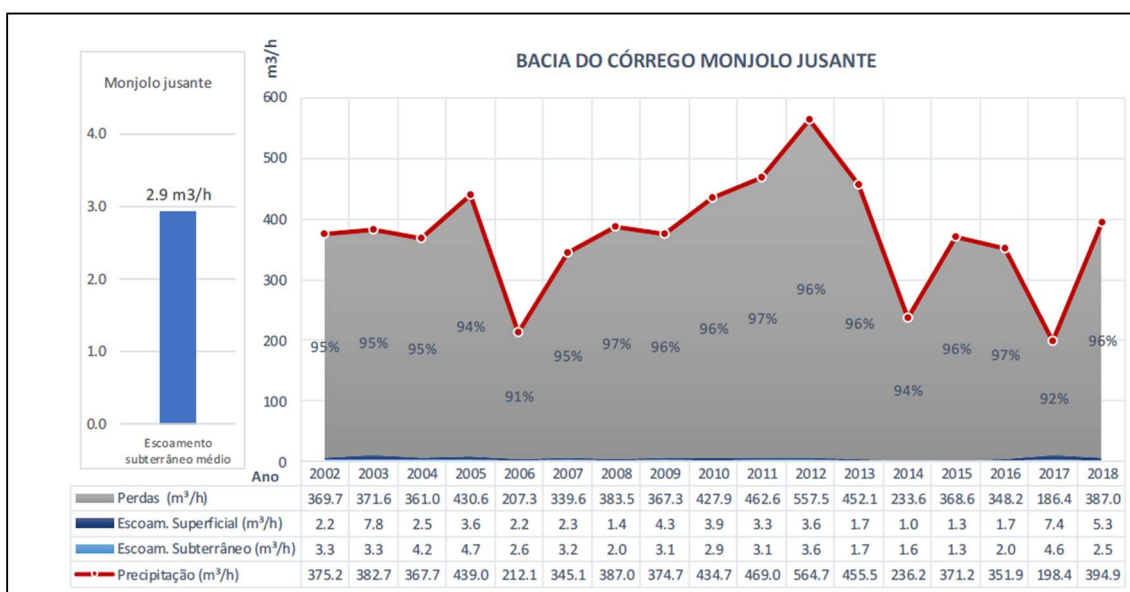


Figura 35 - Gráfico resultante do balanço hídrico na bacia do córrego Monjolo a jusante. Fonte: Hidrovia, 2022.

9. MAPA DE PONTOS DA REDE DE MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO

As figuras a seguir mostram a indicação da rede de monitoramento hídrico subterrâneo e superficial, respectivamente, localizada no entorno da Mina Capoeira Grande.

