

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**CUSTOS AMBIENTAIS NA ANÁLISE DE VIABILIDADE
ECONÔMICA DE PROJETOS DE MINERAÇÃO: APLICAÇÃO EM
ÁREA CARBONÍFERA DO ESTADO DE SANTA CATARINA**

ADRIANO DE PAULA FONTAINHAS BANDEIRA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Carlos André Bulhões Mendes

Banca Examinadora

Prof. Dr. Olavo Correa Pedrollo

IPH / UFRGS

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Depto. de Engenharia de Minas / UFRGS

Prof. Dr. José Paulo Soares de Azevedo

COPPE / UFRJ

Porto Alegre, novembro de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**CUSTOS AMBIENTAIS NA ANÁLISE DE VIABILIDADE
ECONÔMICA DE PROJETOS DE MINERAÇÃO: APLICAÇÃO EM
ÁREA CARBONÍFERA DO ESTADO DE SANTA CATARINA**

ADRIANO DE PAULA FONTAINHAS BANDEIRA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Carlos André Bulhões Mendes

Banca Examinadora

Prof. Dr. Olavo Correa Pedrollo

IPH / UFRGS

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Depto. de Engenharia de Minas / UFRGS

Prof. Dr. José Paulo Soares de Azevedo

COPPE / UFRJ

Porto Alegre, novembro de 2006

“Sê escravo do saber se queres ser
verdadeiramente livre.”

Sêneca

Agradecimentos

Ao Professor Carlos André Bulhões Mendes pela valiosa orientação e pela colaboração;

Aos professores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela dedicação e pelo conhecimento transmitido;

Aos professores da Banca, Olavo Correa Pedrollo, Jair Carlos Koppe, André Luiz Lopes da Silveira e José Paulo Soares de Azevedo;

Às secretárias Márcia e Nadir, pela boa vontade e ajuda despendida durante o curso de mestrado;

Aos meus colegas do IPH pelo companheirismo;

Ao Sr. Cléber José Baldoni Gomes, que me disponibilizou as informações referentes à mineração de carvão na área do SIECESC, sem as quais não seria possível o desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus chefes Sr Marco Antônio Vanni e Cristina Fleig Mayer pelo apoio, sem o qual não teria sido possível a conclusão deste curso;

Aos meus amigos e familiares, por todo incentivo e amizade oferecida.

Aos meus pais, ao meu irmão e aos meus avós, ainda que distantes, sempre estiveram presentes, acreditando em mim;

À minha querida esposa Renata, que sempre está ao meu lado, me estimulando e incentivando. Muito obrigado pelo seu amor e carinho.

RESUMO

Os impactos ambientais provocados por determinadas atividades econômicas podem causar prejuízos em terceiros já que a ação deletéria sobre o meio prejudica e, em alguns casos, inviabiliza a existência de outras atividades. Nesse contexto, enquadra-se a mineração de carvão. Em tal atividade, o contato da água – superficial, subterrânea ou pluvial – com elementos específicos resultantes das escavações, na presença de oxigênio e de microorganismos, forma a chamada drenagem ácida de mina que, em grande parte dos casos, é despejada em cursos d'água adjacentes prejudicando outros usos da água. Assim, o presente trabalho tem por objetivo elaborar uma metodologia de planejamento da exploração do carvão mineral em bacias hidrográficas que busque a produção ótima do minério com a internalização dos custos de tratamento do efluente gerado a fim de que os parâmetros de qualidade da água, estabelecidos pela Resolução 357 do CONAMA, sejam respeitados e, desse modo, diminua a incidência de prejuízos em terceiros. Tal metodologia é pautada pela elaboração de um modelo capaz de simular, ao longo do tempo de exploração das minas, a carga de poluentes lançada nos cursos d'água de uma bacia hidrográfica. Após a coleta de dados, a implantação da metodologia se dá por diversos cenários. O primeiro deles é a análise da situação em que não há internalização dos custos ambientais. Constatou-se que os limites estabelecidos pelo CONAMA são ultrapassados. O segundo cenário caracteriza-se pela tentativa de enquadramento dos cursos d'água na classe 1, com a internalização dos custos ambientais. Dadas as condições de tratamento de efluentes, tal enquadramento não foi possível. O terceiro cenário diz respeito à tentativa de enquadramento na classe 3 dadas as mesmas condições do segundo cenário. Os resultados mostram ser possível tal enquadramento. A elevação dos custos ambientais para enquadramento na classe 1 determina o quarto cenário. Ainda como forma de enquadrar os cursos d'água da bacia na classe 1, é estabelecida uma divisão na operação das minas. Assim, no quinto cenário são consideradas apenas três minas e no sexto cenário são consideradas as demais. Além das concentrações de determinados parâmetros ao longo do tempo, também são mostrados os gráficos de produção das minas em cada cenário. Por fim, são comparados os ganhos obtidos em cada cenário e os fluxos de caixa dos cenários 1, 2 e 3 para que sirvam de subsídio para a classificação das águas da bacia segundo a Resolução 357.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica, Mineração, Otimização, Drenagem Ácida de Mina.

ABSTRACT

The environmental impacts provoked by determined economic activities can cause financial damages to third parts since the deleterious action harms and, in some cases, makes impracticable the existence of other activities. In this context, the coal mining is situated. In such activity, the contact of superficial water, groundwater or rainwater with specific elements resultant from the drillings, in presence of oxygen and microorganisms, forms the acid mine drainage, that, to a large number of the cases, is poured into adjacent rivers harming other uses of the water. Thus, the present work aims to elaborate a methodology of the mineral coal exploitation planning in river basins that achieves the excellent production of the ore with the costs of effluent treatment internalization so that water quality parameters, established by CONAMA's Resolution 357, are respected and there is no incidence of damages to third parts. Such methodology is based on the elaboration of a model that is capable of simulating, during the mines exploitation time, the load of pollutants launched in river basins water. After the data collection, the methodology is implemented in diverse scenarios. The first one of them is the analysis of the situation where there is no environmental costs internalization. It is evidenced that the limits established are exceeded. The next scenario is characterized by the attempt of framing water courses in class 1, with environmental costs internalization. Given the conditions of treatment of effluent, such framing was not possible. The third scenario considers the attempt of framing in class 3 given the same conditions of scene 2. The results show that the framing is possible. The rise of environmental costs to frame in class 1 determines the fourth scenario. Still as a form to fit water courses in class 1, a division in mine's operation is established. Thus, in the fifth scenario only three mines are considered and in the sixth scenario the others are considered. In addition to the concentrations of certain parameters during the exploitation period, the graphs of mine production in each scene are also shown. Finally, the profits obtained in each scenario and the cash flows of scenes 1, 2 and 3 are compared in order to serve as subsidy to classify the river basin waters according to CONAMA's Resolution 357.

Keywords: River Basin, Mining, Optimization, Acid Mine Drainage.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS USADAS NO TEXTO

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

APP: Área de Proteção Permanente

BFV: Bacia de Fluxo Vertical

CaO: Óxido de Cálcio

Carvão CE 4500: Carvão com poder calorífico de 4.500 kcal/kg.

CASAN: Companhia Catarinense de Águas e Saneamento

CETEM: Centro de Tecnologia Mineral

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente

DAM: Drenagem Ácida de Mina

DNAEE: Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

EUA: Estados Unidos da América

Fe²⁺: Íon Ferroso

Fe³⁺: Íon Férrico

Fe(OH)₃: Hidróxido de Ferro

FeS₂: Sulfeto de Ferro

GAMS: *Generical Algebraic Modelling System*

GBH: Gerenciamento de Bacia Hidrográfica

H⁺: Cátion Hidrogênio

H₂O: Água

H₃AsO₃: Ácido Arsenioso

H₃AsO₄: Ácido Arsênico

ISO: *International Standardization Organization*

L: Litro

LRM: Leito de Remoção de Manganês

MCT: Ministério da Ciência e Tecnologia

MMA: Ministério do Meio Ambiente

MME: Ministério das Minas e Energia

MNT: Modelo Numérico do Terreno

O₂: Oxigênio

OCDE: Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico

pH: Potencial Hidrogeniônico

ROM: *Run of Mine*

SDM: Secretaria de Estado e Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente de Santa Catarina

SO₄²⁻: Íon Sulfato

SIENCESC: Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina

UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina

UNESC: Universidade do Extremo Sul Catarinense

VPL: Valor Presente Líquido

WCI: *World Coal Institute*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Abordagem do Problema	26
Figura 2	Diferentes cargas de poluentes na bacia.....	40
Figura 3	Tetraedro de DAM	43
Figura 4	Célula de lagoa aeróbica	47
Figura 5	Lagoa anaeróbica	48
Figura 6	Canal calcáreo óxico	48
Figura 7	Dreno calcáreo anóxico	48
Figura 8	BFV em construção	49
Figura 9	LRM em operação	49
Figura 10	Bacias primária e secundária	49
Figura 11	Lucro (π) x quantidade produzida em um intervalo de tempo (Q_i)....	56
Figura 12	Custo (D) em função do acúmulo de resíduos (Z_i).....	56
Figura 13	Maximização do bem estar social.....	57
Figura 14	Fluxograma metodológico.....	59
Figura 15	Localização das bacias dos Rios Tubarão, Urussanga e Araranguá...	72
Figura 16	Localização da área carbonífera.	73
Figura 17	Sub-bacia do rio Sangão.	75
Figura 18	Desenho esquemático da sub-bacia do Rio Sangão.....	76
Figura 19	Localização dos postos fluviométricos na Bacia do Rio Araranguá..	78
Figura 20	Variação da vazão mínima específica mensal dos postos fluviométricos da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá.....	78
Figura 21	Localização das minas na sub-bacia do Rio Sangão.	84
Figura 22	Fluxo de caixa para o ciclo de vida de empreendimentos mineiros...	92
Figura 23	Gráfico de produção das minas no caso base.	94
Figura 24	Gráfico das concentrações de ferro no caso base.	96
Figura 25	Gráfico das concentrações de sulfatos no caso base.....	97
Figura 26	Gráfico das concentrações de manganês no caso base.	98
Figura 27	Gráfico das concentrações de ferro no caso 1	100
Figura 28	Gráfico das concentrações de sulfato no caso 1.	101
Figura 29	Gráfico das concentrações de manganês no caso 1.	102
Figura 30	Gráfico de produção das minas no caso 2.	105
Figura 31	Gráfico das concentrações de ferro no caso 2.	106
Figura 32	Gráfico das concentrações de sulfatos no caso 2.....	107

Figura 33	Gráfico das concentrações de manganês no caso 2.	108
Figura 34	Gráfico de produção de minas para o caso 3.	111
Figura 35	Gráfico das concentrações de ferro no caso 3.	112
Figura 36	Gráfico das concentrações de sulfatos no caso 3.....	113
Figura 37	Gráfico das concentrações de manganês para o caso 3	114
Figura 38	Gráfico da produção de mina para no caso 4a.....	116
Figura 39	Gráfico das concentrações de ferro no caso 4a.....	117
Figura 40	Gráfico das concentrações de sulfato no caso 4a.	118
Figura 41	Gráfico das concentrações de manganês no caso 4a.	119
Figura 42	Gráfico da produção de mina no caso 4b.	121
Figura 43	Gráfico das concentrações de ferro no caso 4b.	122
Figura 44	Gráfico das concentrações de sulfatos no caso 4b.....	123
Figura 45	Gráfico das concentrações de manganês no caso 4b.	124
Figura 46	Fluxos de caixa relativos aos casos base, 2 e 3.	125
Figura 47	Redução da curva dos fluxos de caixa: Caso 3/Caso Base, Caso 2/Caso Base e Caso 3/Caso 2.	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classificação das águas doces	18
Tabela 2	Mineração no Brasil: Distribuição de atribuições públicas	29
Tabela 3	Impactos da mineração no Brasil	30
Tabela 4	Composição de DAM na mina de zinco e cobre de Golinsky, EUA..	43
Tabela 5	Composição de efluente de construção de túnel em Idaho Springs, EUA.	44
Tabela 6	Contaminante objeto do tratamento.....	50
Tabela 7	Redução de efluentes obtida por diferentes tipos de cobertura	51
Tabela 8	Composição de custos de fechamento de mina	52
Tabela 9	Variáveis de entrada do modelo.	60
Tabela 10	Bacias hidrográficas localizadas na área carbonífera.....	74
Tabela 11	Estações fluviométricas pertencentes à Bacia do Rio Araranguá.....	77
Tabela 12	Área drenada pelos cursos d'água da bacia do rio Sangão.....	79
Tabela 13	Vazões mínimas em m ³ /s na bacia do Rio Sangão.....	79
Tabela 14	Valores de precipitação adotados no modelo.	80
Tabela 15	Composição da DAM nas minas da bacia do Rio Araranguá	81
Tabela 16	Padrão para corpo d'água classe 1.....	81
Tabela 17	Padrão para corpo d'água classe 3.....	82
Tabela 18	Classificação de uso do solo por curso d'água.....	82
Tabela 19	Dados relacionados às minas.....	83
Tabela 20	Participação do custo de capital no total gasto com tratamento	86
Tabela 21	Tratamentos, custos e remanescência de metais.....	87
Tabela 22	Custos de tratamento	87
Tabela 23	Parcelas mensais dos custos de tratamento	88
Tabela 24	Custos totais de fechamento	89
Tabela 25	Custos mensais para o fechamento de mina	89
Tabela 26	Variáveis gerais do modelo	90
Tabela 27	Variáveis comuns relativas às minas.....	91
Tabela 28	Custos de tratamento para o caso 1	99
Tabela 29	Custos de tratamento para o caso 3.	109
Tabela 30	Custos de tratamento para o caso 4a.....	115
Tabela 31	Custos de tratamento para o caso 4b.	120

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 RELEVÂNCIA DO ESTUDO	15
1.2 ASPECTOS LEGAIS	18
1.3 HIPÓTESES E QUESTÕES DA PESQUISA	20
1.3.1 Hipótese Um (H1)	20
1.3.2 Questões-chave da Hipótese Um.....	20
1.3.3 Hipótese Dois (H2).....	21
1.3.4 Questões-chave da Hipótese Dois	21
1.3.5 Hipótese Três (H3)	21
1.3.6 Questões chave da Hipótese Três	21
1.4 OBJETIVOS.....	22
1.4.1 Objetivo Geral	22
1.4.2 Objetivos Específicos	22
1.5 JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS	23
1.5.1 No contexto institucional.....	25
1.5.2 No contexto da sociedade e das empresas.....	25
1.6 ABRANGÊNCIA E DELIMITAÇÃO DE TÓPICOS ENVOLVIDOS	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1 SITUAÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA NO MUNDO	28
2.1.1 Brasil.....	28
2.1.2 Reino Unido.....	30
2.1.3 Países Baixos	31
2.1.4 Eslováquia	31
2.1.5 Hungria	32
2.1.6 Noruega	32
2.1.7 Finlândia.....	33
2.1.8 Suécia	34
2.1.9 Alemanha.....	34
2.1.10 Polônia	35
2.1.11 França	35
2.1.12 Sérvia e Montenegro.....	36
2.1.13 Macedônia	36
2.2 FORMAÇÃO DOS IMPACTOS DA MINERAÇÃO EM CORPOS D'ÁGUA.....	37
2.3 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO DE USO DOS RECURSOS NATURAIS	38
2.4 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA (DAM).....	41
2.5 TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO	44
2.5.1 Lavra subterrânea	44
2.5.2 Lavra a céu aberto	45

2.6	TECNOLOGIA DE MANEJO DE RESÍDUOS	46
2.6.1	Tratamento Passivo	47
2.6.2	Tratamento Ativo.....	50
2.6.3	Fechamento de mina.....	51
2.7	OPERAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS NÃO RENOVÁVEIS	53
2.7.1	Análise da indústria mineradora competitiva	54
2.8	SUPORTE COMPUTACIONAL: GAMS	57
3	METODOLOGIA.....	59
3.1	OBTENÇÃO DE DADOS	60
3.1.1	Dados da bacia.....	61
3.1.2	Dados relacionados à extração do carvão mineral	61
3.1.3	Dados relacionados ao tratamento de efluentes.....	62
3.1.4	Dados relacionados ao fechamento da mina	62
3.2	CONSTRUÇÃO DE FUNÇÕES ECONÔMICAS E DE EQUAÇÕES DE RESTRIÇÃO.....	63
3.3	APLICAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	66
3.4	RESULTADOS	67
3.5	ANÁLISE DE CENÁRIOS.....	67
4	ESTUDO DE CASO: ÁREA CARBONÍFERA DO ESTADO DE SANTA CATARINA.....	69
4.1	A MINERAÇÃO	69
4.2	BACIAS HIDROGRÁFICAS ABRANGIDAS.....	70
4.3	A SUB-BACIA DO RIO SANGÃO	74
4.3.1	Dados hidrometeorológicos da sub-bacia do Rio Sangão	76
4.3.2	Condições de qualidade da água.....	80
4.3.3	Dados relacionados à extração	82
4.3.4	Dados relacionados ao tratamento de efluentes.....	85
4.3.5	Dados relacionados ao fechamento de mina	88
5	APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	90
5.1	VARIÁVEIS DE ENTRADA COMUNS	90
5.2	FORMATO DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	91
5.3	O CASO-BASE: SEM TRATAMENTO DE EFLUENTES E SEM PLANO DE FECHAMENTO.....	93
5.4	CASO 1: ENQUADRAMENTO DAS ÁGUAS DA BACIA NA CLASSE 1	99
5.5	CASO 2: ENQUADRAMENTO DAS ÁGUAS DA BACIA NA CLASSE 3	103
5.6	CASO 3: ELEVAÇÃO DOS GASTOS COM TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA ENQUADRAMENTO NA CLASSE 1.	109
5.7	CASO 4A: OPERAÇÃO DAS MINAS DO TRECHO NORTE DO RIO SANGÃO	115
5.8	CASO 4B: OPERAÇÃO DAS MINAS DO TRECHO SUL DO RIO SANGÃO E DE SEUS AFLUENTES	120

5.9 COMPARAÇÃO ENTRE OS FLUXOS DE CAIXA DO CASO BASE COM OS CASOS 2 E 3.....	125
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
6.1 SÍNTESE DO TRABALHO.....	127
6.2 CONCLUSÃO.....	128
6.3 LIMITAÇÕES E PROPOSTA DE NOVOS TRABALHOS	129

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados a relevância do estudo, aspectos legais a ele relacionados, os objetivos gerais e específicos e as hipóteses e questões da pesquisa. Justifica-se a escolha do tema e dos objetivos e detalham-se a abrangência e a delimitação dos tópicos envolvidos no estudo.

1.1 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Pode-se dizer que a escassez de água não está relacionada apenas com fenômenos meteorológicos, mas também com a forma pela qual esse recurso é utilizado. O aparecimento de novas atividades aliado à expansão daquelas existentes em determinada região provoca acréscimos na demanda por seus recursos naturais, dentre os quais se destaca a água.

Hardin (1968) cita um exemplo de esgotamento de um recurso natural causado pela exploração sem planejamento, denominado “A Tragédia dos Comuns”. O recurso em questão é um campo, sem propriedade definida, onde a população leva seu rebanho para pastar. O problema começa a tomar forma à medida que cada pastor resolve ampliar seu rebanho, pois seu incremento lhe acarreta um benefício maior que o dano causado pela redução da disponibilidade de pasto, já que este último é repartido por todos os pastores. Por se tratar de um recurso finito, à medida que os pastores levavam mais animais ao campo, uma menor área de pasto restava a todos. Sem o adequado planejamento de uso, o recurso se esgotou causando danos aos próprios pastores e, também, à sociedade pela perda da renda gerada pela atividade. Nesse caso, pode-se, ainda, dizer que o excesso de animais de um pastor provocou efeitos adversos na atividade econômica de outro pastor e na sociedade em que vive.

Quando uma ação de um produtor ou consumidor tem influência sobre outros produtores ou consumidores, sem que seja levada em consideração na fixação do preço de mercado, diz-se que ocorreu uma externalidade. Esta pode ser positiva, quando o efeito é benéfico, ou negativa, caso contrário (PINDYCK; RUBINFELD, 2002).

São inúmeros os casos em que a pressão sobre determinado recurso provoca externalidades negativas. May e Rocha (1998) comentam que a expansão da atividade cacaeira no sul da Bahia, em área outrora ocupada por Mata Atlântica, foi responsável pela

redução da disponibilidade hídrica da região, devida à sedimentação nos rios e à redução da infiltração natural no solo. Cunha e Bastos Filho (1998) descrevem que a extração de lenha das florestas do estado do Paraná para o fornecimento de energia gera importantes externalidades negativas, nas formas de redução da biodiversidade, destruição da paisagem e deterioração da qualidade dos recursos hídricos. Tais externalidades prejudicam, sobretudo, a população rural, desestabilizando o mercado de trabalho do setor com conseqüências que se estendem ao mercado de trabalho urbano. Mueller (1998) cita a mineração como uma das atividades degradadoras de matas ciliares nos estados de Minas Gerais e Bahia. A lavagem de minérios e a lixiviação de resíduos formam uma substância que, ao escoar para os cursos d'água, destrói a mata ciliar causando assoreamento e poluição.

No que se refere à utilização dos recursos hídricos, a ocorrência de externalidades é agravada por ser a água considerada um bem público, ou seja, aquele cujos consumidores não sofrem restrição para consumir e cujo custo de ampliação de consumo é nulo.

Assim surgem conflitos pelo seu uso, protagonizados por empreendedores interessados em diluir resíduos de suas atividades ou em usar a água em determinada fase de seu processo de produção, e pela população, interessada no seu abastecimento e no despejo dos resíduos domésticos. A fim de atender a todos os agentes e, assim, prover desenvolvimento econômico aliado à preservação ambiental, é imprescindível um planejamento de uso dos recursos hídricos que considere como unidade territorial a bacia hidrográfica em questão e que defina direitos e responsabilidades, fazendo com que todos os custos sejam internalizados. O planejamento inadequado ou sua não execução pode levar ao esgotamento dos corpos d'água, causando prejuízo a todos os agentes envolvidos.

Nesse contexto, cita-se o exemplo da atividade de mineração, em particular daquela relacionada à exploração de carvão. Quando o carvão é retirado, ele é acompanhado por grande quantidade de resíduos, que, depois de separados, são depositados em locais próximos às minas. A chuva, ao percolar através dos resíduos, reage com eles e adquire elementos nocivos. Em paralelo, a lavra subterrânea pode permitir o contato do minério com o lençol freático. O líquido resultante é o efluente conhecido como DAM (Drenagem Ácida de Mina). A DAM pode escoar na superfície do terreno até os cursos d'água, onde são adicionados aos poluentes já transportados, ou infiltrar no solo, contaminando águas subterrâneas. Após a

exploração da mina, o lançamento da DAM no meio ambiente pode persistir, pois, em geral, as minas são abandonadas sem que haja uma preparação para evitar tal despejo.

Existem diversas formas de tratamento de DAM. Sua utilização, no entanto, é pouco realizada por apresentar altos custos. Assim, formula-se para o caso presente a seguinte questão: Pode a internalização dos custos de tratamento de efluentes e de recomposição da área degradada inviabilizar a exploração de carvão mineral?

Sugere-se, para responder à questão acima, um estudo de planejamento do uso da água para exploração mineral com o objetivo de evitar que essa atividade cause prejuízos em outros empreendimentos ou à sociedade. O mencionado planejamento consiste na internalização dos custos de tratamento do efluente e de recomposição da área, doravante chamado custo de fechamento, em respeito a determinado padrão de qualidade da água nos corpos d'água receptores para a verificação da viabilidade do aproveitamento lucrativo dessa atividade econômica.

Atualmente, por meio de audiências públicas, legislação (tipo enquadramento de rios) ou processos de avaliação de órgãos ambientais, torna-se possível estabelecer um uso da água desejável para um trecho de rio em particular. Tal uso implica no estabelecimento de concentrações desejáveis de parâmetros de qualidade de água (por exemplo, os limites máximos de concentração permitidos pela Resolução 357 do Conselho Nacional de Meio Ambiente). O processo de gestão resulta em medidas de controle ambiental das cargas (intervenções), quando a concentração atual ou projetada (no caso de cenários) é diferente da desejada.

Neste contexto, o problema da gestão da qualidade de água em bacias concentra-se no controle das cargas, de tal forma que um uso específico de um trecho de rio, expresso por padrões de qualidade de água, seja alcançado mediante intervenções nas cargas. Salienta-se, entretanto, que tais operações não devem se resumir à análise de engenharia dos efeitos das cargas na qualidade de água. Esta análise deve incluir restrições econômicas na implantação deste controle, que, por sua vez, se insere em um contexto sócio-político.

1.2 ASPECTOS LEGAIS

O parágrafo 2º do artigo 225 da Constituição Federal Brasileira estabelece que “aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei” (BRASIL, 1988). Com isto não é mais permitido no Brasil o abandono das minas esgotadas, ou consideradas economicamente inviáveis, sem a devida recuperação da área.

Além disso, a Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) determina os padrões de qualidade da água que devem ser atingidos para que se possa fazer determinado uso dos recursos hídricos. Segundo a legislação citada, as águas doces podem se enquadrar em cinco classes distintas. A tabela 1 relaciona a classe com a correspondente destinação da água.

Tabela 1 Classificação das águas doces

Classe	Destinação
Especial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abastecimento para uso humano com desinfecção; ▪ Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; ▪ Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
I	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abastecimento para consumo humano após tratamento simplificado; ▪ Proteção das comunidades aquáticas; ▪ Recreação de contato primário; ▪ Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rente ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; ▪ Proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.
II	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abastecimento para consumo humano após tratamento convencional; ▪ Proteção das comunidades aquáticas; ▪ Recreação de contato primário; ▪ Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; ▪ Aqüicultura e atividade de pesca.
III	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado; ▪ Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas ou forrageiras; ▪ Pesca amadora; ▪ Recreação de contato secundário; ▪ Dessedentação de animais.
IV	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Navegação; ▪ Harmonia paisagística.

(Fonte: Resolução 357 CONAMA/2005.)

Em paralelo, o Código de Mineração, em seu artigo de número quatorze estabelece como parte do Plano de Aproveitamento Econômico a análise da viabilidade econômica da exploração mineral.

Dessa forma, cabe mais um questionamento: o respeito aos limites de concentração de parâmetros de qualidade da água (estabelecidos pela Resolução 357 do CONAMA) pode inviabilizar a exploração mineral?

Com uma resposta afirmativa, a análise da exequibilidade econômica da exploração passa, também, a incluir os custos de tratamento dos resíduos lançados nos corpos d'água. Acredita-se ser este o procedimento correto, já que, no caso contrário, nem sempre seria possível o atendimento dos limites de concentração e as resoluções do CONAMA cairiam em desuso.

Por fim, estabelece a Resolução CONAMA Nº 369, de 28 de março de 2006, no inciso IV do parágrafo sete, que em áreas de proteção permanente (APP) a exploração pode se dar desde que, entre outras exigências, sejam executadas medidas de controle dos meios físicos e bióticos. No inciso V do mesmo parágrafo, a Resolução exige que a exploração deva ter compatibilidade com as diretrizes do plano de recursos hídricos, quando houver.

A Lei 4.771, de 15 de setembro de 1965, classifica como APP as formas de vegetação situadas nas seguintes formações:

- Ao longo dos rios e de qualquer curso d'água desde seus níveis mais altos em faixa marginal de largura mínima variável de acordo com a largura do rio;
- Ao redor de lagoas, lagos ou reservatórios d'água artificiais ou naturais;
- Nas nascentes e "olhos d'água" em raio de 50 metros;
- No topo de morro, montes, montanhas ou serras;
- Nas encostas ou em partes destas;
- Nas restingas, como fixadoras de dunas ou estabilizadoras de mangues;

- Nas bordas de tabuleiros ou chapadas, em limite não inferior a 100 metros da linha de ruptura do relevo;
- Em altitude superior a 1.800 metros.

1.3 HIPÓTESES E QUESTÕES DA PESQUISA

O presente estudo partiu da premissa de que o planejamento de uso dos recursos hídricos por parte da atividade de mineração traz benefícios à sociedade. Os empreendedores tornam-se menos suscetíveis a custos imprevistos, causados por terceiros, e, portanto, podem se organizar melhor e fazer um planejamento mais adequado de suas atividades. A melhor qualidade da água pode, ainda, se tornar um atrativo para a instalação de novas atividades. Enfim, a conjunção da ampliação de atividades econômicas com a melhoria da qualidade da água colabora para um incremento na qualidade de vida e para o crescimento econômico regional.

Supõe-se, também, que todas as empresas mineradoras instaladas na bacia estejam envolvidas no processo de planejamento, embora exista alguma relutância em se inserir neste processo devido ao receio de surgimento de despesas extras.

Para responder à questão da pesquisa, cabe a adoção de algumas hipóteses e a imposição de algumas questões a elas relacionadas.

1.3.1 Hipótese Um (H1)

A análise de viabilidade econômica de um empreendimento mineiro não leva em consideração os custos de tratamento de efluentes nem aqueles referentes ao fechamento da mina (recomposição do solo, paisagismo, entre outros). Dessa forma, o lançamento de cargas poluentes torna-se acentuado assim como os danos causados à área do empreendimento.

1.3.2 Questões-chave da Hipótese Um

1) Como se dá a descarga de poluentes nos corpos d'água? Qual a composição do efluente lançado pela mineração? Quais as formas de tratamento e de recuperação das áreas impactadas?

2) Onde estão localizadas as fontes de poluição?

3) Como é o regime hidrológico da bacia em questão? Existe disponibilidade hídrica para todos os empreendimentos mineiros?

1.3.3 Hipótese Dois (H2)

A internalização dos custos ambientais pode ser considerada como um instrumento econômico de mercado, isto é, uma taxa capaz de exercer um controle do lançamento de cargas poluentes no âmbito de uma bacia hidrográfica.

1.3.4 Questões-chave da Hipótese Dois

1) Como a mineração utiliza os recursos hídricos? Como é dada a produção mineral? Qual a capacidade de assimilação de cargas da bacia, tendo em vista a Resolução CONAMA 357?

2) Qual o custo de tratamento de efluentes? Qual o custo da recuperação das áreas impactadas?

3) De quanto se pode reduzir a emissão de cargas?

1.3.5 Hipótese Três (H3)

A internalização dos custos ambientais não se configura na aplicação de mais um imposto. Com ele, há uma melhoria no bem-estar da população abrangida pela bacia hidrográfica, caracterizada por um aumento de renda devido à ausência das externalidades.

1.3.6 Questões chave da Hipótese Três

1) Qual a produção ótima de cada mina no sentido de maximização do bem estar social? Qual o lançamento de cargas após a adoção do mecanismo de controle?

2) Qual a renda gerada pela mineração após a internalização dos custos ambientais?

Detalhadas as hipóteses e questões-chave que norteiam a presente discussão, passa-se a justificá-las em seus diversos contextos.

1.4 OBJETIVOS

São apresentados, a seguir, os objetivos geral e específicos deste estudo.

1.4.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem como objetivo geral responder à seguinte questão:

- A internalização dos custos de recomposição da área degradada e dos custos de tratamento de efluentes a fim de atender aos limites de concentração de parâmetros de qualidade da água (estabelecidos pela Resolução 357 do CONAMA) pode inviabilizar a exploração mineral?

1.4.2 Objetivos Específicos

É apresentada uma sistemática de análise que aborde a eliminação das externalidades causadas pela poluição das fontes de recursos hídricos por parte da atividade de exploração de carvão mineral, e ilustra-se sua aplicação por meio de um estudo de caso prático.

Para isso, é desenvolvido um modelo matemático de otimização capaz de planejar o uso dos recursos hídricos, configurado pela diluição de resíduos oriundos da mineração de carvão, de uma bacia hidrográfica, considerando os custos de tratamento de efluentes e de fechamento das minas e as restrições impostas pela capacidade de absorção de cargas da bacia hidrográfica.

Além disso, destacam-se como objetivos específicos os seguintes pontos:

- Identificação de uma fundamentação teórica para entender os principais fatores que influenciam o processo de exploração de carvão mineral e o uso dos Recursos Hídricos a ele relacionado;
- Identificação de custos associados ao tratamento de efluentes da mineração de carvão e aqueles associados à recuperação do solo na etapa de fechamento de mina;
- Desenvolvimento um modelo de otimização com o objetivo de maximizar o bem estar social;

- Aplicação e validação do modelo em estudo de caso prático;
- Análise de resultados quanto à eficiência, precisão, praticidade e aplicabilidade em outras bacias.

1.5 JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS

Conforme apresentado, a contaminação dos corpos d'água ocorre, na maioria das vezes, por não se dispor de tratamento adequado ou, em caso de minas abandonadas, pelo fato de não ter sido planejado seu fechamento.

Assim sendo, o presente trabalho tem por objetivo estabelecer um mecanismo econômico para induzir o controle da descarga de DAM, usando como estudo de caso a área de mineração de carvão do estado de Santa Catarina, a fim de reduzir seu contínuo lançamento após o fechamento da mina. Tal mecanismo consiste na inclusão dos custos de tratamento de efluentes e de remediação pós-fechamento na operação da mina. Será estudada a simulação da maximização da renda de todas as minas de carvão localizadas na mesma bacia hidrográfica, considerando as restrições impostas pelos limites toleráveis da concentração de poluentes nos cursos d'água e pelo balanço de massa.

Convém salientar que o simples aumento de renda verificado em determinada região pode ser responsável por um incremento no padrão de qualidade ambiental. Yandle *et al.* (2002) registram que em países da OCDE foi verificado que à medida que a renda per capita se elevava, o ambiente sofria uma contínua deterioração até atingir um ponto máximo. A partir desse ponto, a elevação da renda era responsável pela melhoria dos padrões de qualidade ambiental. Segundo o autor, o fato se deve à maior disposição das pessoas a pagar por uma melhor qualidade de vida. O gráfico correspondente à situação descrita é conhecido como Curva Ambiental de Kuznets.

A análise da questão pelo lado econômico permite dizer que há uma imperfeição no mercado toda vez que for verificada a presença de uma externalidade, seja ela negativa ou positiva. No caso em questão, a descarga de DAM é uma externalidade negativa que deve ser corrigida, pois aponta para uma falha no mercado da mineração de carvão. Como forma de

corrigir imperfeições no mercado, Pindyck (2004) aponta três alternativas: o estabelecimento de um padrão de emissão de poluentes, a arrecadação de uma taxa (*green tax*) sobre o poluente emitido e a distribuição de permissões transferíveis.

O padrão de emissão de poluentes é um limite a partir do qual o agente emissor é penalizado com multas ou outras sanções. É mais usado quando há poucas informações acerca dos custos de redução das emissões, mas é conhecida a quantidade de poluentes emitida.

O estabelecimento de uma *green tax* refere-se à quantia que deve ser paga por unidade de poluente lançada no meio ambiente. É mais indicada para situações em que se tenha certeza sobre os custos de redução da poluição (PINDYCK, 2004).

A distribuição de permissões transferíveis ocorre, por exemplo, no caso do seqüestro de carbono. Cada agente recebe uma permissão de emissão de poluentes e pode vendê-la ou comprar permissões de outro agente, de acordo com suas necessidades de emissão. Esta medida se caracteriza por permitir uma maior flexibilidade para o órgão regulador, tendo em vista que o mercado se ocupa de fiscalizar a obediência dos limites (POLEMIS; RAPANOS, 2005).

Por este motivo, o incentivo econômico utilizado no presente trabalho pode ser entendido como o estabelecimento de uma taxa proporcional à emissão de DAM nos cursos d'água. No entanto, os custos de redução da descarga de DAM são bastante conhecidos, bem como são acessíveis as formas de tratamento. Assim sendo, o custo das emissões será representado no modelo pelo custo de tratamento e pelas formas de tratamento possíveis para que se atinja o padrão de qualidade adequado nos cursos d'água.

Como já observado, a imposição de taxas depende do conhecimento dos custos de redução e o estabelecimento de padrões de emissão baseia-se no conhecimento da quantidade de poluente emitida. Dessa forma, não será considerada no modelo a contaminação das águas subterrâneas por DAM. Isto se deve à complexidade de medição da poluição dos aquíferos e à dificuldade de redução dos níveis de poluição do subsolo. Recomenda-se, no entanto, que, em estudos posteriores, seja verificada a dinâmica hidrogeológica da região para que se possa incluir o devido custo de tratamento.

Por fim, o correto estabelecimento de uma taxa deve abranger todas as atividades que contribuem para a emissão do poluente taxado. Muito embora a DAM seja um poluente

específico da mineração, nele estão presentes substâncias que podem ser encontradas como rejeitos de outras atividades. Além disso, a simples captação de água dos rios locais colabora para o aumento da contaminação, tendo em vista que a redução da vazão dos cursos d'água eleva a concentração dos contaminantes. No modelo pesquisado são consideradas apenas as emissões de poluentes oriundas da mineração.

Assim, são listadas as seguintes justificativas para a realização da pesquisa:

1.5.1 No contexto institucional

a) contribuição para um possível fortalecimento dos Comitês de Bacias Hidrográficas como cenários de discussões e debates acerca do planejamento de uso dos recursos hídricos, já que a bacia se constitui em unidade de estudo;

b) desejo de enfatizar a necessidade de monitoramento de dados relacionados ao uso da água, fortalecendo órgãos públicos responsáveis;

c) necessidade de emprego de pessoal técnico qualificado para que o Comitê de Bacia desenvolva e seja capaz de aplicar estudos técnicos.

É importante que se busque entender que, apesar de ser possível que uma mesma empresa possua os direitos de operação de mais de uma mina, estas minas podem estar a exercer pressão sobre a mesma bacia hidrográfica e, no uso dos recursos hídricos, são competidoras. Dessa forma, faz-se necessária uma arena de discussões, na qual se deve incluir a sociedade, para que a competição não se configure em prejuízo a todos.

1.5.2 No contexto da sociedade e das empresas

A realização desta pesquisa permitirá aos empreendedores inteirar-se sobre a situação dos custos ambientais internalizados no controle da poluição e determinar quais os fatores críticos para esta implantação, bem como suas vantagens e desvantagens. Em relação à sociedade, ressalta-se a importância de se perceber que um recurso escasso, no caso a água, não deve ser tratado somente como um bem público sob pena de se perder o benefício que se pode obter pela manutenção de determinados parâmetros de qualidade da água.

1.6 ABRANGÊNCIA E DELIMITAÇÃO DE TÓPICOS ENVOLVIDOS

A análise do problema apresentado requer a aplicação de conceitos relacionados à economia, à engenharia de minas e à pesquisa operacional no contexto do planejamento de uso dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. A figura 1 exemplifica a abordagem do problema.

