



# Carvão Brasileiro: tecnologia e meio ambiente



## EDITORES

Paulo Sergio Moreira Soares  
Maria Dionísia Costa dos Santos  
Luís Valente Possa

**CETEM**

**Centro de Tecnologia Mineral  
Ministério da Ciência e Tecnologia  
Coordenação de Processos Metalúrgicos e Ambientais  
Serviço de Tecnologias Limpas**

**CARVÃO BRASILEIRO: TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE**

PAULO SERGIO MOREIRA SOARES  
MARIA DIONÍSIA COSTA DOS SANTOS  
MARIO VALENTE POSSA

**Rio de Janeiro  
abril/2008**

**CT 2008-094-00      Comunicação técnica do livro Carvão Brasileiro: tecnologia e meio ambiente, Abril de 2008.**



Carvão Brasileiro: tecnologia e meio ambiente

# Carvão Brasileiro: tecnologia e meio ambiente



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



## EDITORES

Paulo Sergio Moreira Soares  
Maria Dionísia Costa dos Santos  
Mario Valente Possa

[HOME](#)[APRESENTAÇÃO](#)[PREFÁCIO](#)[SUMÁRIO](#)[SEÇÕES](#)[AUTORES](#)

## Apresentação

O livro, *Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente*, editado pelos pesquisadores do CETEM Paulo Sergio Moreira Soares, Maria Dionísia Costa dos Santos e Mario Valente Possa, aborda os diferentes aspectos ambientais da mineração do carvão: lavra, processamento, impactos sobre o meio físico, revegetação, fitorremediação e gestão de áreas impactadas. Reúne, nos seus quatorze capítulos, a experiência de diferentes segmentos profissionais: instituições de pesquisa, universidades, consultores e a indústria do carvão, o que contribui muito para se produzir um documento de elevado conteúdo científico e tecnológico.

Acreditamos que o livro será de grande utilidade para profissionais, estudantes e empresários do setor produtivo e consumidor de carvão e poderá constituir-se em uma referência nacional sobre a tecnologia do carvão e suas implicações ambientais.

Parabenizo os editores, autores dos capítulos e o Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, que assim cumpre a sua missão institucional na difusão do conhecimento tecnológico, em prol do desenvolvimento mineral brasileiro.

Rio de Janeiro, abril de 2008.

ADÃO BENVINDO DA LUZ

*Diretor do CETEM*





HOME

APRESENTAÇÃO

PREFÁCIO

SUMÁRIO

SEÇÕES

AUTORES

## Créditos

### Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente

*Editores* Paulo Sergio Moreira Soares  
Maria Dionísia Costa dos Santos  
Mario Valente Possa

Vera Lucia do E. S. Souza  
*Capa/Projeto Gráfico*

Thatyana R. Freitas  
*Revisão de Texto*

Rosely Pereira Romualdo  
*Editoração Eletrônica*

*Tiragem:* 2000 exemplares

[HOME](#)[APRESENTAÇÃO](#)[PREFÁCIO](#)[SUMÁRIO](#)[SEÇÕES](#)[AUTORES](#)

---

## Ficha catalográfica

---

ISBN Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente/Eds. Paulo Sergio Moreira.  
85-61121-18-1 Soares, Maria Dionísia Costa dos Santos, Mario Valente Possa.  
CDD – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.  
622.7 300p., il.

1. Minas e recursos minerais. 2. Meio ambiente. 3. Carvão. I.  
Soares, Paulo S Moreira. II. Santos, Maria Dionísia Costa dos. III. Possa,  
Mario Valente. IV. Centro de Tecnologia Mineral.

---

[HOME](#)[APRESENTAÇÃO](#)[PREFÁCIO](#)[SUMÁRIO](#)[SEÇÕES](#)[AUTORES](#)

## Prefácio

O início das atividades de exploração de carvão no sul do Brasil data de pouco mais de um século e, em anos recentes, o setor carbonífero nacional tem se transformado no sentido de incorporar novas tecnologias e a gestão ambiental em seus negócios. Ao mesmo tempo, durante este período, pesquisadores e profissionais brasileiros têm acumulado variadas experiências em diversos trabalhos de desenvolvimento de processos, operação de instalações de lavra e beneficiamento, disposição de rejeitos e, mais recentemente, na avaliação do desempenho ambiental da *mineração de carvão*.

