

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA SOB
IMPACTO DAS ATIVIDADES DE IMPLANTAÇÃO DE
GARIMPO NO MUNICÍPIO DE SÃO MARTINHO DA
SERRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nadia Bernardi Bonumá

Santa Maria, RS, Brasil

2006

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA SOB IMPACTO
DAS ATIVIDADES DE IMPLANTAÇÃO DE GARIMPO NO
MUNICÍPIO DE SÃO MARTINHO DA SERRA**

por

Nadia Bernardi Bonumá

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a.Dr^a. Maria do Carmo Cauduro Gastaldini

Santa Maria, RS, Brasil

2006

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA SOB IMPACTO DAS
ATIVIDADES DE IMPLANTAÇÃO DE GARIMPO NO MUNICÍPIO DE
SÃO MARTINHO DA SERRA**

elaborada por
Nadia Bernardi Bonumá

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Cauduro Gastaldini
(Presidente/Orientadora)

Prof. Dr. Carlos Nobuyoshi Ide (UFMS)

Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva (UFMS)

Santa Maria, 22 de fevereiro de 2006.

*“É preciso entender que nós não
herdamos as terras de
nossos pais, mas as tomamos
emprestadas de nossos filhos.”
(Provérbio Amish)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Eduardo e Marlei Lúcia, a minha irmã, Livia e ao meu amor Angelo, por terem compreendido a importância deste trabalho para mim, pelo carinho e incentivo em todos os momentos.

A professora Maria do Carmo Cauduro Gastaldini, pelo seu exemplo e pela oportunidade, orientação, paciência, dedicação e amizade.

Ao professor João Batista Dias de Paiva, pelos ensinamentos, apoio, atenção e amizade.

A todos os professores do mestrado, em especial a professora Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva e ao professor Carlos Ernando da Silva pelas sugestões e esclarecimentos.

Aos amigos e colegas engenheiros, Cintia Dotto, Francieli Junges, Gilson Piovezan e Juliana Scapin pela amizade e companheirismo no decorrer do trabalho.

Aos bolsistas de iniciação científica Álisson Milani, Débora Missio, Fábio Mari Malqui, Felipe Dal'Masso e Letícia Zorzella, pela amizade e auxílio nos trabalhos de campo e laboratório.

Aos servidores técnicos Alcides Sartori, José Astério do Carmo, Eliomar Pappis e Thiago Formentini pelos serviços de campo, laboratório e pelo apoio.

Aos engenheiros Ana Paula Brites, pelas indicações e ajuda nos trabalhos de laboratório, Joaquin Bonnacarrère Garcia e Ranieri Sangoi pelo auxílio em trabalhos de campo.

A COOMAR e a prefeitura de São Martinho da Serra, na pessoa do meu colega Eng^o José Antônio Gomes, pelo apoio e incentivo para pesquisa.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento, em especial ao grupo GHIDROS, pelas instalações e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

A Fapergs pelo financiamento à pesquisa e a CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

Humildemente agradeço a Deus, pela vida e pelos amigos que me proporcionou encontrar.

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA SOB IMPACTO DAS ATIVIDADES DE IMPLANTAÇÃO DE GARIMPO NO MUNICÍPIO DE SÃO MARTINHO DA SERRA

Autor: Nadia Bernardi Bonumá

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Cauduro Gastaldini

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 22 de Fevereiro de 2006.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade das águas superficiais sob impacto de garimpo em uma pequena bacia hidrográfica, nas cabeceiras do Rio Ibicuí-Mirim, no município de São Martinho da Serra - RS. A bacia em estudo abrange uma área total de 33,12 km², onde é desenvolvida a atividade de extração de pedras preciosas. As características de qualidade da água do rio foram avaliadas periodicamente, através dos parâmetros: temperatura da água, temperatura do ar, pH, condutividade elétrica, turbidez, OD, DBO₅, DQO, sólidos totais, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, sólidos fixos, sólidos voláteis, coliformes totais e coliformes termotolerantes. Foram feitas, também, investigações detalhadas, para a quantificação dos seguintes parâmetros: alcalinidade, Alumínio, Cálcio, Cobre, Cromo, Ferro, Fosfato, Magnésio, Manganês, Nitrato, Sódio e Zinco. As amostras de águas foram coletadas em tempo seco e durante os eventos de precipitação, possibilitando a obtenção da carga poluente do escoamento superficial. Os resultados mostram que houve aumento nos valores de condutividade elétrica, turbidez e sólidos, devido às atividades de garimpo. As concentrações médias dos eventos (CME) foram superiores às obtidas em tempo seco, indicando que o escoamento superficial afeta a qualidade da água do corpo receptor. A atividade de extração em São Martinho da Serra ainda está no início e, no entanto, os resultados confirmam a influência do garimpo na qualidade da água do rio. Isso demonstra a necessidade de um monitoramento contínuo dos recursos hídricos, para que possam ser tomadas atitudes que venham a minimizar os impactos ambientais causados pelo garimpo de pedras preciosas.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

QUALITY ASSESSMENT OF WATERS UNDER THE ARTISANAL MINING (GARIMPO)

IMPLANTATION IMPACT IN SÃO MARTINHO DA SERRA.

Author: Nadia Bernardi Bonumá

Advisor: Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Cauduro Gastaldini

Local and Date: Santa Maria, 22nd February 2006.

This research was developed to evaluate the quality of waters under to the artisanal mining (*garimpo*) impact in a catchment, at the headwater of Ibicuí-Mirim River, in São Martinho da Serra - RS. The catchment area is 33.12 km² and the land-use is predominantly agricultural and the extraction of gemstones activity. The water quality characteristics were evaluated periodically through the following parameters: temperature, pH, electric conductivity, turbidity, DO, BOD₅, COD, total solids, suspended solids, dissolved solids, fixed solids, volatile solids, total and fecal coliforms. Five detailed investigations were also made in order to quantify the following parameters: alkalinity, Aluminium, Calcium, Copper, Chromium, Iron, Phosphate, Magnesium, Manganese, Nitrate, Sodium and Zinc. The water samples were collected in dry weather and during the rainfall events, enabling the obtaining of the runoff load pollutant. The results presented an increasing on the electric conductivity, turbidity and solids values due to mineral extraction. The wet weather event mean concentrations (EMC) were over than the ones obtained in dry weather, indicating that the runoff affects the water quality of the receiving body. Despite that mining is a recent activity in São Martinho da Serra, it is already causing local deterioration of the water quality. The results showed the necessity of a continuous water resources monitoring process, in order to minimize the negative environmental effects of the gemstones exploitation activity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Padrões de primeira lavagem para materiais particulados e dissolvidos.	29
Figura 3.1– Localização geográfica da área de estudo no município de São Martinho da Serra – RS.....	42
Figura 3.2 – Estações de monitoramento da bacia em estudo.....	43
Figura 3.3 – Estações fluviográficas da bacia em estudo.....	44
Figura 3.4 – Vista geral do garimpo.....	46
Figura 4.1 – Foto do amostrador de nível ascendente – ANA.....	49
Figura 4.2 – Esquema do vertedor triangular de jusante.....	57
Figura 5.1 – Valores de temperatura da água, em tempo seco.....	67
Figura 5.2 – Valores de oxigênio dissolvido, em tempo seco.....	67
Figura 5.3 – Valores de DBO ₅ , em tempo seco.....	67
Figura 5.4 – Valores de DQO, em tempo seco.....	68
Figura 5.5 – Valores de condutividade elétrica , em tempo seco.	68
Figura 5.6 – Valores de pH, em tempo seco.	68
Figura 5.7 – Valores de sólidos totais, em tempo seco.	69
Figura 5.8 – Valores de sólidos dissolvidos, em tempo seco.	69
Figura 5.9 – Valores de sólidos suspensos, em tempo seco.....	69
Figura 5.10 – Valores de sólidos voláteis, em tempo seco.....	70
Figura 5.11 – Valores de sólidos fixos, em tempo seco.....	70
Figura 5.12 – Valores de turbidez, em tempo seco.	70
Figura 5.13 – Valores de coliformes totais, em tempo seco.	71
Figura 5.14 – Valores de coliformes termotolerantes, em tempo seco.....	71
Figura 5.15 – Valores de nitrato, em tempo seco.....	71
Figura 5.16 – Valores de fosfato, em tempo seco.....	72
Figura 5.17 – Polutograma do parâmetro SSt do dia 10/09/05.....	75
Figura 5.18 – Polutograma do parâmetro SSt do dia 23/09/05.....	75
Figura 5.19– Polutograma do parâmetro SSt do dia 04/10/05.....	76
Figura 5.20 – Polutograma do parâmetro Turbidez do dia 10/09/05.	76
Figura 5.21 – Polutograma do parâmetro turbidez do dia 23/09/05.....	76
Figura 5.22 – Polutograma do parâmetro Turbidez do dia 04/10/05.	77
Figura 5.23 – Correlação entre Sólidos Suspensos (SSt) eTurbidez.	77