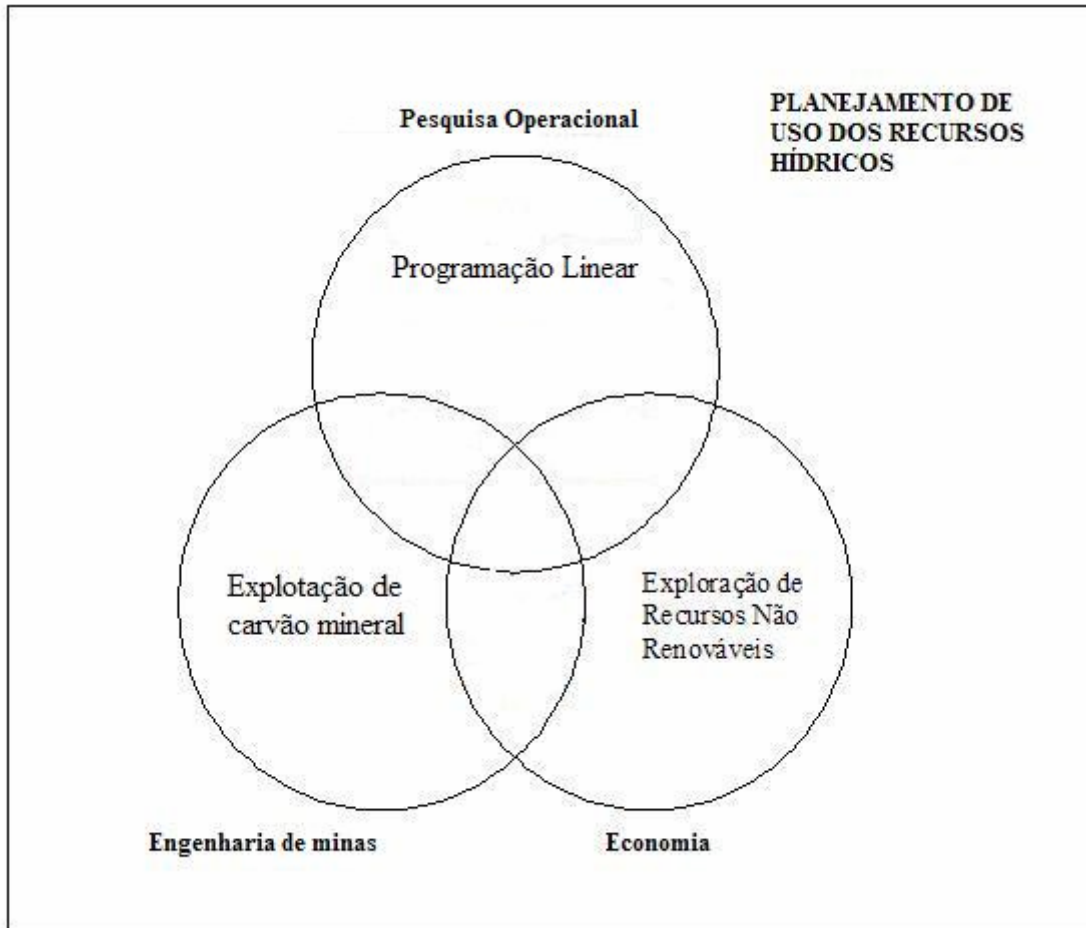


Figura 1 Abordagem do Problema

À economia cabe a teoria da exploração dos recursos naturais não-renováveis. Na exploração de um recurso natural devem ser consideradas suas características e condições de ocorrência. No caso de recursos renováveis são consideradas as taxas de reposição do recurso. Para o carvão mineral, no entanto, não há reposição e suas reservas, por serem finitas, podem vir a se esgotar. Assim sendo, são consideradas as quantidades do recurso disponíveis para extração, isto é, o tamanho das reservas.

A elaboração do modelo de otimização e o algoritmo para sua resolução são conceitos de pesquisa operacional que têm relevante emprego pela engenharia de produção.

A engenharia de minas se faz presente com a indicação das possíveis tecnologias de extração de carvão mineral e seus custos. Seus conceitos também se aplicam no que diz respeito às tecnologias de redução das emissões e custos associados. Por fim, a engenharia de minas se ocupa também de fornecer dados de geração e de redução de poluentes associados à produção e ao manejo de resíduos.

O contexto de planejamento de uso de recursos hídricos é evidenciado, sobretudo, na consideração da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, levando ao estabelecimento de restrições ambientais para a concentração de contaminantes. Lançados nos cursos d'água, os contaminantes presentes na DAM terão suas concentrações estabelecidas pelas vazões nos trechos de rio em que se localizam. A precipitação local colabora para o aumento dos despejos com a percolação na montanha de rejeitos e sua reação com o minério formando DAM. Além disso, o contato com o lençol freático e sua exposição aumenta a vazão efluente e a geração da drenagem ácida.

A intersecção de todos os conceitos acima referidos será aplicada no estudo de caso em parte da área carbonífera onde as mineradoras estão sob supervisão do Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina (SIECESC).

No capítulo 2 aborda-se a teoria necessária ao desenvolvimento do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo apresenta-se a fundamentação teórica relacionada à internalização dos custos ambientais pela mineração de carvão. Para isso, relaciona-se a situação do problema de drenagem ácida no Brasil e em diversos outros países e em seguida é exposta a formação dos impactos da mineração em corpos d'água. Justifica-se o uso da Bacia Hidrográfica como unidade territorial de estudo e em item posterior descrevem-se o mecanismo físico-químico de formação da DAM e as tecnologias de produção e de manejo de resíduos. Após a explanação sobre a teoria econômica de operação de recursos naturais não renováveis, realiza-se uma breve descrição do suporte computacional do modelo a ser implantado.

2.1 SITUAÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA NO MUNDO

2.1.1 Brasil

O Brasil, ao longo de sua história, recebeu importante contribuição do setor de mineração. Tanto na ocupação do território, como no fornecimento de matérias-primas, a exploração de recursos minerais destacou-se como uma das principais vocações do País. No ano 2000, o setor mineral representou 8,5% do Produto Interno Bruto e gerou aproximadamente 500.000 empregos diretos (WAGNER *et al.*, 2002, apud FARIAS, 2002).

Dentre os minerais explorados no País, alguns possuem uma produção expressiva em termos mundiais. É o caso do nióbio (92% da produção mundial), do minério de ferro (20%), tantalita (22%), manganês (19%), alumínio e amianto (11%), grafita (19%), magnesita (9%) e caulim (8%) (BARRETO, 2001).

Como é apresentado adiante, a exploração de recursos minerais provoca impactos ambientais que não se restringem às áreas de retirada das riquezas. Sobretudo quando se trata de recursos hídricos, os efeitos adversos podem se estender por grandes distâncias, pelo transporte de substâncias nocivas nos cursos d'água, e são em alguns casos de difícil remediação, com destaque para a contaminação do solo e de águas subterrâneas. No Brasil, tal

situação depara-se com a complexidade jurídica de estabelecimento de deveres e responsabilidades (FARIAS, 2002). Na tabela 2, apresenta-se a distribuição de atribuições governamentais em relação à proteção ambiental e ao planejamento da mineração (SINTONI, 1994, *apud* FARIAS, 2002).

Tabela 2 Mineração no Brasil: Distribuição de atribuições públicas

ATIVIDADE DE MINERAÇÃO	PODER MUNICIPAL	PODER ESTADUAL	PODER FEDERAL
REQUERIMENTO DE CONCESSÃO OU LICENÇA	Leis de uso e ocupação do solo	Licença ambiental por Legislação Federal	Deferimento ou indeferimento
PESQUISA MINERAL	Leis de uso e ocupação do solo	Licença ambiental por Legislação Federal	Acompanhamento e Aprovação ou Negação
LAVRA MINERAL	Alvará de funcionamento	Análise do EIA/RIMA e licença ambiental por Legislação Federal	Acompanhamento e Fiscalização Mineral
RECUPERAÇÃO DA ÁREA MINERADA	Definição de uso e ocupação do solo criado	Licença ambiental por Legislação Federal	-

(Fonte: adaptado de Sintoni, 1994, *apud* Farias, 2002).

Ressalta-se que a Legislação Federal citada na tabela 2 corresponde ao conjunto de leis ambientais e relativas à mineração aplicadas à definição de diretrizes e regulamentações e à atuação na concessão e na fiscalização de seu cumprimento.

Pode-se notar a dificuldade de delimitação das responsabilidades entre as três esferas de poder (União, Estados e Município) em relação à mineração. Também é fácil verificar a falta de entrosamento com a sociedade civil para a elaboração de uma política mineral no Brasil que venha a estabelecer parâmetros e critérios de desenvolvimento sustentável da atividade, tendo em vista seu papel importante na história e no desenvolvimento do País. Como resultados dessa falta de sintonia histórica, diversos impactos ambientais foram causados na exploração das riquezas minerais brasileiras. Farias (2002) relaciona a mineração de ferro, ouro, chumbo, zinco, prata, carvão, calcário, gipsita e cassiterita com os impactos causados nas respectivas áreas de ocorrência. A tabela 3 é elaborada com base nesses dados.

Tabela 3 Impactos da mineração no Brasil

MINÉRIO	ESTADO	PRINCIPAIS IMPACTOS
Ferro	MG	Antigas barragens de contenção e poluição das águas superficiais
Ouro	PA	Contaminação de cursos d'água por mercúrio
	MG	Contaminação de cursos d'água por arsênio
	MT	Contaminação de cursos d'água por mercúrio
Chumbo, zinco e prata	SP	Contaminação de cursos d'água por arsênio
Chumbo	BA	Contaminação de cursos d'água por arsênio
Carvão	SC	Contaminação de curso d'água e aquíferos subterrâneos por drenagem ácida de mina
Calcário	MG e SP	Mineração em áreas de cavernas com impactos no patrimônio espeleológico
Gipsita	PE	Desmatamento para uso da lenha nos fornos de queima de gipsita
Cassiterita	RO e AM	Destruição da floresta e de leitos de rios

(Fonte: adaptado de Farias, 2002).

No entanto, Farias (2002) relata que o minerador brasileiro tem feito esforços para acompanhar as demandas atuais em torno da questão ambiental e da mineração. O autor aponta que as maiores empresas estão aplicando técnicas de exploração mais modernas e ambientalmente satisfatórias e promovendo estudos para implantação da ISO 14.001, tendo algumas já obtido esse resultado. Por fim, acredita o autor que as empresas de mineração já perceberam a necessidade de internalização dos custos de recuperação ambiental e reconhecem como legítimas as reivindicações das comunidades.

2.1.2 Reino Unido

O Reino Unido tem uma rica história de mineração de carvão e de metais, contudo, a maior parte de suas reservas está esgotada e suas minas, em geral, já foram abandonadas. Devido ao inadequado fechamento, a contaminação das águas persiste até os dias atuais. Ademais, a legislação britânica não responsabiliza os proprietários de minas abandonadas até 1º de janeiro de 2000 pelos danos por elas causados, a menos que as minas sejam comprovadamente a causa desses danos. Devido à complexidade da movimentação hidrogeológica, a comprovação dos danos ambientais torna-se difícil.

Aproximadamente 2.500 km de cursos d'água e 9.000 km² de área de lençol freático estão contaminados por águas oriundas de mineração (DAM) e podem não atender aos

padrões exigidos por órgãos locais (JARVIS; REES, 2004). Tal situação faz com que a poluição gerada pela mineração seja uma das mais severas e mais abrangentes formas de poluição aquática no Reino Unido.

2.1.3 Países Baixos

A mineração de carvão em larga escala entre 1900 e 1975 extraiu 600 milhões de toneladas de minério de doze diferentes minas (MISERE; WINGS, 2004). Concentradas na região de South Limburg, tais minas foram fechadas entre 1967 e 1974, quando também foi cessado o bombeamento d'água de seu interior. Desde então vem ocorrendo uma significativa elevação do nível d'água do subsolo. Convém salientar que, por se tratar de DAM, o surgimento na superfície pode provocar externalidades negativas.

Durante o período mencionado, no entanto, houve a preocupação por parte dos responsáveis em construir barragens para impedir o fluxo de água para o interior das minas. Na região de Kenkrade, até 1994 havia o bombeamento que mantinha baixo o nível d'água a fim de preservar as minas da vizinha Alemanha. Com o encerramento das atividades das minas alemãs, o bombeamento foi cessado e o nível d'água vem se elevando.

Apesar da elevação do nível d'água, o contínuo monitoramento indica que não deve haver contato com as águas superficiais e que, portanto, é baixo o risco de contaminação das fontes de abastecimento d'água.

2.1.4 Eslováquia

A atividade de mineração na Eslováquia teve destaque durante a Idade Média com a retirada de ouro, prata, cobre e ferro. A exploração de carvão, magnesita e gipsita iniciou-se no séc. XX e segue ativa até os dias de hoje.

Este país, contudo, sofre com as conseqüências do mau planejamento da exploração dos recursos minerais. Bajtos (2004) relata que em diversos locais havia mineração próxima a fontes de abastecimento d'água das cidades. Com a exploração descuidada, as minas abrangeram as fontes e, hoje em dia, a água floresce de dentro das minas, já contaminada. Em outras palavras, há uma contínua descarga de DAM na superfície, a qual não recebe tratamento algum. O mesmo autor mostra, ainda, o exemplo de contaminação das águas do

Rio Smolnik. Neste curso d'água, o descuido provocou a drenagem de água contaminada por metais e sulfatos oriundas do depósito de pirita a ele próximo.

2.1.5 **Hungria**

As reservas minerais húngaras mais importantes situam-se na região dos montes Transdanubianos. Em grande parte, tais reservas estão no mesmo nível ou abaixo do lençol freático, o que exige um contínuo bombeamento d'água para fora das minas.

Sárváryné-Szentkatolnay (2004), ministro do meio ambiente e dos recursos hídricos da Hungria, relata que o bombeamento d'água foi responsável pela retirada de 600 m³/min durante as décadas de 1960 e 1970. Aliado à demanda de água para abastecimento, de 200 m³/min, e à capacidade natural de recarga dos aquíferos, de aproximadamente 600 m³/min, o bombeamento foi responsável, em uma área de 8.000 km², pela depressão do nível d'água de 30 a 50m, sendo verificada, em alguns casos 150 m de redução do nível d'água.

Para evitar a contaminação das águas subterrâneas e a posterior contaminação de águas superficiais devido ao bombeamento, autoridades húngaras obrigaram as mineradoras a realizar a retirada de material contaminante do interior das minas, mesmo após o fim da exploração. No entanto, por não haverem planejado a incidência desses custos, várias mineradoras decretaram falência e o material foi, apenas, parcialmente removido.

Atualmente, o governo tem colaborado financeiramente em alguns casos, porém na grande maioria das minas não há controle adequado e os empreendimentos seguem provocando externalidades negativas por intermédio da descarga de DAM.

2.1.6 **Noruega**

Desde 1850, as minas da Noruega já produziram 54 milhões de toneladas de pirita, dois milhões de toneladas de cobre e uma quantidade desconhecida, porém significativa, de DAM oriunda de rocha-sã e dos rejeitos dos minérios (WALDER; NILSSEN, 2005).

A mineração na Noruega tem sido, a exemplo de outros países, uma atividade danosa ao meio ambiente. No ano de 1700, já havia relatos de um “mar morto, sem vida e

envenenado, onde não se vêem peixes nas águas avermelhadas” (Norsk Institut for Water Research *apud* WALDER *et al.*, 2005).

Dede 1970, no entanto, as autoridades de meio ambiente começaram a realizar a análise das águas próximas às minas e os empreendedores vêm sendo obrigados a reduzir a quantidade de efluentes despejada. Assim, no distrito de Røros, apenas a execução de cobertura com material local de minas abandonadas reduziu a descarga de DAM em 80%.

A atitude do governo norueguês foi responsável pela redução da descarga em vários outros locais, mas o monitoramento dessa descarga segue sendo realizado. Foi, ainda, verificada que a caracterização de DAM concentrou-se na qualidade das águas em cursos d’água drenantes e corpos d’água receptores, preterindo uma caracterização geotécnica e geoquímica dos rejeitos gerados. Assim, várias minas deverão sofrer novas avaliações por parte das autoridades do país.

2.1.7 Finlândia

Na Finlândia, a produção de minerais metálicos atingiu seu pico em 1979, quando chegou a 10,3 milhões de toneladas, aproximadamente (RÄISÄNEN *et al.*, 2005). Atualmente, existem apenas quatro minas para extração de sulfetos metálicos, produzindo cerca de 2,4 milhões de toneladas (SÖDERHOLM *apud* RÄISÄNEN *et al.*, 2005).

Existem no país diversas minas abandonadas, com destaque para as de extração de zinco e cobre e de zinco e cobalto. Nestas minas, a contaminação de águas subterrâneas vem sendo evitada através do direcionamento de DAM para bacias de contenção com base de material impermeável. Assim, o efluente pode ser tratado, evitando-se, também, a contaminação de águas superficiais.

No entanto, em uma mina de níquel chamada Hitura, situada na região oeste da Finlândia, a contaminação de águas subterrâneas não foi evitada, apesar dos esforços em sentido contrário. Nesse local a quantidade de rejeitos foi maior do que se supôs e as medidas planejadas não surtiram efeito. Um plano de encerramento das atividades vem sendo realizado.

2.1.8 Suécia

A mineração teve um papel fundamental no desenvolvimento sócio-econômico da Suécia e, ainda hoje, apresenta fundamental importância, principalmente no norte do país.

O total de minas exploradas na Suécia decresceu de cerca de 500 na década de 1920 para 16 nos dias atuais (SALMON *apud* DESTOUNI, 2005). Apesar disso, a produção cresceu de quatro milhões de toneladas em 1900 para 45 milhões de toneladas em 1999 (SGU *apud* DESTOUNI, 2005).

Assim, em 1995 foi estimado que 60% do total de chumbo, cádmio, cobre e zinco descarregado em corpos d'água teve sua origem nos rejeitos da mineração (DESTOUNI, 2005).

Na Suécia, o controle da contaminação de águas por DAM é realizado pela própria empresa, cabendo às autoridades apenas a confirmação dos relatórios apresentados (HOLMGREN *apud* DESTOUNI, 2005). Esse procedimento tem sido satisfatório para o controle da poluição de águas superficiais, mas devido à dificuldade de monitoramento de águas subterrâneas, a credibilidade dos relatórios apresentados tem sido posta em dúvida.

2.1.9 Alemanha

A mineração na Alemanha concentra suas atividades nos seguintes minerais: ferrosos (pirita e minério de ferro), não-ferrosos (chumbo, cobre, zinco e prata), carvão e minerais industriais (barita, potássio e sal).

A maior parte dos problemas relacionados à mineração ocorre na antiga Alemanha Oriental, especialmente nas regiões de Leipzig e Lausitz. Devido ao potencial poluidor da DAM e à escassez de água na área, as autoridades estão incentivando pesquisas e projetos de remediação (HASCHE; WOLKERSDORFER, 2005). Na região de Freiberg, a lixiviação dos rejeitos também provoca a descarga de DAM nos cursos d'água.

Atualmente, os custos de tratamento já vêm sendo considerados e um maior controle por parte das autoridades está sendo conduzido, tanto em relação às minas em operação quanto às aquelas já esgotadas.

2.1.10 Polônia

Entre os minerais explorados economicamente na Polônia destacam-se cobre, ferro, zinco, chumbo, carvão, níquel, sal e enxofre. A partir do início do séc. XX, a exploração desses minerais tornou-se intensa, começando a apresentar um declínio a partir da década de 70.

Atualmente, a principal preocupação em relação à mineração no país recai sobre as minas abandonadas, sua influência no meio ambiente e a necessidade de uso das águas nelas represadas (KULMA *apud* WITKOWSKI, 2005). Na região onde o carvão mineral é retirado, as galerias estão inundadas e são conectadas hidraulicamente, causando grande dificuldade na drenagem e no tratamento da DAM, já que as águas das galerias inundadas são utilizadas nas novas minas da região. Atualmente, esforços vêm sendo feitos para diminuir a quantidade de água retirada por meio de reservatórios de contenção com tratamento da DAM para posterior descarga (WITKOWSKI, 2005).

2.1.11 França

Os minerais mais explorados recentemente na França são carvão, ferro, potássio e urânio. Todos estes já tiveram suas reservas esgotadas ou sua exploração foi encerrada por motivos econômicos. Nos dias de hoje, verifica-se a exploração de flúor, além de ouro e prata (BLACHÈRE, 2004).

Apesar do fim da exploração, problemas ambientais persistem devido ao fechamento inadequado. Estabilidade do solo e contaminação das águas por DAM são os problemas mais encontrados. Assim, o governo francês adotou medidas de obrigatoriedade de restauração dos locais explorados, mas, nesse caso, esbarra no fato de que várias empresas responsáveis por danos ambientais não mais existem, fazendo com que a responsabilidade se volte para o Estado.

Estudos estão sendo feitos com o objetivo de criar uma agência destinada ao fechamento com o objetivo de incentivar medidas de remediação dos locais explorados.

2.1.12 Sérvia e Montenegro

Sérvia e Montenegro possuem uma reserva mineral diversificada. Nestes países há exploração de cobre, chumbo, zinco, níquel, bauxita, ouro, prata, carvão e gás natural, entre outros.

As áreas de mineração sérvias e montenegrinas apresentam-se bastante impactadas, com destaque para o resultado da combinação do despejo de DAM nos cursos d'água próximos com a inadequada construção de represas. Já ocorreram acidentes com tais barragens os quais permitiram que a DAM alcançasse rios como Pek, Drina e Tara, prejudicando o abastecimento da população a jusante (JOVIC *apud* MIDZIC e SILAJDZIC, 2005a).

Devido a tal situação e à complexidade das medidas de recuperação das áreas já impactadas, o país necessita de suporte técnico e financeiro da comunidade internacional, além de transferência de *know-how* e tecnologia para as ações de tratamento (MIDZIC; SILAJDZIC, 2005a).

2.1.13 Macedônia

Os principais minerais extraídos na Macedônia são cobre, ferro, chumbo, metais preciosos e zinco. Dentre estes, destacam-se o zinco e o chumbo, cujas minas localizam-se no nordeste do país, próximas à fronteira com a Bulgária.

Apesar de não haver um planejamento adequado para a exploração mineral (MIDZIC; SILAJDZIC, 2005b), autoridades ligadas ao meio ambiente procedem a um contínuo monitoramento das águas em áreas de mineração. Assim, constata-se que há contaminação por DAM, tornando estas águas impróprias para diversos usos. Os rios Koritniko e Kiselika recebem cerca de um milhão de m³ de água contaminada por ano, a qual não recebe tratamento algum (MIDZIC; SILAJDZIC, 2005b).

Ações para mudança desse quadro estão sendo estudadas pelo governo e incluem a privatização de 22 empresas ineficientes. Cabe lembrar que o regime socialista que vigorou no país costumava empregar mais trabalhadores que o necessário, causando gastos excessivos que não podiam ser compartilhados com os custos ambientais. O governo prepara, ainda,

reformas da legislação para definição de responsabilidades, análise sistêmica do problema com a bacia hidrográfica como foco, educação e treinamento das autoridades públicas com o objetivo de realizar ações de controle ambiental e incentivo ao uso de novas tecnologias de extração (MIDZIC; SILAJDZIC, 2005b).

2.2 FORMAÇÃO DOS IMPACTOS DA MINERAÇÃO EM CORPOS D'ÁGUA

A mineração no mundo começou entre 6000 e 7000 anos atrás, mas apenas após a I Revolução Industrial, no séc. XVIII, tornou-se mais intensa. Esse longo processo de extração mineral foi responsável pelo enriquecimento de muitas nações e, em alguns casos, sua única fonte de rendas. No entanto, além da geração de divisas, a mineração deixou um grande rastro de áreas impactadas (GOUDIE *apud* BATTY, 2005).

A natureza dos problemas ambientais existentes em áreas impactadas pela mineração varia de acordo com o material extraído, com as técnicas de processamento utilizadas, com a geografia e com a geologia do local e, por fim, com o tempo de exploração relacionado (BATTY, 2005). Ainda assim, pode-se dizer que a mineração afeta, de maneira negativa, a biota local, provocando alterações na estrutura das comunidades naturais e reduzindo a biodiversidade. Tal fato deve-se à ocorrência da poluição dos corpos d'água por DAM, provocando um severo empobrecimento da fauna e da flora.

Younger (2004) classifica os impactos nos corpo d'água de acordo com o processo de geração da DAM. Assim, os impactos relacionam-se com a mineração *per se*, ou atividades de extração, com o processamento do minério e disposição dos rejeitos, com o bombeamento d'água para o exterior da mina e com as inundações pós-mineração as quais causam incontrolláveis lançamentos de águas poluídas.

Os impactos oriundos das atividades de extração devem-se ao fato de que as escavações e operações relacionadas a ela podem provocar a alteração da drenagem natural do terreno, desviando os caminhos preferenciais da água. Dessa forma, embora a mineração subterrânea provoque contaminação maior das águas do subsolo, pelo contato desta com o minério, águas superficiais que estejam na continuidade hidráulica do sistema afetado acabam, também, impactadas. Ainda assim, a mineração *per se* provoca, em geral, efeitos localizados e menos visíveis que as outras formas de contaminação.

Em relação ao beneficiamento do minério, pode-se dizer que os rejeitos, em geral, são confinados e retidos em bacias de contenção para posterior descarga. A percolação de material lixiviado das pilhas formadas pelos rejeitos e das bacias de contenção pode causar a poluição de águas superficiais e subterrâneas por DAM.

Entre os impactos causados pelo bombeamento citam-se a subsidência, a redução da vazão dos cursos d'água adjacentes que estejam em continuidade hidráulica ao lençol bombeado e a poluição de águas superficiais e subterrâneas caso a água bombeada já esteja contaminada por DAM ou seja de baixa qualidade.

Por fim, de acordo a classificação de Younger (2004), a inundação das minas, geralmente, leva a impactos duradouros. Além da contaminação química, provocada pela formação da DAM, há o risco de subsidência, tendo em vista que a água pode ser responsável pela erosão dos pilares de sustentação da mina.

2.3 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO DE USO DOS RECURSOS NATURAIS

O uso da bacia hidrográfica, como unidade de estudo, para o gerenciamento das diferentes formas de ocupação e uso das potencialidades ambientais tem como objetivo planejar, coordenar, executar e manejar as melhores formas de apropriação e exploração de seus recursos ambientais, proporcionando o desenvolvimento socioeconômico das suas respectivas populações e a sustentabilidade dos recursos ambientais, diminuindo ou evitando a degradação da qualidade de vida (BORDALLO, 1995). Conforme Lanna (1995), o gerenciamento de bacia hidrográfica (GBH) é o instrumento que orienta o poder público e a sociedade, no longo prazo, na utilização e monitoramento dos recursos ambientais, naturais e econômicos, de forma a promover o desenvolvimento sustentável.

As abordagens de planejamento e gerenciamento que utilizam a bacia hidrográfica como unidade de trabalho têm evoluído bastante, pois as características biogeofísicas dessas bacias apresentam sistemas ecológicos e hidrológicos relativamente coesos. No início, o processo de gerenciamento e planejamento de bacias hidrográficas visava basicamente à solução de problemas relacionados à água, com prioridade para o controle de inundações, para a irrigação, a navegação ou para o abastecimento público e industrial. O planejamento e o

gerenciamento de bacias hidrográficas devem incorporar todos os recursos ambientais da área de drenagem e não apenas o hídrico. Além disso, a abordagem adotada deve integrar os aspectos ambientais, sociais, econômicos e políticos, com ênfase no primeiro, pois a capacidade ambiental de dar suporte ao desenvolvimento possui sempre um limite, a partir do qual todos os outros aspectos serão inevitavelmente afetados (PIRES; SANTOS, 1995).

Cargas de poluentes das mais diversas fontes (agropecuária, urbana e industrial) são lançadas de forma pontual (localização da emissão conhecida) e/ou difusa (dispersa ao longo de uma área) nos sistemas ambientais, tais como redes de drenagem e lagos, ou dispostas sobre o solo. As águas e os sedimentos constituem-se no principal mecanismo de transporte destas cargas. Neste processo de transporte, reações químicas, físicas e biológicas (tais como biodegradação, hidrólise, turbulência) resultam em alteração de concentrações dos parâmetros de qualidade de água associados a estas cargas. O ponto de monitoramento de qualidade de água reflete uma agregação de todas as cargas de montante da bacia (MENDES, 2006). Em síntese, o problema apresentado pode ser dividido nas seguintes componentes:

- Cargas de resíduos no meio ambiente.
- Transformações químicas e biológicas e movimentação de águas (e sedimentos).
- Concentração resultante de uma determinada substância (como OD ou Nutrientes) em uma posição específica (diferente do ponto de lançamento do resíduo) durante um tempo do dia (ou do ano).

A figura 2, adaptada de Mendes (2006), ilustra o processo.



Figura 2 Diferentes cargas de poluentes na bacia. Fonte: Adaptada de Mendes (2006).

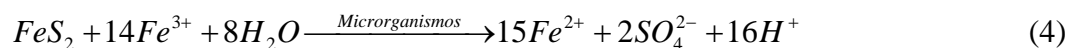
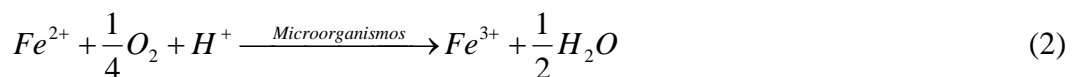
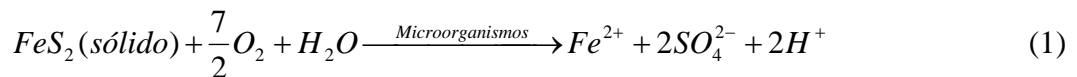
Neste contexto, o problema da gestão da qualidade de água em bacias fica centrado no controle das cargas, de tal forma que um uso específico de um trecho de rio, expresso através de padrões de qualidade de água, seja alcançado mediante intervenções nas cargas. Salienta-se, entretanto, que tais operações não devem se resumir simplesmente à análise de engenharia dos efeitos das cargas na qualidade de água. Esta análise também deve incluir restrições de natureza econômica na implantação destes controles, que por sua vez se inserem em um contexto sócio-político. Assim, o modelo de gerenciamento deve possibilitar:

- A representação de bacias hidrográficas com diversidade de usos, agregadas através de células (menor informação discernível no espaço geográfico), permitindo a variabilidade espacial das propriedades físicas da bacia;
- A união das fontes e dos impactos da poluição através da análise do processo de transporte e agregação das cargas de poluentes ao longo das linhas de escoamento, derivadas do Modelo Numérico do Terreno – MNT. Desta forma é possível combinar fontes de poluição pontual e difusa;
- A implantação de um instrumento de mercado para reduzir o lançamento de cargas;

- O emprego de dados de monitoramento de qualidade de água para comparação dos resultados observados e calculados, permitindo otimização de parâmetros dos modelos;
- A verificação da maximização do bem-estar social;
- A aplicação em diferentes bacias hidrográficas.

2.4 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA (DAM)

A DAM é resultado de um conhecido processo químico. Em contato com ar, água e microorganismos, minerais ricos em enxofre, como a pirita (FeS_2), se oxidam e produzem ácido sulfúrico. Concomitantemente, ferro e outros metais são descarregados na água. O problema pode ser associado com a extração de carvão ou com a escavação de rochas nas quais minerais sulfurosos, antes no subsolo, entram em contato com o oxigênio e com a água. Gusek (2005) apresenta as quatro reações do processo de formação de DAM:



Em uma solução com pH abaixo de 4,5, as reações (1), (2) e (4) são catalisadas por organismos unicelulares que aceleram a oxidação da pirita fazendo com que a acidez aumente. O aumento da acidez, por seu turno, provoca a elevação da concentração de outros metais pesados, sulfatos e do total de sólidos dissolvidos (STUMM *et al.* apud SEYLER, 2003). Em outras palavras, os íons de hidrogênio e de ferro catalisam a oxidação de outros metais sulfurosos que, porventura, estejam presentes. Dessa forma, pode haver a contaminação da água por cobre, zinco, chumbo e manganês, entre outros metais.

Hallberg e Johnson (2005) definem dois tipos de organismos predominantes na geração da DAM, de acordo com o índice de acidez (pH) atingido por esse contaminante. O primeiro tipo diz respeito a elementos dos reinos *Bacteria* e *Archaea* que vivem em soluções aquosas com baixo pH (até próximo ao limite superior de 3,0) e, por isso, recebem a classificação de organismos acidófilos. Esses organismos são os mais importantes, pois atuam de maneira decisiva na formação de DAM. O primeiro representante dessa categoria a ser isolado em laboratório é conhecido como *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Esse micróbio tem a capacidade de oxidar íons de ferro e de enxofre e substâncias sulfurosas em geral. Contudo, o mais importante organismo dessa categoria, por ser mais numeroso em soluções ferrosas, chama-se *Leptospirillum ferrooxidans*.

A pirita é uma substância estável quando não há oxigênio ou água disponível. Porém, a presença dessas substâncias provoca sua espontânea oxidação. A diferença entre o fenômeno espontâneo e aquele em presença dos organismos já citados é a velocidade em que ele se dá. Agindo como catalisadores, acelerando a dissolução da pirita através da regeneração do Fe^{2+} para Fe^{3+} (equação 2), os organismos aumentam a velocidade da reação em muitas ordens de grandeza (HALLBERG; JOHNSON, 2005).

Em soluções com pH acima de quatro, o oxigênio molecular reage espontaneamente com os cátions de ferro, mas para valores de acidez inferiores essa reação abiótica é insignificante (STUMM *et al.*, 1981). Outros microorganismos acidófilos podem oxidar o íon sulfato da equação (1), outros compostos inorgânicos sulfurosos ou o próprio enxofre e gerar ácido sulfúrico (equação 4).

O segundo tipo de organismos presentes na DAM são as bactérias neutrófilas ou acidófilas moderadas, assim chamadas por viverem em soluções com pH entre os valores de três e seis. Essas bactérias são responsáveis pela oxidação do íon ferroso (Fe^{2+}) para íon férrico (Fe^{3+}), provocando o aumento da acidez. Porém, em soluções com baixos valores de pH, os microorganismos acidófilos são mais ativos (HALLBERG; JOHNSON, 2005).

Quando não há pirita no meio, a oxidação dos metais sulfurosos se dá de maneira química (em vez da reação assistida pelos microorganismos), o que pode torná-la muito lenta, de acordo com as condições de oxidação do meio (GUSEK; CLARKE-WHISTLER, 2005).

Assim, de forma análoga ao triângulo do fogo, o qual apresenta os elementos necessários para a combustão (oxigênio, combustível e calor), pode-se elaborar o tetraedro da DAM mostrando-se os elementos sem os quais há maior dificuldade na formação da substância.

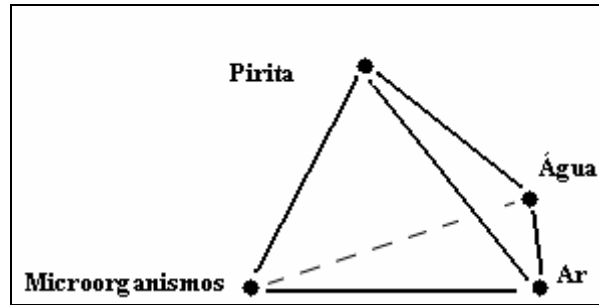


Figura 3 Tetraedro de DAM

A prevenção da contaminação por DAM na década passada teve como base a tentativa de impedir sua formação pela anulação de pelo menos um dos elementos dos vértices do tetraedro (GUSEK; CLARKE-WHISTLER, 2005). No entanto, esta é uma tarefa árdua e, caso haja a formação de DAM, haverá a necessidade de realização de algum tratamento.

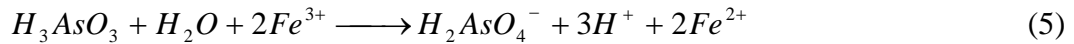
Para a mina de Golinsky, nos EUA, desativada em 1937, quando eram retirados zinco e cobre, Gusek *et al.* (2005) determinaram que a DAM apresentava as seguintes substâncias: ferro, alumínio, manganês, zinco, cobre, níquel, cádmio e íons sulfatos. A tabela 4 apresenta a composição da DAM na mina de zinco e cobre de Golinsky, EUA.

Tabela 4 Composição de DAM na mina de zinco e cobre de Golinsky, EUA.

Período	Vazão (m ³ /min)	pH	Fe mg/L	Al mg/L	Mn mg/L	Zn mg/L	Cu mg/L	Ni mg/L	Cd mg/L	SO ₄ mg/L
2004	0,037	3,0	104,0	24,5	1,3	54,9	9,0	0,031	0,71	797
2005	0,074	2,6	162,0	44,2	0,85	47,2	33,3	0,044	0,47	1104

(Fonte: Adaptada de Gusek *et al.*, 2005)

Bednar *et al.* (2005) apontam, ainda, a presença de arsênio no efluente de minas localizadas nos estados norte-americanos de Colorado, Utah, Nevada e Idaho. Relativamente abundante na natureza, o arsênio é oxidado segundo a reação apontada pela equação.



A composição da DAM do efluente gerado na construção de um túnel em Idaho Springs, EUA, é dada pela tabela 5.

Tabela 5 Composição de efluente de construção de túnel em Idaho Springs, EUA.

Período	pH	PO ₄ ³⁻ mg/L	Cu mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	Mn mg/L	Fe mg/L	As mg/L
2005	2,9	0,386	4,0	2690	74	128	0,091

(Fonte: Adaptada de Bednar *et al.*, 2005).

2.5 TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO

A escolha do método de mineração, entre outros fatores, é determinada pela geologia apresentada no local de extração. Assim, a combinação da profundidade da camada de carvão e das litologias presentes vai estabelecer se o método de lavra será subterrâneo ou a céu aberto.

Atualmente, aproximadamente 60% da produção total de carvão mineral mundial se dá pela lavra subterrânea (WCI, 2005). No entanto, em alguns países, tais como Austrália e EUA, a lavra a céu aberto predomina. Nos EUA, 67% da produção é oriunda da lavra a céu aberto e na Austrália, esse índice chega a 80%. O Brasil se aproxima da média mundial com, aproximadamente, 59% da produção de carvão sendo proveniente da lavra subterrânea e 41% da lavra a céu aberto (MCT, 2002). Assim, descrevem-se os métodos de lavra de carvão mineral.

2.5.1 Lavra subterrânea

A lavra subterrânea ocorre, em geral, quando a camada de carvão mineral está localizada em grandes profundidades ou quando a camada de solo e rochas que a cobre (*overburden*) apresenta dificuldades de remoção. Dois métodos de lavra predominam em subsolo: o método *room-and-pillar* e o método *longwall mining*.

O método *room-and-pillar* tem seu nome oriundo do inglês e significa “câmaras e pilares”. Ele consiste na construção, no interior da camada carbonífera, de uma rede de espaços vazios sustentada por pedaços remanescentes da mesma camada, os quais formam os pilares.

