



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



MATEUS MALAQUIAS NASCIMENTO

**ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DOS IMPACTOS CAUSADOS PELO
REBAIXAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO EM ÁREAS DE MINERAÇÃO**

MONOGRAFIA nº 594

OURO PRETO

Julho de 2026

MATEUS MALAQUIAS NASCIMENTO

ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DOS IMPACTOS CAUSADOS PELO
REBAIXAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO EM ÁREAS DE MINERAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Geológica da Universidade Federal De
Ouro Preto como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro Geólogo. Orientadora:
Prof. Ma. Estefânia Fernandes dos Santos

OURO PRETO

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

N244e Nascimento, Mateus Malaquias.
Estratégias de mitigação dos impactos causados pelo rebaixamento
do nível freático em áreas de mineração. [manuscrito] / Mateus
Malaquias Nascimento. - 2026.
127 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Ma. Estefânia Fernandes dos Santos.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Hidrogeologia. 2. Aquíferos. 3. Impacto ambiental - Minas e
mineração. I. Santos, Estefânia Fernandes dos. II. Universidade Federal
de Ouro Preto. III. Título.

CDU 556.33:622

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Mateus Malaquias Nascimento

Estratégias de Mitigação dos Impactos causados pelo rebaixamento do Nível Freático em Áreas de Mineração

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo,

Aprovada em 17 de julho de 2026

Membros da banca

Mestre - Estefânia Fernandes dos Santos - Orientadora (Departamento de Geologia - UFOP)
Doutora - Mônica Pessoa Neves - (Departamento de Geologia - UFOP)
Geólogo - Matheus Marcolongo - (MDGEO)

Estefânia Fernandes dos Santos, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 17/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Estefânia Fernandes dos Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2026, às 17:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1142497** e o código CRC **E7EB91BF**.

RESUMO

A atividade de mineração a céu aberto ou subterrânea, quando realizada abaixo do nível freático, exige a implementação de sistemas de rebaixamento de aquíferos (*dewatering*) para garantir a estabilidade geotécnica e a segurança operacional. No entanto, essa prática gera um cone de depressão que pode resultar em impactos severos, como a exaustão de recursos hídricos locais, subsidência do solo, intrusão salina e degradação de ecossistemas dependentes de águas subterrâneas. O presente trabalho tem como objetivo analisar e propor estratégias de engenharia para a mitigação desses impactos, focando na sustentabilidade hídrica das operações. A metodologia consistiu em uma revisão bibliográfica sistemática de estudos de caso nacionais e internacionais e literatura técnica recente. Os resultados indicam que a Recarga Gerenciada de Aquíferos (RGA) se apresenta como a solução mais robusta, permitindo que o excedente de água bombeada seja reinjetado no subsolo através de bacias de infiltração ou poços de injeção, preservando o balanço hídrico regional. Destaca-se a eficácia do uso de Poços de Penetração Parcial (PPW) para otimizar a recarga em aquíferos heterogêneos próximos às cavas, bem como a utilização de barreiras físicas (cortinas de injeção) para isolar hidraulicamente corpos hídricos superficiais das áreas de rebaixamento. Além disso, a injeção estratégica durante a vida útil da mina demonstrou potencial para acelerar a recuperação do nível freático no pós-fechamento, mitigando a geração de drenagem ácida. Conclui-se que a integração de modelos hidrogeológicos preditivos e técnicas de RGA na fase de planejamento da mina é indispensável para transformar o passivo da água de *dewatering* em um ativo ambiental, garantindo a resiliência hídrica e a continuidade das operações.

Palavras-chave: Mineração; Rebaixamento de aquífero; Recarga Gerenciada de Aquíferos; Mitigação ambiental; Hidrogeologia.

ABSTRACT

Open-pit or underground mining activities, when conducted below the water table, require the implementation of aquifer drawdown systems (dewatering) to ensure geotechnical stability and operational safety. However, this practice creates a cone of depression that can lead to severe impacts, such as the exhaustion of local water resources, land subsidence, saline intrusion, and the degradation of groundwater-dependent ecosystems. This study aims to analyze and propose engineering strategies to mitigate these impacts, focusing on the water sustainability of operations. The methodology consisted of a systematic literature review of national and international case studies and recent technical literature. Results indicate that Managed Aquifer Recharge (MAR) emerges as the most robust solution, allowing surplus pumped water to be reinjected into the subsurface through infiltration basins or injection wells, thus preserving the regional water balance. The efficacy of Partial Penetration Wells (PPW) to optimize recharge in heterogeneous aquifers near mine pits is highlighted, as well as the use of physical barriers (injection curtains) to hydraulically isolate surface water bodies from drawdown areas. Furthermore, strategic injection during the life of the mine demonstrated the potential to accelerate water table recovery post-closure, mitigating the generation of acid mine drainage. In conclusion, the integration of predictive hydrogeological models and MAR techniques during the mine planning phase is indispensable for transforming dewatering water from a liability into an environmental asset, ensuring water resilience and the continuity of mining operations.

Key words: Mining; Aquifer drawdown; Managed Aquifer Recharge; Environmental mitigation; Hydrogeology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma para inclusão dos estudos	20
Figura 2 - Modelo de evolução da cunha salina. Em a) sem barreira gerada pela injeção d'água. Em b) barreira gerada pela injeção de água.....	44
Figura 3- Modelo conceitual do sistema de desaguamento e recarga gerenciada de aquíferos (MAR)	46
Figura 4 - Esquema dos principais métodos de Recarga Gerenciada de Aquíferos	47
Figura 5 - Esquema conceitual de um sistema de recarga por piscinas de infiltração, detalhando as etapas de captura, pré-tratamento e recarga	49
Figura 6 - Perfil esquemático de valas de infiltração construída em curva de nível para captação de escoamento superficial.....	49
Figura 7 - Adaptação de canais de irrigação não revestidos para recarga de aquíferos durante períodos de excedente hídrico	50
Figura 8 - Sistema de barraginhas implementado para contenção de sedimentos e recarga hídrica no Espírito Santo	52
Figura 9 - Figura esquemática mostrando um tanque de percolação indicado pela seta.....	54
Figura 10 - Perfil esquemático de um poço seco com área para decantação de finos.....	56
Figura 11 - Imagem esquemática mostrando a utilização da técnica ASR.....	59
Figura 12 - Imagem esquemática mostrando a dinâmica de injeção e extração d'água em aquíferos pela técnica ASTR	61
Figura 13 - Imagem esquemática de um rebaixamento do nível freático. Em a) poço totalmente penetrante (FPW) e b) poço parcialmente penetrante (PPW).....	64
Figura 14 - Perfil de uma seção de 1 metro no interior de um poço, capturada por câmera de inspeção (Optical Televiewer - OTV).....	66
Figura 15 - Exibição dos dados reais de mounding (elevação do nível da água no poço) sobrepostos às curvas teóricas de Pyne (1995),.....	68
Figura 16 -Tecnologia de osmose reversa. Em A), unidade de micro-filtração. B) Estrutura de osmose reversa. C) Tratamento físico-químico do material reinjetado em unidades de osmose	

reversa. D) Planta de evaporação forçada	69
Figura 17 - Fluxograma das etapas de alimentação dos poços DRS	70
Figura 18 - Mapa de contorno das águas subterrâneas em aquífero confinado em camada de carvão após mineração a céu aberto em 2020	72
Figura 19 - correlação entre o nível das águas subterrâneas e a distância em relação à cava, evidenciando a influência direta do desaguamento no comportamento do aquífero.....	74
Figura 20 - Seção esquemática do sistema hidrogeológico local	75
Figura 21 - Zoneamento das idades das águas subterrâneas e os tempos de trânsito no aquífero	77
Figura 22 - Mapa de integração de dados da região entre o trecho em secamento do Rio Santa Catarina e a porção sul da mina subterrânea de Vazante	79
Figura 23 - Sumidouros selecionados para as intervenções de tamponamento ao longo do trecho afetado pelo secamento do rio.	80
Figura 24 - Evolução das cargas hidráulicas da mina de Águas Claras em Nova Lima, MG. Em A) ano de 1999. Em B) 2002.....	83
Figura 25 - Efeitos de diferença de densidade e do deslocamento lateral da água armazenada	85
Figura 26 - Perfis de recuperação dos níveis de água subterrânea pós-mineração.....	86
Figura 27 - Representação espacial da relação entre a recuperação do nível freático, as galerias subterrâneas da mina e os pontos potenciais de surgência de água contaminada	86
Figura 28 : Distribuição global dos estudos incluídos no trabalho	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise geral dos estudos selecionados.....	88
Tabela 2 - Comparação dos estudos selecionados	93
Tabela 3 - Estudos reorganizados por grupos de estratégias.....	96
Tabela 4 - Apresentação dos critérios adotados	100
Tabela 5 - Subcritérios analisados para Eficiência Hidrogeológica.....	100
Tabela 6 - Subcritérios considerados para o Benefício Ambiental	101
Tabela 7 - Subcritérios considerados para Aplicabilidade ao Contexto Minerário.....	102
Tabela 8 - Subcritérios considerados para análise de Viabilidade Técnico-Operacional	102
Tabela 9 - Subcritérios considerados para análise de menor risco técnico	103
Tabela 10 : Subcritérios considerados para análise de maturidade de aplicação.....	104
Tabela 11 : Tabela de pesos para os critérios adotados	105
Tabela 12 : Notas para interpretação da Análise Multicritério	107
Tabela 13 : Estratégias utilizadas na Análise Multicritério.....	107
Tabela 14 : Análise Multicritério para avaliação das estratégias de mitigação.....	108
Tabela 15 : Classificação final baseada em Análise Multicritério	109

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos.....	14
1.1.1	Objetivos específicos	14
2	METODOLOGIA.....	15
2.1	Caracterização da Pesquisa.....	15
2.2	Procedimento de Revisão Sistemática e Aplicação do PRISMA	16
2.3	Estratégias de Busca e Fontes de Informação	17
2.4	CrITÉrios de Inclusão, Exclusão	18
2.5	Triagem, Elegibilidade e Seleção dos Estudos	19
2.6	Extração e Organização dos Dados	20
2.7	Agrupamento das Estratégias de Mitigação	21
2.8	Definição dos CritÉrios e Elaboração da Matriz MulticritÉrios.....	22
2.9	Classificação e Interpretação dos Resultados	24
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1	Fundamentos da Hidrogeologia na Mineração.....	25
3.1.1	O Ciclo Hidrológico e a Água Subterrânea	25
3.1.2	Tipos de Aquíferos.....	25
3.1.3	Classificação dos Aquíferos quanto a Pressão Hidrostática.....	26
3.1.4	Nível Freático e Superfície Piezométrica.....	27
3.1.5	Parâmetros Hidrodinâmicos Fundamentais	28
3.2	O Rebaixamento do Nível Freático (RNF) na Mineração	32
3.2.1	Mecanismos e Causas do Rebaixamento do Nível Freático (RNF).....	32
3.2.2	Fluxo de Água Subterrâneo e o Conceito de Poço.....	33
3.2.3	Cone de Rebaixamento	35
3.3	Impactos Ambientais e Socioeconômicos do RNF.....	36

3.3.1	Impactos na Biota e em Ecossistemas Dependentes de Água Subterrânea	37
3.3.2	Impactos na Vegetação.....	37
3.3.3	Impactos Geotécnicos	38
3.3.4	Impactos na Qualidade da Água	39
3.4	Estratégias e Tecnologias de Mitigação.....	40
3.4.1	Monitoramento Hidrogeológico.....	41
3.4.2	Barreiras Físicas e Hidráulicas.....	42
3.4.3	Modelagem Preditiva nas Fases Iniciais	44
3.5	Recarga Gerenciada (MAR)	46
3.5.1	Tecnologias de Recarga Superficial.....	48
3.5.1.1.	Piscinas de Infiltração.....	48
3.5.1.2.	Canais e Valas de Infiltração	49
3.5.1.3.	Trincheiras de Infiltração	50
3.5.1.4.	Alagamento Controlado.....	51
3.5.1.5.	Barraginhas	51
3.5.1.6.	Tanques/Lagoas de Percolação	52
3.5.1.7.	Filtração Interdunar.....	54
3.5.1.8.	Poços em Zona Vadosa	55
3.5.1.9.	Captação da água da chuva.....	56
3.5.2	Tecnologias de Injeção Profunda (poços)	57
3.5.2.1.	Injeção Direta e Gestão de Excedentes	58
3.5.2.2.	Configurações Operacionais: ASR e ASTR.....	59
3.5.2.3.	Poços Parcialmente Penetrantes (PPWs)	63
3.6	Desafios Operacionais	65
3.6.1	Colmatação (Clogging): Mecanismos, Prevenção e Gestão	65
3.6.2	Incompatibilidade Hidroquímica e Necessidade de Tratamento.....	68

3.6.3	Limitações Hidrogeológicas e Estratégias Alternativas.....	71
3.7	Utilização de Estratégias frente aos Impactos Ambientais Físicos.....	72
3.7.1	Estratégias acerca de Impactos sobre Recursos Hídricos Subterrâneos.	72
3.7.2	Estratégias acerca de Impactos sobre Corpos Hídricos Superficiais e Ecossistemas	74
3.7.3	Estratégias acerca de Impactos sobre a Qualidade da Água Subterrânea	76
3.7.4	Estratégias acerca de Impactos Geotécnicos.....	78
3.8	Desequilíbrio Hídrico e Efeitos Cumulativos.....	80
3.8.1	Desequilíbrio Hídrico e Impactos Cumulativos.....	80
3.8.2	Reuso de Água de Mina.....	82
3.9	Sustentabilidade Hídrica e Fechamento de Minas.....	83
3.9.1	Sustentabilidade Hídrica: A Transformação do Passivo do Dewatering em Ativo Estratégico	83
3.9.2	Recuperação Pós-Fechamento e Prevenção Ambiental	85
3.9.3	Monitoramento Contínuo e Gestão Adaptativa.....	87
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	88
4.1	Caracterização dos Estudos Seleccionados.	88
4.2	Análise Comparativa das Estratégias Aplicadas ao Contexto Minerário	96
4.3	Consolidação dos Critérios para Análise Multicritérios	99
4.4	Matriz Multicritério das Estratégias de Mitigação	107
4.5	Interpretação dos Resultados da Matriz.....	110
4.6	Adequação das Estratégias por Cenário Hidrogeológico	114
4.7	Limitações da Análise e Recomendações Técnicas.....	116
5	CONCLUSÃO	118
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea desempenha papel fundamental no abastecimento humano, nas atividades produtivas e na manutenção de ecossistemas em diferentes contextos hidrogeológicos. Entretanto, tanto a disponibilidade quanto a qualidade desse recurso podem ser impactadas por atividades antrópicas, entre as quais se destaca a mineração. Em empreendimentos minerários, a necessidade de garantir condições seguras e economicamente viáveis para a lavra frequentemente exige o rebaixamento do nível freático (RNF), prática que altera a dinâmica natural dos aquíferos e pode modificar o comportamento hidrogeológico da área de influência da mina.

O rebaixamento do nível freático consiste, de modo geral, na retirada contínua de água subterrânea por meio de sistemas de bombeamento, muitas vezes em volumes superiores à capacidade natural de recarga dos aquíferos. Como consequência, ocorre a alteração da superfície potenciométrica e do balanço hídrico subterrâneo, com possível formação de cones de rebaixamento, redução de vazões de base, interferência em nascentes e cursos d'água, subsidência do terreno e mudanças na qualidade da água. Em áreas de mineração, esses efeitos podem ser intensificados pela continuidade do bombeamento ao longo da operação e pela presença de unidades geológicas que, ao mesmo tempo, constituem corpos mineralizados e reservatórios aquíferos relevantes.

Diante dessa relação direta entre atividade mineradora e recursos hídricos subterrâneos, torna-se necessária a adoção de estratégias de mitigação capazes de reduzir os impactos provocados pelo rebaixamento. Entre as alternativas discutidas na literatura, destacam-se as práticas de Recarga Gerenciada de Aquíferos, ou *Managed Aquifer Recharge* (MAR), como reinjeção por poços e reinfiltração por bacias, além do aproveitamento da água de *dewatering*, barreiras físicas e hidráulicas, intervenções em zonas preferenciais de fluxo, medidas associadas ao fechamento de mina e ferramentas de modelagem e monitoramento. Essas estratégias buscam, em diferentes níveis, recompor parcialmente o balanço hídrico subterrâneo, reduzir a propagação dos impactos ambientais e subsidiar uma gestão mais eficiente da água em áreas minerárias.

Apesar do potencial dessas soluções, sua aplicação ainda enfrenta desafios técnicos e operacionais relevantes. Sistemas de recarga, especialmente aqueles baseados em poços de injeção profunda, dependem de condições hidrogeológicas favoráveis, controle da qualidade da água, infraestrutura adequada e monitoramento contínuo. Além disso, fatores como

heterogeneidade geológica dos aquíferos, baixa transmissividade, incompatibilidade hidroquímica, recirculação hidráulica, formação de *mounding* e processos de colmatção física, química e biológica podem comprometer o desempenho e a eficiência das estratégias ao longo do tempo. Em aquíferos cársticos e fraturados, essas incertezas são ainda mais significativas, devido à presença de fraturas, condutos e caminhos preferenciais de fluxo.

Nesse sentido, observa-se que, embora existam diferentes estudos de caso e propostas técnicas voltadas à mitigação dos impactos do rebaixamento do nível freático, essas estratégias ainda se encontram dispersas na literatura e são frequentemente avaliadas a partir de contextos hidrogeológicos específicos. Assim, permanece a necessidade de sistematizar e comparar essas alternativas a partir de critérios comuns, considerando não apenas sua eficiência hidrogeológica, mas também seu benefício ambiental, aplicabilidade ao contexto minerário, viabilidade técnico-operacional, riscos técnicos e maturidade de aplicação.

Diante dessa lacuna, este trabalho tem como objetivo analisar comparativamente as principais estratégias utilizadas para mitigar os impactos hidrogeológicos e ambientais provocados pelo rebaixamento do nível freático em áreas de mineração. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, com seleção dos estudos baseada na metodologia PRISMA, seguida da organização das estratégias identificadas e da aplicação de uma matriz multicritério. Dessa forma, busca-se avaliar a favorabilidade relativa das alternativas, suas limitações técnico-operacionais e sua adequação a diferentes cenários hidrogeológicos, contribuindo para a seleção preliminar de práticas mais consistentes de gestão das águas subterrâneas em empreendimentos minerários.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar comparativamente, por meio de uma revisão sistemática da literatura, com seleção dos estudos baseada na metodologia PRISMA, as principais tecnologias e estratégias de mitigação dos impactos hidrogeológicos e ambientais decorrentes do rebaixamento do nível freático em áreas de mineração, avaliando sua eficácia, aplicabilidade e limitações técnico-operacionais a partir de estudos de caso e trabalhos disponíveis na literatura.

1.1.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, a pesquisa desdobra-se nos seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os mecanismos associados ao rebaixamento do nível freático em

áreas de mineração e identificar seus principais impactos hidrogeológicos e ambientais incluindo alterações em cursos d'água, nascentes, ecossistemas dependentes de água subterrânea, qualidade da água, subsidência do solo, disponibilidade hídrica e conflitos de uso da água;

- Identificar e sistematizar, a partir dos estudos selecionados pela metodologia PRISMA, as principais tecnologias e estratégias de mitigação apresentadas na literatura, como práticas de Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR), reinjeção por poços, reinfiltração por bacias, aproveitamento da água de *dewatering*, barreiras físicas e hidráulicas, intervenções em zonas de perda, medidas de fechamento de mina e ferramentas de modelagem e monitoramento;
- Comparar as estratégias de mitigação identificadas por meio de uma matriz multicritério, considerando critérios relacionados à eficiência hidrogeológica, benefício ambiental, aplicabilidade ao contexto minerário, viabilidade técnico-operacional, menor risco técnico e maturidade da aplicação;
- Discutir a adequação das estratégias de mitigação em diferentes cenários hidrogeológicos e operacionais, considerando o tipo de aquífero, a fase da mina, a disponibilidade e qualidade da água de *dewatering*, a presença de áreas ambientalmente sensíveis e a infraestrutura disponível;
- Propor recomendações técnicas para a seleção preliminar de estratégias de mitigação.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização da Pesquisa

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura, de abordagem qualitativa, com caráter descritivo e comparativo. O estudo foi desenvolvido a partir da seleção, sistematização e análise de trabalhos técnicos e científicos relacionados aos impactos provocados pelo rebaixamento do nível freático em áreas de mineração e às estratégias utilizadas para sua mitigação.

Quanto aos procedimentos metodológicos, a pesquisa é bibliográfica, uma vez que se baseia em estudos de caso, artigos científicos, revisões técnicas e publicações especializadas disponíveis na literatura. A seleção dos estudos foi conduzida com base na metodologia PRISMA, permitindo organizar de forma transparente as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos trabalhos analisados.

A abordagem qualitativa justifica-se pelo fato de a análise não se limitar à quantificação dos estudos selecionados, mas envolver a interpretação técnica das estratégias de mitigação, suas formas de aplicação, limitações operacionais, riscos associados e adequação a diferentes contextos hidrogeológicos. Além disso, a pesquisa possui caráter comparativo, pois as estratégias identificadas foram agrupadas e avaliadas por meio de critérios comuns, posteriormente organizados em uma matriz multicritério.

2.2 Procedimento de Revisão Sistemática e Aplicação do PRISMA

A revisão sistemática da literatura foi conduzida com base na metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), utilizada neste trabalho como referência para organizar e tornar transparente o processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos analisados. A adoção dessa metodologia permitiu estruturar o percurso de seleção dos trabalhos, desde o levantamento inicial das publicações até a definição do conjunto final de estudos incluídos na análise.

Neste trabalho, o PRISMA foi utilizado como diretriz para o processo de seleção e registro dos estudos, não havendo realização de metanálise ou síntese estatística dos resultados. A análise desenvolvida possui caráter qualitativo e comparativo, com foco na sistematização das estratégias de mitigação, na identificação dos impactos associados ao rebaixamento do nível freático e na avaliação das limitações técnico-operacionais relatadas na literatura.

O procedimento foi organizado em quatro etapas principais. A primeira correspondeu à identificação dos registros, realizada por meio de buscas em bases de dados, periódicos científicos, repositórios institucionais e literatura técnica relacionada à hidrogeologia, mineração, recarga gerenciada de aquíferos e mitigação de impactos ambientais. A segunda etapa consistiu na triagem dos registros, com leitura dos títulos e resumos, visando excluir trabalhos claramente fora do escopo da pesquisa. Na terceira etapa, os estudos potencialmente relevantes foram avaliados quanto à elegibilidade, por meio da leitura integral ou parcial dos textos disponíveis, considerando sua aderência ao tema, ao contexto minerário e à presença de estratégias de mitigação ou impactos relacionados ao rebaixamento do nível freático. Por fim, a quarta etapa correspondeu à inclusão dos estudos que atenderam aos critérios definidos, resultando no conjunto final de 24 trabalhos analisados.

O processo de seleção foi representado por meio de um fluxograma, elaborado a partir da lógica do PRISMA, no qual são indicadas as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão, bem como as exclusões realizadas ao longo do processo. Esse procedimento

permitiu maior rastreabilidade na seleção das publicações e forneceu a base para a posterior extração, organização e análise comparativa das informações utilizadas nos resultados.

2.3 Estratégias de Busca e Fontes de Informação

As buscas bibliográficas foram realizadas em bases de dados científicas, periódicos especializados, repositórios institucionais e fontes técnicas relacionadas às áreas de hidrogeologia, mineração, gestão de recursos hídricos subterrâneos e mitigação de impactos ambientais. Foram consultadas plataformas como Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley/NGWA, SciELO, repositórios institucionais de universidades, bases técnicas nacionais e internacionais, além de publicações vinculadas a instituições e associações da área, como ABAS, SGB/RIGEO, ABRHidro, IMWA e ACG.

A estratégia de busca foi conduzida em português e inglês, de modo a ampliar a abrangência da revisão e incluir estudos nacionais e internacionais. Foram utilizados descritores relacionados ao rebaixamento do nível freático, mineração, hidrogeologia, impactos ambientais, desaguamento de minas, recarga gerenciada de aquíferos e estratégias de mitigação. Entre os principais termos empregados destacam-se: “rebaixamento do nível freático”, “mineração”, “hidrogeologia”, “impactos hidrogeológicos”, “recarga gerenciada de aquíferos”, “MAR”, “desaguamento de mina”, “*mine dewatering*”, “*groundwater drawdown*”, “*managed aquifer recharge*”, “*mine water management*”, “*groundwater mitigation*”, “*aquifer recharge*”, “*reinjection wells*” e “*infiltration basins*”.

Os termos foram utilizados de forma isolada e combinada, com o objetivo de localizar estudos que abordassem tanto os impactos associados ao rebaixamento do nível freático quanto as estratégias aplicadas para sua mitigação. Também foram realizadas buscas complementares a partir das listas de referências dos estudos inicialmente selecionados, permitindo identificar publicações adicionais relevantes, especialmente estudos de caso, revisões técnicas e trabalhos aplicados ao contexto minerário.

As fontes de informação incluíram artigos científicos, trabalhos acadêmicos, relatórios técnicos, estudos de caso e publicações especializadas. A seleção priorizou documentos que apresentassem relação direta com o rebaixamento do nível freático em áreas de mineração, estratégias de mitigação, aplicação de Recarga Gerenciada de Aquíferos, reinjeção, reinfiltração, aproveitamento da água de *dewatering*, controle em aquíferos cársticos ou fraturados, medidas de fechamento de mina, modelagem, monitoramento e gestão adaptativa.

2.4 Critérios de Inclusão, Exclusão

A seleção dos estudos foi realizada com base em critérios de inclusão e exclusão definidos previamente, com o objetivo de garantir a aderência dos trabalhos ao tema da pesquisa. Foram priorizadas publicações relacionadas ao rebaixamento do nível freático em áreas de mineração, aos impactos hidrogeológicos e ambientais associados a essa prática e às estratégias utilizadas para sua mitigação.

Foram incluídos estudos de caso, artigos científicos, revisões técnicas, modelagens conceituais ou numéricas, dissertações, teses e relatórios técnicos que apresentassem relação direta com o contexto minerário ou com tecnologias de mitigação aplicáveis à mineração. Também foram considerados estudos não exclusivamente minerários quando apresentavam fundamentos técnicos relevantes para a análise das estratégias avaliadas, especialmente no caso da Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR), reinjeção, reinfiltração, avaliação econômica, modelagem e gestão de recursos hídricos subterrâneos.

Como critérios de inclusão, foram considerados os trabalhos que: abordavam o rebaixamento do nível freático, o desaguamento de minas ou alterações hidrogeológicas associadas à mineração; apresentavam impactos ambientais, hidrogeológicos ou socioeconômicos relacionados à alteração dos níveis d'água subterrânea; descreviam ou avaliavam estratégias de mitigação, compensação, recarga, controle hidráulico, monitoramento, modelagem ou recuperação pós-lavra; e disponibilizavam informações suficientes para extração de dados sobre o tipo de mina, bem mineral, contexto hidrogeológico, impacto identificado e estratégia adotada.

Foram excluídos os trabalhos que não apresentavam relação clara com águas subterrâneas, mineração, rebaixamento do nível freático ou estratégias de mitigação; estudos voltados exclusivamente a aspectos geotécnicos, metalúrgicos ou operacionais sem conexão com impactos hidrogeológicos; publicações duplicadas; materiais sem acesso ao texto completo ou com informações insuficientes para análise; e estudos que abordavam apenas qualidade da água, drenagem superficial ou gestão hídrica de forma genérica, sem relação direta com o problema investigado.

A aplicação desses critérios permitiu selecionar um conjunto de estudos tecnicamente aderentes aos objetivos da pesquisa, contemplando diferentes tipos de mina, bens minerais, contextos hidrogeológicos, impactos associados ao rebaixamento e alternativas de mitigação.

2.5 Triagem, Elegibilidade e Seleção dos Estudos

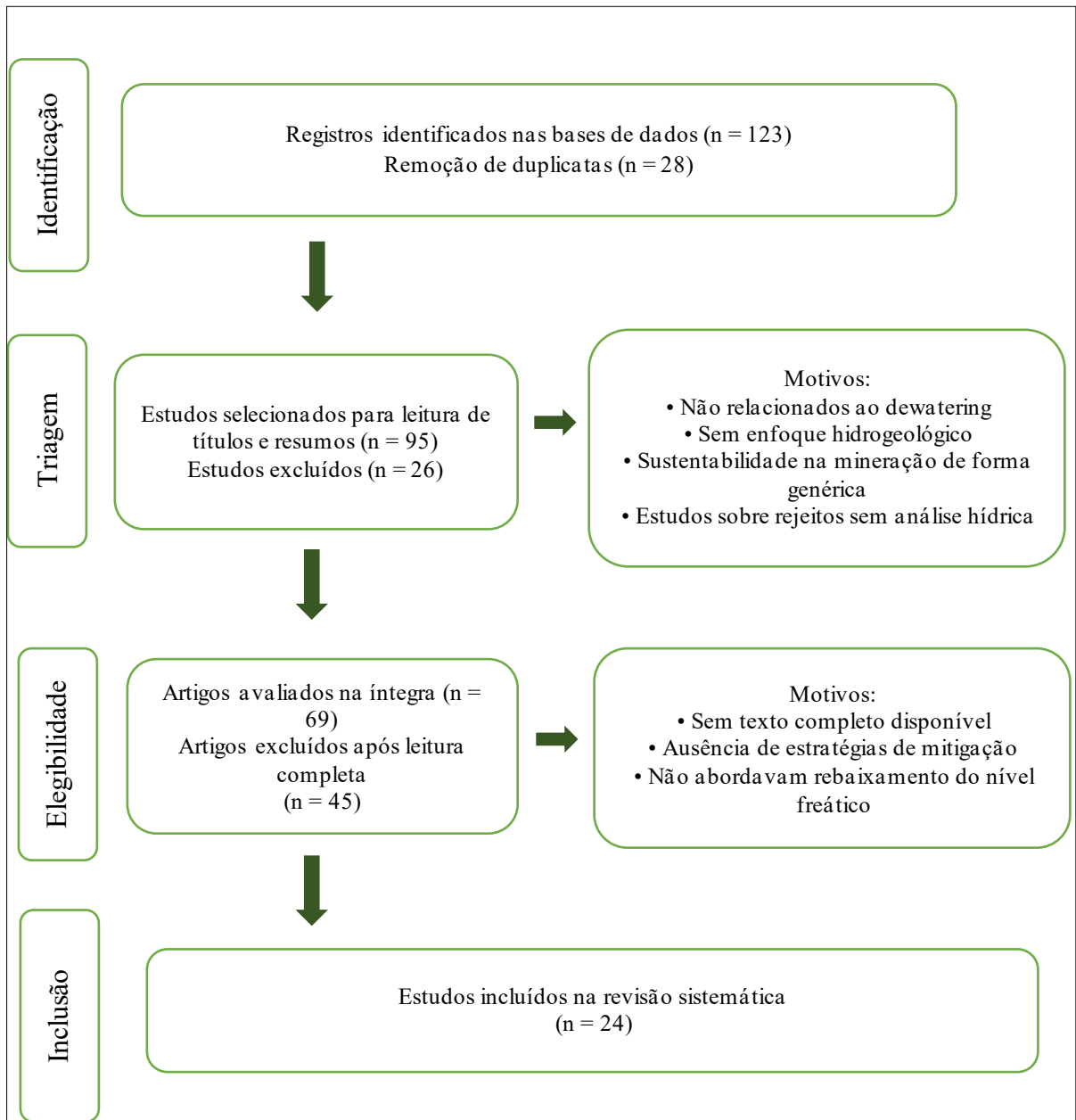
Após a definição das fontes de busca e dos critérios de inclusão e exclusão, os registros identificados foram submetidos a etapas sucessivas de triagem, elegibilidade e seleção final, conforme a lógica da metodologia PRISMA. Inicialmente, foram reunidos os trabalhos encontrados nas bases de dados, periódicos, repositórios institucionais e fontes técnicas consultadas. Nessa etapa, também foram considerados estudos adicionais identificados por meio da análise das referências bibliográficas dos trabalhos previamente selecionados.

Em seguida, foi realizada a remoção de registros duplicados e de publicações claramente fora do escopo da pesquisa. A triagem inicial ocorreu por meio da leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, com o objetivo de verificar a aderência dos trabalhos ao tema do rebaixamento do nível freático, impactos hidrogeológicos em mineração e estratégias de mitigação. Foram excluídos, nessa fase, estudos sem relação direta com águas subterrâneas, mineração, desaguamento de minas, recarga de aquíferos, controle hidráulico, modelagem, monitoramento ou recuperação pós-lavra.

Os estudos considerados potencialmente relevantes foram então avaliados na etapa de elegibilidade, por meio da leitura integral ou parcial dos textos disponíveis. Nessa fase, verificou-se se os trabalhos apresentavam informações suficientes para a análise proposta, como tipo de mina, bem mineral, contexto hidrogeológico, impacto identificado, estratégia de mitigação adotada ou discutida e principais limitações técnico-operacionais. Trabalhos com abordagem muito genérica, ausência de informações aplicáveis à matriz de análise ou sem acesso ao conteúdo necessário foram excluídos.

Ao final do processo, foram selecionados 24 estudos para compor a base de análise deste trabalho. Esses estudos foram utilizados na caracterização dos casos selecionados, na identificação e agrupamento das estratégias de mitigação, na definição dos critérios de avaliação e na elaboração da matriz multicritério. O processo de triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos está representado no fluxograma da

Figura 1: Fluxograma para inclusão dos estudos seguindo as metodologia PRISMA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base no fluxograma de seleção de estudos da metodologia PRISMA.

2.6 Extração e Organização dos Dados

Após a definição do conjunto final de estudos incluídos na revisão sistemática, foi realizada a etapa de extração e organização das informações consideradas relevantes para os objetivos da pesquisa. Essa etapa teve como finalidade sistematizar os dados presentes nos trabalhos selecionados e permitir a comparação entre diferentes estratégias de mitigação dos impactos associados ao rebaixamento do nível freático em áreas de mineração.

Para cada estudo incluído, foram extraídas informações referentes ao autor e ano de publicação, tipo de mina, bem mineral associado, contexto hidrogeológico ou tipo de aquífero analisado, impacto hidrogeológico ou ambiental identificado, estratégia de mitigação proposta ou aplicada, além de limitações técnico-operacionais e observações relevantes para a comparação entre os casos. Quando disponíveis, também foram consideradas informações sobre a fase do empreendimento, escala de aplicação, uso de modelagem, monitoramento, qualidade da água, riscos técnicos e condições necessárias para a implantação da estratégia.

As informações extraídas foram organizadas em uma tabela-síntese, utilizada como base para a caracterização dos estudos selecionados e para a análise comparativa das estratégias de mitigação. Essa organização permitiu identificar padrões recorrentes na literatura, como os principais tipos de impacto associados ao rebaixamento, os contextos hidrogeológicos mais discutidos, as estratégias mais frequentemente aplicadas e as limitações técnicas observadas em diferentes estudos de caso.

A sistematização dos dados também subsidiou as etapas posteriores da pesquisa, especialmente o agrupamento das estratégias de mitigação, a definição dos critérios de avaliação e a elaboração da matriz multicritério. Dessa forma, a extração dos dados não se limitou ao registro bibliográfico dos estudos, mas buscou reunir elementos técnicos suficientes para avaliar a favorabilidade relativa das estratégias analisadas.

2.7 Agrupamento das Estratégias de Mitigação

Após a extração e organização dos dados, as estratégias identificadas foram inicialmente avaliadas de forma individual, considerando sua aplicação em cada estudo de caso ou trabalho técnico. Em seguida, foram agrupadas em categorias com base na semelhança entre seus mecanismos de atuação e sua finalidade principal. Esse agrupamento permitiu comparar estratégias de mesma natureza, mesmo quando aplicadas em contextos minerários distintos, evitando que a análise ficasse restrita à descrição isolada de cada publicação.

A partir dessa interpretação, as estratégias foram organizadas em grupos principais, incluindo: reinjeção por poços ou MAR por reinjeção; reinfiltração e bacias de infiltração; aproveitamento compensatório da água de *dewatering*; rebaixamento controlado em aquíferos cársticos ou fraturados; tamponamento de condutos e impermeabilização de zonas de perda; *backfill* e enchimento controlado de cava; e modelagem, monitoramento e gestão adaptativa.

Esse agrupamento serviu como base para a análise comparativa apresentada nos resultados, permitindo avaliar não apenas a ocorrência das estratégias na literatura, mas também

seu potencial de aplicação, suas limitações e sua adequação a diferentes cenários hidrogeológicos.

2.8 Definição dos Critérios e Elaboração da Matriz Multicritérios

A partir da análise qualitativa dos estudos selecionados e do agrupamento das estratégias de mitigação, foi elaborada uma matriz multicritério com o objetivo de comparar a favorabilidade relativa das alternativas identificadas na literatura. Essa matriz foi utilizada como ferramenta de apoio à análise comparativa, permitindo avaliar estratégias de diferentes naturezas a partir de critérios comuns.

Os critérios adotados foram definidos com base nos aspectos recorrentes observados nos estudos analisados, considerando tanto o desempenho hidrogeológico das estratégias quanto suas implicações ambientais, operacionais e técnicas. Dessa forma, foram estabelecidos seis critérios de avaliação: eficiência hidrogeológica, benefício ambiental, aplicabilidade ao contexto minerário, viabilidade técnico-operacional, menor risco técnico e maturidade da aplicação.

A eficiência hidrogeológica foi considerada em função da capacidade da estratégia de atuar sobre o rebaixamento do nível freático, recompor parcialmente o balanço hídrico subterrâneo, reduzir a propagação do cone de rebaixamento ou acelerar a recuperação dos níveis d'água. O benefício ambiental avaliou o potencial da estratégia em reduzir impactos sobre cursos d'água, nascentes, áreas úmidas, ecossistemas dependentes de água subterrânea e aquíferos. A aplicabilidade ao contexto minerário considerou a compatibilidade da estratégia com diferentes tipos de mina, fases do empreendimento, disponibilidade de água de *dewatering* e restrições operacionais. A viabilidade técnico-operacional avaliou as exigências práticas de implantação, operação, manutenção, infraestrutura e controle. O critério de menor risco técnico considerou a tendência da estratégia a apresentar falhas ou efeitos indesejados, como colmatção, formação de *mounding*, recirculação hidráulica, instabilidade geotécnica ou elevada incerteza hidrogeológica. Por fim, a maturidade da aplicação foi utilizada para diferenciar estratégias mais consolidadas na literatura daquelas baseadas em aplicações pontuais, propostas conceituais ou modelagens ainda pouco recorrentes.

Para cada critério foi atribuído um peso percentual, de acordo com sua importância relativa para a avaliação das estratégias. Os maiores pesos foram atribuídos à eficiência hidrogeológica e ao benefício ambiental, ambos com 25%, por representarem os aspectos centrais da mitigação dos impactos associados ao rebaixamento. Os critérios de aplicabilidade

ao contexto minerário, viabilidade técnico-operacional e menor risco técnico receberam peso de 15% cada, enquanto a maturidade da aplicação recebeu peso de 5%, por atuar como critério complementar. A soma dos pesos correspondeu a 100%.

As estratégias foram avaliadas por meio de uma escala de favorabilidade de 1 a 5, na qual notas mais baixas indicam menor favorabilidade e notas mais altas indicam maior favorabilidade em relação ao critério analisado. Assim, a nota 1 correspondeu à muito baixa favorabilidade, enquanto a nota 5 correspondeu à muito alta favorabilidade. A atribuição das notas foi realizada com base na interpretação técnica dos estudos selecionados, considerando as evidências apresentadas na literatura, os contextos de aplicação, as limitações relatadas e o desempenho esperado de cada estratégia.