Figura 5.24 – Correlação entre Sólidos Suspensos Fixos (SSf) e Sólidos Suspensos Voláteis (SSv).....	78
Figura 5.25 - Correlação entre massa de sólidos totais e o volume escoado.....	79
Figura 5.26 - Correlação entre massa de sólidos suspensos totais e a precipitação.	80
Figura 5.27 - Curvas M(V) do parâmetro sólidos totais dos eventos analisados	81
Figura 5.28- Curvas M(V) do parâmetro sólidos suspensos dos eventos analisados	81
Figura 5.29 - Curvas M(V) do parâmetro sólidos dissolvidos dos eventos analisados	81
Figura 5.30- Curvas M(V) do parâmetro sólidos suspensos voláteis dos eventos analisados	82
Figura 5.31- Curvas M(V) do parâmetro sólidos suspensos fixos dos eventos analisados	82
Figura 5.32 - Curvas M(V) do parâmetro turbidez dos eventos analisados.....	82
Figura 5.33- Curvas M(V) do parâmetro condutividade dos eventos analisados.....	83
Figura 5.34 - Curvas M(V) do parâmetro pH dos eventos analisados	83
Figura A. 1 – Hidrograma do Evento 16/07/05	100
Figura A. 2 – Hidrograma do Evento 21/08/05	100
Figura A. 3 – Hidrograma do Evento 23/08/05	100
Figura A. 4 – Hidrograma do Evento 10/09/05	101
Figura A. 5 – Hidrograma do Evento 23/09/05	101
Figura A. 6 – Hidrograma do Evento 04/10/05	101
Figura A. 7 – Hidrograma do Evento 13/10/05	102
Figura A. 8 – Hidrograma do Evento 14/10/05	102
Figura A. 9 – Hidrograma do Evento 21/10/05	102
Figura A. 10 – Hidrograma do Evento 06/11/05	103
Figura A. 11 – Hidrograma do Evento 24/11/05	103
Figura A. 12 – Hidrograma do Evento 08/01/06	103
Figura A. 13 – Hidrograma do Evento 12/01/05	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características físicas da bacia em estudo	42
Tabela 4.1 - Relações nível-garrafa do ANA, instalado no ponto de jusante.....	50
Tabela 4.2 – Parâmetros monitorados, unidades, técnicas e locais de análise.....	51
Tabela 5.1 - Características de qualidade da água em tempo seco, determinadas no ponto de montante.....	64
Tabela 5.2- Características de qualidade da água em tempo seco, determinadas no ponto intermediário (na saída do garimpo).	65
Tabela 5.3- Características de qualidade da água em tempo seco, determinadas no ponto de jusante.	66
Tabela 5.4 - Concentrações médias dos eventos monitorados na bacia.	74
Tabela 5.5 - Massa transportada pelo escoamento superficial na bacia em estudo.	79
Tabela A. 1– Coletas do escoamento superficial.....	106

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Ag	Prata
Al	Alumínio
ANA	Amostrador de nível ascendente
B	Boro
Be	Berílio
C	Concentração
C(t)	Concentração no tempo t
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
cm	Centímetro
CME	Concentração Média do Evento
CMPE	Concentração Média Parcial do Evento
Co	Cobalto
Colif.	Coliformes
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cond.	Condutividade
COOMAR	Cooperativa Martinhense de Garimpeiros da Região Central
CP	Coleta pontual
CQA	Característica de qualidade da água
Cs	Césio
Ctt	Coliformes termotolerantes
CT	Coliformes totais
Cu	Cobre
DAM	Drenagem ácida de minas
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxigênio de cinco dias
DQO	Demanda química de oxigênio
Δt	Intervalo de tempo
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
Esc.	Escoamento
F	Adimensional de volume escoado acumulado
Fe	Ferro
FT	Fósforo total
g	Gramas
GHIDROS	Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
H	Cota
h	Hora
ha	Hectare
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Im	Intensidade média
K	Potássio
Kg	quilograma
Km	quilômetros
Km ²	quilômetros quadrados
L	Adimensional de massa poluente acumulada
L	Litro
La	Lantânio
LASAM	Laboratório de Saneamento Ambiental

LAQIA	Laboratório de Análises Químicas Industriais e Ambientais
Li	Lítio
M	Massa total de poluente durante o evento
m(t)	Massa poluente no tempo t
M(V)	Curva cumulativa da massa poluente vs volume escoado acumulado
m	metro
m ³	metro cúbico
MG	Minas Gerais
mg	Miligramas
mín.	Mínimo
ml	Mililitro
mm	Milímetro
Na	Sódio
Nd	Neodímio
Ni	Níquel
NMP	Número mais provável
OD	Oxigênio dissolvido
Pb	Chumbo
pH	Potencial hidrogeniônico
Pr	Praseodímio
Prec.	Precipitação
PTSA	Período de Tempo Seco Antecedente
Q	Vazão
Q(t)	Vazão no tempo t
Rb	Rubídio
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
SDT	Sólidos Dissolvidos
SO ₄	Sulfato
Si	Silício
Sr	Estrôncio
SSf	Sólidos Suspensos fixos
SSM	<i>Smalle-scale mining</i>
SSt	Sólidos Suspensos totais
SSv	Sólidos Suspensos voláteis
ST	Sólidos Totais
t	Tempo
Temp.	Temperatura
Turb.	Turbidez
U	Urânio
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
V	Volume total escoado durante o evento
v(t)	Volume escoado no tempo t
Vol.	Volume
Y	Ítrio
Zn	Zinco
°C	Grau Celsius

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	15
1.1 - OBJETIVOS.....	16
1.1.1 - Objetivo Geral	16
1.1.2 - Objetivos Específicos.....	17
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 - MINERAÇÃO E MEIO AMBIENTE.....	18
2.1.1 - Considerações iniciais.....	18
2.1.2 - Efeitos no meio ambiente.....	19
2.2 - EXTRAÇÃO DE PEDRAS PRECIOSAS (AMETISTA E ÁGATA)	22
2.3 - QUALIDADE DA ÁGUA NA MINERAÇÃO	25
2.3.1 - Panorama geral da qualidade da água	25
2.3.1.1 Avaliação das cargas poluidoras	27
2.3.2 - Água na atividade mineradora	30
2.3.3 - Medidas de controle da poluição.....	34
2.3.4 - Casos estudados	37
3 - A BACIA DE ESTUDO.....	42
3.1 - ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO	43
3.1.1 - Uso e ocupação do solo.....	45
3.1.2 - Geologia e geomorfologia regional	46
4 - METODOLOGIA	48
4.1 - COLETA DE AMOSTRAS	48
4.1.1 - Amostrador Automático.....	49
4.2 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	50
4.2.1 - Parâmetros físicos	51
4.2.1.1 Sólidos.....	51
4.2.1.2 Temperatura	52
4.2.1.3 Turbidez.....	52
4.2.2 - Parâmetros físico-químicos.....	52
4.2.2.1 pH.....	52
4.2.2.2 Alcalinidade	53
4.2.2.3 Condutividade elétrica	53
4.2.2.4 Oxigênio Dissolvido – OD.....	53
4.2.2.5 Demandas Química e Bioquímica de Oxigênio	54
4.2.3 - Parâmetros Microbiológicos	54
4.2.3.1 Coliformes Totais e Termotolerantes.....	54
4.2.4 - Parâmetros Químicos.....	55
4.2.4.1 Metais	55
4.2.4.2 Fosfato.....	56
4.2.4.3 Nitrato	56
4.3 - MEDIÇÃO DE VAZÃO	57
4.4 - AVALIAÇÃO DA CARGA DIFUSA	58
4.4.1 - Concentração média do evento (CME)	59
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1 - QUALIDADE DA ÁGUA NA BACIA.....	61

5.1.1 - Análises das características de tempo seco	61
5.1.2 - Análises das características do escoamento superficial	72
5.1.2.1 Carga difusa do escoamento superficial.....	78
5.1.2.2 Distribuição dos poluentes em função do volume: Curvas M(V)	80
6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	84
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXOS	98
ANEXO 1 – HIDROGRAMAS DOS EVENTOS ANALISADOS NA BACIA ESTUDADA.....	99
ANEXO 2 – PLANILHAS DAS COLETAS DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	105

1 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e o crescimento das atividades produtivas vêm acelerando o processo de degradação dos recursos hídricos. Deste modo, é vital que estes recursos sejam avaliados e protegidos conciliando-os com as demandas de água para as atividades humanas. Dentre as atividades potencialmente poluidoras dos recursos hídricos, estão aquelas relacionadas à mineração. No caso específico da extração de pedras preciosas, a própria natureza da lavra implica em alterações do meio ambiente que podem refletir numa diminuição da qualidade da água dos mananciais.

As atividades de mineração e de garimpo são essenciais para o desenvolvimento econômico do mundo atual, pois os minérios extraídos da natureza são utilizados ou como matéria-prima ou como parte do processo industrial de muitos dos produtos utilizados pelo homem. No entanto, esta relação de dependência gera um conflito para a sociedade que tem de arcar com os reflexos gerados pela degradação dessas áreas de exploração mineral e seus entornos.

O Brasil possui uma das maiores reservas minerais do mundo. E desde o começo de sua colonização até os dias de hoje, sofre com os impactos de uma extração mineral desordenada e com pouquíssimo controle tecnológico. Durante séculos não houve nenhuma preocupação com as alterações ambientais causadas pelas atividades extrativas. O resultado foi um quadro de degradação oneroso em muitas áreas do território nacional.

O aproveitamento dos enriquecimentos minerais pode causar grandes impactos ambientais, pois além das modificações das características do ambiente natural pode haver uma grande quantidade de rejeitos gerados. Parte desses detritos acaba sendo transportada para os corpos de água, alterando suas características qualitativas.