O método *longwall mining* consiste na extração total da camada de carvão encontrada no subsolo. Essa técnica necessita de cuidadoso planejamento, pois deve ser assegurado que a geologia local não configure riscos à atividade. A retirada do minério se dá em extensões entre 100 e 350 metros, sendo a rocha de cobertura sustentada, durante a lavra, por macacos hidráulicos.

Da comparação entre as duas técnicas de lavra subterrânea conclui-se que a técnica *room-and-pillar* permite que a retirada do carvão se inicie de forma mais rápida, já que exige um maquinário mais barato. A exploração por *longwall mining* exige máquinas de grande porte cujo custo de aquisição pode atingir valores elevados (WCI, 2005).

A escolha da melhor técnica deve ser baseada no tipo de terreno encontrado, mas, em alguns casos, uma mesma mina pode apresentar os dois tipos de lavra subterrânea.

Em relação à contaminação das águas, destaca-se na lavra subterrânea o fato de ser comum encontrar o lençol freático, o que exige o constante esgotamento da mina (GIBSON, 1987). Assim, a água bombeada do interior da mina deve passar por algum sistema de tratamento, antes de ser despejada nos corpos d’água.

2.5.2 Lavra a céu aberto

Esse método de lavra apresenta viabilidade econômica quando a camada de carvão se localiza próxima à superfície (WCI, 2005). Consiste na escavação e remoção da camada de solo que cobre o carvão. Com o carvão exposto, a lavra se inicia.

A retirada da cobertura sobre o depósito (*overburden*) é realizada por meio de explosivos e/ou de forma mecanizada. Uma vez exposta a camada de carvão, ela é, então, removida. O material extraído pode ser levado por caminhões para beneficiamento ou pode ser levado para o consumo direto.

Esse método é responsável por uma alta produtividade da mina, tendo em vista que, com ele, todo o carvão é retirado da camada. Em geral, por questões de segurança, é comum que a lavra subterrânea seja finalizada, ainda que exista alguma quantidade de minério no subsolo.

Em relação à contaminação dos corpos d'água, especial atenção deve ser dada à entrada de águas pluviais nas escavações. A retirada do *overburden* e os próprios trabalhos superficiais, tais como o beneficiamento e a construção de vias de acesso, são responsáveis pela alteração da drenagem natural do terreno e do regime de infiltração de água no subsolo. Assim, pode haver tanto a contaminação de águas subterrâneas como a de águas superficiais.

A contaminação de águas subterrâneas pode se dar pelo contato de águas do lençol freático com a camada de minério encontrada, gerando a DAM. Além disso, a entrada de águas pluviais na cava pode, também, formar a DAM e, essa, percolar para lençóis mais profundos. Já a contaminação das águas superficiais pode ocorrer com o bombeamento d'água do interior da escavação e seu despejo sem tratamento nos cursos d'água. Assim, é importante que, além do tratamento adequado, seja construída uma rede de drenagem artificial na superfície da região de exploração com o objetivo de impedir o contato de águas pluviais com o minério (GIBSON, 1987).

2.6 TECNOLOGIA DE MANEJO DE RESÍDUOS

Conforme mostra o item 2.4, para que haja a geração de drenagem ácida, basta a existência dos quatro elementos formadores do tetraedro da figura 4. Esse fato faz com que seja possível que haja formação de DAM, ainda que a exploração da mina tenha cessado. Assim, a tecnologia de manejo de resíduos deve ser considerada ao longo de todo o tempo de duração do empreendimento mineiro, incluindo-se a fase pós-fechamento da mina.

As formas de tratamento de resíduos de operações mineiras são classificadas em ações para o tratamento de efluentes e ações para o fechamento do empreendimento. As ações para o tratamento do efluente gerado pelas escavações, pela lavagem do minério ou pela lixiviação dos depósitos de resíduos são, por sua vez, classificadas como tratamento passivo e tratamento ativo. Desde que haja manutenção das instalações envolvidas no tratamento, estas ações podem se estender até o período pós-fechamento.

As ações para o fechamento do empreendimento consistem na recuperação da área explorada e dizem respeito às formas de cobrimento que a área receberá. Como após o encerramento das atividades pode continuar a haver a formação de DAM, cada tipo de cobertura é responsável por um grau de redução do poder de contaminação do efluente. A seguir, são apresentadas as formas de tratamento mencionadas.

2.6.1 Tratamento Passivo

O tratamento passivo é definido como “a melhoria da qualidade da água com a utilização de fontes de energia naturalmente disponíveis, em sistemas de tratamento com escoamento por gravidade, projetados para que necessitem de pouco freqüente, porém regular, manutenção a fim de operarem, de forma bem-sucedida, por toda sua vida útil” (PIRAMID CONSORTIUM, 2003). As principais estruturas para a realização desse tipo de tratamento são as lagoas anaeróbica e aeróbica, o canal calcário óxico, o dreno calcário anóxico, a bacia de fluxo vertical e o leito de remoção de manganês (OSM, 2006).

A lagoa aeróbica é utilizada para a retirada de metais da DAM e para redução da acidez. No entanto, na segunda tarefa, essa alternativa não se mostra muito eficiente e, por isso, geralmente é associada a outro dispositivo. Ela consiste na escavação de uma bacia em forma trapezoidal, onde será depositado o líquido para tratamento. Há, ainda, uma cobertura, sobre a qual será plantada a vegetação apropriada. Deve-se prever que o nível máximo da lagoa seja superior ao nível do terreno a fim de se evitar o influxo de material lixiviado.



Figura 4 Célula de lagoa aeróbica (Fonte: OSM, 2006)

Além da remoção de metais, a lagoa anaeróbica tem a função de reduzir a acidez das descargas. Difere da lagoa aeróbica, pela presença de uma camada de calcário.



Figura 5 Lagoa anaeróbica (Fonte: OSM, 2006)

O canal calcário óxico é uma estrutura simples que consiste na escavação de um canal aberto, com fundo de calcário, para a condução de DAM.



Figura 6 Canal calcário óxico (Fonte: OSM, 2006)

O dreno de calcário anóxico diferencia-se do canal anóxico por ser envolto por uma membrana sintética e coberto com solo.



Figura 7 Dreno calcário anóxico (Fonte: OSM, 2006)

A bacia de fluxo vertical também é uma escavação de forma trapezoidal onde se encontram uma camada de argila, uma camada de calcário e uma de matéria orgânica, esta

com o objetivo de retirar oxigênio do efluente. Difere das lagoas pelo fato de possuir em seu fundo uma rede de tubulações destinada a conduzir o efluente.



Figura 8 BFV em construção (Fonte: OSM, 2006)

O leito de remoção de manganês também consiste em uma escavação trapezoidal. Possui uma espessa camada calcária destinada à remoção desse metal.



Figura 9 LRM em operação (Fonte: OSM, 2006).

Auxiliar no processo de tratamento, a bacia de contenção tem forma trapezoidal e destina-se à precipitação dos metais. Encontra-se, em geral, em linha com outros dispositivos.



Figura 10 Bacias primária e secundária (Fonte: OSM, 2006)

A tabela 6 relaciona as estruturas com os contaminantes por elas removidos.

Tabela 6 Contaminante objeto do tratamento

TECNOLOGIA DE TRATAMENTO PASSIVO	ELEMENTO-ALVO DO TRATAMENTO
Lagoa Anaeróbica	SO ₄ , acidez
Lagoa Aeróbica	Fe, U, Mg, As, CN
Canal calcário óxico	Acidez, Zn, Cd, As, Mg, Ca
Dreno calcário anóxico	Acidez, Zn, Cd, As, Mg, Ca
Bacia de fluxo vertical	Acidez, SO ₄
Leito de remoção de manganês	Mn

(Fonte: Adaptada de Rees, 2005)

2.6.2 Tratamento Ativo

O tratamento ativo de drenagem ácida de mina consiste na adição de um reagente químico que seja capaz de provocar a precipitação de substâncias contaminantes a fim de que estas sejam posteriormente removidas. É mais utilizado em soluções temporárias, em águas com elevado grau de contaminação ou quando há pouca disponibilidade de espaço (COULTON; WILLIAMS, 2005). Para os demais casos, o tratamento passivo é mais indicado pela sua pouca necessidade de manutenção e seu baixo custo de operação.

Os principais reagentes utilizados no tratamento ativo são: soda cáustica (NaOH), cal hidratada (Ca(OH)₂), cal virgem (CaO) e amônia (NH₃). Também podem ser utilizados o óxido de magnésio (MgO), o hidróxido de magnésio (Mg(OH)₂) e o carbonato de sódio (Na₂CO₃).

Gusek (2005) aponta que os dados de qualidade da água a ser tratada e a medição da vazão de descarga são de extrema importância para o sucesso do tratamento, pois determinam a quantidade de reagente que será lançada para a precipitação dos metais. Além disso, o autor cita, ainda, as necessidades de remoção e de disposição final do lodo gerado por tal precipitação. A associação dos tratamentos ativo e passivo pode ser considerada em casos em que haja disponibilidade de espaço e elevado padrão de exigência para despejo de efluentes.

2.6.3 Fechamento de mina

De acordo com o parágrafo 2º do artigo 225 da Constituição Federal Brasileira, os empreendedores ficam obrigados a reduzir as descargas de DAM, ou impedir a formação da substância, mesmo após o fim da exploração. Porém, devido ao mau planejamento de uso do recurso mineral, as empresas, em geral, começavam a se ocupar da atividade de recuperação ambiental ao fim do seu período de exploração. Nesta altura, já descapitalizadas, as empresas procuram pelo plano de fechamento mais barato possível, com o menor tempo de monitoramento e execução realizada por terceiros sem a devida fiscalização da contratante (OLIVEIRA JÚNIOR, 2001).

São objetos de recomposição as áreas de superfície minerada. As formas de recomposição da área com seus respectivos potenciais de redução dos efluentes gerados são fornecidos por Mendes e Gomes (2004) e apresentados na tabela 7.

Tabela 7 Redução de efluentes obtida por diferentes tipos de cobertura

TIPOLOGIA DE POLUIÇÃO	ARGILA	VEGETAÇÃO	ARGILA COM VEGETAÇÃO	URBANIZAÇÃO
Áreas de superfícies mineradas	0,2	0,2	0,4	0,6
Pilhas de rejeitos	0,2	0,2	0,4	0,6
Pilhas de rejeitos em áreas de superfície mineradas	0,2	0,2	0,4	0,6
Minas represadas	0,0	0,0	0,0	0,0

(Fonte: Adaptada de Mendes *et al.*, 2004)

Gusek (2005) distingue os tipos de cobertura utilizados, de acordo com a umidade. As coberturas secas impedem que a água atinja as rochas, quebrando um dos vértices do tetraedro do DAM e são mais recomendadas em regiões de clima árido. Em áreas de clima úmido, é necessária a instalação de uma camada impermeabilizante. A inundação das minas afasta o ar de seu interior, impedindo a oxidação dos metais.

Assim, os custos de fechamento de mina podem ser divididos em custos diretos e indiretos. Os custos diretos referem-se às atividades de campo e de planejamento. As atividades de campo consistem na evacuação de minas subterrâneas com lacre das entradas, emissão de avisos às comunidades adjacentes, monitoramento da qualidade dos rejeitos e dos corpos hídricos locais, demolição das instalações, retirada de equipamentos e revegetação das

áreas afetadas. O planejamento pode ser entendido como a execução de estudos de viabilidade e apoio financeiro, da preparação e a aprovação técnica do plano de trabalho e de consulta às partes interessadas (CANADÁ *apud* CETEM, 2001a).

Como custos indiretos incluem-se as seguintes atividades: pagamento de pendências trabalhistas, inventário de bens móveis e imóveis, estabilização da área de rejeitos, construção de estações de tratamento contínuo de efluentes e manutenção de estradas e das estruturas construídas para o fechamento da mina e gerenciamento da área minerada e de rejeitos com cercas, avisos e sinais de trânsito. Pode, ainda, haver a inclusão de custos relativos a taxas e seguros (CANADÁ *apud* CETEM, 2001a). A tabela 8 apresenta o peso relativo dos custos citados, tendo como base o estudo de caso de um dos mais importantes projetos de recuperação de áreas degradadas pela mineração executado no Canadá (CETEM, 2001a).

Tabela 8 Composição de custos de fechamento de mina

Atividade	% do custo total
Planejamento e licenciamento	11,06
Evacuação da mina e cobrimento do túnel de acesso	7,53
Demolição e recuperação da área	11,36
Gerenciamento das áreas de rejeito	16,64
Usina de tratamento de efluentes	7,53
Manutenção da área	2,64
Monitoramento dos indicadores	6,02
Taxas municipais	5,96
Seguros	3,45
Taxas de licenciamento	4,40
Gerenciamento / Supervisão global	23,40
TOTAL	100,00

(Fonte: Adaptada de CETEM, 2001a)

Ainda segundo o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), para recuperar a área, houve a obrigação de se dar o destino correto a, aproximadamente, 100 milhões de toneladas de rejeitos. O custo total aproximado para a recuperação da área foi de 80 milhões de dólares americanos em um período de doze anos após o fechamento de minas naquele país. Assim, pode-se adotar o valor de 80 centavos de dólar para cada tonelada de resíduo gerado pela mineração de carvão como uma projeção dos custos de fechamento de mina.

2.7 OPERAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS NÃO RENOVÁVEIS

Os recursos naturais não renováveis são desprovidos de taxas de crescimento ou de qualquer outro processo regenerativo. Assim, chamando de $R(t)$ a reserva de minério na jazida, no tempo t , de $R(t+1)$ a reserva de minério no tempo posterior e de $q(t)$ a produção de minério por parte do explorador da mina, pode-se dizer que:

$$R(t+1) = R(t) - q(t) \quad (6)$$

De acordo com Pindyck (1978), há de ser feita a distinção entre um recurso exaurível e um recurso não-renovável. A diferença reside na possibilidade de novas descobertas. Enquanto para o primeiro tipo de recurso não existem novas descobertas a serem realizadas, para o segundo é possível que se aumente a quantidade $R(t)$ desde que sejam elevados os esforços de exploração a fim de que sejam detectadas novas jazidas.

Dessa maneira, Conrad e Clarke (1987) estabelecem um modelo da dinâmica de exploração dos recursos não-renováveis. Sejam $X(t)$ e $w(t)$, respectivamente, as descobertas acumuladas e o esforço de exploração. Pode-se estabelecer que:

$$\frac{\partial R(t)}{\partial t} = \frac{\partial X(t)}{\partial t} - q(t) \quad (7)$$

$$\frac{\partial X(t)}{\partial t} = f(w(t), X(t)) \quad (8)$$

Em outras palavras, diz-se que a variação da reserva de recurso com o tempo depende da variação das novas descobertas do recurso com o tempo e da produção mineral. Tal se deve ao fato de a variação das novas descobertas com o tempo ($\frac{\partial w}{\partial t}$) depender não só do esforço de exploração, mas também da possibilidade de haver novas descobertas. Partindo dessa definição, compreende-se que:

- $\frac{\partial f}{\partial w} > 0$, pois quanto maior o esforço de exploração, mais descobertas de minério serão feitas; e

- $\frac{\partial f}{\partial X} < 0$, pois à medida que novas descobertas são feitas, menores são as chances de que sejam realizadas outras descobertas, isto é, o recurso não-renovável é finito e, em algum momento, não haverá mais reservas a serem descobertas.

A apresentação da teoria de exploração dos recursos naturais não renováveis está baseada nas definições acima mencionadas.

2.7.1 Análise da indústria mineradora competitiva

Sejam $C_i(q_i(t))$ o custo de extração da i -ésima mineradora, R_i suas reservas iniciais e p o preço de venda do minério em um mercado competitivo.

Cada firma tenta maximizar os lucros de acordo com a seguinte formulação matemática, na qual δ refere-se à taxa de juros:

$$\text{Max } \pi = \int_0^{T_i} [p(t)q(t) - C(q(t)) - C(w(t))]e^{-\delta t} dt \quad (9)$$

$$\text{Sujeito a } R(t+1) - R(t) = f(w(t), X(t)) - q(t) \quad (10)$$

$$R_i(0) = R_i \quad (11)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = f(w(t), X(t)) \quad (12)$$

$$X(0) = 0 \quad (13)$$

As restrições significam respectivamente que:

- A variação da reserva com o tempo é igual, em módulo, à diferença entre as descobertas, quando há, e a produção da mina;
- A reserva inicial de cada mina é igual à reserva total estimada (ou medida) de cada mina;
- As novas descobertas são uma função do esforço para realizá-las e da quantidade de descobertas já realizadas;

- A descoberta inicial é nula.

Em tese, exceto no caso monopolista, uma firma não pode saber o preço $p(t)$ a assumir na função objetivo. Em um mercado competitivo, portanto, a i -ésima mineradora é uma “tomadora” de preços e trata $p(t)$ como variável exógena.

Além dos custos de extração e de novas descobertas, Conrad *et al.* (1987) inclui na equação (9) os custos de tratamento de rejeitos e de danos ambientais como função da quantidade produzida em determinado período de tempo (Q_t) e do acúmulo de resíduos no meio ambiente (Z_t) em determinado período de tempo.

Henderson (1976) analisa a situação sob o ponto de vista da sociedade. Segundo o autor, o bem-estar social (W) é dado pela diferença entre as funções lucro de cada atividade (π), e o dano (D). O lucro de cada atividade consiste na diferença entre as receitas obtidas pela venda do produto e as despesas necessárias para produzi-lo. O dano relaciona-se com os custos provocados pelo acúmulo de resíduos no meio ambiente.

A função dano exige uma análise pormenorizada, pois apresenta duas interpretações com diferenças sutis. A primeira delas é aquela em que o acúmulo de poluentes no meio provoca custos em terceiros, isto é externalidades negativas. Neste caso, outros agentes, empreendedores ou a sociedade ou ambos, estão despendendo recursos financeiros extras para realizar suas atividades devido à presença de substâncias nocivas acumuladas no meio. Para essa situação, a função dano representa tais custos extras incidentes sobre as atividades de terceiros.

A segunda interpretação representa o cenário econômico ideal, ou seja, com a internalização dos efeitos externos. Assim, os custos das externalidades são evitados por ações de controle e tratamento de resíduos. Neste caso, a função dano representa o montante financeiro gasto para evitar que custos extras incidam em outras atividades.

Em qualquer caso, no entanto, a função dano apresenta a mesma característica: uma função côncava para cima, isto é: $D' > 0$ e $D'' > 0$. Isto se deve ao fato de que, para uma dada substância, quanto maior seu despejo no meio ambiente, maior serão os custos causados em terceiros ou maior serão os custos para evitá-los. A função lucro, por sua vez é côncava para baixo, pois apresenta $\pi' > 0$ e $\pi'' < 0$. Em outras palavras, pode-se dizer que, para uma dada tecnologia de produção, haverá um limite em que os custos de extração se tornarão

impeditivos para a realização de lucro, pois os recursos se tornam mais raros e difíceis de serem encontrados ou retirados. Nas figuras 11 e 12 são apresentados os gráficos simbólicos das funções mencionadas.

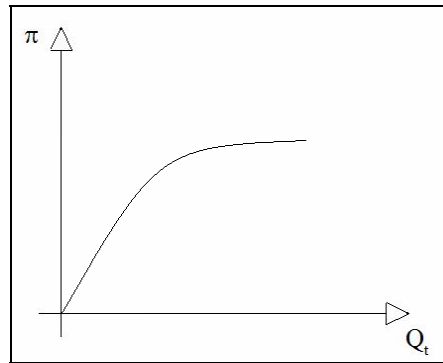


Figura 11 Lucro (π) x quantidade produzida em um intervalo de tempo (Q_t).

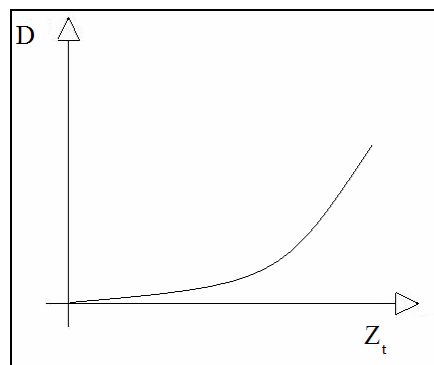


Figura 12 Custo (D) em função do acúmulo de resíduos no meio ambiente (Z_t).

Assim, segundo Henderson (1976), o modelo de exploração econômica deve ser a maximização do bem-estar social em face dos custos provocados pelo lançamento de resíduos no meio, ou seja:

$$\text{Max } W = \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t [\pi(q(t)) - D(Z(t))] \text{ (bem estar social)} \quad (14)$$

$$\text{Sujeito a: } Z(t+1) - Z(t) = \gamma Z(t) + S(t) \text{ (estoque de poluentes),} \quad (15)$$

onde γ refere-se ao percentual de Z_t que se degrada, $S(t) = \mu q(t)$ é a parcela de rejeitos da produção que se acumula no meio ambiente (nesse caso μ representa o percentual da produção que se transforma em rejeitos não degradáveis) e $\rho = \frac{1}{1+\delta}$. Como o estoque de

poluentes é uma função da quantidade produzida, a equação (14) pode ser representada pela figura 13.

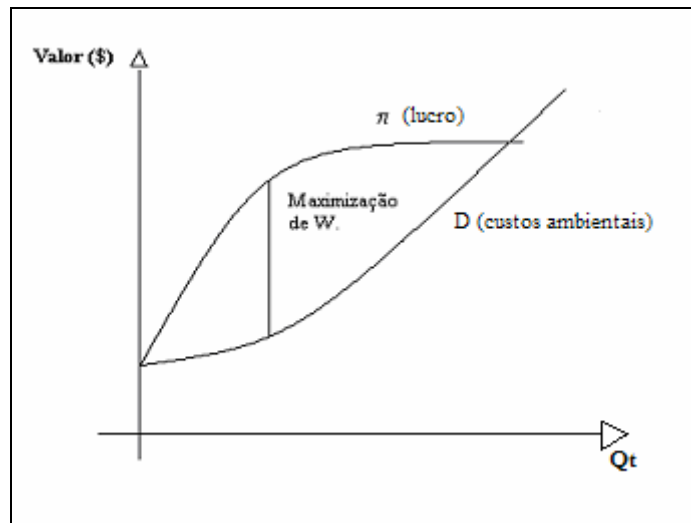


Figura 13 Maximização do bem estar social.

Percebe-se com facilidade que a maximização ocorre quando a distância entre os lucros e os gastos com o estoque de poluentes atinge seu nível máximo.

2.8 SUPORTE COMPUTACIONAL: GAMS

O GAMS (Sistema de Modelagem Algébrica Geral – *General Algebraic Modelling System*) é um *software*, desenvolvido na década de 80, para a solução de problemas de programação matemática. O desenvolvimento do *software* teve o objetivo de facilitar a análise e a entrada de dados, elaborar uma linguagem de programação de alto nível pela qual fosse possível a resolução de problemas de larga e reduzida escalas, permitir que alterações no modelo fossem feitas de maneira simples e segura, impedir que fossem estabelecidas relações algébricas ambíguas e, enfim, permitir que a descrição do modelo fosse independente do algoritmo de resolução (BROOKE *et al.*, 1998).

Dessa forma, o *software* GAMS foi escolhido para a resolução do problema de otimização proposto para a internalização dos custos ambientais na exploração econômica do carvão mineral na sub-bacia do rio Sangão, situado no estado de Santa Catarina. A listagem do programa desenvolvido, utilizando-se da metodologia proposta, é apresentada no Anexo 1.

A elaboração do problema de otimização demanda uma função-objetivo não linear e restrições de caráter linear, constituindo, assim, um problema de otimização não-linear. O GAMS permite que se trabalhe tanto com problemas lineares quanto não-lineares. Ademais, é possível executar a variação de diversos algoritmos de otimização para análise e, com isso, concluir entre eles qual o mais indicado para o modelo proposto.

O *software* GAMS possui, ainda, uma modelagem do processo que permite o cálculo dos dados de entrada, a verificação da correção das sentenças algébricas, a verificação de ambigüidades no modelo algébrico e o uso da solução gerada para a elaboração de relatórios (McCARL, 2004).

No capítulo 3 é apresentada a metodologia a ser empregada no estudo de caso.

3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada no presente trabalho consiste na elaboração de um modelo de otimização da produção de carvão e na análise dos resultados em diversos cenários. Para tanto é necessária a busca de dados para que seja possível a construção das funções econômicas e das restrições impostas pela bacia hidrográfica considerada. De posse das funções econômicas, realiza-se a formulação da função-objetivo. As características das jazidas e da bacia hidrográfica fornecem as restrições à função-objetivo. Assim, o modelo é aplicado e de posse de seus resultados são analisados diversos cenários. A figura 14 ilustra a metodologia adotada.

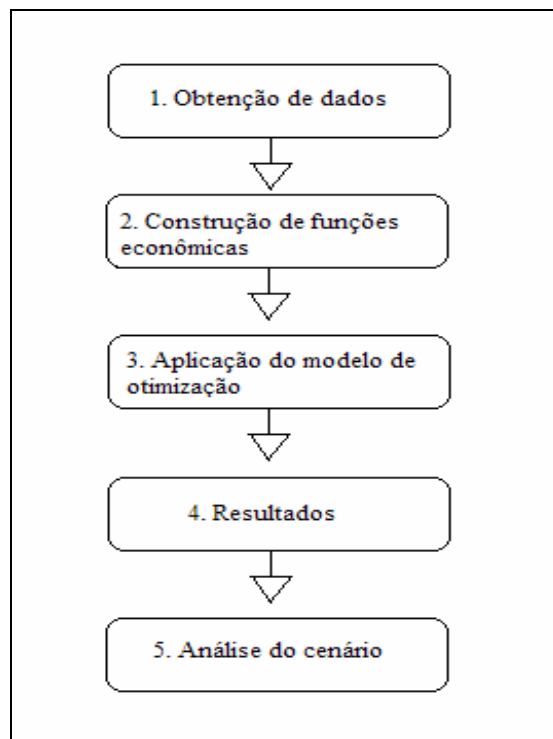


Figura 14 Fluxograma metodológico.

Nos itens 3.1 a 3.5 é explicado cada tópico mencionado.

3.1 OBTENÇÃO DE DADOS

A resolução do modelo de otimização formulado é realizada sob diversos cenários. Conforme apresentado no capítulo anterior, os custos de produção variam conforme a tecnologia de produção adotada e os custos de tratamento dependem da alternativa de tratamento escolhida. Realiza-se a análise das diversas combinações de tecnologia de produção com alternativa de tratamento a fim de se verificar a que melhor atende aos padrões de qualidade dos cursos d'água.

Os dados necessários para o modelo de otimização a ser proposto podem ser divididos nas seguintes categorias: dados da bacia, dados relacionados à extração do carvão mineral e ao tratamento do minério, dados relacionados ao tratamento de efluentes e dados relacionados ao fechamento do empreendimento. A tabela 9 exhibe os dados necessários ao desenvolvimento do estudo. Tais dados, apresentados sob a forma de variáveis de entrada, serão, em seguida, classificados quanto à área a que são afetos (exploração de carvão e beneficiamento do minério, tratamento de efluentes e fechamento do empreendimento).

Tabela 9 Variáveis de entrada do modelo.

VARIÁVEIS DE ENTRADA	VARIÁVEIS DA BACIA	
	$Q_{\text{mensal}}(i,t)$	Vazão mensal nos cursos d'água
	$P(t)$	Precipitação mensal
	$\text{Lim}(l)$	Limite tolerável de cada contaminante
	$Q_{\text{sub}}(t)$	Vazão bombeada para fora das minas oriunda do lençol freático
	VARIÁVEIS DE EXTRAÇÃO	
	i	Número de minas na bacia
	$T(i)$	Tempo de exploração das minas
	$A(i)$	Área de superfície minerada de cada mina
	$R_0(i)$	Reserva inicial da mina i
	p	Preço da tonelada de carvão
	ε	Percentual de rejeitos no carvão
	ex	Alternativas de exploração
	$C_{\text{Exp}}(i)$	Custo fixo de exploração de cada mina
$C_{\text{Ben}}(i)$	Custo de beneficiamento do carvão extraído pela mina i	
δ	Taxa de juros	
VARIÁVEIS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES		
j	Alternativas de tratamento de efluentes	
$C_{\text{Trat}}(i)$	Custo de tratamento de efluentes da mina i	
l	Contaminante considerado	
$\text{Conc}(l,i)$	Concentração do contaminante l na DAM da mina i	
$\eta(l,i)$	Percentual remanescente do contaminante l na mina i	
VARIÁVEL DE FECHAMENTO DA MINA		
$C_{\text{Fec}}(i)$	Custo para recompor a área da mina i	

3.1.1 Dados da bacia

A importância dessa etapa relaciona-se com o fato de que as vazões dos cursos d'água que compõem a bacia escolhida serão elementos restritivos da descarga de poluentes. Em outras palavras, pode-se dizer que quanto menor for o volume d'água disponível no corpo receptor, menores deverão ser as descargas de poluentes, o que implica maiores custos de tratamento dos resíduos gerados pela atividade.

A descarga de poluentes, por sua vez, relaciona-se com a precipitação incidente sobre a bacia. A percolação de águas pluviais pelas pilhas de resíduos, e por toda a área minerada, é responsável pela dissolução e pelo transporte de poluentes aos cursos d'água.

Embora nem sempre esteja diretamente relacionado com o modelo hidrológico da bacia, o volume d'água vazado dos aquíferos subterrâneos deve ser conhecido pois também é responsável pela geração de DAM.

Dessa forma, são necessários dados de vazão mensal dos cursos d'água da bacia receptores das descargas de efluentes, de precipitação mensal nos locais em que existam minas em exploração e de vazões fornecidas pelos aquíferos em locais onde houver lavra subterrânea.

3.1.2 Dados relacionados à extração do carvão mineral

Para a extração do minério, serão considerados os seguintes parâmetros:

- Número e localização das minas (i);
- Tempo de exploração da mina i ($T(i)$);
- Reserva inicial da jazida explorada pela mina i : $R_0(i)$;
- Preço da tonelada de carvão mineral (p);
- Percentual de rejeitos contidos na produção de carvão (ϵ);
- Alternativa de exploração adotada pela mina i (ex);

- Custo da extração de carvão mineral por tonelada, de acordo com a tecnologia a ser adotada para a mina i ($C_{Exp_{ex}(i)}$);
- Taxa mensal de inflação (δ).

Considera-se conhecida a reserva de minério inicial e impõe-se que, de maneira simplificada, ao fim do último mês de exploração, a reserva de carvão esteja esgotada.

3.1.3 Dados relacionados ao tratamento de efluentes

Para o tratamento de resíduos, existem os seguintes parâmetros específicos:

- Alternativa de tratamento (j);
- Valor necessário à construção e à operação das instalações correspondentes à execução do tratamento adotado por determinada mina (M_{0ij});
- Contaminantes considerados no rejeito (l);
- Percentual do contaminante l remanescente no efluente após aplicação da alternativa de tratamento j ($\eta(l,j)$). No modelo de otimização, entretanto, tal parâmetro será utilizado com a associação entre o tratamento e a mina que o utiliza, isto é, $\eta(l,i)$;
- Despejo de efluente da mina i no tempo t ($Q_{efl}(i,t)$).

Consideram-se conhecidos os custos de implantação e de manutenção de cada alternativa de tratamento, bem como seu potencial de redução de cada contaminante.

3.1.4 Dados relacionados ao fechamento da mina

Para o fechamento da mina, são considerados os custos relativos às intervenções necessárias para recompor a área degradada de forma que esta fique em condições semelhantes àsquelas do início da atividade. Assim, devem ser formulados os custos de terraplenagem relativos à cobertura que será implantada no local.

Os dados necessários são:

- Custo da cobertura de argila;
- Custo da cobertura vegetal;
- Área de influência de cada empreendimento mineiro ($A(i)$).

Os custos referidos dependem da área a ser coberta e da espessura do cobrimento necessária. No entanto, como é apresentado adiante, sua estimativa pode ser feita por meio da quantidade de resíduos que a ser gerada ao longo da exploração. Em outras palavras, com base em experiências anteriores (CETEM, 2001a), pode-se dizer que a degradação da área está diretamente relacionada com o tamanho da reserva e a formação de rejeitos, entre outros fatores. Dessa forma, é possível prever o gasto total (M_{id}) necessário ao fechamento da mina, sabendo-se *a priori*, o tamanho da reserva e, por consequência, a quantidade de rejeito extraída.

Uma outra característica atinente ao fechamento de minas é o fato de que, de um modo geral, as empresas começam a arcar com esses custos após ou em etapa próxima ao esgotamento das reservas. A essa altura, porém, as receitas diminuem e torna-se difícil o dispêndio de recursos nessa tarefa. Esta é uma das causas de abandono indevido das minas.

A fim de evitar essa situação, será realizada a divisão desse custo futuro em parcelas iguais que serão pagas ao longo do tempo de exploração de cada mina. Tal mecanismo pode ser entendido com a criação de um fundo econômico para capitalização das empresas com vistas a arcar com o fechamento no seu momento apropriado.

Assim, qualquer que seja a ação de fechamento adotada por determinada mina (i), a ela corresponderá um custo, o qual será representado pelo seguinte símbolo: M_{id} .

3.2 CONSTRUÇÃO DE FUNÇÕES ECONÔMICAS E DE EQUAÇÕES DE RESTRIÇÃO

As funções econômicas necessárias para o desenvolvimento do modelo dizem respeito à receita da mineradora, aos seus custos de extração e de beneficiamento e aos seus custos de tratamento de efluentes e de fechamento de mina.

A receita da mineradora pode ser dada pelo produto entre a quantidade de minério por ela produzida (*run of mine*) e o preço unitário do carvão mineral, descontando-se a quantidade de resíduos presentes por tonelada de ROM:

$$Receita = p \bullet q(i,t) \bullet (1 - \varepsilon) \quad (16)$$

Os custos de extração do carvão mineral dependem da tecnologia de extração adotada pela empresa ou analisada no cenário proposto. Assim, com base nos dados apresentados formula-se a equação 17.

$$Extração = CExp_{ex}(i) \bullet q(i,t) \quad (17)$$

Os custos de tratamento de efluentes serão divididos em parcelas mensais ao longo do tempo de exploração da mina.

Assim, as parcelas do custo de tratamento j ($CTrat_j$) terão seu valor dado pela equação 18.

$$CTrat_j(i) = \frac{M_{0j} (1 + \delta)^t \delta}{(1 + \delta)^t - 1} \quad (18)$$

Por fim os custos de fechamento são dados pelas ações de terraplenagem necessárias à execução de uma cobertura na área da mina e representam-se pela equação 19:

$$CFec_d(i) = \frac{M_{id} \delta}{(1 + \delta)^t - 1} \quad (19)$$

As restrições consideradas no modelo são referentes ao balanço de massa e à concentração de poluentes nos cursos d'água. O balanço de massa é dado pela equação 20.

$$R(i,t) = R(i,t-1) - q(i,t) \quad (20)$$

No entanto, deve ser considerada a reserva inicial de cada jazida, bem como o seu esgotamento ao final do tempo de exploração. Tais restrições são dadas, respectivamente, pelas equações 21 e 22.

$$R(i,t=0) = R_i \quad (21)$$

$$R(i, t = T) = 0 \quad (22)$$

Para a concentração de poluentes nos cursos d'água são necessários os seguintes parâmetros:

- Seções dos rios onde são analisados os limites de concentração de contaminantes. Tais seções são aquelas nas quais as minas despejam seus efluentes e, por isso, também recebem o símbolo (i);
- Limite de concentração tolerável do poluente l (Lim(l));
- Vazão mensal do rio no trecho considerado e no tempo t (Q(i,t)).

Seja, ainda, a carga de poluentes despejada nos rios da bacia hidrográfica em estudo dada pelo produto entre a vazão do efluente do tratamento e a concentração de cada contaminante após o devido tratamento. Assim, formula-se a equação 23.

$$Carga(l, i, t) = Q_{efluente}(i, t) * \eta(i, t) * Conc(l, i). \quad (23)$$

Para que seja possível a comparação da descarga de contaminantes com os valores de concentração previstos em lei, deve-se dividir o valor encontrado acima pela vazão no trecho de rio receptor dos efluentes da mina considerada. Então, a contaminação causada por uma mina pode ser escrita conforme a equação 24.

$$Cont(l, i, t) = \frac{Q_{efluente}(i, t) * \eta(i, t) * Conc(l, i)}{Q(i, t)}. \quad (24)$$

Sabe-se que a vazão efluente de cada mina varia com o tempo, pois é fruto de características hidrológicas do local, tais como precipitação e vazão oriunda de aquíferos subterrâneos. A esse respeito, duas considerações se fazem necessárias: a primeira é que a água precipitada diretamente nas minas, ou aquela que para ela flui devido às alterações da drenagem na área minerada, é esgotada em sua totalidade e descarregada para tratamento. A segunda é que há o represamento das águas nas cavas.

Além disso, contribui o processo de beneficiamento do carvão mineral para um maior volume de despejos, já que para cada tonelada de minério extraída é necessária uma

quantidade de água (K) para que se consiga separar os resíduos. Dessa forma a vazão efluente mensal (Q_{efluente}) originada por cada mina pode ser dada pela equação 25.

$$Q_{\text{efluente}}(i,t) = \text{Pr } ec(i,t) * A(i) + Q_{\text{subt}}(i,t) + K * q(i,t) \quad (25)$$

De posse de tais parâmetros, pode-se construir o conjunto de restrições dado pela equação 26.

$$\frac{\sum_{i=1}^m Q_{\text{efluente}}(i,t) * \eta(i,t) * \text{Conc}(l,i)}{Q(i,t)} \leq \text{Lim}(l), \quad (26)$$

onde a variação do somatório de 1 a m refere-se às minas que contribuem para o acúmulo de contaminantes em determinada seção de rio e o parâmetro $\text{Lim}(l)$ diz respeito à concentração de determinado contaminante permitida. Cabe salientar que por se tratar de substâncias inorgânicas pouco aproveitadas por organismos vivos, não é considerado o fenômeno de autodepuração dos cursos d'águas. Em outras palavras, as cargas somam-se toda vez que a descarga de uma mina encontrar um novo lançamento.

3.3 APLICAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Para a aplicação do modelo adotada-se a discretização mensal do tempo. Tal consideração visa à simplificação dos cálculos computacionais, bem como a redução de incertezas relacionadas à medição da vazão em menores intervalos de tempo.

A função-objetivo do modelo de otimização é composta pelo somatório no tempo da soma total da renda líquida das empresas operadoras das minas instaladas na bacia de estudo. Em outras palavras, trata-se da maximização do valor presente líquido (VPL) da atividade de exploração de carvão mineral sob a consideração do despejo de efluentes em uma bacia hidrográfica. Sua maximização será restringida pelo balanço de massa e pelo limite de concentração de contaminantes nos cursos d'água.