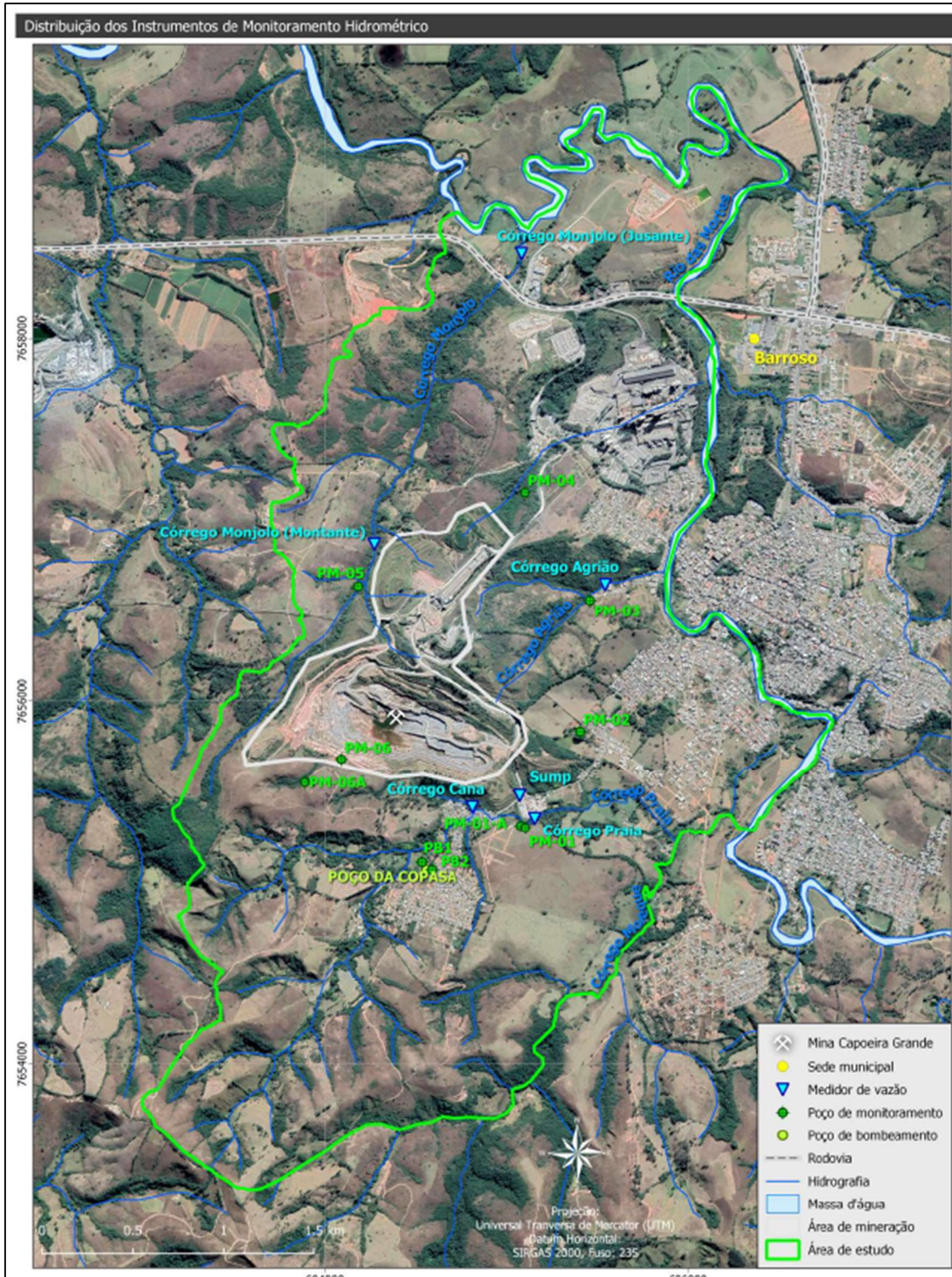


Figura 36 - Localização da rede de monitoramento hídrico no entorno da Mina Capoeira Grande. Fonte: Hidrovia, 2022.