O Rio Grande do Sul é conhecido no Brasil e no exterior como um dos grandes fornecedores de gemas do mundo, especialmente ágata e ametista, sendo considerado um dos três maiores produtores de gemas do país. Este tipo de atividade tem uma grande relevância no desenvolvimento sócio-econômico das regiões junto aos locais de extração e beneficiamento. Entretanto, também é

responsável por grandes modificações na paisagem e meio ambiente, podendo causar um alto grau de deterioração ambiental nos recursos hídricos, mesmo após o término da atividade extrativa.

Apesar disso, a poluição hídrica gerada por esses garimpos tem sido pouco estudada, uma vez que não existem dados suficientes nem sobre o potencial das reservas minerais e tão pouco sobre o processo extrativo das lavras existentes e o passivo ambiental gerado.

Deste modo, entende-se a importância do monitoramento das águas superficiais sobre influência da atividade de extração de pedras preciosas na bacia em estudo. Assim será possível identificar alterações nas características qualitativas dos cursos d'água, avaliar a eficácia das medidas de controle de poluição adotadas bem como, se necessário, propor as medidas necessárias para minimização dos impactos gerados.

Para contornar a poluição gerada pelas atividades de mineração, com o objetivo de preservar a qualidade da água dos mananciais é necessário que haja um gerenciamento dos recursos hídricos, tentando utilizar as lições aprendidas com os erros de experiências degradantes anteriores.

1.1 - Objetivos

1.1.1 - Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é avaliar a qualidade das águas superficiais sob impacto da extração de pedras preciosas, em uma pequena bacia hidrográfica nas cabeceiras do Rio Ibicuí-Mirim. Esta bacia localiza-se no município de São Martinho da Serra, pertencente a uma região do Rio Grande do Sul considerada de elevado potencial gemológico, onde estão em operação garimpos de pedras preciosas (ametistas, ágatas).

1.1.2 - Objetivos Específicos

- Avaliar a qualidade da água à jusante da área de lavra garimpeira e verificar se a qualidade desta sofrerá alterações, quando comparada com a água recolhida à montante, sem influência direta do garimpo.
- Avaliar a carga difusa de poluentes lançados no corpo d'água em eventos de precipitação, à jusante da área de garimpo;
- Realizar um diagnóstico atual da qualidade dos recursos hídricos da bacia estudada.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Mineração e meio ambiente

2.1.1 - Considerações iniciais

A mineração e o garimpo são atividades que exercem um papel decisivo para o desenvolvimento econômico do mundo atual. Através da extração de variados tipos de recursos naturais do solo e do subsolo, e dos usos múltiplos desses recursos foi possível o crescimento industrial dos últimos séculos.

De acordo com Meyer (2000), a utilização dos recursos minerais é uma das mais antigas atividades exercidas pelo homem e a base de seu desenvolvimento. Os historiadores registram que, mesmo antes do surgimento da agricultura, os primeiros grupos humanos caçadores e coletores já utilizavam sílex (rocha sedimentar dura), para a confecção de suas armas.

Entretanto, as atividades extrativas interferem fortemente no ambiente natural contribuindo para a sua deterioração. Como coloca Fonseca (2004), das atividades humanas, as chamadas atividades econômicas são as grandes responsáveis pelas alterações do meio ambiente. As duas atividades econômicas básicas são a mineração e a agricultura. Elas são as atividades através das quais o homem extrai os recursos naturais que alimentam toda a economia. Sem elas nenhuma das atividades subsequentes pode existir. A mineração e a agricultura, junto com a exploração florestal, a produção de energia, os transportes, as construções civis e as indústrias básicas (químicas e metalúrgica) são as causadoras de quase todo o impacto ambiental.

O Brasil tem uma forte vocação mineral. Por apresentar uma grande diversidade geológica e devido às suas dimensões continentais, vem se destacando na produção e comercialização de diversos bens minerais. Entretanto, desde os tempos do Brasil Colônia até os dias de hoje, sofre com os impactos de uma

atividade extrativa desordenada, com pouquíssimo controle tecnológico e muitas vezes até clandestina.

Meyer (2000), comenta que em sua fase inicial, a extração mineral era desenvolvida sem conhecimento suficiente do jazimento, o que impedia a realização de um trabalho planejado, com objetivos definidos. Esta situação ainda persiste nos "garimpos", termo que define a atividade informal de extração mineral, diferentemente da mineração formal. Nos tempos da Colônia, apenas os senhores de escravos eram considerados aptos a sustentar produções regulares e a arcar com a tributação. Aos homens livres sem posses restava embrenharem-se pelos lugares ermos e aí praticarem suas lavras, à distância das autoridades coloniais. Conforme Vieira Couto (1801, *apud* MEYER, 2000), esses homens subiam as grimpas a procura de ouro e gemas preciosas, daí a denominação de "garimpos".

Durante muitos séculos não houve nenhuma preocupação com os impactos causados no meio físico pelas atividades extrativas. O resultado desta atividade exploratória foi um quadro de degradação oneroso, em muitas áreas do território nacional.

2.1.2 - Efeitos no meio ambiente

As atividades de extração mineral se caracterizam pela exploração de um recurso natural não renovável, tendo um alto potencial impactante sobre o ambiente, em especial sobre a fauna, a flora, o relevo, a qualidade das águas e a população das áreas mineradas.

Segundo Figueiredo (2000), a mineração produz impactos ambientais em todas as suas fases: prospecção e pesquisa, extração, beneficiamento, refino e fechamento de mina.

Os efeitos no ambiente durante a fase de prospecção e pesquisa podem ser expressivos, apesar de pouco mencionados na literatura. As aberturas de trincheiras, poços e de caminhos para os equipamentos de geofísica e perfuração afetam a vegetação e a fauna, alteram as paisagens, aceleram processos de erosão, etc. Figueiredo (2000) salienta que nessa fase, deveriam ser realizadas algumas atividades que serão importantes na fase de planejamento ambiental e da

execução do projeto, tais como o monitoramento da qualidade das águas (superficial e subterrânea), dos solos, da diversidade da fauna e da flora, etc.

Na fase de extração do minério podem produzir-se danos à vegetação e à paisagem, especialmente nas lavras a céu aberto, e onde se requeira o uso da madeira para produção de energia. O lençol freático local é rebaixado por meio de bombeamento da água e um grande volume de rochas e de pilhas de minério podem ficar expostas aos processos de oxidação. Pode ocorrer a formação de drenagens ácidas com efeitos adversos para a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Os níveis de radioatividade natural nas galerias subterrâneas e de gases, oriundos de várias fontes, deverão ser controlados por meio de sistemas de ventilação adequados. Produção de pó e ruídos constituem, também, aspectos negativos da lavra de minérios (FIGUEIREDO, 2000).

Nas fases de beneficiamento e refino de minérios, a disposição de pilhas de rejeitos ocupa grandes áreas que devem estar sujeitas a monitoramento permanente para atenuar os efeitos de substâncias indesejáveis nas águas superficiais e subterrâneas, solos e sedimentos. Podem ocorrer emissões na atmosfera de sulfatos (SO_4), hidrocarbonetos, flúor e outras substâncias tóxicas. Efeitos adversos, que afetam diretamente a saúde dos trabalhadores das minas e plantas industriais não devem ser subestimados.

Com o esgotamento inevitável do depósito, o fechamento da mina precisa ser planejado. O lençol freático tenderá a elevar-se após cessar o bombeamento, e grandes quantidades de materiais serão expostos à oxidação, ferragens e madeirames ficarão debaixo d'água e cavas se transformarão em grandes lagoas (FIGUEIREDO, 2000).

Para Meyer (2000), uma característica importante da mineração é que por mais que se desenvolva a atividade dentro dos melhores padrões de controle ambiental, sempre haverá um impacto residual, que é corrigido através da reabilitação de áreas degradadas, com algumas exceções no caso de lavra subterrânea.

Dentre os danos irreversíveis inclui-se a perda e alteração de solos, liberação de substâncias tóxicas para as drenagens a partir das minas, das bacias e pilhas de rejeitos; e provável alteração das águas subterrâneas, da flora e fauna originais.

Todo um conjunto de efeitos no ambiente precisa ser previsto e simulado em experimentos, para garantir a estabilidade dos ecossistemas alterados por um longo tempo no futuro (FIGUEIREDO, 2000).

Este fato é reconhecido pela Constituição Federal, no artigo 225, § 2, que determina a recuperação das áreas degradadas pela extração mineral. Se, por um lado, isto significa uma obrigação, por outro configura o reconhecimento de que a atividade mineral pode degradar o ambiente. A permissão para lavra, evidentemente, condiciona a alteração temporária do uso do solo (uma característica do processo de extração), ao cumprimento dos quesitos de manutenção dos padrões de qualidade ambiental e de conservação da flora e da fauna (MEYER, 2000).

A preocupação com a questão ambiental deve ser maior ainda nas áreas de garimpo, onde na maioria das vezes não existe nenhum controle tecnológico e a atividade extrativa não é realizada por instituições formais e sim por um grupo de pessoas (cooperativas, associações). A área de garimpo sofre diariamente alterações prejudiciais, pois o ato de minerar, tanto no processo de extração mineral quanto o de deposição de rejeitos, modifica a estrutura do terreno. Devem ser tomadas precauções, para evitar o aumento do passivo ambiental por poluição ou abandono das áreas degradadas, por falta de responsabilidade legal.