Matematicamente:

Max

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \rho^t [p \cdot q(i,t) \cdot (1 - \varepsilon) - CExp_{ex}(i) \cdot q(i,t) - CBen \cdot q(i,t) - CTrat_j(i) - CFec_d(i)] \quad (27)$$

Sujeito a:

$$R(i,t = 0) = R(i); \quad (28)$$

$$R(i,t) = R(i,t - 1) - q(i,t); \quad (29)$$

$$R(i,t = T) = 0;$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m Q_{efluente}(i,t) * \eta(i,t) * Conc(l,i)}{Q(i,t)} \leq Lim(l). \quad (30)$$

3.4 RESULTADOS

Os resultados do modelo são os valores de $q(i,t)$, isto é, a produção ótima de carvão mineral de cada mina no intervalo de tempo analisado, além da concentração de cargas poluentes nos trechos de rio analisados. Com base nestes valores poderá ser verificada a receita das empresas ao longo desse intervalo, bem como seus custos de exploração, tratamento e fechamento. De posse de todos esses valores é possível a montagem de um fluxo de caixa que represente o empreendimento mineiro em todas as suas etapas.

3.5 ANÁLISE DE CENÁRIOS

São analisados diversos cenários a partir da variação da tecnologia de manejo de resíduos e dos limites de concentração impostos pela Resolução CONAMA 357.

Como a área de estudo é aquela em que todas as minas já estão desativadas, o caso-base é aquele que representa a atividade durante todo o tempo de exploração. Assim, no caso-base não são considerados custos de tratamento ou de fechamento e são considerados os custos de extração relativos à tecnologia adotada durante a exploração das minas.

A partir dessa situação, nos cenários seguintes, inserem-se os custos de tratamento e de fechamento e o modelo é executado, considerando o enquadramento da bacia hidrográfica nas classes 1 e 3, de acordo com a Resolução CONAMA 357.

Não são analisadas as situações de enquadramento nas classes especial, 2 e 4. A análise do enquadramento da bacia na classe especial não se faz necessária, tendo em vista que o artigo treze da referida legislação estabelece que nesta classe devem ser mantidas as condições naturais do curso d'água. Em relação à classe 4, o artigo 17 não estabelece restrições às substâncias presente na DAM. A classe 2, é uma situação intermediária entre as classes analisadas (1 e 3) e, por isso, não é considerada.

Com os valores da produção ótima, monta-se o fluxo de caixa para cada alternativa. Nele não se consideram os investimentos iniciais para abertura de mina.

No Capítulo 4 é apresentada a área de estudo com uma descrição dos dados necessários ao modelo.

4 ESTUDO DE CASO: ÁREA CARBONÍFERA DO ESTADO DE SANTA CATARINA

No presente capítulo são tratados os assuntos referentes à atividade de mineração em Santa Catarina, às bacias hidrográficas atingidas pela atividade e à sub-bacia do Rio Sangão.

4.1 A MINERAÇÃO

A Área Carbonífera de Santa Catarina, localizada a sudeste do estado, estende-se das proximidades de Morro dos Conventos – Arroio Silva, no litoral sul, até a cabeceira do rio Hipólito, ao norte. No limite oeste, atinge Nova Veneza, e a leste, a linha natural de afloramento vai até Lauro Müller e Brusque do Sul. A região possui um comprimento conhecido de 95 km e uma largura média de 20 km.

A lavra e o beneficiamento do carvão mineral no sul de Santa Catarina apresentaram-se, desde os seus primórdios, como atividades econômicas fundamentais ao desenvolvimento de toda a região e, desde o início de sua exploração econômica, o carvão teve a sua comercialização atrelada a decisões governamentais.

A mineração do carvão sempre exerceu um papel dominante na economia da região sul do estado de Santa Catarina, com destaque para os municípios de Araranguá, Criciúma e Tubarão. A participação do carvão na economia da região atingiu 30% do PIB na década de 70. Na década de 80, sua participação esteve entre 28,7 e 33,3%. Nos anos 90, mesmo com o declínio da produção, sua contribuição foi de 20,4 a 25,6% para o PIB da região. Em municípios onde há pouca diversificação da economia, como Lauro Müller e Siderópolis, o carvão contribuiu com até 85% da produção industrial (SIECESC, 1996).

A indústria carbonífera catarinense atingiu seu auge na década de 80, chegando a empregar cerca de 11.000 trabalhadores e prover a subsistência de mais de 66.000 pessoas (CETEM, 2001a). Assumindo a participação de atividades periféricas, tais como o comércio e o setor portuário, com igual importância às da mineração, o impacto total sobre o número de empregos na indústria carbonífera poderia ser estimado em 38.000, os quais mantinham mais

de 220.000 pessoas na década de 80. A partir de 1990, a produção anual de carvão brasileiro praticamente estabilizou-se entre cinco e seis milhões de toneladas, apresentando, portanto, redução em relação à década de 80 quando se situou próximo de oito milhões de toneladas (CETEM, 2001a).

Nas últimas décadas, a produção industrial vem tendo um expressivo crescimento, com destaque para a indústria de cerâmica. De modo similar, a agricultura apresentou grande desenvolvimento, principalmente na lavoura de arroz irrigado. Outra atividade que merece ser destacada é a tradicional produção de suínos, atividade altamente poluente dos recursos hídricos, que despeja nos mananciais grande quantidade de coliformes fecais (SANTA CATARINA, 1997a).

4.2 **BACIAS HIDROGRÁFICAS ABRANGIDAS**

Existem na Área Carbonífera do estado de Santa Catarina três bacias hidrográficas integrantes da Bacia do Atlântico Sudeste: a do Rio Araranguá, a do Rio Tubarão e a do Rio Urussanga. O registro das atividades de uso do solo local foi realizado pelo CETEM a pedido do Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina no ano 2000. De acordo com o SIECESC, a área possui o solo dividido entre as seguintes categorias: mineração, vegetação e cultivos, área urbana, solo exposto e campos, bem como cultivos em áreas alagadas (CETEM, 2001b).

A bacia do Rio Araranguá drena os territórios de 11 municípios, dentre os quais se destacam Araranguá e Criciúma. Possui uma superfície de 3.020 km²; vazão média de 40 m³/s, e uma densidade de drenagem de 1,95 km/km². Esta bacia, cujas nascentes ficam na Serra Geral e cujo rio principal se forma a partir da confluência dos rios Itoupava e Mãe Luzia, é composta por cerca de 15 cursos d'água, dentre os quais merecem citação: Mãe Luzia, Amola Faca, dos Porcos, Jundiá, Turvo e São Bento. De acordo com dados do antigo DNAEE (atual ANEEL), a sub-bacia em pauta tem seus índices máximos de vazão entre janeiro e abril, sendo que as vazões mínimas (média de 18 m³/s) ocorrem de julho a setembro (FREITAS, 1999).

Na Bacia do Rio Urussanga foi analisada pelo SIECESC apenas a área drenada pelo Rio Carvão, com 40,6 km². Com apenas 5,2% de área urbana, esta sub-bacia tem 24,7% do

seu espaço ocupado pelas atividades mineradoras, 21,5% de solo exposto e 48,6% de área cultivada (CETEM, 2001b).

A sub-bacia do Rio Urussanga, que tem uma densidade de drenagem de 1,83 km/km², é a menor do Extremo Sul Catarinense, com uma superfície de 580 km². A montante da sede do município de Urussanga, o rio principal recebe a contribuição do Rio Cocal e de seus afluentes: Tigre e Barbosa. A jusante deste ponto até as proximidades da rodovia BR-101, o Urussanga está canalizado. Na altura da BR-101, na margem direita, surgem as desembocaduras dos rios Ronco D'água e Linha Anta, a última e expressiva contribuição recebida pelo Urussanga antes de atingir a planície flúvio-marinha. De acordo com dados da CASAN, voltados para a análise do suprimento de água para a região de Criciúma, a vazão média mínima do Rio Urussanga é de, aproximadamente, 2,1 m³/s (SDM, 1997).

Por fim, com o maior índice de ocupação urbana (16,1%), tem-se a Bacia do Rio Tubarão, apresentando 126,3 km² de área. Nesta bacia, 12,6% de sua área é ocupada pelas atividades de mineração, 17,1 % por solo exposto e campos e 54,3% por cultivos diversos (SIECESC, 2001). A bacia do Rio Tubarão é a mais expressiva da região: percorre uma distância de 120 km e drena uma área de, aproximadamente, 5.640 km². O Rio Tubarão tem uma vazão média de 50 m³/s e desemboca na Lagoa de Santo Antônio dos Anjos, no município de Laguna. As vazões mínimas concentram-se nos meses de inverno, de março a setembro, quando o rio principal chega a apresentar uma descarga de 10 m³/s. Felizmente, esta queda da vazão ocorre durante a entressafra do arroz irrigado, período em que o consumo de água na agricultura fica, em consequência, mais reduzido.

A figura 15 ilustra a localização das bacias hidrográficas citadas.



Figura 15 Localização das bacias dos Rios Tubarão, Urussanga e Araranguá. Fonte: Adaptada de Gomes (2005).

A figura 16 apresenta as três bacias em detalhe. A área destacada evidencia o local onde há a atividade de exploração de carvão mineral.

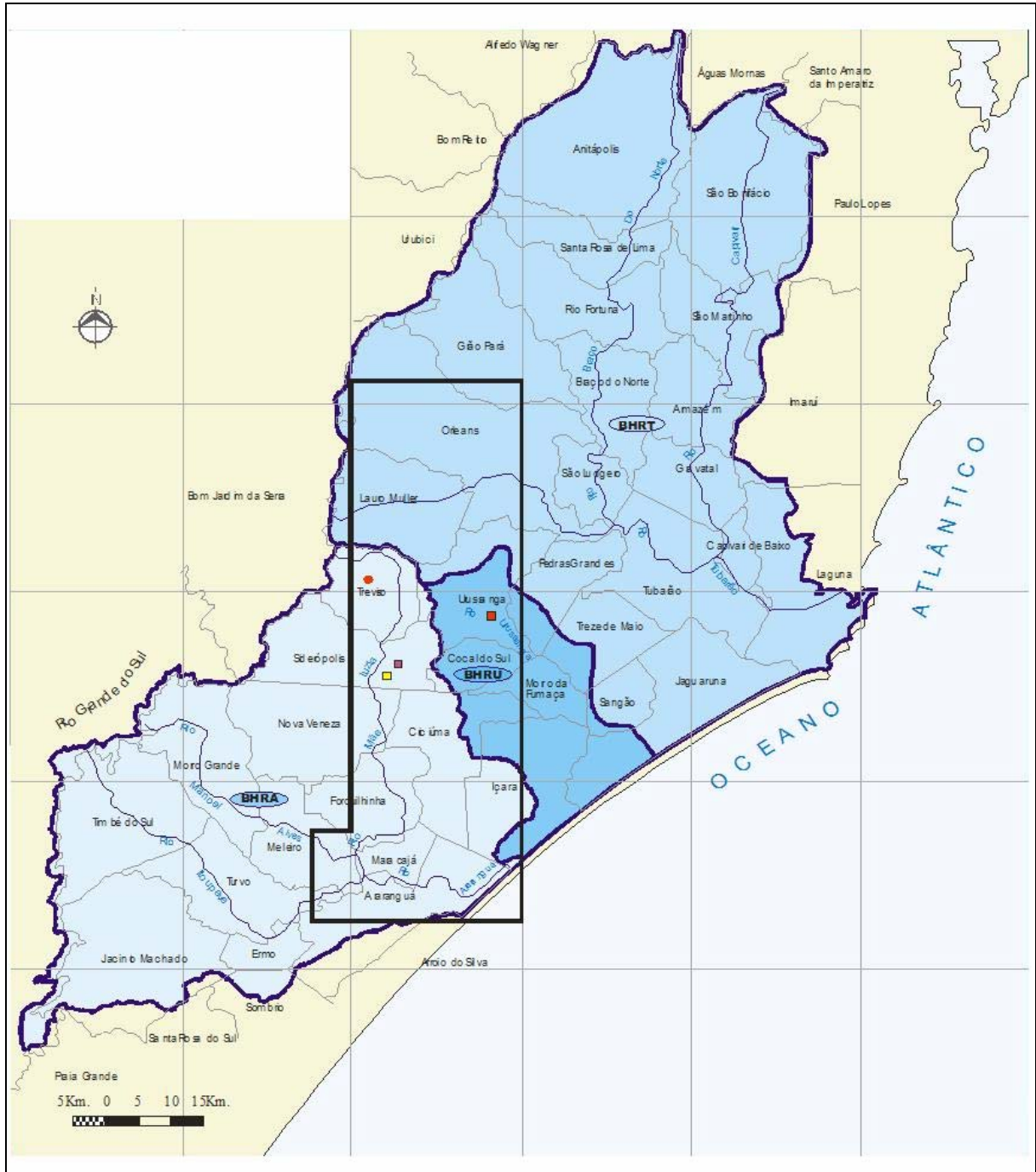


Figura 16 Localização da área carbonífera. Fonte: Adaptada de Gomes (2005).

Convém ressaltar que a Área Carbonífera localiza-se entre as escarpas da Serra Geral e o Oceano Atlântico, sendo que estes são separados por apenas 50 km aproximadamente. Isso faz com que as bacias hidrográficas da região sejam pequenas com rios de pouca vazão. Este fato, por sua vez, provoca conflitos de uso, caracterizados pela baixa disponibilidade hídrica e pela pequena capacidade de diluição de efluentes. A tabela 10 relaciona as áreas e a extensão de cada bacia da área carbonífera.

Tabela 10 Bacias hidrográficas localizadas na área carbonífera

BACIA	ÁREA (ha)	EXTENSÃO (km)
Rio Tubarão	510.000	7.172
Rio Araranguá	302.000	5.916
Rio Urussanga	58.000	1.064

(Fonte: UNESCO, 1996)

Além da indústria da mineração, são fontes de poluição difusa a rizicultura, a suinocultura e o lançamento de esgoto doméstico sem tratamento. Como fontes pontuais de poluição citam-se as indústrias cerâmicas, metal-mecânica e química, os depósitos de resíduos sólidos urbanos e os postos de combustíveis e lavanderias. Dentre os municípios da região, Criciúma é o que apresenta o maior número de fontes de poluição pontual.

Também possui caráter relevante a reserva de água subterrânea da Bacia Carbonífera. Ocorrem duas categorias de aquíferos na região. As rochas cristalinas, graníticas ou basálticas, constituem os aquíferos do tipo fraturado e as rochas sedimentares gonduânicas e os sedimentos terciário-quadernários constituem os aquíferos por porosidade granular. A vulnerabilidade e o risco de contaminação dessas fontes de água pela indústria de extração de carvão são, em geral, altos, com exceção para aqueles encimados por espessos pacotes de rochas pelíticas pouco permeáveis. As descargas de águas contaminadas nos aquíferos, por DAM não serão consideradas no presente estudo, mas constituem um problema de relevada importância para a região.

O presente trabalho será focado na área drenada pelo Rio Sangão, a qual representa uma sub-bacia do Rio Araranguá. Nesse local, a atividade de extração de carvão mineral se desenvolve desde 1885 (GOTHE, 1993) e, assim, várias minas abandonadas podem ser encontradas na superfície da sub-bacia.

4.3 A SUB-BACIA DO RIO SANGÃO

O Rio Sangão apresenta-se degradado desde sua nascente até a foz. Em sua nascente principal, o rio já apresenta pH próximo de 3,0, altas concentrações de sulfatos e de metais pesados.

Recebe contribuições de efluentes industriais (cerâmica, metal-mecânica, vestuários, curtumes etc.), hospitalares, urbanos, além de atividades ligadas à exploração e beneficiamento de carvão mineral. Apresenta aproximadamente 1440 ha de áreas degradadas pela deposição de rejeitos, oriundos do beneficiamento de carvão mineral.

Em alguns trechos, o rio Sangão apresenta-se completamente assoreado. No seu baixo curso, em épocas de cheia, extravasa o seu leito normal e invade áreas agricultáveis, deixando um rastro de devastação quando retorna ao seu nível normal, já que toda a área fica recoberta por uma camada de óxido de ferro.

A figura 17 mostra na cor vermelha os campos de exploração de carvão mineral e a localização do rio Sangão.

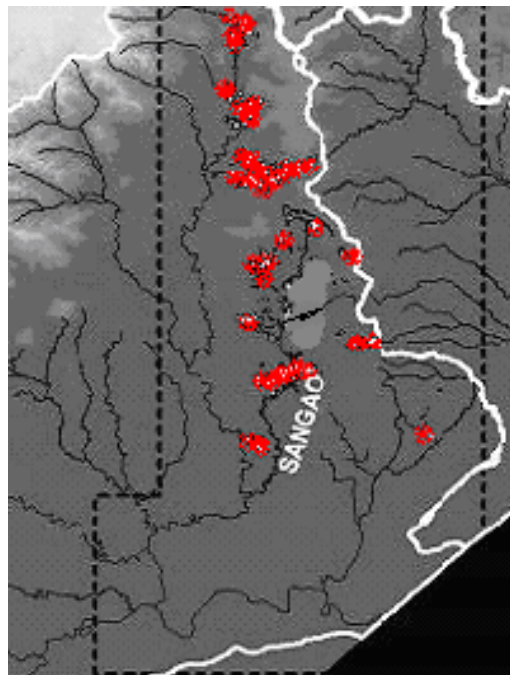


Figura 17 Sub-bacia do rio Sangão. Adaptada de Mendes *et al.*(2004).

De forma esquemática, pode-se representar a sub-bacia do Rio Sangão conforme a figura 18.

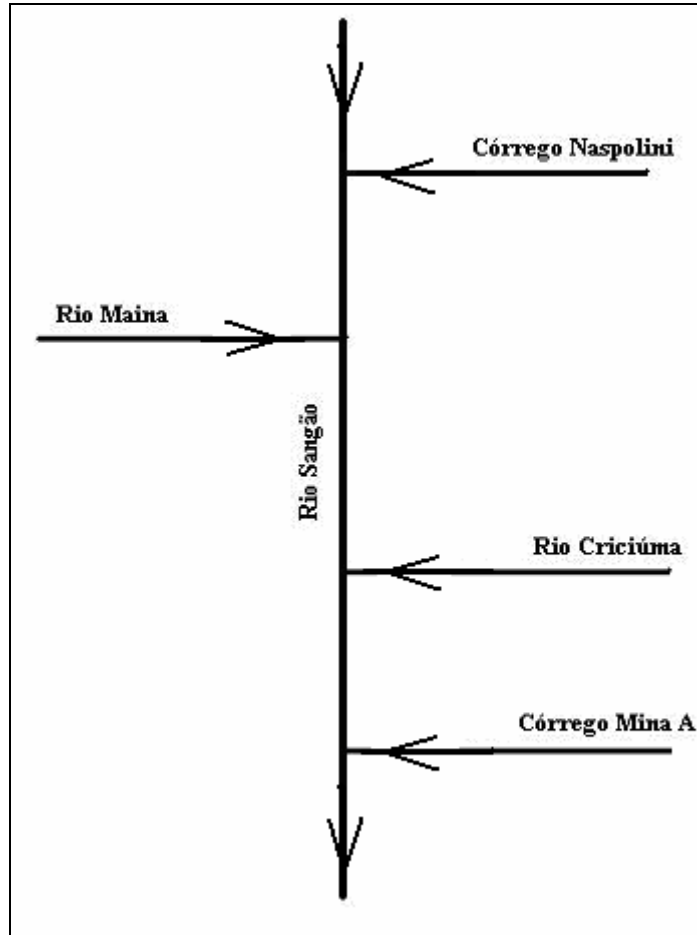


Figura 18 Desenho esquemático da sub-bacia do Rio Sangão

4.3.1 Dados hidrometeorológicos da sub-bacia do Rio Sangão

Conforme já mencionado no presente estudo, deve-se dispor dos seguintes dados hidrometeorológicos: vazões nos cursos d'água, precipitação na bacia, padrão de qualidade da água e vazão oriunda de aquíferos subterrâneos.

Os dados de vazão são necessários para que se possa determinar a concentração do material contaminante nos cursos d'água. Dessa forma, serão adotadas vazões relacionadas às situações de estiagem, quando, então, a concentração de poluentes se torna mais elevada.

Estudo desenvolvido pelo governo do estado de Santa Catarina estabeleceu a vazão mínima específica (em $L/s \cdot km^2$) da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, na qual se encontra a sub-bacia do rio Sangão (SANTA CATARINA, 1997b). Os rios formadores da sub-bacia do Rio Sangão não possuem postos de medição sendo, portanto, necessária uma abordagem de

regionalização para a caracterização hidrológica da Bacia do Rio Araranguá em qualquer seção fluvial.

A metodologia de regionalização baseia-se na descrição da Eletrobrás (1995) e permite a utilização pontual da informação espacialmente disseminada de um parâmetro hidrológico. Sua aplicação foi realizada por meio do programa MAG 3 – RegHidro: Modelo de Regionalização de Variáveis Hidroclimatológicas, desenvolvido pelo professor Antônio Eduardo Lanna do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Foram analisados os dados básicos com exame do ramo inferior (vazões mínimas) e superior (vazões máximas) da curva de descarga, além da continuidade das vazões na região, modificações do leito e dos dados históricos. Calcularam-se os valores de vazões mínimas anuais com duração de sete dias, vazões mínimas mensais e vazões anuais para cada posto. Neste caso, estabeleceu-se um período base de 51 anos, preenchendo-se as falhas existentes.

A tabela 11 apresenta a localização dos postos fluviométricos tomados como base para a regionalização das vazões. Em seguida, a figura 19 mostra a distribuição geográfica desses postos.

Tabela 11 Estações fluviométricas pertencentes à Bacia do Rio Araranguá

Nome da Estação	Local	Latitude	Longitude	Área (Km²)	Período analisado
Forquilha	Rio Mãe Luzia	28°44'00"	49°28'00"	523,0	1942-1992
Meleiro	Rio Manuel Alves	28°49'00"	49°38'38"	344,0	1942-1950
Foz do Manuel Alves	Rio Manuel Alves	28°52'00"	49°32'32"	404,0	1977-1992
Turvo	Rio Amola Faca	28°56'00"	49°42'42"	336,0	1976-1992
Ermo	Rio Itoupava	28°58'00"	49°38'38"	826,0	1978-1992
Taquaruçu	Rio Itoupava	28°57'00"	49°36'00"	898,0	1942-1992

(Fonte: Adaptada de Santa Catarina, 1997b)

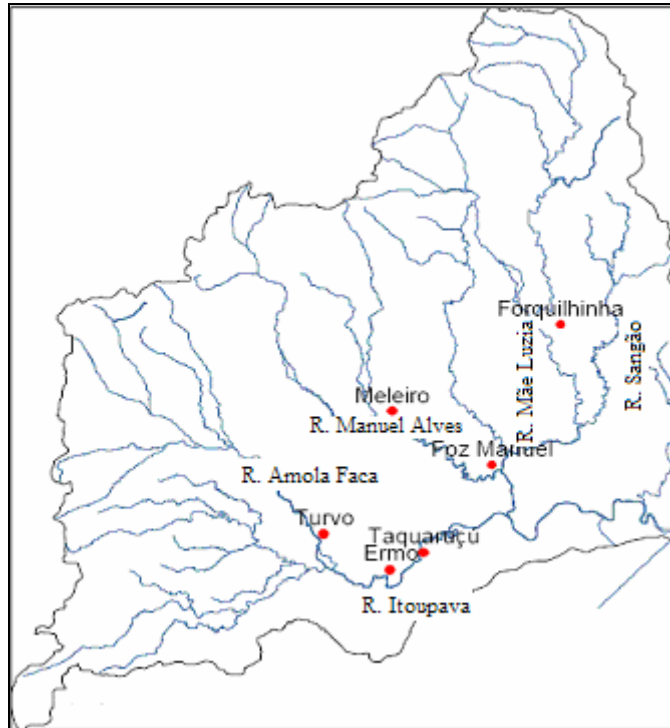


Figura 19 Localização dos postos fluviométricos na Bacia do Rio Araranguá. Fonte: Adaptada de Santa Catarina (1997b).

A metodologia de regionalização foge ao escopo do trabalho. Seu resultado, no entanto, é fundamental para a determinação da qualidade da água ao longo do tempo de exploração do carvão. Assim, utilizaram-se as vazões específicas mínimas mensais apresentadas na figura 20.

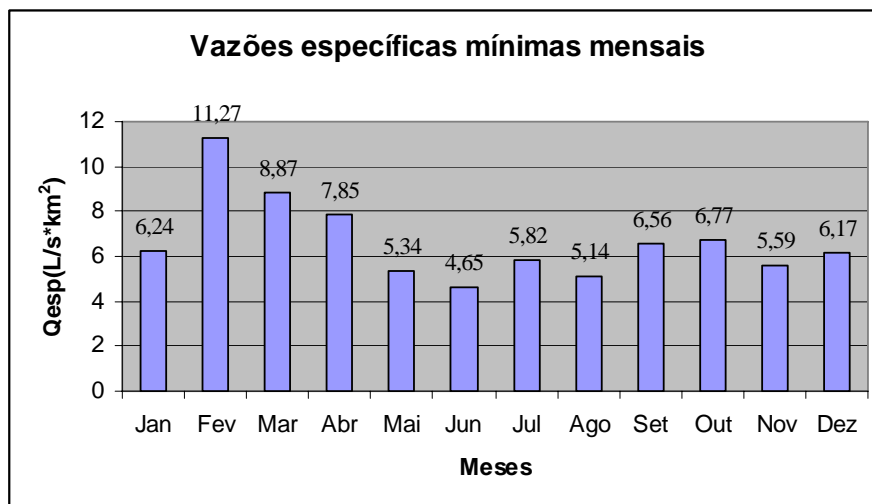


Figura 20 Variação da vazão mínima específica mensal dos postos fluviométricos da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá. Fonte: Adaptada de Santa Catarina (1997b).

A vazão em cada curso d'água será dada, portanto, pelo produto da vazão específica mensal com a área drenada por cada curso d'água. A tabela 12 apresenta a área drenada por cada curso d'água.

Tabela 12 Área drenada pelos cursos d'água da bacia do rio Sangão

Curso d'água	Área drenada (km²)
Rio Sangão (trecho norte)	59,88
Córrego Napolini	2,27
Rio Maina	7,63
Rio Sangão (trecho sul)	51,42
Rio Criciúma	4,28
Córrego Mina A	1,08

(Fonte: CETEM, 2001b)

Enfim, a tabela 13 apresenta as vazões mínimas mensais dos cursos d'água da sub-bacia do Rio Sangão.

Tabela 13 Vazões mínimas em m³/s na bacia do Rio Sangão.

Mês	Rio Sangão (trecho norte)	Córrego Napolini	Rio Maina	Rio Sangão (trecho sul)	Rio Criciúma	Córrego Mina A
Jan	0,374	0,014	0,048	0,321	0,027	0,007
Fev	0,675	0,026	0,086	0,580	0,048	0,012
Mar	0,531	0,020	0,068	0,456	0,038	0,010
Abr	0,470	0,018	0,060	0,404	0,034	0,008
Mai	0,320	0,012	0,041	0,275	0,023	0,006
Jun	0,278	0,011	0,035	0,239	0,020	0,005
Jul	0,349	0,013	0,044	0,299	0,025	0,006
Ago	0,308	0,012	0,039	0,264	0,022	0,006
Set	0,393	0,015	0,050	0,337	0,028	0,007
Out	0,405	0,015	0,052	0,348	0,029	0,007
Nov	0,335	0,013	0,043	0,287	0,024	0,006
Dez	0,369	0,014	0,047	0,317	0,026	0,007

Os valores de precipitação adotados referem-se à medição realizada no município de Forquilha, vizinho ao município de Criciúma, onde se localiza parte da sub-bacia do rio Sangão. Tais valores têm por finalidade quantificar a carga lançada pelo contato da água pluvial com as superfícies degradadas pela mineração, onde, de forma geral, encontram-se resíduos da atividade. Foram adotadas para estas águas as mesmas concentrações de contaminantes existentes na água oriunda do beneficiamento do carvão. Considerou-se a média histórica da precipitação observada no período de 1980 até 2000. A tabela 14, adaptada de Gomes (2005), exhibe os valores adotados.

Tabela 14 Valores de precipitação adotados no modelo.

Mês	Precipitação (mm)
Jan	170,28
Fev	188,35
Mar	129,09
Abr	99,87
Mai	98,84
Jun	96,05
Jul	123,71
Ago	104,22
Set	124,63
Out	135,62
Nov	132,73
Dez	162,82

(Fonte: Adaptada de Gomes, 2005)

Como não há estações pluviométricas localizadas na sub-bacia do Rio Sangão, a precipitação é considerada constante em todos os pontos onde há minas na área de estudo. Apesar da possibilidade de variações da precipitação anual, o volume de efluentes é determinado, em sua maior parte, pelo beneficiamento de minério, o que torna aceitável a aproximação.

No presente trabalho, considera-se que a vazão mensal bombeada para fora das minas corresponde ao volume de água precipitado sobre a área de superfície minerada. Apesar de constar da metodologia, não é levada em consideração a vazão oriunda de aquíferos subterrâneos, tendo em vista a prática comum na região de represar as águas subterrâneas.

4.3.2 Condições de qualidade da água

Conforme apresentado, as principais substâncias verificadas na drenagem ácida de mina são: ferro, alumínio, manganês, zinco, cobre e sulfatos. Gomes (2005) relata a concentração média dos principais componentes da drenagem ácida de treze bocas de minas abandonadas nas bacias hidrográficas dos Rios Araranguá e Urussanga. A tabela 15 exhibe tais concentrações, além do valor de pH, responsável pela medida de acidez de qualquer solução química, que foi mais freqüente na análise da DAM dessas minas.

Tabela 15 Composição da DAM nas minas da bacia do Rio Araranguá

Parâmetro	Padrão
pH	3,17
Fe	29,48 mg/L
Al	18,63 mg/L
Mn	2,63 mg/L
Zn	2,15 mg/L
Cu	0,001 mg/L
Sulfatos	1460 mg/L

(Fonte: Adaptada de Gomes, 2005)

Assim sendo, considera-se que todos os rios da bacia do Rio Sangão possam ser classificados como corpos d'água da classe 1, na qual o padrão de qualidade da água exige maior rigor quanto ao lançamento de efluentes, ou como corpos d'água da classe 3, na qual existe maior tolerância em relação aos parâmetros de qualidade.

Conforme apresentado, os parâmetros de qualidade da água são dados pela Resolução CONAMA 357/2005. De acordo com esta Resolução, para que determinada fonte de água doce seja classificada em dada classe de uso, a concentração de alguns parâmetros não pode ser superior a um limite estabelecido. Os limites de concentração para o enquadramento na classe 1 dos principais parâmetros que compõem a DAM são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 Padrão para corpo d'água classe 1

Parâmetro	Padrão
pH	Entre 6,0 e 9,0
Fe	0,3 mg/L
Al	0,1 mg/L
Mn	0,1 mg/L
Zn	0,18 mg/L
Cu	0,009 mg/L
Sulfatos	250 mg/L

(Fonte: Resolução 357 CONAMA/2005)

Para o enquadramento na classe 3, a Resolução estabelece os limites de concentração dos principais parâmetros que compõem a DAM. Tais limites são apresentados na tabela 17.

Tabela 17 Padrão para corpo d'água classe 3

Parâmetro	Padrão
pH	Entre 6,0 e 9,0
Fe	5,0 mg/L
Al	0,2 mg/L
Mn	0,5 mg/L
Zn	5,0 mg/L
Cu	0,013 mg/L
Sulfatos	250 mg/L

(Fonte: Resolução 357 CONAMA/2005)

Assim, o tratamento de efluentes deve reduzir a concentração dos parâmetros apresentada na tabela 15 a valores menores ou iguais àqueles apresentados na tabela 16 ou 17, de acordo com cenário apresentado. Para a correta fiscalização, faz-se necessária a adoção de pontos de monitoramento da qualidade da água. No presente estudo, são considerados pontos de monitoramento os trechos de rio onde se localizam as minas.

4.3.3 Dados relacionados à extração

De acordo com estudos realizados pelo CETEM, foi identificada a presença de áreas degradadas pela mineração na sub-bacia do Rio Sangão. Tais áreas foram quantificadas e o solo classificado quanto ao uso. A tabela 18 apresenta a classificação de uso do solo nas áreas drenadas pelos cursos d'água localizados na área de estudo (CETEM, 2001b).

Tabela 18 Classificação de uso do solo por curso d'água.

Corpo d'água receptor	Área de rejeitos (km ²)	Área de rejeitos com recomposição vegetal (km ²)	Solo e Campos (km ²)	Área urbana (km ²)	Vegetação e Cultivos (km ²)	Bacias e lagos (km ²)	Áreas alagadas (km ²)
Rio Sangão (N)	5,326	-	8,321	13,459	31,697	1,081	-
Córrego Napolini	1,031	-	0,725	3,107	2,548	0,220	-
Rio Maina	0,100	-	0,563	0,792	0,816	-	-
Rio Sangão (S)	3,594	4,606	10,034	11,932	18,518	1,296	1,443
Rio Criciúma	0,397	0,510	0,388	0,323	1,528	0,278	0,857
Córrego Mina A	0,084	0,112	0,300	0,055	0,493	0,035	-

(Fonte: Adaptada de CETEM, 2001b)

Considerar-se-á que as minas estão situadas no interior da área de rejeitos. Ademais, toda a precipitação incidente sobre essa área formará drenagem ácida. Convém, no entanto, ressaltar que a área de rejeitos apresenta dimensões maiores do que poderia ter, caso houvesse a adoção dos mecanismos de tratamento de efluentes e de fechamento de mina citados no presente estudo. Assim sendo, os valores de área de rejeitos apresentados refletem atividades passadas e sua adoção na elaboração do modelo não fariam jus à situação de exploração de minas recém descobertas. Portanto, serão usados no modelo valores menores do que aqueles apresentados na tabela 18.

A reserva de minério e o tempo de exploração da mina serão fictícios, mas baseados em valores apresentados no estudo desenvolvido pelo CETEM a pedido do SIECESC (CETEM, 2001b). As reservas serão tanto maiores quanto maior for a área minerada. O tempo de exploração será de quinze anos para todas as minas. Uma consideração especial será feita em relação ao Rio Sangão: enquanto nos outros rios será considerada uma única mina, nele a área minerada será dividida para que, no modelo, as minas se localizem entre seus afluentes e se possa representar o arranjo mais elaborado que o modelo pode tomar. Assim, o trecho norte do rio terá sua área minerada dividida em três e o trecho sul terá apenas duas minas.

Os resíduos gerados no beneficiamento serão despejados no trecho de rio em cuja área de drenagem a mina se encontra. A verificação do atendimento aos parâmetros de qualidade da água será realizada no mesmo ponto. A tabela 19 apresenta a localização das minas quanto ao curso d'água receptor, a área aproximada de cada mina tendo como base a tabela anterior, a reserva de minério estimada e o tempo de exploração do carvão mineral.

Tabela 19 Dados relacionados às minas.

Mina	Área minerada (m²)	Corpo d'água receptor	Reserva de minério (ton)	Tempo de exploração da mina (anos)
Mina 1	17.500	Rio Sangão	9.000.000	15 anos
Mina 2	10.000	Córrego Napolini	6.000.000	15 anos
Mina 3	17.500	Rio Sangão	9.000.000	15 anos
Mina 4	10.000	Rio Maina	3.750.000	15 anos
Mina 5	17.500	Rio Sangão	9.000.000	15 anos
Mina 6	4.000	Rio Criciúma	4.500.000	15 anos
Mina 7	17.500	Rio Sangão	9.000.000	15 anos
Mina 8	850	Córrego Mina A	3.000.000	15 anos
Mina 9	17.500	Rio Sangão	9.000.000	15 anos

A figura 21 ilustra a localização das minas na sub-bacia do Rio Sangão.

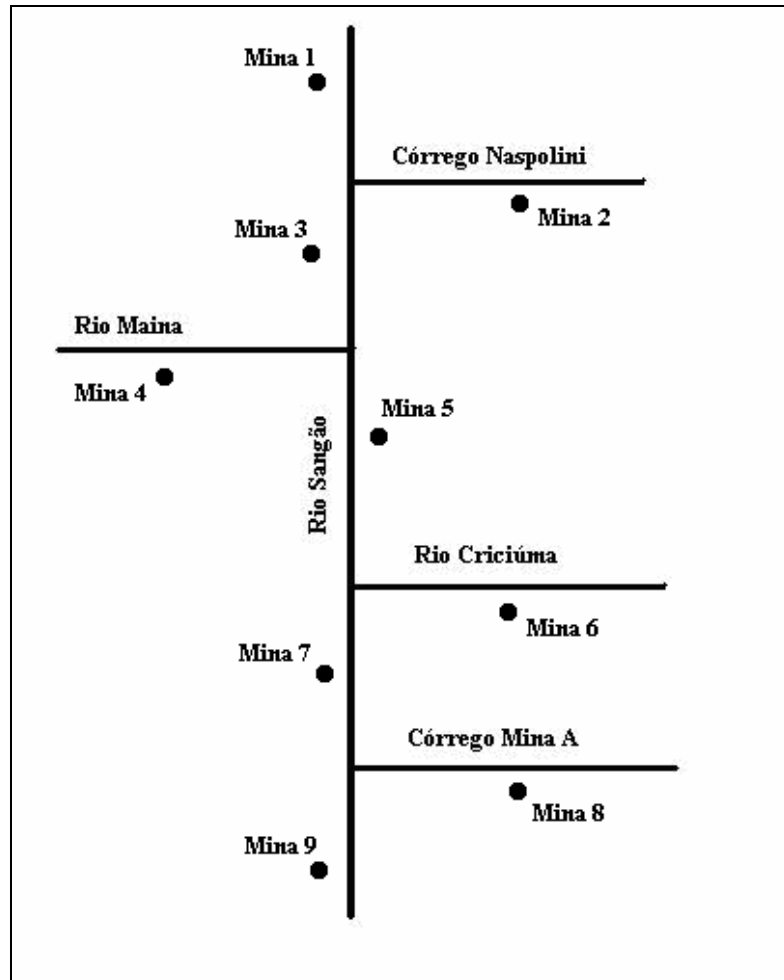


Figura 21 Localização das minas na sub-bacia do Rio Sangão.

Segundo o SIECESC, o preço da tonelada de carvão beneficiado é de R\$ 110,00, considerando-se a produção de CE 4.500 kcal/kg cujo índice de rejeitos é de, aproximadamente, 65%. A taxa de juros considerada será de 0,8% ao mês.

As minas da área de estudo são subterrâneas, fazendo com que as técnicas de exploração possíveis sejam a de câmaras-e-pilares e a de *longwall mining*.

Ainda de acordo com o SIECESC, o custo da lavra subterrânea com a execução de câmaras e pilares é da ordem de R\$30,00 por tonelada ROM, variando de acordo com a escassez. Em outras palavras, à medida que a reserva diminui, os custos se elevam. Dessa forma, é considerado no modelo o aumento linear dos custos de extração de acordo com a equação 31.

$$C_{Exp} = \frac{\text{tempo}}{60} + 28 \quad (31)$$

O tempo é dado em meses. Assim o custo da lavra subterrânea pela técnica câmaras e pilares será situado entre R\$ 28,00, no início das atividades, e R\$ 31,00, ao término.