A nota final de cada estratégia foi calculada por média ponderada, a partir da multiplicação da nota atribuída em cada critério pelo respectivo peso. Dessa forma, a matriz permitiu gerar uma pontuação final para cada estratégia e, posteriormente, um ranking geral de favorabilidade. Ressalta-se que essa classificação possui caráter teórico-comparativo e não representa validação em campo, devendo ser interpretada como uma ferramenta de apoio à seleção preliminar de alternativas de mitigação.

Após a definição dos critérios, pesos e escala de favorabilidade, foi elaborada a matriz multicritério das estratégias de mitigação identificadas nos estudos analisados. Nesta etapa, a unidade de análise deixa de ser o estudo individual e passa a ser a estratégia de mitigação, permitindo comparar alternativas de diferentes naturezas a partir dos mesmos parâmetros avaliativos.

Ressalta-se que a matriz possui caráter teórico-comparativo, sendo construída a partir da interpretação dos estudos de caso, revisões técnicas, modelagens e aplicações documentadas na literatura. Dessa forma, as notas atribuídas não representam uma validação em campo para uma área específica, mas sim uma avaliação relativa da favorabilidade de cada estratégia com base nas evidências disponíveis nos trabalhos selecionados.

A matriz tem como objetivo indicar quais estratégias apresentam maior potencial técnico, hidrogeológico e ambiental para mitigação dos impactos associados ao rebaixamento do nível freático em mineração. Os resultados devem ser interpretados como uma ferramenta de apoio à análise, uma vez que a escolha final de qualquer alternativa depende das condições locais de cada mina, como tipo de aquífero, geometria da cava ou galerias, disponibilidade de água de *dewatering*, restrições ambientais e capacidade operacional do empreendimento

2.9 Classificação e Interpretação dos Resultados

Após o cálculo das notas finais ponderadas, as estratégias de mitigação foram organizadas em um ranking geral de favorabilidade. Esse ranking teve como objetivo sintetizar o desempenho relativo de cada alternativa frente aos critérios adotados na matriz multicritério.

Como a aplicação dos pesos resultou em notas finais decimais, os valores foram agrupados em classes de favorabilidade, variando de muito baixa a muito alta. Essa classificação foi definida por intervalos iguais dentro da escala de avaliação de 1 a 5, permitindo facilitar a leitura comparativa dos resultados.

A interpretação das estratégias considerou tanto a nota final quanto o desempenho individual em cada critério. Dessa forma, a classificação não foi tratada como uma recomendação universal de aplicação, mas como uma indicação comparativa, dependente das condições hidrogeológicas, ambientais e operacionais de cada mina.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fundamentos da Hidrogeologia na Mineração

3.1.1 *O Ciclo Hidrológico e a Água Subterrânea*

A Hidrogeologia, ciência que estuda a ocorrência, o movimento e a qualidade da água subterrânea, consolidou-se, nos últimos 150 anos, como uma ciência ambiental de abrangência crescente, pois trata de um bem essencial: a água. O estudo da água subterrânea assume uma importância cada vez maior, sendo o aproveitamento criterioso deste recurso um fator essencial para o desenvolvimento.

A água subterrânea não é um reservatório estático, mas sim um componente essencial e dinâmico do ciclo hidrológico, o processo contínuo de circulação da água na Terra. Nesse ciclo, a água dos oceanos e superfícies terrestres evapora, forma a precipitação atmosférica e retorna à terra. Parte dessa água retorna aos aquíferos através do mecanismo da infiltração em suas áreas de recarga.

A fase subterrânea do ciclo hidrológico é de importância estratégica e global. A água subterrânea é considerada um recurso vital para os seres humanos e para o meio ambiente como um todo, sendo a fonte que provê mais de 97% da água doce acessível do planeta (Jakeman *et al.*, 2016). Em muitas regiões, esse recurso torna-se um reservatório crucial, servindo como uma fonte de segurança hídrica quando as fontes superficiais se mostram insuficientes ou limitadas.

A gestão integrada do ciclo hidrológico é um interesse crescente, demandando a análise e interpretação conjuntas das diferentes fases da água, o que inclui a água subterrânea como uma fase importante do ciclo que necessita de aprofundamento científico e pesquisa. Compreender a dinâmica dessa circulação lenta, por meio dos poros e fraturas da rocha, é fundamental para o contexto da mineração, uma vez que as atividades extrativas interferem diretamente nesse equilíbrio natural.

3.1.2 *Tipos de Aquíferos*

A classificação dos tipos aquíferos é fundamental para a compreensão da dinâmica do fluxo subterrâneo e para o correto dimensionamento de projetos de rebaixamento. Essa distinção baseia-se primordialmente nas características litológicas e estruturais das formações geológicas, as quais determinam a porosidade (capacidade de armazenamento) e a permeabilidade (capacidade de transmissão) da água. Segundo Feitosa *et al* (2008), os aquíferos

podem ser divididos em três grupos principais: porosos, fraturados e cársticos. No entanto, em contextos geológicos complexos como o Quadrilátero Ferrífero, é comum a ocorrência de sistemas mistos ou de dupla porosidade (Mourão *et al*, 2006).

Os aquíferos porosos (ou granulares) ocorrem em rochas sedimentares ou em coberturas inconsolidadas onde a circulação da água se dá através dos vazios intergranulares. Gonçalves *et al* (2020) destacam a importância das coberturas cenozoicas e dos depósitos aluvionares na região de Itabira como representantes desta tipologia. Embora possuam menor relevância estrutural para a estabilidade de cavas profundas se comparados às rochas duras, esses aquíferos superficiais atuam frequentemente como zonas de recarga e armazenamento ("esponjas") para os sistemas fissurais subjacentes (Mesquita, 2023).

Os aquíferos fraturados (ou fissurais) estão associados a rochas ígneas e metamórficas, onde a capacidade de armazenamento e o fluxo da água são condicionados pela presença de descontinuidades físicas, como fraturas, falhas e diaclases. Uma particularidade crucial para a mineração de ferro é apresentada pelo Aquífero Cauê. Segundo Mesquita (2023) e Mourão *et al* (2006), este aquífero pode apresentar um comportamento de dupla porosidade (fissural e granular simultaneamente), especialmente nos itabiritos friáveis, onde a desagregação dos grãos cria uma permeabilidade intergranular que coexiste com o fluxo pelas fraturas tectônicas. Essa característica torna a modelagem de rebaixamento nestas litologias um desafio singular, pois o meio combina a alta condutividade das fraturas com a capacidade de armazenamento dos poros.

Por fim, os aquíferos cársticos desenvolvem-se principalmente em rochas carbonáticas através da dissolução química dos minerais, criando condutos que variam de pequenas fissuras a grandes cavernas. No contexto do Quadrilátero Ferrífero, o Aquífero Gandarela é o principal representante desta tipologia. Mourão *et al* (2006) ressaltam que esta unidade, frequentemente associada ou limitante às formações ferríferas, possui elevada condutividade hidráulica e heterogeneidade extrema. Em operações de *dewatering* (rebaixamento do nível freático), a interceptação de condutos cársticos do Gandarela pode resultar em afluxos de água repentinos e de grande volume para dentro da cava, representando um risco geotécnico e operacional crítico.

3.1.3 Classificação dos Aquíferos quanto a Pressão Hidrostática

A condição de pressão sob a qual a água se encontra armazenada nos poros ou fraturas da rocha é determinante para o comportamento do sistema durante o rebaixamento. De acordo com Pinto-Coelho e Havens (2015), os aquíferos são classificados em livres, confinados e

semiconfinados, dependendo de suas fronteiras geológicas e da pressão atuante na superfície da água.

Os aquíferos livres são aqueles em que a superfície superior da zona saturada, denominada nível freático, encontra-se submetida à pressão atmosférica. Segundo Pinto-Coelho e Havens (2015), nestas formações, geralmente mais superficiais, o limite superior é definido pelo próprio nível da água, que pode flutuar livremente de acordo com a recarga ou o bombeamento. Em operações de mineração a céu aberto, as camadas iniciais de solo e saprólito frequentemente comportam-se como aquíferos livres. Do ponto de vista do *dewatering*, o bombeamento nestes aquíferos envolve a drenagem física dos poros (esvaziamento real), o que demanda tempo e está associado ao parâmetro de produtividade específica.

Os aquíferos confinados ocorrem quando a água está aprisionada sob pressão entre duas camadas impermeáveis ou de permeabilidade muito baixa. Conforme explicam Pinto-Coelho e Havens (2015), se um poço perfura tal aquífero, a água sobe até um nível superior ao topo da formação geológica, buscando equilibrar a pressão interna; esse nível é chamado de superfície potenciométrica ou piezométrica. Na mineração, o rebaixamento em aquíferos confinados não esvazia os poros fisicamente de imediato, mas sim alivia a pressão interna (compressibilidade da água e da rocha). Isso faz com que o cone de depressão se expanda muito mais rapidamente e a distâncias maiores do que em aquíferos livres, exigindo monitoramento regional rigoroso.

Por fim, os aquíferos semiconfinados representam um cenário intermediário e muito comum em geologias complexas. Eles são limitados por camadas semipermeáveis (aquitardos) que permitem trocas verticais de água (drenança) com as unidades adjacentes.

3.1.4 Nível Freático e Superfície Piezométrica

A compreensão da geometria e do comportamento da superfície da água subterrânea é pré-requisito para qualquer projeto de *dewatering*. O parâmetro fundamental de medição em campo é o nível estático (NE), definido como a profundidade da lâmina d'água medida em um poço ou piezômetro quando este não está sob influência de bombeamento recente, representando o equilíbrio natural entre a pressão atmosférica e a pressão interna do aquífero naquele ponto.

Em aquíferos livres, essa superfície é denominada nível freático. Ela corresponde ao limite superior da zona saturada, onde a pressão da água é igual à pressão atmosférica. - Lazarim e Loureiro (2000) descrevem que em regiões de relevo acidentado como o Quadrilátero Ferrífero, a superfície freática tende a acompanhar, de forma suavizada, a topografia do terreno,

sendo mais elevada nas zonas de recarga (topos de morro) e mais baixa nas zonas de descarga (fundos de vale).

Já em aquíferos confinados, utiliza-se o termo superfície piezométrica (ou potenciométrica). Como a água está sob pressão superior à atmosférica, ao se perfurar o aquífero, o nível da água sobe na tubulação até estabilizar em um ponto que representa a carga hidráulica total do sistema. Freitas *et al* (2023) destacam que, em modelos hidrogeológicos complexos como os de Brumadinho, a superfície piezométrica dos aquíferos profundos (como o Cauê e o Gandarela) pode estar desconectada da superfície freática local, respondendo de forma distinta aos eventos de precipitação e bombeamento.

Esses desníveis de energia geram o gradiente hidráulico natural, que é a força motriz do fluxo subterrâneo. O gradiente é a razão entre a diferença de carga hidráulica (nível da água) entre dois pontos e a distância entre eles. Gonçalves *et al* (2020) observam que, no Distrito Ferrífero de Itabira, os gradientes hidráulicos são fortemente controlados pelas estruturas geológicas e pela topografia, direcionando o fluxo das áreas altas para as cavas de mineração ou drenagens naturais.

No contexto do rebaixamento, o objetivo da engenharia é justamente alterar artificialmente esse gradiente natural, criando um cone de depressão que inverta o fluxo em direção aos poços de bombeamento, garantindo a secagem da área de lavra. Dessa forma, para fins de delimitação deste trabalho, a expressão "rebaixamento do nível freático" adotada no escopo da pesquisa engloba a depleção geral e sistêmica da carga hidráulica do maciço rochoso, uma simplificação conceitual para representar o rebaixamento da zona saturada como um todo, independentemente das condições locais de confinamento, caso existam.

3.1.5 Parâmetros Hidrodinâmicos Fundamentais

A quantificação do fluxo subterrâneo e a previsão do comportamento do cone de depressão gerado pelo rebaixamento dependem de três parâmetros físicos intrínsecos ao aquífero: a condutividade hidráulica, a transmissividade e o coeficiente de armazenamento.

A condutividade hidráulica (K) é o parâmetro que expressa a facilidade com que um fluido (neste caso, a água) percola através dos espaços vazios (poros ou fraturas) de um meio geológico sob a ação de um gradiente hidráulico. Segundo Pinto-Coelho e Havens (2015), embora a porosidade determine o volume de água armazenado, é a permeabilidade, diretamente relacionada à condutividade hidráulica, que governa o fluxo, sendo influenciada pelo tamanho, forma e interconexão dos vazios. Em termos práticos para a mineração, K define a velocidade

com que o cone de rebaixamento se propaga e a vazão necessária para manter a cava seca. No entanto, assumir um valor único de K para todo o aquífero é uma simplificação que pode levar a erros de projeto. Van Lopik *et al* (2020) alertam que aquíferos reais são heterogêneos e anisotrópicos, ou seja, a condutividade hidráulica varia espacialmente e conforme a direção do fluxo. Em seus estudos, os autores demonstram que a condutividade horizontal (K_h) é frequentemente muito superior a vertical (K_v) devido à estratificação sedimentar, o que influencia diretamente a eficiência de poços de recarga parcialmente penetrantes.

No contexto específico do Quadrilátero Ferrífero, a condutividade hidráulica apresenta extrema variabilidade devido à complexidade litoestrutural. Freitas *et al* (2023) caracterizam o Aquífero Cauê (itabiritos) como a unidade de maior condutividade hidráulica relevante na região de Brumadinho, atribuindo esse comportamento à sua dupla porosidade (granular e fissural). Essa característica permite que o Cauê funcione como o principal vetor de fluxo subterrâneo, exigindo maiores esforços de bombeamento para seu rebaixamento. Por outro lado, Mourão *et al* (2006) observam que, na porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero, o Aquífero Cauê apresenta valores de condutividade hidráulica que variam significativamente dependendo do grau de alteração da rocha e da intensidade do fraturamento. Em zonas de itabirito friável, a condutividade tende a ser mais elevada e comportar-se como em meio poroso, enquanto em zonas de itabirito compacto, o fluxo é estritamente condicionado pelas fraturas.

Além disso, a presença de barreiras ou contrastes de permeabilidade é um fator crítico. Luo *et al* (2022) demonstram, através de testes de bombeamento, como a diferença de magnitude na condutividade hidráulica entre um aquífero fraturado de alta produtividade e um aquífero confinado adjacente de baixa permeabilidade determina a direção do fluxo e a interação com águas superficiais. No caso estudado, o aquífero de alta condutividade (K aprox 17,8 m/dia) drenava rapidamente a água, criando riscos de inundação na mina, enquanto o aquífero de arenito adjacente apresentava condutividade ordens de magnitude menor (K aprox 0,049 m/dia).

Portanto, a caracterização precisa de K , não apenas como um valor médio, mas considerando sua distribuição espacial e anisotropia, é indispensável para o sucesso de estratégias de mitigação como a injeção de água (*grouting*) ou a instalação de cortinas impermeáveis.

A transmissividade (T) é definida como a taxa na qual a água é transmitida através de uma faixa vertical unitária de largura do aquífero, estendendo-se por toda a sua espessura

saturada, sob um gradiente hidráulico unitário. Em termos matemáticos, é o produto da condutividade hidráulica (K) pela espessura saturada do aquífero (b). Segundo Pinto-Coelho e Havens (2015), enquanto a condutividade descreve a propriedade da rocha em si, a transmissividade descreve a capacidade produtiva do aquífero como um todo estrutural.

No contexto de projetos de *dewatering* em mineração, a transmissividade é o parâmetro governante da geometria do cone de depressão. Sloan *et al* (2023) explicam que a magnitude de T dita a extensão e a inclinação do rebaixamento:

- Em aquíferos de baixa transmissividade, o cone de depressão tende a ser íngreme e restrito às imediações da cava, limitando os impactos regionais, mas dificultando a drenagem rápida.
- Em aquíferos de alta transmissividade, o cone de depressão se propaga por grandes distâncias, tornando-se mais plano e extenso. Isso pode afetar ecossistemas dependentes de água subterrânea e usuários a quilômetros de distância da mina, exigindo volumes de bombeamento significativamente maiores para rebaixar o nível d'água na cava.

A variabilidade da transmissividade no Quadrilátero Ferrífero é um fator crítico de projeto. Mourão *et al* (2006) destacam que, embora o Aquífero Cauê (itabiritos) possua boa capacidade de transmissão devido à sua dupla porosidade, é o Aquífero Gandarela (cárstico) que frequentemente apresenta os maiores valores de transmissividade regional. A presença de condutos cársticos no Gandarela pode elevar a transmissividade local a patamares extremos, criando "autoestradas" hidráulicas que propagam o impacto do rebaixamento rapidamente e conectam a mina a sistemas hídricos superficiais adjacentes.

Gonçalves *et al* (2020) reforçam essa heterogeneidade no Distrito Ferrífero de Itabira, observando que a transmissividade é fortemente controlada pelas estruturas geológicas (falhas e dobras) e pela espessura variável dos horizontes de itabirito alterado. Em zonas onde a espessura saturada do minério é grande e o fraturamento é intenso, a transmissividade resultante exige sistemas de bombeamento robustos e, simultaneamente, favorece a aplicação de técnicas de mitigação como a Recarga Gerenciada de Aquíferos (RGA), pois o meio é capaz de "aceitar" altas taxas de reinjeção (Sloan *et al*, 2023).

Portanto, a determinação precisa da transmissividade, preferencialmente através de ensaios de bombeamento de longa duração, é indispensável não apenas para dimensionar as bombas, mas para delimitar a área de influência do projeto e prever conflitos pelo uso da água

na bacia hidrográfica.

A capacidade de um aquífero em armazenar e liberar água é quantificada pelo Coeficiente de Armazenamento (S), um parâmetro adimensional que define o volume de água que um aquífero libera (ou absorve) por unidade de área superficial e por unidade de variação na carga hidráulica. Pinto-Coelho e Havens (2015) ressaltam que, embora a porosidade defina o espaço vazio total, nem toda a água armazenada é passível de drenagem, sendo o coeficiente de armazenamento o indicador da reserva explorável. A natureza física dessa liberação difere radicalmente conforme o tipo de aquífero, o que exige a distinção entre dois conceitos:

Em aquíferos livres (freáticos), utiliza-se o termo Produtividade Específica (S_y) ou porosidade eficaz. Neste caso, a liberação da água ocorre pela drenagem física dos poros sob a ação da gravidade à medida que o nível freático desce. Gonçalves *et al* (2020) observam que, nas coberturas cenozoicas e zonas de itabirito friável (intemperizado) do Distrito Ferrífero de Itabira, a produtividade específica é elevada (tipicamente entre 0,1 e 0,3), pois os espaços intergranulares são drenados efetivamente. Isso implica que o cone de depressão se expande lentamente, pois há um grande volume de água a ser removido fisicamente para rebaixar o nível.

Em aquíferos confinados, a liberação da água não ocorre pelo esvaziamento dos poros (que permanecem saturados), mas sim pela descompressão do sistema. O alívio da pressão hidráulica causa uma expansão elástica da água e uma compressão do esqueleto rochoso. Este fenômeno resulta em valores de Coeficiente de Armazenamento (S) extremamente baixos, na ordem de 10^{-5} a 10^{-3} . Van Lopik *et al* (2020) demonstram, através de modelagem numérica, que em aquíferos com baixo S, o impacto hidráulico (cone de depressão) se propaga muito mais rapidamente e a distâncias muito maiores do que em aquíferos livres, mesmo com taxas de bombeamento menores.

No contexto do Quadrilátero Ferrífero, Freitas *et al* (2023) indicam que o Aquífero Cauê pode apresentar comportamento dual. Quando confinado por formações pelíticas (como xistos da Formação Batatal) ou itabiritos compactos, ele responde com baixos coeficientes de armazenamento, transmitindo a depressão piezométrica rapidamente para áreas vizinhas. Já nas zonas de afloramento ou de intensa fraturação conectada à superfície, comporta-se como livre, com maior capacidade de armazenamento e resposta mais lenta ao *dewatering*.

A correta determinação de S e S_y é, portanto, indispensável para prever o tempo de resposta do aquífero ao início do bombeamento e para calcular o raio de influência que definirá a necessidade de medidas mitigadoras para proteção de nascentes e usuários no entorno da

mina.

3.2 O Rebaixamento do Nível Freático (RNF) na Mineração

O rebaixamento do nível freático, tecnicamente denominado desaguamento (*dewatering*), constitui uma das operações unitárias mais críticas na mineração a céu aberto e subterrânea quando a cota de lavra ultrapassa a profundidade do nível estático natural do aquífero. Conforme Bertachini e Almeida (2003), diferentemente das obras civis onde o rebaixamento é uma medida temporária limitada ao período construtivo, na mineração essa atividade é perene e progressiva, iniciando-se no momento em que a cava intercepta o nível d'água e perdurando até o descomissionamento da mina.

O objetivo primordial desta intervenção não é apenas a remoção da água, mas a alteração do campo de pressões hidrostáticas do maciço rochoso. Conforme elucidam Silva e Santos (2018), o sistema visa permitir o deslocamento das águas subterrâneas da área projetada, garantindo que as operações de engenharia ocorram em condições "a seco". No contexto minerário, isso se traduz na estabilidade dos taludes da cava (pelo aumento da tensão efetiva do solo ou rocha, reduzindo a poropressão) e na viabilidade operacional do transporte e manuseio do minério, que seria inviabilizado em condições de saturação excessiva.

A complexidade do rebaixamento na mineração reside na sua dinâmica espacial e temporal. Enquanto um sistema predial é estático, a cava de uma mina está em constante expansão e aprofundamento. Bertachini e Almeida (2003) ressaltam que, nas grandes minas a céu aberto, os sistemas de bombeamento precisam ser constantemente redimensionados para acompanhar o avanço da lavra, gerando cones de depressão que frequentemente extrapolam os limites da propriedade mineira e interferem no balanço hídrico regional. Dessa forma, o controle do nível freático deixa de ser apenas uma medida de apoio operacional para se tornar um elemento central do planejamento de lavra (*mine planning*) e da gestão ambiental do empreendimento.

3.2.1 Mecanismos e Causas do Rebaixamento do Nível Freático (RNF)

O fenômeno do rebaixamento na mineração não é um evento isolado, mas uma resposta hidrodinâmica induzida pela necessidade de alterar o equilíbrio natural do aquífero para viabilizar a lavra. Segundo Silva e Santos (2018), o mecanismo fundamental do rebaixamento consiste na criação artificial de um diferencial de carga hidráulica. Ao bombear água de um ponto (poço ou *sump*), gera-se uma zona de baixa pressão que inverte o gradiente hidráulico natural, forçando a água subterrânea a fluir em direção ao sistema de captação e,

consequentemente, afastando-a da área de interesse geotécnico.

As causas que tornam esse processo mandatório na mineração são duplas: operacionais e geotécnicas. A causa operacional é direta: a interseção física entre o plano de lavra (cava ou galeria) e o nível estático do aquífero (Bertachini; Almeida, 2003). Sem a remoção da água, as frentes de trabalho ficariam submersas, impossibilitando o tráfego de equipamentos de carga e transporte.

No entanto, a causa geotécnica é frequentemente a mais crítica. A presença de água nos poros ou fraturas do maciço rochoso exerce uma pressão (poropressão) que atua contra as forças de atrito que mantêm o solo ou a rocha estável. O mecanismo de rebaixamento atua reduzindo essa poropressão, o que resulta no aumento imediato da tensão efetiva do material. Conforme explicam Silva e Santos (2018), a drenagem adequada previne patologias graves na obra, que na mineração se traduzem como rupturas de taludes e liquefação de pisos operacionais.

Portanto, o rebaixamento funciona como um mecanismo de "alívio de tensão hidráulica", onde a retirada de um volume de água é apenas o meio para atingir o fim principal: a depressurização do maciço para garantir a segurança estrutural da mina.

3.2.2 Fluxo de Água Subterrâneo e o Conceito de Poço

O movimento da água no meio subterrâneo não é governado apenas pela gravidade, mas pela distribuição de energia mecânica no aquífero. Segundo Cabral *et al* (2008), o fluxo ocorre invariavelmente de regiões de maior potencial hidráulico para regiões de menor potencial, em busca do equilíbrio energético. A energia total em qualquer ponto do aquífero é denominada carga hidráulica (h), sendo composta pela soma da carga de posição (cota altimétrica z) e da carga de pressão.

A força motriz que vence a resistência do meio poroso e impulsiona o fluxo é o gradiente hidráulico (i), definido como a perda de energia (carga) por unidade de distância percorrida na direção do fluxo. Cabral *et al* (2008) destaca que, em obras de engenharia como o rebaixamento de aquíferos, o objetivo é manipular artificialmente esses gradientes para induzir o fluxo em direção aos poços de bombeamento.

A relação física que descreve esse movimento em regime laminar é a Lei de Darcy. Conforme a formulação clássica (EQ.1):

$$Q = K \cdot i \cdot A \quad (\text{Equação 1})$$

Onde a vazão (Q) é proporcional à condutividade hidráulica (K), ao gradiente (i) e à

área da seção transversal (A).

No entanto, Cabral et al. (2008) faz uma distinção crucial para a engenharia: a velocidade de Darcy (q) (ou descarga específica) é uma velocidade aparente, calculada como se a água fluísse por toda a área da seção ($q = Q / A$). A velocidade real (v) da água nos poros é significativamente maior, pois o fluxo ocorre apenas através dos vazios. Essa relação é dada por (EQ.2):

$$v = q/ne \quad (\text{Equação 2})$$

Onde ne é a porosidade efetiva.

Em mineração, essa distinção é vital: embora a Lei de Darcy calcule o volume a ser bombeado, a velocidade real (v) determina o tempo de transporte de contaminantes e a rapidez com que a pressão de poros é dissipada durante o rebaixamento.

No contexto operacional, Bertachini e Almeida (2003) descrevem a escavação da cava como um grande sumidouro de potencial zero, ou pressão atmosférica. Essa intervenção cria um gradiente centrípeto que inverte o fluxo regional natural. O êxito do sistema de *dewatering* depende, portanto, da capacidade de interceptar esse fluxo convergente e reduzir a pressão nos taludes antes que a estabilidade geotécnica da mina seja comprometida.

No âmbito da hidrogeologia aplicada, o poço tubular profundo transcende a definição simplista de uma perfuração no solo. Segundo Alonso (2007), trata-se de uma obra de engenharia hidráulica vertical, de formato cilíndrico, projetada e construída com a finalidade de explorar águas subterrâneas de forma técnica e economicamente viável. No contexto do rebaixamento de nível freático, essa estrutura funciona como o ponto focal de alívio de pressão, permitindo a captação controlada do fluxo subterrâneo induzido.

A eficiência hidráulica dessa estrutura depende da correta configuração de seus componentes internos. Alonso (2007) explica que o poço é constituído por uma coluna de revestimento, composta por tubos cegos (lisos) e seções filtrantes (filtros). Tubos cegos têm a função de sustentar as paredes da perfuração nas zonas improdutivas ou instáveis, além de abrigar o sistema de bombeamento. Filtros (Seções Filtrantes) são os dispositivos de admissão de água. Devem ser posicionados estrategicamente frente aos horizontes produtivos do aquífero para permitir a entrada da água com a mínima perda de carga possível, retraindo, simultaneamente, as partículas sólidas da formação geológica.

Um elemento vital para a performance e vida útil do poço é o pré-filtro (*gravel pack*).

Conforme detalha Alonso (2007), este componente consiste no preenchimento do espaço anular (entre a parede da perfuração e a coluna de revestimento) com material granular selecionado, arredondado e de granulometria uniforme (geralmente quartzo). Suas funções técnicas são múltiplas: aumentar o diâmetro efetivo do poço (ampliando a área de captação), reduzir a velocidade de entrada da água nos filtros (minimizando turbulência e incrustações) e estabilizar mecanicamente a formação geológica, impedindo o areamento (entrada de finos) no interior do poço.

Portanto, a concepção de um poço de rebaixamento deve respeitar esses critérios construtivos para garantir que a conexão hidráulica entre o aquífero e o sistema de bombeamento seja perfeita, transformando o potencial energético da água em vazão de drenagem de forma eficiente.

3.2.3 Cone de Rebaixamento

A manifestação física da alteração do campo de pressões hidrostáticas induzida pelo bombeamento é denominada cone de rebaixamento (ou cone de depressão). De acordo com Sloan *et al* (2023), este fenômeno ocorre durante o processo de *dewatering* (rebaixamento de nível), gerando uma diminuição dos níveis de água ao redor da operação que se assemelha à forma geométrica de um cone invertido. Dependendo das propriedades hidrogeológicas do local, esse rebaixamento da superfície potenciométrica pode se estender por centenas de metros a vários quilômetros de distância do ponto de extração.

A superfície potenciométrica é uma representação hidráulica virtual que define o nível de energia potencial de um aquífero confinado ou semiconfinado. Segundo Pinto-Coelho e Havens (2015), em aquíferos confinados, a água ocupa a totalidade dos poros da rocha e encontra-se submetida a uma pressão superior à atmosférica, estando limitada no topo por camadas de baixa permeabilidade. Quando esse sistema é interceptado por um poço, a água ascende pela tubulação impulsionada pela pressão interna até alcançar um ponto de equilíbrio. A superfície imaginária que conecta esses níveis estáticos ao longo do aquífero é denominada superfície potenciométrica. É fundamental distinguir este conceito do nível freático. Pinto-Coelho e Havens (2015) esclarecem que, enquanto o nível freático corresponde à superfície física real da água em aquíferos livres (onde a pressão é atmosférica), a superfície potenciométrica pode situar-se em cotas muito superiores ao topo geológico da formação aquífera. Caso essa superfície virtual esteja acima da cota do terreno, ocorre o fenômeno do artesianismo jorrante.

A delimitação espacial desse impacto é tradicionalmente definida pelo Raio de Influência (R), parâmetro que estima a distância radial onde o rebaixamento se torna nulo. Contudo, a aplicação desse conceito teórico (que pressupõe uma área de influência circular) encontra limitações severas em ambientes geológicos complexos. Conforme alerta Alonso (2007), os métodos analíticos tradicionais (como as equações de Theis ou Cooper-Jacob) tendem a simplificar excessivamente a realidade, pois assumem aquíferos homogêneos e isotrópicos.

Em contrapartida, a realidade hidrogeológica de minas — frequentemente situadas em aquíferos fraturados, cársticos ou com barreiras hidráulicas — gera uma propagação irregular do rebaixamento. Nesses cenários, Alonso (2007) destaca que o fluxo não é radial circular, mas governado pela conectividade das fraturas e pela anisotropia do meio, o que torna o conceito de "raio" impreciso. Para superar essas limitações, Cabral *et al* (2008) defendem que a modelagem numérica (utilizando softwares como o Visual MODFLOW) torna-se a ferramenta indispensável, pois permite discretizar o domínio do aquífero e representar as heterogeneidades e as condições de contorno complexas que condicionam a real área de influência do projeto.

Por fim, Bertachini e Almeida (2003) complementam que, em sistemas de *dewatering* com múltiplos poços, ocorre a interferência hidráulica, onde a sobreposição dos cones individuais amplia significativamente a profundidade e a extensão da área desaguada, permitindo o rebaixamento regional necessário para a estabilidade da cava.

3.3 Impactos Ambientais e Socioeconômicos do RNF

A implementação de sistemas de rebaixamento do nível freático (RNF) em minerações a céu aberto, embora constitua um imperativo técnico para a segurança e viabilidade econômica da lavra, gera inevitavelmente uma série de externalidades que transcendem os limites operacionais da cava. Segundo Bertachini e Almeida (2003), a alteração do regime hidrodinâmico natural, promovida pelo bombeamento contínuo e de longa duração, não se restringe à área da mina, expandindo-se regionalmente através da propagação do cone de depressão. Esse fenômeno interfere diretamente no ciclo hidrológico local, convertendo o *dewatering* de uma solução de engenharia em um desafio de gestão ambiental complexo.

Sob a ótica ambiental, a consequência mais imediata é a modificação das relações entre as águas subterrâneas e superficiais. Cabral *et al* (2008) explicam que a redução drástica das cargas hidráulicas pode inverter os gradientes de fluxo, transformando rios e lagos, anteriormente alimentados pelo aquífero (efluentes), em zonas de recarga induzida (influentes)

ou causando o desaparecimento total de nascentes e zonas úmidas. Além disso, a despressurização dos poros do subsolo pode desencadear processos físicos irreversíveis, como a subsidência do terreno, colapsos em áreas cársticas e a compactação de aquíferos, comprometendo a integridade de infraestruturas e ecossistemas dependentes.

Na esfera socioeconômica, a disputa pelo uso da água emerge como o ponto crítico. Pinto-Coelho e Havens (2015) contextualizam que a escassez induzida ou o rebaixamento de poços de abastecimento em comunidades vizinhas geram conflitos de governança hídrica. A percepção pública de que a atividade minerária está exaurindo as reservas hídricas regionais pode afetar a "licença social para operar" da empresa, exigindo medidas de mitigação onerosas e negociações constantes com comitês de bacias e órgãos reguladores.

Portanto, a análise do rebaixamento não pode ser dissociada de seus impactos. A compreensão detalhada dessas interferências é pré-requisito para o desenvolvimento de modelos de gestão que busquem, através de técnicas como a recarga artificial ou o uso racional, minimizar o passivo ambiental deixado para as gerações futuras.

3.3.1 Impactos na Biota e em Ecossistemas Dependentes de Água Subterrânea

A redução dos níveis piezométricos decorrente das atividades de *dewatering* não afeta apenas a disponibilidade hídrica para consumo humano, mas impõe riscos severos à biota, especificamente aos Ecossistemas Dependentes de Águas Subterrâneas (GDEs – *Groundwater Dependent Ecosystems*). Estes ecossistemas, que incluem nascentes, áreas úmidas, vegetação freatofítica e a fauna aquática associada, dependem da descarga contínua ou da proximidade do lençol freático para manter sua estrutura e função ecológica.

Segundo Currell *et al* (2017), a alteração no regime de fluxo subterrâneo pode romper o equilíbrio delicado que sustenta esses ambientes. Quando o cone de rebaixamento de uma mina atinge a zona de captura de uma nascente ou reduz a pressão artesianismo que a alimenta, o resultado pode ser a diminuição da vazão de base (*baseflow*) ou a cessação total do fluxo. Esse processo leva à morte da vegetação que não consegue aprofundar suas raízes na velocidade do rebaixamento, à perda de habitat para espécies endêmicas e, em casos extremos, à extinção local de comunidades biológicas inteiras que evoluíram em condições de estabilidade hidrológica milenar.

3.3.2 Impactos na Vegetação

A relação entre a vegetação e as águas subterrâneas é regida pela dependência fisiológica de certas espécies, denominadas freatófitas, que aprofundam seus sistemas radiculares até a

franja capilar ou diretamente até o nível freático para suprir suas demandas hídricas. O impacto do rebaixamento (RNF) sobre essa cobertura vegetal não é imediato, mas ocorre quando a velocidade de descida do nível d'água supera a capacidade biológica de crescimento vertical das raízes.

Quando o rebaixamento induzido pela mineração ocorre de forma abrupta, perde-se a conexão hidráulica entre a zona saturada e as raízes. Isso desencadeia um processo de estresse hídrico severo, caracterizado pela cavitação dos vasos do xilema, interrupção do fluxo de seiva e consequente morte da planta ou substituição gradual por espécies invasoras xerofíticas (adaptadas à seca), alterando permanentemente a composição florística e a estrutura do habitat local (Currell *et al*, 2017).

Currell *et al* (2017) ilustram essa dependência estrita ao analisarem o Complexo de Nascentes Doongmabulla, na Austrália. Segundo os autores, a manutenção da biodiversidade vegetal nessas áreas é condicionada exclusivamente pela pressão hidráulica ascendente do Aquífero Clematis Sandstone. O risco imposto pela mineração reside na redução dessa carga piezométrica regional. Se o rebaixamento na cava da mina propagar-se através das falhas geológicas ou pela condutividade vertical de aquitardes (como a Formação Rewan), a pressão que sustenta o fluxo nas nascentes diminuirá.

A consequência ecológica imediata descrita por Currell *et al* (2017) é a contração e o eventual secamento das áreas úmidas. Para a vegetação endêmica local, que evoluiu em um ambiente de estabilidade hidrológica milenar, a interrupção do fluxo não resulta apenas em estresse hídrico temporário, mas em mortalidade em massa e alteração irreversível da estrutura do habitat. Uma vez que o fluxo da nascente cessa e o solo seca, espécies invasoras adaptadas a ambientes áridos tendem a colonizar a área, levando à extinção local das espécies nativas especializadas.

3.3.3 Impactos Geotécnicos

A redução da poropressão decorrente do rebaixamento do nível freático provoca um aumento correspondente na tensão efetiva do solo. Esse fenômeno físico, fundamental na mecânica dos solos, pode levar à consolidação das camadas compressíveis e resultar em subsidência ou recalques na superfície. Tais movimentos de terreno representam riscos severos para a integridade de edificações e infraestruturas situadas no raio de influência do rebaixamento.

Van Lopik *et al* (2020) destacam que o risco de assentamento do solo é uma preocupação

crítica em áreas urbanas, citando exemplos históricos como Copenhague (Dinamarca) e Amsterdã (Holanda). Nestas cidades, a preservação de fundações antigas de madeira exige controles rigorosos sobre qualquer alteração no nível do lençol freático, evidenciando como a gestão inadequada do *dewatering* pode causar danos irreversíveis ao patrimônio construído.

Embora frequentemente associada à construção civil, a subsidência é um impacto geotécnico de larga escala também na mineração e na gestão de aquíferos regionais. Cruz-Ayala e Megdal (2020) apontam a Cidade do México como um estudo de caso emblemático, onde décadas de extração de água subterrânea resultaram em afundamentos significativos do terreno. Este processo não apenas compromete a estabilidade estrutural da cidade, mas também altera a dinâmica de drenagem superficial, exacerbando riscos de inundações.

Para combater esses efeitos, Van Lopik *et al* (2020) apontam a Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR) como uma solução viável. A reinjeção de água no aquífero permite a manutenção das pressões de poros, contrabalanceando o rebaixamento causado pelo bombeamento. Através de modelagem e testes de campo, que o uso de poços de recarga, especificamente poços parcialmente penetrantes, pode ser dimensionado para mitigar os impactos hidráulicos fora da área de escavação, prevenindo assim o assentamento do solo em zonas sensíveis.

No contexto da mineração, Ebrahim *et al* (2020) relatam experiências no continente africano que ilustram a aplicação prática dessas estratégias. Em operações onde o desaguamento é necessário para a lavra, o retorno da água ao aquífero (recarga) tem sido utilizado não apenas para gestão hídrica, mas como ferramenta para estabilização das condições geotécnicas regionais, mitigando os impactos ambientais do rebaixamento.

3.3.4 Impactos na Qualidade da Água

O rebaixamento do nível freático em operações de mineração não altera apenas a quantidade e o fluxo da água subterrânea, mas provoca modificações profundas na sua composição hidrogeoquímica. A exposição de minerais anteriormente submersos ao oxigênio atmosférico, combinada com a mistura de águas de diferentes estratos e a interação com materiais de estéril (*spoils*), são os principais vetores de degradação da qualidade hídrica.