Inserido neste contexto, Fonseca (2005) afirma que no garimpo, assim como em todas atividades econômicas ligadas à natureza, devem tomar cuidados importantes com relação à proteção do meio ambiente. Estas preocupações são essenciais para se alcançar o desenvolvimento sustentável desta atividade econômica. Até a presente data, o quadro que se nota na atividade garimpeira, é uma dificuldade de se conciliar a estrutura precária das atividades extrativas desenvolvidas, com os cuidados necessários à operação em ambientes de alta sensibilidade ambiental.

Kopezinski (2000), sugere que o impacto ambiental, positivo e/ou negativo causado pela atividade extrativa, dependerá exclusivamente da ação antrópica. A atividade humana é que determinará o tipo, a magnitude e as conseqüências da alteração ambiental no meio a ser minerado.

2.2 - Extração de Pedras Preciosas (ametista e ágata)

A mineração de pedras preciosas desempenha importante papel na economia industrial. O Estado do Rio Grande do Sul é conhecido no Brasil e no Exterior como um dos grandes fornecedores de gemas do mundo, não propriamente pela diversificação de pedras, mas pelo significativo volume de gemas que produz, especialmente ágata e ametista, sendo considerado o segundo maior produtor de gemas do País, ficando atrás somente do estado de Minas Gerais.

As principais fontes de gemas no Rio Grande do Sul são as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. (JUCHEM *et al.*, 1990 *apud* AGOSTINI, *et al.* (1998)). Nessas rochas ocorrem extensas jazidas de ágata e ametista, em depósitos do tipo “geodo em basalto” (BOSSI & CAGGIANO, 1974 *apud* AGOSTINI *et al.*, 1998).

Entretanto, a extração desses minerais exige grandes intervenções no ambiente natural. As pedras preciosas são enriquecimentos minerais no interior da massa rochosa, gerados por efeitos de magmatismo acompanhado de calor e pressão. Esses são extraídos em jazidas que produzem grandes cicatrizes e exigem grande remanejamento de rocha.

Conforme Agostini *et al.* (1998), a lavra pela sua própria natureza, é uma atividade que implica em alterações do meio ambiente, cujos reflexos podem ultrapassar os limites das áreas dos trabalhos mineiros, atingindo o solo, o subsolo, os recursos hídricos da superfície e subsuperfície, além da fauna, flora, atmosfera e até o próprio homem.

Em seu ensaio sobre a extração de ametista do Rio Grande do Sul, Alberti. *et al.*, (2003), alertam que a extração é realizada de forma precária e que a mão-de-obra empregada nesta atividade são produtores rurais, sendo comum a participação de crianças neste processo de extração, o que requer maior atenção por parte dos órgãos públicos, devido aos expressivos danos causados à saúde. E, ainda cita que os impactos ambientais decorrentes da extração precária e a não recomposição do material de rejeito na área, causam problemas ao meio ambiente, podendo chegar a desmoronamentos, uma vez que a extração é realizada em áreas acidentadas ou declivosas.

Conforme Agostini *et al.* (1998), existem duas formas básicas de execução da lavra: semimecanizada e garimpagem. A lavra semimecanizada é realizada a céu

aberto e utiliza tratores de esteira de pá frontal para o desmonte da cobertura de estéril e retirada do nível mineralizado. A garimpagem é executada tanto a céu aberto quanto subterraneamente e caracteriza-se pela forma rudimentar de extração. As ferramentas utilizadas são pás, picaretas, ponteiros e marretas. A garimpagem por túneis (ou galerias) é feita nas frentes abertas pelos tratores. Simultaneamente ou após a limpeza dessas frentes, entram em ação os garimpeiros, que cavam túneis na zona produtora do talude.

A lavra semimecanizada e a garimpagem criam instabilidades e perturbações no terreno que podem comprometer o meio ambiente e as condições de segurança do trabalhador. A lavra a céu aberto ocasiona um impacto ambiental maior, pois as modificações paisagísticas ocasionadas pela remoção de segmentos de um morro inteiro ajudam a aumentar o impacto visual. No caso da garimpagem por túneis, os efeitos mais danosos são aqueles causados pelo lançamento dos materiais estéreis escavados no aterro de estéril.

Mas, é a lavra mecanizada que mais modifica a paisagem e o meio ambiente. O uso de equipamento pesado, principalmente tratores de esteira de vários tamanhos, remove grandes volumes de material e gera instabilidade no equilíbrio natural do meio geológico e ambiental, pois a maior parte da lavra está localizada na encosta dos morros. E, caso não haja um sistema de contenção dos rejeitos, o material estéril retirado pelos tratores vai assorear as drenagens próximas, devido à ausência de uma vegetação natural protetora e/ou à elevada declividade do terreno.

Segundo estudos feitos por Environment Levantamentos e Projetos (1992 *apud* AGOSTINI *et al.* 1998), a área de lavra de ágatas no Rio Grande do Sul foi separada em três situações, levando-se em conta o impacto ambiental.

O caso mais grave são as lavras feitas nos flancos (encostas) dos morros, sem contenção natural dos rejeitos. Nesta situação, o material estéril retirado pelos tratores vai assorear as drenagens próximas, devido à ausência de uma vegetação natural protetora e/ou à elevada declividade do terreno.

Quando a lavra é feita nos flancos dos morros, mas com contenção parcial dos rejeitos, o corte dos morros dá-se onde há uma espessa vegetação, que atua como um elemento de contenção parcial do estéril removido. Quando a inclinação da encosta é próxima do ângulo de repouso do material estéril ou de ângulo menor, o risco de assoreamento é menor. Mesmo assim, ocorrem problemas de erosão desse material, principalmente nas pontas de aterro.

De acordo com Environment Levantamentos e Projetos (1992 *apud* AGOSTINI *et al.* 1998) o ideal são as lavras executadas em morros distantes de drenagem. A extração deve ser feita a uma distância razoável (aproximadamente, 200 m) das drenagens perenes e intermitentes. Assim, não há assoreamento direto das drenagens.

Em todas essas situações ainda pode existir o problema do escorregamento e queda de massas de solo e/ou rocha, devido à instabilidade causada pelo sistema de lavra utilizado.

Este quadro de degradação ambiental e precariedade de condições de trabalho nos garimpos não ocorre apenas no Brasil. Na Zâmbia, Kambani (2003) discute sobre “small-scale mining” (SSM) ou garimpos, e suas implicações ambientais. Entre outros tipos de garimpos, são levantados os problemas encontrados nos de pedras preciosas, principalmente de esmeraldas, ametistas, águas-marinha e turmalinas. Como era esperado, o dano ambiental é proporcional à intensidade da extração: grandes operações mecanizadas causam o maior dano. Além disso, foi constatado que o volume de resíduos gerados para extrair pequenas quantidades de pedras preciosas é muito alto, se comparado ao volume gerado com a extração de grande quantidade de minerais como o ferro, cobre e materiais para a indústria ou para a construção civil. Conseqüentemente, um grande volume de resíduos é deixado após a atividade de extração sem que haja a recuperação das áreas degradadas.

Segundo Kambani (2003), a situação na Zâmbia está piorando, pois as minas estão sendo exploradas a profundidades cada vez maiores. Em uma tentativa de diminuir as aberturas na superfície do solo, as cavas estão sendo feitas com paredes íngremes, com taludes inadequados resultando em acidentes e trabalhadores feridos. Outro problema é a condição insalubre de trabalho a que se submetem os garimpeiros.

2.3 - Qualidade da água na mineração

2.3.1 - Panorama geral da qualidade da água

A água é dos mais importantes recursos naturais, pois desde os tempos mais remotos foi e continua sendo essencial para existência da vida no nosso planeta. Como coloca Silva (1998), os cursos d'água, a despeito de sua história geológica ser muito anterior à presença humana na terra, sofreram alterações e novas conformações produzidas pelas sociedades históricas. Desta forma, o destino dos cursos d'água sempre esteve condicionado ao fluxo do próprio processo civilizatório, com as cidades se desenvolvendo ao longo dos rios.

Com o crescimento da população e o aumento da produção de bens econômicos, os usos da água foram se diversificando. Além de sua importância biológica, a água ainda exerce papel fundamental em quase todas as atividades humanas podendo ser utilizada como: fonte de energia, meio de transporte, matéria-prima ou parte do processo produtivo industrial, opção de lazer e transporte de despejos e resíduos em geral.

Além de exigir uma demanda cada vez maior deste recurso, cada um destes usos requer diferentes características qualitativas, ou seja, exigem um grau maior ou menor de pureza da água, o que muitas vezes acaba gerando conflitos entre os usuários. Mas, se por um lado houve este aumento e esta diversificação dos usos, por outro a quantidade de água disponível no planeta é a mesma. Porém, muitas vezes com uma qualidade bem inferior à desejada, pois a capacidade de autodepuração dos mananciais não consegue acompanhar esse incremento das atividades produtivas.

Conforme Benetti e Bidone (2001), para avaliação da qualidade da água foram estabelecidos padrões de qualidade, isto é, a máxima concentração de elementos ou compostos que poderiam estar presentes na água, sem prejudicar sua utilização para um determinado fim. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA classifica as águas segundo seus usos predominantes, e para cada classe estabelece os requisitos de qualidade que o manancial deve obedecer.

Caso a qualidade da água não apresente as condições especificadas, medidas de controle de poluição devem ser adotadas.