Apesar de a técnica *longwall* não ser utilizada na área do SIECESC, o sindicato estima que seu custo seja da ordem de R\$ 20,00 por tonelada ROM.

Não são considerados custos fixos, tendo em vista o fato de os custos apresentados já abrangerem todas as despesas relativas à atividade.

Por fim, o beneficiamento do carvão mineral tem um custo aproximado de R\$3,00 por tonelada, conforme informações cedidas pelo SIECESC.

Cumprido ressaltar que os dados apresentados variam de acordo com a empresa mineradora. No entanto, podem ser vistos como uma média apresentada pelas empresas estabelecidas na área de estudo.

4.3.4 Dados relacionados ao tratamento de efluentes

O custo de tratamento de efluentes varia de acordo com a concentração de metais presentes na drenagem ácida. Segundo Gusek (2005), o custo de tratamento por quilograma de metal retirado do efluente, em preços de 1995, pode variar de US\$0,33 a US\$0,38 no caso de tratamento passivo. Para o tratamento ativo, o mesmo autor estima seu custo em, aproximadamente, US\$0,77.

Assim são consideradas três formas diferentes de tratamento. A primeira delas, o tratamento passivo simples, consta apenas de uma bacia de decantação e de uma bacia de fluxo vertical. Uma outra forma de tratamento passivo, mais eficiente, é semelhante à anterior, porém com o efluente passando ainda por uma lagoa anaeróbica. Por fim, o tratamento ativo considerado consiste da adição de calcário (CaO) em quantidades necessárias à elevação do pH para que os metais sejam precipitados.

Além dessas estruturas, deve-se considerar a existência de estruturas e serviços auxiliares, a saber: condutos, válvulas, coleta de amostras para monitoramento da qualidade da água, emprego de mão-de-obra, manutenção das instalações e remoção do lodo formado.

Os custos de implantação da estrutura de tratamento podem ser divididos em custos de capital e custos anuais. Os primeiros dizem respeito à construção das estruturas onde, de fato, ocorre o tratamento da drenagem ácida. Os custos anuais respondem pelo montante gasto com a operação da estrutura de tratamento. Gusek (2005) faz uma estimativa da razão entre o custo de capital e o custo total de tratamento de efluentes. Em geral, as empresas arcam com os custos de capital em fase anterior ao início das atividades. Conforme apresentado, no modelo todos os custos incidirão durante a atividade de mineração.

A razão entre o custo de capital e o custo total é mostrada na tabela 20.

Tabela 20 Participação do custo de capital no total gasto com tratamento

Tratamento	Razão: % do custo de capital sobre o custo total
Passivo simples (j=1)	Entre 40% e 60%
Passivo com lagoa anaeróbica (j=2)	Entre 80% e 85%
Ativo com CaO (j=3)	Entre 20% e 30%

(Fonte: Gusek, 2005)

O aumento da participação do custo de capital no total gasto com o tratamento passivo com lagoa anaeróbica em relação ao tratamento passivo simples deve-se à construção de mais uma estrutura, a própria lagoa, a qual necessita de um fundo de calcário, elevando, assim, seu custo de instalação. A menor participação dos custos de capital no total gasto com o tratamento ativo deve-se à necessidade de constante aquisição de reagente, fazendo com que os custos de operação sejam realçados.

A eficiência de qualquer tratamento de efluentes e, em particular, daqueles oriundos das atividades de mineração de carvão depende da concentração inicial de substâncias críticas no efluente e do padrão que se deseja alcançar. É comum que se atinja a redução total de contaminantes, embora para tal seja necessário o correto dimensionamento da estrutura de tratamento. Para fins de validação do modelo, é adotado o tratamento ativo como o mais eficiente, isto é, aquele que conduz à remoção total de metais. Ademais, adota-se, para efeito de validação do modelo, que o tratamento passivo simples permite que 2% dos metais

permaneçam no efluente e que o tratamento passivo com lagoa anaeróbica deixa 1% dos metais remanescentes. A tabela 21 relaciona tratamentos, custos e a reminiscência de metais.

Tabela 21 Tratamentos, custos e reminiscência de metais.

Tratamento	Custo (R\$/kg)	Percentual Remanescente (η)
Passivo simples	1,12	2%
Passivo com lagoa anaeróbica	1,29	1%
Ativo	2,61	0

Pode-se prever o volume de efluentes a tratar a partir da consideração de que são necessários 2 m³ de água para beneficiar uma tonelada de carvão mineral (SANTA CATARINA, 1997a). Soma-se ao volume de efluentes o produto da precipitação total ao longo do tempo da atividade pela área minerada para a determinação do volume de águas pluviais destinadas ao tratamento. A massa total de metais a tratar será o produto da concentração total de metais pelo volume de efluentes gerado.

De acordo com a Tabela 15, a concentração total de metais no efluente das minas da sub-bacia do rio Sangão é 52,891 mg/L. Os custos totais de tratamento são dados pela tabela 22.

Tabela 22 Custos de tratamento

Minas	Massa de Metais (kg)	Custo total do tratamento passivo simples (M_{0i1})	Custo total do tratamento passivo com lagoa anaeróbica (M_{0i2})	Custo total do tratamento ativo (M_{0i3})
Mina 1	973.783,1	R\$ 1.090.637,05	R\$ 1.256.180,18	R\$ 2.541.573,85
Mina 2	647.117,8	R\$ 724.771,89	R\$ 834.781,91	R\$ 1.688.977,36
Mina 3	973.783,1	R\$ 1.090.637,05	R\$ 1.256.180,18	R\$ 2.541.573,85
Mina 4	97.925,8	R\$ 445.676,09	R\$ 513.323,35	R\$ 1.038.584,45
Mina 5	973.783,1	R\$ 1.090.637,05	R\$ 1.256.180,18	R\$ 2.541.573,85
Mina 6	480.989,3	R\$ 538.708,02	R\$ 620.476,20	R\$ 1.255.382,09
Mina 7	973.783,1	R\$ 1.090.637,05	R\$ 1.256.180,18	R\$ 2.541.573,85
Mina 8	18.402,2	R\$ 356.610,45	R\$ 620.476,20	R\$ 831.029,72
Mina 9	973.783,1	R\$ 1.090.637,05	R\$ 1.256.180,18	R\$ 2.541.573,85

Os custos de tratamento, no entanto, aparecem no modelo divididos em parcelas mensais já que esta é a discretização temporal adotada. Aplicando-se a Eq. (18), com a taxa de juros mensal de 0,8%, nos valores totais, obtêm-se os custos de tratamento que constarão da função-objetivo. A tabela 23 apresenta tais custos arredondados para a centena superior mais próxima.

Tabela 23 Parcelas mensais dos custos de tratamento

Minas	Custo do tratamento passivo simples (C_{Trat₁}(i))	Custo do tratamento passivo com lagoa anaeróbica (C_{Trat₂}(i))	Custo do tratamento ativo (C_{Trat₃}(i))
Mina 1	R\$ 11.500,00	R\$ 13.200,00	R\$ 26.700,00
Mina 2	R\$ 7.700,00	R\$ 8.800,00	R\$ 17.800,00
Mina 3	R\$ 11.500,00	R\$ 13.200,00	R\$ 26.700,00
Mina 4	R\$ 4.700,00	R\$ 5.400,00	R\$ 11.000,00
Mina 5	R\$ 11.500,00	R\$ 13.200,00	R\$ 26.700,00
Mina 6	R\$ 5.700,00	R\$ 6.600,00	R\$ 13.200,00
Mina 7	R\$ 11.500,00	R\$ 13.200,00	R\$ 26.700,00
Mina 8	R\$ 3.800,00	R\$ 4.400,00	R\$ 8.800,00
Mina 9	R\$ 11.500,00	R\$ 13.200,00	R\$ 26.700,00

4.3.5 Dados relacionados ao fechamento de mina

Conforme relatam os itens 2.6.3, 3.1.4 e 3.2 do presente estudo, pode-se fazer a previsão dos custos a serem realizados com o fechamento de mina estimando-se quantidade de rejeitos produzidos pela exploração do carvão.

Desse modo, a partir da reserva inicial estabelecida para cada mina e do percentual de rejeitos contidos no minério e, ainda, tendo em vista o fato de que as minas esgotam-se dentro de um tempo estabelecido, pode-se definir a quantidade de rejeito gerado. De posse da quantidade de rejeito a ser gerada durante a operação da mina, pode-se estimar o custo total de fechamento, tendo como base o valor de US\$ 0,80 por tonelada de rejeito. Adota-se a taxa de câmbio R\$2,25 por dólar. Logo, os custos totais de fechamento de cada mina podem ser dados pela tabela 24.

Tabela 24 Custos totais de fechamento

Minas	Reserva (ton)	Rejeitos (65%)	Custo total de fechamento	
Mina 1	9.000.000	5.850.000	R\$	10.530.000,00
Mina 2	6.000.000	3.900.000	R\$	7.020.000,00
Mina 3	9.000.000	5.850.000	R\$	10.530.000,00
Mina 4	3.750.000	2.437.500	R\$	4.287.500,00
Mina 5	9.000.000	5.850.000	R\$	10.530.000,00
Mina 6	4.500.000	2.925.000	R\$	5.265.000,00
Mina 7	9.000.000	5.850.000	R\$	10.530.000,00
Mina 8	3.000.000	1.950.000	R\$	3.510.000,00
Mina 9	9.000.000	5.850.000	R\$	10.530.000,00

Contudo, pretende-se criar um mecanismo de capitalização para que ao fim do empreendimento se disponha dos recursos necessários ao fechamento.

Sabe-se que algumas atividades de fechamento podem ser desenvolvidas durante a lavra e outras são aplicáveis apenas depois de cessadas as atividades. No entanto, conforme apresentado, os custos incidem durante a etapa de exploração do carvão. Assim, são adotadas parcelas mensais com a aplicação da Eq. (19), com taxa de juros de 0,8% ao mês.

A tabela 25 apresenta os resultados obtidos com arredondamento para a centena superior mais próxima.

Tabela 25 Custos mensais para o fechamento de mina

Minas	Custo total de fechamento		Custos mensais de fechamento (CFec(i))	
Mina 1	R\$	10.530.000,00	R\$	20.100,00
Mina 2	R\$	7.020.000,00	R\$	13.400,00
Mina 3	R\$	10.530.000,00	R\$	20.100,00
Mina 4	R\$	4.287.500,00	R\$	8.400,00
Mina 5	R\$	10.530.000,00	R\$	20.100,00
Mina 6	R\$	5.265.000,00	R\$	10.100,00
Mina 7	R\$	10.530.000,00	R\$	20.100,00
Mina 8	R\$	3.510.000,00	R\$	6.700,00
Mina 9	R\$	10.530.000,00	R\$	20.100,00

No Capítulo 5 são vistos os cenários analisados e os resultados obtidos.

5 APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os cenários avaliados e seus respectivos resultados. Para isso, entretanto, realiza-se uma breve descrição das variáveis de entrada comuns a todos os cenários e são tecidas algumas considerações a respeito da apresentação dos resultados.

5.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA COMUNS

Conforme já mencionado, a diferença entre os casos analisados é dada pela variação das formas de tratamento do efluente gerado, pela variação do padrão de qualidade da água desejado e pela presença das minas no trecho de rio associado. Assim sendo, as demais variáveis de entrada do modelo têm os mesmos valores para todos os casos analisados.

Pode-se, então, classificar as variáveis de entrada em variáveis comuns e variáveis específicas de cada mina. Variáveis comuns são aquelas que não dependem da mina, nem do cenário analisado. A tabela 26 recapitula algumas variáveis gerais do modelo, os símbolos adotados para representá-las e seus respectivos valores.

Tabela 26 Variáveis gerais do modelo

Variável	Símbolo	Valor
Tempo de exploração	t	180 meses
Preço da tonelada de carvão mineral	p	R\$ 110,00
Quantidade de rejeitos no carvão ROM	ε	65%
Taxa mensal de inflação	δ	0,8%
Volume de água para o beneficiamento de 1 tonelada de carvão	K	2,0 m ³
Custo de beneficiamento de 1 tonelada de carvão mineral	CBen	R\$ 3,00

Também são classificadas como variáveis comuns, aquelas relacionadas com o regime hidrológico da bacia (vazão e precipitação). Representa-se, no modelo, a vazão mensal nos trechos onde há mina por: Q_{mensal} . Os valores são dados pela tabela 13. A precipitação, representada pela letra P, é considerada igual para a toda a bacia, embora se saiba que existem pequenas variações. Seus valores são dados pela tabela 14.

As variáveis relativas às minas são aquelas que dependem da localização da mina ou da técnica de manejo de resíduos a ela destinada. Tais variáveis também podem ser comuns a

todos os cenários e é o que acontece para as variáveis de localização. Nessa circunstância tem-se: superfície minerada, reserva inicial estimada para cada mina e composição dos efluentes de cada mina. Cumpre ressaltar que, no modelo, considera-se que o efluente tem a mesma composição para todas as minas. A tabela 27 recapitula símbolos e valores das variáveis relativas a cada uma das minas.

Tabela 27 Variáveis comuns relativas às minas.

Minas	Reserva inicial – R ₀ (ton)	Área - A (m ²)	Composição da DAM		
			Ferro (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Manganês (mg/L)
Mina 1	9.000.000	17.500	29,48	1460	2,63
Mina 2	6.000.000	10.000	29,48	1460	2,63
Mina 3	9.000.000	17.500	29,48	1460	2,63
Mina 4	3.750.000	10.000	29,48	1460	2,63
Mina 5	9.000.000	17.500	29,48	1460	2,63
Mina 6	4.500.000	4.000	29,48	1460	2,63
Mina 7	9.000.000	17.500	29,48	1460	2,63
Mina 8	3.000.000	850	29,48	1460	2,63
Mina 9	9.000.000	17.500	29,48	1460	2,63

Ademais, conforme apresentado no item 2.4, a dissolução de metais ocorre com a diminuição do pH do efluente. Assim, as concentrações dos metais presentes na DAM estão correlacionadas, de maneira forte, entre si e com a acidez. Tal situação faz com que não seja necessária a verificação e a imposição de limites sobre a concentração de todos os metais. No presente estudo, são analisados apenas três parâmetros: ferro total, manganês e sulfatos.

Salienta-se que é estipulado um intervalo de produção para cada mina a fim de evitar que se tenha como resultados produção nula em determinados meses. Assim, considera-se que as minas devem produzir no mínimo 12.500 toneladas por mês e no máximo 60.000 toneladas por mês.

As variáveis relacionadas com as técnicas de manejo de resíduos, os limites de concentração impostos e a presença ou ausência de mina em determinados trechos serão consideradas caso a caso.

5.2 FORMATO DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Conforme relatado na metodologia, além da maximização da função objetivo, é obtida a produção de cada mina em cada mês do seu período de operação. No entanto, o

modelo elaborado é capaz de apresentar a concentração dos parâmetros analisados (ferro, sulfatos e manganês) durante o mesmo período.

Dessa forma, apresenta-se o valor da função objetivo e a produção mensal de cada mina, em forma de gráfico. Também são mostradas em forma de gráfico as concentrações dos parâmetros de qualidade da água escolhidos.

A partir dos resultados de produção monta-se um fluxo de caixa, representando o conjunto de minas da bacia. Wildemann *et al* (2005) estabelecem o fluxo de caixa para o ciclo de vida de um empreendimento mineiro apresentado pela figura 22.

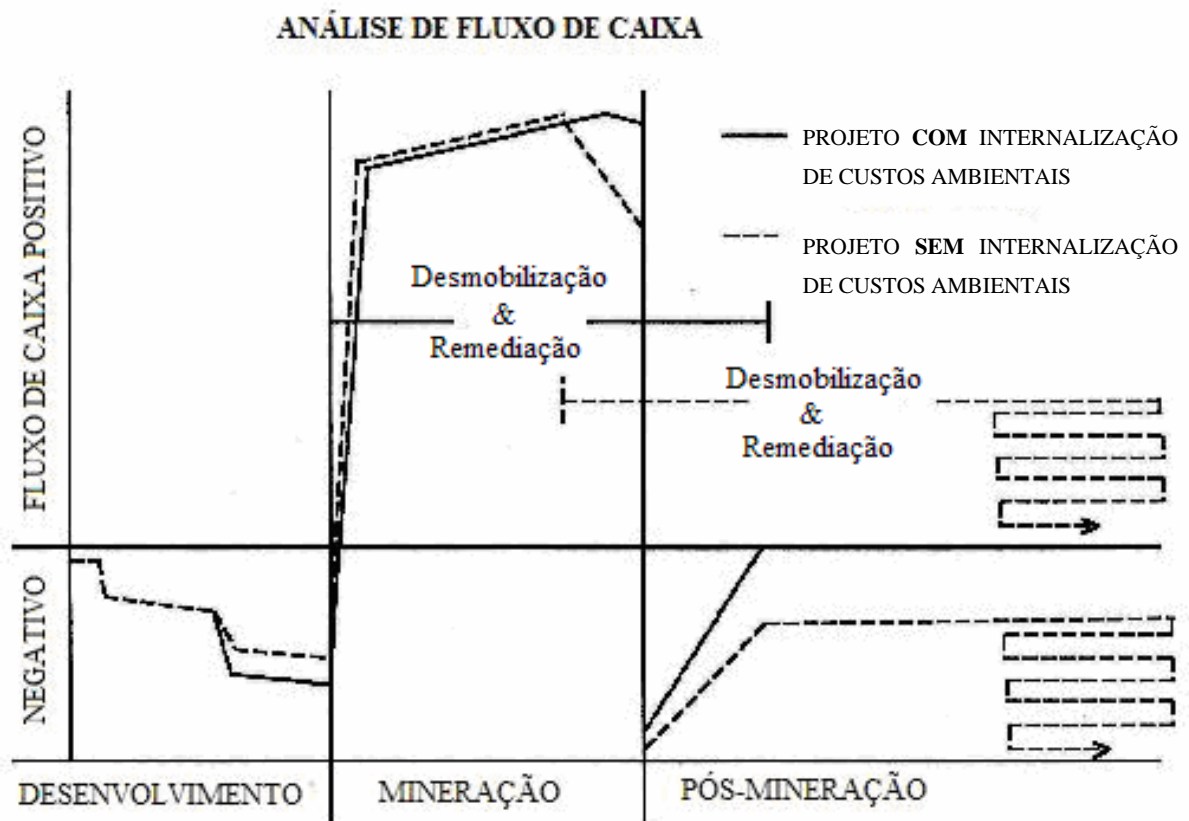


Figura 22 Fluxo de caixa para o ciclo de vida de empreendimentos mineiros. Fonte: Adaptada de Wildemann (2005)

Os projetos em que os custos de tratamento e de remediação são considerados desde a fase de planejamento mostram-se mais rentáveis, pois diminuem os elevados custos da fase pós-fechamento. Cabe ressaltar que, em alguns casos, os custos da fase pós-fechamento podem se prolongar por tempo indeterminado.

Destaca-se, ainda, que a instalação de dispositivos de tratamento garante a redução de áreas impactadas e diminui o valor dos custos de desmobilização. Tais dispositivos, além de concentrarem a drenagem ácida em local onde ela receberá o tratamento adequado, contam com condutores, tais como canais ou tubulações, responsáveis pelo transporte de DAM dos seus locais de origem ao destino final (curso d'água) após passagem pelo próprio sistema de tratamento, impedindo o escoamento desse material pela drenagem natural do terreno.

Assim, é realizada uma comparação entre a renda total gerada pela mineração em vários cenários com tratamento de efluentes e a renda total obtida na área na situação real em que a exploração se deu, ou seja, sem tratamento algum. Enfim, espera-se encontrar uma regra operacional econômica para cada mina em face dos custos ambientais e da bacia hidrográfica na qual a extração se situa.

5.3 O CASO-BASE: SEM TRATAMENTO DE EFLUENTES E SEM PLANO DE FECHAMENTO

O caso-base consiste na situação em que não há qualquer tipo de tratamento para o efluente gerado e não é considerada a responsabilidade de recomposição da área degradada. Assim sendo, verificou-se o valor de R\$ 246.360.674,38 para a função-objetivo. Devido à ausência de tratamento, o valor encontrado é o maior entre os cenários analisados em detrimento da qualidade das águas da bacia. Salienta-se que tal situação de forma alguma indica que o caso base seja o responsável pelos maiores retornos financeiros. Conforme Wildemann (2005), um projeto que não integra o tratamento de efluentes e o fechamento do empreendimento é considerado um projeto fraco, pois provoca prejuízos futuros.

Os prejuízos causados por um projeto fraco afetam a sociedade de duas formas. A primeira delas é a incursão de prejuízos aos próprios empreendimentos mineiros tendo em vista que, após o esgotamento das reservas, as ações de fechamento podem se estender por um tempo ilimitado, fazendo desaparecer grande parte do lucro conseguido com retirada de carvão. Em paralelo, a falta de obediência dos limites de concentração dos parâmetros de qualidade da água impede o estabelecimento de novas atividades e provoca ônus naquelas já existentes. A figura 23 apresenta a produção ótima de cada mina ao longo do tempo para o caso base.

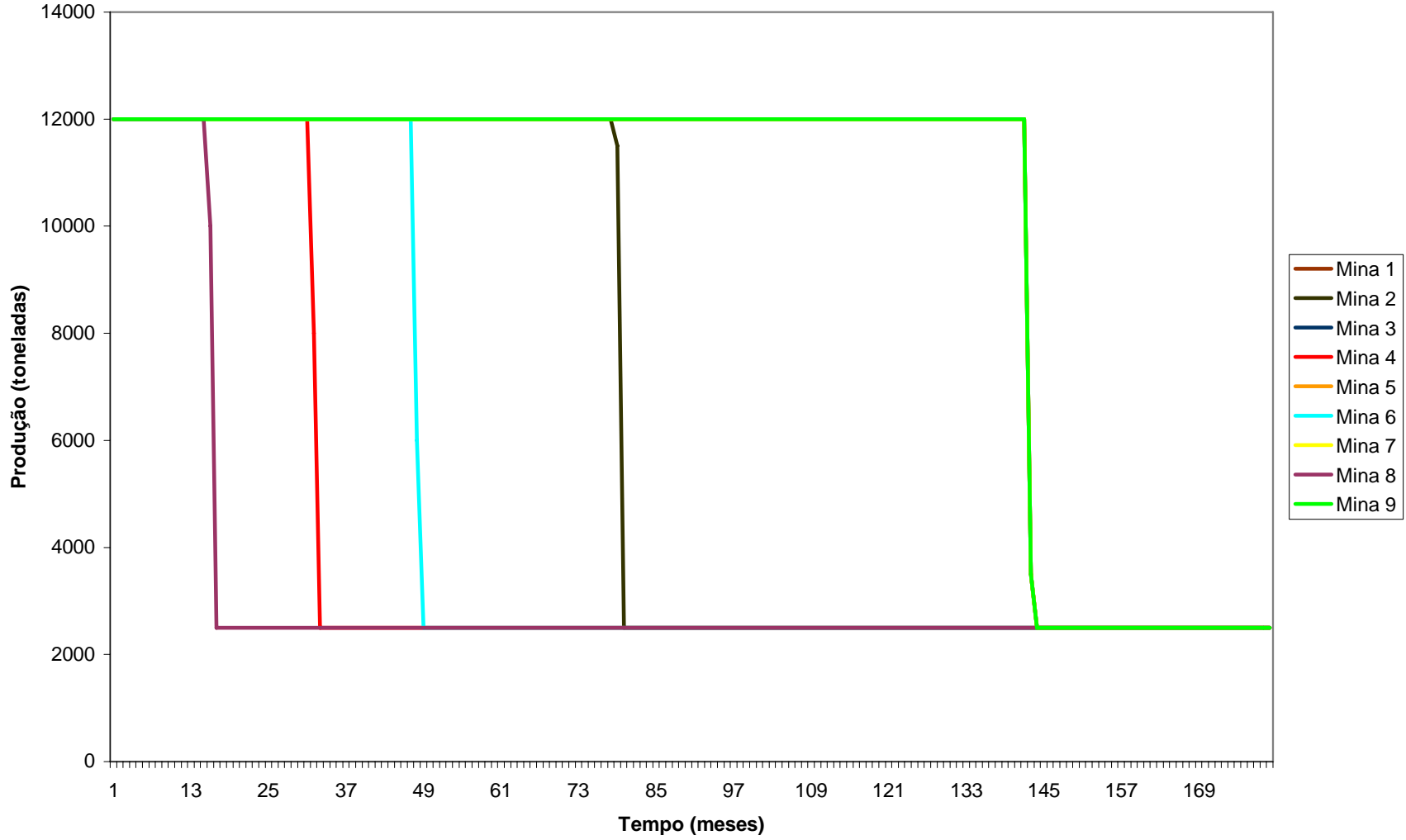


Figura 23 Gráfico de produção das minas no caso base.

Na figura 23, observa-se que as minas de número ímpar, as situadas às margens do rio Sangão, apresentaram a mesma produção e suas linhas estão sobrepostas, sendo nítida apenas a representação da mina 9. Tal se deve ao fato de que, para essas minas, são idênticas as reservas iniciais. Pode-se também verificar que a maximização da produção impõe que as minas operem com sua máxima capacidade de produção no início do período analisado a fim de que se possa obter maior retorno financeiro, evidenciado pelo Valor Presente Líquido. A falta de tratamento de efluentes fez com que fossem atingidas altas concentrações dos parâmetros analisados. No caso de ferro, verificam-se valores quase 1000 vezes maiores que aqueles permitidos para enquadramento na classe 1 (0,3 mg/L) e cerca de 60 vezes maiores que o tolerável em enquadramento classe 3 (5,0 mg/L). No caso de concentração de sulfatos são atingidos valores 50 vezes maiores que o permitido para ambas as classes (250 mg/L). No caso do manganês o limite para classe 1 (0,1 mg/L) foi violado por valores cerca de 250 vezes maiores e para classe 3 (0,5 mg/L) por valores 50 vezes maiores.

A figura 24 apresenta os resultados obtidos para as concentrações de ferro, a figura 25 apresenta os resultados obtidos para as concentrações de sulfatos e a figura 26 apresenta os resultados obtidos para as concentrações de manganês. Cabe ressaltar que os três gráficos de concentrações seguem um mesmo padrão, pois ambos se relacionam com a quantidade de efluentes produzida. Dessa forma, especial atenção deve ser concedida ao eixo das ordenadas, onde estão localizados os valores atingidos pelas concentrações dos parâmetros analisados.

Após a apresentação de tais resultados, realiza-se a tentativa de enquadramento das águas da bacia nas classes 1 e 3, respectivamente.

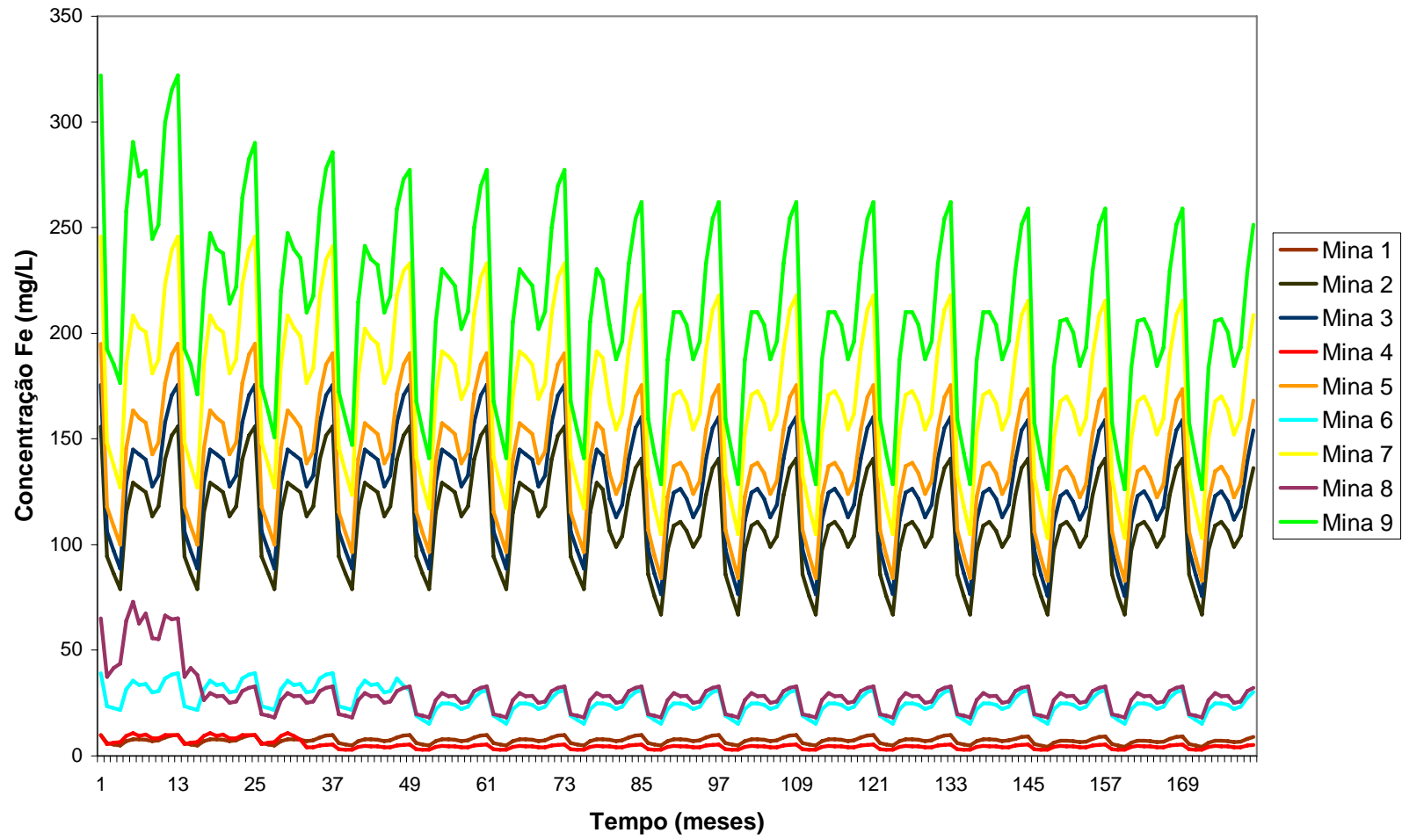


Figura 24 Gráfico das concentrações de ferro no caso base.

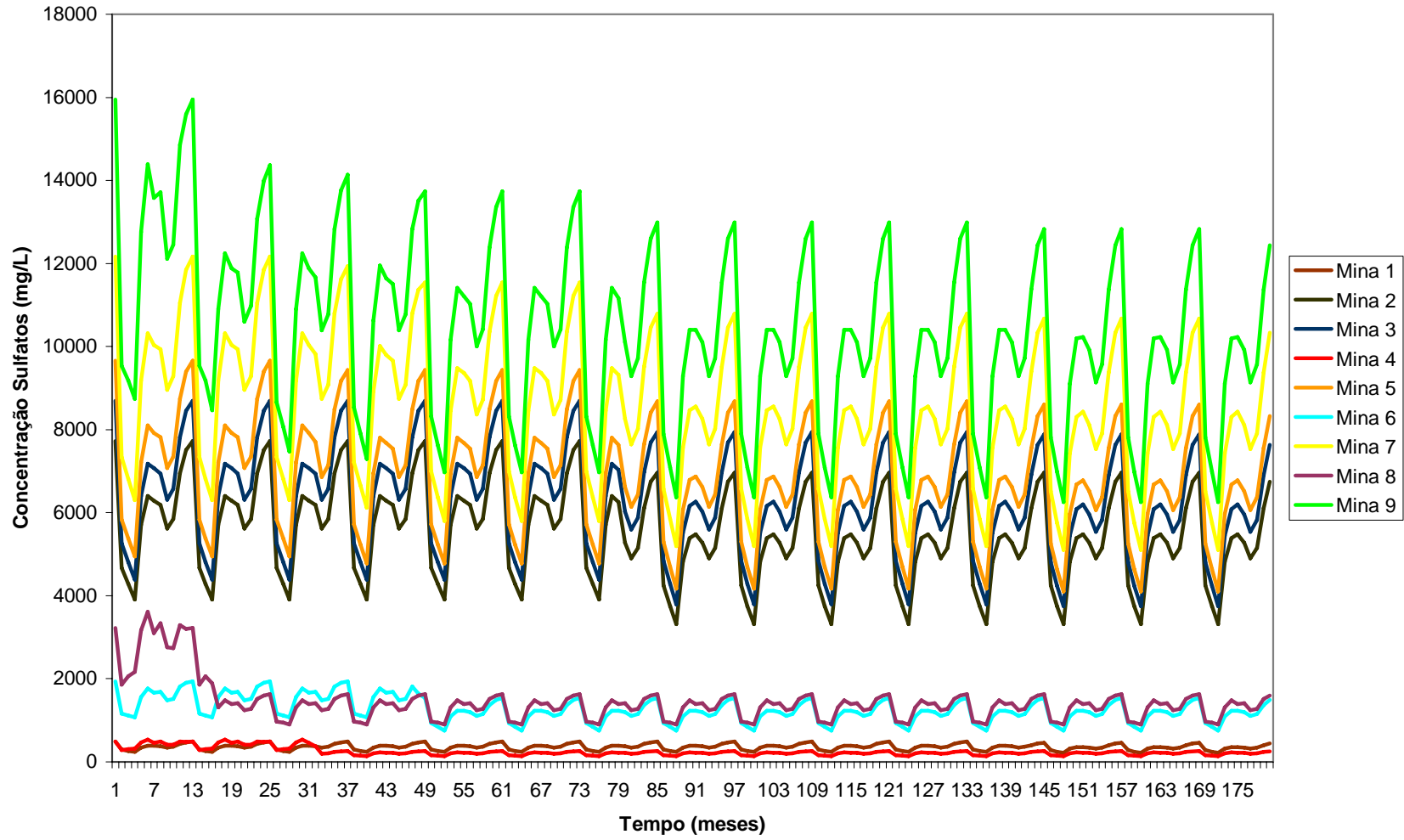


Figura 25 Gráfico das concentrações de sulfatos no caso base.

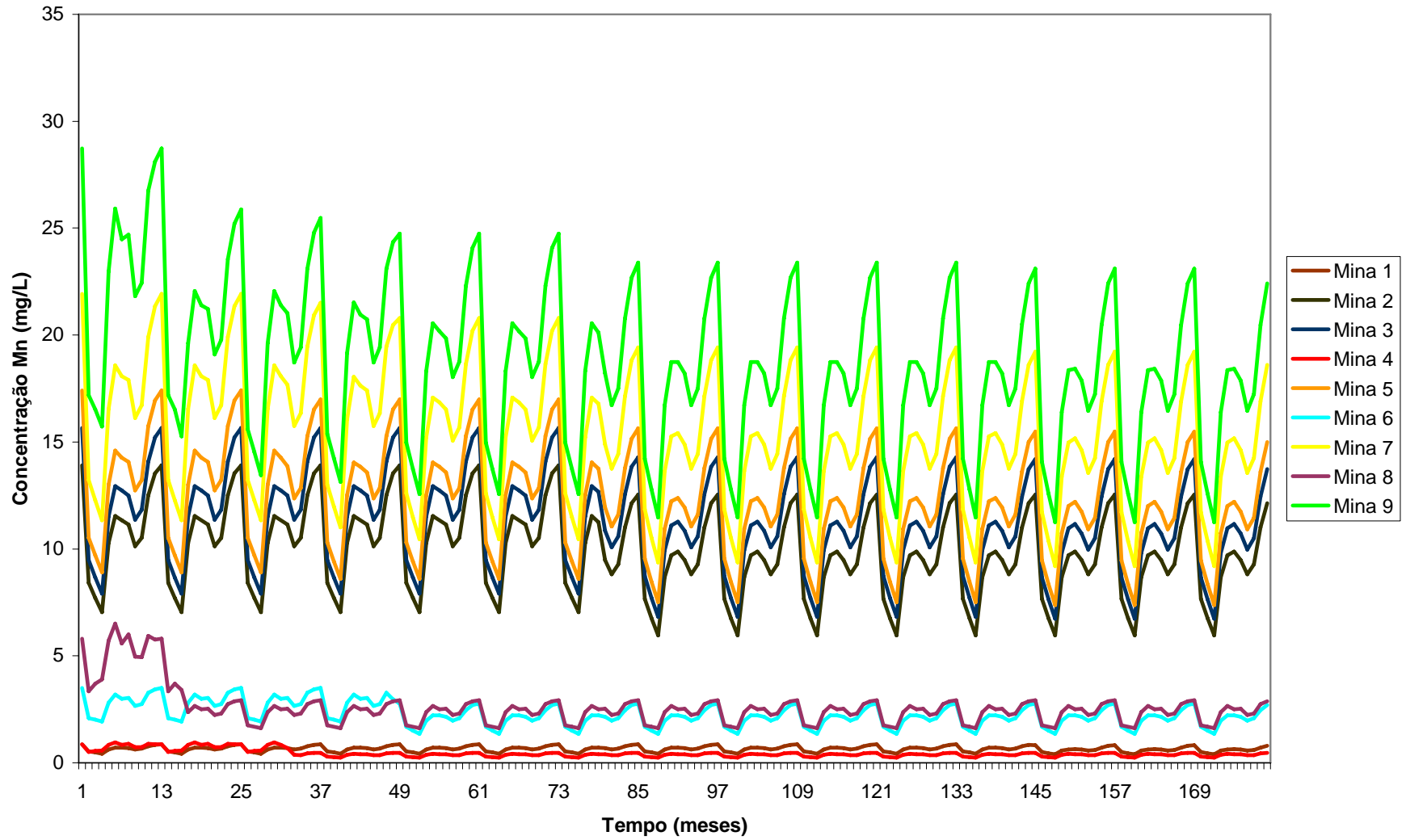


Figura 26 Gráfico das concentrações de manganês no caso base.

5.4 CASO 1: ENQUADRAMENTO DAS ÁGUAS DA BACIA NA CLASSE 1

Conforme apresentado no item anterior, a falta de tratamento de efluentes fez com que os parâmetros de qualidade da água analisados tivessem concentrações excedentes aos limites impostos pela lei. Portanto, para que tais limites sejam respeitados, é mister o emprego de técnicas de tratamento em todas as minas da bacia. No caso 1, é realizada a tentativa de enquadramento das águas da bacia na classe 1. A tabela 28 relaciona as técnicas de tratamento e seus custos mensais associados a cada mina.