Como parte de sua missão institucional, o Centro de Tecnologia Mineral – CETEM tomou a iniciativa de documentar algumas das transformações e experiências mencionadas, relatadas por diferentes profissionais.

A obra consiste de quinze capítulos distribuídos em cinco seções nas quais são discutidos os seguintes temas: tecnologia de lavra e processamento mineral e seus aspectos ambientais; experiências de recuperação ambiental de áreas mineradas em empresas de mineração; impactos decorrentes da mineração sobre o meio físico; revegetação e fitoremediação de áreas mineradas; e estratégias de gestão de áreas impactadas. Nessas seções foi reunida uma coletânea dos mais recentes trabalhos sobre os temas, na expectativa de contribuir para a reflexão do leitor sobre as possibilidades do uso sustentável do carvão brasileiro.

Agradecemos aos autores e colaboradores que se empenharam conosco na elaboração desse trabalho, e ao apoio do Ministério da Ciência e Tecnologia e da FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, por meio do Fundo Setorial Mineral (CT – Mineral).

*Os Editores*

*Rio de Janeiro, abril de 2008*



HOME

APRESENTAÇÃO

PREFÁCIO

SUMÁRIO

SEÇÕES

AUTORES

## Sumário

**Os problemas do carvão em geral e do carvão brasileiro em particular**

Arthur Pinto Chaves .....13

**A lavra de carvão e o meio ambiente em Santa Catarina**

Jair Carlos Koppe; João Felipe Coimbra Leite Costa .....25

**Evolução da gestão ambiental na indústria carbonífera em Santa Catarina: um caso de sucesso**

Carlos Henrique Schneider .....39

**Emprego da tecnologia de Backfilling na gestão de resíduos sólidos da mineração de carvão**

Roberto Heemann; Jose Carlos Franco Costa.....57

**Recuperação de áreas impactadas pela mineração de carvão a céu aberto em Santa Catarina: gestão de rejeitos e revegetação**

James Alexandre Polz .....75

**Recuperação de áreas degradadas**

Mário Dukas da Silva; José Adolpho de Carvalho Júnior; Alexandre Bugin; Fábio A. M. Rodriguez.....93

**O papel da hidrogeologia como instrumento de gestão ambiental na mineração de carvão**

Antônio Sílvio Jornada Krebs; Mario Valente Possa ..... 109

**Controle e mitigação dos impactos da drenagem ácida em operações de mineração**

Mariluce de Oliveira Ubaldo; Vicente Paulo de Souza .....129

**Poliuição atmosférica associada ao uso do carvão no Brasil**

Elba Calesso Teixeira; Eduardo Rodrigo Ramos de Santana.....153







HOME

APRESENTAÇÃO

PREFÁCIO

SUMÁRIO

SEÇÕES

AUTORES

**Recuperação de áreas mineradas com espécies fontes de produtos florestais não-madeiráveis: oportunidades socioeconômicas e ambientais para a região carbonífera, Sul de Santa Catarina, Brasil**  
 Vanilde Citadini-Zanette; Raquel Rejane Bonato Negrelle; Tim Brigham; Tom Hobby; Darcy Mitchell .....183

**Fitorremediação de solos e águas subterrâneas contaminados**  
 Gustavo Henrique de Sousa Araujo .....199

**Análise e avaliação de risco ambiental como instrumentos de gestão em instalações de mineração**  
 Laís Alencar de Aguiar; Gustavo Henrique de Sousa Araujo; Josimar Ribeiro de Almeida; Paulo Sergio Moreira Soares; Mario Valente Possa .....213

**Aplicação das geotecnologias à gestão ambiental da atividade minerária**  
 Luzia Alice Ferreira de Moraes; Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos .....237

**Projeto de recuperação ambiental da bacia carbonífera de Santa Catarina**  
 Cléber José Baldoni Gomes; Jonathan Jurandir Campos; Roberto Romano Neto; Márcio Zanuz .....247

**Meio ambiente urbano, desenvolvimento sustentável e qualidade de vida em áreas degradadas pela mineração de carvão no sul de Santa Catarina: o caso dos bairros de São Sebastião e Paraíso (Criciúma) e Rio Fiorita (Siderópolis)**  
 Geraldo Milioli; Angelita Schütz Santos; Marta Oliveira Miranda .....273