Como define von Sperling (1996), poluição das águas é a adição de qualquer substância ou forma de energia que, direta ou indiretamente, alterem a natureza do corpo d'água vindo a prejudicar os legítimos usos que dele são feitos. Há duas formas básicas em que a fonte de poluentes pode atingir um corpo d'água, uma delas é a poluição pontual e a outra poluição difusa.

Na poluição pontual, os poluentes acabam atingindo o corpo d'água de maneira concentrada no espaço. Um exemplo é o da descarga em um rio de um emissário transportando os esgotos de uma comunidade.

Já no que se refere à poluição difusa ou não-pontual, os poluentes aderem-se aos corpos d'água distribuídos ao longo de parte de sua extensão. A origem das cargas difusas não é identificada facilmente. Essas cargas são geradas em áreas extensas e, associadas à chuva, chegam aos corpos d'água de forma intermitente.

As cargas difusas apresentam as seguintes características: o lançamento da carga poluidora está relacionado à precipitação; os poluentes são transportados a partir de extensas áreas; a fonte exata de poluição é difícil ou impossível de ser identificada; o controle da poluição deve incluir ações sobre a área geradora da poluição, ao invés de incluir apenas o controle do efluente; é difícil o estabelecimento de padrões de qualidade para o lançamento do efluente (NOVOTNY, 1991, *apud* PORTO, 1995)

Segundo USEPA (1987), as cargas difusas podem ter diversas fontes. Entre elas estão: o escoamento superficial de áreas agrícolas, a drenagem urbana e o escoamento e percolação de minas abandonadas (águas superficiais e subterrâneas).

Inserido neste contexto, Pegram & Bath (1995), dizem que as minas abandonadas e em operação podem ser consideradas como "fontes de poluição concentradas", por apresentarem características tanto de fontes pontuais, como de fontes difusas. As descargas das minas podem ser representadas por pontos dentro da bacia, mas, geralmente, ocorrem durante eventos meteorológicos, assim como as fontes de poluição difusa. A extensão das áreas de mineração e a sua correlação com fatores meteorológicos é que caracterizam o escoamento de minas como fonte de poluição difusa.

No enfoque da poluição difusa proveniente de áreas rurais Novotny (1999), comenta que a degradação da qualidade da água superficial e subterrânea está relacionada aos processos de conversão do uso do solo, aumento da erosão e perda de solo, poluição química devido ao uso de fertilizantes e pesticidas e as operações de trato animal.

2.3.1.1 Avaliação das cargas poluidoras

Em diversos países, vários estudos já apontam cargas difusas como o principal motivo pelo qual muitos de seus rios e lagos encontram-se poluídos (WU *et al.* 1998).

No Brasil, a temática das fontes difusas ainda é pouco estudada. Embora seja evidente a importância de maiores estudos relacionados a estas cargas, a Política Nacional de Recursos Hídricos e as resoluções do CONAMA ainda não contemplam a problemática da geração das cargas difusas (SILVA, 2003 *apud* GRASSI, PRESTES & QUINÁIA, 2005)

Como coloca Porto (1995), a poluição por cargas difusas tem origem no ciclo hidrológico e é um fenômeno aleatório, assim como o evento responsável pela sua ocorrência.

Para Tucci (2005), as condições qualitativas da água em um corpo d'água englobam dois fatores fundamentais: condições hidrológicas e qualidade da água. As condições hidrológicas são representadas pela quantidade de água existente em um corpo d'água. Já a qualidade da água é função da concentração de um parâmetro de qualidade associado com a vazão, que é a carga existente no sistema. A concentração, isoladamente, não tem representatividade temporal e espacial, já que a mesma apresenta variações com a alteração de vazão.

Assim como as vazões, as concentrações de poluentes geradas no escoamento variam ao longo do evento hidrológico. É de se esperar que tais valores formem um polutograma, com a mesma forma genérica do hidrograma correspondente (PORTO, 1995).

Segundo Bertrand-Krajewski, Chebbo & Saget (1998), a variabilidade da taxa de massa poluente transportada durante eventos de precipitação na rede de drenagem, pode ser descrita por duas curvas: hidrograma $Q(t)$ e polutograma $C(t)$

para cada poluente considerado, onde, Q representa a vazão (m^3/s); e C a concentração (mg/L). O polutograma é um gráfico temporal das variações de parâmetros de qualidade, durante o acréscimo e decréscimo de vazões (IDE, 1984). É difícil calcular ou prever a distribuição temporal das concentrações de poluentes, isto é, o polutograma. (PORTO, 1995).

Em uma bacia hidrográfica, estas curvas podem variar de evento para evento, dependendo dos seguintes parâmetros: intensidade de precipitação, período de tempo seco antecedente ao evento e o total precipitado, acúmulo de massa poluente sobre a bacia, características da bacia, entre outros.

Um dos fenômenos discutidos quando se trata de prever polutogramas, como salienta Porto (1995) é a ocorrência da chamada carga de primeira lavagem (em inglês, "*first flush*"). A explicação mais comum é a de que se trata da remoção inicial do material acumulado no período entre chuvas, significando que o pico do polutograma ocorreria antes do pico das vazões.

Existem alguns estudos sobre a avaliação das cargas difusas e a ocorrência do fenômeno da carga de lavagem, especialmente em bacias urbanas (IDE, 1984; DE LUCA *et al.*, 1991; GUPTA & SAUL, 1996; DELETIC, 1998; BERTRAND-KRAJEWSKI, CHEBBO & SAGET, 1998; LEE & BANG, 2000, LEE *et al.*, 2002; PAZ, 2004; BRITES, 2005).

No entanto, como salienta Porto (1995), a carga de lavagem não é um fenômeno consistente e é observado com mais frequência em bacias pequenas do que em bacias maiores. Em grandes bacias, as concentrações de poluentes não decrescem rapidamente à medida que o volume de escoamento aumenta, porque áreas distantes podem estar produzindo altos valores de concentração nas suas descargas iniciais, que se misturam com os valores já decrescentes dos locais próximos à seção de medição.

Uma das maneiras de identificar o fenômeno da primeira lavagem é através do uso das curvas acumulativas adimensionais $M(V)$. As curvas $M(V)$ indicam a distribuição da massa poluente pelo volume e possibilitam comparar as variações da massa poluente de diferentes eventos e/ou bacias. Esta representação consiste em plotar a curva que mostra a variação da massa poluente acumulada dividida pela massa poluente total em relação ao volume acumulado dividido pelo volume total (BERTRAND-KRAJEWSKI, CHEBBO & SAGET, 1998).

Através de análises gráficas das curvas $M(V)$, observa-se a posição destas em relação ao bissetor, indicando a distribuição dos poluentes durante todo o evento. Se a curva apresenta declividade de 45° assume-se que os poluentes são distribuídos uniformemente durante o evento, a forma do polutograma será semelhante à do hidrograma, no tempo. Quando esta permanecer acima do bissetor, curva $> 45^\circ$, a ocorrência da carga de lavagem fica evidenciada. Reciprocamente, a carga de lavagem não ocorre quando a curva permanecer abaixo do bissetor, curva $< 45^\circ$.

A figura 4.3 mostra diferentes curvas acumulativas adimensionais que caracterizam padrões de primeira lavagem para materiais particulados e dissolvidos. De acordo com Lee & Bang (2002), o fenômeno de primeira lavagem ocorre fortemente em pequenas bacias hidrográficas e durante precipitações de alta intensidade. Além disso, os pesquisadores constataram que existe uma diferença nas tendências de resposta das curvas de materiais particulados e dissolvidos. No entanto, Lee & Bang (2002) afirmam que mais estudos são necessários para a generalização do fenômeno.

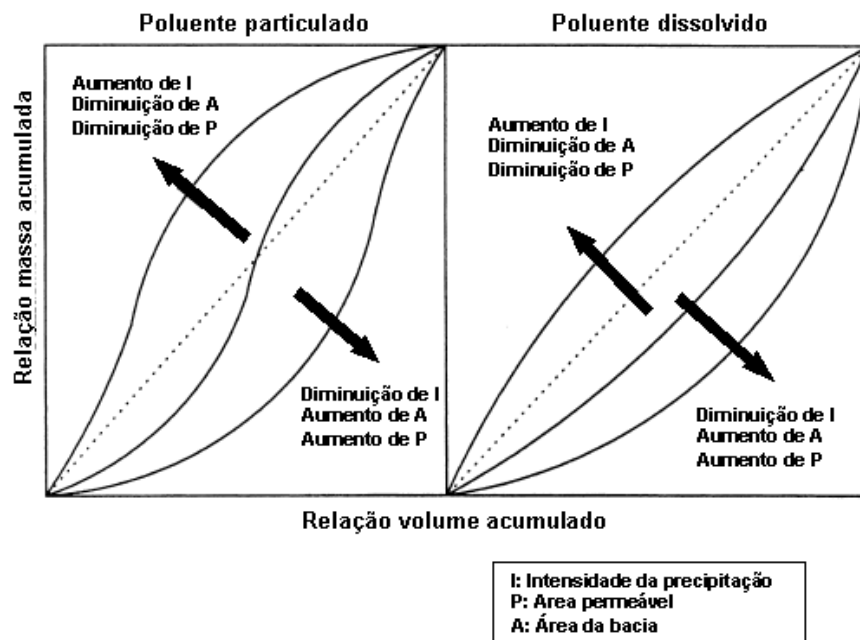


Figura 2.1 – Padrões de primeira lavagem para materiais particulados e dissolvidos.
Fonte: Adaptado de Lee & Bang (2002).