Tabela 28 Custos de tratamento para o caso 1

Mina	Tratamento	Custo mensal (R\$)
1	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00
2	Passivo simples	7.700,00
3	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00
4	Passivo simples	4.700,00
5	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00
6	Passivo simples	5.700,00
7	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00
8	Passivo simples	3.800,00
9	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00

Considera-se a forma intermediária de tratamento (passivo com lagoa anaeróbica) para as minas localizadas às margens do Rio Sangão, enquanto para as demais foi considerado o tratamento passivo simples. Verifica-se que dessa maneira não é possível o atendimento dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA para enquadramento das águas da bacia na classe 1. A figura 27 apresenta as concentrações de ferro. Percebe-se com facilidade que apenas as minas situadas no trecho norte do Rio Sangão (minas 1, 3 e 5) conseguiram respeitar o limite de 0,3 mg/L imposto pela legislação. Este resultado pode ser justificado pela localização dessas minas a montante da bacia, onde o somatório das cargas poluentes ainda é pequeno.

A violação das restrições é mais acentuada nos casos das minas situadas nos afluentes do rio Sangão. Isto se deve à menor vazão desses rios o que eleva a concentração de qualquer contaminante descarregado em suas águas.

A figura 28 apresenta as concentrações de sulfato ao longo do tempo de operação das minas e o atendimento ao limite (250mg/L) da Resolução CONAMA 357. A figura 29 apresenta as concentrações de manganês.

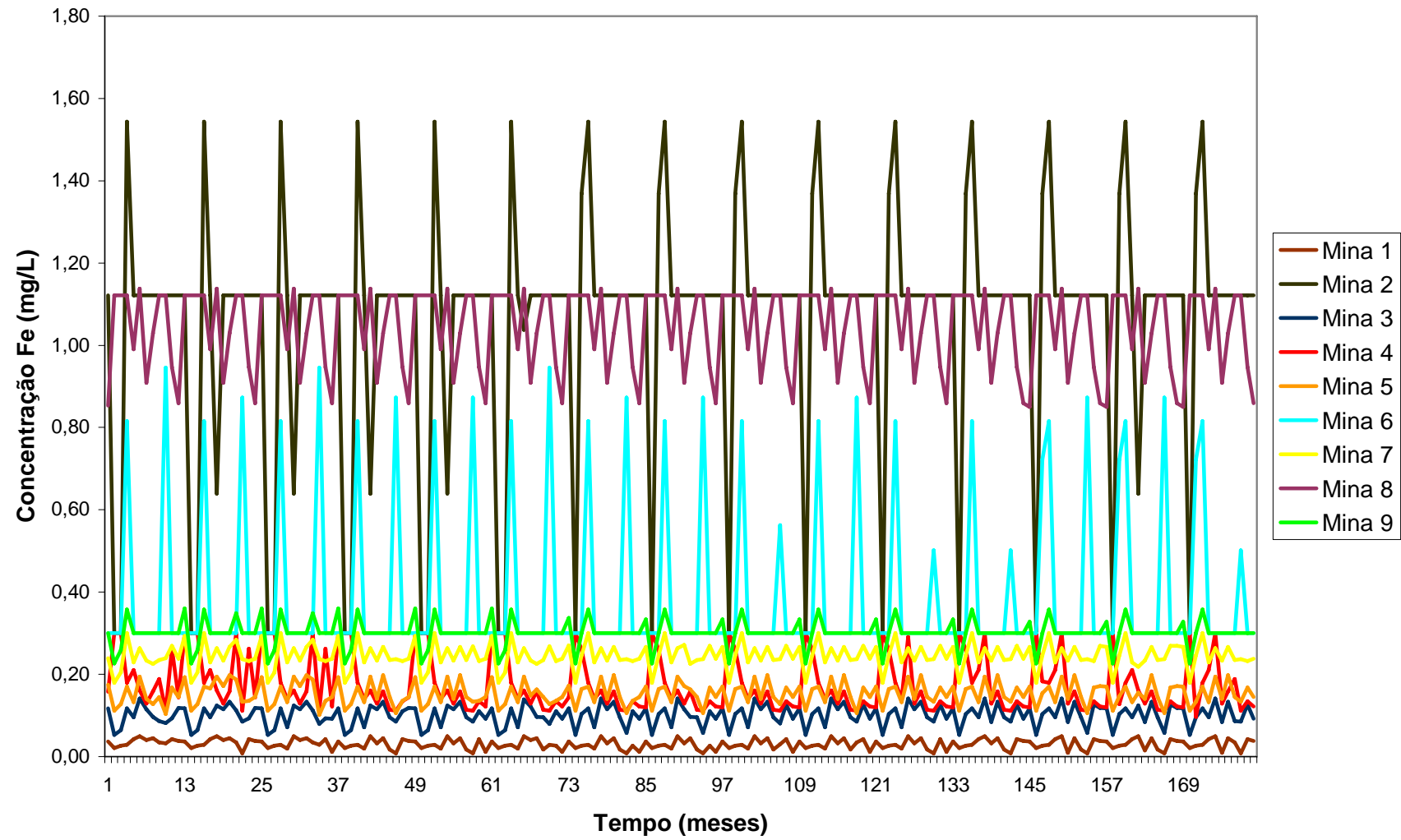


Figura 27 Gráfico das concentrações de ferro no caso 1

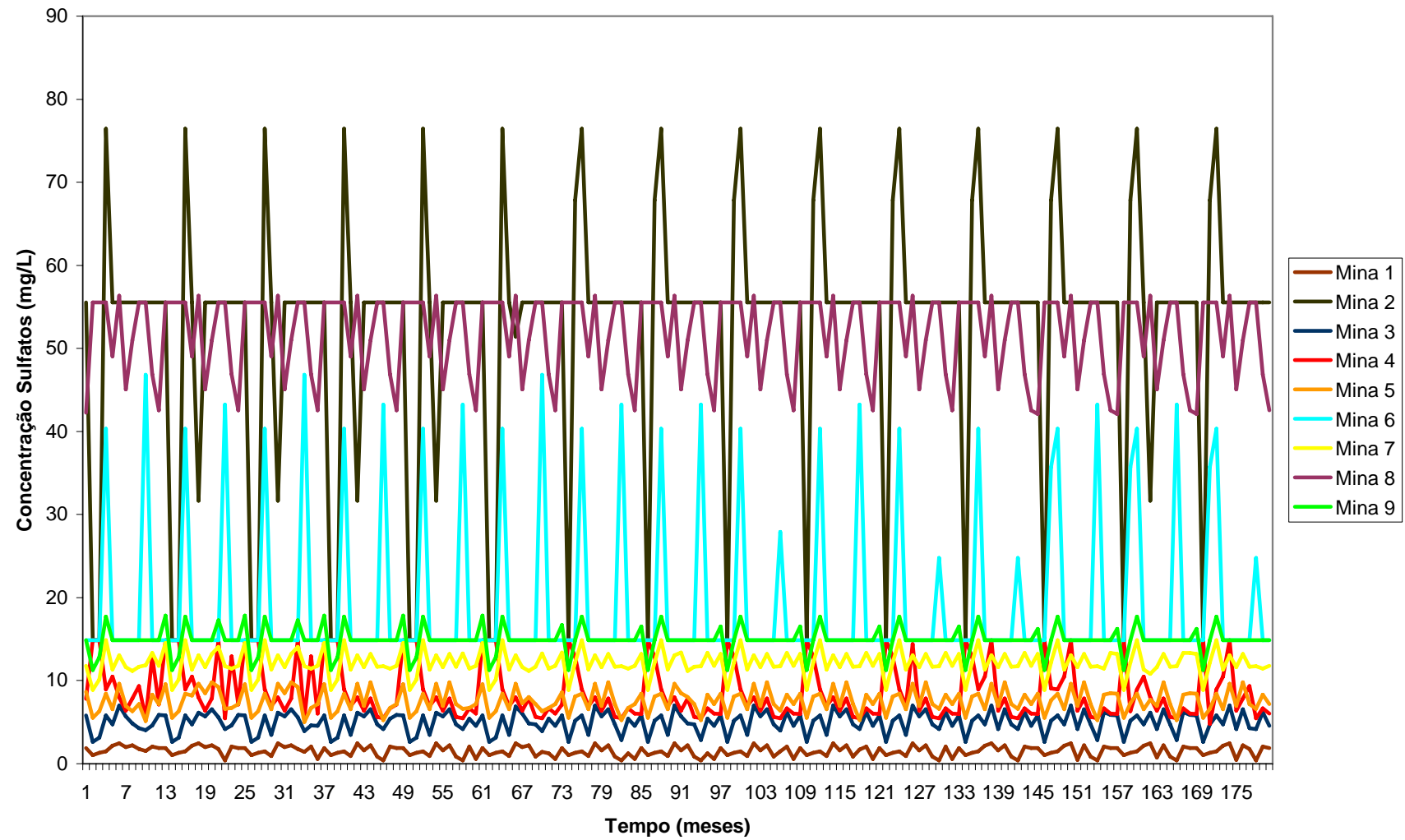


Figura 28 Gráfico das concentrações de sulfato no caso 1.

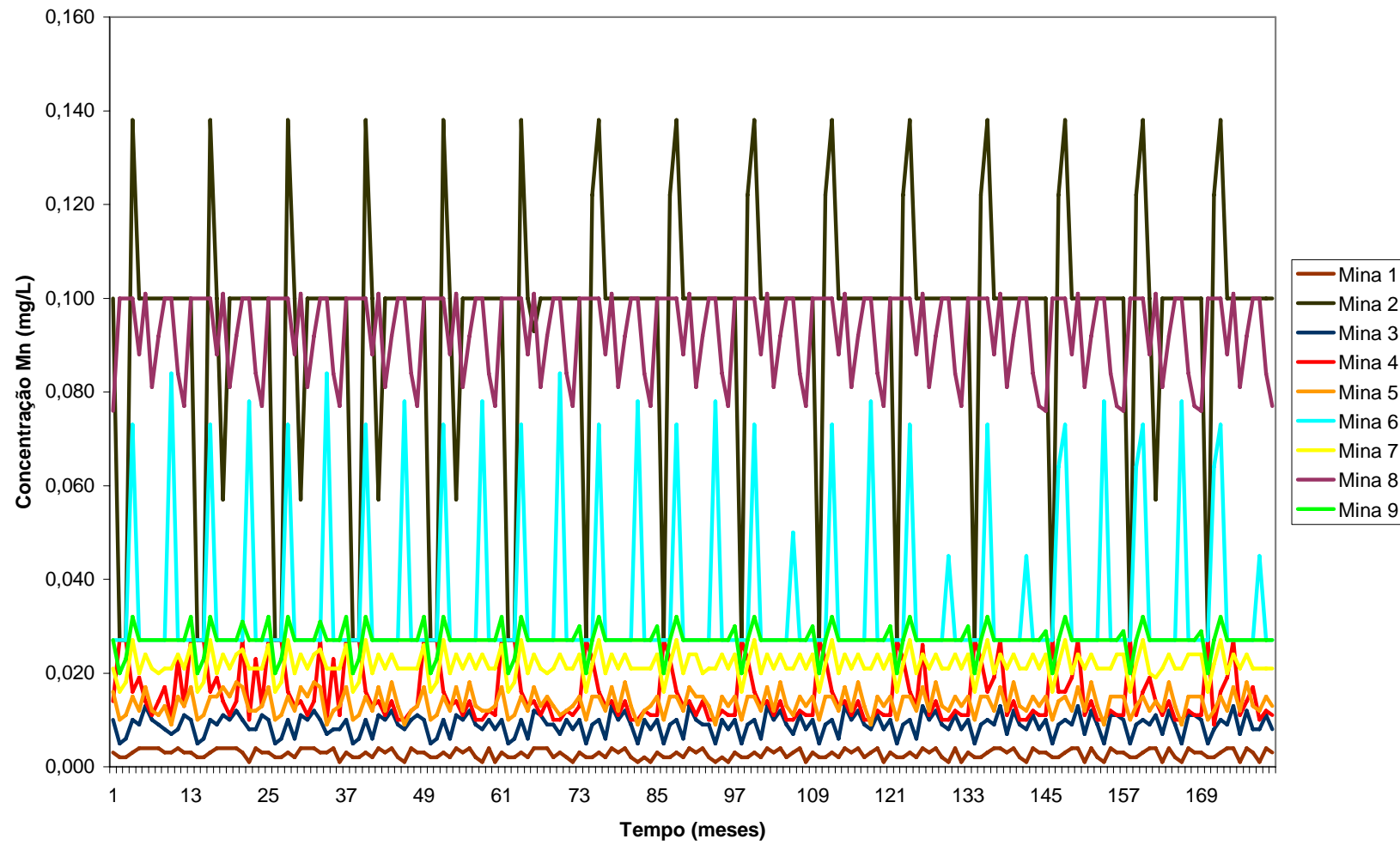


Figura 29 Gráfico das concentrações de manganês no caso 1.

Com base nas três últimas figuras, pode-se dizer que o parâmetro mais restritivo em relação ao atendimento das restrições é o ferro. Verifica-se que as concentrações de sulfatos se estabeleceram abaixo do limite de 250 mg/L e o limite de concentração do manganês não é respeitado apenas pelas minas 2 e 8.

Os resultados do caso 1 permitem concluir que existem duas alternativas para que haja o enquadramento das águas da bacia na classe 1. A primeira delas é a elevação dos gastos com tratamento de efluentes, procurando reduzir o lançamento de cargas poluentes e, assim, atender aos limites impostos pela legislação. A segunda alternativa é deixar de realizar a exploração simultânea das minas e separá-las em dois ou mais grupos. Assim, seria realizada a exploração de um grupo e, somente ao final desta, iniciaria a exploração do segundo grupo de minas. Neste caso, o somatório das cargas de poluentes na bacia seria menor.

Não se pode esquecer que existe a possibilidade de enquadrar as águas da bacia na classe 3, cujos limites de concentração são um pouco menos restritivos. O enquadramento das águas nesta classe ainda possibilita outros usos das águas.

Assim sendo, realizam-se no presente estudo mais quatro simulações. A primeira delas diz respeito ao enquadramento das águas na classe 3 e é denominada de caso 2. O caso 3 consiste da elevação dos gastos com tratamento de efluentes na tentativa de enquadrar as águas da bacia na classe 1. O caso 4 é dividido em duas partes. Dessa forma, no caso 4a são analisadas as operações apenas das minas situadas no trecho norte do Rio Sangão (minas 1, 3 e 5). O caso 4b consiste da simulação das demais minas.

5.5 CASO 2: ENQUADRAMENTO DAS ÁGUAS DA BACIA NA CLASSE 3

Conforme observado, não é possível o enquadramento das águas da bacia na classe 1 da Resolução CONAMA 357. No caso 2, é feita a tentativa de enquadramento das águas na classe 3, dadas as mesmas condições de tratamento do caso 1. Em outras palavras, pretende-se obter um enquadramento das águas sem aumentar os custos ambientais.

Dessa forma, a função objetivo reduz-se, como era de se esperar, em relação ao caso base, e toma o valor de R\$ 224.743.760,66. A diferença de rendimentos representa, aproximadamente, 8,77% do VPL obtido no caso base. A figura 31 apresenta a produção das

minas no caso presente. Pode-se dizer que não são verificadas maiores diferenças entre as figuras 23 e 30. Apenas uma pequena variação na produção da mina 8, a qual sugere que, caso houvesse a produção máxima, o limite estabelecido para a concentração de algum parâmetro teria sido violado.

Ressalta-se, no entanto, que se incluem na redução do VPL os gastos com o fechamento das minas, os quais no caso base não deixariam de existir e seriam, com certeza, superiores àqueles obtidos no caso 1, onde há tratamento de efluentes. Ademais, o respeito aos parâmetros de qualidade da água possibilita a existência de outras atividades econômicas que dela dependam, fazendo com que toda a sociedade tenha benefício.

A figura 31 evidencia que as concentrações de ferro foram mantidas abaixo do limite de 5,0 mg/L, imposto pela resolução CONAMA 357. A figura 32 evidencia o respeito ao limite de 250,0 mg/L (CONAMA 357). A figura 33 evidencia o respeito ao limite de 0,5 mg/L (CONAMA 357).

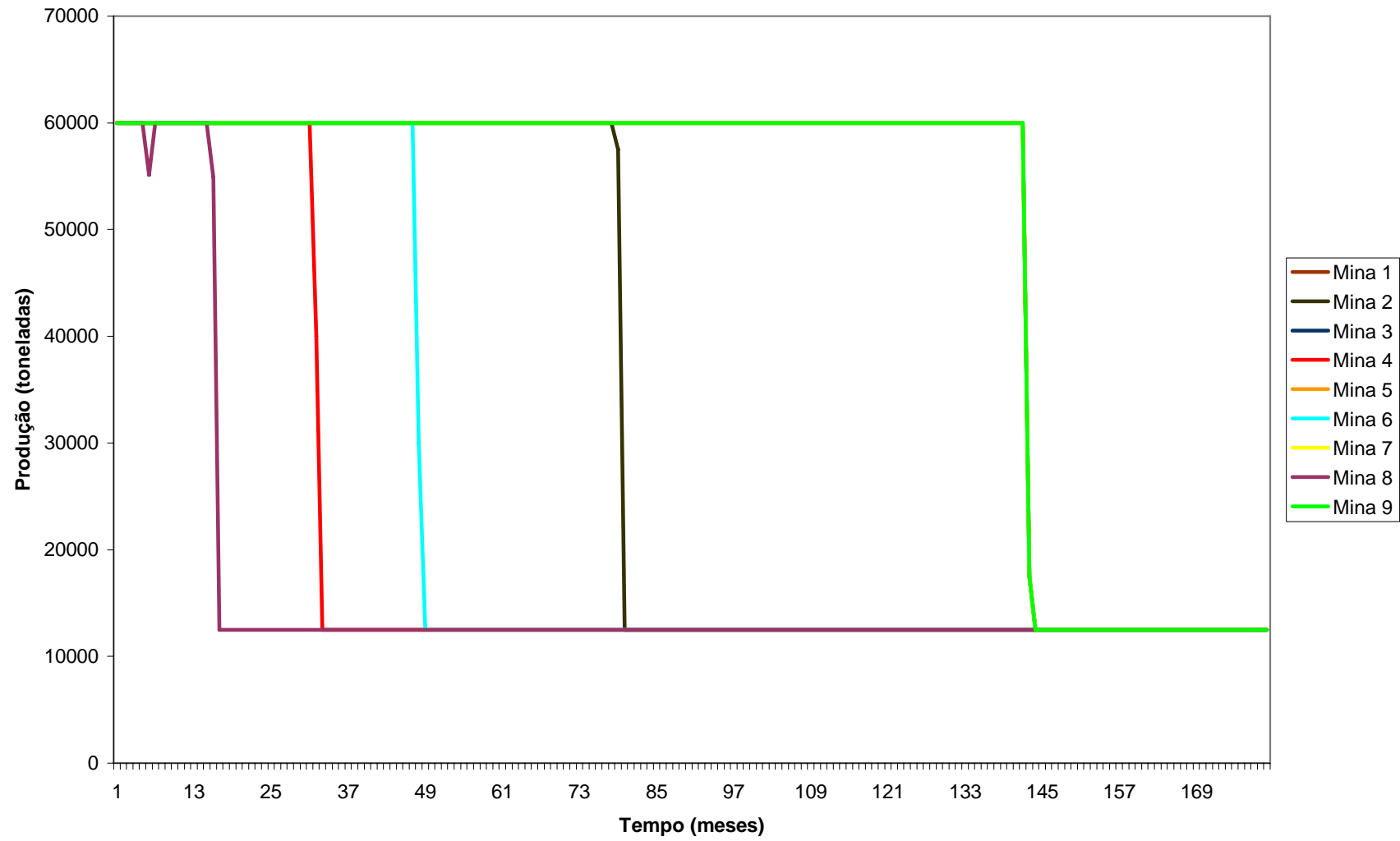


Figura 30 Gráfico de produção das minas no caso 2.

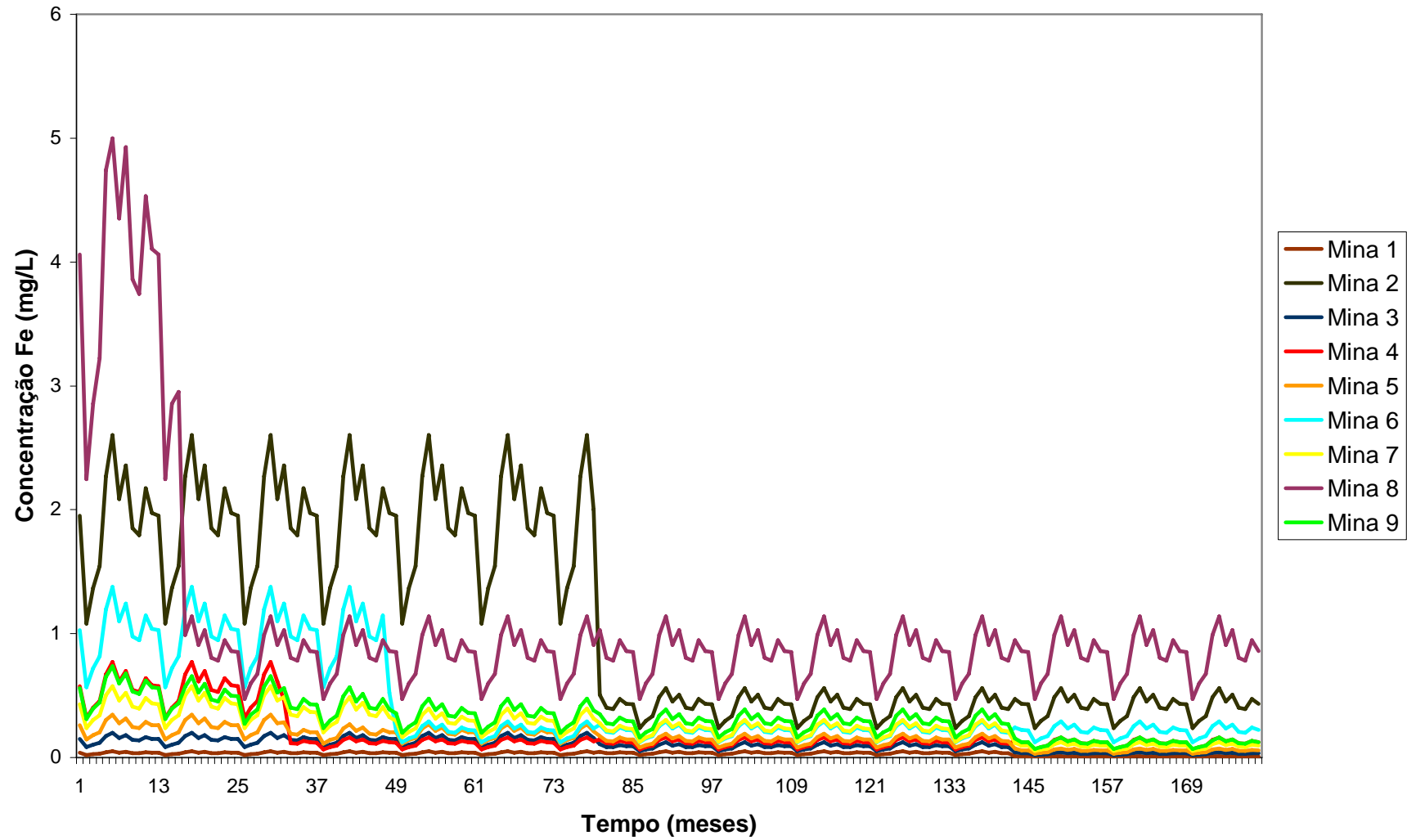


Figura 31 Gráfico das concentrações de ferro no caso 2.

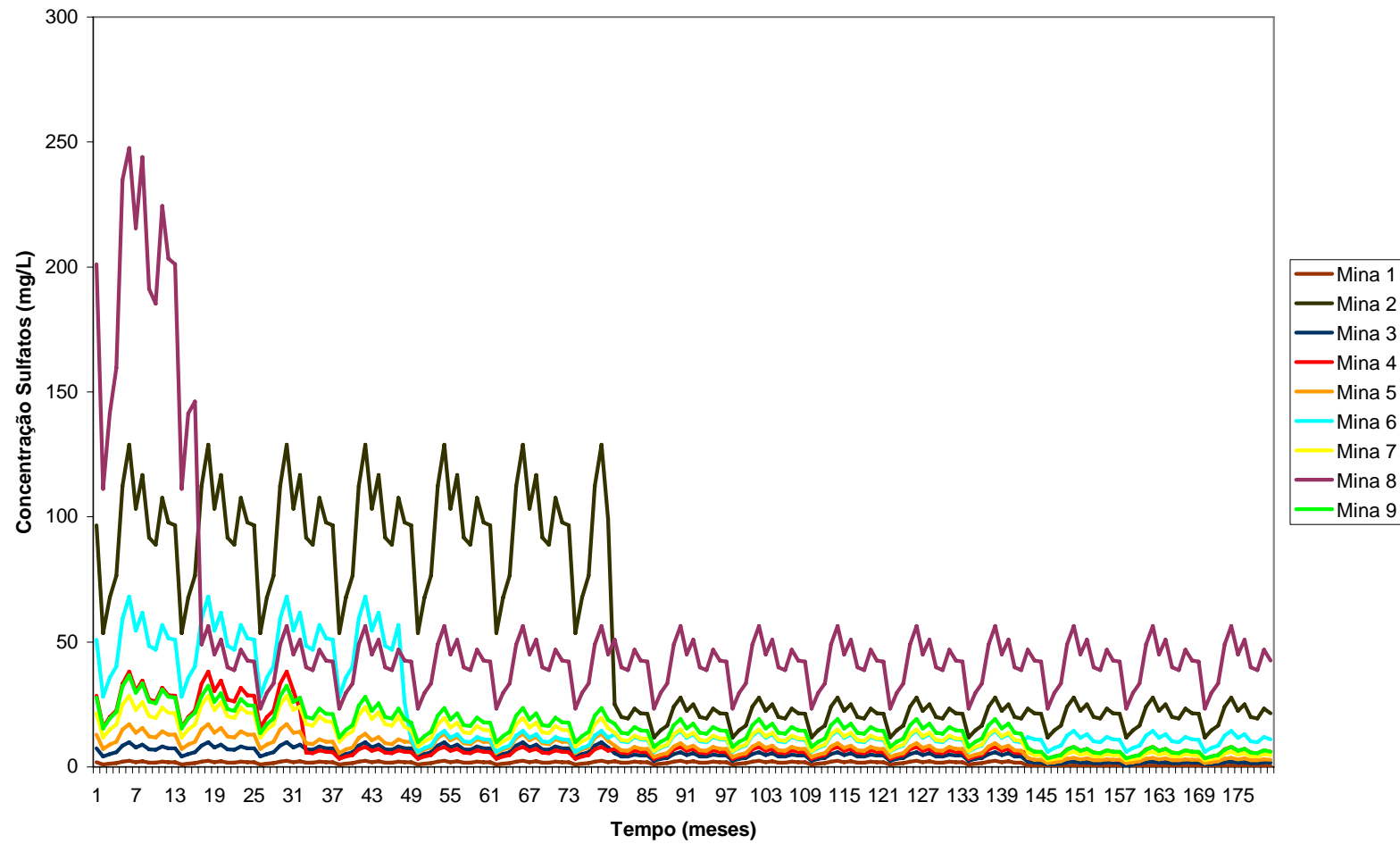


Figura 32 Gráfico das concentrações de sulfatos no caso 2.

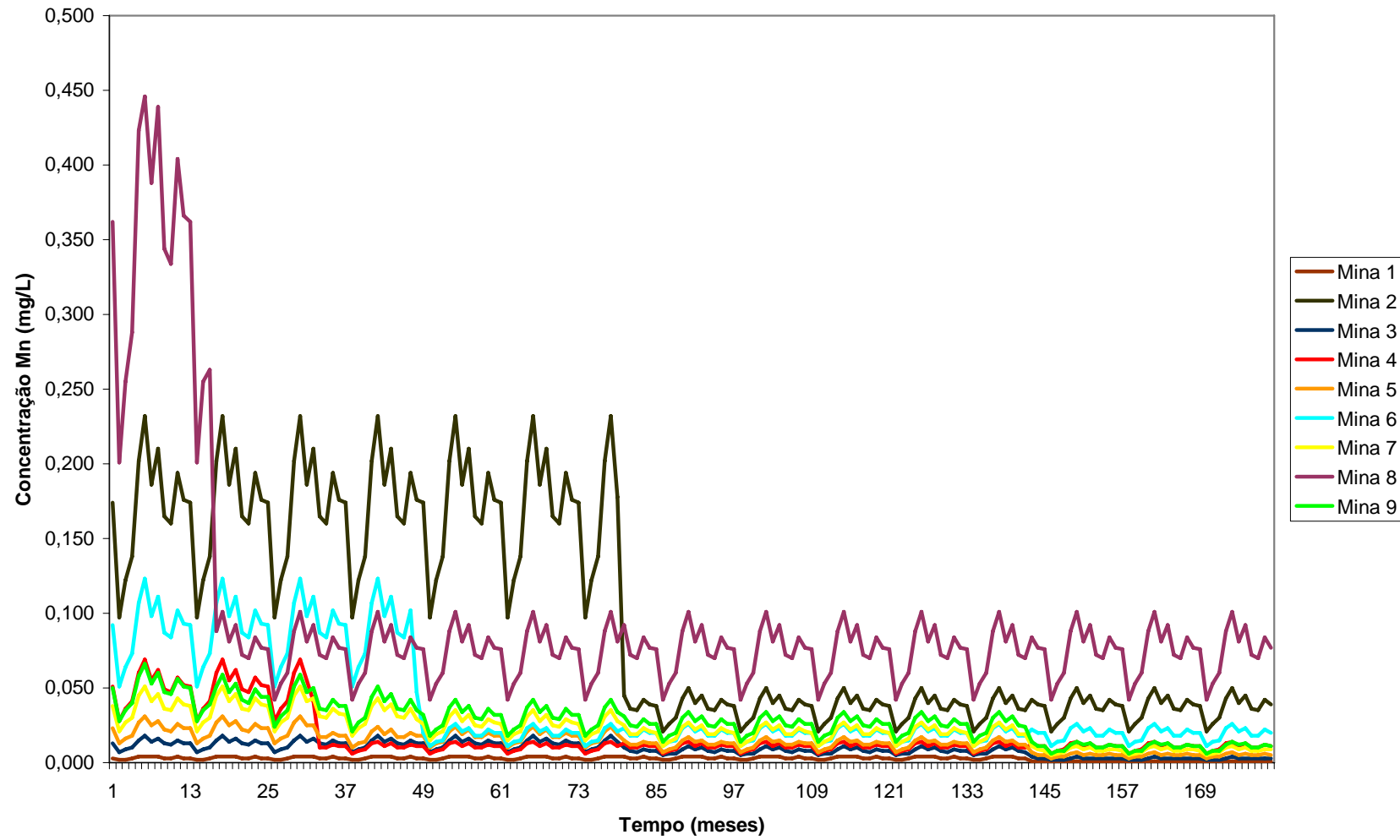


Figura 33 Gráfico das concentrações de manganês no caso 2.

5.6 CASO 3: ELEVAÇÃO DOS GASTOS COM TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA ENQUADRAMENTO NA CLASSE 1.

Conforme apresentado no item 5.4, o conjunto do tratamento de efluentes adotado para enquadramento na classe 1 deve ser mais rigoroso. A adoção de tratamento passivo com lagoa anaeróbica para as margens do Rio Sangão e de tratamento passivo simples para seus afluentes não logra êxito e faz com que os dois dos parâmetros de qualidade da água analisados, o ferro e os sulfatos, tenham concentrações excedentes aos limites impostos pela lei.

Portanto, para que tais limites sejam respeitados, é necessário o emprego de técnicas de tratamento que sejam capazes de garantir uma maior redução das cargas, ainda que para isso se devam elevar os gastos com tratamento.

Assim, no caso 3, não se adota o tratamento passivo simples. Seis minas terão o tratamento ativo de seus efluentes (1, 2, 3, 5, 6 e 8) e três delas (4, 7 e 9) terão o tratamento passivo com lagoa anaeróbica.

A tabela 29 relaciona as técnicas de tratamento e seus custos mensais associados a cada mina.

Tabela 29 Custos de tratamento para o caso 3.

Mina	Tratamento	Custo mensal (R\$)
1	Ativo	26.700,00
2	Ativo	17.800,00
3	Ativo	26.700,00
4	Passivo com lagoa anaeróbica	5.400,00
5	Ativo	26.700,00
6	Ativo	13.200,00
7	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00
8	Ativo	8.800,00
9	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00

Dessa forma, obtém-se o valor de R\$ 218.585.329,07 para a função objetivo, o que implica uma redução de 11,27% em relação ao caso base. A figura 34 apresenta a produção das minas para o caso em tela. Percebe-se, com clareza, que a mina 4, a qual recebeu a forma

intermediária de tratamento, teve de diminuir sua produção nos primeiros meses de operação a fim de atender os limites para enquadramento na classe 1.

Ressalta-se, mais uma vez, que se incluem na redução do VPL os gastos com o fechamento das minas, os quais no caso base não deixariam de existir e seriam, com certeza, superiores àqueles estimados para o caso 3, onde há tratamento de efluentes. Ademais, o respeito aos parâmetros de qualidade da água possibilita a existência de outras atividades econômicas que dela dependam, fazendo com que toda a sociedade tenha benefício.

A figura 35 evidencia que as concentrações de ferro foram mantidas abaixo do limite de 0,3 mg/L, imposto pela resolução CONAMA 357. Com a comparação entre as duas figuras anteriores, verifica-se que nos meses em que a concentração de ferro atinge o limite máximo previsto na lei, a produção de minério da mina 4 é diminuída, fazendo com que seja gerada uma menor vazão efluente e, em consequência, se reduzam as emissões de cargas poluentes.

Conforme é apresentado nas figuras 36 e 37, as concentrações de sulfatos e de manganês se situaram com folga abaixo dos limites estabelecidos. As concentrações de manganês são dadas pela figura a seguir. No caso 3, assim como no caso 1, o parâmetro mais restritivo é o ferro. Ressalta-se, no entanto, que no caso 3 os limites são atendidos, fato que não ocorre no caso 1.

As próximas duas análises dizem respeito à situação em que, para que sejam atendidos os limites para enquadramento na classe 1, opta-se por não realizar a operação simultânea de todas as minas da bacia.

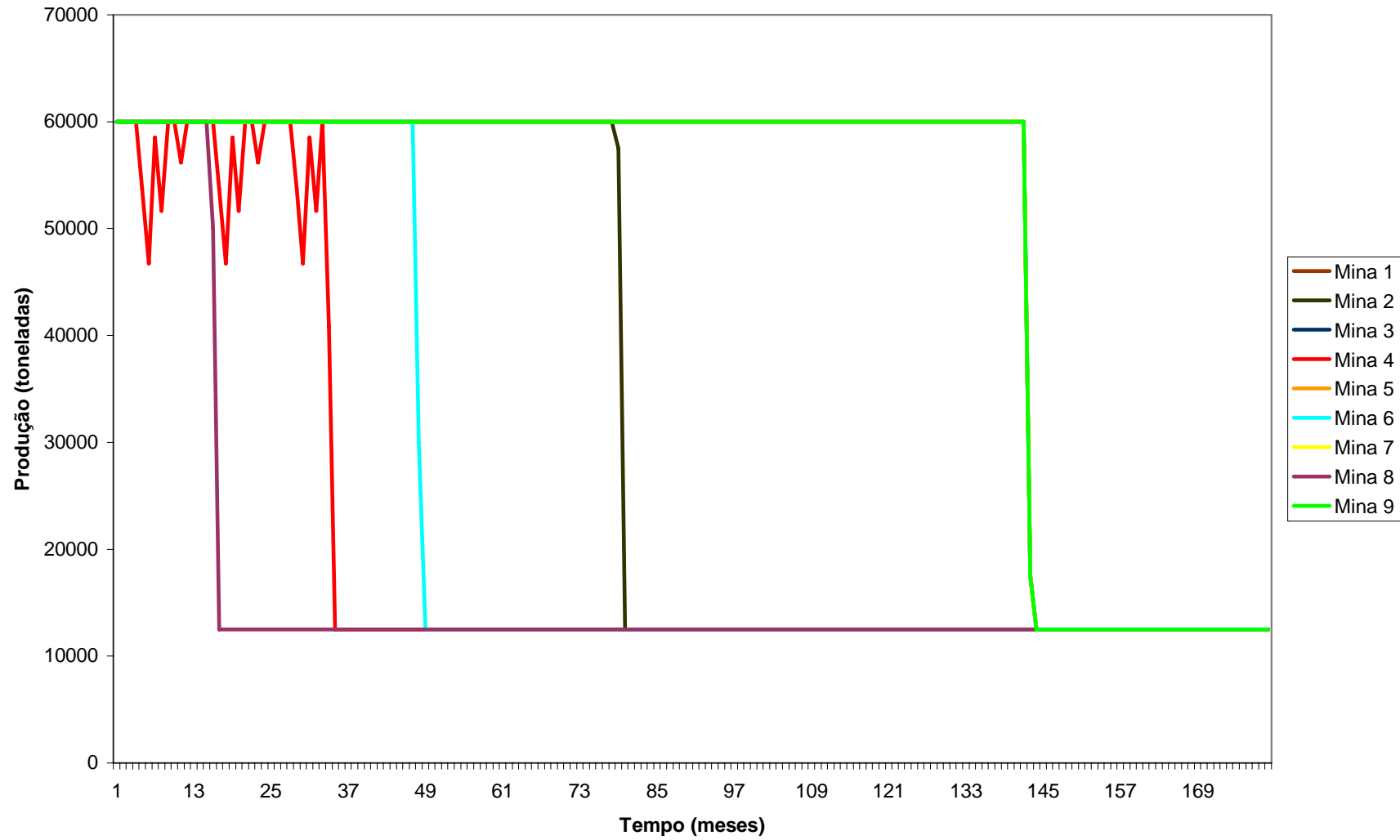


Figura 34 Gráfico de produção de minas para o caso 3.