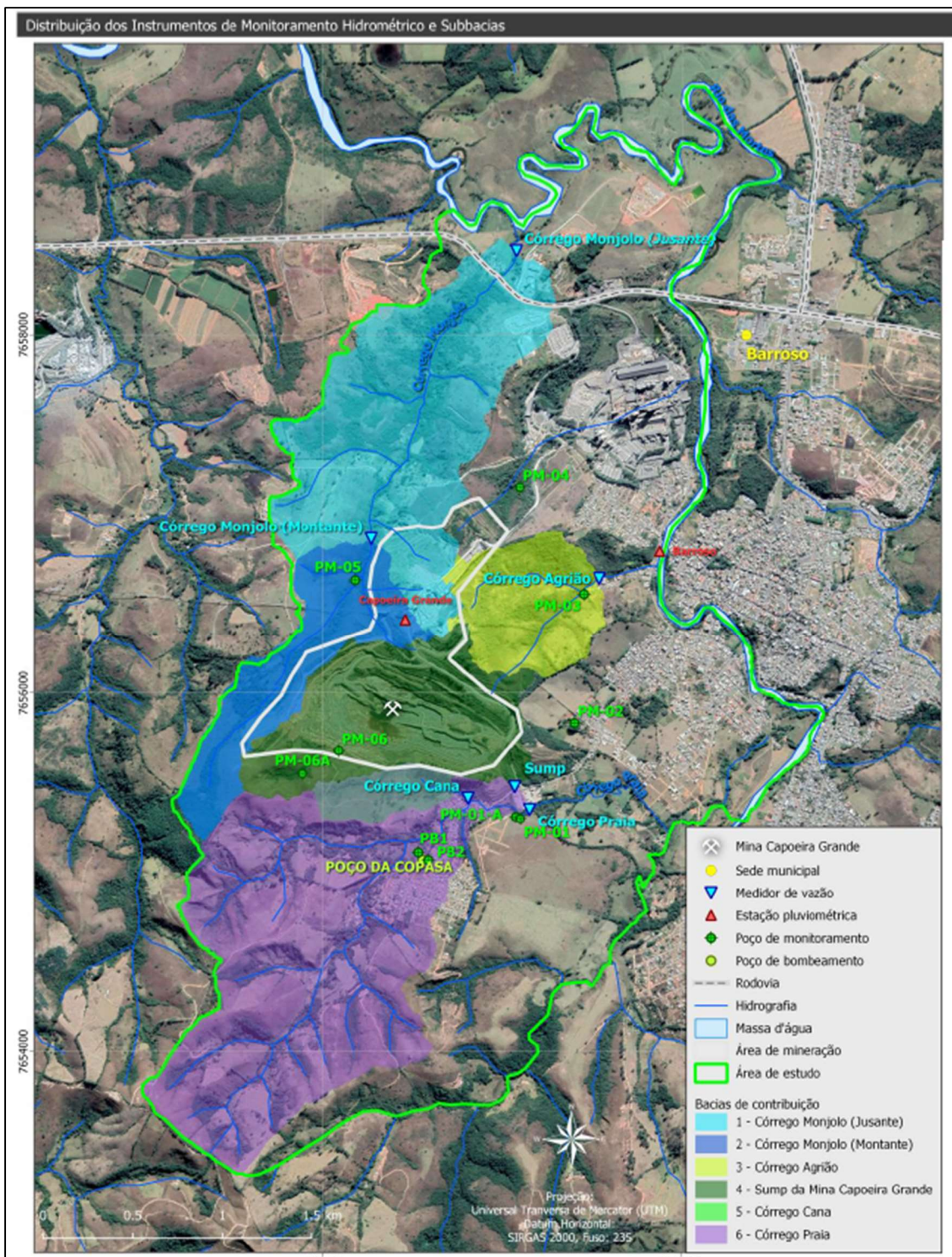


Figura 37 - Drenagem local com a indicação das regiões de contribuição para as respectivas vazões medidas nos vertedores instalados nos córregos

10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

10.1. CONCLUSÕES

Apresentou-se neste relatório a recalibração do modelo hidrogeológico numérico representativo da região localizada no entorno da mina Capoeira Grande, nas proximidades do rio das Mortes, município de Barroso, em Minas Gerais. O modelo foi utilizado para simular as condições hidrodinâmicas do sistema hidrogeológico em questão, com o objetivo de avaliar as consequências hidrológicas devidas ao rebaixamento das águas subterrâneas na cava da mina.

Os resultados obtidos com o estudo corroboram as conclusões dos estudos anteriores (HIDROVIA, 2003, 2005, 2006, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2016, 2019, 2020 e 2021) com relação ao modelo conceitual e numérico desenvolvido.

O modelo foi calibrado satisfatoriamente, comparando-se os resultados simulados de cota do nível d'água com os respectivos dados obtidos em campo, permitindo assim a sua utilização como ferramenta de análise hidrogeológica do sistema em questão. Tanto as cargas hidráulicas como vazões dos cursos d'água simuladas apresentaram comportamento relativamente semelhante ao observado. Ressalta-se, contudo, que os resultados são uma aproximação e uma simplificação das condições reais e que apesar da validação, é importante reconhecer que há incertezas inerentes aos resultados, como em qualquer modelo hidrogeológico, sendo necessário incorporar aos elementos do modelo conceitual mais informações à medida que se investiga e se conhece mais o sistema hidrogeológico. Os resultados, a sensibilidade e as limitações dependem diretamente do objetivo e da escala do modelo, bem como da quantidade e qualidade dos dados disponíveis, como por exemplo:

- Detalhamentos geológicos-estruturais da área da cava e do entorno;
- Quantidade e localização dos instrumentos de monitoramento (precipitação, carga hidráulica);
- Perfis construtivos dos instrumentos;
- Geometria dos planos de lavra;
- Topografia de detalhe do entorno etc.