Para uma avaliação global do impacto das cargas difusas calcula-se o fator Concentração Média no Evento (CME), o qual tem sido usado para indicar a carga poluidora total que será lançada no corpo receptor. A carga total do poluente produzida durante um evento pode ser obtida através da coleta de diversas amostras ao longo do tempo de duração do escoamento, juntamente com o levantamento do hidrograma, (PORTO, 1995).

De acordo com Lee *et al.* (2000) o uso do parâmetro Concentração Média do Evento (CME) é apropriado para avaliar os efeitos do escoamento superficial nos corpos d'água receptores, uma vez que estes respondem lentamente as vazões pluviais, quando comparados com a taxa nas quais as concentrações dos constituintes modificam-se durante um evento de precipitação. Portanto, a Concentração Média do Evento torna-se um importante parâmetro a ser analisado.

O estabelecimento da Concentração Média do Evento, como parâmetro indicador do potencial poluidor de cada evento de precipitação, traz algumas vantagens (NOVOTNY, 1992, *apud* PORTO, 1995): para um mesmo local, as CME's exibem distribuição log-normal; podem ser associadas probabilidades e frequência de ocorrência; é um parâmetro conciso, representando um conjunto de dados muito variável; a comparação entre diferentes eventos e diferentes locais é mais fácil de ser feita.

É necessário enfatizar a necessidade da coleta local de dados, para que seja possível o diagnóstico correto dos problemas de poluição causados por cargas difusas e, também, para que as decisões sobre medidas de controle tenham suporte em levantamentos e análises coerentes com a realidade local.

2.3.2 - Água na atividade mineradora

“O recurso hídrico é um insumo essencial ao desenvolvimento de atividades mineradoras, seja através do uso direto, para lavagem do produto minerado ou de forma indireta, como componente de barragem de rejeitos.” (VON SPERLING, 1998, p.103).

No entanto, como já citado, a mineração pode ser uma fonte de contaminação dos recursos hídricos da área de extração e entorno. As atividades de mineração e de garimpo exigem grandes remanejamentos de rochas e movimentações de terra,

por isso os parâmetros de qualidade da água mais alterados por essa atividade são os sólidos e a turbidez. Quando há a formação de lagos nas cavas de mineração ainda pode ocorrer o fenômeno da eutrofização.

E, ainda em alguns casos, pode haver a dissolução de compostos químicos (da rocha ou do solo), nos efluentes ou na drenagem alterando outros parâmetros da água, como acidez ou alguns metais pesados. Um dos mais graves impactos ambientais associados à atividade de mineração é a drenagem ácida de minas (DAM). Trata-se da solução aquosa ácida gerada quando minerais sulfetados presentes em resíduos de mineração (rejeito ou estéril) são oxidados em presença de água. Esta solução age como agente lixiviante dos minerais presentes no resíduo produzindo um percolado rico em metais dissolvidos e ácido sulfúrico. Caso o percolado alcance corpos hídricos próximos pode contaminá-los, tornando-os impróprios para o uso por um longo tempo, mesmo após cessadas as atividades de mineração.

A Agência de Proteção Ambiental Americana – USEPA, apresenta vários estudos sobre a drenagem ácida de minas e suas implicações ambientais. Existem muitas minas de minérios abandonadas, principalmente no oeste americano, causando problemas de qualidade da água. Essas minas causam a poluição difusa dos corpos d'água através da drenagem ácida, sedimentos e metais, degradando os cursos d'água para fins de usos benéficos (USEPA, 2005).

A ocorrência de DAM tem sido relatada na extração de ouro, carvão, cobre, zinco ou urânio, entre outros, bem como na disposição inadequada dos resíduos destas operações. Evitar que as superfícies de rejeitos e/ou estéreis que contém minerais sulfetados fiquem expostas a condições oxidantes em presença de água é fundamental para a prevenção e minimização da DAM.

Fonseca (2004), sugere que a maior parte das minerações no Brasil provoca poluição por sedimentos. A poluição por compostos químicos solúveis, também existe e pode ser localmente grave, mas é mais restrita. As minerações de ferro, calcário, granito, areia, argila, bauxita, manganês, cassiterita, diamante e várias outras provocam, em geral, poluição das águas apenas por sedimentos. Além da poluição por sólidos, muitas minerações provocam poluição de natureza química, por efluentes que se dissolvem na água usada no tratamento do minério ou na água que passa pela área de mineração. Estes contaminantes solúveis podem ser reagentes usados no tratamento do minério ou podem ser originados pela própria

rocha minerada. A contaminação química da água mais comum, provocada pela própria rocha minerada, é a contaminação por ácido sulfúrico originado da oxidação de sulfetos de rocha (pirita). Pode haver contaminação, também, por metais pesados originados da rocha. As bacias de rejeito e as pilhas de estéril de minas de metais não-ferrosos e de ouro, também podem provocar contaminação da água.

Von Sperling (1996), complementa ao afirmar que a passagem da água por minas abandonadas, vazadouros de mineração e das borras de minérios pode alterar a acidez da água. E, ainda, que as atividades mineradoras e de garimpo podem originar a poluição por micropoluentes inorgânicos, que muitas vezes são tóxicos. Entre estes, têm especial destaque os metais pesados. Vários destes metais se concentram na cadeia alimentar, resultando num grande perigo para os organismos situados nos degraus superiores.

Inserido neste contexto, Mota (2000), salienta que a mineração e o garimpo são fontes de poluição dos recursos hídricos, modificando principalmente os seguintes parâmetros: sólidos e compostos tóxicos. Os sólidos são alterados através da erosão do solo, que pode trazer como conseqüências: o assoreamento dos rios; o aterramento gradual dos mananciais e o soterramento de animais e ovos de peixes; o aumento da turbidez da água, ocasionando a diminuição da penetração da luz solar, reduzindo a atividade fotossintética das algas e, em conseqüência, sua produção de oxigênio; impactos sobre a vida aquática.

Alguns componentes inorgânicos, entre eles os metais pesados, são tóxicos ao homem e, se incorporados à água, podem trazer como conseqüência danos à saúde humana e aos animais aquáticos.

Segundo Lamego Simões F^o *et al.* (2003), nas atividades de mineração as fontes de poluição para o meio ambiente, com repercussão no sistema hidrológico da região, são as liberações de efluentes líquidos para os cursos superficiais e sistemas subterrâneos. Além dos efluentes relacionados com a parte industrial, devem ser consideradas também as drenagens. Outro aspecto a ser mencionado é que o próprio desenvolvimento da lavra (que dá origem a cava da mina ou as galerias subterrâneas) tem o potencial de alterar o padrão hidrogeológico local e causar alteração de composição nestas águas, que deverão ser drenadas (e eventualmente tratadas) antes de serem liberadas para o meio ambiente.

Von Sperling (1998), coloca que as cavas de mineração são formadas durante o exercício da atividade extrativa, permanecendo como um componente

artificial do relevo, após o término daquela atividade. As características morfométricas da cava dependem do processo minerário adotado. Em geral, resultam em fortes depressões no terreno, as quais vão sendo naturalmente preenchidas com água subterrânea, superficial ou com água da chuva.

No enchimento com água subterrânea, deve ser dedicada atenção especial aos aspectos geotécnicos, particularmente à estabilidade dos taludes. Com relação à qualidade da água subterrânea, esta é em geral livre de nutrientes que possam causar problemas de eutrofização no reservatório formado. Um outro aspecto referente à qualidade das águas subterrâneas é o seu pH, que em alguns casos é muito reduzido, podendo conferir à água uma cor ocre ou avermelhada, limitando bastante o seu uso (VON SPERLING, 1998).

O processo mais rápido para a formação do lago, de acordo com von Sperling (1998), é através do enchimento da cava com água superficial proveniente de rios situados nas proximidades. Esse processo é menos suscetível a problemas com estabilidade de taludes. No entanto, o aspecto de uma possível eutrofização deve ser destacado, devido à probabilidade da ocorrência de nutrientes em águas superficiais.

O enchimento com água da chuva apresenta uma evolução que depende do balanço hidrológico local. Em regiões tropicais pode ocorrer a formação de reservatórios com altos índices de salinidade e, portanto, impróprios para o adequado desenvolvimento da vida aquática. Além disso, as precipitações pluviométricas podem também conter poluentes orgânicos e minerais. Um outro aspecto refere-se à acidificação da água em decorrência de chuvas com baixos valores de pH (VON SPERLING, 1998).

No que tange aos impactos gerados pela mineração de pedras preciosas, esse assunto ainda não foi muito explorado. Segundo o relatório da USEPA (1998), a maior parte dos resíduos gerados na extração de pedras preciosas é inerte, ou seja, fragmentos de minerais não aproveitados e sedimentos resultantes da grande movimentação de terra, principalmente em minas subterrâneas. Ainda podem ser gerados resíduos perigosos, devido à utilização de substâncias químicas no beneficiamento das pedras; para tingimento e polimento das gemas. Outros resíduos perigosos gerados podem ser solventes, substâncias de limpeza, pneus, óleos e lubrificantes de caminhões e do maquinário pesado. Pode haver ainda a poluição orgânica, devido ao esgoto sanitário gerado pelos trabalhadores das minas.