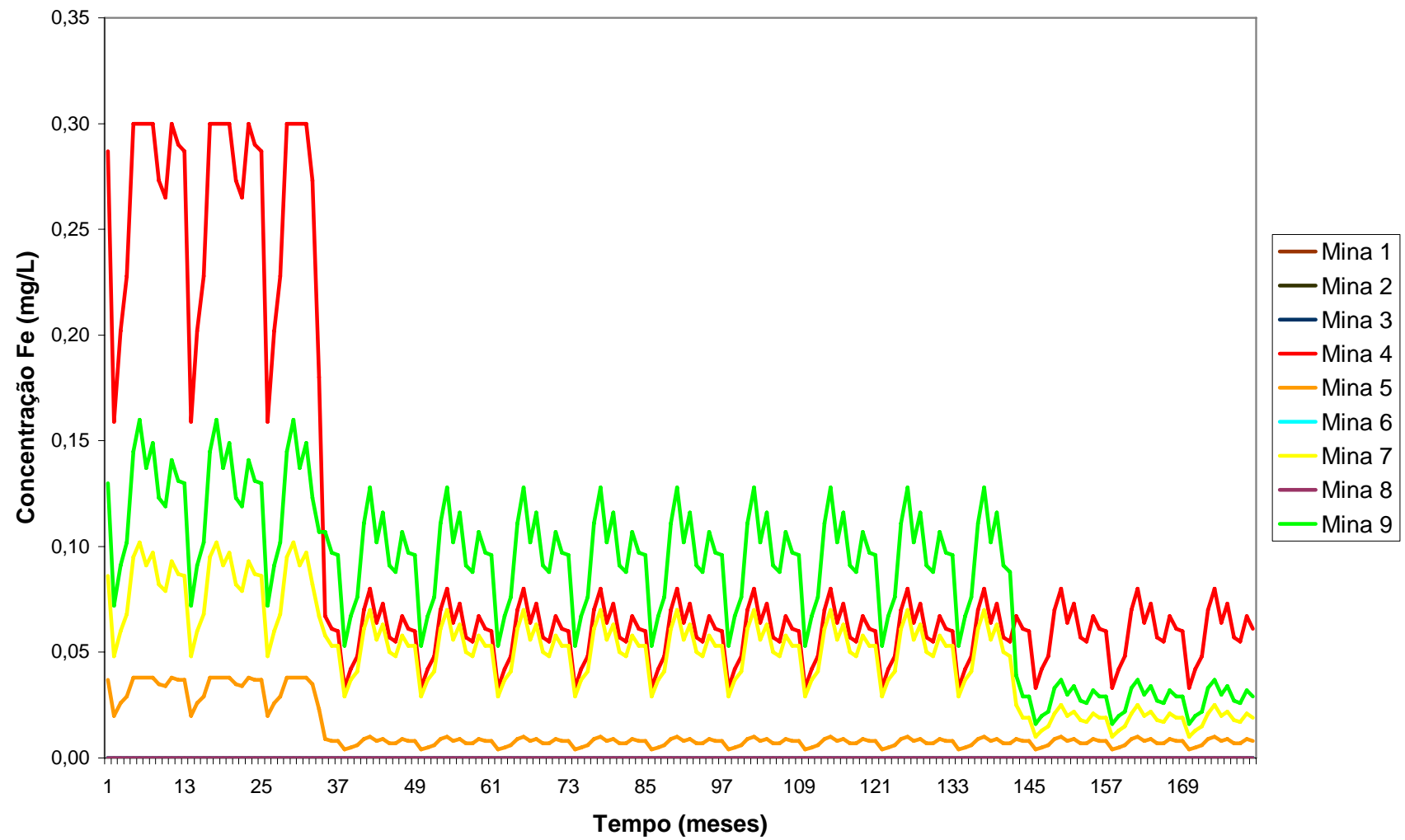


Figura 35 Gráfico das concentrações de ferro no caso 3.

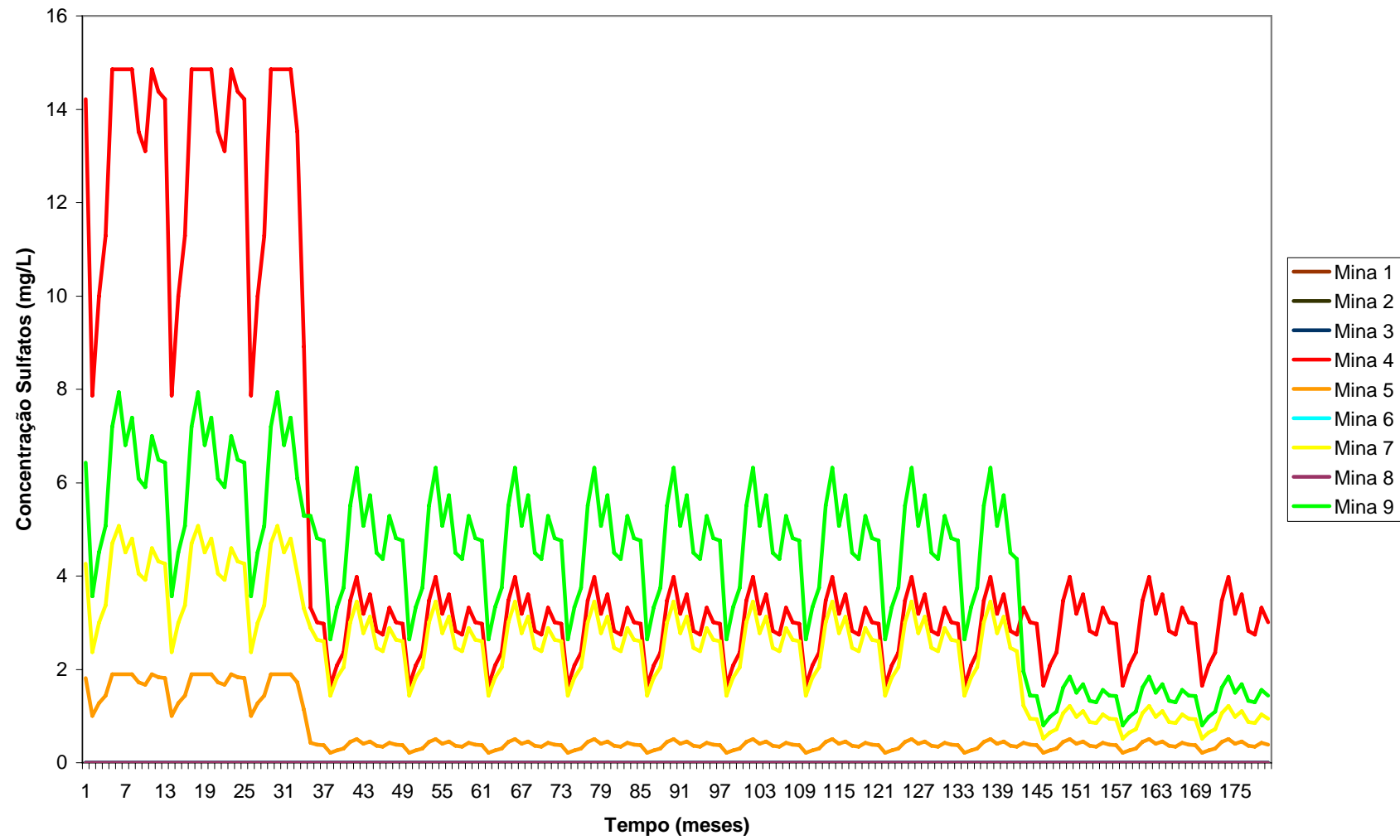


Figura 36 Gráfico das concentrações de sulfatos no caso 3.

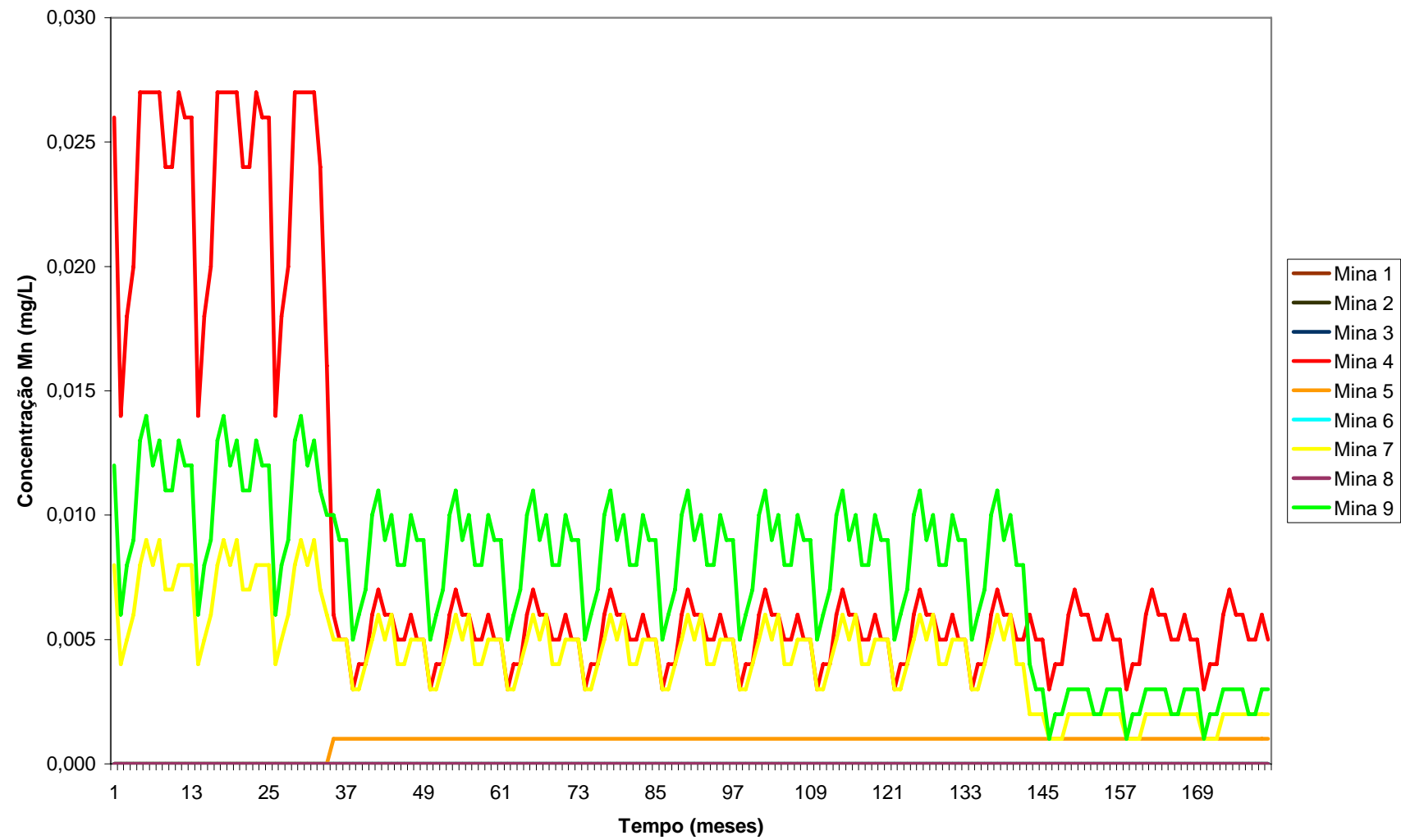


Figura 37 Gráfico das concentrações de manganês para o caso 3

5.7 CASO 4A: OPERAÇÃO DAS MINAS DO TRECHO NORTE DO RIO SANGÃO

Conforme apresentado no item 5.4, existe a alternativa de enquadramento das águas da bacia na classe 1 com a restrição do número de minas em operação simultânea. Assim, no caso presente é analisada a operação das minas do trecho norte do Rio Sangão (minas 1, 3 e 5). Todas as minas contam com o tratamento passivo com lagoa anaeróbica para redução do lançamento de cargas poluentes.

A tabela 30 relaciona as técnicas de tratamento e seus custos mensais associados a cada mina.

Tabela 30 Custos de tratamento para o caso 4a.

Mina	Tratamento	Custo mensal (R\$)
1	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00
3	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00
5	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00

Obtém-se o valor de R\$ 138.829.909,02 para a função objetivo. Tal valor não pode ser comparado com os valores obtidos no caso base, no caso 2 e no caso 3, já que existe um número menor de minas em operação.

O gráfico da produção das minas mostra que não é necessário o balanço da produção entre as minas. Em outras palavras, as três minas podem operar com sua capacidade máxima simultânea sem que isso faça com que os limites de concentração sejam violados. A figura 38 apresenta o gráfico de produção com as linhas das três minas sobrepostas. A figura 39 apresenta as concentrações de ferro. As figuras 40 e 41 apresentam as concentrações de sulfatos e de manganês. Os gráficos relativos às concentrações dos parâmetros de qualidade da água mostram que não há dificuldades no atendimento dos limites impostos pela legislação. No caso do manganês, a concentração no trecho mais a montante, ocupado pela mina 1, é tão baixa que não aparece no gráfico.

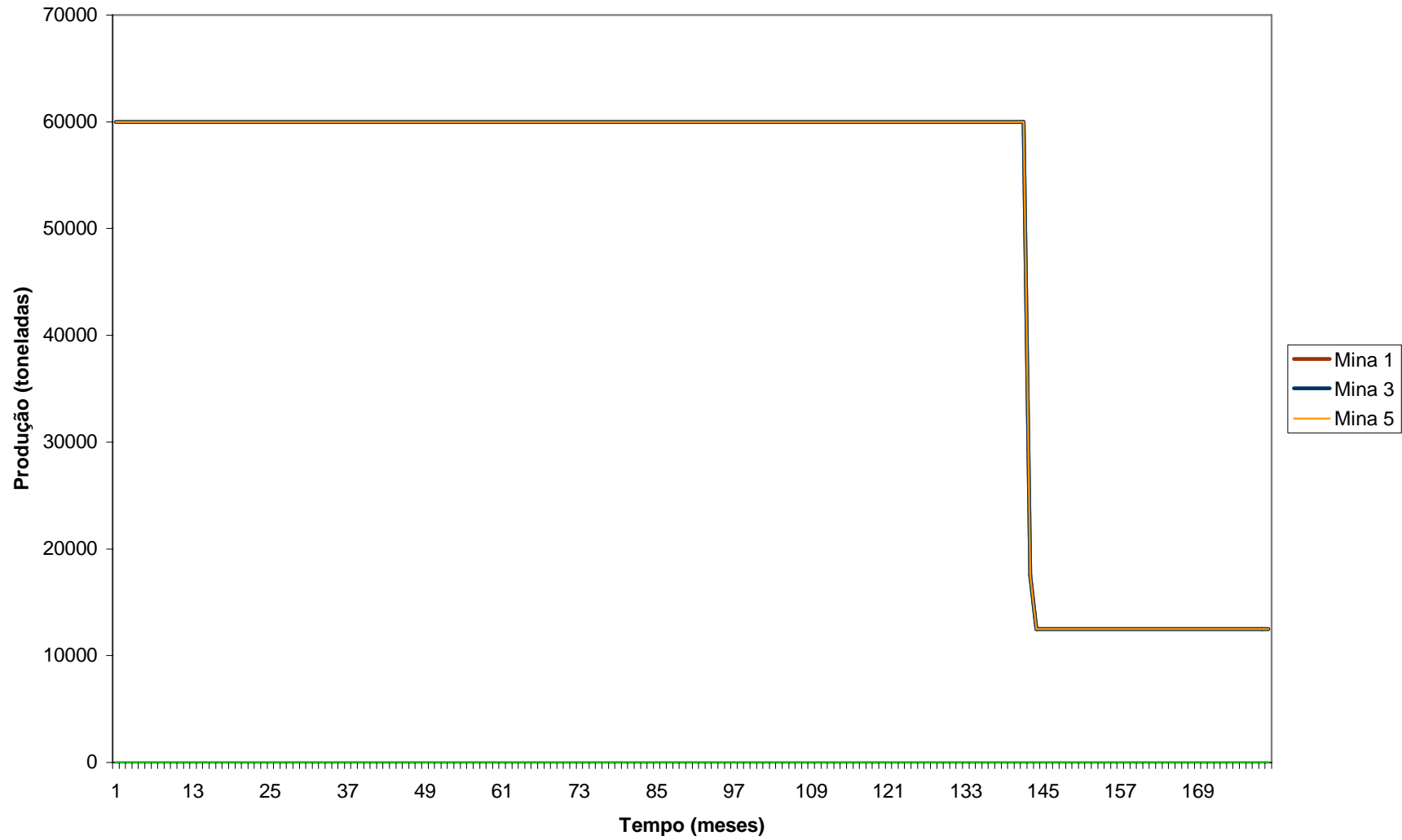


Figura 38 Gráfico da produção de mina para no caso 4a.

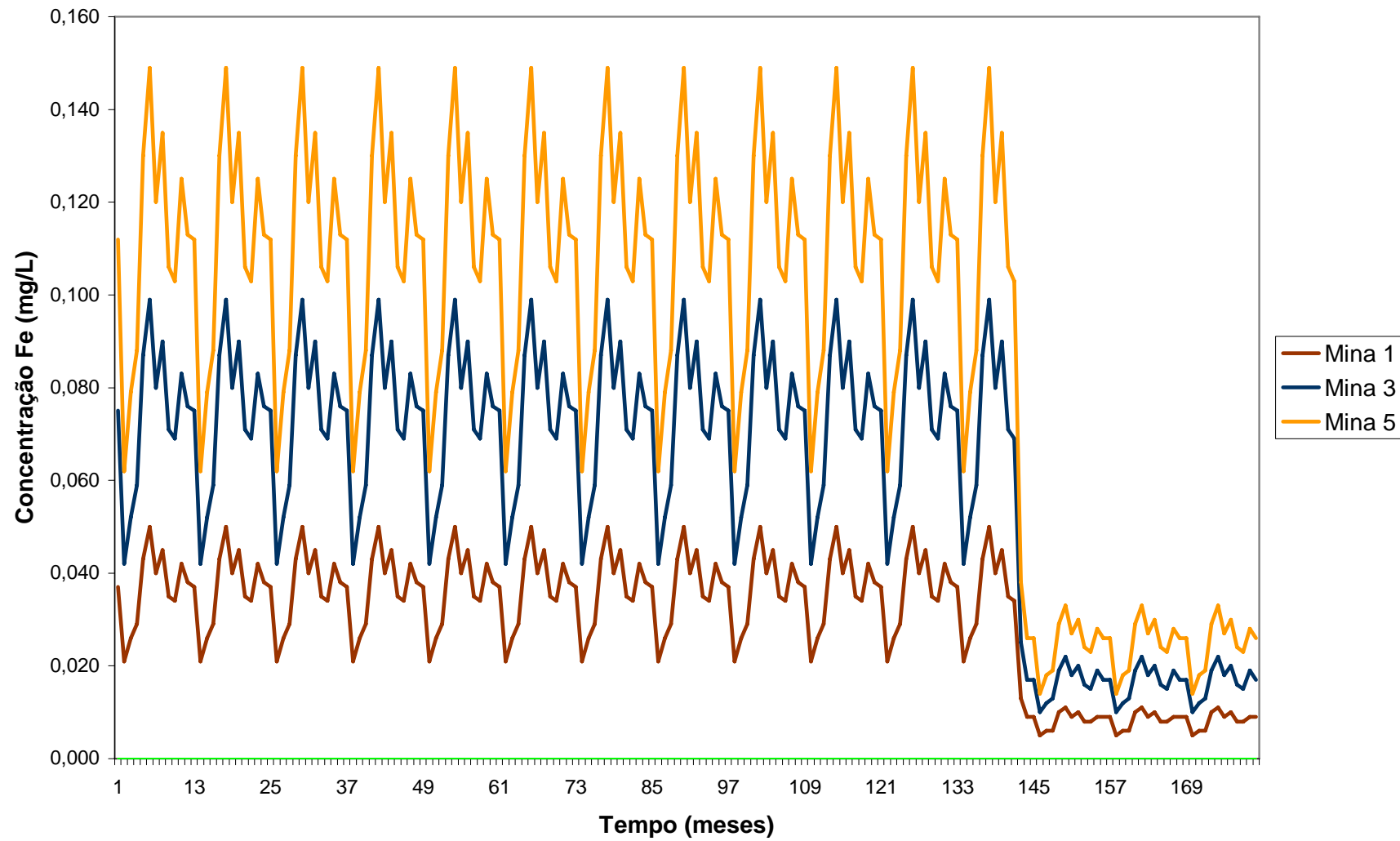


Figura 39 Gráfico das concentrações de ferro no caso 4a

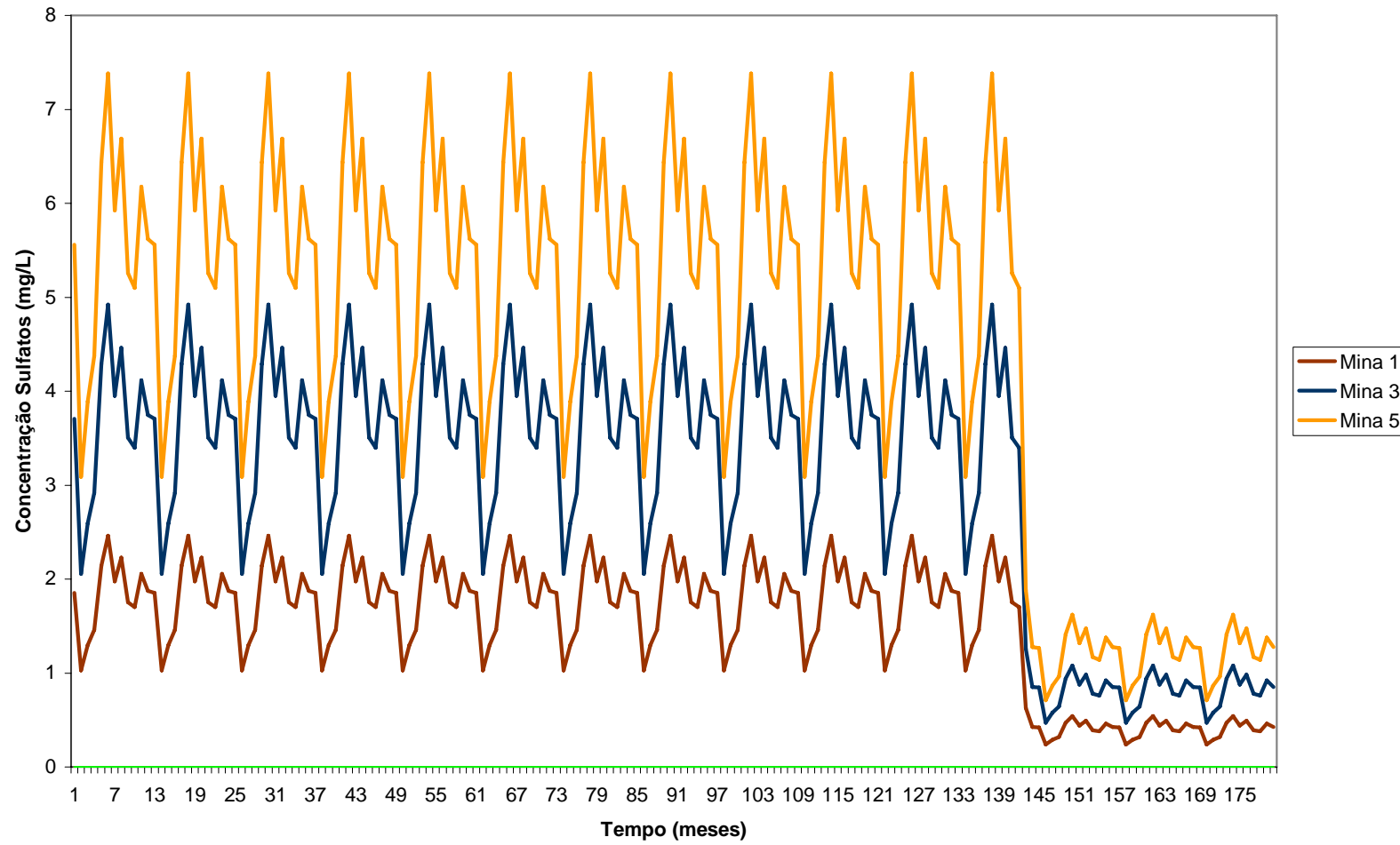


Figura 40 Gráfico das concentrações de sulfato no caso 4a.

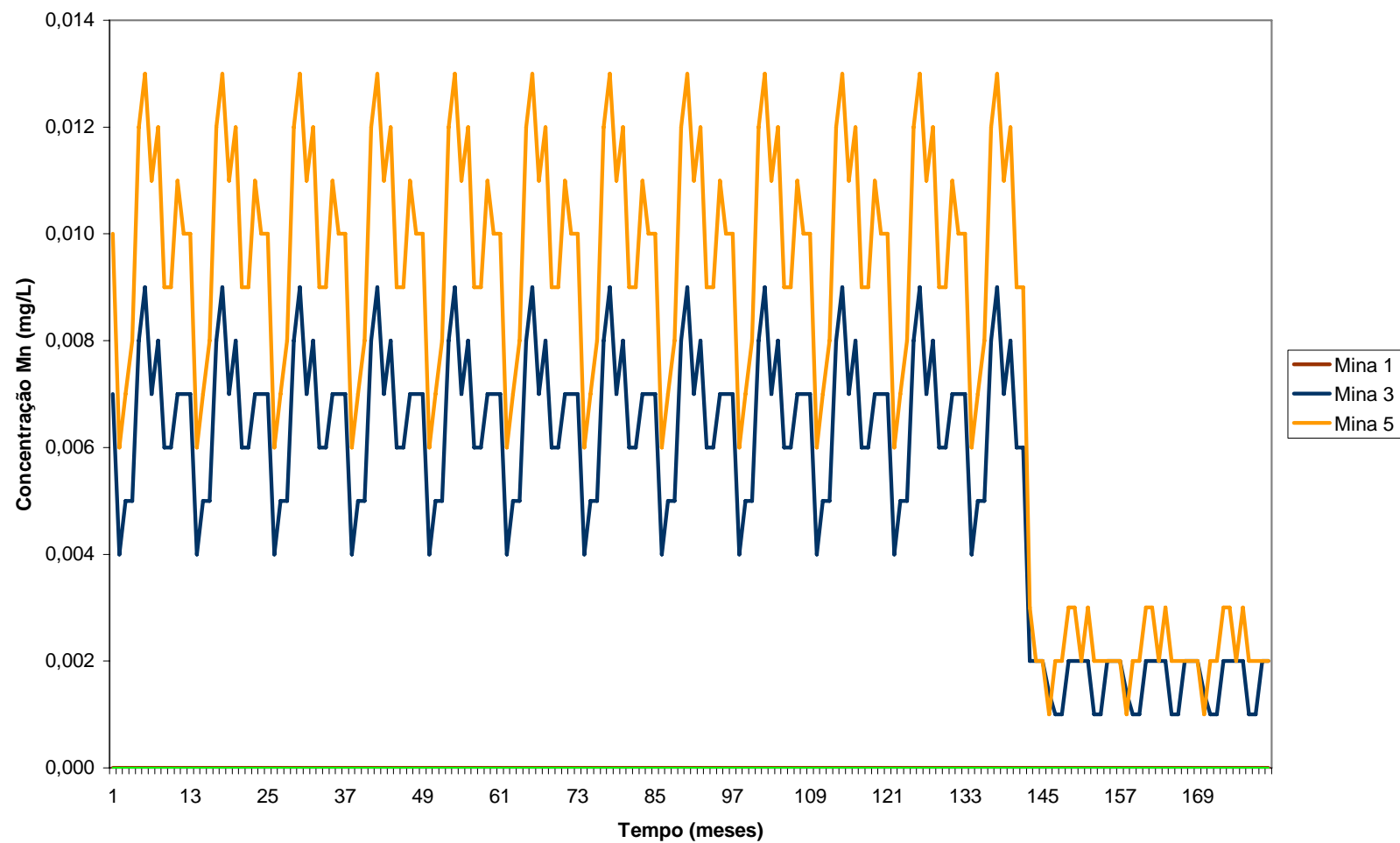


Figura 41 Gráfico das concentrações de manganês no caso 4a.

5.8 CASO 4B: OPERAÇÃO DAS MINAS DO TRECHO SUL DO RIO SANGÃO E DE SEUS AFLUENTES

Em continuidade à solução de evitar a operação simultânea de todas as minas, são analisadas as operações das minas do trecho sul do Rio Sangão (minas 7 e 9) e aquelas situadas nos seus afluentes (minas 2, 4, 6 e 8). Todas as minas contam com o tratamento passivo com lagoa anaeróbica para redução do lançamento de cargas poluentes.

A tabela 31 relaciona as técnicas de tratamento e seus custos mensais associados a cada mina.

Tabela 31 Custos de tratamento para o caso 4b.

Mina	Tratamento	Custo mensal (R\$)
2	Ativo	17.800,00
4	Passivo com lagoa anaeróbica	5.400,00
6	Ativo	13.200,00
7	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00
8	Ativo	8.800,00
9	Passivo com lagoa anaeróbica	13.200,00

Obtém-se o valor de R\$ 196.059.234,42 para a função objetivo. Tal valor também não pode ser comparado com os valores obtidos no caso base, no caso 2 e no caso 3, já que existe um número menor de minas em operação. Para o correto entendimento do valor assumido pela função objetivo, deve-se estipular a ordem de operação dos casos 4a e 4b, para se verificar o VPL com a aplicação do expoente de tempo correto.

O gráfico da produção das minas mostra que se repetiu o ajuste da mina 4, ocorrido no caso 3, para o atendimento dos limites impostos. A figura 42 exibe o gráfico mencionado. As figuras 43, 44 e 45 apresentam as concentrações de ferro, sulfatos e manganês.

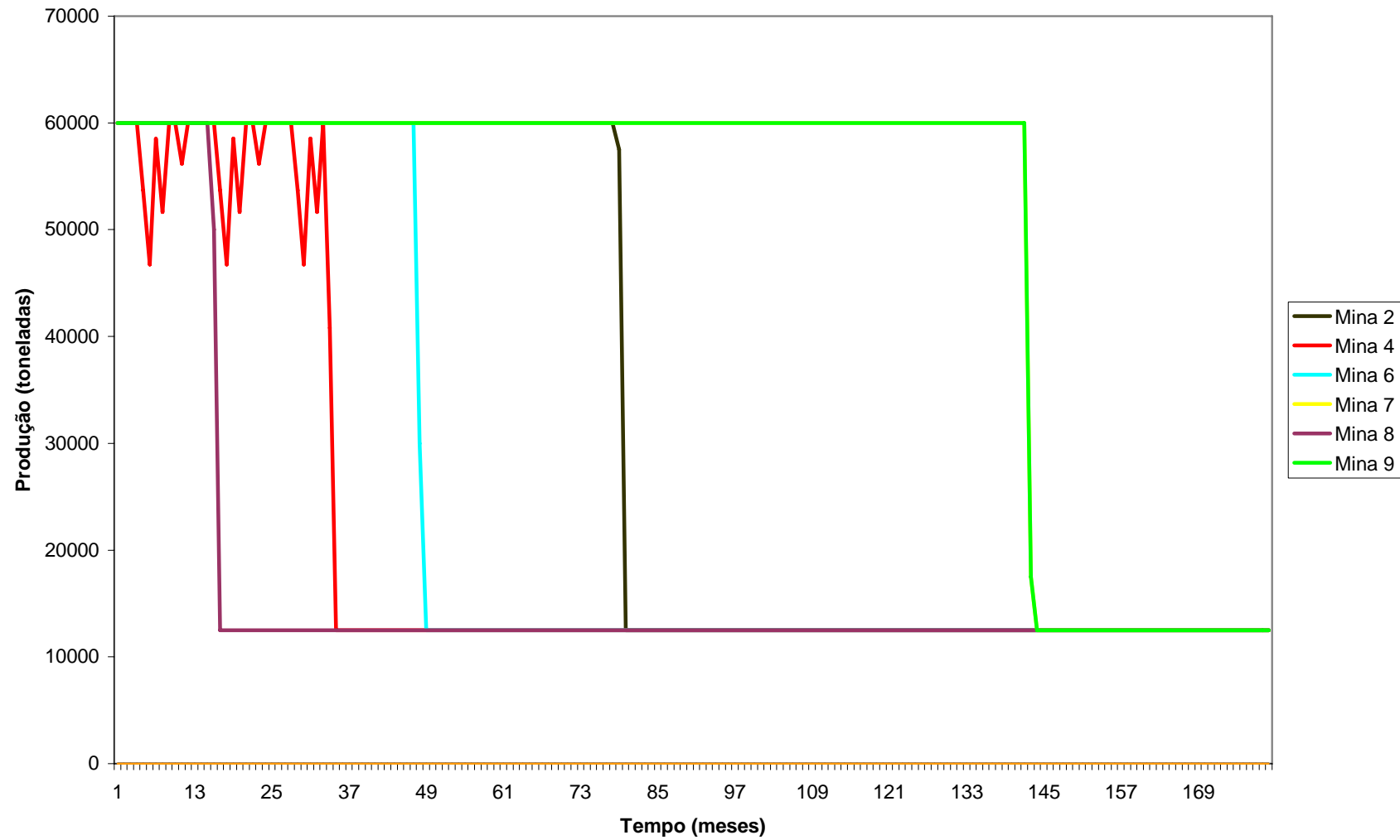


Figura 42 Gráfico da produção de mina no caso 4b.

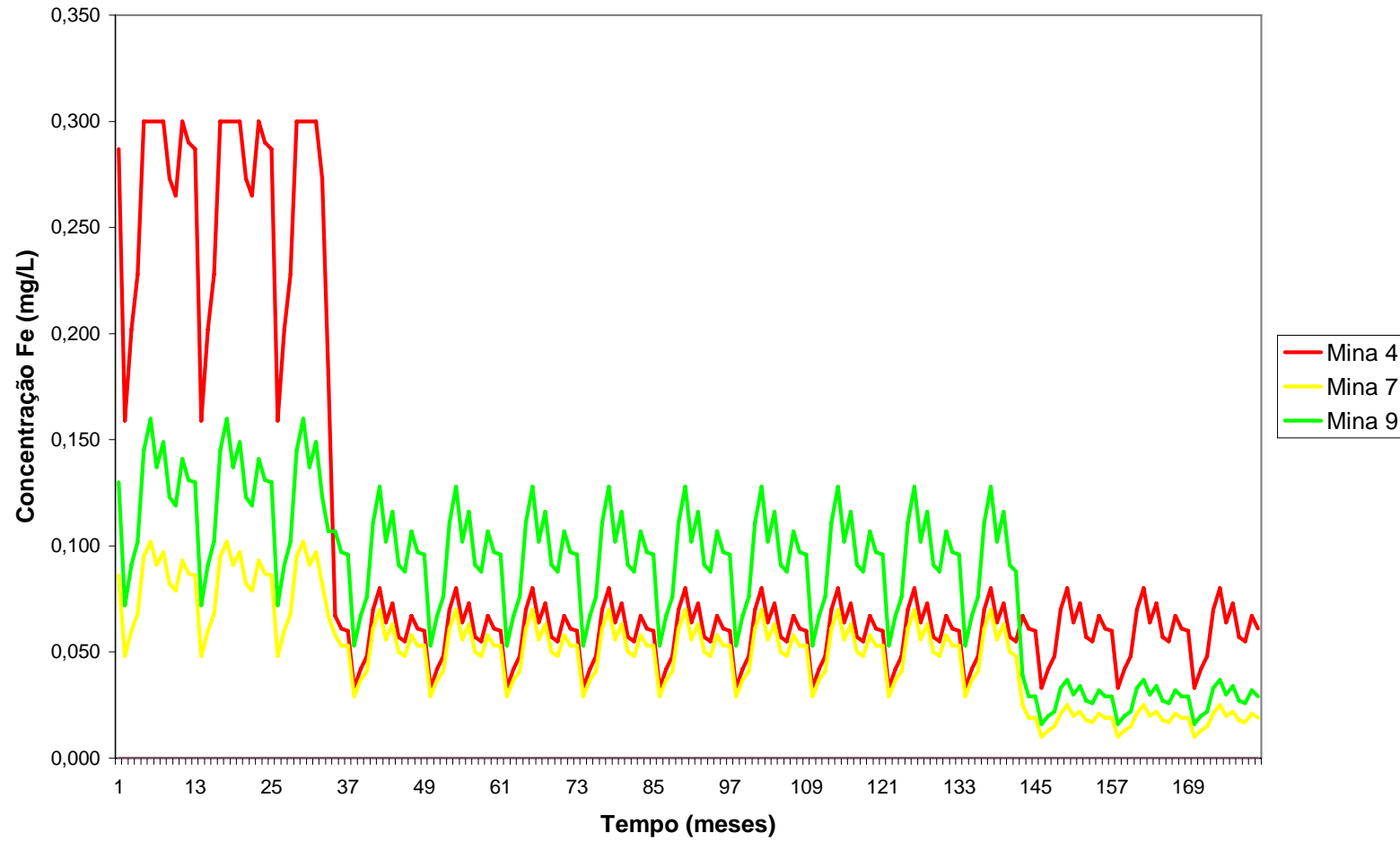


Figura 43 Gráfico das concentrações de ferro no caso 4b.

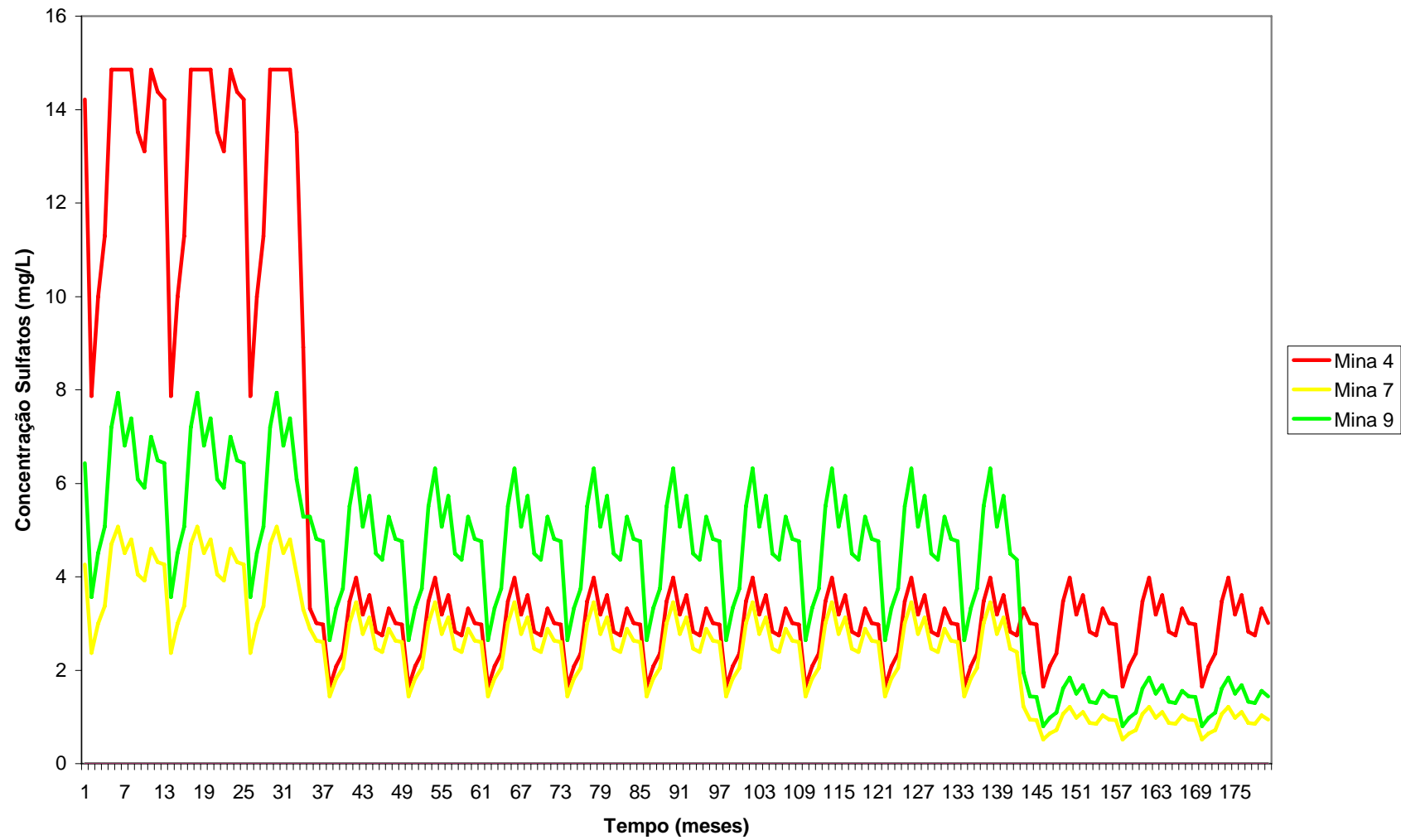


Figura 44 Gráfico das concentrações de sulfatos no caso 4b.