HOME

APRESENTAÇÃO

PREFÁCIO

SUMÁRIO

SEÇÕES

AUTORES

## SEÇÃO 1 - Lavra e Processamento Mineral

### **Os problemas do carvão em geral e do carvão brasileiro em particular**

Arthur Pinto Chaves

### **A lavra de carvão e o meio ambiente em Santa Catarina**

Jair Carlos Koppe; João Felipe Coimbra Leite Costa





HOME

APRESENTAÇÃO

PREFÁCIO

SUMÁRIO

SEÇÕES

AUTORES

## SEÇÃO 2 - Áreas Mineradas

### **Evolução da gestão ambiental na indústria carbonífera em Santa Catarina: um caso de sucesso**

Carlos Henrique Schneider

### **Emprego da tecnologia de Backfilling na gestão de resíduos sólidos da mineração de carvão**

Roberto Heemann; João Felipe Coimbra Leite Costa

### **Recuperação de áreas impactadas pela mineração de carvão a céu aberto em Santa Catarina: Gestão de rejeitos e revegetação**

James Alexandre Polz

### **Recuperação de áreas degradadas**

Mário Dukas da Silva; José Adolpho de Carvalho Júnior; Alexandre Bugin; Fábio A. M. Rodriguez

[HOME](#)[APRESENTAÇÃO](#)[PREFÁCIO](#)[SUMÁRIO](#)[SEÇÕES](#)[AUTORES](#)

## SEÇÃO 3 - Impactos sobre o Meio Físico

### **O papel da hidrogeologia como instrumento de gestão ambiental na mineração de carvão**

Antônio Silvio Jornada Krebs; Mario Valente Possa

### **Controle e mitigação dos impactos da drenagem ácida em operações de mineração**

Mariluce de Oliveira Ubaldo; Vicente Paulo de Souza

### **Poluição atmosférica associada ao uso do carvão no Brasil**

Elba Calessio Teixeira; Eduardo Rodrigo Ramos de Santana

[HOME](#)[APRESENTAÇÃO](#)[PREFÁCIO](#)[SUMÁRIO](#)[SEÇÕES](#)[AUTORES](#)

## SEÇÃO 4 - Revegetação e Fitorremediação

**Recuperação de áreas mineradas com espécies fontes de produtos florestais não-madeiráveis: oportunidades socioeconômicas e ambientais para a região carbonífera, sul de Santa Catarina, Brasil**

Vanilde Citadini-Zanette; Raquel Rejane Bonato Negrelle; Tim Brigham; Tom Hobby; Darcy Mitchell

**Fitorremediação de solos e águas subterrâneas contaminados**

Gustavo Henrique de Sousa Araujo

## SEÇÃO 5 - Gestão de Áreas Impactadas

### **Análise e avaliação de risco ambiental como instrumentos de gestão em instalações de mineração**

Laís Alencar de Aguiar; Gustavo Henrique de Sousa Araujo; Josimar Ribeiro de Almeida; Paulo Sergio Moreira Soares; Mario Valente Possa

### **Aplicação das geotecnologias à gestão ambiental da atividade minerária**

Luzia Alice Ferreira de Moraes; Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos

### **Projeto de recuperação ambiental da bacia carbonífera de Santa Catarina**

Cléber José Baldoni Gomes; Jonathan Jurandir Campos; Roberto Romano Neto; Márcio Zanuz

### **Meio ambiente urbano, desenvolvimento sustentável e qualidade de vida em áreas degradadas pela mineração de carvão no sul de Santa Catarina: o caso dos bairros de São Sebastião e Paraíso (Criciúma) e Rio Fiorita (Siderópolis)**

Geraldo Milioli; Angelita Schütz Santos; Marta Oliveira Miranda

# Os problemas do carvão em geral e do carvão brasileiro em particular

Arthur Pinto Chaves

O carvão mineral não é um mineral no sentido estrito da palavra. Ele não tem composição química definida. Trata-se dum recurso energético e, entre estes, luta com o petróleo e o gás natural pela supremacia.

Historicamente, entretanto, reinou absoluto, até o começo do século passado, quando o petróleo adquiriu a importância que hoje tem.