Luo *et al* (2022) destacam que a drenagem de minas em larga escala (*large-scale mining drainage*) é um fator determinante na evolução hidrogeoquímica regional. Em estudos realizados em bacias sedimentares de regiões áridas, como no campo carbonífero de A-ai (Xinjiang, China), observa-se que o rebaixamento induzido pela mineração altera o equilíbrio

químico natural do aquífero. A perturbação do fluxo subterrâneo promove a interação entre a água e as rochas em condições oxidantes, acelerando processos de dissolução mineral e modificando as assinaturas isotópicas e químicas da água. Segundo os autores, isso eleva as concentrações de íons dissolvidos e transforma a dinâmica hidroquímica, que passa a ser dominada por processos de mistura de águas superficiais e subterrâneas (Luo *et al*, 2022).

Um exemplo clássico desses impactos é observado em minas de carvão a céu aberto, onde a remoção do aquífero original e sua substituição por pilhas de estéril (*spoil aquifers*) geram novas condições hidrogeológicas. Meredith *et al* (2020) analisam a resposta hidrogeológica a 50 anos de mineração de superfície na Bacia do Rio Powder (EUA) e apontam a salinidade como uma preocupação crítica. O processo de desmonte e reposição do solo aumenta a superfície específica dos minerais disponíveis para intemperismo. Quando a água subterrânea recupera seu nível e satura esses materiais de estéril, ocorre uma lixiviação intensa de sais. Dados de monitoramento indicam que a salinidade, medida pelos Sólidos Totais Dissolvidos (STD), pode levar décadas para ser "lavada" do sistema e retornar aos níveis pré-mineração (Meredith *et al*, 2020).

Além da geração de drenagem ácida ou salina, o manejo do volume de água bombeada (*surplus water*) representa um desafio técnico. Sloan *et al* (2023) revisam o uso da Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR) na indústria da mineração como estratégia para lidar com o excesso de água. No entanto, a qualidade da água é um fator limitante para a reinjeção. A incompatibilidade geoquímica entre a água da mina e o aquífero receptor pode causar reações de precipitação mineral ou crescimento bacteriano, levando à colmatção (*clogging*) dos poços de recarga (Sloan *et al*, 2023). Portanto, o monitoramento rigoroso e o tratamento prévio da água são essenciais para evitar que a mitigação de um impacto (quantidade) gere outro problema severo (qualidade).

3.4 Estratégias e Tecnologias de Mitigação

Diante dos impactos hidrogeológicos e ambientais causados pelo rebaixamento do nível freático, torna-se necessária a adoção de estratégias que ultrapassem a simples drenagem operacional e contribuam para a sustentabilidade hídrica do empreendimento. Historicamente, o manejo de águas de mina (*mine water management*) esteve voltado principalmente à eficiência do desaguamento e ao descarte seguro do excedente em corpos hídricos superficiais. No entanto, a crescente escassez hídrica e o maior rigor das legislações ambientais têm impulsionado uma mudança de paradigma, na qual a reinjeção e o armazenamento subterrâneo

passam a ser considerados ferramentas relevantes de mitigação.

A principal estratégia identificada na literatura para minimizar ou reverter cones de depressão é a Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR – *Managed Aquifer Recharge*). Segundo Sloan *et al* (2023), a MAR consiste na recarga intencional de água em aquíferos para recuperação posterior ou benefício ambiental. Essa prática difere da simples “reinjeção de descarte”, cujo objetivo é apenas dispor o excedente hídrico bombeado da cava. Na MAR, a recarga é planejada com finalidades específicas de gestão, como sustentar níveis piezométricos regionais, proteger ecossistemas dependentes de águas subterrâneas (GDEs) e prevenir a intrusão de contaminantes

No contexto brasileiro, a aplicação da MAR ainda enfrenta desafios técnicos e regulatórios, embora apresente potencial crescente em cenários de segurança hídrica. Segundo Shubo *et al.* (2020), as iniciativas nacionais têm se concentrado em tecnologias sociais de baixo custo e pequena escala, como as “barraginhas”, voltadas à captação de água de chuva em áreas rurais e semiáridas. No setor mineral, contudo, a adaptação dessas práticas representa uma alternativa relevante para o aproveitamento da água de *dewatering*. Conforme Sloan *et al.* (2023), a MAR permite reavaliar esse excedente hídrico como recurso estratégico, contribuindo para a recarga de aquíferos impactados e para a manutenção da disponibilidade hídrica ambiental e de outros usuários da bacia.

Assim, as estratégias de mitigação devem ser entendidas como parte de um sistema integrado de gestão hídrica. Nas seções seguintes, são apresentadas as principais tecnologias, incluindo métodos de recarga, barreiras físicas e estratégias de otimização do bombeamento.

3.4.1 *Monitoramento Hidrogeológico*

A eficácia das estratégias de mitigação do rebaixamento de aquíferos depende de uma rede de monitoramento hidrogeológico robusta. Conforme Feitosa *et al.* (2008), o monitoramento sistemático permite compreender a dinâmica do fluxo subterrâneo, acompanhar variações no armazenamento e fornecer dados para calibração de modelos numéricos. Na mineração, essa rede deve integrar águas subterrâneas e respostas do meio superficial, devido ao forte estresse hidráulico gerado pelo bombeamento. Os principais dispositivos utilizados incluem:

- **Poços de Monitoramento (PM) e Poços de Observação (PO):** são perfurações revestidas e equipadas com filtros que permitem a comunicação com o aquífero. Os PMs seguem critérios construtivos específicos, como a ABNT NBR 15495-1,

possibilitando a coleta de amostras representativas para análise da qualidade da água. Já os POs são voltados principalmente ao acompanhamento da variação do nível d'água e à delimitação espacial do cone de rebaixamento.

- **Piezômetros:** possuem seção de captação mais pontual que os poços de observação, permitindo medir a carga hidráulica ou poro-pressão em profundidades ou estratos específicos. Na mineração, são importantes para compreender a conectividade hidráulica entre litologias, falhas e aquíferos confinados, além de contribuir para o controle geotécnico de taludes e barragens.
- **Indicadores de Nível de Água (INAs):** Equipamentos portáteis, compostos por trenas elétricas ou sonoras, utilizados para a medição manual *in situ*. Quando o sensor do INA entra em contato com a água dentro do poço ou piezômetro, um circuito elétrico é fechado, emitindo um sinal luminoso e sonoro que permite a leitura exata da profundidade do nível d'água a partir de um referencial topográfico de superfície (boca do tubo).
- **Dataloggers e Sistemas de Telemetria:** Transdutores de pressão instalados de forma submersa nos poços e piezômetros. Eles automatizam as medições, registrando o nível d'água em frequências pré-programadas (ex: a cada hora). Quando acoplados a sistemas de telemetria, transmitem os dados em tempo real para as salas de controle, permitindo respostas rápidas caso o rebaixamento atinja limites críticos.
- **Estações Fluviométricas e Vertedores:** A mitigação dos impactos subterrâneos exige a compreensão da interação aquífero-rio. Estruturas como vertedores (para pequenos fluxos) ou estações com réguas linimétricas e perfiladores acústicos (ADCP) instaladas em seções de controle de cursos d'água superficiais medem a vazão do rio. Esse controle é vital para identificar a possível redução do escoamento de base (fluxo de base) das bacias hidrográficas afetadas pela depressão do nível d'água.

3.4.2 **Barreiras Físicas e Hidráulicas**

No gerenciamento de águas subterrâneas em mineração, nem sempre o objetivo da recarga artificial é apenas o armazenamento ou a recuperação de níveis. Frequentemente, a injeção de água ou de materiais cimentantes é utilizada estrategicamente para impedir o fluxo, criando barreiras que isolam a área de operação mineira do ambiente hidrológico circundante (Sloan *et al* 2023). Estas estratégias dividem-se fundamentalmente em barreiras hidráulicas

(dinâmicas) e barreiras físicas (estáticas).

De acordo com Sloan *et al* (2023), o uso de barreiras hidráulicas na mineração visa proteger receptores sensíveis, impedindo que o cone de rebaixamento da mina (*drawdown cone*) se estenda para áreas úmidas ou aquíferos utilizados por terceiros, além de conter a migração de plumas de contaminação. Em paralelo, soluções de engenharia geotécnica, como cortinas de impermeabilização (*sealing curtains*) e injeção de cimento (*grouting*), são aplicadas para cortar fisicamente a conexão hidráulica entre corpos d'água superficiais (como rios) e a cava da mina, reduzindo drasticamente a necessidade de bombeamento de drenagem (*dewatering*) e os custos operacionais associados.

A seguir, são detalhadas as especificidades operacionais e construtivas dessas duas abordagens.

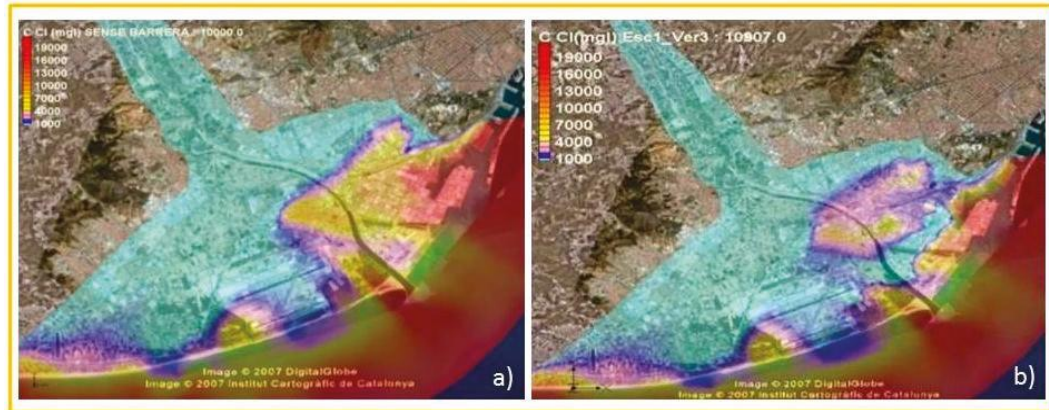
- **Barreiras Hidráulicas:** representam uma aplicação estratégica da recarga artificial onde o objetivo primordial não é apenas o armazenamento de água, mas o controle da dinâmica de fluxo subterrâneo. Segundo Barbosa e Mattos (2008), em aquíferos costeiros sujeitos a bombeamento excessivo, a redução da pressão da água doce permite o avanço da cunha salina em direção ao continente, degradando a qualidade do recurso hídrico. Para combater esse fenômeno, a solução técnica consiste na instalação de "baterias de poços de injeção" alinhados estrategicamente entre a zona de extração e a costa. A injeção contínua nestes poços estabelece um gradiente hidráulico no sentido do mar, criando uma crista de pressão positiva que fisicamente bloqueia a entrada de água salgada e protege os poços de abastecimento situados a montante.

A eficácia desta técnica é demonstrada no caso clássico da barreira hidráulica positiva (FIG. 2) implementada no delta do rio Llobregat, em Barcelona (Espanha). Conforme detalhado por Escalante *et al* (2019), este sistema utiliza poços de recarga injetando água regenerada proveniente de uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) para pressurizar o aquífero. O monitoramento de longo prazo e a modelagem matemática indicaram que a injeção criou uma barreira efetiva contra a intrusão, empurrando a cunha salina de volta em direção ao mar. Os autores destacam que, além de recuperar a qualidade da água (redução dos isocloretores), o sistema atua como uma medida de adaptação às mudanças climáticas, protegendo reservas estratégicas de água doce contra a elevação do nível do mar.

No contexto da mineração, embora o foco não seja sempre a intrusão marinha, o princípio físico é idêntico: a criação de uma "parede de pressão" (*pressure wall*) através de

injeção para conter a migração de plumas de contaminantes da área da mina ou para impedir que o cone de rebaixamento da lavra afete aquíferos preservados na vizinhança.

Figura 2 - Modelo de evolução da cunha salina. Em a) sem barreira gerada pela injeção d'água. Em b) barreira gerada pela injeção de água



Fonte: Escalante et al, (2019).

- **Barreiras físicas:** diferentemente das barreiras hidráulicas, que atuam pela manipulação dos gradientes de pressão por bombeamento, as barreiras físicas são estruturas estáticas de impermeabilização utilizadas para isolar hidraulicamente a área de mineração do entorno. Segundo Van Lopik *et al.* (2020), essas barreiras podem incluir cortinas de selagem (*sealing curtains*), paredes diafragma (*slurry walls*), estacas-prancha (*sheet piling*) e injeção de solo (*soil grouting*). Seu objetivo é reduzir o influxo de água subterrânea para a cava, limitar a propagação do cone de rebaixamento e proteger estruturas vizinhas contra recalques. Contudo, sua implantação pode ser financeiramente inviável em grandes perímetros ou escavações profundas, sendo mais indicada para áreas onde a estabilidade geotécnica ou a proteção ambiental justifiquem o elevado investimento inicial.

3.4.3 Modelagem Preditiva nas Fases Iniciais

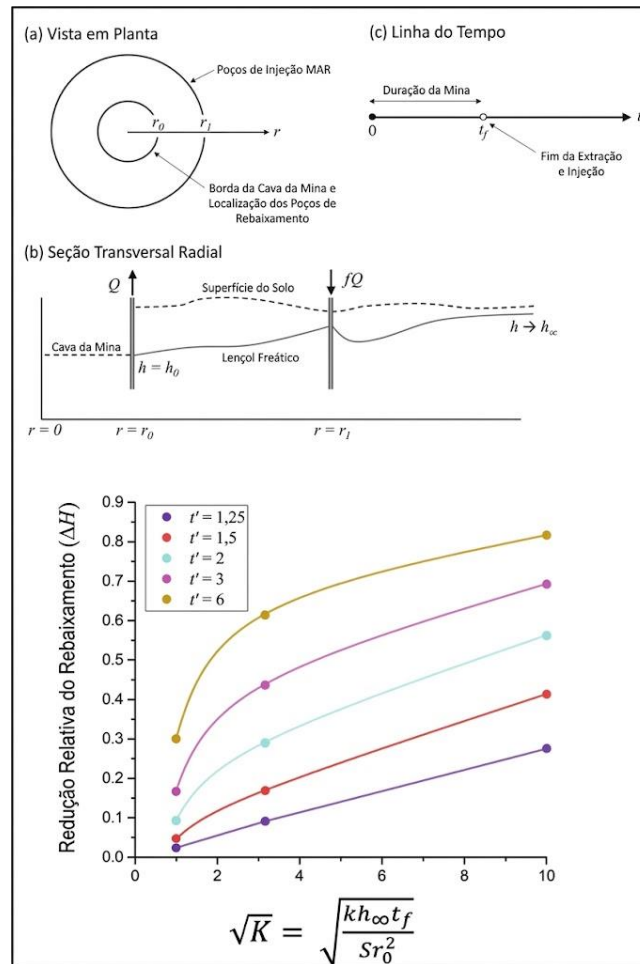
A implementação de estratégias de mitigação hidrogeológica em minas a céu aberto, principalmente aquelas relacionadas à Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR), depende diretamente de um planejamento técnico bem estruturado e baseado em modelagem hidrogeológica. Sem esse tipo de estudo prévio, as intervenções no sistema aquífero podem apresentar resultados insatisfatórios, como o aumento excessivo do nível freático (*mounding*) ou até mesmo o retorno da água injetada para o interior da cava, reduzindo a eficiência do sistema. Nesse contexto, Gresswell *et al* (2019) destacam que o fechamento de minas representa uma fase crítica, marcada pela transição entre o rebaixamento artificial do aquífero e sua

recuperação natural. Segundo os autores, a modelagem deve ser incorporada desde as etapas iniciais do planejamento, permitindo prever tanto a recuperação piezométrica quanto a interação das águas subterrâneas com os futuros *pit lakes*.

Além disso, a modelagem matemática também possui papel essencial na otimização operacional e econômica dos sistemas de MAR. De acordo com Cook *et al* (2022) a definição da distância ideal de reinjeção da água proveniente do *dewatering* é um dos principais fatores para o sucesso da estratégia (FIG.3). Os autores desenvolveram um modelo matemático que demonstra que essa distância ótima geralmente varia entre duas e nove vezes o raio da cava. O objetivo é encontrar um equilíbrio: a água deve ser injetada suficientemente distante para evitar seu retorno rápido à cava, o que aumentaria os custos de bombeamento, mas também próxima o bastante para favorecer a recuperação mais rápida do nível freático após o encerramento das operações.

Mesmo com o avanço das ferramentas de modelagem matemática, ainda existem diversas incertezas associadas à aplicação prática desses modelos. Segundo Sloan *et al* (2023) os modelos hidrogeológicos precisam ser constantemente calibrados e atualizados com dados reais de campo, já que diferenças entre os parâmetros adotados na modelagem e as condições geológicas reais podem gerar problemas não previstos, como surgências superficiais de água ou colmatção de poços de injeção. Complementando essa discussão, Suescun *et al* (2025) ressaltam que as características locais do aquífero são fundamentais para definir a estratégia adequada de monitoramento, incluindo a posição dos piezômetros e o período necessário de acompanhamento após o fechamento da mina. A figura 3 representa o Modelo conceitual do sistema de desaguamento e recarga gerenciada de aquíferos (MAR) em cava de mineração e resultados da modelagem numérica da distância ótima de injeção e da redução relativa do rebaixamento hidráulico em função do parâmetro adimensional $\sqrt{K}$.

Figura 3- Modelo conceitual do sistema de desaguamento e recarga gerenciada de aquíferos (MAR)

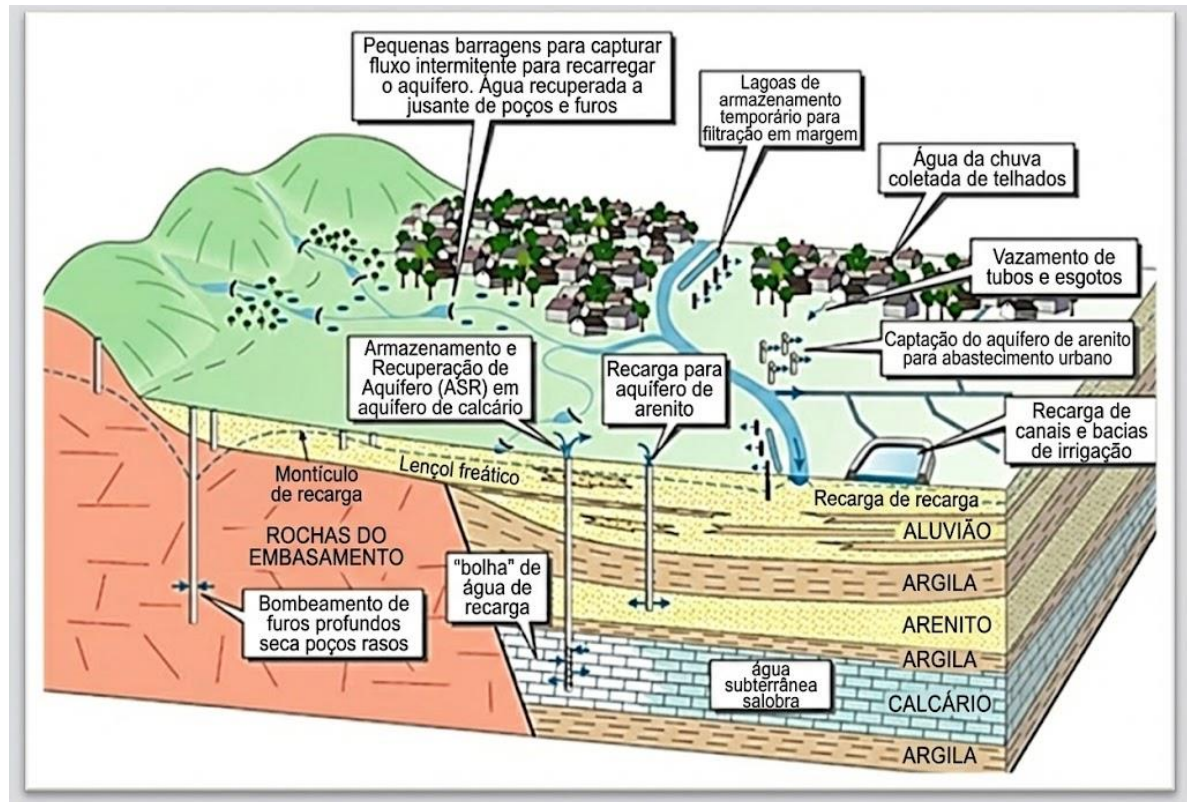


Fonte: Adaptado de Cook *et al.* (2022).

3.5 Recarga Gerenciada (MAR)

Para a correta aplicação de medidas mitigadoras, é essencial estabelecer a distinção conceitual entre os processos naturais de entrada de água no aquífero e as intervenções intencionais de engenharia. A literatura especializada, consolidada por Dillon *et al* (2019), define a Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR) como a recarga intencional de água em aquíferos para posterior recuperação ou benefício ambiental (FIG.4). O termo chave nesta definição é "intencionalidade". A MAR não é um evento fortuito, mas um processo de gestão que requer planejamento, infraestrutura e monitoramento para garantir que a água introduzida atenda a objetivos específicos de quantidade e qualidade (Dillon *et al* 2019),

Figura 4 - Esquema dos principais métodos de Recarga Gerenciada de Aquíferos



Fonte: Adaptado de Dillon *et al* (2019).

Em contrapartida, a Recarga Não Gerenciada (ou incidental) refere-se à infiltração que ocorre como consequência não planejada de atividades humanas ou processos naturais, sem controle sobre o volume ou a qualidade da água. No contexto da mineração, Sloan *et al* (2023) alertam que a infiltração a partir de barragens de rejeitos ou pilhas de estéril constitui uma forma de recarga não gerenciada (incidental). Diferentemente da MAR, esse processo é frequentemente indesejado, pois pode atuar como vetor de contaminantes para o subsolo, não contribuindo para a segurança hídrica e sim para o passivo ambiental da operação (Sloan *et al*, 2023).

A distinção também se aplica ao descarte de água. A simples injeção de excedentes de *dewatering* em poços profundos apenas para "se livrar" da água, sem um estudo hidrogeológico que vise a sustentabilidade do aquífero ou a manutenção de níveis piezométricos, classifica-se como *aquífer disposal* (descarte em aquífero) e não necessariamente como MAR. Para ser considerada uma estratégia de mitigação válida (MAR), a prática deve demonstrar um benefício tangível, como a contenção da subsidência, a proteção de nascentes ou a criação de reservas estratégicas de água para uso futuro (Sloan *et al*, 2023).

3.5.1 Tecnologias de Recarga Superficial

A recarga superficial, frequentemente referida como métodos de espraçamento (*spreading methods*), constitui a tecnologia de MAR mais antiga e difundida. Barbosa e Mattos (2008) explicam que esses métodos operam pelo princípio da infiltração gravitacional através da zona não saturada, dependendo intrinsecamente da permeabilidade dos solos e da ausência de camadas confinantes, como argilas, que impeçam o fluxo vertical. Diferentemente da injeção direta, Moura (2004) destaca que tais sistemas aproveitam a capacidade de o perfil do solo atuar como um filtro natural, processo denominado Tratamento Solo-Aquífero (SAT), promovendo a depuração preliminar da água.

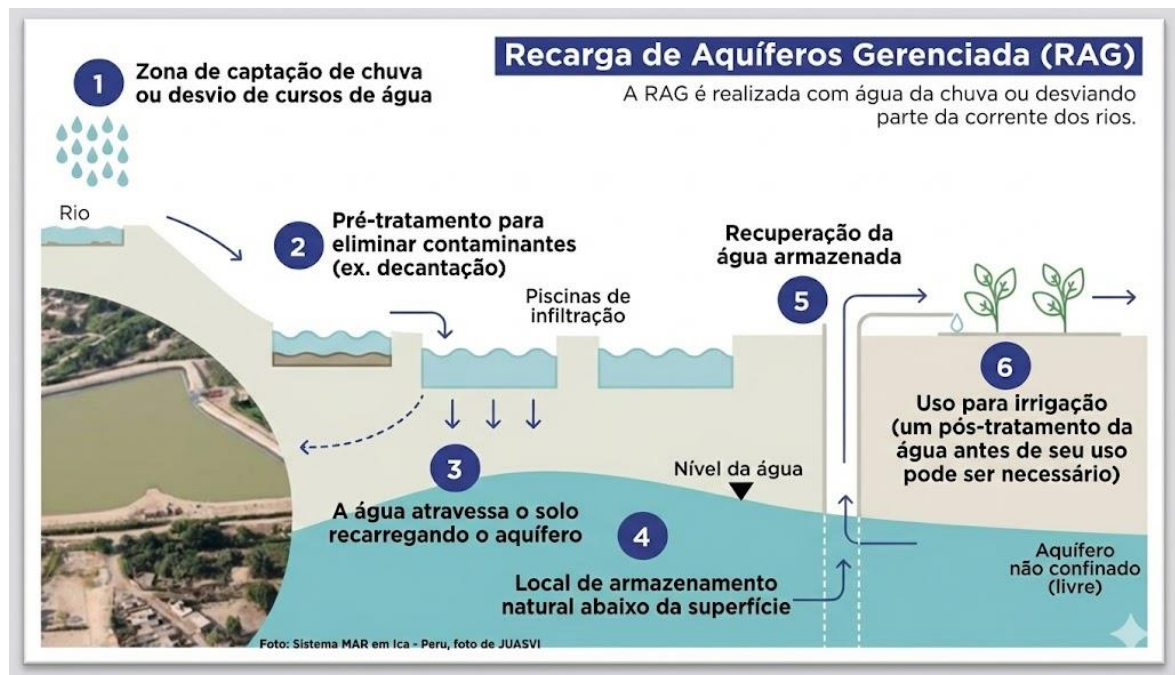
No contexto específico da mineração, Sloan *et al* (2023) observam que o uso de bacias de infiltração é predominante, especialmente em regiões áridas, servindo como uma solução estratégica para gerenciar os grandes volumes de excedente hídrico provenientes do rebaixamento de aquíferos. Contudo, a aplicação dessas estratégias está condicionada à disponibilidade de área territorial, fator que Logan (2020) aponta como determinante para infraestruturas em larga escala.

A seguir, são detalhadas as principais tecnologias de recarga superficial.

3.5.1.1. Piscinas de Infiltração

As piscinas de infiltração, ou bacias de recarga, conforme esquematizada na FIG. 5 representam a tecnologia de recarga gerenciada mais difundida globalmente. Moura (2004) define o método como a disposição de água em depressões que, por meio da pressão hidrostática, promovem a percolação vertical até o aquífero livre. Segundo *Comisión Nacional de Riego* (CNR) e a CSIRO Chile (2020), a eficiência do sistema depende da integração entre captura, pré-tratamento (decantação) e infiltração. Contudo, sua aplicação exige solos permeáveis e monitoramento constante, pois, conforme alerta Moura (2004), o fenômeno de colmatção (*clogging*) por sedimentos ou atividade biológica pode reduzir drasticamente a capacidade de recarga, exigindo manutenção periódica do fundo da bacia.

Figura 5 - Esquema conceitual de um sistema de recarga por piscinas de infiltração, detalhando as etapas de captura, pré-tratamento e recarga



Fonte: Adaptado de CNR; CSIRO CHILE (2020).

3.5.1.2. Canais e Valas de Infiltração

Os sistemas de valas (FIG. 6) e canais (FIG. 7) de infiltração representam uma variação linear das bacias de recarga, sendo definidos por Barbosa e Mattos (2008) como trincheiras longas e estreitas, onde a profundidade geralmente excede a largura. Diferentemente das piscinas, que demandam grandes áreas planas, essa geometria permite que o sistema se adapte com maior flexibilidade à topografia acidentada e às condições geológicas locais.

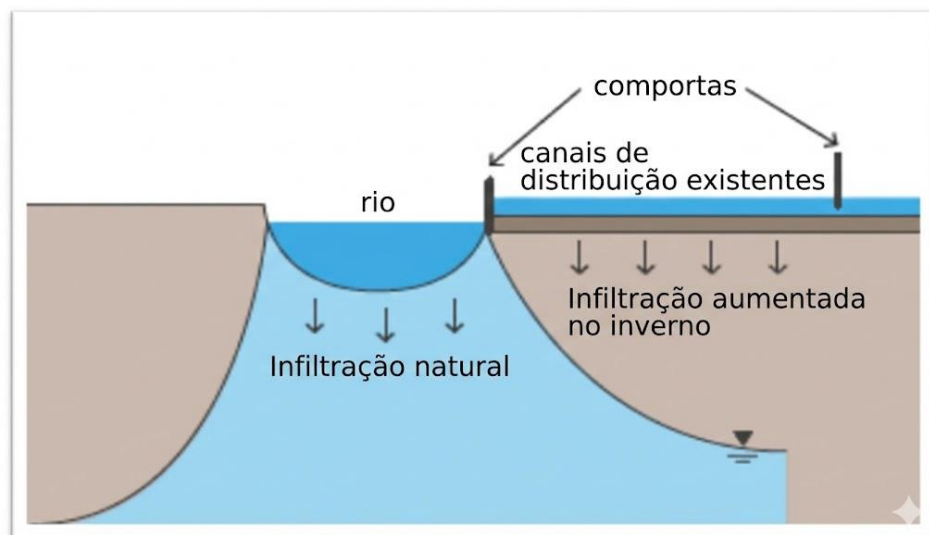
Figura 6 - Perfil esquemático de valas de infiltração construída em curva de nível para captação de

escoamento superficial.



Fonte: CNR; CSIRO CHILE (2020).

Figura 7 - Adaptação de canais de irrigação não revestidos para recarga de aquíferos durante períodos de excedente hídrico



Fonte: Adaptado de CNR; CSIRO CHILE (2020).

No contexto da mineração, Sloan *et al* (2023) apontam que essas estruturas lineares são eficazes para o gerenciamento de águas em áreas restritas ou ao longo de infraestruturas lineares (como estradas de mina e minerodutos). Além disso, sua configuração facilita a manutenção e a remoção de sedimentos, pois permite o isolamento de seções específicas sem a necessidade de interromper todo o sistema de recarga (Barbosa; Mattos, 2008).

3.5.1.3. Trincheiras de Infiltração

As trincheiras de infiltração constituem uma alternativa técnica intermediária entre os

métodos superficiais e os poços de injeção. Conforme definido por Moura (2004) e corroborado por diretrizes da UNESCO (Gale, 2005), esta técnica é particularmente indicada quando as camadas superficiais do solo apresentam baixa permeabilidade ou não estão disponíveis (devido ao uso do solo), mas existem estratos permeáveis acessíveis a uma profundidade de escavação entre 5 e 15 metros. Diferentemente das bacias de infiltração que priorizam a percolação vertical, as trincheiras são escavações lineares profundas, preenchidas com material poroso (cascalho ou areia grossa), projetadas para maximizar a infiltração lateral através das paredes da escavação para o aquífero. No contexto brasileiro, Shubo *et al* (2020) relatam adaptações desta técnica, como o 'Barreiro Trincheira', utilizado para a gestão de águas pluviais em regiões semiáridas.

3.5.1.4. Alagamento Controlado

O método de alagamento controlado (*controlled flooding*) destaca-se pela sua simplicidade e baixo custo de implementação em regiões de topografia favorável. Segundo Gale (2005), esta técnica consiste no desvio de água de rios ou canais para grandes superfícies planas, onde a água é espalhada uniformemente formando uma fina lâmina que percola através do solo. Diferentemente das bacias de infiltração que exigem escavação, o alagamento requer mínima preparação do terreno, tornando-o economicamente atrativo para grandes áreas. Barbosa & Mattos (2008) complementam que a eficiência deste método é maximizada em áreas onde a vegetação e o solo permanecem não perturbados, o que favorece taxas de infiltração mais elevadas em comparação a solos compactados ou nus. No entanto, Gale (2005) alerta para a necessidade de controle da carga de sedimentos, pois a deposição excessiva pode colmatar a superfície, embora em áreas agrícolas esses sedimentos possam, ocasionalmente, enriquecer o solo.

3.5.1.5. Barraginhas

Embora as 'barraginhas' tenham sido concebidas inicialmente para o contexto agropecuário, sua aplicação apresenta um potencial significativo para o setor de mineração como medida de compensação ambiental e mitigação de impactos hidrogeológicos. Sloan *et al.* (2023) identificam que o uso de estruturas de infiltração, como bacias e pequenas represas, é uma das práticas mais comuns de MAR na mineração global, utilizada tanto para descartar o excedente de água bombeada (*dewatering*) quanto para preservar os níveis dos aquíferos locais. No contexto de uma mina, a implementação de um sistema de barraginhas nas zonas de amortecimento (*buffer zones*) ou em áreas reabilitadas pode atuar de forma descentralizada para

maximizar a recarga natural das águas pluviais, ajudando a contrabalançar o cone de depressão gerado pelo rebaixamento do lençol freático.

Além da recarga direta, Shubo *et al* (2020) ressaltam que essas estruturas promovem a recuperação de nascentes e a revitalização de bacias hidrográficas, serviços ecossistêmicos cruciais em áreas mineradas onde o fluxo de base dos rios pode ser afetado pelo rebaixamento do nível da água. A capacidade dessas pequenas bacias de reter sedimentos e conter a erosão oferece uma vantagem operacional adicional para a mineração, atuando como barreiras físicas que impedem o carreamento de sólidos suspensos para os corpos hídricos superficiais, protegendo a qualidade da água a jusante enquanto promovem a infiltração vertical para o aquífero livre. Dessa forma, as barraginhas (FIG. 8) funcionam como uma ferramenta de dupla aptidão: controle de processos erosivos superficiais e incremento da segurança hídrica subterrânea frente à variabilidade climática e à pressão de extração.

Figura 8 - Sistema de barraginhas implementado para contenção de sedimentos e recarga hídrica no Espírito Santo



Fonte: INCAPER (2016).

3.5.1.6. Tanques/Lagoas de Percolação

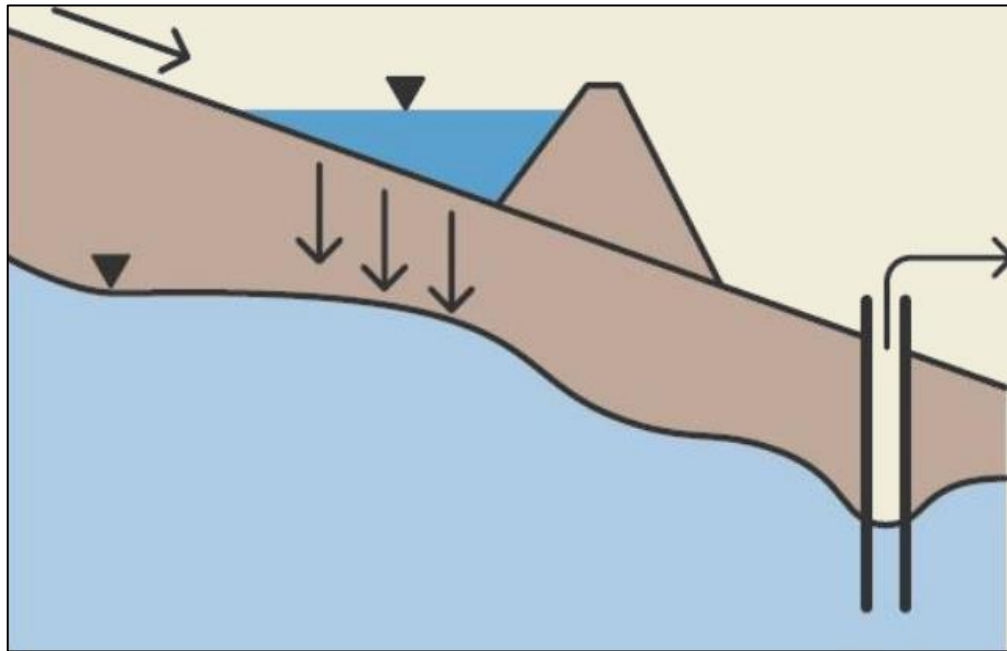
Diferentemente das piscinas de infiltração, que são construídas fora do curso do rio (*off-*

channel) e requerem estruturas de desvio de água, os tanques de percolação (FIG. 9) caracterizam-se como intervenções diretas no leito do rio (*in-channel modifications*). Segundo a Comisión Nacional de Riego e a CSIRO Chile (2020), esta técnica consiste na construção de represas ou diques transversais em cursos d'água intermitentes ou efêmeros com o objetivo de interceptar e reter o escoamento superficial. Ao formar um reservatório temporário (micro embalse), a estrutura reduz a velocidade do fluxo e a energia mecânica da água, diminuindo a erosão e forçando a infiltração vertical através do leito natural permeável do rio em direção ao aquífero (COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO; CSIRO CHILE, 2020).

É fundamental distinguir esta técnica das "barraginhas" e das barragens subterrâneas, muito comuns no Brasil. Enquanto as barraginhas, conforme descritas por Shubo *et al* (2020), são pequenas bacias de captação dispersas na bacia hidrográfica (em pastagens e encostas) para conter a enxurrada difusa antes que ela atinja o canal principal, os tanques de percolação gerenciam fluxos já concentrados dentro do canal de drenagem. Por outro lado, diferem das barragens subterrâneas pois estas últimas possuem um septo impermeável enterrado para barrar o fluxo subterrâneo, enquanto os tanques de percolação são estruturas superficiais visíveis que visam transformar água superficial em água subterrânea (Shubo *et al*, 2020).

Gale (2005) complementa que essas estruturas podem variar desde simples barramentos de terra até gabiões e diques de retenção (*check-dams*), sendo classificadas internacionalmente na categoria de modificações de canal. A *Comisión Nacional de Riego* e a CSIRO Chile (2020) ressalta ainda que, para a segurança da obra, é vital a inclusão de vertedouros para gerenciar o extravasamento durante cheias excepcionais, e que a manutenção requer a remoção periódica de sedimentos finos que tendem a colmatar o fundo do leito e reduzir a taxa de recarga.

Figura 9 - Figura esquemática mostrando um tanque de percolação indicado pela seta



Fonte: CNR; CSIRO CHILE (2020).

3.5.1.7. Filtração Interdunar

A filtração interdunar (*inter-dune filtration*) constitui uma variação específica dos métodos de recarga superficial, historicamente desenvolvida e amplamente aplicada em regiões costeiras. Segundo Gale (2005), esta técnica consiste no alagamento controlado dos vales naturais formados entre dunas de areia com água proveniente de fontes superficiais (como rios) ou em contextos mais modernos, águas pluviais e efluentes tratados. O objetivo é promover a infiltração através dos sedimentos arenosos permeáveis subjacentes.

O diferencial desta estratégia reside na sua dupla função de armazenamento e proteção do aquífero. Conforme explicam Dillon *et al* (2019) e Gale (2005), a infiltração contínua nessas depressões cria uma "lente" ou domo hidráulico de água doce no subsolo. Este domo atua como uma barreira hidráulica positiva que impede o avanço da intrusão salina, um problema recorrente em aquíferos costeiros sujeitos a bombeamento excessivo ou rebaixamento de nível, cenários comuns em minerações de areias ou em zonas litorâneas urbanizadas.

Além da recarga física, o método aproveita a capacidade natural de filtração do pacote arenoso das dunas. A passagem da água através do meio poroso promove a remoção de turbidez e patógenos, servindo como uma etapa de pré-tratamento antes da recuperação da água em pontos situados mais para o interior do continente (Gale, 2005). No contexto da mineração costeira, esta técnica apresenta-se como uma solução de engenharia ecológica para mitigar o

cone de depressão e proteger a qualidade da água subterrânea contra a salinização, aproveitando a geomorfologia local existente.