De acordo com Hancock *et al.* (2006), a preservação ambiental da região de minas abandonadas é muito importante, especialmente onde o escoamento superficial e a erosão podem carrear os rejeitos das minas e contaminar o seu entorno e os cursos d'água. É necessário o desenvolvimento de metodologias para avaliação do impacto ambiental e da dinâmica da alteração do relevo das minas, principalmente onde dados de campo são ausentes ou escassos.

2.3.3 - Medidas de controle da poluição

O escoamento de minas em atividade e de minas abandonadas pode ser considerado como fonte de poluição difusa. Conforme USEPA (1987), o controle de cargas difusas deve ser feito através de um conjunto de medidas que podem ajudar a diminuir ou evitar que os poluentes cheguem aos rios.

O primeiro procedimento a ser adotado é o planejamento da extração e controle de todo o processo para a redução do volume de resíduos gerados. Essas medidas reduziram o volume de efluente a ser tratado e dessa maneira diminuiriam o custo da recuperação das áreas degradadas.

A melhor alternativa de tratamento dependerá de fatores técnicos (volume de efluentes, tipo e concentração dos contaminantes presentes, etc.) e econômicos. Se os efluentes da mineração forem muito ácidos ou apresentarem metais pesados, o tratamento requererá alguns cuidados especiais. Existem alguns estudos sobre as melhores técnicas de remediação da DAM (CORSEUIL, 1984; CYBIS, 1987; DE LUCA, 1991; EVANGELOU, VANDIVIERI & CHAPPEL, 1998; PINTO & NEPOMUCENO, 1998; AKCIL & KOLDAS, 2005; WHITEHEAD, COSBY & PRIOR, 2005; JOHNSON & HALLBERG, 2005; KALIN, FYSON & WHEELER, 2006; SHEORAN & SHEORAN, 2005; GAZEA, ADAM & KONTOPOULOS, 2006).

Segundo USEPA (2005), os métodos de tratamento de efluentes que eliminam ou reduzem acidez e precipitação de metais pesados de águas impactadas podem ser divididos em dois tipos: ativo e passivo. O tratamento ativo envolve a neutralização de águas ácidas pela adição de substâncias alcalinas. As desvantagens desta tecnologia são: a produção de grandes quantidades de lodo que devem ser dispostas de maneira adequada envolvendo altos custos; a necessidade de uma grande dose de material alcalino para neutralizar o pH. O método passivo

envolve a construção de um sistema de tratamento que utiliza reações biológicas e químicas que ocorrem naturalmente na drenagem ácida de minas (DAM). Este tratamento requer pouca manutenção. Medidas de controle passivas incluem drenagem anóxica, canais revestidos com pedra calcária, recarga alcalina de aquíferos e desvio de drenagem através de banhados artificiais ou outras estruturas de sedimentação.

No caso da extração de pedras preciosas a maior parte dos poluentes gerados é constituída de resíduos inertes, como fragmentos de gemas refugados, solos e rochas removidos pela mineração. O tratamento mais usado para esse tipo de resíduos é a execução de barragens de contenção de rejeitos na saída das minas.

Como coloca Fonseca (2004), o controle no caso de sólidos é tecnicamente simples, mas pode requerer investimentos consideráveis. Pode ser feito através de barragens para contenção e sedimentação. As barragens são muitas vezes os investimentos mais pesados em controle ambiental realizado pelas empresas de mineração. Por outro lado, como estas barragens servem também para recirculação de água, podem não ser considerados investimentos exclusivos de controle ambiental.

Nos locais onde existem rochas capazes de contaminar a água, alguma contaminação pode já existir antes da abertura de uma mina. É recomendável, portanto, quando possível, analisar as águas antes de abertura da mina, para estabelecer o limite natural das características da água no local.

Conforme von Sperling (1998), as barragens de rejeitos apresentam muitas vezes aspectos esteticamente agradáveis. Na verdade, predomina nestas barragens o fenômeno físico de sedimentação de material particulado indo, portanto, ao encontro do objetivo principal, que é a remoção ou contenção de rejeitos das atividades de mineração. A precipitação de partículas de distintos tamanhos contribui para uma varredura vertical da coluna d'água. Se o processo de lançamento de rejeitos não for contínuo, a massa líquida pode até mesmo adquirir uma coloração azulada, já que o comprimento de onda da cor azul é o que apresenta menor coeficiente de extinção em águas limpas, penetrando a maiores profundidades. Nestes casos, pode ocorrer ainda o estabelecimento de distintas comunidades aquáticas, com cadeias sedimentares consolidadas.

Para Bezerra (2005) uma estrutura de retenção de água para sedimentação dos rejeitos requer manutenção contínua e representa uma responsabilidade a longo prazo. Von Sperling, 1998 sugere que as empresas mineradoras implantem programas de monitoramento da qualidade da água em barragens de rejeitos não apenas para atender a deliberações normativas de órgãos de controle da poluição, mas também subsidiar a correta operação hidrológica dessas barragens, incluindo sua região de entorno, o que contribui significativamente para enriquecer o componente visual das empresas mineradoras

Bezerra (2005) ressalta a importância do planejamento e das pesquisas para recuperação de áreas de contenção de sedimentos (barragens ou lagos). Após definir os objetivos da recuperação, o primeiro problema técnico relativo à recuperação de resíduos é o desaguamento, principalmente com a fração fina (silte ou limo) dos sedimentos. Uma maneira de evitar estes problemas é projetar um sistema de recuperação que retenha permanentemente os sedimentos sob a lâmina de água. A entrada de água pluvial e subterrânea no lago de retenção representa o maior risco de falha para esta estrutura, estas águas devem ser desviadas e não direcionadas para dentro da represa. Enquanto tais sistemas podem ser aceitáveis durante a operação do represamento, sua utilidade em uma situação de desativação é questionada. Uma maneira de evitar o problema, potencialmente sério, destas águas é de construir represamentos em áreas à montante. Locais à montante, sem ameaças de águas pluvial e subterrânea, e, preferivelmente, locais de lavra à montante poderiam ser usados para receber os depósitos de estéril sempre que possível. Infelizmente, locais em áreas topograficamente mais altas nem sempre estão disponíveis para deposição.

A recuperação deve também visar ao problema da estabilidade da barragem. Durante o uso ativo da represa, a manutenção da barragem é uma operação de rotina. A situação não será a mesma após a mina ser exaurida, e as represas de contenção devem ser construídas para que apenas um mínimo de manutenção seja necessário. Processos que transportam os finos fora do represamento devem ser avaliados e controlados na medida do possível. Isto é especialmente importante quando elementos potencialmente tóxicos estão nos resíduos e sujeitos a transporte. O essencial no controle do transporte de resíduos é o conhecimento das características físicas e químicas dos resíduos e de como elas podem afetar os sistemas biológicos. Esta informação é então usada para desenvolver meios

simples, de manutenção a custos baixos, para o controle do transporte de resíduos e da poluição resultante. (BEZERRA, 2005).

2.3.4 - Casos estudados

Alguns trabalhos foram feitos para avaliar a qualidade da água sob impacto de atividades de mineração e garimpo, no entanto, a literatura existente refere-se principalmente à drenagem e aos efluentes em termos de metais pesados ou elementos radioativos, em minas de carvão, ferro, cobre, zinco, urânio, ouro e prata.

O IBGE (1997), realizou o Diagnóstico Ambiental da Bacia do Rio Jequitinhonha. Essa bacia abrange grande parte do Estado de Minas Gerais e pequeno setor da Bahia e possui uma área total de 70.315 km². Foi salientado que atividades humanas de desmatamento para fins agropastoris, de mineração e de garimpagem no alto curso do Rio Jequitinhonha e alguns dos afluentes têm causado, no decurso dos anos, modificações importantes no ciclo hidrológico. A mineração é feita através da cata manual de pedras preciosas e da mineração a céu aberto, com desmonte hidráulico de cascalheiras e desmonte mecanizado através das imensas dragas. Esta atividade configura-se como a mais impactante das atividades, causando danos irreversíveis aos ecossistemas, com reflexos negativos nas atividades de navegação, piscicultura e na própria vida do rio principal. Os problemas de erosão que ocasionam no alto curso do Jequitinhonha são conhecidos e tem reflexos em todo o vale. O assoreamento é particularmente grave na área da foz.

De acordo com ANA/GEF/PNUMA/OEA (2004), a Bacia do Rio São Francisco apresenta várias fontes de poluição e entre estas se destacam os esgotos domésticos, as atividades agropecuárias e a mineração. Foi constatado que os parâmetros de qualidade mais alterados pela mineração são: sólidos em suspensão, metais (arsênio, cádmio, chumbo, cobre, ferro, manganês, mercúrio, níquel, zinco) e sulfetos. De acordo com a avaliação da condição atual dos corpos de água desta bacia sugeriu-se que a Demanda Bioquímica de Oxigênio (devido aos esgotos domésticos e agricultura) e turbidez (indicativo da erosão do solo e das atividades de mineração) sejam adotados como parâmetros prioritários.