Apontam-se os seguintes resultados obtidos:

Quanto ao desaguamento:

- Os resultados das simulações dos cenários de lavra mostraram que as vazões necessárias para o desaguamento da mina da Capoeira Grande serão crescentes até o final da vida útil do empreendimento, atingindo 75 m³/h para o cenário do pit final. Em se tratando de um meio com porosidade fissural, este comportamento é esperado e normal visto que, de fato, não ocorrerá a formação de um cone rebaixamento de nível d'água stricto sensu, mas a retirada da água que escorre pelos planos de acamamento e de fraturas para dentro da cava. Assim, na medida em que a cava se expande lateralmente, maior a exposição das rochas fraturadas e, por consequência, maior a necessidade de desague;
- É importante ressaltar que as vazões de rebaixamento calibradas no modelo transiente aproximam dos valores máximos monitorados no sump. Desta forma, as vazões calculadas nas simulações também podem corresponder às vazões de pico dos anos simulados;
- Ressalta-se que os volumes utilizados para abastecer caminhões-pipa para umectação de vias e britador, não são computados no monitoramento do sump;

Quanto aos impactos associados:

Com relação aos impactos pretéritos (entre 2001 e 2022) nos cursos d'água, os dados históricos de vazão das calhas parshall instaladas nos córregos Agrião e

Monjolo (nos trechos a montante e a jusante) indicam um comportamento hidrológico controlado pelo ritmo sazonal de precipitação, não havendo uma tendência de diminuição dos fluxos ao longo do tempo diferente daquele que já se observa no regime pluviométrico. Portanto, não são observados efeitos significativos decorrentes das operações de desaguamento da cava entre 2001 e 2022 no escoamento de base dos córregos Agrião e Monjolo. Por outro lado, no córrego Cana é possível observar ausência de fluxo de base a partir de 2015, ocorrendo apenas em períodos pós chuvas, onde o fluxo tem sua contribuição mantida pelo escoamento superficial. Essa interrupção do fluxo em períodos de estiagem tem ocorrido possivelmente em função do período de escassez hídrica e também do rebaixamento do nível d'água subterrâneo, especialmente a sul da cava, onde a série de monitoramento dos instrumentos PM-06 e PM-06A, situados próximos à cabeceira do córrego Cana, demonstra uma curva descendente no histórico de medições em função da diminuição do nível d'água subterrâneo local. Já o escoamento registrado no córrego Praia sofre interferência do lançamento de águas do sump e também de captações de água e lançamento de efluentes da comunidade vizinha, e, portanto, não é possível afirmar que o mesmo esteja sendo impactado pelo bombeamento de água no sump na mina Capoeira Grande.

Para a avaliação dos impactos futuros, foi utilizada uma simulação de referência, em regime permanente, equivalente ao cenário atual da mina. Tal simulação de referência, bem como as simulações futuras, foram padronizadas conforme calibração permanente, sendo cada simulação diferenciada apenas pelo plano de lavra. Essa padronização na recarga e no regime estacionário para as simulações busca uma base comum para comparação, permitindo avaliar a variação das cargas hidráulicas e vazões de base provocadas exclusivamente pelo desaguamento para atendimento da expansão da cava.

Ainda com relação aos resultados de simulação futura a partir do modelo numérico de fluxo, estima-se uma diminuição gradual na vazão dos córregos

Praia, Agrião e Monjolo jusante, com a projeção do avanço de lavra. As reduções nos respectivos cursos d'água são de 12%, 56% e 64% para o cenário da cava final. Os córregos Cana e Monjolo a montante, desde a calibração para a situação de 2019 já não apresentam fluxo de água subterrânea.

Quanto à extensão do rebaixamento produzido pelos planos de lavras, estima-se que cava projetada para o ano 5 produzirá um cone de rebaixamento na região da cava na ordem de 35 m de profundidade. Além disso, é possível observar que a extensão do rebaixamento referente ao ano 5 poderá interceptar os pontos MJ-02, CA-01, PM-05, PR-08, PM-06A, PR-07 e PR-06, porém observa-se também que a extensão do rebaixamento não prevê impacto no poço de abastecimento da Copasa.