3.5.1.8. Poços em Zona Vadosa

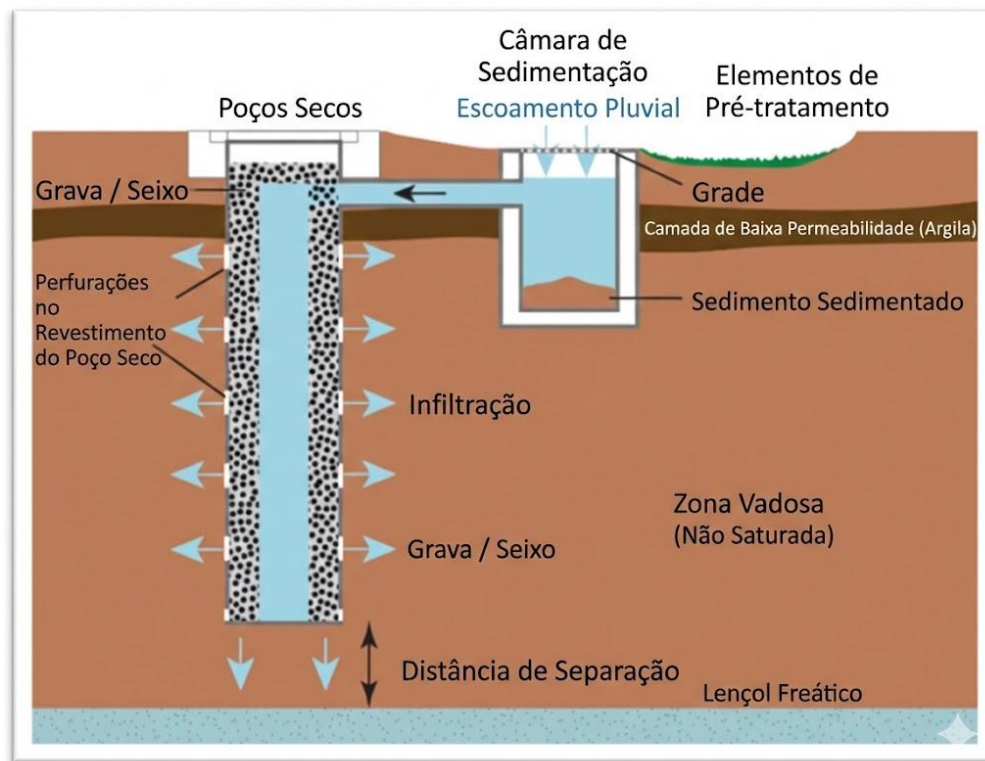
Os poços secos (*dry wells*), também referidos na literatura como poços na zona não saturada (FIG. 10), constituem uma técnica de infiltração pontual que utiliza escavações de grande diâmetro e profundidade moderada para recarregar aquíferos livres por gravidade. Segundo a Comisión Nacional de Riego e a CSIRO Chile (2020), esta técnica é particularmente estratégica em locais onde a superfície do solo apresenta camadas de baixa permeabilidade (como argilas) nos primeiros metros, que impediriam o uso de bacias de infiltração convencionais. O poço atravessa essa camada impermeável, permitindo a infiltração direta na zona vadosa permeável subjacente, acelerando a chegada da água ao nível freático.

Em termos construtivos, Barbosa e Mattos descrevem estas estruturas como perfurações de largo diâmetro (geralmente 1 a 2 metros), preenchidas com material poroso como cascalho e areia grossa para prevenir colapso e facilitar a infiltração. É fundamental que a água captada passe por um pré-tratamento, como câmaras de sedimentação, para reduzir a turbidez e evitar a colmatção (entupimento) rápida do poço, sendo recomendado proteger a abertura superior para evitar acidentes e entrada de luz solar, inibindo o crescimento de algas.

No cenário brasileiro, uma adaptação vernácula e amplamente difundida desta tecnologia é a "Caixa Seca". De acordo com Shubo *et al* (2020), a caixa seca funciona como um poço de infiltração de baixo custo, utilizado primariamente para a gestão de águas pluviais em estradas rurais não pavimentadas. O sistema consiste em uma série de valetas ou trincheiras escavadas diagonalmente à estrada que desviam o escoamento superficial para caixas escavadas (com volume mínimo de 1 m³), promovendo a retenção de sedimentos e a infiltração da água no solo.

Além de recarregar o lençol freático, essa variação da tecnologia atua na conservação do solo, prevenindo a erosão das estradas e o assoreamento de rios e córregos vizinhos. Shubo *et al* (2020) ressaltam que a manutenção é simples, exigindo a remoção do sedimento acumulado quando este atinge cerca de 50% do volume da caixa. Para a mineração, esta técnica apresenta potencial para o manejo de águas pluviais em estradas de acesso e áreas de talude, transformando um problema de drenagem em oportunidade de recarga.

Figura 10 - Perfil esquemático de um poço seco com área para decantação de finos



Fonte: Adaptado de CNR; CSIRO CHILE (2020).

3.5.1.9. Captação da água da chuva

Apesar de a maioria das estratégias de recarga dependa, em última instância, da precipitação, a técnica de *Rainwater Harvesting* (RWH) para fins de MAR distingue-se pela captação direta do escoamento em superfícies impermeáveis construídas, como telhados e pátios pavimentados, antes que a água atinja o solo ou a rede de drenagem comum. Segundo Gale (2005), esta estratégia diferencia-se das demais pela qualidade da água captada; o escoamento de telhados apresenta, geralmente, uma carga de contaminantes e sedimentos significativamente menor do que o escoamento superficial terrestre ou fluvial, o que facilita sua injeção direta no aquífero com requisitos simplificados de pré-tratamento.

A *Comisión Nacional de Riego* (2020) classifica esta técnica como um sistema de captação e infiltração *in situ* destacando sua natureza descentralizada. Ao contrário das grandes obras hidráulicas (como barragens ou canais), esta técnica aproveita a infraestrutura predial existente, desviando a água pluvial através de calhas e tubulações para estruturas de infiltração pontuais, como poços secos, trincheiras ou galerias subterrâneas, em vez de armazená-la em cisternas fechadas para consumo.

No contexto da mineração, esta estratégia atua de forma complementar aos grandes

sistemas de recarga. Enquanto as bacias de infiltração gerenciam os grandes volumes de água bombeada das cavas, a captação de água de chuva mitiga o impacto da impermeabilização do solo nas áreas administrativas, alojamentos e oficinas industriais. Shubo *et al* (2020) ressaltam que, no Brasil, técnicas similares são essenciais para transformar o passivo da drenagem pluvial em um ativo de segurança hídrica, promovendo a recarga em áreas onde a infiltração natural foi suprimida pela construção civil. Dessa forma, a mineração pode utilizar essa técnica para reduzir o volume de efluentes pluviais que necessitariam de tratamento se entrassem em contato com o solo da mina, segregando águas limpas para recarga imediata.

3.5.2 *Tecnologias de Injeção Profunda (poços)*

As tecnologias de injeção profunda compreendem o conjunto de métodos de Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR) que utilizam poços tubulares para introduzir água diretamente na zona saturada do aquífero, transpondo a zona não saturada (vadosa). Diferentemente dos métodos de espraçamento superficial, que dependem da permeabilidade dos solos superiores e de grandes áreas disponíveis, a injeção por poços é a solução técnica mandatária quando o aquífero-alvo é profundo, confinado ou semiconfinado, estando separado da superfície por camadas de baixa permeabilidade que impediriam a infiltração natural.

No contexto da indústria de mineração, estas tecnologias assumem um papel estratégico e muitas vezes operacional. Conforme revisado por Sloan *et al* (2023), a injeção profunda é amplamente adotada para gerenciar os grandes volumes de água excedente gerados pelo rebaixamento do nível freático (*dewatering*) necessário para a lavra. Além de solucionar o problema logístico do descarte de água, permitindo o cumprimento de licenças ambientais de "descarga zero" em rios, a reinjeção estratégica visa mitigar os cones de depressão, preservar níveis piezométricos para outros usuários e sustentar ecossistemas dependentes de água subterrânea.

A literatura técnica classifica estas tecnologias não apenas pela infraestrutura física, mas pela estratégia operacional. Pyne (1995) estabelece a distinção fundamental entre poços de injeção direta (focados na recarga ou descarte) e sistemas de *Aquifer Storage and Recovery* (ASR), que utilizam poços de dupla função para injetar e recuperar a água, otimizando custos e manutenção. Variações como o *Aquifer Storage Transfer and Recovery* (ASTR) adicionam o benefício do tratamento da água pelo solo ao separar fisicamente os pontos de injeção e recuperação.

Recentemente, avanços na engenharia de poços, como o uso de Poços Parcialmente

Penetrantes (PPWs) descritos por Lopik *et al* (2020), têm permitido otimizar a recarga em aquíferos heterogêneos, direcionando o fluxo para camadas de alta permeabilidade e reduzindo impactos hidráulicos indesejados próximos às cavas de mineração. Contudo, a aplicação bem-sucedida destes métodos exige um controle rigoroso da qualidade da água para prevenir a colmatção (*clogging*) física, química ou biológica, que representa o principal desafio operacional e econômico para a longevidade dos poços de injeção. Somado a isso, a ausência de informações, como estudos de caso, sobre a utilização dessa técnica em contextos de mineração, reflete a pouca discussão sobre o tema nesse setor.

3.5.2.1. Injeção Direta e Gestão de Excedentes

A injeção direta constitui o método de recarga artificial que utiliza poços tubulares para introduzir água, geralmente sob pressão, diretamente na zona saturada do aquífero. Segundo Barbosa e Mattos (2008), esta técnica é uma alternativa quando as camadas superficiais do solo são impermeáveis, impossibilitando a infiltração por gravidade, ou quando os alvos da recarga são aquíferos profundos, confinados ou semiconfinados. Diferentemente dos métodos de espraiamento que requerem grandes áreas superficiais, os poços de injeção possuem uma pequena pegada espacial (*footprint*), sendo viáveis em locais com restrição de terreno.

No contexto da mineração, a aplicação desta tecnologia assume nuances específicas. Sloan *et al* (2023) destacam que, embora os termos Reinjeção de Aquífero e Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR) sejam frequentemente usados como sinônimos na indústria, existe uma distinção funcional importante. A Reinjeção é frequentemente implementada como uma estratégia de descarte para gerenciar os grandes volumes de água excedente gerados pelo rebaixamento do nível freático, visando cumprir licenças ambientais rigorosas que exigem "descarga zero em corpos hídricos superficiais. Por outro lado, o termo MAR é aplicado quando o objetivo primário é o "uso benéfico da água armazenada, como a preservação de níveis piezométricos para ecossistemas dependentes de água subterrânea ou a estocagem para abastecimento futuro da planta de beneficiamento (Sloan *et al*, 2023).

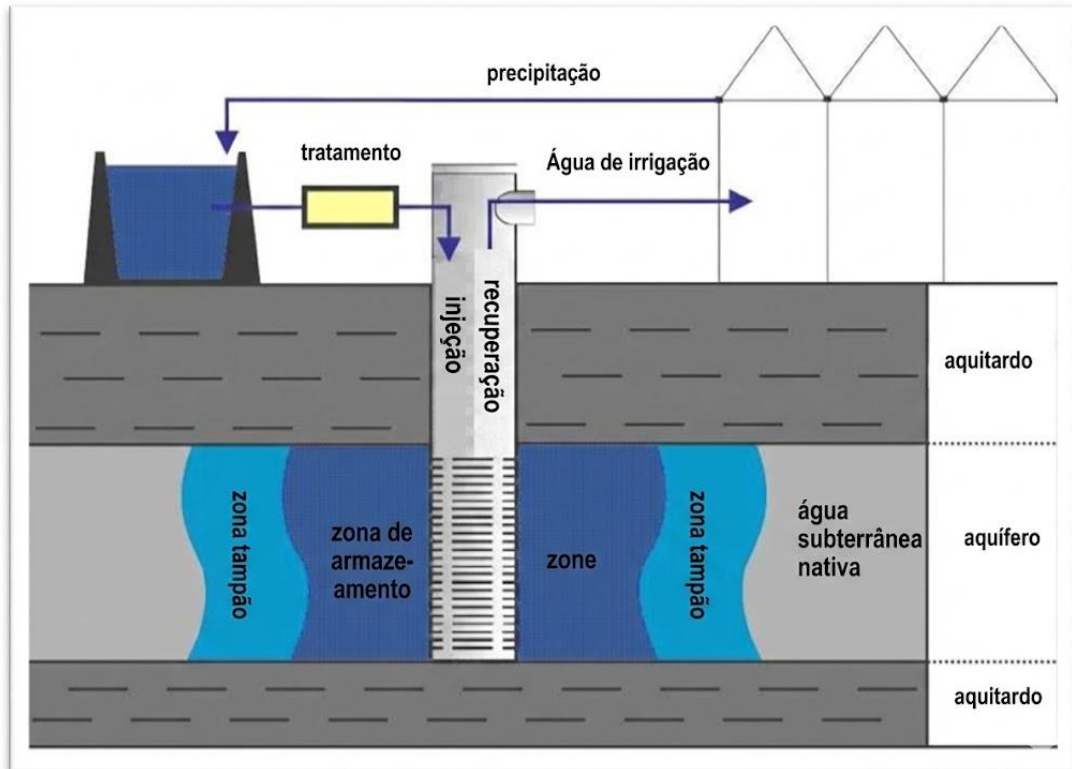
A viabilidade técnica da injeção profunda depende estritamente da qualidade da água. Como a injeção introduz água diretamente na matriz do aquífero, sem a filtragem natural proporcionada pela zona vadosa (solo), o risco de colmatção (*clogging*) do poço é significativamente maior do que em métodos superficiais. Pyne (1995) alerta que a água injetada deve ser física-quimicamente compatível com a água nativa e com a mineralogia do aquífero. A incompatibilidade pode desencadear reações geoquímicas, como a precipitação de

ferro e manganês ou a dispersão de argilas, que reduzem irreversivelmente a permeabilidade do aquífero ao redor do poço. Portanto, o pré-tratamento rigoroso para remoção de sólidos suspensos e gases (ar entranhado), bem como o controle bacteriológico, são frequentemente necessários para manter a eficiência operacional e evitar custos elevados de manutenção e limpeza dos poços (Pyne, 1995).

3.5.2.2. Configurações Operacionais: ASR e ASTR

O sistema ASR (*Aquifer Storage and Recovery*) define-se pela utilização de poços de dupla função, capazes de operar tanto na recarga (injeção) quanto na extração (recuperação) de água (FIG. 11).—De acordo com Pyne (1995), esta configuração distingue-se dos métodos convencionais por permitir que a água seja armazenada em um aquífero através de um poço durante períodos de disponibilidade e recuperada pelo mesmo poço quando necessário. Esta dualidade oferece uma vantagem econômica significativa, pois elimina a necessidade de construir estruturas separadas para injeção e bombeamento, além de reduzir a infraestrutura de tubulações na superfície.

Figura 11 - Imagem esquemática mostrando a utilização da técnica ASR



Fonte: Adaptado de Rambags *et al* (2013).

A principal vantagem técnica do ASR reside na gestão da colmatção (*clogging*). Em poços de injeção dedicados, a acumulação de sólidos suspensos e biofilme tende a reduzir a

capacidade de recarga rapidamente, exigindo intervenções de limpeza onerosas. No sistema ASR, a bomba instalada para a fase de recuperação é utilizada periodicamente para realizar a retrolavagem (*backflushing*). Conforme detalha Pyne (1995), este processo consiste em inverter o fluxo e bombear a água para fora do poço por curtos períodos, removendo fisicamente os sedimentos e o material biológico acumulado na face do poço e restaurando sua eficiência hidráulica sem a necessidade de equipamentos externos.

No contexto da mineração, o ASR é uma ferramenta estratégica para a segurança hídrica e eficiência de capital. Sloan *et al* (2023) descrevem que esta tecnologia permite a prática de *Water Banking* (banco de água), onde o excesso de água gerado pelo rebaixamento de nível (*dewatering*) ou captado durante a estação chuvosa é estocado no aquífero em vez de ser evaporado ou descartado. Posteriormente, nos períodos de seca ou quando a demanda da planta de beneficiamento aumenta, a mesma infraestrutura inverte a operação para suprir a mina.

Uma oportunidade específica destacada por Sloan *et al* (2023) é a otimização de ativos: poços perfurados inicialmente para injetar o excedente de água no início da vida da mina podem ser convertidos em poços de produção no futuro, à medida que a cava se aprofunda e a demanda por água aumenta, reduzindo significativamente os custos de capital e os riscos associados à perfuração de novos poços. Além disso, a estocagem estratégica via ASR pode ser planejada para facilitar a recuperação acelerada dos níveis freáticos regionais após o fechamento da mina (*mine closure*), mitigando passivos ambientais de longo prazo.

A técnica ASTR (*Aquifer Storage Transfer and Recovery*) difere fundamentalmente do ASR pela configuração espacial dos poços (FIG. 16). Segundo Rambags *et al* (2013), enquanto o ASR utiliza um único poço para injetar e recuperar a água, o sistema ASTR emprega poços dedicados exclusivamente à injeção e outros poços distintos, situados a uma determinada distância, para a recuperação. Esta configuração força a água a percorrer um trajeto sub-horizontal através do aquífero, garantindo um tempo de residência mínimo no subsolo antes de ser extraída.

Segundo Rambags *et al* (2013), a principal vantagem estratégica do ASTR (*Aquifer Storage Transfer and Recovery*) é a melhoria da qualidade da água, pois o distanciamento físico entre os pontos de injeção e recuperação permite que o aquífero atue como um biorreator natural. Conforme complementam Dillon *et al* (2019) e os próprios Rambags *et al* (2013), o tempo de residência estendido e a passagem pelo meio poroso promovem processos de atenuação natural — como a filtração mecânica e a biodegradação — que são particularmente

eficazes na remoção de patógenos, vírus e certos contaminantes orgânicos. Isso cria uma barreira de segurança adicional, tornando o ASTR uma opção preferencial quando a água de origem (como efluentes tratados ou água de mina) necessita de polimento final antes do reuso potável ou ambiental.

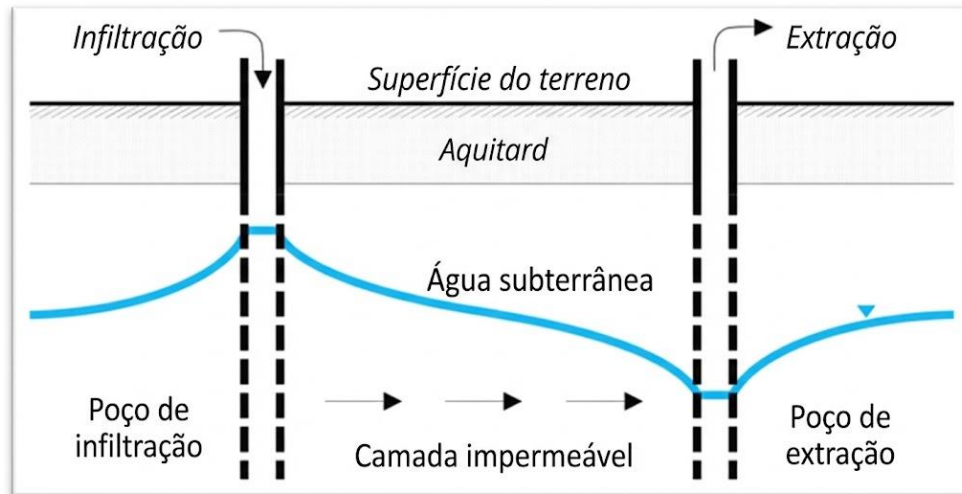
No cenário da mineração, a lógica do ASTR é aplicada para o gerenciamento hidráulico da área lavrada versus a área externa. Sloan *et al* (2023) destacam que a reinjeção de água excedente deve ocorrer a uma distância calculada da cava da mina para evitar a recirculação imediata da água para dentro da zona de extração. O sistema funciona, portanto, como um ASTR modificado (Figura 12):

- **Injeção Distante:** A água é bombeada dos poços de rebaixamento (*dewatering*) próximos à cava e transportada para poços de injeção situados fora do cone de depressão ativo.
- **Mitigação de Impactos:** Essa injeção estratégica em pontos distantes serve para repressurizar o aquífero em áreas onde o rebaixamento da mina poderia prejudicar usuários vizinhos ou ecossistemas dependentes de água subterrânea, criando uma barreira hidráulica que protege o entorno enquanto a mineração ocorre.

Apesar das vantagens de qualidade, o ASTR apresenta um desafio operacional maior em relação ao entupimento (*clogging*). Diferentemente do ASR, onde a bomba de recuperação permite limpar o poço frequentemente através de retrolavagem (inversão de fluxo), os poços de injeção dedicados do ASTR não possuem bombas instaladas permanentemente. Isso torna a limpeza mais difícil e custosa, exigindo um pré-tratamento da água de injeção mais rigoroso para evitar a colmatção física e biológica (Dillon *et al*, 2019).

Figura 12 - Imagem esquemática mostrando a dinâmica de injeção e extração d'água em aquíferos pela

técnica ASTR



Fonte: Adaptado de IGRAC (2007).

A escolha entre as tecnologias ASR (*Aquifer Storage and Recovery*) e ASTR (*Aquifer Storage Transfer and Recovery*) para operações de mineração depende fundamentalmente do equilíbrio desejado entre custos operacionais, controle de colmatção e objetivos de qualidade da água.

Do ponto de vista econômico e de manutenção, o ASR apresenta vantagens claras. Segundo Pyne (1995), o uso de poços de dupla função elimina a necessidade de duplicar a infraestrutura de perfuração e, crucialmente, permite a limpeza frequente do poço através da retrolavagem (*backflushing*). Essa capacidade de inverter o fluxo para remover sedimentos e biofilmes torna o ASR mais robusto contra a colmatção (*clogging*), um problema crônico na injeção de águas de mina que podem conter sólidos suspensos ou potencial de precipitação química. Na mineração, o ASR é ideal para a estratégia de "*Water Banking*" descrita por Sloan *et al* (2023), onde o excedente de *dewatering* da estação chuvosa é estocado no local para ser recuperado e utilizado na planta de beneficiamento durante a estação seca, otimizando o balanço hídrico operacional.

Por outro lado, o ASTR destaca-se quando o objetivo primordial é a segurança ambiental e o polimento da qualidade da água. Conforme notam Dillon *et al* (2019) e Rambags *et al* (2013), a separação física entre os poços de injeção e recuperação força a água a percorrer o aquífero, garantindo tempo de residência para a atenuação natural de patógenos e contaminantes. No entanto, esta configuração é operacionalmente mais rígida: como os poços de injeção são dedicados, eles não podem ser limpos por retrolavagem simples, exigindo água

de injeção de altíssima qualidade para evitar falhas por entupimento. Para a mineração, o ASTR é mais indicado quando é necessário criar barreiras hidráulicas distantes da cava ou quando a água reinjetada precisa atingir padrões de qualidade rigorosos antes de alcançar usuários a jusante ou ecossistemas sensíveis (Sloan *et al*, 2023).

Em suma, enquanto o ASR oferece uma solução de engenharia eficiente para o gerenciamento de volumes e custos (estoque estratégico), o ASTR atua como uma solução de tratamento e transporte, priorizando a qualidade da água em detrimento da facilidade de manutenção.

3.5.2.3. Poços Parcialmente Penetrantes (PPWs)

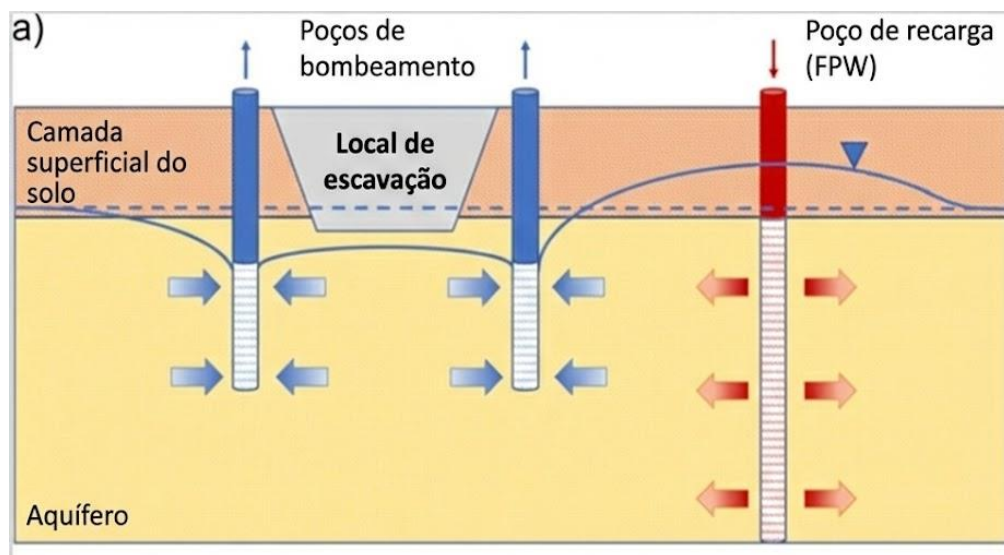
A eficiência dos sistemas de injeção profunda em mineração depara-se frequentemente com um desafio hidráulico crítico: a gestão do cone de injeção (*groundwater mounding*) e seu impacto nas operações de lavra (Sloan *et al*, 2023). Segundo Van Lopik *et al* (2020), tradicionalmente recorre-se ao uso de Poços Totalmente Penetrantes (FPW – *Fully Penetrating Wells*), cujas seções filtrantes se estendem por toda a espessura do aquífero para maximizar a taxa de entrada de água e minimizar a colmatção. No entanto, os autores demonstram que essa configuração distribui o aumento de pressão por toda a coluna vertical, elevando significativamente o nível freático também nas camadas superficiais. Conforme concluem Van Lopik *et al* (2020), essa característica hidráulica obriga os operadores a instalarem os poços de recarga a distâncias consideráveis da área de escavação para evitar que a água reinjetada recircule para dentro da zona de rebaixamento (*dewatering*) ou cause instabilidade no solo, o que pode elevar os custos de infraestrutura e bombeamento.

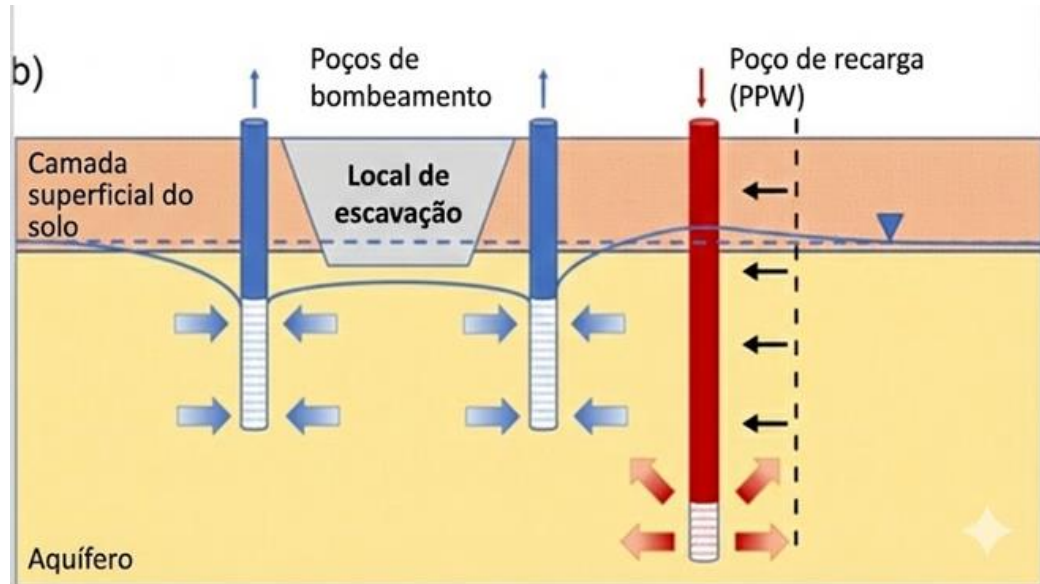
Como solução de engenharia para otimizar este balanço, surge a técnica dos Poços Parcialmente Penetrantes (PPWs) (FIG. 13). Segundo Van Lopik *et al* (2020), esta abordagem explora a heterogeneidade natural dos aquíferos, especificamente a anisotropia (onde a permeabilidade horizontal é maior que a vertical). A técnica consiste em instalar poços com seções filtrantes curtas (ex: 1 a 5 metros), posicionadas estrategicamente apenas nas camadas de alta permeabilidade e em maior profundidade do aquífero.

Ao concentrar a injeção em camadas profundas e transmissivas, cria-se um gradiente hidráulico que favorece o fluxo lateral em profundidade, retardando a propagação da pressão para a superfície. Van Lopik *et al* (2020) demonstraram, através de modelagem numérica e testes de campo, que o uso de PPWs reduz significativamente a elevação do nível freático nas camadas superficiais em comparação aos FPWs.

Esta redução no impacto superficial gera um benefício econômico direto para o projeto de mineração: permite que os campos de poços de recarga sejam instalados muito mais próximos da área de operação (cava da mina) sem comprometer a segurança geotécnica ou aumentar o bombeamento de *dewatering*. Isso resulta em uma redução drástica nos custos de infraestrutura, especificamente na diminuição da extensão das tubulações de transporte de água e nos custos de bombeamento associados à distância (Van Lopik *et al*, 2020). Sloan *et al* (2023) reforçam que, em aquíferos com alta transmissividade, estratégias que gerenciem a forma do cone de depressão e de injeção são vitais para a viabilidade econômica do manejo de águas. Na imagem, o nível estático original da água é indicado pela linha tracejada, ao desconsiderar o fluxo subterrâneo natural. Já a configuração da superfície freática durante a operação simultânea de bombeamento e recarga é demarcada pela linha contínua.

Figura 13 - Imagem esquemática de um rebaixamento do nível freático. Em a) poço totalmente penetrante (FPW) e b) poço parcialmente penetrante (PPW)





Fonte: Adaptado de Van Lopik *et al.* (2020).

3.6 Desafios Operacionais

3.6.1 Colmatção (Clogging): Mecanismos, Prevenção e Gestão

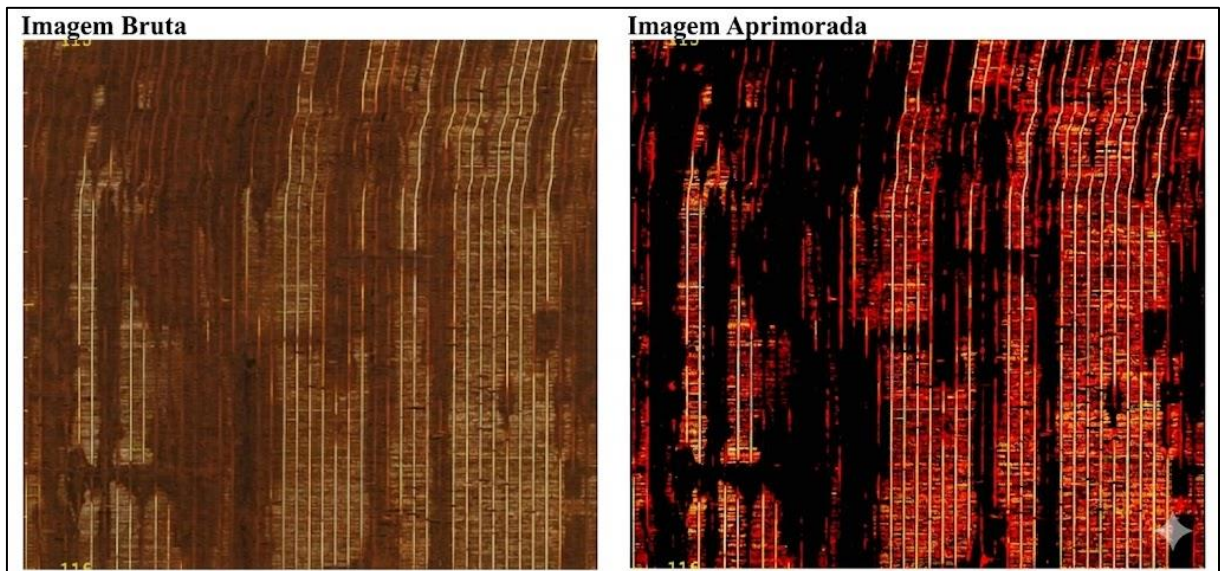
A operação de sistemas de Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR) enfrenta um problema técnico bastante importante e que, muitas vezes, compromete a eficiência das estruturas ao longo do tempo: a colmatção, conhecida na literatura internacional como clogging. Segundo Sloan *et al* (2023), o entupimento das estruturas de infiltração e dos poços de injeção é considerado o principal desafio operacional relacionado à aplicação de MAR na mineração. Esse processo ocorre devido à redução gradual da permeabilidade do meio poroso do aquífero ou das ranhuras dos poços, o que acaba diminuindo a eficiência hidráulica do sistema, aumentando a resistência ao fluxo e exigindo manutenções frequentes para manter a operação funcionando adequadamente.

Para compreender melhor a complexidade desse problema, o estudo desenvolvido por Smith (2014), na mina de ferro de Mining Area C, na região de Pilbara, Austrália, apresenta uma das análises mais completas sobre o tema. Segundo o autor, a colmatção (FIG.14) não ocorre por apenas um único mecanismo, mas sim pela atuação de quatro processos principais, que podem acontecer de forma isolada ou combinada: colmatção física, química, biológica e mecânica. A colmatção física está relacionada ao acúmulo de partículas sólidas em suspensão, como siltes e argilas, que acabam bloqueando os espaços porosos do aquífero. Já a colmatção química ocorre devido a reações hidroquímicas, principalmente associadas a mudanças nas condições de oxidação da água, favorecendo a precipitação de minerais como óxidos de ferro e

carbonatos. No caso da colmatção biológica, o problema está associado ao crescimento de bactérias e microrganismos que formam biofilmes nas paredes dos poços e nas estruturas de infiltração, fenômeno conhecido como biofouling.

Entre os diferentes tipos de colmatção, o aprisionamento de ar merece atenção especial nos sistemas de Armazenamento e Recuperação de Aquíferos (ASR) por injeção profunda. Conforme observado por Smith (2014), o fluxo turbulento e o efeito de cascata da água no interior dos poços favorecem a entrada de grandes quantidades de bolhas de ar no sistema. Esse ar atua de duas formas principais: fisicamente, as bolhas ocupam os espaços porosos do aquífero, e quimicamente, o aumento da oxigenação favorece ainda mais a precipitação de minerais oxidantes e o crescimento microbiológico. A Figura 14 exemplifica o processo de colmatção no interior de um poço por meio de filmagem, evidenciando o revestimento em seu estado bruto e após processamento de imagem para realce.

Figura 14 - Perfil de uma seção de 1 metro no interior de um poço, capturada por câmera de inspeção (*Optical Televiewer - OTV*)



Fonte: Adaptado de Smith (2014).

Para prevenir a falha e mitigar riscos antes da fase operacional crônica, Smith (2014) detalha a aplicação de ferramentas de diagnóstico preditivo. Em campo, a avaliação do potencial de colmatção física é comumente executada por meio do Índice de Filtração em Membrana (MFI), que consiste em forçar a passagem da água sob pressão constante por um filtro de abertura conhecida. Parâmetros convencionais de qualidade da água fornecem indicadores essenciais: a turbidez e os sólidos suspensos totais rastreiam vulnerabilidades mecânicas, enquanto o Carbonato Orgânico Total e o Carbono Orgânico Dissolvido refletem o

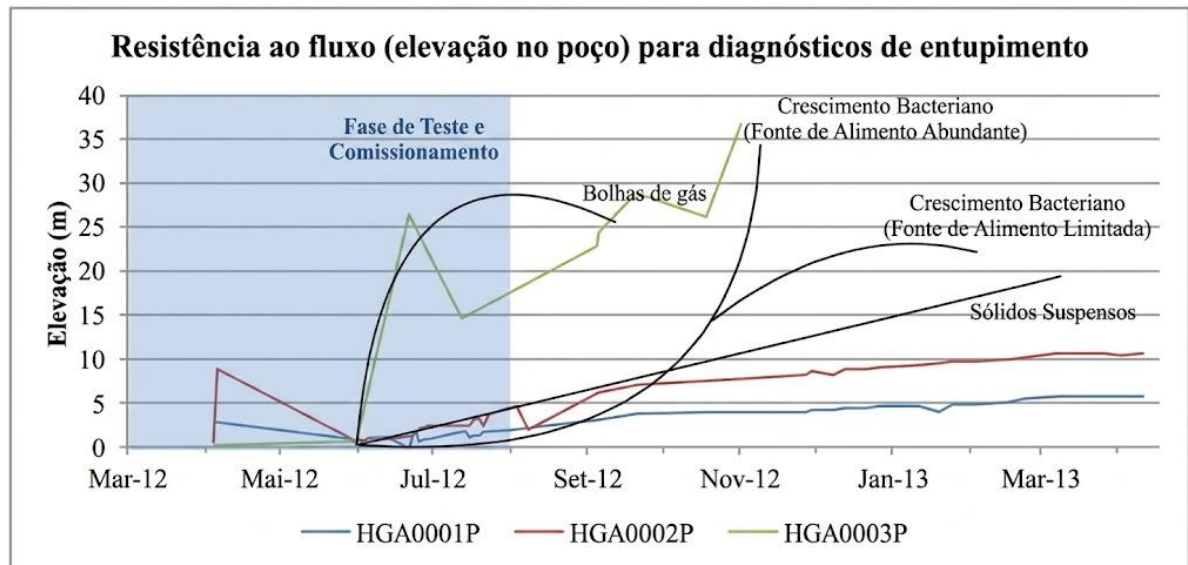
potencial de colmatção biológica.

Para a previsão de incrustações químicas, Smith (2014) recomenda o emprego de modelagem geoquímica computacional (a exemplo do software PHREEQC). Essa ferramenta utiliza dados hidrogeológicos para calcular os índices de saturação e o limiar termodinâmico de precipitação de fases minerais. Ferramentas gráficas simples (FIG. 15) também podem auxiliar as tomadas de decisão na mineração, permitindo que as equipes comparem as curvas reais de resistência ao fluxo (*in-well mounding*) em função do tempo frente a curvas padronizadas que caracterizam a assinatura hidrodinâmica de cada tipo de colmatção. Do ponto de vista preventivo do aprisionamento de ar, as diretrizes defendem que os riscos devem ser sanados precocemente, através de um dimensionamento rigoroso na engenharia e no *design* da infraestrutura tubular.

Uma vez constatado o declínio da injetividade, o método corretivo primário documentado pela indústria é o redesenvolvimento sistemático dos poços. O processo ocorre através do bombeamento forçado ou da aplicação de ar comprimido (*airlifting*) para desobstruir os poros, em frequências que devem ser ajustadas (diárias a anuais) conforme a severidade da taxa de colmatção.

Smith (2014) aponta o pré-tratamento da água captada como uma estratégia preventiva de excelência. Além de minimizar ativamente o acúmulo de partículas, essa técnica blinda a qualidade da reserva subterrânea receptora contra plumas de contaminação. Quando a redução da permeabilidade é atribuída a causas microbianas persistentes, a remediação através da injeção de agentes químicos torna-se necessária. As abordagens incluem o uso de cloro estruturado, dispersantes biológicos, enzimas e a injeção controlada de ácidos orgânicos e minerais para dissolver compostos e destruir biofilmes. Ademais, nos casos onde os mecanismos físicos inviabilizam cronicamente o sistema, adequações físicas diretas nas completções dos furos — como a remoção ou substituição de seções filtrantes de PVC — podem ser adotadas como medidas corretivas extremas. A Figura 15 ilustra a resistência da passagem de água em função dos processos de colmatção.

Figura 15 - Exibição dos dados reais de *mounding* (elevação do nível da água no poço) sobrepostos às curvas teóricas de Pyne (1995),



Fonte: Adaptado de Smith (2014).