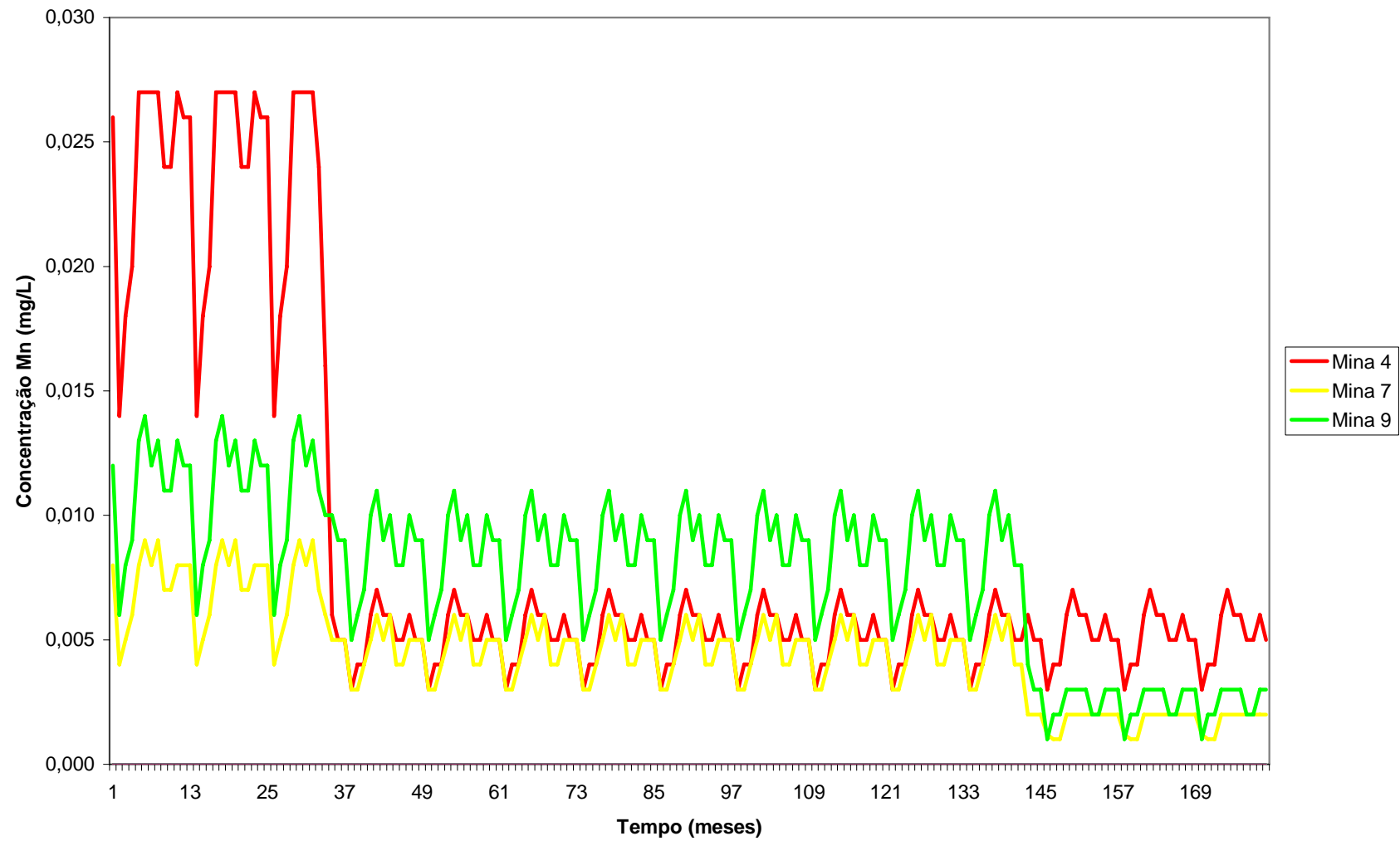


Figura 45 Gráfico das concentrações de manganês no caso 4b.

5.9 COMPARAÇÃO ENTRE OS FLUXOS DE CAIXA DO CASO BASE COM OS CASOS 2 E 3

O fluxo de caixa apresentado no modelo difere daquele proposto por Wildemann (2005) no sentido de que, para o caso base, os custos de fechamento não são considerados, enquanto no modelo proposto pelo autor, tais custos são analisados na fase pós-mineração. Além disso, salienta-se que não são considerados os investimentos para a abertura das minas, tendo em vista o fato de que seriam iguais em todos os casos analisados. A figura 46 apresenta a comparação entre os fluxos de caixa do caso base, do caso 2 e do caso 3. Tal figura pode ser vista como referente à parte central do gráfico proposto por Wildemann (2005). Os valores apresentados são todos positivos e consideram os ganhos e perdas do conjunto de minas da bacia.

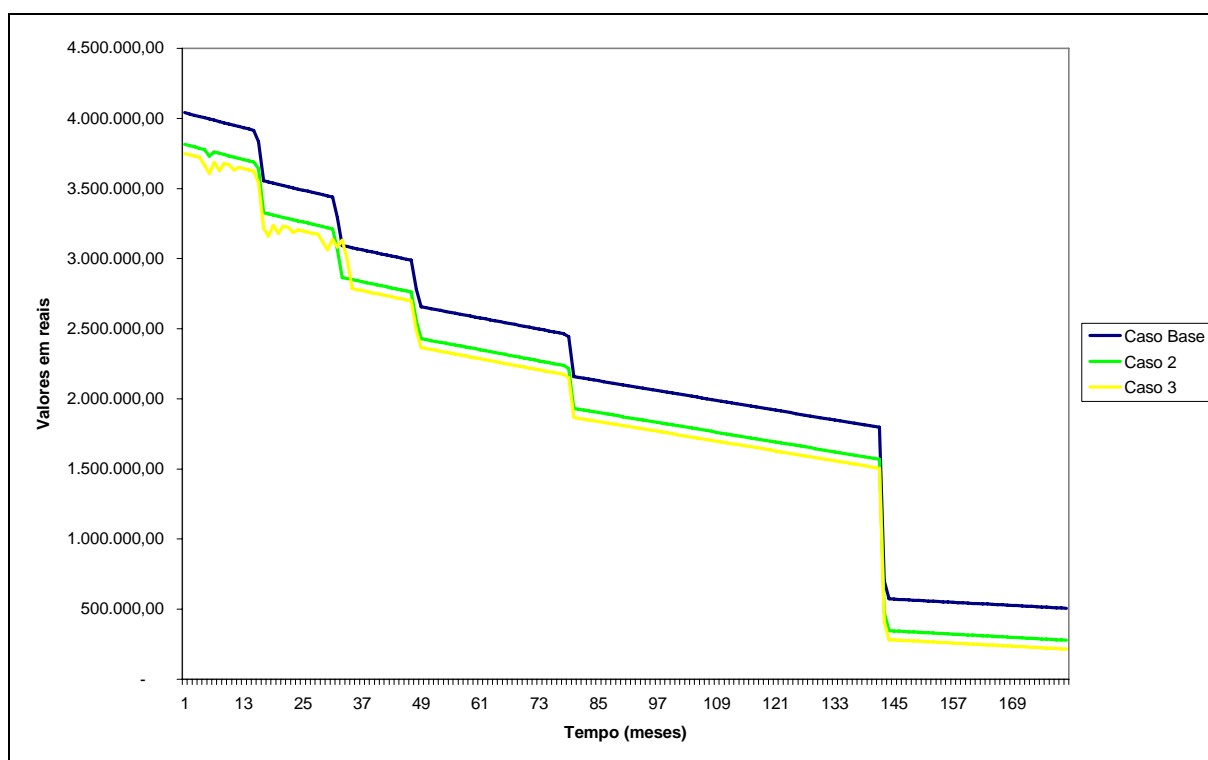


Figura 46 Fluxos de caixa relativos aos casos base, 2 e 3.

Cabe ressaltar, no entanto, que um dos objetivos do modelo é verificar a redução dos ganhos decorrente da incidência de custos ambientais. Na comparação evidenciada pela figura 46, percebe-se que a redução dos ganhos é mais acentuada para o caso 3, no qual as águas da bacia foram enquadradas na classe 1. Em paralelo, nota-se que a diferença entre os fluxos de caixa dos casos 2 e 3 é menor que aquela entre um deles e o caso base. A tendência decrescente do gráfico é dada pela queda progressiva da produção e pelo aumento,

considerado linear, do custo de extração. A figura 47 apresenta a curva de redução dos casos 2 e 3 em relação ao caso base e do caso 3 em relação ao caso 2.

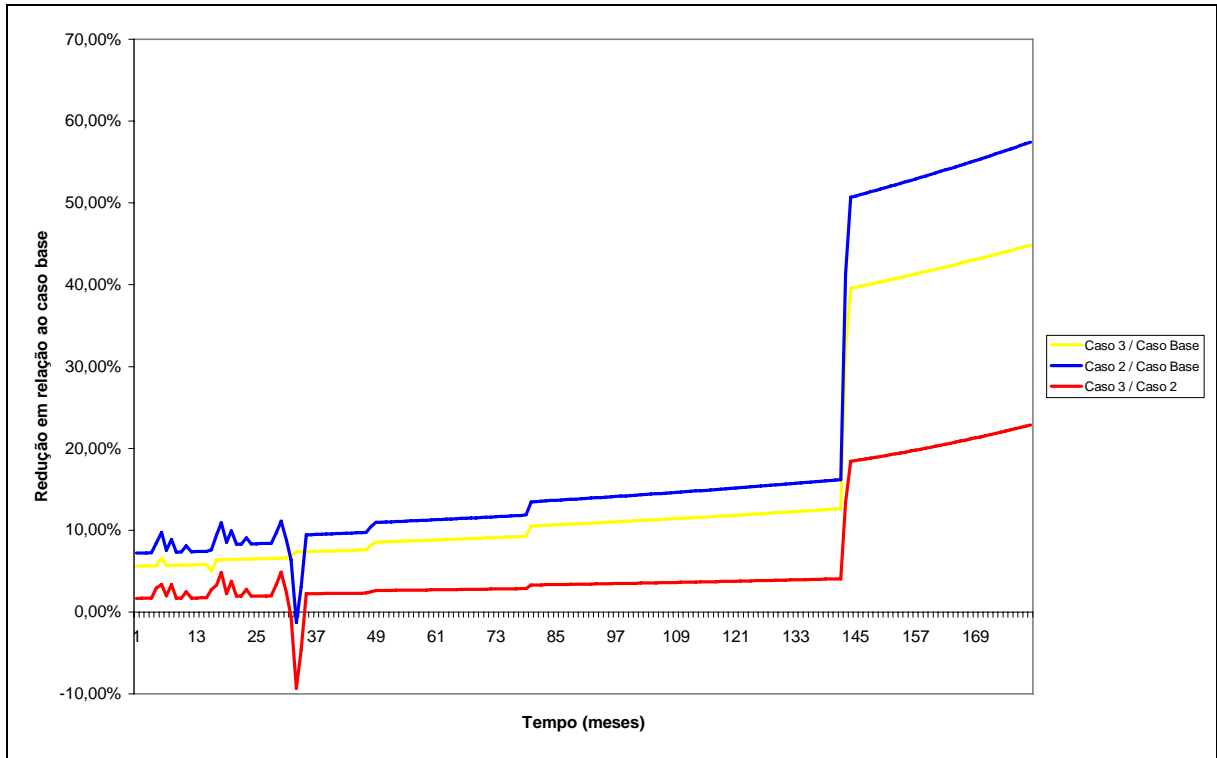


Figura 47 Redução da curva dos fluxos de caixa: Caso 3/Caso Base, Caso 2/Caso Base e Caso 3/Caso 2.

A figura 47 pode servir como subsídio para responder a seguinte pergunta: em qual classe de uso a bacia deve ser enquadrada?

Salienta-se que tal pergunta (e a subsequente resposta) deve ser formulada (e respondida) em um ambiente de negociação coletiva e com participação social. Os comitês de bacias podem ser adequadas arenas de debates para questões dessa natureza. Nesse contexto, a figura apresentada serve como um insumo a mais para a discussão.

A resposta deve ser baseada nas demais possibilidades de uso da água existentes. Conforme o gráfico, a redução de ganhos do caso 3 para o caso 2 é menor do que 5,0% em, aproximadamente, 80% do tempo analisado, o que mostra pouca diferença de gastos entre as classes de enquadramento.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresenta-se uma síntese do trabalho, são tecidos os comentários finais a respeito do estudo e são propostas novas idéias relacionadas com o tema.

6.1 SÍNTESE DO TRABALHO

O presente estudo é caracterizado pelo desenvolvimento de uma metodologia de análise econômica para a exploração do carvão mineral com a inclusão de custos ambientais (tratamento de efluentes e fechamento do empreendimento), dada a capacidade de suporte da bacia segundo o estabelecimento das concentrações legais de determinados parâmetros de qualidade da água.

A revisão bibliográfica contempla uma descrição da situação de diversos países a respeito do lançamento de efluentes da mineração (DAM) e como essa atividade impacta os corpos d'água. A adoção da bacia hidrográfica como unidade de estudo é defendida e, em seguida, descreve-se a formação da drenagem ácida de mina. São apresentadas as teorias relativas à produção, ao manejo de resíduos e à operação dos recursos naturais não renováveis. Também é apresentado o suporte computacional escolhido para implantação da metodologia.

A metodologia apresentada é baseada na modelagem computacional com o uso da pesquisa operacional. São listados os dados necessários à metodologia para que fossem formuladas as funções econômicas e as equações de restrição do modelo.

A área carbonífera do estado de Santa Catarina é escolhida como caso de estudo. São apresentados os dados relativos à área e é montado o modelo computacional com base na metodologia descrita.

Por fim, a metodologia é aplicada segundo seis diferentes cenários e os resultados são analisados.

6.2 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que, com o uso do modelo elaborado, é possível realizar a internalização dos custos ambientais na atividade de mineração de carvão e, assim, reduzir a incidência de prejuízos em outros agentes decorrentes da poluição dos cursos d'água. Ademais, percebe-se que tal internalização pode, ainda, caracterizar corte de despesas tendo em vista que reduz gastos imprevistos, impedindo que o empreendedor seja surpreendido com despesas extras. A esse respeito, cumpre salientar o efeito positivo da distribuição, ao longo do período de exploração, de parte dos custos de fechamento, o que reduz sua concentração nos períodos finais – mais críticos pela diminuição de rendimentos. Ainda quanto à internalização dos custos ambientais, destaca-se que ações tardias podem consumir os ganhos realizados pelos custos acumulados, causados, inclusive, por ações legais.

A utilização da bacia hidrográfica como unidade de estudo mostra-se uma metodologia eficaz de controle da poluição das águas superficiais, pois a propagação e o transporte dos sedimentos se dão por elas. Cabe, ainda, ressaltar que foram utilizados os valores de vazões mínimas mensais, o que, tornou a situação bastante restritiva, porém coerente quanto aos aspectos preventivos.

A fundamentação teórica desenvolvida por Conrad *et al* (1987) para a exploração dos recursos naturais não renováveis e aquela desenvolvida por Henderson (1976) para a maximização do bem estar social, quando aplicadas em conjunto, podem aliar o desenvolvimento econômico com o interesse de outros agentes instalados na bacia. Ademais, pode-se perceber que tais conceitos mostram que a conservação do meio ambiente não deve ser vista como restritiva da atividade econômica. A análise do modelo mostra, ainda, que o uso dos recursos hídricos não deixa de ser realizado, ele é apenas controlado para que não seja ultrapassada a capacidade de fornecimento de águas de boa qualidade.

Conforme apresentado, a falta de planejamento de uso dos recursos naturais acarreta elevados prejuízos financeiros não só a quem os provoca, mas também àqueles que deles dependem. Dessa forma, o modelo apresentado torna possível concluir que, desde que haja o preparo necessário, pode-se aliar uma atividade lucrativa à proteção do meio ambiente. Tal conclusão é corroborada pelo valor positivo obtido pelo modelo para a função-objetivo dos casos 2 e 3, principalmente.

A aplicação do modelo, entretanto, não deve se restringir apenas aos cenários propostos. Em etapa anterior à exploração de carvão mineral, deve o empreendedor analisar e avaliar diferentes cenários e suas conseqüências. O modelo permite uma fácil manipulação de dados de entrada, o que possibilita a avaliação de novas propostas de estruturas de tratamento de resíduos ou de tecnologias de exploração. A técnica *longwall mining* não foi analisada, mas conforme apresentado no texto, seu custo é menor e poderia gerar maiores lucros, caso o empreendedor considere excessivos os gastos ambientais.

A estimativa das reservas iniciais apresenta incertezas. Assim sendo, diversas possibilidades devem ser verificadas para que se possa obter a produção ótima. Ademais, aparece, ainda, a taxa de juros como parâmetro de acentuada importância, pois esta permite a comparação do empreendimento com outros investimentos. Em outras palavras, a análise de taxas de juros distintas permite avaliar o retorno obtido pela atividade mineradora, face às opções disponíveis no mercado financeiro. Com as devidas adaptações, o modelo pode ser aplicado em outras bacias hidrográficas.

Por fim, cabe destacar mais uma vez, que é possível internalizar os custos ambientais e, assim, respeitar a classificação de uso das águas sem que isso inviabilize a mineração de carvão.

6.3 LIMITAÇÕES E PROPOSTA DE NOVOS TRABALHOS

Ressalta-se a utilidade do modelo apresentado para os órgãos de controle e fiscalização de bacias hidrográficas. Neste caso, contudo, algumas adaptações podem se fazer necessárias. A primeira delas diz respeito ao fato de haver distintas atividades econômicas com diferentes descargas de poluentes na bacia. Assim, deve-se conhecer não só a quantidade e a qualidade dos despejos individuais, mas também as possíveis reações químicas entre as substâncias despejadas. Um novo tema seria a aplicação de modelo semelhante para diversas atividades econômicas instaladas na bacia.

Com uma dinâmica hidrológica distinta daquela verificada no escoamento das águas superficiais, as águas subterrâneas não foram consideradas no modelo. Assim, deixou-se de analisar a questão da contaminação dos aquíferos subterrâneos, tema de relevada importância

à sociedade. Dessa forma, propõe-se a inclusão das águas subterrâneas em modelo semelhante ou modelo ampliado pela presença de atividades econômicas distintas.

REFERÊNCIAS

- BAJTOS, P. Mine Water Issues in Slovakia. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 1. **Mine Water and the Environment**, vol. 23 (4), p. 170-173, 2004.
- BARRETO, M. **Mineração e Desenvolvimento Sustentável: Desafios para o Brasil**. Rio de Janeiro: DECEM/MCT, 215p., 2001.
- BATTY, L.C. The Potential Importance of Mine Sites for Biodiversity. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 101-103, 2005.
- BEDNAR, A., GARBARINO, J. R., BURKHARDT, M. R., RANVILLE, J. F., WILDERMAN, T. Field and Laboratory Arsenic Speciation Methods and their Application to Natural Water Analysis. **Water Research** vol. 38, p.355-364, 2004.
- BLACHÈRE, A., MOREL, S., LEFORT, D. France. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 16-18, 2005.
- BORDALLO, C. L. A. **A Bacia Hidrográfica como unidade de planejamento dos recursos hídricos**. NUMA/UFPA. Belém, 1995.
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado, 1988.
- BRASIL. Presidência da República. Decreto-Lei n. 227 de 28 de fev. de 1967. **Dá nova redação ao Decreto-Lei n. 1.985, de 29 de jan. de 1940 (Código de Minas)**. Disponível em www.planalto.gov.br/CCIVIL/Decreto-Lei/Del0227.htm, acesso em 15 de dezembro de 2005.
- BRASIL. Presidência da República. Lei n. 4771 de 15 de set. de 1965. **Institui o novo código florestal**. Disponível em www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L4771.htm, acesso em 15 de dezembro de 2005.
- BROOKE, A., KENDRIC, D., MEERANS, A. RAMAN, R. **GAMS: A User's Guide**. GAMS Development Corporation, 1998.
- CETEM. **Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Hidrográfica Sul Catarinense**. Vol I. Mar, 2001. Disponível em www.siecesc.com.br, acesso em 25 de fevereiro de 2006.
- CETEM. **Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Hidrográfica Sul Catarinense**. Vol III. Mar, 2001. Disponível em www.siecesc.com.br, acesso em 25 de fevereiro de 2006.
- CONAMA. Resolução n. 357 de 18 de mar. de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Disponível em www.mma.gov.br, acesso em 12 de mar. de 2006.

- CONAMA. Resolução n. 369 de 29 de mar. de 2006. **Dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social, ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Área de Preservação Permanente.** Disponível em www.mma.gov.br, acesso em 12 de mar. de 2006.
- CONRAD, J.M., CLARKE, C.W. **Natural Resource Economics: Notes and Problems.** Cambridge: Cambridge University Press, 231p, 1987.
- COULTON, R., WILLIAMS, K. Active Treatment of Mine Water: A European Perspective. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 23-26, 2005.
- CUNHA, A., BASTOS FILHO, G. . O Sistema Agrossilvicultural da Bracatinga. In: LOPES, I. *et al*; **Gestão Ambiental no Brasil: Experiência e Sucesso.** Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, p. 63-94, 1998.
- DESTOUNI, G. Sweden. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 7-10, 2005.
- FREITAS, M. **O Estado das Águas no Brasil.** Agência Nacional de Energia Elétrica – Brasília: ANEEL/MME /MMA/SRH, 1999.
- FARIAS, C. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil.** Relatório Preparado para o CGEE – PNUD. Disponível em <http://www.cgee.org.br> , 2002
- GIBSON, J. **Coal and the Environment.** Rio de Janeiro: Science Reviews, 1987. 59p.
- GOMES, C. Projeto de Recuperação Ambiental: Áreas Impactadas Pela Mineração de Carvão. In: **I Workshop da Companhia Vale do Rio Doce sobre Drenagem Ácida de Mina**, 2005.
- GOTHE, C. **Avaliação dos Impactos Ambientais da Indústria Carbonífera nos Recursos Hídricos da Região Sul-Catarinense.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Dissertação de Mestrado em Geografia, 1993.
- GUSEK, J., CLARKE-WHISTLER, K. Where does the Recovery of Metal Resources from Passive Treatment Systems fit in Sustainable Development Initiatives associated with Large Mining Projects? In: **National Meeting of the American Society for Mining and Reclamation**, 2005.
- GUSEK, J., SHIPLEY, B., LINDSAY, D. Overcoming Access Issues at a Remote Passive Treatment Site near Lake Shasta, CA. In: **National Meeting of American Society for Mining and Reclamation**, 2005.
- GUSEK, J. Passive Treatment System Design, Construction and Operating Costs: How Much it Really costs Comparative to the Alternatives? In: **I Workshop da Companhia Vale do Rio Doce sobre Drenagem Ácida de Mina**, 2005.

- HALLBERG, K., JOHNSON, D. Mine Water Microbiology. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 28-32, 2005.
- HARDIN, G. The Tragedy of the Commons. **Science**, vol. 162 (3854), p.1243-1248, Dec., 1968.
- HASCHE, A., WOLKERSDORFER, C. Germany. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 10-13, 2005.
- HENDERSON, J., **Teoria Microeconômica: uma abordagem matemática**. São Paulo: Pioneira, 417 p., 1976.
- JARVIS, A., REES, B. Mine Water Studies in the United Kingdom. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 1. **Mine Water and the Environment**, vol. 23 (4), p. 164-165, 2004.
- LANDERS, J. O Plantio Direto na Agricultura: o Caso do Cerrado. In: LOPES, I. *et al.*; **Gestão Ambiental no Brasil: Experiência e Sucesso**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, p.3-34, 1998.
- LANNA, A. **Gerenciamento de bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos**. IBAMA. Brasília, 170p., 1995.
- MAY, P., ROCHA, R. O Sistema Agrossilvicultural do Cacau-cabruca. In: LOPES, I. *et al.*; **Gestão Ambiental no Brasil: Experiência e Sucesso**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, p. 35-64, 1998.
- Mc CARL, B. **Gams User Guide: 2004. Version 21.3**. Desenvolvido em cooperação com GAMS Development Corporation, 2004.
- MENDES, C., GOMES, C. **Coal Waste Disposal Sites and their Environmental Impact: A Case of Study for Sangão Watershed, Brasil**, 2004.
- MENDES, C. **Cargas Poluentes**. Notas de aula da disciplina de Economia dos Recursos Hídricos do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFRGS, 2006.
- MIDZIC, S., SILAJDZIC, I. Serbia and Montenegro. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 18-20, 2005a.
- MIDZIC, S., SILAJDZIC, I. Macedonia. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 21-23, 2005b.
- MISERÉ, W., WINGS, R. The Netherlands – Rising Mine Water in the Former Dutch Coal Mines. **Mine Water and the Environment**, vol. 23 (4), p. 168-170, 2004.
- MUELLER, C. Gestão de Matas Ciliares. In: LOPES, I. *et al.*; **Gestão Ambiental no Brasil: Experiência e Sucesso**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, p. 185-214, 1998.

- OSM. **Getting Started Help for AMDTreat v4.0.** Disponível em <http://amd.osmre.gov/GettingStarted.htm>, acesso em 15 de jun. de 2006.
- PINDYCK, R. The Optimal Exploration and Production of Nonrenewable Resources. **Journal of Political Economy**, vol. 86 (5), p.841-861, 1978.
- PINDYCK, R., RUBINFELD, D. **Microeconomia**. São Paulo: Prentice Hall, 711p., 2002.
- PIRAMID CONSORTIUM. **Engineering Guidelines for the Passive Remediation of Acidic and/or Metalliferous Mine Drainage and Similar Wastewaters**. European Commission 5th Framework RTD Project , Passive in-situ Remediation of Acidic Mine/Industrial Drainage (PIRAMID), University of Newcastle upon Tyne, UK, 2003.
- PIRES, J., SANTOS, J. Bacias Hidrográficas. Integração entre Meio Ambiente e Desenvolvimento. In: **Ciência Hoje, Águas no Brasil: má utilização e falta de planejamento**. No 110. SBPC. Rio de Janeiro, 1995.
- POLEMIS, M., RAPANOS, V., Energy Demand and Environmental Taxes: the Case of Greece. **Energy Policy**, vol. 3, p.1781-1788, 2005.
- RÄISÄNEN, M. L., HEIKKINEN, P., PULKKINEN, K., KORKA-NIEMI, K., SALONEN, V. Finland – Mine Water Quality in Some Abandoned and Active Mines. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 5-7, 2005.
- REES, B. An Overview of Passive Mine Water Treatment in Europe. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, Springer-Verlag, 2005.
- SANTA CATARINA. Plano de Gestão e Gerenciamento da Bacia do Rio Araranguá. Vol II: **Caracterização Hidrológica**. Florianópolis: Epagri, 1997a.
- SANTA CATARINA. Plano de Gestão e Gerenciamento da Bacia do Rio Araranguá. Vol IV: **Disponibilidade das Águas Superficiais**. Florianópolis: Epagri, 1997b.
- SÁRVÁRYNÉ-SZENTKATOLNAY, B. Hungary. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 1. **Mine Water and the Environment**, vol. 23 (4), p. 175-177, 2004.
- SDM. (Secretaria de Estado e Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente). **Bacias Hidrográficas de Santa Catarina: Diagnóstico Geral**. Florianópolis, 1997.
- SEYLER, J., FIGUEROA, L., AHMANN, D., WILDERMAN, T., ROBUSTELLI, M. Effects of Solid Phase Organic Substrate Characteristics on Sulfate Reducer Activity and Metal Removal in Passive Mine Drainage Treatment Systems. **National Meeting of American Society for Mining and Reclamation**, 2005.
- SIECESC. **O Impacto do Carvão Mineral na Economia Brasileira**. Fundação Getúlio Vargas: Rio de Janeiro, 1996.

- UNESC. Plano Básico de Desenvolvimento Ecológico e Econômico – PBDEE. Área da AMREC. UNESC, Criciúma, 1996.
- WALDER, I., NILSSEN, S. Acid Rock Drainage from Norwegian Mines. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 2-5, 2005.
- WILDERMAN, T. GUSEK, J., VASCONCELOS, F. Passive Treatment of Mining Influenced Waters. Apresentado no **I Workshop da Companhia Vale do Rio Doce sobre Drenagem Ácida de Mina**, 2005.
- WITKOWSKY, A. Poland. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. **Mine Water and the Environment**, vol. 24 (4), p. 13-16, 2005.
- WORLD COAL INSTITUTE. **The Coal Resource: a Comprehensive Overview of Coal**. Disponível em www.worldcoal.org Acesso em 03 de abril de 2006.
- YANDLE, B., VIJAYARAGHAVAN, M., BHATTARAI, M. **The Environmental Kuznets Curve**. PERC Research Study. May 2002.
- YOUNGER, P. Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management. **Mine Water and the Environment**, Springer-Verlag, 2004.

ANEXO I: LISTAGEM DO PROGRAMA PARA O CASO BASE

Sets (*****Declaração dos conjuntos*****)

t tempo em meses de exploracao das minas / $1 * 180 /$

i minas na bacia do Rio Sangao / M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9/

l componentes da DAM /ferro, sulfatos, manganes/;

Variable (***** Declaração das variáveis*****)

W renda liquida; (*****Bem estar – função a ser maximizada*****)

Positive Variables

q(i,t) producao da mina i no mes t (*****em toneladas*****)

Qefluente(i,t) vazao efluente da mina i no mes t (*****em m³/mês*****)

CargaInd(l,i,t) massa de cada poluente despejada por cada mina (*****em kg/m³*****)

ContInd(l,i,t) descarga do contaminante l pela mina i no tempo t (***** em mg/L*****)

Reserva(i,t) Reserva da mina i no tempo t (*****em toneladas*****)

ContM1(l,t) Descarga na mina 1 (*****em mg/L*****)

ContM2(l,t) Descarga na mina 2 (*****em mg/L*****)

ContM3(l,t) Descarga na mina 3 (*****em mg/L*****)

ContM4(l,t) Descarga na mina 4 (*****em mg/L*****)

ContM5(l,t) Descarga na mina 5 (*****em mg/L*****)

ContM6(l,t) Descarga na mina 6 (*****em mg/L*****)

ContM7(l,t) Descarga na mina 7 (*****em mg/L*****)

ContM8(l,t) Descarga na mina 8 (*****em mg/L*****)

ContM9(l,t) Descarga na mina 9 (**em mg/L**);

Scalar p preço da tonelada de carvão mineral em reais / 110 /

epsilon percentual de rejeitos no carvão ROM / 0.65/

delta taxa mensal de inflação /0.008/

K quantidade de água usada no beneficiamento do minério em m³ / 2 /

CBen custo por tonelada de carvão beneficiado em reais / 3 /;

Parameters (**Parâmetros**)

A(i) área em m² influenciada pela mina i /

M1 17500

M2 10000

M3 17500

M4 1000

M5 17500

M6 4000

M7 17500

M8 850

M9 17500 /

R(i) Reserva total de cada mina /

M1 9000000

M2 6000000

M3 9000000

M4 3750000

M5 9000000

M6 4500000

M7 9000000

M8 3000000

M9 9000000 /

alfa (t) Coeficientes de custos variáveis de exploracao /

1 1

(...) (...)

180 180 /

Lim (l) Limites toleraveis de cada contaminante /

ferro 5000000

sulfatos 5000000

manganês 5000000 /

Precipitacao (t) Valores mensais de chuva (**x10⁻³mm**)/

1 .17028

2 .18835

3 .12909

4 .09987

5 .09884

6 .09605

7	.12371
8	.10422
9	.12463
10	.13562
11	.13273
12	.16282 (...);

Table ComposicaoDAM (l,i) Concentracao dos principais componentes da DAM no efluente das minas

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
ferro	29.48	29.48	29.48	29.48	29.48	29.48	29.48	29.48	29.48
sulfatos	1460	1460	1460	1460	1460	1460	1460	1460	1460
manganes	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63

Table Qmensal (i,t) Vazao mensal dos rios em trechos onde existe mina (**em m3/mês**)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
M1	968559	1749304	1376782	1218459	828863	721763	903367	797819	1018229	1050824	867667	957694 (...)
M2	36740	66355	52225	46219	31441	27378	34267	30263	38624	39860	32913	36328 (...)
M3	968559	1749304	1376782	1218459	828863	721763	903367	797819	1018229	1050824	867667	957694 (...)
M4	123411	222892	175426	155253	105612	91965	115105	101656	129740	133894	110556	122027 (...)

M5 968559 1749304 1376782 1218459 828863 721763
 903367 797819 1018229 1050824 867667 957694 (...)

M6 69262 125093 98454 87133 59272 51614 64600
 57052 72814 75145 62047 68485 69262 (...)

M7 831710 1502143 1182254 1046302 711752 619784
 775730 685094 874362 902352 745074 822380 (...)

M8 17450 31517 24805 21953 14933 13004 16276
 14374 18345 18932 15633 17255 (...)

M9 831710 1502143 1182254 1046302 711752 619784
 775730 685094 874362 902352 745074 822380 (...)

Equations (****Declaração das Equações****)

W funcao objetivo

Res(i) Reserva total da mina i

vazaoefluente(i,t) Vazao despejada por cada mina

CargaIndividual(l,i,t) Massa de poluentes despejada por cada mina

ContaminacaoInd(l,i,t) Concentracao de cada poluente por cada mina no tempo t

RestrAmb(l,i,t) Restricao ambiental

RestrAmb3(l,t) Restricao ambiental para a mina3

RestrAmb5(l,t) Restricao ambiental para a mina5

RestrAmb7(l,t) Restricao ambiental para a mina7

RestrAmb9(l,t) Restricao ambiental para a mina9

ContaminacaoM1(l,t) Descarga de contaminantes no trecho da mina 1

ContaminacaoM2(l,t) Descarga de contaminantes no trecho da mina 2

ContaminacaoM3(1,t) Descarga de contaminantes no trecho da mina 3

ContaminacaoM4(1,t) Descarga de contaminantes no trecho da mina 4

ContaminacaoM5(1,t) Descarga de contaminantes no trecho da mina 5

ContaminacaoM6(1,t) Descarga de contaminantes no trecho da mina 6

ContaminacaoM7(1,t) Descarga de contaminantes no trecho da mina 7

ContaminacaoM8(1,t) Descarga de contaminantes no trecho da mina 8

ContaminacaoM9(1,t) Descarga de contaminantes no trecho da mina 9;

$W \dots w = e = \sum((i,t), ((1/(1+\delta))^{ord(t)} * ((1-\epsilon)^p * q(i,t) - C_{Ben} * q(i,t) - (\alpha(t)/60 + 28) * q(i,t)))));$

$Res(i) \dots \sum(t, q(i,t)) = e = R(i);$

$vazaoefluente(i,t) \dots Q_{efluente}(i,t) = e = Precipitacao(t) * A(i) + K * q(i,t);$

$CargaIndividual(l,i,t) \dots CargaInd(l,i,t) = e = Q_{efluente}(i,t) * ComposicaoAMD(l,i);$

$ContaminacaoInd(l,i,t) \dots ContInd(l,i,t) = e = CargaInd(l,i,t) / Q_{mensal}(i,t);$

$ContaminacaoM1(1,t) \dots ContM1(1,t) = e = ContInd(1, "M1", t);$

$ContaminacaoM2(1,t) \dots ContM2(1,t) = e = ContInd(1, "M2", t);$

$ContaminacaoM3(1,t) \dots ContM3(1,t) = e = (CargaInd(1, "M1", t) + CargaInd(1, "M2", t) + CargaInd(1, "M3", t)) / Q_{mensal}("M3", t);$

$ContaminacaoM4(1,t) \dots ContM4(1,t) = e = ContInd(1, "M4", t);$

$ContaminacaoM5(1,t) \dots ContM5(1,t) = e = (CargaInd(1, "M1", t) + CargaInd(1, "M2", t) + CargaInd(1, "M3", t) + CargaInd(1, "M4", t) + CargaInd(1, "M5", t)) / Q_{mensal}("M5", t);$

$ContaminacaoM6(1,t) \dots ContM6(1,t) = e = ContInd(1, "M6", t);$

ContaminacaoM7(1,t) .. ContM7(1,t) =e= (CargaInd(1,"M1",t) + CargaInd(1,"M2",t)+
CargaInd(1,"M3",t)+ CargaInd(1,"M4",t)+ CargaInd(1,"M5",t)+ CargaInd(1,"M6",t)+
CargaInd(1,"M7",t))/Qmensal("M7",t);

ContaminacaoM8(1,t) .. ContM8(1,t) =e= ContInd(1,"M8",t);

ContaminacaoM9(1,t) .. ContM9(1,t) =e= (sum(i,CargaInd(1,i,t)))/Qmensal("M9",t);

RestrAmb(1,i,t) .. ContInd(1,i,t) =l= Lim(1);

RestrAmb3(1,t) .. ContM3(1,t) =l= Lim(1);

RestrAmb5(1,t) .. ContM5(1,t) =l= Lim(1);

RestrAmb7(1,t) .. ContM7(1,t) =l= Lim(1);

RestrAmb9(1,t) .. ContM9(1,t) =l= Lim(1);

q.lo(i,t)=12500;

q.up(i,t)=60000;

Qefluente.lo(i,t) = 0;

ContInd.lo(1,i,t) = 0;

CargaInd.lo(1,i,t) = 0;

Model siecesc /all/ ;

option nlp=minos;

Solve siecesc using nlp maximizing pi;

Display q.l, w.l, ContaminacaoM1.l, ContaminacaoM2.l, ContaminacaoM3.l,
ContaminacaoM4.l, ContaminacaoM5.l, ContaminacaoM6.l, ContaminacaoM7.l,
ContaminacaoM8.l, ContaminacaoM9.l, CargaInd.l;