Ressalta-se que por se tratar de um aquífero fissural, as avaliações numéricas dos impactos apresentam maiores incertezas e devem ser tomadas com ressalvas, uma vez que são realizadas simplificações do meio fissural, tratado como um meio poroso. Por isso, destaca-se a importância da continuidade do plano de monitoramento hidrológico e hidrogeológico para a área de influência da mina em questão, para que, na medida em que são observados os impactos, as medidas mitigadoras possam ser definidas e aplicadas com acuidade.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, M.P. & WOESSNER, W. W. 1992. Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press. Inc.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. 2ed. London: Academic Press, p.602, 2015.

ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS - Uma ferramenta para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. Disponível em: (<http://www.atlasdasaguas.ufv.br>). Acesso em: 10 jul. 2023.

CHAPMAN, T. G. & MAXWELL, A. I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. Hydrological and Water Resources Symposium, Institution of Engineers Australia, Hobart; 539–545. 1996.

CHAPMAN, T. G. Comment on “Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses” by RJ Nathan and TA McMahon. Water Resources Research, 27(7), 1783-1784. 1991.

COLLISCHONN, W. & FAN, F. M. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. Hydrological Processes, 27(18), 2614-2622. 2013.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Mapa Geológico de Minas Gerais. Brasília: CPRM, 2014.

EBERT, H. D. Ocorrência de fácies granulítica no sul de Minas Gerais e em áreas adjacentes. em dependência da estrutura orogênica: hipótese sobre sua origem. An. Acad. Bras. Ciências, v.40 (Suplemento), p.215-229, 1968

ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes: An International Journal, v. 19, n. 2, p. 507-515. 2005.

LYNE, V.; HOLLICK, M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. In: Institute of Engineers Australia National Conference. Barton, Australia: Institute of Engineers Australia. p. 89-93. 1979.

GUIGUER, N. & FRANZ, THOMAS. 1998. Visual MODFLOW. Waterloo Hydrogeologic.

HASUI, Y. & OLIVEIRA, M. A, F. Província Mantiqueira, setor central. In: ALMEIDA, F.F.M. de; HASUI, Y. eds, O pré-cambriano do Brasil. São Paulo, Edgar Blucher, 378 p. 1984. cap.7, p.308-344.

HIDROVIA. 2003. Avaliação das condições hidrogeológicas de rebaixamento do nível d'água no domínio de influência da Mina Capoeira Grande – Barroso/MG. Holcim Brasil. Relatório Final. Belo Horizonte, 136 p. + anexos.

HIDROVIA. 2005. Avaliação das condições hidrogeológicas de rebaixamento do nível d'água no domínio de influência da Mina Capoeira Grande – Barroso/MG. Recalibração em regime transiente. Holcim Brasil. Relatório Final. Belo Horizonte, 89 p. + anexos.

HIDROVIA. 2006. Avaliação das condições hidrogeológicas de rebaixamento do nível d'água no domínio de influência da Mina Capoeira Grande – Barroso/MG. Recalibração em regime transiente. Holcim Brasil. Relatório Final. Belo Horizonte, 88 p. + anexos.

HIDROVIA. 2007. Avaliação das condições hidrogeológicas de rebaixamento do nível d'água no domínio de influência da Mina Capoeira Grande – Barroso/MG. Recalibração em regime transiente. Holcim Brasil. Relatório Final. Belo Horizonte, 89 p. + anexos.

HIDROVIA. 2009a. Avaliação das condições hidrogeológicas de rebaixamento do nível d'água no domínio de influência da Mina Capoeira Grande – Barroso/MG. Recalibração em regime transiente. Holcim Brasil. Relatório Final. Fevereiro de 2009. Belo Horizonte, 91 p. + anexos.

HIDROVIA. 2009b. Avaliação das condições hidrogeológicas de rebaixamento do nível d'água no domínio de influência da Mina Capoeira Grande – Barroso/MG. Recalibração em regime transiente. Holcim Brasil. Relatório Final. Outubro de 2009. Belo Horizonte, 96 p + anexos.

HIDROVIA. 2010. Avaliação das condições hidrogeológicas de rebaixamento do nível d'água no domínio de influência da Mina Capoeira Grande – Barroso/MG. Recalibração em regime transiente. Holcim Brasil. Relatório Final. Dezembro de 2010. Belo Horizonte, 91 p + anexos.