3.6.2 Incompatibilidade Hidroquímica e Necessidade de Tratamento

A viabilidade operacional da Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR) por meio de injeção profunda não depende apenas de fatores hidráulicos relacionados ao rebaixamento ou ao controle das pressões subterrâneas. Um dos principais desafios da técnica está ligado à compatibilidade química entre a água utilizada na recarga e a água naturalmente presente no aquífero. Segundo Dahlke *et al* (2018), quando a água injetada apresenta características geoquímicas incompatíveis com as águas subterrâneas da formação geológica, ocorre um desequilíbrio hidroquímico capaz de provocar a precipitação de minerais dentro dos espaços porosos da rocha. Como consequência, ocorre o entupimento dos poros do aquífero e dos filtros dos poços, reduzindo drasticamente a eficiência hidráulica do sistema e podendo até inviabilizar a operação de reinjeção.

Para compreender melhor esse processo, é importante considerar que o aquífero não funciona apenas como um reservatório passivo de armazenamento de água. Conforme discutido por Dillon *et al* (2019), os aquíferos atuam como verdadeiros reatores biogeoquímicos, onde ocorrem diferentes interações entre a água recarregada e o meio geológico. Segundo os autores, essas interações podem ocorrer de três formas principais. A primeira delas está relacionada à remoção natural de contaminantes, incluindo a degradação de compostos orgânicos e a redução

de patógenos em zonas de atenuação dentro do aquífero. Em alguns casos, a presença de carbono orgânico favorece processos microbiológicos que auxiliam na degradação desses contaminantes. Entretanto, Dillon *et al* (2019) destacam que também existem processos menos favoráveis, como a remoção ineficiente de determinados compostos, incluindo sais dissolvidos, nutrientes e sólidos suspensos, além da possibilidade de mobilização de elementos naturalmente presentes na rocha, como o arsênio. Dessa forma, os autores ressaltam que a capacidade natural de filtração do aquífero é limitada e, muitas vezes, insuficiente para atender aos padrões ambientais e de qualidade exigidos para a operação, tornando o tratamento prévio da água uma etapa indispensável antes da injeção.

Um dos principais exemplos práticos dessa necessidade pode ser observado no estudo desenvolvido por Baquero *et al* (2016), relacionado ao Sistema de Drenagem e Reinjeção (DRS) da mina de Cobre Las Cruces, na Espanha. Segundo os autores, a operação ocorre em um aquífero confinado, denominado Aquífero Niebla-Posadas, caracterizado por águas subterrâneas com elevada interação geoquímica com as formações rochosas locais. Como resultado, a água natural da região apresenta concentrações elevadas de arsênio, amônio, boro e sais dissolvidos, o que inviabilizava a reinjeção direta da água proveniente do dewatering sem um tratamento adequado. Diante desse cenário e das exigências ambientais impostas ao empreendimento, toda a água bombeada da cava passou a ser submetida a um rigoroso processo de tratamento físico-químico antes da reinjeção no aquífero.

Para solucionar esse problema, a mineradora implantou uma Estação Permanente de Tratamento de Água (FIG.16 e FIG.17) baseada na tecnologia de osmose reversa. De acordo com Baquero *et al* (2016), o sistema possui capacidade de tratamento contínuo de até 576 m³/h, operando com etapas de pré-filtração, microfiltração e osmose reversa. Segundo os autores, a planta alcança uma taxa de recuperação de aproximadamente 91% da água drenada da mina. Além da remoção de sais dissolvidos e metais potencialmente tóxicos, o sistema também realiza o controle microbiológico da água, reduzindo significativamente a presença de bactérias e colóides que poderiam provocar colmatção nos poços de reinjeção.

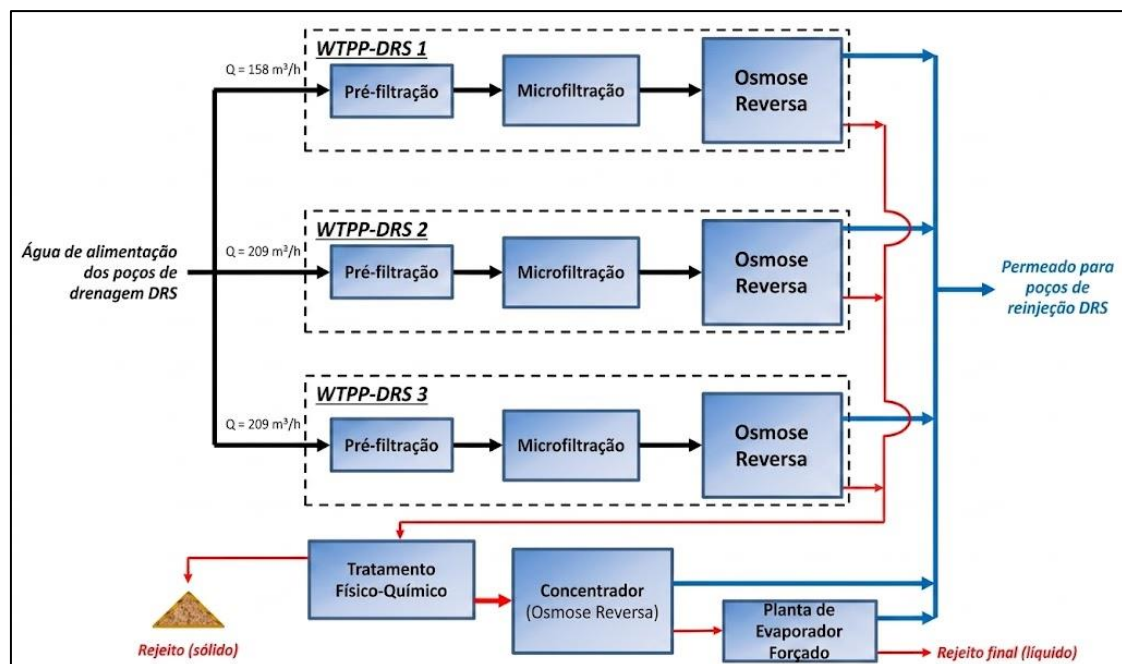
Figura 16 -Tecnologia de osmose reversa. Em A), unidade de micro-filtração. B) Estrutura de osmose reversa. C) Tratamento físico-químico do material reinjetado em unidades de osmose reversa. D) Planta

de evaporação forçada



Fonte: Adaptado de Baquero *et al* (2016).

Figura 17 - Fluxograma das etapas de alimentação dos poços DRS



Fonte: Adaptado de Baquero *et al* (2016).

A experiência dessa mina de Cobre Las Cruces demonstra que o simples bombeamento

da água subterrânea não é suficiente para garantir a viabilidade do MAR em operações de mineração. Apesar dos altos custos associados à implantação e operação de sistemas avançados de tratamento, como a osmose reversa, essas estruturas são fundamentais para garantir a continuidade operacional e o atendimento às exigências ambientais. Nesse contexto, o tratamento prévio da água funciona como uma etapa essencial para evitar problemas de colmatção, impedir a contaminação cruzada entre aquíferos e assegurar a estabilidade hidrogeológica das áreas impactadas pela mineração.

3.6.3 Limitações Hidrogeológicas e Estratégias Alternativas

Embora a Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR) apresente diversos benefícios ambientais e operacionais para a mineração, a aplicação dessa técnica depende diretamente das características geológicas e hidrogeológicas do local. Segundo Sloan *et al* (2023), a transmissividade do aquífero é um dos principais fatores que controlam a viabilidade física dos sistemas de recarga. Em aquíferos com baixa permeabilidade, a formação geológica não consegue absorver grandes volumes de água de forma eficiente, principalmente quando comparada às elevadas vazões geradas pelo rebaixamento do nível d'água em minas a céu aberto. Nessas situações, os sistemas de MAR acabam se tornando pouco eficientes ou até tecnicamente inviáveis, fazendo com que a operação precise recorrer a alternativas mais convencionais, como o descarte controlado da água em drenagens superficiais ou o armazenamento em lagoas de evaporação, especialmente em regiões áridas e semiáridas.

Essa limitação relacionada à baixa transmissividade também influencia diretamente a recuperação hidrogeológica da área após o fechamento da mina. Conforme demonstrado por Bozan *et al* (2022), aquíferos com baixa permeabilidade apresentam tempos extremamente longos para recuperação da superfície potenciométrica. Segundo os autores, em determinados cenários geológicos, o retorno dos níveis piezométricos às condições próximas do período pré-mineração pode levar mais de cem anos. Como consequência, um dos principais objetivos associados ao uso de MAR — acelerar a recuperação hídrica e promover o enchimento mais rápido da cava — acaba perdendo parte da sua efetividade em aquíferos restritivos.

Além disso, as características estratigráficas da área também podem limitar significativamente a eficiência dos sistemas de recarga superficial. De acordo com Dahlke *et al* (2018), a eficiência das bacias de infiltração depende diretamente das propriedades hidráulicas da zona não saturada. Os autores destacam que a presença de camadas argilosas com comportamento confinante ou semiconfinante funciona como uma barreira física à infiltração

vertical da água. Dessa forma, mesmo que a água seja aplicada na superfície, ela pode não conseguir atingir os níveis mais profundos do aquífero devido à baixa condutividade hidráulica dessas camadas ricas em finos. Nessas condições, os sistemas de infiltração superficial acabam perdendo eficiência, tornando necessária a utilização de poços de injeção profunda capazes de atravessar as camadas menos permeáveis.

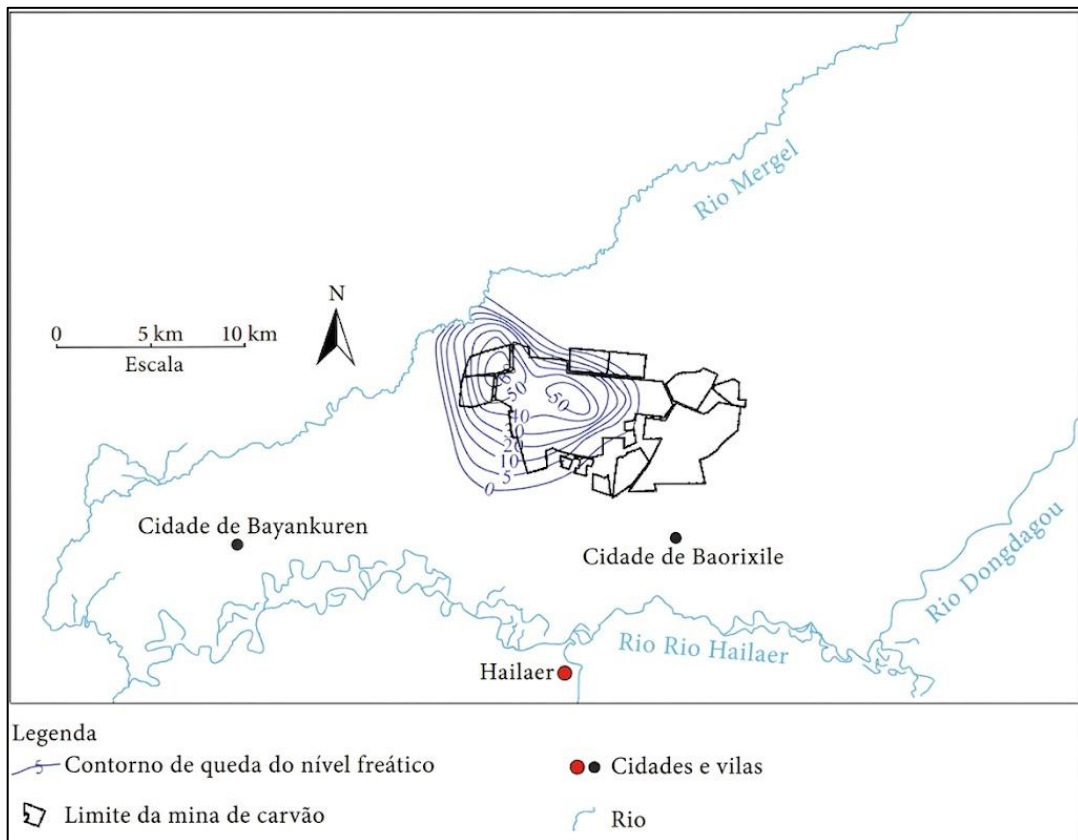
3.7 Utilização de Estratégias frente aos Impactos Ambientais Físicos.

3.7.1 Estratégias acerca de Impactos sobre Recursos Hídricos Subterrâneos.

A mineração em cavas a céu aberto provoca alterações importantes na dinâmica das águas subterrâneas, tornando necessário o controle contínuo do rebaixamento do nível freático. No estudo realizado na mina de carvão de Baorixile, localizada na Bacia de Hailaer, na China, Du *et al* (2022) observaram que o bombeamento constante utilizado no desaguamento da cava modificou significativamente o fluxo natural do aquífero, transformando a área da mina em um novo centro artificial de convergência hídrica. Como resultado, formou-se um amplo cone de depressão (FIG.27), com rebaixamentos que chegaram a aproximadamente 60 metros na região central da cava. Além disso, os impactos atingiram um raio de cerca de 8 km ao redor da mina, afetando diretamente uma área próxima de 200 km² (DU *et al.* 2022). A Figura 18 ilustra a dimensão do impacto do rebaixamento por meio de equipotenciais na região da mina.

Figura 18 - Mapa de contorno das águas subterrâneas em aquífero confinado em camada de carvão após

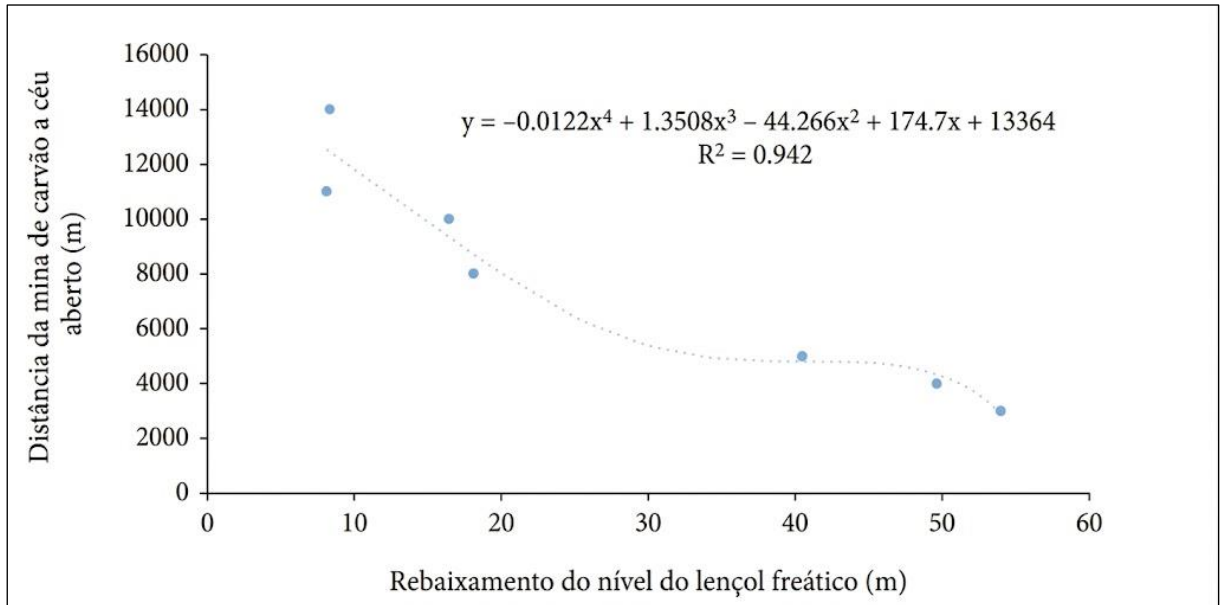
mineração a céu aberto em 2020



Fonte: Adaptado de Du *et al* (2022).

O monitoramento desses impactos foi realizado por meio de uma rede tridimensional automatizada de acompanhamento hidrogeológico, permitindo relacionar diretamente a queda do nível d'água com o avanço da lavra. A partir das análises espaciais, Du *et al* (2022) verificaram que o rebaixamento do aquífero aumenta à medida que os pontos de monitoramento se aproximam da cava, demonstrando uma relação inversamente proporcional entre o nível freático e a distância da mina. Os autores destacam ainda que o bombeamento artificial passou a controlar a dinâmica do sistema aquífero, superando a influência natural da precipitação e da topografia. Durante a operação, o sistema inicialmente consome as reservas estáticas do aquífero e, posteriormente, passa a comprometer também as reservas dinâmicas, gerando um cenário de estresse hídrico cumulativo. A Figura 19 mostra a relação inversamente proporcional entre o nível freático e a distância da cava.

Figura 19- correlação entre o nível das águas subterrâneas e a distância em relação à cava, evidenciando a influência direta do desaguamento no comportamento do aquífero



Fonte: Adaptado de Du *et al* (2022).

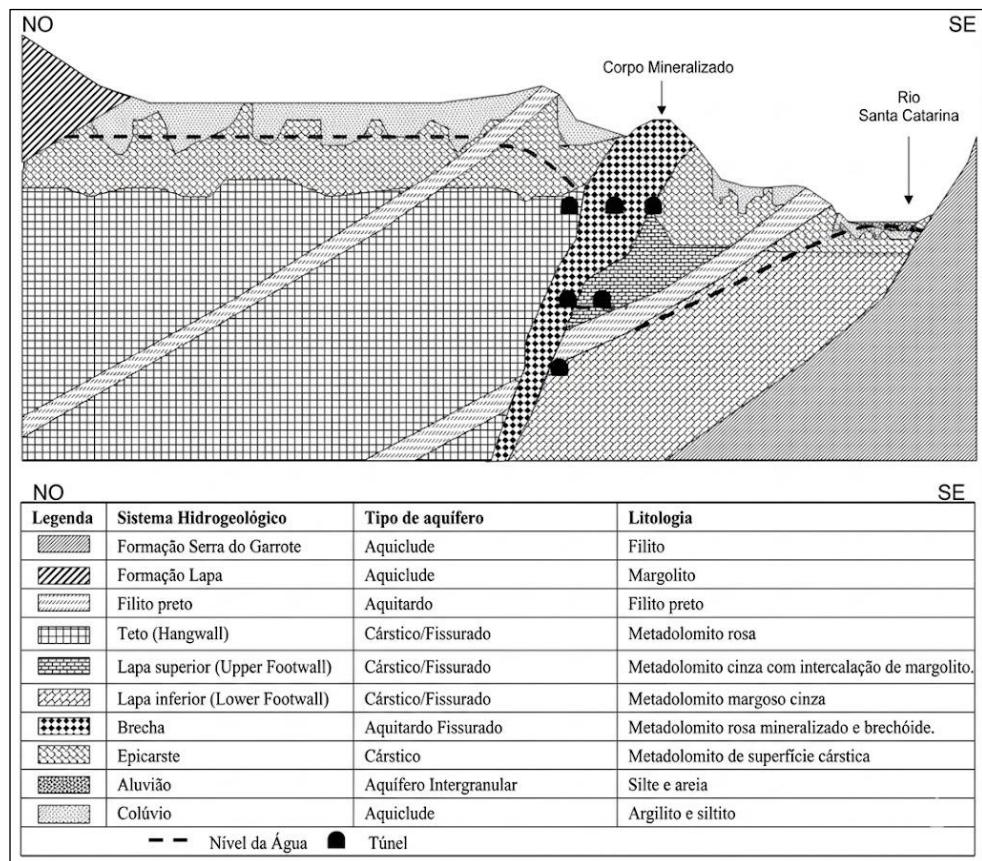
Diante desses impactos, Du *et al* (2022) ressaltam a necessidade de medidas voltadas para o controle do bombeamento e para o reaproveitamento da água drenada. Entre as principais estratégias propostas está a redução das vazões excessivas nos poços de desaguamento, evitando a superexploração do aquífero. Além disso, os autores defendem que toda a água retirada da mina seja captada, tratada e reutilizada nas próprias atividades operacionais e de suporte do empreendimento. Como forma complementar de compensação hídrica, o estudo também propõe a construção de reservatórios subterrâneos sob pilhas de estéril e o aproveitamento de lagos superficiais em áreas já recuperadas ambientalmente, buscando criar reservas estratégicas de água para a região (DU *et al* 2022).

3.7.2 Estratégias acerca de Impactos sobre Corpos Hídricos Superficiais e Ecossistemas

A mineração subterrânea em áreas cársticas exige o rebaixamento contínuo do nível freático para manter as frentes de lavra secas. Na Mina de Zinco de Vazante, em Minas Gerais, o bombeamento constante acabou interceptando zonas carstificadas do maciço rochoso, provocando um rebaixamento acelerado do aquífero e formando um amplo cone de depressão. Segundo Bittencourt *et al* (2008), essa alteração no comportamento hidráulico afetou diretamente importantes nascentes da região, como a Lagoa do Sucuri, a nascente Olaria e a nascente Poço Verde, que chegaram a secar completamente. Esse cenário evidencia a forte conexão entre os aquíferos profundos e a drenagem superficial, além de demonstrar como o rebaixamento causado pela mineração pode comprometer a vazão natural das surgências

presentes na área de influência da mina. A Figura 20 mostra a interceptação do nível d'água subterrâneo com a mina.

Figura 20 - Seção esquemática do sistema hidrogeológico local



Fonte: Adaptado de Bittencourt *et al* (2008).

Diante da redução das vazões e da ocorrência frequente de subsidências e dolinas associadas à despressurização do maciço, as principais medidas mitigadoras passaram a focar no controle das águas superficiais. Bittencourt *et al* (2008) observaram que a infiltração de água da chuva nas áreas afetadas pelo rebaixamento funcionava como um gatilho para a formação de novas dolinas de colapso. Por esse motivo, o manejo do escoamento superficial tornou-se essencial para reduzir os riscos geotécnicos. Entre as medidas adotadas, destaca-se a manutenção das tubulações de água expostas nas instalações da usina, permitindo a identificação rápida de vazamentos e evitando infiltrações artificiais que poderiam agravar a instabilidade do terreno drenado.

Na tentativa de mitigar os impactos e garantir maior segurança operacional, foi implantada uma ampla rede de monitoramento hidrogeológico integrada a sistemas de Informação Geográfica (GIS). De acordo com Bittencourt *et al* (2008), essa estrutura passou a

contar com 173 piezômetros, dos quais 10 operavam com telemetria em tempo real, além de 5 estações pluviométricas e 34 pontos destinados ao monitoramento de vazão de rios e nascentes. Associado ao mapeamento geológico detalhado e às sondagens realizadas durante o avanço da lavra, esse sistema de monitoramento permitiu controlar de maneira gradual o rebaixamento da superfície potenciométrica. O objetivo principal era evitar mudanças bruscas na pressão hidrostática do maciço, reduzindo os riscos tanto para a operação da mina quanto para os ecossistemas superficiais da região.

3.7.3 *Estratégias acerca de Impactos sobre a Qualidade da Água Subterrânea*

O estudo de caso da mina de Cobre Las Cruces (CLC), localizada na Faja Pirítica Ibérica, na Espanha, e aqui já descrito por Baquero *et al* (2016), é também um dos exemplos mais completos sobre degradação hidroquímica associada ao desaguamento de minas e às estratégias de mitigação utilizadas para controlar esse impacto. Nessa operação, a cava intercepta o Aquífero Niebla-Posadas, que se encontra confinado abaixo de uma camada de margas marinhas com espessura entre 120 e 150 metros e baixa permeabilidade.

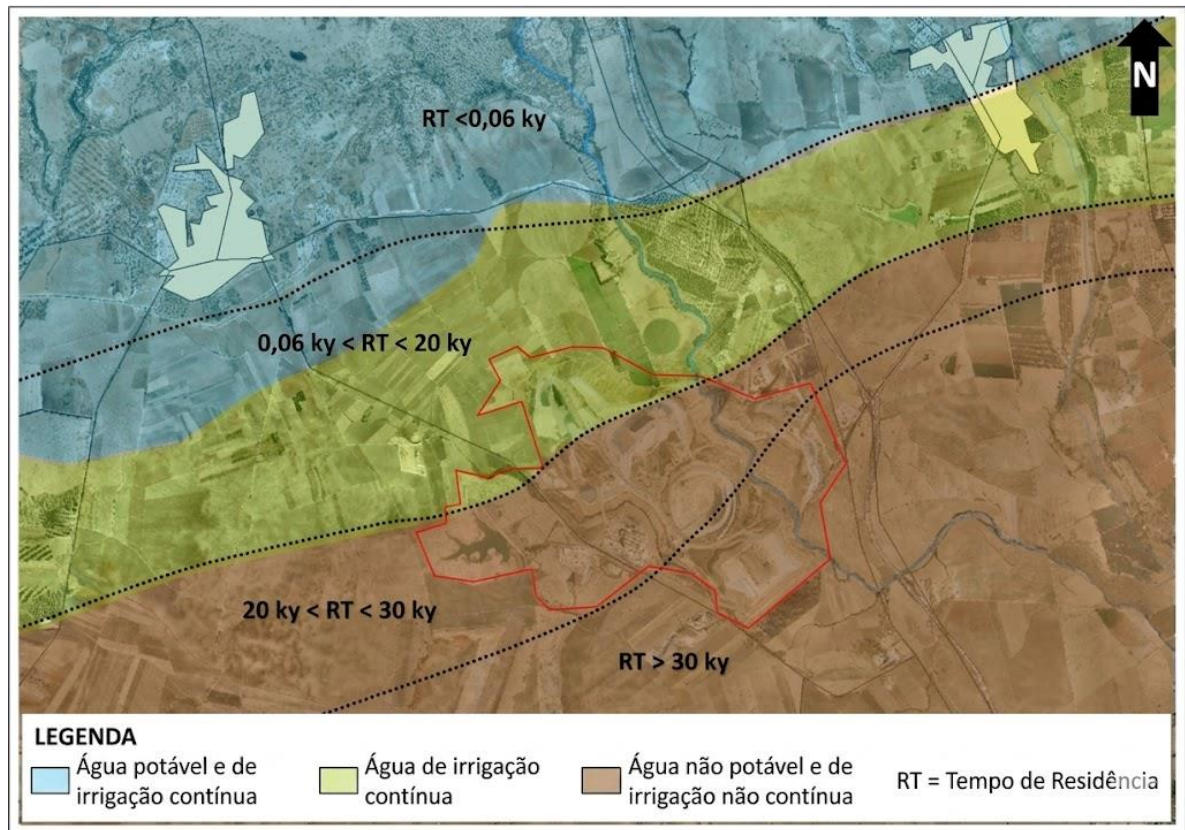
Além da elevada salinidade, Baquero *et al* (2016) também identificaram que essas águas possuem um longo tempo de residência no aquífero (FIG.30). Através de datações utilizando trítio, carbono-14 e cloro-36, os autores verificaram idades superiores a 20 mil anos para parte das águas subterrâneas. Esse longo período de confinamento favorece a formação de um ambiente fortemente redutor, com potenciais Eh próximos de -300 mV nas áreas associadas aos sulfetos maciços. A Figura 21 mostra a diferenciação das águas de aquíferos e a sua relação tempo de residência.

Segundo os autores, essas condições geoquímicas favorecem a degradação da matéria orgânica e a dissolução de hidróxidos de ferro, promovendo a liberação de metais previamente adsorvidos na matriz rochosa. Como consequência, foram registradas concentrações elevadas de arsênio, chegando a 180 µg/L, além de amônio com até 12,8 mg/L e boro atingindo 3,48 mg/L nas águas bombeadas pelo sistema de *dewatering*.

Diante do risco de expansão do cone de rebaixamento e da possibilidade de migração dessas águas contaminadas para captações externas utilizadas para abastecimento, a mineradora implantou um Sistema de Drenagem e Reinjeção (DRS) associado a um rigoroso tratamento físico-químico da água. Segundo Baquero *et al* (2016), o sistema foi composto por um anel interno com 32 poços de drenagem responsáveis pelo rebaixamento do nível d'água até aproximadamente 120 metros de profundidade, além de um anel externo formado por 28 poços

de reinjeção localizados entre 0,7 km e 2,5 km da cava.

Figura 21 - Zoneamento das idades das águas subterrâneas e os tempos de trânsito no aquífero



Fonte: Adaptado de Baquero *et al* (2016).

Toda a água extraída pelo sistema, equivalente a cerca de 3,2 hm³/ano, é encaminhada para uma Estação Permanente de Tratamento de Água (WTPP). De acordo com os autores, essa unidade possui capacidade operacional de até 576 m³/h e opera com etapas de pré-filtração, microfiltração e osmose reversa de alta pressão, trabalhando entre 15 e 30 bar em três linhas independentes. A microfiltração utiliza módulos compostos por aproximadamente 1.500 fibras ocas com porosidade de 0,1 µm, sendo fundamental para a remoção de coloides e bactérias que poderiam causar colmatação dos poços de reinjeção. Além disso, o sistema de osmose reversa foi projetado especificamente para remoção de boro. O rejeito concentrado do processo é encaminhado para tratamento físico-químico e posteriormente para uma planta de evaporação forçada de seis efeitos, permitindo minimizar perdas e alcançar uma taxa de recuperação de água próxima de 91%.

Os resultados apresentados por Baquero *et al* (2016) mostram que as medidas de mitigação adotadas foram extremamente eficientes tanto do ponto de vista operacional quanto ambiental. Segundo os autores, após aproximadamente 10 anos de funcionamento do sistema

de reinjeção, apenas três poços precisaram passar por processos de limpeza e desobstrução, evidenciando a alta eficiência do tratamento e do controle de colmatção.

Os resultados mostram reduções expressivas nas concentrações de contaminantes, com teores de arsênio reduzidos para cerca de 1 µg/L e concentrações de amônio abaixo dos limites de detecção analítica. Segundo os autores, ao longo dos primeiros sete anos de operação, aproximadamente 17,4 hm³ de água foram tratados e reinjetados no aquífero, promovendo uma renovação artificial significativa das águas subterrâneas da região. Dessa forma, águas antigas, salinas e enriquecidas em metais foram gradualmente substituídas por água tratada e de melhor qualidade. Esse caso demonstra que a gestão hidrogeológica sustentável na mineração não depende apenas do controle dos volumes bombeados, mas também do controle da qualidade química da água reinjetada, garantindo a preservação ambiental e a estabilidade hidroquímica do sistema aquífero.

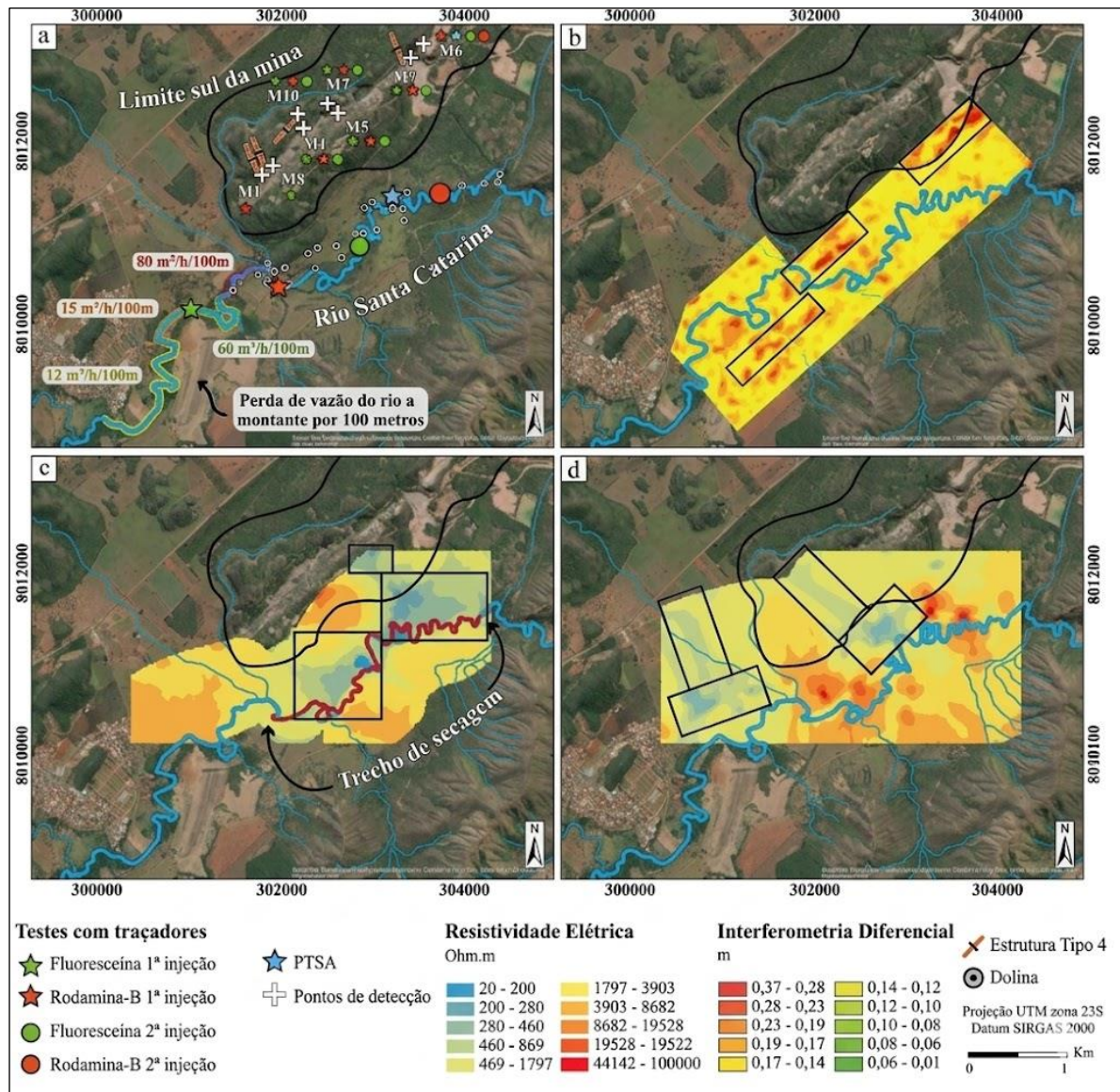
3.7.4 Estratégias acerca de Impactos Geotécnicos

No contexto geológico brasileiro, os impactos geotécnicos associados ao rebaixamento do nível d'água também podem atingir proporções bastante severas, principalmente em aquíferos cársticos. Um exemplo importante disso foi documentado por Ferreira (2023) na mina subterrânea de zinco de Vazante (MG). Segundo o autor, o bombeamento contínuo realizado para manter as frentes de lavra secas provocou uma despressurização intensa das rochas metadolomíticas da região. Com a retirada da água subterrânea, houve perda do suporte hidrostático que atuava nas fraturas e cavidades do maciço, favorecendo o surgimento de diversos sumidouros (sinkholes) e dolinas, especialmente nas áreas de planície de inundação próximas à mina (FIG.22).

Em minas subterrâneas instaladas em terrenos cársticos, o rebaixamento artificial do nível freático pode causar impactos geotécnicos bastante significativos, principalmente relacionados à subsidência do terreno e à formação de dolinas e sumidouros (*sinkholes*). Com o objetivo de entender melhor a evolução dessas instabilidades, Ferreira (2023) utilizou técnicas de sensoriamento remoto associadas à Interferometria Diferencial por Radar de Abertura Sintética (DInSAR). A aplicação contínua dessa metodologia permitiu identificar pequenos deslocamentos da superfície ao longo do tempo, mostrando que as áreas mais instáveis da planície de inundação estão diretamente associadas a estruturas rúpteis hidrogeologicamente condutivas localizadas nas porções rasas do aquífero. Dessa forma, o estudo demonstrou que o avanço das dolinas possui forte controle estrutural e relação direta com as alterações induzidas

pelo rebaixamento freático (Ferreira, 2023).

Figura 22 - Mapa de integração de dados da região entre o trecho em secamento do Rio Santa Catarina e a porção sul da mina subterrânea de Vazante



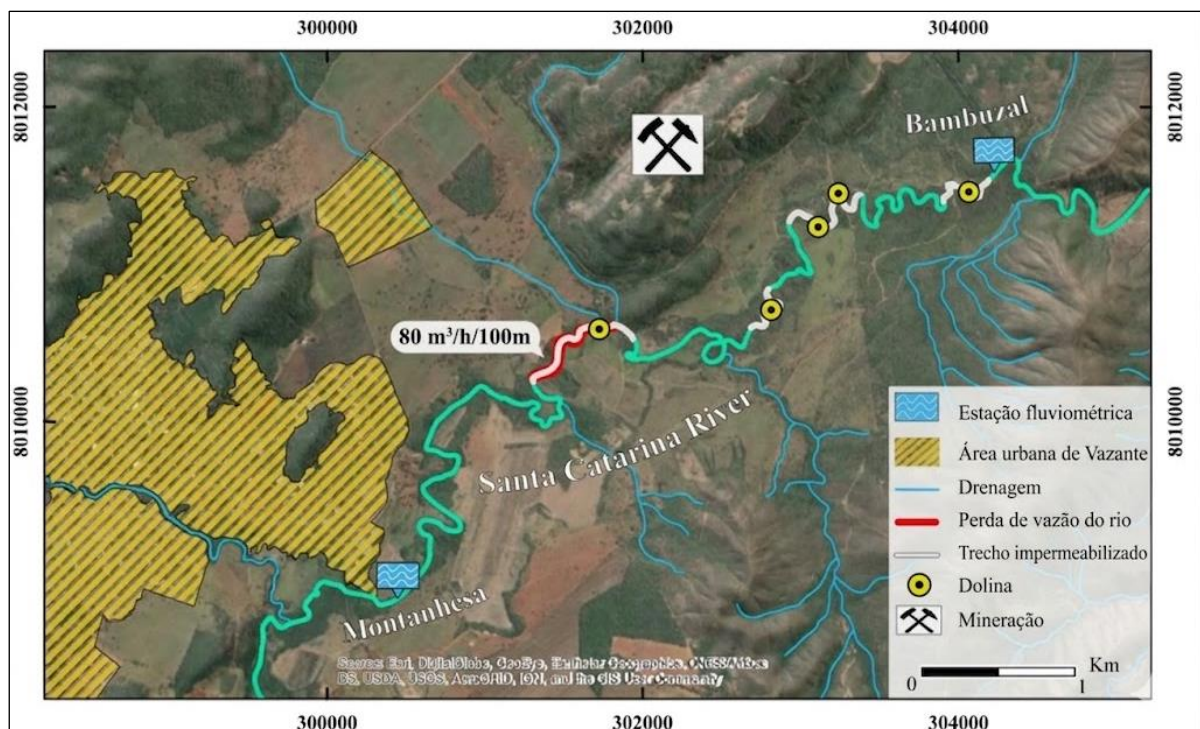
Fonte: Adaptado de Ferreira (2023).

Como medida mitigadora para reduzir os riscos geotécnicos e controlar a erosão interna das estruturas cársticas, Ferreira (2023) realizou simulações numéricas considerando o tamponamento dos sumidouros por meio da injeção de calda de cimento e poliuretano, considerada uma barreira física (FIG.23). O autor avaliou cenários de obstrução parcial (50%) e total (100%) dos condutos cársticos e verificou que essa estratégia foi a mais eficiente para minimizar os impactos. Segundo os resultados das modelagens, o bloqueio da comunicação hidráulica entre o rio e as zonas profundas do aquífero reduziu significativamente a perda de

água e limitou o avanço do cone de rebaixamento para valores entre 89 e 103 metros até o ano de 2030. Além disso, a diminuição das variações de pressão hidrostática contribuiu para reduzir os riscos de surgimento de novas instabilidades geotécnicas (Ferreira, 2023).