No Brasil não temos a cultura do uso do carvão que outros países têm. Não temos invernos frios e portanto não temos que aquecer as nossas casas. Desta forma, não estamos familiarizados com este combustível, sem o qual os habitantes de países frios não teriam sobrevivido aos invernos rigorosos.

Isto se reflete no balanço energético brasileiro: energia elétrica gerada por hidrelétricas e biomassas (carvão vegetal, lenha e bagaço de cana) têm uma participação que não se nota em nenhum outro país, enquanto o carvão mineral tem participação minoritária. A tabela 1 mostra os valores do Balanço Energético Nacional de 2005 (acessado via internet, no site do Ministério de Minas e Energia).

Além disto, a extração do carvão (da ordem de 6 milhões de toneladas por ano) está restrita ao extremo sul do país. Exceto uma única mina no Paraná, as demais se concentram no Rio Grande do Sul e no sudeste de Santa Catarina, longe portanto do restante do país. Mesmo os geólogos e engenheiros de minas de outras regiões têm pouca familiaridade com ela.

Tabela 1 - Balanço energético brasileiro

energia	%
petróleo	42,0
gás natural	8,8
carvão vapor	1,2
carvão metalúrgico	0,1
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0,7
total de não renováveis	52,7
hidráulica	14,5
lenha	14,2
bagaço de cana	15,5
outras	3,2
total de renováveis	47,3

Pior ainda, o carvão brasileiro é considerado de qualidade inferior devido aos elevados teores de cinzas e enxofre (carvões de Santa Catarina e do Paraná). Também, a lavra em Santa Catarina foi conduzida de maneira predatória e sem compromisso nenhum com o meio ambiente. Resultou um passivo ambiental enorme e uma área impactada com pequenas perspectivas de recuperação (embora esforços significativos, apesar de localizados, estejam sendo feitos). Por isto, a imagem que o grande público tem desta indústria é muito ruim.

A história da indústria carbonífera brasileira é, portanto, um capítulo melancólico da história do Brasil. Existe tecnologia para melhorar a sua qualidade e produzir carvões lavados de qualidade aceitável, como também sempre existiu tecnologia para lavar e lavar o carvão em termos ambientalmente saudáveis. Mas, desde o seu início, um pequeno número de empresários se manteve graças apenas às benesses do governo federal. O consumo de carvão metalúrgico era obrigatório às usinas siderúrgicas brasileiras e os consumidores de carvão energético eram empresas governamentais. O preço era estabelecido pelo próprio governo, bem como os parâmetros de qualidade do produto; não havia preços para produtos de melhor qualidade. Não havia, pois, estímulo para melhorar a qualidade, apesar de existir tecnologia para isto.

O governo Collor acabou com a obrigatoriedade do consumo de carvão metalúrgico nacional e quase todas as velhas mineradoras fecharam. A produção brasileira diminuiu, deixou de ser produzido carvão metalúrgico e hoje apenas um pequeno grupo de mineradores tenta reestruturar este importante setor.

Em termos mundiais, entretanto, o carvão é uma *commodity* de máxima importância. O mercado internacional é da ordem de 4,7 bilhões de t/ano e está crescendo! Existem países indissolúvelmente ligados à indústria mineral carvoeira, como a Polônia, a China, os Estados Unidos e a Austrália. Na América Latina, a Colômbia. No passado, França, Alemanha, Bélgica e Inglaterra foram importantes produtores. Guerras intermináveis foram travadas pelo controle das minas de carvão da Alsácia e da Lorena. As gerações



do começo do século passado cresceram arrebatadas pela descrição que Emile Zola fez duma greve numa mina de carvão em sua obra prima, *Germinal*.

Nos Estados Unidos existiram escolas de minas dedicadas exclusivamente à formação de engenheiros de minas e metalurgistas (tratamentistas) para carvão. Eles não estavam habilitados para lavar ou beneficiar outra substância mineral. Vale destacar, escolas de muito prestígio, como a PennState, por exemplo.

Em comparação com as outras commodities minerais, o carvão tem diferenças e individualidades muito específicas: é muito leve - densidade aparente em torno de 0,8, pulveriza-se facilmente, gerando grande quantidade de finos, é preto e suja tudo, tem muita umidade intrínseca e, por isto, é muito difícil de manusear, de peneirar, de britar ou de sofrer qualquer outro tratamento a seco.