HIDROVIA. 2011. Avaliação das condições hidrogeológicas de rebaixamento do nível d'água no domínio de influência da Mina Capoeira Grande – Barroso/MG. Recalibração em regime transiente. Holcim Brasil. Relatório Final. Novembro de 2011. Belo Horizonte, 92 p + anexos.

HIDROVIA. 2016. Avaliação das Condições Hidrogeológicas de Rebaixamento do Nível d'água no Domínio de Influência da Mina Capoeira Grande – Recalibração do Modelo Numérico em Regime Transiente. Holcim Brasil. Relatório Final. Julho de 2016. Belo Horizonte, 99 p.

HIDROVIA. 2018. Compilação e Síntese dos Dados de Monitoramento Hidrogeológico e Hidrológico na Região da Mina Capoeira Grande. Relatório Final. Dezembro de 2018. Belo Horizonte, 59 p.

HIDROVIA. 2019. Avaliação das Condições Hidrogeológicas de Rebaixamento do Nível d'água no Domínio de Influência da Mina Capoeira Grande – Recalibração do Modelo Numérico em Regime Transiente. Holcim Brasil. Relatório Final. Outubro de 2019. Belo Horizonte, 74 p.

HIDROVIA. 2022. Avaliação das Condições Hidrogeológicas de Rebaixamento do Nível d'água no Domínio de Influência da Mina Capoeira Grande – Modelo Numérico de Fluxo Subterrâneo. LafargeHolcim Brasil S/A. Relatório Final. Outubro de 2022. Belo Horizonte, 98 p.

HIDROWEB – Sistema de informações hidrológicas da Agência Nacional das Águas.
<http://hidroweb.ana.gov.br/hidroweb/>

IGAM/UFV. Estudo de Regionalização de Vazão de Minas Gerais: Vazões calculadas para a bacia do Rio São Francisco. 2012. Disponível na Base de Dados IDE-SISEMA: < <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webqis>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Tabelas de Apoio (Tabelas 1 a 17)

IGAM Manual Técnico e Administrativo de Outorga de Direito de Usos de Recursos Hídricos no estado de Minas Gerais. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Belo Horizonte: IGAM, 2010.234p.

KARFUNKEL, J. et al. A formação Carandaí do centro sul do Estado de Minas Gerais: gênese, ambiente de deposição e correlações. In: SIMP GEOL. MINAS GERAIS, II, 1983. Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: SBG-MG, 1983. Bol.3, p.30-37

RIBEIRO, A., ÁVILA, C. A., VALENÇA, J. G., PACIULLO, F. V. P., TROUW, R. A. J., 2002. Geologia da Folha São João Del Rei. Projeto Sul Minas – Serviço Geológico de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais e Universidade Estadual e Federal do Rio de Janeiro.

SHEWCHUK, J. R. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation. Computational geometry, v. 22, n. 1-3, p. 21-74, 2002.

TROUW, R. A. J. et al. Contribuição a geologia da Folha Barbacena 1:250.000. In: CONG. BRAS. GEOL., 34, 1986. Goiânia. Anais... Goiânia: SBG, 1986. v.2, p.974-982.

TROUW, R. A. J. et al. Os grupos São João Del Rey, Carrancas e Andrelândia, interpretados como continuação dos grupos Canastra e Araxá. In: CONG. BRAS. GEOL., 33, 1984, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: SBG-RJ, 1984. v.7, p.3227-3240.

ANEXOS

ANEXO I - ANOTAÇÃO DE RESPONSABILIDADE TÉCNICA

**ANEXO II - VALORES MENSIS DAS CARGAS HIDRÁULICAS NOS
POÇOS DE MONITORAMENTO (MNM) - JULHO/2001 A JULHO/2022**

**ANEXO III - VARIAÇÃO MENSAL DA CARGA HIDRÁULICA DOS
POÇOS DE MONITORAMENTO - JULHO/2001 A JULHO/2022**

**ANEXO IV - VALORES DE VAZÕES MENSAIS NA REDE DE
MONITORAMENTO SUPERFICIAL**

**ANEXO V - VARIAÇÃO MENSAL DE VAZÃO NA REDE DE
MONITORAMENTO SUPERFICIAL**