Por outro lado, Ferreira (2023) também avaliou uma alternativa baseada na impermeabilização do leito do rio em trechos de aproximadamente 500 metros ao redor dos sumidouros, sendo 250 metros a montante e 250 metros a jusante. Apesar de parecer uma solução viável para reduzir as perdas de água superficiais, os resultados da modelagem indicaram um cenário de maior risco geotécnico. A redução da infiltração e da recarga natural do aquífero provocaria uma expansão muito mais intensa do cone de depressão, alcançando cerca de 513 metros de avanço. Segundo o autor, esse aumento do déficit hídrico poderia acelerar os processos de carstificação, ampliar feições de colapso já existentes e até favorecer o aparecimento de novas dolinas em direção às áreas urbanas próximas da mina (Ferreira, 2023).

Figura 23- Sumidouros selecionados para as intervenções de tamponamento ao longo do trecho afetado pelo secamento do rio



Fonte: Adaptado de Ferreira (2023).

3.8 Desequilíbrio Hídrico e Efeitos Cumulativos

3.8.1 Desequilíbrio Hídrico e Impactos Cumulativos

A exploração de minério de ferro provoca alterações significativas no balanço hídrico

das bacias hidrográficas. Isso ocorre porque, à medida que as cavas avançam para cotas abaixo da superfície piezométrica, torna-se necessário realizar o rebaixamento contínuo do nível freático, processo conhecido como *dewatering*. Segundo Mourão *et al* (2006), essa operação exige o bombeamento constante de grandes volumes de água subterrânea, muitas vezes superiores à capacidade natural de recarga dos aquíferos, transformando estruturas geológicas importantes, como o Sinclinal da Moeda, no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, em áreas de elevado estresse hidrogeológico.

Do ponto de vista quantitativo, Magalhães *et al* (2022) demonstram claramente esse desequilíbrio ao modelarem o flanco leste do Sinclinal da Moeda. Os autores apontam que o volume médio bombeado pelas minas da região chega a aproximadamente 41 milhões de m³ por ano, enquanto a reserva renovável estimada para o Aquífero Cauê é de apenas 27 milhões de m³/ano. Isso significa que a exploração atual corresponde a cerca de 150% da capacidade renovável do aquífero, evidenciando um cenário de superexploração e consumo progressivo da reserva permanente do sistema hidrogeológico.

Outro ponto importante é que esse impacto não ocorre de forma isolada em apenas uma mina. Conforme discutido por Figueiredo (2021), a concentração de diferentes empreendimentos minerários nas áreas de recarga e nos afloramentos da Formação Cauê faz com que os cones de depressão gerados pelas operações acabem se sobrepondo regionalmente. Como consequência, ocorre a formação de grandes zonas contínuas de rebaixamento do nível freático. Essa interferência regional altera diretamente o comportamento natural do fluxo subterrâneo. Em condições naturais, o Aquífero Cauê funciona como um importante divisor de águas subterrâneas. Entretanto, Magalhães *et al* (2022) mostram que, nas porções centrais do Sinclinal da Moeda, a superposição dos cones de rebaixamento induz a convergência de fluxo subterrâneo para o interior das cavas, fazendo com que águas provenientes de unidades geológicas adjacentes e menos permeáveis migrem em direção às áreas mineradas.

Além dos impactos hidrogeológicos, o problema também possui forte dimensão socioeconômica. Segundo Magalhães *et al* (2022), o rebaixamento excessivo do Aquífero Cauê representa uma ameaça direta à segurança hídrica da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), que corresponde ao terceiro maior aglomerado urbano do Brasil. O aquífero possui papel fundamental na manutenção das vazões da bacia do Alto Rio das Velhas, sistema responsável pelo abastecimento de mais de 60% da população de Belo Horizonte e cerca de 40% dos aproximadamente seis milhões de habitantes da RMBH. Os autores ressaltam ainda que a vulnerabilidade hídrica da região vem sendo agravada pelo crescimento populacional e

pelos eventos recorrentes de seca extrema observados nos últimos anos. Como reflexo desse cenário, Magalhães *et al* (2022) relatam que, no final de 2018, já haviam sido registradas solicitações formais para declaração de áreas de conflito pelo uso da água na bacia do Alto Rio das Velhas.

A situação se tornou ainda mais crítica após o rompimento da barragem de rejeitos em Brumadinho, ocorrido em 2019. O desastre comprometeu as captações de água no Rio Paraopeba, que anteriormente era responsável por aproximadamente 60% do abastecimento da RMBH. Com isso, houve um aumento expressivo da dependência do sistema do Rio das Velhas, justamente em uma região que já vinha sofrendo com os impactos do rebaixamento hidrogeológico causado pelas atividades minerárias.

3.8.2 *Reuso de Água de Mina*

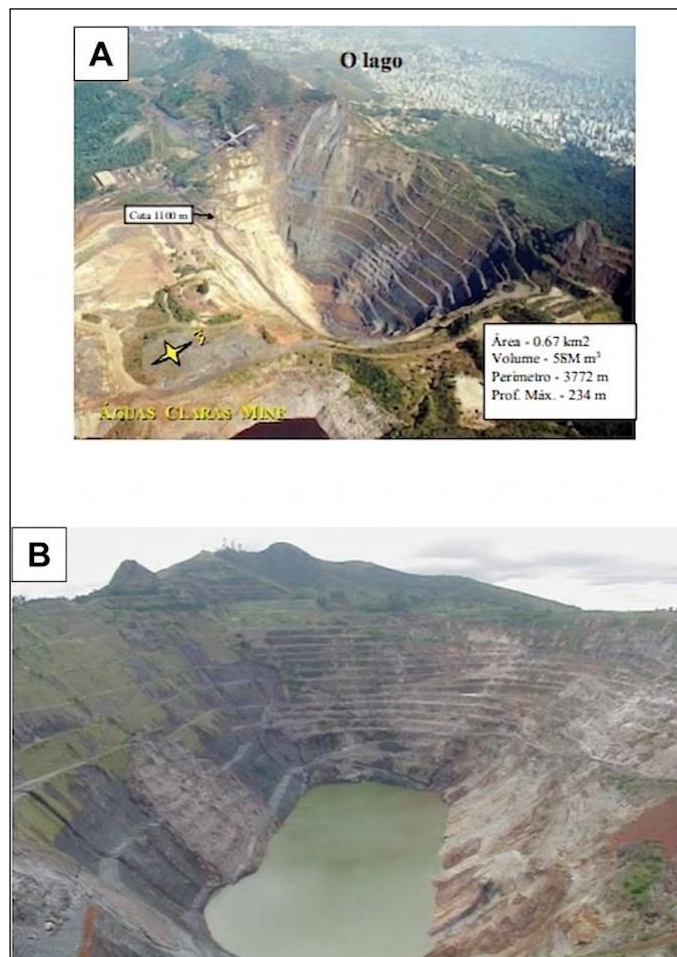
Um dos exemplos conhecidos de reuso de água de mina no Brasil foi apresentado por Amorim *et al* (1999), a partir da experiência da Minerações Brasileiras Reunidas (MBR) em parceria com a COPASA. No caso da Mina de Capão Xavier, o volume de água captado pelos poços de desaguamento era superior ao impacto causado pela redução das nascentes da região. Dessa forma, a água excedente passou a ser direcionada para o sistema público de tratamento, contribuindo para regularizar a oferta hídrica e garantindo maior estabilidade ao abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, principalmente durante os períodos de estiagem. Nesse contexto, a água proveniente do *dewatering* deixou de ser apenas um passivo operacional e passou a representar um benefício ambiental e socioeconômico para a bacia hidrográfica.

Além da utilização durante a fase operacional da mina, o planejamento hídrico de longo prazo também possui papel importante no período pós-fechamento. Grandchamp *et al* (2002) demonstram esse cenário no caso da Mina de Águas Claras, em Nova Lima (FIG.24). Após a paralisação do bombeamento e a recuperação gradual das cargas hidráulicas do Aquífero Cauê, a cava exaurida começou a funcionar como um grande reservatório hídrico e área de recarga induzida. Segundo os autores, o monitoramento do balanço hídrico indicou a formação de um lago com capacidade aproximada de 58 milhões de m³ de água, consolidando uma importante reserva hídrica regional para o Quadrilátero Ferrífero.

O reuso da água de mina também tem sido aplicado para suprir demandas industriais internas, reduzindo a pressão sobre os recursos hídricos locais. Baquero *et al* (2016) descrevem esse modelo na mina de Cobre Las Cruces, na Espanha, onde a água drenada apresenta elevada salinidade e contaminação natural. Para viabilizar sua utilização, a água passa por um sistema

avanzado de tratamento envolvendo osmose reversa e processos físico-químicos. Segundo os autores, a parcela da água tratada que não retorna ao aquífero é reaproveitada integralmente na própria planta hidrometalúrgica da mina. Essa estratégia reduz o descarte de efluentes no meio ambiente e aumenta a autossuficiência hídrica do empreendimento, demonstrando que, quando adequadamente tratada, a água de drenagem pode se tornar um recurso estratégico para a atividade minerária.

Figura 24 - Evolução das cargas hidráulicas da mina de Águas Claras em Nova Lima, MG. Em A) ano de 1999. Em B) 2002



Fonte: Adaptado de Grandchamp *et al* (2002).

3.9 Sustentabilidade Hídrica e Fechamento de Minas

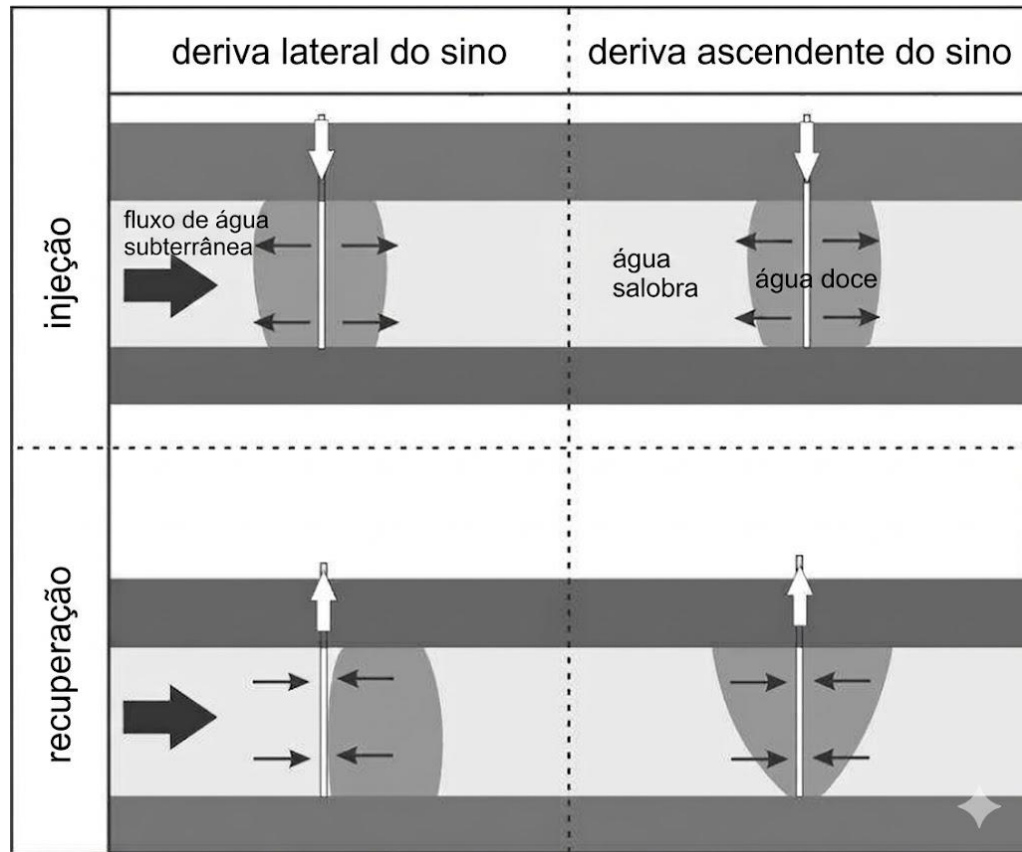
3.9.1 *Sustentabilidade Hídrica: A Transformação do Passivo do Dewatering em Ativo Estratégico*

No contexto australiano, Windsor *et al* (2012) destacam a aplicação da técnica de Recarga Gerenciada de Aquíferos na mina de minério de ferro de Cloudbreak, localizada na

região de Pilbara. Nesse empreendimento, o sistema de injeção direta no maciço foi projetado não apenas para destinar os volumes hídricos massivos provenientes do desaguamento (*dewatering*) contínuo das cavas, mas também para atenuar o avanço espacial do cone de rebaixamento, protegendo ecossistemas úmidos adjacentes de relevância nacional, a exemplo do Fortescue Marsh. Adicionalmente, Windsor *et al* (2012) ressaltam o emprego de válvulas de fundo de poço (*down-hole valves*) na infraestrutura hidrogeológica. Esses aparatos técnicos são utilizados para regular a contrapressão e controlar o fluxo da água durante a injeção, prevenindo o escoamento em cascata e a subsequente entrada e aprisionamento de ar na matriz, o que mitiga problemas mecânicos e de colmatção na formação aquífera.

Apesar dos benefícios, a reinjeção também apresenta desafios hidrodinâmicos importantes, principalmente em situações nas quais a água injetada possui salinidade diferente da água subterrânea natural do aquífero. O relatório técnico desenvolvido por Rambags *et al* (2013), no âmbito do projeto europeu PREPARED, demonstra que diferenças de densidade entre água doce e água salina podem provocar fenômenos como a ascensão da água doce injetada, dificultando sua recuperação posterior. Além disso, os autores destacam que gradientes hidráulicos regionais podem induzir perdas laterais do volume armazenado, processo denominado lateral *bell drift*. A Figura 25 ilustra esse processo.

Figura 25 - Efeitos de diferença de densidade e do deslocamento lateral da água armazenada



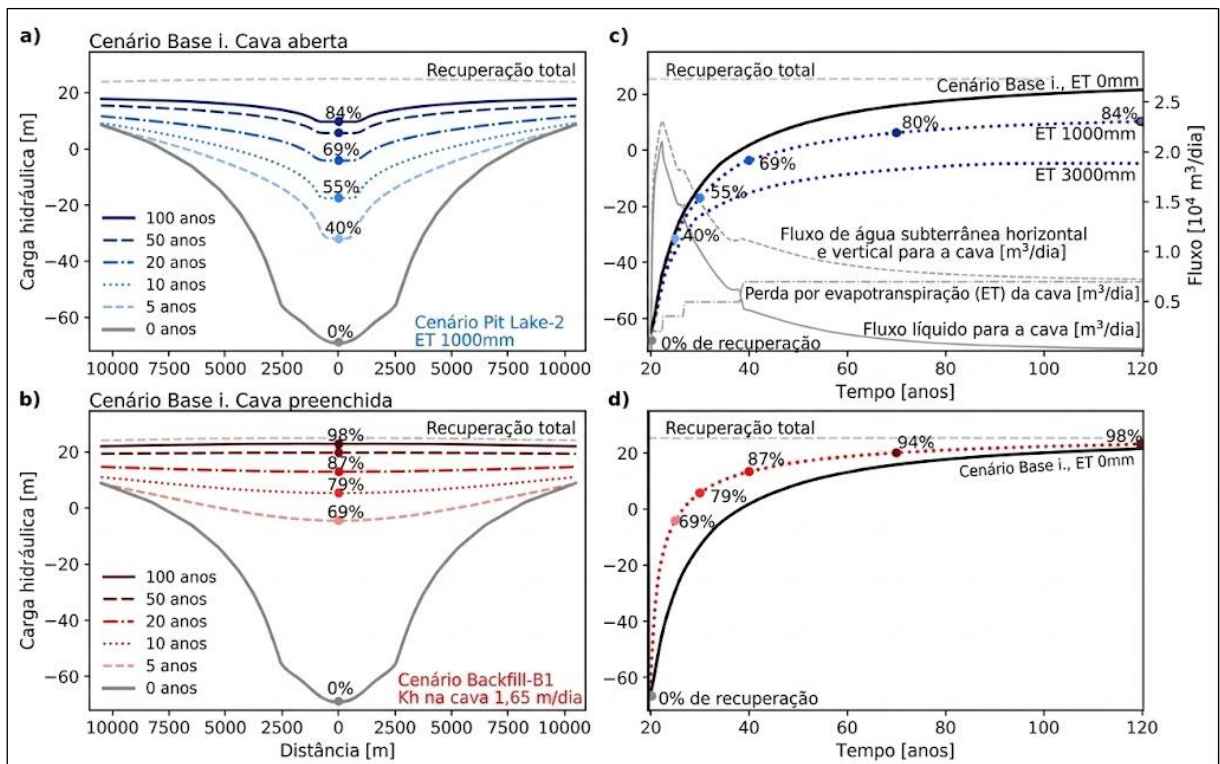
Fonte: Adaptado de Rambags *et al* (2013).

3.9.2 Recuperação Pós-Fechamento e Prevenção Ambiental

Com o encerramento das atividades minerárias e a paralisação dos sistemas de rebaixamento (*dewatering*), inicia-se a recuperação gradual do nível freático, processo conhecido como rebote hídrico. Segundo Bozan *et al* (2022), a velocidade dessa recuperação depende principalmente das características hidrodinâmicas do aquífero e das estratégias adotadas no fechamento da mina (FIG.26). Os autores demonstram que o preenchimento da cava favorece significativamente o rebote hídrico, permitindo que aquíferos de transmissividade moderada recuperem mais de 70% da superfície potenciométrica original já na primeira década após o fechamento. Em contrapartida, quando a cava permanece aberta e evolui para um *pit lake*, formação de um lago, a evaporação contínua passa a atuar como um dreno permanente, retardando a recuperação do nível d'água e podendo manter o sistema rebaixado por períodos muito longos, principalmente em regiões áridas. Os painéis (a) e (b) ilustram uma seção transversal Leste-Oeste de 20 km através do centro do vazio da mina, comparando as condições de cava aberta (com evaporação líquida de 1.000 mm/ano) e cava preenchida (backfill com condutividade hidráulica de 1,65 m/dia), indicando as porcentagens

de recuperação aos 0, 5, 20, 50 e 100 anos. Os painéis (c) e (d) detalham a evolução temporal da recuperação da água sob condições de cava aberta, submetida a diferentes taxas de evaporação, e sob condições de cava preenchida, respectivamente, incluindo também as modelagens de influxo de água subterrânea e as perdas por evaporação ao longo do tempo.

Figura 26- Perfis de recuperação dos níveis de água subterrânea pós-mineração

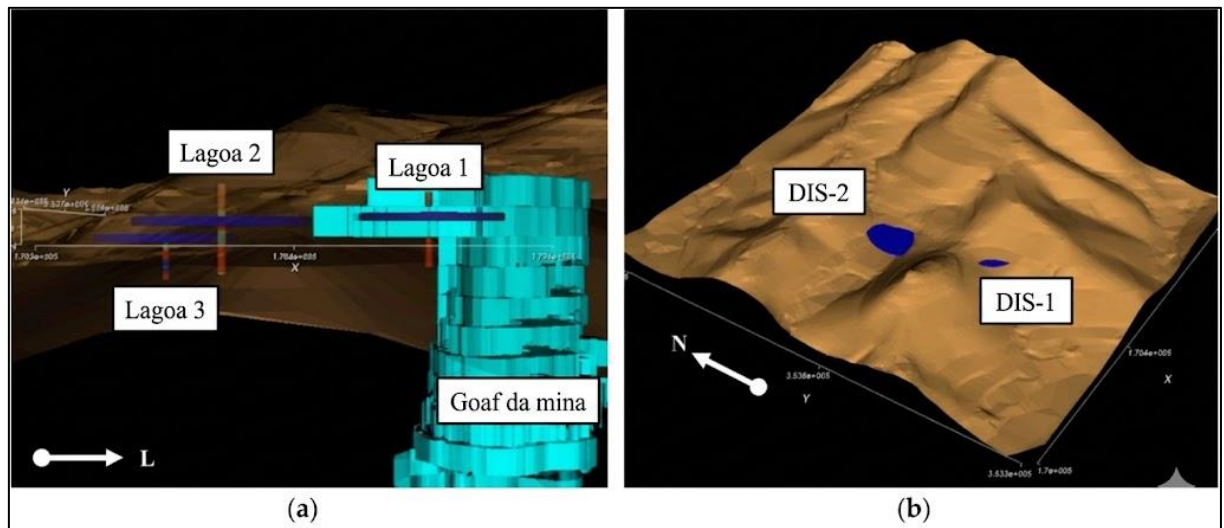


Fonte: Adaptado de Bozan *et al* (2022).

Em minas com extensa infraestrutura subterrânea, o monitoramento do rebote hídrico também é essencial para prevenir a surgência de contaminantes para a superfície (FIG.27). Kim *et al* (2018) utilizaram modelagem hidrogeológica e ferramentas de visualização tridimensional na mina de cobre de Dalsung, na Coreia do Sul, para prever a recuperação do aquífero e identificar áreas de risco. Os resultados indicaram que a elevação do nível freático poderia interceptar galerias antigas e favorecer a descarga de águas contaminadas por drenagem ácida de mina (DAM) em nascentes e pilhas de estéril próximas à superfície, principalmente nas cotas de 190 m e 210 m. Dessa forma, os autores ressaltam a necessidade de implementar sistemas preventivos de captação e isolamento dessas rotas preferenciais antes que o rebote hídrico alcance a superfície.

Figura 27- Representação espacial da relação entre a recuperação do nível freático, as galerias

subterrâneas da mina e os pontos potenciais de surgência de água contaminada



Fonte: Adaptado de Kim *et al* (2018).

3.9.3 Monitoramento Contínuo e Gestão Adaptativa

A eficácia das medidas de mitigação aplicadas no rebaixamento de cavas não depende apenas da implantação inicial do sistema, mas também do acompanhamento contínuo das condições hidrogeológicas ao longo da operação. Nesse contexto, o monitoramento de campo passa a ser fundamental para avaliar a resposta do aquífero e ajustar as estratégias adotadas. Suescun *et al* (2025) destacam que a definição da quantidade de piezômetros, da distribuição espacial e do tempo de monitoramento deve considerar diretamente as características hidrodinâmicas do aquífero. Em meios com diferentes níveis de transmissividade, por exemplo, a recuperação do lençol freático ocorre de maneiras distintas, exigindo redes de monitoramento específicas para representar adequadamente o comportamento hidráulico do sistema.

Além disso, o monitoramento contínuo fornece a base para a chamada gestão adaptativa, em que os modelos hidrogeológicos e as medidas de mitigação são constantemente atualizados a partir dos novos dados obtidos em campo. Garrick *et al* (2016) demonstram a aplicação dessa abordagem no estudo da Instalação Integrada de Resíduos de Mineração (IMWF), na mina de Krumovgrad, na Bulgária. Nesse caso, os autores utilizaram modelagens probabilísticas com simulações de Monte Carlo para avaliar o desempenho do sistema de controle de contaminantes ao longo de 1.000 anos. O estudo evidencia que projetos de engenharia voltados para mitigação hidrogeológica não podem ser tratados como estruturas fixas, mas sim como sistemas que precisam ser continuamente revisados e ajustados conforme novas informações hidrológicas e climáticas são incorporadas ao gerenciamento da mina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos Estudos Seleccionados.

Os trabalhos evidenciam que os impactos associados ao rebaixamento não se restringem à alteração dos níveis d'água subterrânea, mas também envolvem interferências em cursos d'água, nascentes, ecossistemas dependentes de água subterrânea, qualidade da água, estabilidade geotécnica e disponibilidade hídrica. As estratégias de mitigação identificadas variam conforme o contexto analisado, abrangendo medidas de recarga, reinjeção, reinfiltração, aproveitamento da água de *dewatering*, controle operacional, intervenções físicas, fechamento de mina, modelagem e monitoramento.

A Tabela 1 apresenta uma síntese inicial dos estudos, destacando o ano e autoria, a estratégia de mitigação identificada, a análise geral da aplicação, as propostas de melhoria indicadas ou inferidas e a discussão técnica associada a cada caso.

Tabela 1 - Análise geral dos estudos seleccionados

<i>Ano/Autor</i>	<i>Estratégia de mitigação</i>	<i>Análise Geral</i>	<i>Proposta de melhoria</i>	<i>Discussão</i>
1999 – <i>Amorim et al.</i>	Gestão compensatória do <i>dewatering</i> integrada ao abastecimento urbano.	Compatibilidade entre o rebaixamento de cavas e a conservação hídrica	Uso do efluente bombeado excedente para regularizar o suprimento de água municipal.	O impacto nas nascentes é mitigado, convertendo a água drenada da mina em capital ambiental.
2026 – <i>Ataie-Ashtiani</i>	Modelagem em camadas para MAR com injeção dividida.	Acelera a recuperação hídrica em aquíferos estratificados.	Ajustar raio e alocação de injeção para evitar <i>mounding</i> .	Evita superestimar o tempo de fechamento da cava.
2016 – <i>Baquero et al.</i>	Drenagem e reinjeção perimetral acopladas à osmose reversa.	Intercepta o fluxo pré-cava e controla o cone de rebaixamento.	Controle operacional via telemetria (SCADA) e descolmatação preventiva de poços.	Viabiliza a lavra e melhora a qualidade química natural do aquífero regional.
2008 – <i>Bittencourt et al.</i>	Rebaixamento gradual e rede de monitoramento estratégico.	O rebaixamento controlado reduziu a formação de dolinas.	Gestão de águas superficiais e caracterização de riscos.	Garante a segurança operacional da lavra em aquíferos cársticos.
2022 – <i>Bozan et al.</i>	Preenchimento de cavas (<i>backfill</i>) e inundação rápida.	Acelera a recuperação hídrica no pós-fechamento.	Preencher a cava acima do nível do lençol freático.	Evita a formação de sumidouros permanentes por evaporação.

<i>Ano/Autor</i>	<i>Estratégia de mitigação</i>	<i>Análise Geral</i>	<i>Proposta de melhoria</i>	<i>Discussão</i>
2010 – <i>Bucher et al.</i>	Reinfiltração associada ao monitoramento hidrogeológico.	Compensa o rebaixamento e protege áreas úmidas.	Ajustar a reinfiltração com base em monitoramento contínuo.	Reduz impactos sobre cursos d'água, abastecimento e ecossistemas.
2022 – <i>Cook et al.</i>	Reinjeção da água do <i>dewatering</i> (MAR) a distâncias otimizadas.	Acelera a recuperação do lençol freático após o fechamento da mina.	Modelagem para definir a distância ideal de injeção, evitando o rebombeamento.	Reduz o cone de rebaixamento de longo prazo e mitiga impactos pós-fechamento.
2017 – <i>Currell et al.</i>	Avaliação de impacto rigorosa (EIA) e planejamento prévio de mitigação.	A falta de dados hidrogeológicos estruturais gera incertezas críticas para ecossistemas.	Coletar dados robustos e definir a mitigação antes da aprovação ambiental.	Critica gatilhos de rebaixamento tardios e defende maior integração entre ciência e regulação.
2018 – <i>Dahlke et al.</i>	Recarga usando fluxos de inundação	Repõe aquíferos, mitiga subsidência e controla intrusão salina.	Adequar legislação de águas e mapear solos adequados (SAGBI).	Estratégia econômica para secas, porém exige controle de qualidade hídrica.
2019 – <i>Dillon et al.</i>	Aplicação global de MAR (múltiplas técnicas).	expansão global da técnica ainda é inferior ao ritmo de esgotamento dos aquíferos.	Padronizar diretrizes regulatórias, documentar custos e prever a colmatação.	A recarga é indispensável para garantir segurança hídrica e resiliência climática global.
2022 – <i>Du et al.</i>	Monitoramento 3D automático e armazenamento subterrâneo.	Quantifica o rebaixamento e confirma a drenagem como impacto principal.	Reduzir bombeamento excessivo e reciclar efluentes na operação.	Promove a mineração verde e protege aquíferos em zonas áridas.
2023 – <i>Ferreira</i>	Tamponamento de sumidouros e impermeabilização.	Tamponamento reduz perda hídrica em 47,7%.	Testes de campo e monitoramento de poços.	Impermeabilização expande o cone de rebaixamento.
2021 – <i>Figueiredo</i>	Proteção de áreas de recarga e gestão de bacias.	Conflito entre rebaixamento de cavas e abastecimento.	Estudos hidrogeológicos regionais integrados.	Risco de colapso hídrico urbano por desaguamento
2005 – <i>Gale</i>	Múltiplas técnicas de MAR em regiões semiáridas.	Recupera aquíferos e melhora a qualidade hídrica.	Gestão integrada, controle de colmatação e engajamento local.	Assegura segurança hídrica e resiliência climática frente à escassez.
2016 – <i>Garrick et al.</i>	Modelagem probabilística e captura de águas	Avalia o risco de transporte de contaminantes a	Validar os modelos preditivos com monitoramento	Otimiza o projeto e mitiga riscos sem exigir

<i>Ano/Autor</i>	<i>Estratégia de mitigação</i>	<i>Análise Geral</i>	<i>Proposta de melhoria</i>	<i>Discussão</i>
	subterrâneas.	longo prazo.	contínuo.	revestimentos totais.
2018 – <i>Kim e Choi</i>	Programa SIMPL para previsão do rebote hídrico subterrâneo em cavas.	Modela a recuperação de aquíferos para evitar drenagem ácida de mina.	Adicionar módulos geoquímicos e instalar mais instrumentos de monitoramento.	Otimiza a tomada de decisão no planejamento do fechamento de minas.
2010 – <i>Maliva</i>	Análise custo-benefício (CBA) para MAR.	Viável em usos de alto valor econômico.	Incorporar riscos e incertezas nos modelos.	Escassez de dados financeiros restringe a técnica.
2020 – <i>Meredith et al</i>	Preenchimento de cavas e monitoramento de longo prazo.	Recuperação hídrica acompanhada de elevação inicial da salinidade.	Otimizar lagoas de infiltração e tamponar furos exploratórios.	Dados contínuos são essenciais para fundamentar os modelos de recuperação.
2024 – <i>Miguel e Campos</i>	<i>Dewatering</i> com destinação para abastecimento público.	Viabiliza a lavra e supre a demanda hídrica urbana.	Recarga gerenciada e monitoramento geoquímico.	A mineração atua como fornecedora hídrica frente à expansão urbana.
2024 – <i>Moser et al.</i>	Modelagem preditiva e manejo hidrológico de cavas.	Cavas viram sistemas de fluxo antes da recuperação hídrica total.	Desenvolver modelos hidrogeológicos locais específicos.	A previsão hidrológica evita a contaminação de aquíferos a jusante.
2021 – <i>Rózkowski et al.</i>	Recirculação da água bombeada para cava inundada.	Reduz efeitos ambientais do rebaixamento regional.	Avaliar cenários por modelagem numérica antes da implantação.	Aproveita cavas exauridas como reservatórios de
2023 – <i>Sloan et al</i>	Bacias e poços de injeção.	Gerencia excedentes hídricos e mitiga rebaixamento.	Planejamento prévio e compartilhamento de dados.	Preserva aquíferos e acelera recuperação hídrica.
2014 – <i>Smith</i>	Recarga gerenciada (MAR) para gerir excedente hídrico e monitoramento de colmatação.	A recarga atenua o rebaixamento, mas a colmatação reduz a eficiência da injeção.	Manutenção preventiva de poços e padronização de testes de bombeamento.	Método sustentável para descarte hídrico em operações abaixo do lençol freático.
2025 – <i>Suescun et al</i>	Otimização do monitoramento pós-fechamento.	Reduz incertezas na previsão de recuperação hídrica.	Posicionar poços conforme distância e tempo de resposta.	Melhora a previsão da recuperação do aquífero após a lavra.

Fonte: Próprio Autor (2026).

A análise dos estudos selecionados mostra que as estratégias de mitigação relacionadas ao rebaixamento do nível freático em áreas de mineração variam conforme as condições

hidrogeológicas locais, o método de lavra, o volume de água bombeada e os impactos ambientais associados.

Entre as abordagens levantadas, destacam-se as estratégias baseadas em Recarga Gerenciada de Aquíferos, reinjeção e recirculação da água proveniente do *dewatering*. Essas alternativas aparecem com maior frequência em estudos nos quais o volume bombeado supera a demanda operacional da mina. Nesses casos, a água retirada do aquífero passa a ser tratada não apenas como um excedente a ser descartado, mas como um recurso que pode ser reaproveitado para reduzir desequilíbrios no sistema hidrogeológico. Sua aplicação pode contribuir para a recomposição parcial do balanço hídrico, para a manutenção dos níveis piezométricos e para a diminuição de impactos sobre corpos d'água, nascentes, áreas úmidas e usuários dependentes dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais.

Além das medidas diretamente associadas à reposição ou ao controle da água subterrânea, os estudos também apresentam estratégias de apoio à tomada de decisão, como a modelagem numérica, o monitoramento hidrogeológico contínuo e a avaliação de cenários. Embora essas ferramentas não promovam, por si só, a recuperação dos níveis aquíferos, elas são essenciais para compreender a evolução do cone de rebaixamento, ajustar taxas de bombeamento ou reinjeção, estimar riscos operacionais e subsidiar a escolha da alternativa mais adequada para cada contexto de lavra. Nesse sentido, a Tabela 1 não deve ser compreendida apenas como um levantamento bibliográfico dos estudos selecionados, mas como uma etapa inicial de organização e comparação das informações.

Com base nisso, os estudos selecionados mostram que, embora o rebaixamento do nível freático em áreas de mineração seja uma questão global, as pesquisas sobre mitigação concentram-se em poucos contextos regionais. Dos trabalhos avaliados, 4 possuem caráter global ou teórico, enquanto 20 correspondem a estudos de caso, com destaque para a Austrália, com 6 estudos, e o Brasil, com 5 estudos.

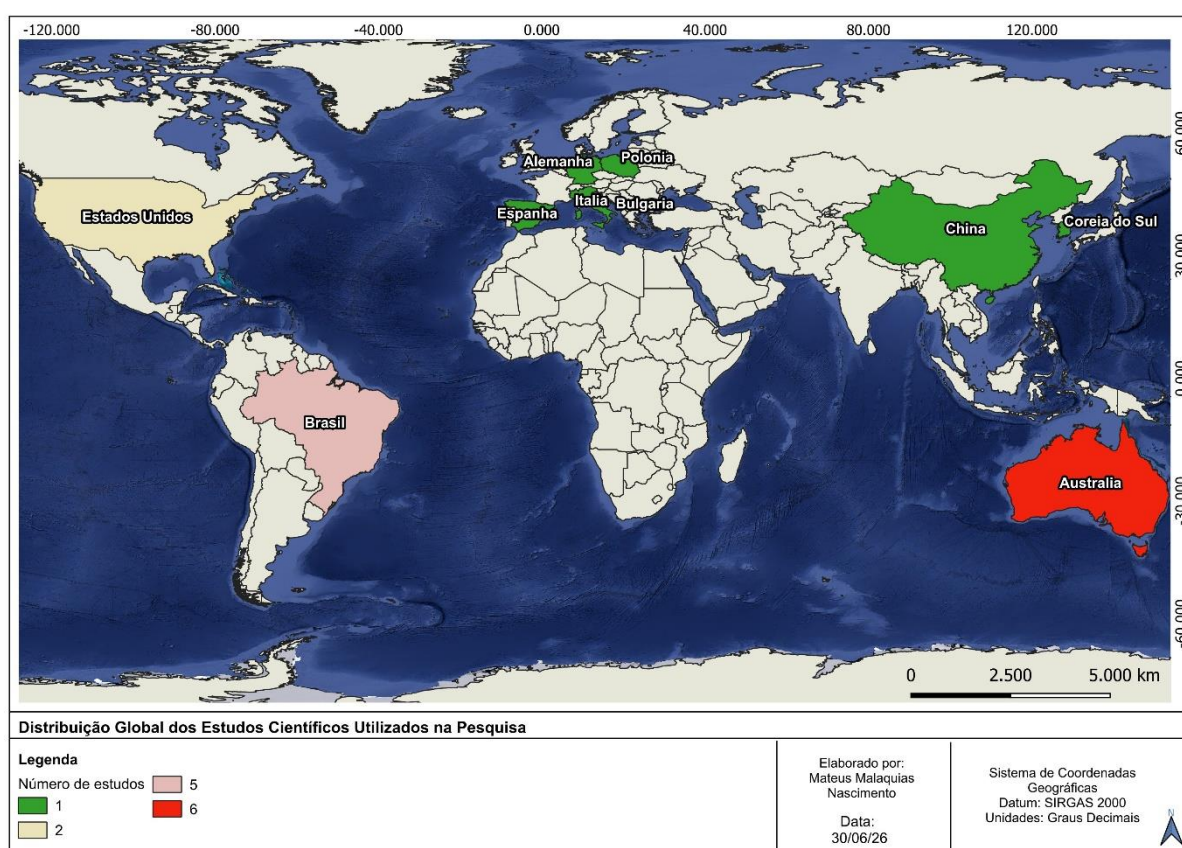
Na Austrália, a concentração dos estudos está relacionada principalmente à mineração de minério de ferro na região de Pilbara, em ambientes áridos e semiáridos. Nessas áreas, o *dewatering* gera grandes volumes de água excedente, ao mesmo tempo em que a água subterrânea representa um recurso estratégico. Por isso, as estratégias mais discutidas envolvem Recarga Gerenciada de Aquíferos, reinjeção profunda e armazenamento subterrâneo, visando reduzir perdas por evaporação, conter o avanço do cone de rebaixamento e proteger ecossistemas sensíveis.

No Brasil, os estudos concentram-se em Minas Gerais e refletem dois cenários principais: o ambiente cárstico de Vazante, onde o rebaixamento está associado ao secamento de cursos d'água e à formação de dolinas e sinkholes; e o Quadrilátero Ferrífero, onde a exploração de minério de ferro interfere em aquíferos importantes, como o Cauê, em áreas relacionadas ao abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Nesses casos, a mitigação envolve tanto a modelagem hidrogeológica e o controle de fluxos subterrâneos quanto o aproveitamento da água bombeada para usos externos à mina.

Os demais estudos, distribuídos entre Estados Unidos, Europa e países asiáticos, indicam que as estratégias de mitigação também são impulsionadas por condições de escassez hídrica, restrições regulatórias e necessidade de proteção de aquíferos, áreas úmidas, atividades agrícolas e usuários da água. De modo geral, observa-se que a produção científica avança principalmente em regiões onde a mineração entra em conflito direto com a disponibilidade hídrica, a fragilidade geológica ou a proteção ambiental.

A Figura 28 ilustra a distribuição global dos estudos que foram utilizados na pesquisa.

Figura 28: Distribuição global dos estudos incluídos no trabalho



Fonte: Próprio Autor (2026).

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos estudos, contemplando o tipo de mina, o bem

mineral, o contexto hidrogeológico, os principais impactos identificados e as estratégias de mitigação propostas ou implementadas. Essa organização não tem apenas caráter descritivo, mas constitui a primeira etapa da análise comparativa, uma vez que permite reconhecer padrões de aplicação, limitações recorrentes e condições hidrogeológicas associadas a cada estratégia.