Pompêo, *et al.* (2004), verificaram os efeitos da mineração de carvão na qualidade da água dos corpos de água na microbacia do Rio Fiorita (Município de Siderópolis, SC). Como resultado da intensa mineração, a área da bacia hidrográfica apresentou inúmeros locais com rejeitos estéreis de mineração e lagos ácidos. Foram coletadas amostras de água em cinco lagos e em quatro pontos ao longo dos rios da microbacia. Nos lagos, as amostras de água foram tomadas em uma única estação a três diferentes profundidades e nos rios foram coletadas amostras da água superficial. Foram verificadas as seguintes amplitudes de variação para algumas das variáveis estudadas: temperatura de 21,0 a 31,0°C; pH de 3,0 a 7,0; oxigênio dissolvido de 6,7 a 10,0 mg/L; condutividade elétrica de 54,7 a 1205,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$; acidez de 3,0 a 246,0 mg/L CaCO_3 ; alcalinidade de 7,0 a 30,0 mg/L CaCO_3 ; nitrogênio total de 0,12 a 1,03 mg/L; alumínio de abaixo do limite de detecção do método a 22,4 mg/L; ferro II de abaixo do limite de detecção do método a 3,23 mg/L; ferro total de 0,05 a 3,72 mg/L; magnésio de 1,27 a 26,0 mg/L; manganês de abaixo do limite de detecção do método a 9,0 mg/L; cálcio de 4,0 a 93,7 mg/L; sulfato de 5,0 a 540 mg/L; sulfetos abaixo do limite de detecção do método; sólidos totais de 16,0 a 981,0 mg/L. Os resultados mostraram que a microbacia apresentou redução da qualidade da água em direção à parte baixa da bacia, com diminuição do pH e elevação nos valores de acidez total, condutividade elétrica; e nos teores de sólidos totais, sulfato, alumínio, cálcio, ferro II e total, magnésio e manganês. Esses dados sugeriram o efeito da concentração de metais. Pompêo, *et al.* (2004) compararam os resultados com os limites da Resolução Conama 20 de 1986, concluindo que as águas da microbacia do Rio Fiorita apresentaram-se com elevado grau de comprometimento de sua qualidade e de uso restrito. Também foram apresentadas considerações visando contribuir com subsídios à recuperação ambiental da área em questão.

Von Sperling, *et al.* (2004), apresentaram os resultados do monitoramento de qualidade da água durante a formação do Lago de Águas Claras – MG, decorrente do enchimento da cava exaurida de uma mineração de ferro, onde foi constatado o predomínio de uma água de boa qualidade. Tratando-se de um ambiente bem oxigenado, os teores de oxigênio dissolvido variaram de 11,1 mg/L a 4,3 mg/L e com baixos teores de cor e turbidez, esta última variando de 1,1 UNT a 55 UNT. Os valores de pH oscilaram de 6,9 a 9,2, caracterizando a ocorrência de águas alcalinas. Para condutividade elétrica, os teores obtidos variaram de 68 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 113

$\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando a presença de sais dissolvidos na água, de origem geoquímica. As águas na cava se mostraram livres de contaminação mineral e orgânica. As concentrações de DBO_5 variaram de $<0,1$ mg/L a 4,3 mg/L. As concentrações de fosfato total situaram-se na faixa de $<0,010$ mg/L a 0,177 mg/L. O nitrogênio amoniacal apresentou concentrações variando de $<0,05$ mg/L a 0,40 mg/L, com relação ao nitrogênio nítrico as concentrações situaram-se na faixa de $<0,01$ mg/L a 1,3 mg/L. Os resultados obtidos apontaram para uma virtual ausência de contaminação fecal, onde quase todos os valores foram inferiores a 2 NMP/100mL. O Lago Águas Claras não apresentou contaminação por metais pesados e outros agentes tóxicos. Os teores de ferro total situaram-se na faixa de $<0,05$ mg/L a 1,73 mg/L e as concentrações de manganês oscilaram entre $<0,05$ mg/L e 0,17 mg/L. No aspecto hidrobiológico destacou-se a freqüente alternância no predomínio de grupos algais, indicando a instabilidade de ecossistemas que se encontram em processo de formação.

Neala *et al.* (2005), apresentaram os resultados do monitoramento da qualidade das águas do Rio Carnon, Cornwall Ocidental, na Grã-Bretanha, com o impacto das descargas de uma mina abandonada. Em janeiro de 1992, houve a descarga no Rio Carnon de milhões de litros de água altamente poluída da mina abandonada de estanho de Wheal Jane, que também extraía minérios de Ag, Cu e Zn. Mais tarde, ainda no ano de 1992, o Centre for Ecology and Hydrology realizou, durante 18 meses, o monitoramento diário do Rio Carnon, para avaliar a natureza e a dinâmica das descargas de poluição. Este estudo foi realizado para avaliar os níveis de poluição das primeiras descargas, mas principalmente para servir como base para o planejamento das medidas de remediação necessárias.

Dois grupos de parâmetros de qualidade da água foram observados. O primeiro grupo de parâmetros foi: B, Cs, Ca, Li, K, Na, SO_4 , Rb e Sr. Suas concentrações foram correlacionadas positivamente uma com a outra ($R^2 > 0,7$ e até 0,99), e inversamente correlacionados com a vazão (R^2 na faixa de 0,26 a 0,62). Este grupo de parâmetro de qualidade da água mostrou variações na concentração ligadas aos processos hidrogeoquímicos normais dentro da bacia, que se confundem com os limites das drenagens da mina. O segundo grupo compreendeu os parâmetros Al, Be, Cd, Co, Cu, Fe, La, Pb, Pr, Nd, Ni, Si, U, Y e Zn, as concentrações para todo este grupo foram correlacionados positivamente um com o outro ($R^2 > 0,7$ e até 0,97). Todos os parâmetros neste segundo grupo tiveram as

concentrações correlacionadas negativamente com o pH ($R^2 > 0,5$ e até 0,76). Este grupo estava ligado diretamente com a descarga de poluição da mina. Posteriormente (2000-2002), foi realizado um estudo com amostras mensais das drenagens da mina, onde foram adicionados reagentes neutralizadores das concentrações dos poluentes da drenagem da mina, e comparados com os valores após a adição de compostos neutralizadores. Segundo Neala *et al.* (2005), a qualidade da água das drenagens da mina melhorou, se comparada com a descarga inicial de poluição (1992), mas a dinâmica das variações de concentrações na drenagem química da mina e os impactos no Rio Carnon necessitam de um tempo de amostragem maior. Além disso, existe a dificuldade em determinar os efeitos das variações de vazão na concentração dos poluentes baseados em dados diários.

Em 1994, foi construído um sistema de tratamento passivo, em escala piloto, na mina de Wheal Jane (WHITEHEAD & PRIOR, 2005), que representa o maior experimento europeu deste tipo. O sistema ofereceu uma oportunidade rara para o estudo dos mecanismos biológicos, geoquímicos e físicos que ocorrem nos sistemas passivos de tratamento. O projeto gerou dados, conhecimento, modelos e critérios de dimensionamento para os projetos futuros, permitindo a gerência sustentável de sistemas passivos de tratamento. Os resultados de análises (1994–1997) indicaram redução média do Fe entre 55-92%, remoção de sulfato entre 3–38% e remoção de metais-traço (cádmio, cobre e zinco), abaixo dos limites de detecção (WHITEHEAD; COSBY & PRIOR, 2005).

Ravengai *et al.* (2005), realizaram um estudo para avaliar o impacto potencial de quatro minas de ouro abandonadas na qualidade de água do Rio Mupfure e de seus tributários, no Vale Sanyati, Zimbábue. As amostras de água foram coletadas ao longo dos afluentes que drenam a área das minas, nas cavas de mineração, e em dois pontos do Rio Mupfure, a montante e a jusante da área de estudo. Os parâmetros testados incluíram o pH, o ferro, o cobre, o níquel, o chumbo, o zinco, o antimônio e o arsênico. As análises químicas mostraram que a água superficial estava ligeiramente contaminada, no que diz respeito ao Pb, Zn e Ni. Os valores de Pb variaram de 0,08 a 0,42 mg/L, os valores de Zn variaram de 0,252 a 0,636 mg/L e os valores de Ni variaram de 0,014 a 0,579 mg/L. Tal contaminação foi atribuída aos resíduos das minas. Entretanto, o pH próximo ao neutro, com valores entre 6 e 8, e a baixa contaminação mostram que o impacto na qualidade de água das minas é localizado, provavelmente devido ao pequeno volume do escoamento superficial

nos locais de mineração, quando comparados com o escoamento do resto da bacia. A baixa contaminação poderia, também, indicar que a drenagem ácida da mina está agindo em uma taxa lenta ou no fato de que está em seus estágios iniciais.

Hancock *et al.* (2006), desenvolveram uma metodologia para a avaliação do grau de reabilitação de áreas degradadas pela mineração e transporte de sedimentos radioativos, e impactos na qualidade da água, na mina de urânio de Nabarlek, no norte da Austrália. O estudo concluiu que a área contendo o depósito de minério era extremamente estável e estava de acordo com as diretrizes estabelecidas para armazenamento a longo prazo de minérios de urânio. A maioria de outras áreas no local também eram estáveis; contudo em algumas áreas havia uma alto potencial erosivo. A concentração de sedimento em Riacho Cooper, que drena o local, manteve-se dentro dos limites da legislação australiana para qualidade de água. Contudo, as concentrações de sedimento em afluentes foram superiores aos níveis recomendados. As determinações dos radionuclídeos nas amostras de solo mostraram que as atividades radioativas mais elevadas se concentraram em uma pequena área (0,44 ha), com um índice relativamente alto de erosão. Esta área contribuiu com a maior parte do fluxo estimado da série de urânio incorporado nos sedimentos (provenientes da mina), para o Riacho Cooper.