Tabela 2 - Comparação dos estudos selecionados

<i>Autor/ano</i>	<i>Tipo de mina</i>	<i>Bem mineral</i>	<i>Tipo de aquífero/contexto hidrogeológico</i>	<i>Impacto identificado</i>	<i>Estratégia de mitigação</i>
<i>Ataie Ashtiani (2026)</i>	Mina a céu aberto, modelo conceitual	Não especificado	Sistema estratificado com aquífero livre, aquífero confinado	Recuperação lenta pós-fechamento, mounding e recirculação da água injetada	MAR por reinjeção em anel, com alocação entre aquífero livre e confinado
<i>Suescun et al. (2025)</i>	Mina a céu aberto, modelo sintético	Ferro	Aquífero livre sedimentar, com cenários de barreira hidráulica e rio conectado	Recuperação lenta e incerta do nível d'água após o fechamento	Otimização da rede de monitoramento para reduzir incertezas na previsão de recuperação
<i>Baquero et al. (2016)</i>	Mina a céu aberto	Cobre	Aquífero Niebla-Posadas, poroso e confinado sob camada de margas	Interceptação do aquífero pela cava, rebaixamento e risco ao balanço hídrico	Sistema de drenagem e reinjeção com tratamento por osmose reversa
<i>Cook et al. (2022)</i>	Mina a céu aberto, modelo conceitual	Não especificado	Aquífero livre homogêneo em modelo radial simplificado	Rebaixamento regional e recuperação lenta após o fechamento	MAR por reinjeção em distância ótima em relação à cava
<i>Dillon et al. / estudo conceitual de MAR</i>	Não se aplica diretamente à mineração	Não se aplica	Aquíferos livres e multicamadas em contexto de declínio piezométrico	Depleção hídrica e redução da disponibilidade subterrânea	MAR por bacias de infiltração e poços de recarga
<i>Sloan et al. (2023)</i>	Revisão global com 27 minas	Diversos	Aquíferos aluviais, livres, confinados, fraturados, dolomíticos/cársticos e calcretes	Excedente de água de dewatering, cone de rebaixamento e impacto em usuários/ecossistemas	MAR em mineração por bacias de infiltração, poços de injeção, monitoramento e modelagem
<i>Du et al. (2022)</i>	Mina a céu aberto	Carvão	Aquífero quaternário freático e aquífero associado à camada de carvão	Rebaixamento do nível d'água, cone de depressão e distúrbio em raio de até 8 km	Rede automática tridimensional de monitoramento

<i>Autor/ano</i>	<i>Tipo de mina</i>	<i>Bem mineral</i>	<i>Tipo de aquífero/contexto hidrogeológico</i>	<i>Impacto identificado</i>	<i>Estratégia de mitigação</i>
<i>Currell et al. (2017)</i>	Mina a céu aberto e subterrânea	Carvão	Sistema sedimentar da Bacia Galilee, com possível controle por falhas e conexão com nascentes	Risco de impacto em nascentes e ecossistemas dependentes de água subterrânea	e gestão da drenagem Modelagem conceitual robusta, monitoramento e gestão adaptativa prévia
<i>Dahlke et al. (2018)</i>	Não se aplica diretamente à mineração	Não se aplica	Aquíferos porosos em bacias urbanas, agrícolas e costeiras da Califórnia	Depleção de aquíferos, intrusão salina e insegurança hídrica	Recarga gerenciada por bacias de infiltração, poços de injeção e ag-MAR
<i>Garrick et al. (2016)</i>	Instalação de resíduos de mineração	Ouro	Aquífero fraturado e aquífero aluvial sensível a jusante	Risco de contaminação de águas subterrâneas e superficiais no fechamento	Modelagem probabilística, sistema de captura subterrânea, liner e cobertura
<i>Bittencourt et al. (2008)</i>	Mina subterrânea	Zinco	Aquífero cárstico em dolomitos fraturados	Rebaixamento acelerado, subsidência, dolinas e sinkholes	Rebaixamento controlado, monitoramento hidrogeológico e gestão operacional
<i>Bozan et al. (2022)</i>	Mina a céu aberto, modelo sintético	Ferro, por analogia ao Pilbara	Aquífero livre em contexto semiárido, com diferentes transmissividades	Recuperação lenta do nível freático e formação de lago de cava	Backfill, enchimento rápido da cava e avaliação de cenários pós-fechamento
<i>Amorim et al. (1999)</i>	Mina a céu aberto	Ferro	Aquífero Cauê, associado à Formação Cauê, em área de recarga do Quadrilátero Ferrífero	Possível redução de vazões em nascentes e interferência no abastecimento de Belo Horizonte	Gestão compensatória da água de desaguamento e redistribuição ao abastecimento urbano
<i>Kim e Choi (2018)</i>	Minas subterrâneas abandonadas	Carvão, cobre e tungstênio	Sistema subterrâneo artificializado, com galerias, shafts, goafs e conexões hidráulicas	Recuperação do nível d'água após o fechamento, com risco de drenagem ácida	Modelagem simplificada do rebound com o programa SIMPL e visualização 3D
<i>Maliva (2010)</i>	Não se aplica	Não se aplica	Aquíferos utilizados para	Déficit hídrico, depleção de	Avaliação econômica de

<i>Autor/ano</i>	<i>Tipo de mina</i>	<i>Bem mineral</i>	<i>Tipo de aquífero/contexto hidrogeológico</i>	<i>Impacto identificado</i>	<i>Estratégia de mitigação</i>
Ferreira (2023)	diretamente à mineração		armazenamento e tratamento por MAR	aquíferos, intrusão salina e subsidência	MAR por análise custo-benefício
	Mina subterrânea	Zinco	Aquífero fissural-cárstico em dolomitos fraturados, conectado ao Rio Santa Catarina	Secamento do Rio Santa Catarina, inversão de gradiente, subsidência e conexão por condutos	Modelagem numérica de cenários mitigadores: adução, impermeabilização e tamponamento
Figueiredo (2021)	Contexto regional de mineração	Ferro	Aquífero Cauê no Quadrilátero Ferrífero/Quadrilátero Aquífero	Conflito entre mineração, abastecimento público e segurança hídrica da RMBH	Gestão preventiva e integrada do Aquífero Cauê
Gale (2005)	Não se aplica diretamente à mineração	Não se aplica	Aquíferos de regiões semiáridas: aluviais, fraturados, areníticos e carbonáticos	Escassez hídrica, depleção de aquíferos e baixa segurança de abastecimento	Estratégias de MAR: bacias de infiltração, barragens, poços, shafts e recarga por canais
Miguel e Campos (2024)	Mina a céu aberto	Ferro	Sistema aquífero misto, com porosidade intergranular em solos/saprolitos e porosidade secundária em rochas fraturadas	Conflito entre mineração, expansão urbana e recursos hídricos subterrâneos em Capão Xavier	Aproveitamento da água de rebaixamento no abastecimento público e avaliação hidrodinâmica dos aquíferos
Moser et al. (2024)	Mina a céu aberto, modelo conceitual	Não especificado	Sistema aquífero associado a lagos de cava em regiões áridas e semiáridas	Evolução de lago de cava como sumidouro terminal ou sistema de fluxo passante, com risco à qualidade da água	Modelagem preditiva para definição do comportamento hidráulico de lagos de cava pós-fechamento
Bucher et al. (2010)	Mina a céu aberto	Carvão	Sistema aquífero regional afetado por depressão piezométrica extensa	Rebaixamento superior a dezenas de quilômetros, com risco a poços, cursos d'água e áreas úmidas	Reinfiltração da água bombeada associada a monitoramento hidrogeológico, hidrológico e ecológico
Rózkowski et al. (2021)	Mina a céu aberto	Agregados/rocha para construção	Sistema aquífero afetado por cavas adjacentes e cava exaurida inundada	Cone de rebaixamento e alteração do campo	Recirculação da água bombeada para cava exaurida/inundada

<i>Autor/ano</i>	<i>Tipo de mina</i>	<i>Bem mineral</i>	<i>Tipo de aquífero/contexto hidrogeológico</i>	<i>Impacto identificado</i>	<i>Estratégia de mitigação</i>
Smith (2014)	Mina a céu aberto	Ferro	Aquífero mineralizado de minério de ferro e aquífero regional dolomítico/cárstico no Pilbara	hidrodinâmico pela drenagem da nova cava Excedente hídrico de dewatering, mounding e perda de desempenho por colmatção	ada, com apoio de modelagem numérica MAR por injeção de água excedente, com diagnóstico de colmatção física, química e biológica
Meredith et al.	Mina a céu aberto e produção de metano em camada de carvão	Carvão	Aquíferos em camadas de carvão e aquíferos de estéril/rejeito reconstruídos após lavra	Rebaixamento piezométrico, alteração da qualidade da água, salinidade e recuperação lenta	Recuperação hidrológica por recomposição de aquíferos de estéril, monitoramento de longo prazo e critérios de fechamento

Fonte: Próprio Autor (2026).

4.2 Análise Comparativa das Estratégias Aplicadas ao Contexto Minerário

A análise dos 24 estudos selecionados permitiu identificar diferentes estratégias de mitigação aplicadas ao rebaixamento do nível freático em mineração. Essas estratégias apresentam mecanismos de atuação distintos, abrangendo medidas de recarga direta ou indireta do aquífero, aproveitamento compensatório da água de *dewatering*, controle operacional em aquíferos complexos, intervenções físicas em zonas preferenciais de fluxo, ações voltadas ao fechamento de mina e ferramentas de modelagem, monitoramento e gestão adaptativa.

A Tabela 3 apresenta o agrupamento das estratégias aplicadas ou discutidas nos estudos selecionados, destacando os principais trabalhos associados, a função de cada grupo estratégico e suas limitações técnicas mais recorrentes.

Tabela 3 - Estudos reorganizados por grupos de estratégias

<i>Grupo de estratégia</i>	<i>Estratégias incluídas</i>	<i>Estudos associados</i>	<i>Função principal</i>	<i>Limitações principais</i>
<i>Recarga/reinjeção</i>	Poços de injeção, MAR, ASR, reinjeção perimetral	Baquero, Smith, Sloan, Cook, Ataie	Repor água ao aquífero e reduzir efeitos do rebaixamento	Colmatção, mounding, tratamento da água
<i>Infiltração/reinfiltração</i>	Bacias, estruturas de infiltração, reinfiltração artificial	Bucher, Sloan, Gale, Dahlke	Compensar impactos em áreas úmidas,	Área disponível, qualidade da

<i>Grupo de estratégia</i>	<i>Estratégias incluídas</i>	<i>Estudos associados</i>	<i>Função principal</i>	<i>Limitações principais</i>
<i>Gestão compensatória da água</i>	Uso da água bombeada para abastecimento ou compensação hídrica	Amorim, Miguel e Campos	aquíferos e corpos hídricos Converter água de dewatering em recurso hídrico	água, controle operacional Depende de qualidade, infraestrutura e demanda
<i>Modelagem e monitoramento</i>	Modelagem numérica, redes de monitoramento, análise de incerteza	Suescun, Du, Currell, Bozan, Moser	Prever impactos e orientar decisões	Não mitiga sozinha; depende de dados robustos
<i>Fechamento e recuperação</i>	Backfill, enchimento de cava, lagos de cava	Bozan, Moser, Kim e Choi	Acelerar recuperação pós-fechamento e controlar passivos	Custo, tempo, qualidade da água e estabilidade
<i>Controle em aquíferos cársticos/fraturados</i>	Tamponamento, impermeabilização, rebaixamento controlado	Bittencourt, Ferreira	Reduzir perda de água, subsidência e fluxo preferencial	Alta incerteza estrutural e risco geotécnico

Fonte: Próprio Autor (2026).

Nos casos de Cobre Las Cruces e Mining Area C, a reinjeção por poços aparece associada ao aproveitamento da água proveniente do *dewatering*, porém com finalidades distintas dentro da gestão hídrica em mineração. Em Cobre Las Cruces, a estratégia é orientada ao controle hidráulico do aquífero e à limitação da propagação do cone de rebaixamento; em Mining Area C, o foco recai sobre o manejo do excedente hídrico e sobre a avaliação do desempenho operacional dos poços de injeção.

Essa diferença indica que a reinjeção por poços não deve ser entendida apenas como uma forma de disposição da água bombeada, mas como uma estratégia de mitigação dependente da resposta do aquífero receptor. Quando associada ao tratamento da água, ao controle piezométrico e ao monitoramento contínuo, a técnica pode contribuir para a recomposição parcial do balanço hídrico subterrâneo e para a redução dos impactos do rebaixamento. Entretanto, sua aplicação apresenta limitações importantes, especialmente relacionadas à compatibilidade hidroquímica, ao controle de sólidos, à colmatação, ao risco de *mounding*, à recirculação da água injetada e à manutenção da eficiência dos poços.

Percebe-se, desse modo, que a reinjeção por poços apresenta alto potencial de mitigação em contextos com disponibilidade de água bombeada e aquíferos com boa capacidade de armazenamento e transmissão. Na análise multicritério, essa estratégia tende a receber

avaliação positiva quanto à eficiência hidrogeológica e ao benefício ambiental, mas deve ser ponderada por sua elevada complexidade operacional, custo de implantação e operação, necessidade de tratamento prévio e risco técnico associado à perda de desempenho do sistema.

No caso de Garzweiler e nos estudos de MAR aplicados à mineração, a reinfiltração e as bacias de infiltração aparecem principalmente como medidas de compensação hidráulica regional. Diferentemente da reinjeção por poços, que conduz a água diretamente ao aquífero receptor, a reinfiltração depende da disponibilidade de área superficial, da capacidade de infiltração do terreno e da conexão hidráulica entre a zona de recarga e os sistemas aquíferos impactados.

Essas estratégias são mais adequadas quando há excedente hídrico proveniente do *dewatering* e necessidade de reduzir impactos sobre áreas sensíveis, como poços de abastecimento, cursos d'água e ecossistemas dependentes de água subterrânea. Sua efetividade, entretanto, não depende apenas do volume infiltrado, mas da integração entre estruturas de infiltração, controle da qualidade da água, tratamento prévio, quando necessário, e monitoramento contínuo da resposta piezométrica, da água superficial e da vegetação.

Nesse contexto, a reinfiltração e as bacias de infiltração apresentam bom potencial de mitigação em áreas com disponibilidade espacial, aquíferos receptores favoráveis e condições adequadas de infiltração. Na análise multicritério, essa estratégia tende a ser bem avaliada quanto ao benefício ambiental e à menor complexidade construtiva em relação aos poços de injeção, mas deve ser ponderada por limitações associadas à demanda de área, risco de *mounding*, colmatção das estruturas, variação da taxa de infiltração e necessidade de monitoramento permanente.

Nos estudos desenvolvidos na Mina de Vazante, as estratégias aplicadas a aquíferos cársticos/fraturados indicam que a mitigação nesse tipo de sistema não pode se basear apenas na reposição de água ou no controle geral do nível freático. A elevada heterogeneidade hidráulica, associada à presença de fraturas, condutos cársticos e conexões preferenciais entre água superficial e subterrânea, exige medidas voltadas ao controle dos caminhos de fluxo. Enquanto uma abordagem prioriza o controle operacional do rebaixamento e o monitoramento de efeitos como subsidência e formação de dolinas, outra avança para a simulação de intervenções físicas, como tamponamento de condutos, impermeabilização do leito do rio e adução de água a montante. Assim, em aquíferos cársticos/fraturados, as estratégias mais robustas tendem a combinar diagnóstico estrutural, monitoramento contínuo e intervenções

localizadas nos pontos de maior conectividade hidráulica. Na análise multicritério, esse grupo deve apresentar alta relevância ambiental e potencial de redução de impactos, mas também elevada complexidade técnica, maior incerteza hidrogeológica e forte dependência de dados de campo, geofísica, traçadores e modelagem numérica.

As estratégias voltadas ao fechamento de mina e à recuperação pós-lavra, discutidas por Bozan *et al.* (2022), Moser *et al.* (2024) e Kim e Choi (2018), demonstram que a mitigação dos impactos do rebaixamento não se limita à fase operacional da mina. Nesse grupo, as medidas estão associadas à recuperação do nível d'água após o encerramento das atividades, seja por meio de *backfill*, enchimento controlado de cavas, formação de lagos de cava ou previsão do *rebound* em minas subterrâneas abandonadas. Essas alternativas podem reduzir o tempo de recuperação hidrogeológica e auxiliar no controle de passivos ambientais, mas sua eficiência depende do tipo de mina, da geometria da cava ou das galerias, da transmissividade do aquífero, do clima e da qualidade da água acumulada. Dessa forma, apresentam alta relevância para o fechamento e pós-fechamento, embora tenham menor aplicabilidade imediata durante a operação da mina.

As estratégias de modelagem, monitoramento e gestão adaptativa, abordadas por Suescun *et al.* (2025), Du *et al.* (2022) e Currell *et al.* (2017), não atuam diretamente como obras de mitigação, mas são fundamentais para reduzir incertezas e orientar a tomada de decisão. O monitoramento permite acompanhar a evolução do cone de rebaixamento e a resposta dos aquíferos, enquanto a modelagem auxilia na previsão da recuperação hídrica, na avaliação de cenários e na definição de medidas preventivas. Essas estratégias funcionam como suporte técnico às demais alternativas, sendo especialmente importantes em áreas com alta incerteza hidrogeológica, presença de ecossistemas dependentes de água subterrânea ou risco de impactos não previstos. Na análise multicritério, esse grupo tende a apresentar alta importância estratégica, embora sua capacidade de mitigação direta seja limitada.

4.3 Consolidação dos Critérios para Análise Multicritérios

Os critérios consolidados permitem avaliar estratégias de naturezas distintas a partir de uma mesma estrutura analítica, incluindo medidas de recarga, aproveitamento da água de *dewatering*, controle em aquíferos cársticos/fraturados, intervenções físicas, ações de fechamento de mina e ferramentas de modelagem e monitoramento. Dessa forma, a matriz multicritério passa a reunir, de maneira padronizada, os principais fatores que condicionam a favorabilidade das alternativas no contexto minerário. Os critérios adotados são apresentados

na Tabela 4.

Tabela 4 - Apresentação dos critérios adotados

<i>Critério</i>	<i>Síntese da avaliação</i>
• <i>Eficiência hidrogeológica</i>	Avalia a capacidade da estratégia de recompor parcialmente o balanço hídrico subterrâneo ou acelerar a recuperação do nível d'água.
• <i>Benefício ambiental</i>	Avalia o potencial de redução dos impactos sobre nascentes, cursos d'água, áreas úmidas, aquíferos, ecossistemas dependentes de água subterrânea e usuários da água.
• <i>Aplicabilidade ao contexto mineral</i>	Avalia a adequação da estratégia às condições típicas de minas em operação, fechamento ou pós-fechamento.
• <i>Viabilidade técnico-operacional</i>	Avalia a facilidade relativa de implantação, operação, manutenção, controle e infraestrutura necessária para a aplicação da estratégia.
• <i>Menor risco técnico</i>	Avalia a menor tendência da estratégia a apresentar limitações como colmatção, <i>mounding</i> , recirculação, instabilidade, baixa eficiência ou elevada incerteza hidrogeológica.
• <i>Maturidade da aplicação</i>	Avalia o grau de consolidação da estratégia na literatura, considerando estudos de caso, aplicações reais, revisões técnicas e modelagens.

Fonte: Próprio Autor (2026).

A Tabela 5 leva em consideração os subcritérios utilizados no contexto da eficiência hidrogeológica.

Tabela 5 - Subcritérios analisados para Eficiência Hidrogeológica

<i>Subcritérios considerados – Eficiência Hidrogeológica</i>	<i>O que observar na estratégia</i>
○ <i>Tipo de aquífero</i>	Se a estratégia é compatível com aquífero poroso, fraturado, cárstico, livre, confinado ou multicamadas.
○ <i>Transmissividade/condutividade hidráulica</i>	Se o aquífero consegue receber e transmitir a água sem gerar baixa eficiência, acúmulo excessivo ou resposta limitada.
○ <i>Armazenamento</i>	Se o sistema tem capacidade de armazenar a água reinjetada, infiltrada ou recirculada.
○ <i>Conectividade hidráulica</i>	Se existe conexão adequada entre o ponto de intervenção e a área impactada pelo rebaixamento.
○ <i>Resposta piezométrica esperada</i>	Se a estratégia tende a elevar níveis d'água, reduzir drawdown, conter o cone ou acelerar a recuperação pós-fechamento.
○ <i>Compatibilidade com o método</i>	Se a técnica escolhida é adequada ao problema: reinjeção, infiltração, backfill, tamponamento, modelagem etc.
○ <i>Risco de efeito contrário</i>	Se pode gerar <i>mounding</i> , recirculação para a cava, perda de eficiência ou redistribuição indesejada do fluxo.

Fonte: Próprio Autor (2026).

O benefício ambiental foi consolidado como critério de avaliação devido à recorrência de impactos associados ao rebaixamento do nível freático sobre o meio físico e biótico. Nos estudos analisados, esses impactos não se restringem ao aquífero, mas envolvem também redução de vazões em cursos d'água, interferência em nascentes, áreas úmidas, ecossistemas dependentes de água subterrânea e usuários da água. Dessa forma, esse critério representa a importância de considerar a capacidade das estratégias em reduzir efeitos ambientais associados à alteração dos níveis d'água subterrânea.

A Tabela 6 consolida os subcritérios considerados em relação aos benefícios ambientais.

Tabela 6 - Subcritérios considerados para o Benefício Ambiental

<i>Subcritérios considerados – Benefício Ambiental</i>	<i>O que observar na estratégia</i>
○ <i>Proteção de cursos d'água</i>	Se a estratégia contribui para manter ou recuperar vazões em rios, córregos e drenagens impactadas pelo rebaixamento.
○ <i>Preservação de nascentes</i>	Se a medida reduz o risco de secamento, diminuição de vazão ou deslocamento das zonas de descarga subterrânea.
○ <i>Proteção de áreas úmidas e GDEs</i>	Se a estratégia ajuda a conservar áreas úmidas e ecossistemas dependentes de água subterrânea (GDEs).
○ <i>Controle da qualidade da água</i>	Se a estratégia evita ou reduz riscos de contaminação, drenagem ácida, salinização ou alteração hidroquímica.
○ <i>Redução de passivos ambientais</i>	Se a medida contribui para minimizar impactos no fechamento e pós-fechamento da mina, como lagos de cava degradados, drenagem contaminada ou recuperação lenta.
○ <i>Integração água superficial– subterrânea</i>	Se a estratégia considera e protege a conexão entre aquíferos, rios, nascentes e zonas de descarga.
○ <i>Abrangência espacial do benefício</i>	Se os efeitos positivos ficam restritos à área da mina ou se alcançam áreas externas, como bacias, usuários e ecossistemas sensíveis.

Fonte: Próprio Autor (2026).

A aplicabilidade ao contexto minerário destacou-se como critério relevante devido à variação das condições de implantação observadas nos estudos analisados. Algumas estratégias dependem diretamente da fase do empreendimento, do tipo de lavra, da disponibilidade de água de *dewatering*, da geometria da cava ou das galerias, do tipo de aquífero interceptado e das restrições operacionais da área.

Os estudos indicam que estratégias tecnicamente viáveis do ponto de vista hidrogeológico nem sempre apresentam aplicação direta ou ampla em empreendimentos minerários. Em muitos casos, sua utilização está condicionada a contextos específicos, como disponibilidade de área, infraestrutura existente, compatibilidade com a operação mineral, necessidade de tratamento da água e capacidade de adaptação às mudanças no plano de lavra ou nas vazões bombeadas.

A Tabela 7 consolida os subcritérios considerados em relação à aplicabilidade de determinada estratégia ao contexto minerário.

Tabela 7 - Subcritérios considerados para Aplicabilidade ao Contexto Minerário

<i>Subcritérios considerados – Aplicabilidade ao contexto minerário</i>	<i>O que observar na estratégia</i>
○ <i>Fase do empreendimento</i>	Se a estratégia é aplicável durante a operação, no fechamento ou apenas no pós-fechamento da mina.
○ <i>Tipo de lavra</i>	Se a alternativa é compatível com mina a céu aberto, subterrânea ou ambas.
○ <i>Disponibilidade de água de dewatering</i>	Se a estratégia depende da existência de volume excedente de água bombeada para ser aplicada.
○ <i>Geometria da cava ou das galerias</i>	Se a forma, profundidade e avanço da cava ou das galerias favorecem ou limitam a implantação da medida.
○ <i>Tipo de aquífero interceptado</i>	Se a estratégia é compatível com aquíferos porosos, fraturados, cársticos, livres, confinados ou multicamadas.
○ <i>Disponibilidade de área</i>	Se há espaço físico suficiente para implantação de bacias, estruturas de infiltração, poços, sistemas de tratamento ou áreas de backfill.
○ <i>Compatibilidade com a operação mineral</i>	Se a estratégia pode ser executada sem comprometer a segurança, o avanço da lavra, o bombeamento ou a logística da mina.
○ <i>Exigência de infraestrutura</i>	Se a alternativa requer estruturas complexas, como redes de poços, adutoras, tratamento de água, sistemas de bombeamento ou monitoramento permanente.
○ <i>Flexibilidade de adaptação</i>	Se a estratégia pode ser ajustada conforme mudanças no plano de lavra, vazões bombeadas, níveis piezométricos ou condições ambientais.

Fonte: Próprio Autor (2026).

A viabilidade técnico-operacional foi incluída para considerar as exigências práticas de implantação, operação e manutenção das estratégias. Medidas como reinjeção, reinfiltração, tamponamento de condutos ou monitoramento contínuo podem apresentar bom desempenho técnico, mas demandam infraestrutura, controle de qualidade da água, manutenção de estruturas, instrumentação e equipe especializada. Esse critério, portanto, avalia a facilidade relativa de colocar a estratégia em funcionamento e mantê-la operando adequadamente.

A Tabela 8 consolida os subcritérios utilizados em relação à viabilidade técnico-operacional.

Tabela 8 - Subcritérios considerados para análise de Viabilidade Técnico-Operacional

<i>Subcritérios considerados – Viabilidade técnico-operacional</i>	<i>O que observar na estratégia</i>
○ <i>Complexidade de implantação</i>	Se a estratégia exige obras simples ou estruturas complexas, como poços, adutoras, bacias, sistemas de tratamento ou intervenções subterrâneas.

<i>Subcritérios considerados – Viabilidade técnico-operacional</i>	<i>O que observar na estratégia</i>
○ <i>Exigência de infraestrutura</i>	Se a aplicação depende de bombas, tubulações, sistemas de controle, instrumentação, tratamento de água ou estruturas permanentes.
○ <i>Facilidade de operação</i>	Se a estratégia pode ser operada de forma relativamente simples ou se exige controle técnico contínuo e ajustes frequentes.
○ <i>Necessidade de manutenção</i>	Se a alternativa demanda limpeza, descolmatagem, reparos, substituição de estruturas ou manutenção periódica dos sistemas implantados.
○ <i>Controle da qualidade da água</i>	Se a estratégia exige tratamento prévio, controle de sólidos, compatibilidade hidroquímica ou monitoramento de parâmetros físico-químicos.
○ <i>Demanda por monitoramento</i>	Se a medida depende de acompanhamento contínuo de níveis d'água, vazões, qualidade da água, pressão, vegetação ou resposta do aquífero.
○ <i>Necessidade de equipe especializada</i>	Se a estratégia exige profissionais com experiência em hidrogeologia, operação de sistemas de bombeamento, modelagem, geotecnia ou tratamento de água.
○ <i>Compatibilidade com a rotina da mina</i>	Se a estratégia pode ser integrada à operação mineral sem interferir de forma significativa na lavra, segurança, logística ou produção.
○ <i>Sensibilidade a falhas operacionais</i>	Se pequenas falhas de operação podem comprometer rapidamente a eficiência da estratégia.
○ <i>Facilidade de ajuste operacional</i>	Se a estratégia permite adaptações conforme variações na vazão bombeada, no nível d'água, no avanço da lavra ou nas condições ambientais.

Fonte: Próprio Autor (2026).

O critério de menor risco técnico foi incorporado porque diversas estratégias apresentam limitações que podem comprometer sua eficiência ao longo do tempo. Entre os riscos mais recorrentes estão colmatagem, formação de *mounding*, recirculação da água injetada para a cava, baixa taxa de infiltração, instabilidade geotécnica, incerteza estrutural em aquíferos fraturados/cársticos e perda de desempenho operacional. Dessa forma, esse critério permite ponderar não apenas o potencial da estratégia, mas também sua confiabilidade técnica.

A Tabela 9 consolida os subcritérios analisados em relação ao critério menor risco técnico.

Tabela 9 - Subcritérios considerados para análise de menor risco técnico

<i>Subcritérios considerados – Menor risco técnico</i>	<i>O que observar na estratégia</i>
○ <i>Risco de colmatagem</i>	Se a estratégia pode perder eficiência por obstrução física, química ou biológica de poços, bacias ou estruturas de infiltração.
○ <i>Formação de mounding</i>	Se a introdução de água no sistema pode gerar elevação excessiva do nível d'água ou acúmulo hidráulico indesejado.

<i>Subcritérios considerados – Menor risco técnico</i>	<i>O que observar na estratégia</i>
○ <i>Recirculação hidráulica</i>	Se a água reinjetada ou infiltrada pode retornar rapidamente para a cava ou para o sistema de bombeamento, reduzindo a eficiência da mitigação.
○ <i>Baixa taxa de infiltração/injeção</i>	Se o aquífero ou o terreno apresenta baixa capacidade de receber água, limitando o desempenho da estratégia.
○ <i>Incerteza hidrogeológica</i>	Se há pouca previsibilidade sobre a resposta do aquífero, especialmente em sistemas heterogêneos, fraturados ou cársticos.
○ <i>Instabilidade geotécnica</i>	Se a estratégia pode induzir ou agravar subsidência, colapsos, dolinas, instabilidade de taludes ou recalques.
○ <i>Alteração indesejada da qualidade da água</i>	Se a medida pode favorecer mistura de águas incompatíveis, mobilização de contaminantes, salinização ou drenagem ácida.
○ <i>Perda de desempenho operacional</i>	Se a estratégia tende a apresentar redução de eficiência ao longo do tempo, exigindo intervenções corretivas frequentes.
○ <i>Sensibilidade ao controle operacional</i>	Se pequenas variações de vazão, pressão, qualidade da água ou manutenção podem comprometer o funcionamento da estratégia.
○ <i>Dependência de modelagem e monitoramento</i>	Se a estratégia exige acompanhamento contínuo para evitar efeitos não previstos ou corrigir desvios de desempenho.

Fonte: Próprio Autor (2026).

Por fim, a maturidade da aplicação foi considerada para diferenciar estratégias já documentadas em estudos de caso, aplicações reais e revisões técnicas daquelas ainda baseadas principalmente em simulações, propostas conceituais ou aplicações pontuais. Esse critério não indica, necessariamente, que uma estratégia mais recente seja inadequada, mas permite reconhecer o grau de segurança e consolidação disponível na literatura para subsidiar sua avaliação comparativa.

A Tabela 10 descreve os subcritérios relacionados à análise de maturidade de aplicação.

Tabela 10: Subcritérios considerados para análise de maturidade de aplicação

<i>Subcritérios considerados – Maturidade de aplicação</i>	<i>O que observar na estratégia</i>
○ <i>Existência de estudos de caso reais</i>	Se a estratégia já foi aplicada em minas ou em contextos hidrogeológicos semelhantes, com resultados documentados.
○ <i>Aplicação direta em mineração</i>	Se a estratégia foi testada especificamente em áreas minerárias ou apenas em outros contextos hidrogeológicos.
○ <i>Grau de documentação dos resultados</i>	Se os estudos apresentam dados de monitoramento, resposta piezométrica, vazões, qualidade da água ou desempenho operacional.
○ <i>Recorrência na literatura</i>	Se a estratégia aparece em vários estudos, revisões técnicas ou aplicações independentes.
○ <i>Validação por monitoramento</i>	Se há acompanhamento de campo demonstrando a efetividade, limitações ou evolução da estratégia ao longo do tempo.

<i>Subcritérios considerados – Maturidade de aplicação</i>	<i>O que observar na estratégia</i>
○ <i>Existência de modelagens aplicadas</i>	Se a estratégia foi avaliada por modelagem numérica ou conceitual, mesmo quando ainda não há aplicação operacional consolidada.
○ <i>Tempo de acompanhamento</i>	Se os resultados abrangem apenas testes pontuais ou se há monitoramento de médio/longo prazo.
○ <i>Conhecimento das limitações</i>	Se os principais riscos e restrições da estratégia já são conhecidos, como colmatção, <i>mounding</i> , recirculação, baixa eficiência ou dependência do tipo de aquífero.
○ <i>Reprodutibilidade em outros contextos</i>	Se a estratégia pode ser adaptada a diferentes minas, aquíferos ou fases do empreendimento.
○ <i>Grau de consolidação técnica</i>	Se a estratégia já possui procedimentos, critérios de projeto ou diretrizes operacionais minimamente estabelecidos.

Fonte: Próprio Autor (2026).

Após a definição dos critérios de avaliação, foram atribuídos pesos relativos a cada um deles, considerando sua importância para a análise das estratégias de mitigação dos impactos associados ao rebaixamento do nível freático em áreas de mineração. A ponderação adotada buscou priorizar os critérios mais diretamente relacionados ao objetivo central da pesquisa, sem desconsiderar os aspectos práticos que condicionam a aplicação das estratégias em campo.

Nesse sentido, a eficiência hidrogeológica e o benefício ambiental receberam os maiores pesos, por representarem, respectivamente, a capacidade técnica da estratégia de atuar sobre o rebaixamento e seu potencial de reduzir os efeitos ambientais associados. Os demais critérios foram ponderados com pesos intermediários ou complementares, de modo a incorporar aspectos como aplicabilidade ao contexto minerário, viabilidade técnico-operacional, risco técnico e maturidade da aplicação.

A Tabela 11 mostra os pesos adotados em cada critério, para serem utilizados na análise multicritérios.

Tabela 11: Tabela de pesos para os critérios adotados

<i>Critério</i>	<i>Peso (%)</i>
<i>Eficiência hidrogeológica</i>	25
<i>Benefício ambiental</i>	25
<i>Aplicabilidade ao contexto minerário</i>	15
<i>Viabilidade técnico-operacional</i>	15
<i>Menor risco técnico</i>	15
<i>Maturidade da aplicação</i>	5

<i>Cr�terio</i>	<i>Peso (%)</i>
<i>Total</i>	100

Fonte: Próprio Autor (2026).

A atribuição dos pesos considerou a importância relativa de cada critério para a avaliação das estratégias de mitigação. Como o objetivo central da análise é comparar alternativas capazes de reduzir os impactos associados ao rebaixamento do nível freático em áreas de mineração, os maiores pesos foram atribuídos   eficiência hidrogeológica e ao benefício ambiental. Esses dois critérios concentram 50% da nota final, pois representam, respectivamente, a capacidade técnica da estratégia de atuar sobre o sistema aquífero e seu potencial de reduzir os efeitos ambientais decorrentes da drenagem da mina.

A eficiência hidrogeológica recebeu peso de 25% por representar o principal desempenho esperado das estratégias avaliadas. Esse critério expressa a capacidade da medida de reduzir o rebaixamento, recompor parcialmente o balanço hídrico subterrâneo, controlar a propagação do cone de depressão ou acelerar a recuperação dos níveis d' gua. Da mesma forma, o benefício ambiental recebeu peso de 25%, uma vez que a mitigação não deve ser avaliada apenas pela resposta do aquífero, mas também pela redução de impactos sobre cursos d'água, nascentes, áreas úmidas, ecossistemas dependentes de água subterrânea e usuários da  gua.

A aplicabilidade ao contexto minerário recebeu peso de 15%, pois uma estratégia pode apresentar bom desempenho técnico, mas ser pouco compatível com determinadas condições de lavra, fase do empreendimento, disponibilidade de água de *dewatering*, geometria da cava ou características do aquífero. A viabilidade técnico-operacional também recebeu peso de 15%, por considerar as exigências práticas de implantação, operação, manutenção, controle da qualidade da água, infraestrutura e monitoramento.

O critério de menor risco técnico foi igualmente ponderado com 15%, uma vez que diversas estratégias podem apresentar limitações capazes de comprometer seu desempenho ao longo do tempo, como colmatação, formação de *mounding*, recirculação da água injetada, instabilidade geotécnica ou elevada incerteza hidrogeológica. Por fim, a maturidade da aplicação recebeu peso de 5%, por atuar como critério complementar, pois é importante reconhecer se uma estratégia já possui aplicações reais, revisões ou modelagens consolidadas.

Para a atribuição das notas, foi adotada uma escala de favorabilidade de 1 a 5, aplicada a todos os critérios da matriz multicritério. Essa escala permite padronizar a avaliação das

estratégias, indicando o grau de desempenho relativo de cada alternativa em relação ao critério analisado. Dessa forma, notas mais baixas representam menor favorabilidade, enquanto notas mais altas indicam maior adequação, eficiência ou segurança da estratégia frente ao critério avaliado. A interpretação geral das notas é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12: Notas para interpretação da Análise Multicritério

<i>Nota</i>	<i>Interpretação</i>
1	Muito baixa favorabilidade
2	Baixa favorabilidade
3	Favorabilidade intermediária
4	Alta favorabilidade
5	Muito alta favorabilidade

Fonte: Próprio Autor (2026).

4.4 Matriz Multicritério das Estratégias de Mitigação

A matriz multicritério consolidou a avaliação das estratégias de mitigação identificadas nos estudos analisados, permitindo comparar o desempenho relativo de cada alternativa frente aos critérios adotados. As estratégias avaliadas incluíram medidas de recarga, reinfiltração, aproveitamento da água de *dewatering*, controle em aquíferos cársticos/fraturados, intervenções físicas em zonas de perda, ações de fechamento de mina e ferramentas de modelagem, monitoramento e gestão adaptativa.

Os resultados obtidos indicam diferentes níveis de favorabilidade entre as estratégias, refletindo variações quanto à eficiência hidrogeológica, benefício ambiental, aplicabilidade ao contexto mineral, viabilidade técnico-operacional, menor risco técnico e maturidade da aplicação.

As estratégias avaliadas são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13: Estratégias utilizadas na Análise Multicritério

<i>Código</i>	<i>Estratégia avaliada</i>	<i>Observação</i>
E1	Reinjeção por poços /	Estratégia de recarga direta no aquífero.
E2	Reinfiltração / bacias de infiltração	Estratégia de recarga superficial ou subsuperficial.
E3	Aproveitamento compensatório da água de <i>dewatering</i>	Uso da água bombeada para abastecimento ou compensação hídrica

Código	Estratégia avaliada	Observação
<i>E4</i>	Rebaixamento controlado em aquíferos cársticos/fraturados	Estratégia de controle operacional voltada à redução de riscos em sistemas hidrogeológicos heterogêneos.
<i>E5</i>	Tamponamento de condutos e impermeabilização de zonas de perda	Intervenção física em caminhos preferenciais de fluxo entre águas superficiais e subterrâneas.
<i>E6</i>	<i>Backfill</i> e enchimento controlado de cava	Estratégia associada ao fechamento e à recuperação hidrogeológica pós-lavra.
<i>E7</i>	Modelagem, monitoramento e gestão adaptativa	Estratégia de suporte à decisão, previsão de impactos e controle de incertezas.

Fonte: Próprio Autor (2026).

Com base nos critérios, pesos e estratégias definidos anteriormente, foi elaborada a matriz multicritério apresentada na Tabela 14. A pontuação atribuída a cada estratégia reflete sua favorabilidade relativa frente aos critérios avaliados, permitindo comparar, de forma padronizada, alternativas com diferentes mecanismos de atuação e distintos níveis de aplicabilidade no contexto minerário.

Tabela 14: Análise Multicritério para avaliação das estratégias de mitigação

Estratégia	Eficiência hidrogeológica a 25%	Benefício ambiental 25%	Aplicabilidade e 15%	Viabilidade técnico-operacional 15%	Menor risco técnico 15%	Maturidade de aplicação 5%	Nota final ponderada
Reinjeção por poços / MAR por reinjeção	5	4	4	3	3	4	3,95
Reinfiltração / bacias de infiltração	4	5	4	3	3	4	3,95
Aproveitamento compensatório da água de <i>dewatering</i>	3	4	4	4	4	4	3,75
Rebaixamento controlado em aquíferos cársticos/fraturados	3	4	3	3	3	4	3,30
Tamponamento de condutos e impermeabilização de zonas de perda	4	5	3	2	2	2	3,40

Estratégia	Eficiência hidrogeológica 25%	Benefício ambiental 25%	Aplicabilidade e 15%	Viabilidade técnico-operacional 15%	Menor risco técnico 15%	Maturidade de aplicação 5%	Nota final ponderada
Enchimento controlado de cava	4	4	3	3	3	4	3,55
Modelagem, monitoramento e gestão adaptativa	2	4	5	4	5	5	3,85

Fonte: Próprio Autor (2026).

A leitura inicial dessa matriz mostra que as estratégias diretamente associadas à recarga e reposição hídrica (reinjeção por poços e reinfiltração/bacias de infiltração) apresentaram as maiores notas finais, principalmente por combinarem boa eficiência hidrogeológica e elevado benefício ambiental. A modelagem, monitoramento e gestão adaptativa também apresentou pontuação elevada, não por atuar diretamente sobre o aquífero, mas por sua alta aplicabilidade, baixo risco técnico e importância no controle de incertezas.

As estratégias de tamponamento de condutos, rebaixamento controlado em aquíferos cársticos/fraturados e enchimento controlado de cava apresentaram notas intermediárias, refletindo seu potencial técnico e ambiental, mas também suas limitações de aplicação, maior complexidade operacional ou dependência de condições hidrogeológicas específicas.

A Tabela 15 consolida a classificação final das estratégias baseadas em análises multicritérios.

Tabela 15: Classificação final baseada em Análise Multicritério

Ranking	Estratégia avaliada	Nota final ponderada	Classificação
1º	Reinjeção por poços / MAR por reinjeção	3,95	Alta favorabilidade
1º	Reinfiltração / bacias de infiltração	3,95	Alta favorabilidade
3º	Modelagem, monitoramento e gestão adaptativa	3,85	Alta favorabilidade
4º	Aproveitamento compensatório da água de <i>dewatering</i>	3,75	Alta favorabilidade
5º	<i>Backfill</i> e enchimento controlado de cava	3,55	Alta favorabilidade
6º	Tamponamento de condutos e impermeabilização de zonas de perda	3,40	Favorabilidade intermediária

<i>Ranking</i>	<i>Estratégia avaliada</i>	<i>Nota final ponderada</i>	<i>Classificação</i>
7º	Rebaixamento controlado em aquíferos cársticos/fraturados	3,30	Favorabilidade intermediária

Fonte: Próprio Autor (2026).

4.5 Interpretação dos Resultados da Matriz

A interpretação dos resultados da matriz multicritério não deve se limitar ao ranking final das estratégias, uma vez que a nota ponderada representa a combinação entre critérios com pesos e significados distintos. Uma estratégia pode apresentar elevada favorabilidade geral e, ainda assim, possuir limitações importantes quanto à operação, ao risco técnico ou à dependência das condições hidrogeológicas locais. Da mesma forma, alternativas com pontuação intermediária não devem ser descartadas de forma direta, pois podem ser altamente eficientes em contextos específicos. Assim, a análise das notas deve considerar não apenas o valor final obtido, mas também o desempenho individual de cada estratégia nos critérios de eficiência hidrogeológica, benefício ambiental, aplicabilidade ao contexto minerário, viabilidade técnico-operacional, menor risco técnico e maturidade da aplicação.

A reinjeção por poços, associada às técnicas de recarga gerenciada de aquíferos, apresentou uma das maiores notas finais da matriz, principalmente em função de sua elevada eficiência hidrogeológica. Atribuição de nota máxima nesse critério se justifica pelo fato de a estratégia atuar diretamente no aquífero receptor, possibilitando a reposição parcial da água bombeada, a elevação dos níveis piezométricos e a redução da propagação do cone de rebaixamento, quando aplicada em condições hidrogeológicas favoráveis. Essa interpretação é sustentada pelos estudos que tratam de sistemas de reinjeção em mineração, como os casos de Cobre Las Cruces e Mining Area C, além das discussões conceituais sobre MAR em áreas minerárias. O benefício ambiental também foi considerado elevado, embora não máximo, pois a estratégia pode contribuir para reduzir impactos sobre aquíferos, cursos d'água, nascentes e usuários da água, mas sua efetividade depende da qualidade da água reinjetada, da compatibilidade hidroquímica e da resposta hidráulica do aquífero. Por outro lado, as notas intermediárias em viabilidade técnico-operacional e menor risco técnico refletem as limitações da técnica, especialmente a necessidade de infraestrutura de bombeamento, tratamento prévio da água, controle de sólidos, monitoramento contínuo, manutenção dos poços, risco de colmatção, formação de *mounding* e eventual recirculação da água injetada para a cava ou para o sistema de drenagem. Portanto, a reinjeção por poços se destaca como uma estratégia de alto potencial, mas tecnicamente exigente.

A reinfiltração e as bacias de infiltração também apresentaram elevada favorabilidade na matriz, com desempenho semelhante ao da reinjeção por poços. A nota alta em eficiência hidrogeológica decorre da capacidade da estratégia de favorecer a recarga do sistema aquífero por meio da infiltração superficial ou subsuperficial da água disponível, contribuindo para a compensação parcial dos volumes removidos pelo *dewatering*. Entretanto, diferentemente da reinjeção por poços, a água não é conduzida diretamente ao aquífero profundo, o que torna sua eficiência mais dependente das características da zona não saturada, da permeabilidade dos materiais superficiais, da profundidade do nível d'água e da conectividade hidráulica entre a área de infiltração e o aquífero impactado. O benefício ambiental recebeu nota máxima porque essa estratégia pode atuar na manutenção de áreas úmidas, cursos d'água, zonas de descarga e ecossistemas dependentes de água subterrânea, especialmente quando implantada de forma integrada ao monitoramento ambiental. A nota intermediária em viabilidade técnico-operacional reflete o fato de que, embora as bacias de infiltração possam ser construtivamente menos complexas que sistemas de injeção por poços, elas demandam disponibilidade de área, controle da qualidade da água, manutenção periódica e acompanhamento da taxa de infiltração. Da mesma forma, o risco técnico foi avaliado como intermediário devido à possibilidade de colmatção das estruturas, redução da capacidade de infiltração, formação de *mounding* e baixa eficiência em terrenos pouco permeáveis. Assim, essa estratégia apresenta alto potencial de mitigação, mas sua aplicação depende fortemente das condições físicas do terreno e da disponibilidade espacial na área minerária.

O aproveitamento compensatório da água de *dewatering* apresentou nota final elevada, embora ligeiramente inferior às estratégias diretamente associadas à recarga do aquífero. A nota intermediária em eficiência hidrogeológica se justifica porque essa alternativa não atua necessariamente na recomposição do nível freático ou na redução direta do cone de rebaixamento. Seu objetivo principal é o uso da água bombeada para abastecimento, compensação hídrica, manutenção de disponibilidade ou redução de conflitos pelo uso da água. Portanto, embora não represente uma medida de recuperação hidrogeológica direta, pode gerar benefícios ambientais e sociais relevantes, sobretudo em regiões onde a drenagem da mina intercepta volumes significativos de água subterrânea que poderiam ser perdidos ou descartados sem aproveitamento. Por essa razão, o benefício ambiental foi considerado alto, uma vez que a estratégia pode reduzir pressões sobre outros mananciais, contribuir para o abastecimento público ou industrial e compensar parcialmente os impactos associados ao rebaixamento. As notas mais favoráveis em aplicabilidade, viabilidade técnico-operacional e menor risco técnico

refletem o fato de que essa alternativa tende a se integrar com maior facilidade à rotina operacional da mina, aproveitando uma água que já é bombeada pelo sistema de drenagem. Ainda assim, sua aplicação depende de tratamento, regularização, controle de qualidade e compatibilidade com os usos pretendidos, o que impede sua classificação como uma solução universal. Em termos práticos, trata-se de uma estratégia importante de gestão hídrica, mas com menor capacidade de mitigação direta sobre o aquífero quando comparada à reinjeção ou reinfiltração.

O rebaixamento controlado em aquíferos cársticos e fraturados recebeu pontuação intermediária na matriz, refletindo a complexidade desse tipo de ambiente hidrogeológico. A nota atribuída à eficiência hidrogeológica foi moderada porque a estratégia pode reduzir riscos associados ao rebaixamento acelerado, à subsidência, à formação de dolinas e à alteração de fluxos subterrâneos, mas não necessariamente recompõe o balanço hídrico ou recupera níveis d'água. Sua função principal é controlar a velocidade e a magnitude do rebaixamento, evitando respostas abruptas do sistema. O benefício ambiental foi considerado alto, pois em aquíferos cársticos e fraturados os impactos do bombeamento podem se propagar rapidamente por caminhos preferenciais, afetando cursos d'água, nascentes e zonas de descarga. Os estudos associados à Mina de Vazante demonstram essa sensibilidade, especialmente pela conexão entre fraturas, condutos cársticos, drenagens superficiais e efeitos geotécnicos. No entanto, a aplicabilidade, a viabilidade operacional e o menor risco técnico foram avaliados de forma intermediária, pois a estratégia depende de conhecimento detalhado da estrutura do aquífero, de monitoramento contínuo, de instrumentação adequada e de respostas operacionais rápidas. A heterogeneidade desses sistemas torna difícil prever com precisão os caminhos de fluxo e os efeitos do rebaixamento, aumentando a incerteza técnica. Por isso, essa estratégia é relevante em contextos cársticos ou fraturados, mas sua eficácia depende fortemente da qualidade do modelo conceitual, da rede de monitoramento e da capacidade de gestão operacional da mina.

O tamponamento de condutos e a impermeabilização de zonas de perda apresentaram uma avaliação contrastante na matriz. A estratégia recebeu notas elevadas em eficiência hidrogeológica e benefício ambiental por atuar diretamente sobre caminhos preferenciais de fluxo, especialmente em sistemas cársticos ou fraturados com forte conexão entre águas superficiais e subterrâneas. Quando bem aplicada, essa intervenção pode reduzir perdas de água para o sistema subterrâneo, limitar a drenagem induzida pela mina e contribuir para a recuperação ou manutenção de vazões em cursos d'água impactados. Por esse motivo, seu potencial ambiental é significativo, principalmente em áreas onde o rebaixamento afeta rios,

nascentes ou zonas de descarga sensíveis. Entretanto, as notas baixas em viabilidade técnico-operacional, menor risco técnico e maturidade da aplicação indicam limitações importantes. Trata-se de uma medida de difícil execução, dependente da identificação precisa dos condutos, fraturas ou zonas de perda, além de demandar intervenções físicas que podem ter incerteza elevada quanto à efetividade e à durabilidade. A resposta hidráulica também pode ser difícil de prever, pois o bloqueio de um caminho preferencial pode redirecionar o fluxo para outras descontinuidades. Assim, embora essa estratégia tenha alto potencial em casos específicos, ela apresenta maior risco técnico e menor consolidação na literatura quando comparada a alternativas mais amplamente documentadas.

As estratégias de *backfill* e enchimento controlado de cava receberam pontuação final alta, porém inferior às estratégias de recarga direta. A nota elevada em eficiência hidrogeológica se justifica pelo potencial dessas medidas em acelerar a recuperação dos níveis d'água no fechamento ou pós-fechamento da mina, reduzir o volume final de vazio da cava e influenciar a formação de lagos de cava. Esses efeitos foram discutidos em estudos voltados à recuperação pós-lavra e à modelagem de cenários de fechamento. O benefício ambiental também foi considerado alto, pois a estratégia pode contribuir para reduzir passivos de longo prazo, controlar a evolução de lagos de cava, limitar a exposição de materiais reativos e favorecer uma recuperação hidrogeológica mais estável. No entanto, a aplicabilidade ao contexto minerário foi avaliada como intermediária porque essas medidas são mais associadas ao fechamento ou pós-fechamento, tendo menor aplicação durante a fase operacional da mina. A viabilidade técnico-operacional e o menor risco técnico também receberam notas intermediárias, uma vez que o desempenho dessas estratégias depende da geometria da cava, da disponibilidade e qualidade do material de preenchimento, da estabilidade geotécnica, das condições climáticas, da transmissividade do aquífero e da qualidade da água acumulada. Dessa forma, *backfill* e enchimento controlado de cava representam alternativas relevantes para a gestão de passivos e recuperação pós-lavra, mas não substituem medidas de mitigação aplicáveis durante a operação do rebaixamento.

A modelagem, o monitoramento e a gestão adaptativa apresentaram uma das maiores notas finais da matriz, apesar de terem recebido baixa pontuação em eficiência hidrogeológica direta. Essa aparente contradição se explica pelo fato de que essas ações não atuam fisicamente sobre o aquífero, não repõem água no sistema e não reduzem, por si só, o cone de rebaixamento. Por isso, a nota de eficiência hidrogeológica foi baixa quando comparada às estratégias de recarga ou intervenção física. Entretanto, os demais critérios receberam avaliações elevadas,

pois a modelagem e o monitoramento são fundamentais para compreender o comportamento do sistema aquífero, prever impactos, reduzir incertezas, acompanhar a evolução do rebaixamento e orientar medidas corretivas. A aplicabilidade ao contexto minerário foi considerada muito alta, uma vez que essas ferramentas podem ser utilizadas em diferentes tipos de mina, fases do empreendimento e contextos hidrogeológicos. O menor risco técnico também recebeu nota elevada, pois essas ações tendem a reduzir a incerteza e melhorar a tomada de decisão, embora dependam da qualidade dos dados disponíveis e da consistência do modelo conceitual. A maturidade da aplicação foi considerada máxima, pois modelagem, monitoramento e gestão adaptativa aparecem de forma recorrente nos estudos analisados, seja como estratégia principal, seja como suporte indispensável às demais alternativas. Assim, essa estratégia não deve ser entendida como uma medida mitigadora isolada, mas como base técnica para o planejamento, a implantação e o acompanhamento de qualquer ação de mitigação.

4.6 Adequação das Estratégias por Cenário Hidrogeológico

Embora a matriz multicritério permita comparar as estratégias de mitigação de forma padronizada, sua interpretação não deve ser feita de maneira isolada do contexto hidrogeológico. A posição de uma estratégia no ranking geral indica sua favorabilidade relativa, mas não significa que ela será, necessariamente, a alternativa mais adequada para todas as áreas minerárias. A escolha da medida de mitigação depende de fatores como tipo de aquífero, transmissividade, condutividade hidráulica, grau de fraturamento, presença de condutos cársticos, disponibilidade de água de *dewatering*, fase da mina, sensibilidade ambiental da área e infraestrutura operacional disponível.

Em aquíferos porosos, sedimentares ou em sistemas com boa capacidade de armazenamento e transmissão, as estratégias associadas à recarga gerenciada tendem a apresentar maior adequação. Nesses contextos, a reinjeção por poços pode ser mais eficiente quando o objetivo é atuar diretamente sobre o aquífero impactado, recompondo parcialmente os níveis piezométricos ou reduzindo a propagação do cone de rebaixamento. Já a reinfiltração por bacias ou estruturas superficiais pode ser mais adequada quando há disponibilidade de área, boa capacidade de infiltração dos materiais superficiais e conexão hidráulica entre a zona de recarga e o aquífero afetado. Assim, em sistemas hidrogeológicos mais homogêneos e com resposta hidráulica previsível, essas estratégias apresentam maior potencial de aplicação.

Em áreas onde há grande disponibilidade de água proveniente do *dewatering*, a escolha da estratégia deve considerar não apenas o volume bombeado, mas também a qualidade da

água, a necessidade de tratamento e a possibilidade de reaproveitamento. Nesses casos, a reinjeção, a reinfiltração e o aproveitamento compensatório da água bombeada podem ser alternativas complementares. Quando o aquífero receptor possui condições adequadas, a água pode ser utilizada para recarga ou compensação hidráulica. Quando a reinjeção ou reinfiltração não são tecnicamente viáveis, o aproveitamento compensatório pode representar uma solução relevante para abastecimento ou diminuição da pressão sobre outros mananciais.

Nos aquíferos cársticos e fraturados, a adequação das estratégias exige maior cautela. Nesses sistemas, o fluxo subterrâneo tende a ser controlado por fraturas, falhas, condutos e zonas preferenciais de circulação, o que aumenta a incerteza quanto à direção, velocidade e resposta hidráulica do aquífero. Dessa forma, estratégias baseadas apenas na reposição de água podem não ser suficientes ou podem apresentar comportamento difícil de prever. Nesses contextos, tornam-se mais adequadas medidas como rebaixamento controlado, monitoramento hidrogeotécnico, modelagem numérica, tamponamento de condutos e impermeabilização de zonas de perda. Essas estratégias buscam controlar os caminhos preferenciais de fluxo e reduzir riscos associados à subsidência, formação de dolinas, secamento de cursos d'água e perda de conectividade entre águas superficiais e subterrâneas.

Em áreas com nascentes, cursos d'água, áreas úmidas ou ecossistemas dependentes de água subterrânea, o critério ambiental passa a ter maior relevância na escolha da estratégia. Nesses cenários, as medidas mais adequadas são aquelas capazes de reduzir a propagação dos impactos para além da cava ou das galerias subterrâneas. A reinfiltração, as bacias de infiltração, a reinjeção por poços e o monitoramento adaptativo podem contribuir para a manutenção de vazões de base, proteção de zonas de descarga e acompanhamento da resposta ambiental ao rebaixamento. Entretanto, a aplicação dessas medidas deve ser acompanhada de monitoramento contínuo, uma vez que a resposta dos sistemas superficiais pode ocorrer de forma lenta ou defasada em relação às alterações no aquífero.

Quando o principal impacto está relacionado à disponibilidade hídrica para usuários, comunidades, abastecimento público ou atividades produtivas, o aproveitamento compensatório da água de *dewatering* assume papel importante. Ainda que essa estratégia não atue diretamente na recuperação do nível freático, ela pode reduzir os efeitos sociais e ambientais da drenagem da mina ao direcionar a água bombeada para usos compatíveis. Nesse tipo de cenário, a estratégia deve ser entendida como uma medida de gestão hídrica e compensação, mais do que como uma técnica de recuperação hidrogeológica direta.

Nos contextos de fechamento e pós-fechamento de mina, as estratégias mais adequadas passam a ser aquelas voltadas à recuperação de longo prazo do sistema hidrogeológico e à redução de passivos ambientais. Nesse caso, medidas como enchimento controlado de cava, gestão de lagos de cava, modelagem do *rebound* e monitoramento de longo prazo tornam-se mais relevantes. Essas alternativas podem contribuir para acelerar a recuperação dos níveis d'água, reduzir o volume de vazio da cava, controlar a evolução hidroquímica dos lagos de cava e minimizar impactos persistentes após o encerramento da lavra. No entanto, sua aplicação depende fortemente da geometria da mina, das condições climáticas, da transmissividade do aquífero e da qualidade dos materiais utilizados no preenchimento.

4.7 Limitações da Análise e Recomendações Técnicas

A matriz multicritério apresentada neste trabalho deve ser interpretada como uma ferramenta teórico-comparativa, elaborada a partir da sistematização dos estudos selecionados na literatura. Dessa forma, as notas atribuídas às estratégias não representam uma validação experimental em uma área específica, mas sim uma avaliação relativa do potencial de aplicação das medidas de mitigação frente aos critérios definidos. Essa limitação é importante, pois o desempenho real de cada estratégia depende diretamente das condições locais de cada empreendimento, como tipo de aquífero, grau de heterogeneidade geológica, transmissividade, condutividade hidráulica, disponibilidade de água de *dewatering*, qualidade da água, fase da mina, restrições ambientais e infraestrutura operacional.

Outra limitação relevante está relacionada à diversidade dos estudos analisados. Os trabalhos selecionados apresentam diferenças quanto ao tipo de mina, bem mineral, clima, escala de análise, fase do empreendimento e nível de detalhamento dos dados hidrogeológicos. Alguns estudos são baseados em aplicações reais e monitoramento de campo, enquanto outros se apoiam em modelagens conceituais, simulações numéricas ou revisões técnicas. Essa diferença de abordagem interfere no grau de segurança atribuído a cada estratégia, especialmente quando se comparam medidas amplamente documentadas, como modelagem, monitoramento, reinjeção e reinfiltração, com intervenções mais específicas, como tamponamento de condutos e impermeabilização de zonas de perda.

Também se destaca a limitação associada à ausência de informações econômicas padronizadas nos estudos avaliados. Em muitos casos, não há dados suficientes sobre custos de implantação, operação, manutenção, tratamento da água, monitoramento ou desativação das estruturas. Por esse motivo, a viabilidade econômica não foi tratada como um critério

independente na matriz, sendo considerada apenas de forma indireta dentro da viabilidade técnico-operacional. Essa ausência impede uma comparação mais completa entre as alternativas, uma vez que estratégias tecnicamente eficientes podem apresentar custos elevados ou demandar infraestrutura complexa para sua aplicação.

Apesar dessas limitações, a análise permitiu identificar tendências relevantes para o planejamento de medidas de mitigação em áreas minerárias. A principal recomendação técnica é que nenhuma estratégia seja definida sem a elaboração prévia de um modelo conceitual hidrogeológico robusto. Esse modelo deve integrar informações geológicas, estruturais, hidrogeológicas, hidrológicas e ambientais, contemplando unidades aquíferas, zonas de recarga e descarga, conexão com cursos d'água, presença de nascentes, estruturas condicionantes de fluxo, usuários da água e evolução prevista do rebaixamento ao longo da operação e do fechamento da mina.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar estratégias de mitigação dos impactos causados pelo rebaixamento do nível freático em áreas de mineração, com base na sistematização de estudos selecionados na literatura técnica e científica. A partir da análise dos trabalhos levantados, foi possível identificar diferentes abordagens aplicadas ao contexto minerário, incluindo recarga gerenciada de aquíferos, reinjeção por poços, reinfiltração por bacias, aproveitamento compensatório da água de *dewatering*, controle operacional em aquíferos cársticos/fraturados, intervenções físicas em zonas de perda, medidas associadas ao fechamento de mina e estratégias de modelagem, monitoramento e gestão adaptativa.

Os resultados indicaram que as estratégias diretamente associadas à reposição ou compensação hídrica do sistema aquífero apresentaram maior favorabilidade relativa na matriz multicritério. A reinjeção por poços/MAR por reinjeção e a reinfiltração/bacias de infiltração se destacaram por seu potencial de atuação direta sobre o balanço hídrico subterrâneo e por seus benefícios ambientais, embora apresentem limitações importantes relacionadas à operação, manutenção, controle da qualidade da água, colmatção, formação de *mounding* e dependência das características hidráulicas do aquífero receptor.

A modelagem, o monitoramento e a gestão adaptativa também apresentaram elevada relevância, apesar de não constituírem medidas físicas diretas de mitigação. Essas estratégias se mostraram fundamentais para reduzir incertezas, prever cenários, acompanhar a evolução do rebaixamento e orientar a tomada de decisão ao longo da operação, do fechamento e do pós-fechamento da mina. Dessa forma, sua aplicação deve ser considerada como base técnica para o planejamento e acompanhamento das demais medidas mitigadoras.

As estratégias de aproveitamento compensatório da água de *dewatering* e de *backfill*/enchimento controlado de cava apresentaram desempenho favorável, porém associado a finalidades mais específicas. A primeira se destaca como medida de gestão hídrica e redução de conflitos pelo uso da água, enquanto a segunda possui maior aplicabilidade em contextos de fechamento e recuperação pós-lavra. Já o rebaixamento controlado em aquíferos cársticos/fraturados e o tamponamento de condutos ou impermeabilização de zonas de perda demonstraram potencial técnico e ambiental relevante, mas com maior dependência de estudos locais detalhados, devido à elevada heterogeneidade e incerteza desses sistemas.

Conclui-se que a mitigação dos impactos associados ao rebaixamento do nível freático em mineração não deve ser tratada a partir de uma solução única e universal. A escolha da

estratégia mais adequada depende da integração entre tipo de aquífero, fase da mina, disponibilidade e qualidade da água de *dewatering*, sensibilidade ambiental da área, presença de usuários da água, infraestrutura disponível e capacidade de monitoramento do empreendimento. Nesse sentido, as alternativas mais robustas tendem a ser aquelas aplicadas de forma integrada, combinando medidas de intervenção, recarga, compensação hídrica, modelagem, monitoramento e gestão adaptativa.

Por fim, destaca-se que a matriz multicritério elaborada neste trabalho possui caráter teórico-comparativo e deve ser entendida como uma ferramenta de apoio à análise preliminar das estratégias de mitigação. Sua aplicação prática exige validação por estudos locais, com base em modelo conceitual hidrogeológico consistente, dados de campo, ensaios hidráulicos, avaliação da qualidade da água, análise de riscos e monitoramento contínuo. Ainda assim, os resultados obtidos contribuem para organizar e comparar as principais estratégias disponíveis, fornecendo subsídios técnicos para a seleção de alternativas mais adequadas à redução dos impactos hidrogeológicos e ambientais provocados pelo rebaixamento do nível freático em áreas de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. 1 recurso online. ISBN 9788579752957.

AMORIM, L. Q.; FERNANDEZ RUBIO, R.; ALKMIN, F. F. The effects of mining Capao Xavier iron ore deposit on the water supply of Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. *In: IMWA CONGRESS*, 1999, Sevilla. **Mine, Water & Environment** [...]. Sevilla: 1999. p. 359-366.

ASHTIANI, B. A. Layered Radial Aquifer Model for Open-Pit Mine Closure with Managed Aquifer Recharge. **Groundwater**, [s. l.], 2026. DOI: 10.1111/gwat.70065.

BAQUERO, J. C.; REYES, M. J. de los; CUSTODIO, E.; SCHEIBER, L.; VÁZQUEZ-SUÑÉ, E. Groundwater Management in Mining: The Drainage and Reinjection System in Cobre Las Cruces, Spain. **Modern Environmental Science and Engineering**, New York, v. 2, n. 10, p. 631-646, 2016. Disponível em: [https://doi.org/10.15341/mese\(2333-2581\)/10.02.2016/001](https://doi.org/10.15341/mese(2333-2581)/10.02.2016/001). Acesso em: 15 outubro 2025.

BARBOSA, Carlos Magno de Souza; MATTOS, Arthur. Conceitos e diretrizes para recarga artificial de aquíferos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 15., 2008, Natal. **Anais** [...]. São Paulo: ABAS, 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23657>.

BERTACHINI, Antônio Carlos; ALMEIDA, Danilo Carvalho de. O rebaixamento do nível d'água em mineração e obras civis. *In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE*, 1., 2003. **Anais** [...]. São Paulo: ABAS, 2003. Disponível em: <http://www.aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/23932/15992>.

BITTENCOURT, C.; BESSA, V. de; ARAÚJO, E. E. de. The Vazante underground mine, Brazil – An example of controlled water table drawdown in karstic areas. *In: SINKHOLES AND THE ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF KARST*, 11., 2008, Tallahassee. *Proceedings* [...]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2008. p. 733–741.

BOZAN, Ç.; WALLIS, I.; COOK, P. G.; DOGRAMACI, S. Groundwater-level recovery following closure of open-pit mines. **Hydrogeology Journal**, Cham, v. 30, n. 6, p. 1819–1832, 2022. DOI: 10.1007/s10040-022-02508-2.

BUCHER, B.; JARITZ, R.; BERGER, D. Monitoring the effects on the water balance of the Garzweiler open pit mine: concepts, methods and experience. *Water Supply*, v. 10, n. 4, p. 534–540, 2010. DOI: 10.2166/ws.2010.181.

CABRAL, J. J. S. P.; DEMETRIO, J. G. A. **Aplicação de modelos em hidrogeologia**. *In: FEITOSA, Fernando A. Carneiro; MANOEL FILHO, João; FEITOSA, Edilton Carneiro; DEMETRIO, José Geilson A. (Org.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 687-707.

COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO; CSIRO. *Guía metodológica: marco operativo para proyectos de recarga artificial de aquíferos*. Santiago: Comisión Nacional de Riego, 2020.

COOK, P. G.; MILLER, A. D.; WALLIS, I.; DOGRAMACI, S. Facilitating open pit mine

closure with managed aquifer recharge. **Groundwater, Hoboken**, v. 60, n. 5, p. 673–684, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gwat.13178>. Acesso em: 02 Dezembro 2025.

CRUZ-AYALA, M. B.; MEGDAL, S. B. An overview of managed aquifer recharge in Mexico and its legal framework. In: DILLON, P. et al. (ed.). **Managed Aquifer Recharge for Water Resilience**. Basel: MDPI, 2020. p. 269–292. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12020474>. Acesso em: 04 Janeiro 2026.

CURRELL, M. J.; WERNER, A. D.; MCGRATH, C.; WEBB, J. A.; BERKMAN, M. Problems with the application of hydrogeological science to regulation of Australian mining projects: Carmichael Mine and Doongmabulla Springs. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 548, p. 674–682, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.031>. Acesso em: 05 Fevereiro 2026.

DAHLKE, H. E. *et al.* Managed aquifer recharge as a tool to enhance sustainable groundwater management in California: examples from field and modeling studies. In: VOUDOURIS, K.; VOUTSA, D. (eds.). **Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection**. Amsterdam: Elsevier, 2018. v. 3, p. 215–275. DOI: 10.1016/bs.apmp.2018.07.003.

DILLON, P. et al. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. **Hydrogeology Journal**, Cham, v. 27, n. 1, p. 1–30, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>.

DU, Wenfeng *et al.* Spatial and Temporal Distribution of Groundwater in Open-Pit Coal Mining: A Case Study from Baorixile Coal Mine, Hailaer Basin, China. **Geofluids**, [S. l.], v. 2022, art. 8753217, p. 1–17, 29 jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/8753217>. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/8753217>. Acesso em: 23 maio 2026.

EBRAHIM, G. Y.; LAUTZE, J. F.; VILLHOLTH, K. G. Managed Aquifer Recharge in Africa: **Taking Stock and Looking Forward**. In: DILLON, P. et al. (Ed.). *Managed Aquifer Recharge for Water Resilience*. Basel: MDPI, 2020. p. 225–245.

FEITOSA, Fernando A. Carneiro (Coord.) *et al.* **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM; Recife: LABHID, 2008. 812 p. il., color. ISBN 9788574990613. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14818>. Acesso em: 01 de novembro de 2026.

FERNÁNDEZ ESCALANTE, Enrique; SAN SEBASTIÁN SAUTO, Jon; CALERO GIL, Rodrigo. **Sites and Indicators of MAR as a Successful Tool to Mitigate Climate Change Effects in Spain**. Water, Basel, v. 11, n. 9, art. 1943, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w11091943>. Acesso em: 1 fev. 2026.

FERREIRA, O. B. Multi-technical approach to evaluate the impacts caused by the Vazante Mine (MG) on the Santa Catarina River flow loss through the overexploitation of a fissure-karst aquifer and simulation of mitigating solutions by numerical modeling. 2023. **Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente)** – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.44.2023.tde-07122023-082334>. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-07122023-082334/>. Acesso em: 5 fevereiro 2026.

FIGUEIREDO, M. A. Mineração e crise hídrica em Minas Gerais: **Quadrilátero**

Ferrífero/Quadrilátero Aquífero. Caderno de Geografia, Belo Horizonte, v. 31, n. esp. 1, p. 116–122, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2021v31nesp1p116>. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/25533>.

FREITAS, Alex Rodrigues de; PAULA, Rodrigo Sérgio de; TEIXEIRA, Gabriela Meira. **Modelo hidrogeológico conceitual da região entre as Serras do Curral e de Três Irmãos, Brumadinho-MG.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25., 2023, Aracaju. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRHidro, 2023. p. 1.

GALE, I. (ed.). **Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas.** Paris: UNESCO, 2005.

GARRICK, H.; STEWART, F.; HAYES, E.; GOODE, M.; DIGGES LA TOUCHE, G. Adaptive, integrated water management designs and probabilistic modelling for mine waste facility closure and restoration. In: FOURIE, A. B.; TIBBETT, M. (ed.). **Mine Closure 2016.** Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2016. DOI: 10.36487/ACG_rep/1608_34_Garrick.

GONÇALVES, J. A. C.; PEREIRA, P. H. R.; VIEIRA, E. M. **Sistemas Aquíferos: Hidrogeologia da porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero na região de Itabira (MG).** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2020. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRH, v. 35, n. 1, p. 1-13, 2020.

GRANDCHAMP, C. A. P.; VELÁSQUEZ, L. N. M. **Determinação do balanço hídrico na recuperação do nível de água do aquífero Cauê na Mina de Águas Claras, Serra do Curral, município de Nova Lima, Minas Gerais.** In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 12., 2002, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: ABAS, 2002. p. 1–14.

GRESSWELL, R.; FOLEY, G.; FAITHFUL, J. Hydrogeological modelling to inform closure planning for Hazelwood Mine. In: MINE CLOSURE 2019, Perth. **Proceedings...** Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. DOI: 10.36487/ACG_rep/1915_106_Gresswell.

INCAPER. **Barraginhas: tecnologia implementada no ES permite infiltração de água no solo.** [S.l.]: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, 2016. Disponível em: <https://incaper.es.gov.br/Not%C3%ADcia/barraginhas-tecnologia-implementada-no-es-permite-infiltracao-de-agua-no-solo>. Acesso em: 28 jan. 2026.

INTERNATIONAL GROUNDWATER RESOURCES ASSESSMENT CENTRE (IGRAC). **Artificial recharge of groundwater in the world.** Delft: IGRAC, 2007. Disponível em: <https://www.inowas.com/mar-methods/aquifer-storage-transfer-and-recovery-astr/>. Acesso em: 30 jan. 2026.

JAKEMAN, Anthony J. *et al.* (ed.). **Integrated Groundwater Management: concepts, approaches and challenges.** Cham: Springer Open, 2016. DOI 10.1007/978-3-319-23576-9.

KIM, S.-M.; CHOI, Y. SIMPL: A Simplified Model-Based Program for the Analysis and Visualization of Groundwater Rebound in Abandoned Mines to Prevent Contamination of Water and Soils by Acid Mine Drainage. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 951, p. 1-19, 2018. DOI: 10.3390/ijerph15050951.

LAZARIM, H. A.; LOUREIRO, C. O. **Modelagem hidrogeológica computacional do**

sistema de fluxo de águas subterrâneas no Bairro Jardim Canadá – Quadrilátero Ferrífero, Nova Lima, MG. *In*: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1., 2000, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: ABAS/ALHSUD, 2000.

LOGAN IV, William S. **Managed Aquifer Recharge and the U.S. Army Corps of Engineers: Water Security through Resilience**. Alexandria, VA: U.S. Army Corps of Engineers: Institute for Water Resources, 2020. (IWR White Paper 2020-WP-01).

LUO, Ankun *et al.* Effect of Large-Scale Mining Drainage on Groundwater Hydrogeochemical Evolution in Semi-Arid and Arid Regions. **Frontiers in Environmental Science**, [S.l.], v. 10, art. 926866, 2022. DOI 10.3389/fenvs.2022.926866. Acesso em: 24 out. 2025.

MAGALHÃES, C. C. C.; MELO, M. C.; GUIGUER, N.; PAULA, R. S. **The Cauê Aquifer on the eastern limb of the Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in the western Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil**. Brazilian Journal of Geology, São Paulo, v. 52, n. 4, e20220005, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-488920220220005>.

MALIVA, R. G.; MISSIMER, T. M. Aquifer Storage and Recovery: Developing Sustainable Water Supplies. **IDA Journal of Desalination and Water Reuse**, v. 2, n. 2, p. 74-80, 2010. DOI: 10.1179/ida.2010.2.2.74.

MEREDITH, E.; WHEATON, J.; KUZARA, S. Hydrogeologic Responses to 50 Years of Surface Coal Mining and 20 Years of Coalbed-Methane Production in Southeastern Montana. *In*: **Geology of Montana**. Montana Bureau of Mines and Geology, 2020. v. 2: Special Topics, p. 1-13.

MESQUITA, Daniele Costa de. **Análise da integração de águas superficiais e subterrâneas na gestão de recursos hídricos: um estudo no Quadrilátero Ferrífero - MG**. 2023. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

MIGUEL, R.; CAMPOS, J. **Relações entre mineração e recursos hídricos subterrâneos: o caso da Mina Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG**. Revista Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 38, n. 1, e-30219, p. 1–15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v38i1.30219>.

MOSER, B.; COOK, P. G.; MILLER, A. D.; DOGRAMACI, S.; WALLIS, I. **The hydraulic evolution of groundwater-fed pit lakes after mine closure**. Groundwater, Hoboken, v. 62, n. 6, p. 1047–1061, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/gwat.13419>.

MOURA, André. **Recarga artificial de aquíferos: os desafios e riscos para garantir o suprimento futuro de água subterrânea**. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Cuiabá. **Anais [...]**. São Paulo: ABAS, 2004.

MOURÃO, Maria Antonieta Alcântara; LOUREIRO, Celso de Oliveira; ALKMIM, Fernando Flecha. **O Aquífero Cauê e unidades hidrogeológicas associadas: principais características hidroquímicas**, porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero, MG. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006, Curitiba. **Anais [...]**. São Paulo: ABAS, 2006.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, London, v. 372, n. 71, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71.

PINTO-COELHO, R. M.; HAVENS, K. **Crise nas águas: educação, ciência e governança juntas evitando conflitos gerados pela escassez e pela perda da qualidade das águas**. Belo Horizonte: Recléo Editora Ltda., 2015. 162 p. ISBN 978-85-61502-05-8.

PYNE, R. David G. **Groundwater Recharge and Wells: A Guide to Aquifer Storage Recovery**. Boca Raton: Lewis Publishers; CRC Press, 1995.

RAMBAGS, Femke *et al.* **Aquifer Storage and Recovery (ASR): Design and operational experiences for water storage through wells**. Nieuwegein: KWR Watercycle Research Institute; PREPARED Project, 2013. (Technical Report 2012.016).

RÓŹKOWSKI, K.; ZDECHLIK, R.; CHUDZIK, W. Open-pit mine dewatering based on water recirculation: case study with numerical modelling. *Energies*, v. 14, n. 15, art. 4576, 2021. DOI: 10.3390/en14154576.

U.S

SHUBO, T.; FERNANDES, L.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **An overview of managed aquifer recharge in Brazil**. *Water*, Basel, v. 12, n. 4, 1072, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12041072>.

SILVA, R. R. C. da; SANTOS, M. M. dos. **Análise das técnicas de rebaixamento de lençol freático aplicado em solos sedimentares**. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, Ponta Grossa, v. 10, n. 1, p. 1–13, 2018.

SLOAN, S.; COOK, P. G.; WALLIS, I. **Managed aquifer recharge in mining: a review**. *Groundwater*, Hoboken, v. 61, n. 3, p. 305–317, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/gwat.13311>.

SMITH, L. **Clogging mechanisms in Managed Aquifer Recharge: a case study at Mining Area C**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) - School of Earth and Environment, The University of Western Australia, Crawley, 2014.

SUESCUN, L. C.; COOK, P.; PARTINGTON, D.; HUGMAN, R.; WALLIS, I. **Influence of aquifer properties on optimal location and duration of groundwater level monitoring to predict aquifer recovery after mine closure** [J. Hydrol. 631 (2025) 133686]. *Journal of Hydrology*, v. 660, art. 133792, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133792>.

VAN LOPIK, J. H.; HARTOG, N.; SCHOTTING, R. J. **Taking advantage of aquifer heterogeneity in designing construction dewatering systems with partially penetrating recharge wells**. *Hydrogeology Journal*, Cham, v. 28, n. 7, p. 2487–2500, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02226-7>.

WINDSOR, S.; ROUHIAINEN, C.; WILLIS-JONES, B. **Cloudbreak mine water conveyance infrastructure**. *Water Practice and Technology*, v. 7, n. 1, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/wpt.2012.021>>