Como, entretanto, a tonelagem processada é muito grande, uma indústria de fabricação de equipamentos próprios para ele se estabeleceu desde logo e criou-se uma cultura própria, muito madura e muito rica, paralela à dos outros minerais. Estas duas culturas desenvolveram-se em mundos paralelos e raramente se comunicavam. Fabricantes de equipamentos para carvão tinham seu próprio mercado e não se interessavam por outros setores. Mineradores de carvão tinham seus próprios fornecedores de equipamento e não se interessavam pelos fabricantes dedicados ao universo paralelo.

Em termos da engenharia de minas e de tratamento de minérios, isto foi lamentável, pois a cultura carvoeira é uma cultura muito interessante. Somente nas últimas décadas este cenário mudou. Importantes desenvolvimentos da indústria carvoeira foram trazidos para a indústria mineral e vice-versa.

Passaremos em revista algumas características do carvão brasileiro e das diferentes operações unitárias de Tratamento de Minérios conforme são praticadas na indústria carbonífera. Acreditamos estar trazendo uma contribuição para o conhecimento dos colegas de outros setores e uma oportunidade para reflexão sobre a prática da nossa arte.

## **Características do carvão brasileiro**

O carvão brasileiro é produzido apenas nos estados da Região Sul. Rio Grande do Sul é o maior produtor e tem as maiores reservas. A qualidade varia do sul para o norte: o teor de cinzas diminui e o teor de enxofre aumenta. O caráter metalúrgico (capacidade de fornecer coque) não existe no Rio Grande do Sul, exceto no carvão de Morungava, é fraco no Paraná e excelente em Santa Catarina (camada Barro Branco, especialmente).

Os carvões brasileiros, sul-africanos e indianos são diferentes dos carvões do Hemisfério Norte. Eles são chamados de carvões gonduânicos, porque teriam sido formados antes da separação dos três continentes. Eles têm peculiaridades petrográficas que justificam as diferenças de comportamento (Chaves, 1972).

Nos carvões gonduânicos, a proporção de exinita é muito maior do que nos carvões europeus e americanos. Isto implica num altíssimo teor de matérias voláteis, mascarando a classificação pelos critérios de *ranking*. Ou seja, a quantidade de matérias voláteis corresponde a um carvão alto voláteis, mas o seu comportamento à coqueificação é mais próximo dum carvão médio voláteis. A Figura 1 mostra a relação entre matérias voláteis e poder refletor para carvões europeus e gonduânicos.

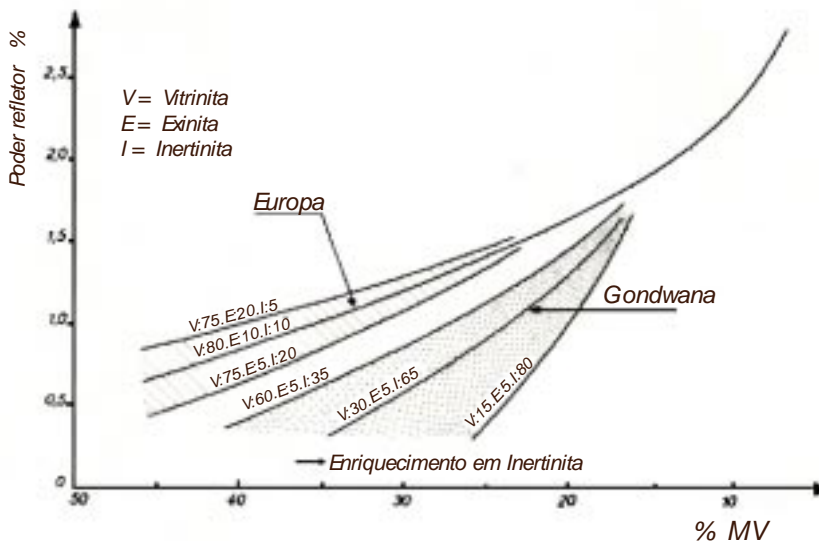


Figura 1 - Carvões gonduânicos e europeus (apud Alpern, 1969)

Os carvões gonduânicos têm também quantidades de matéria mineral (cinzas) muito maiores do que os carvões norte-americanos e europeus. Os indianos desenvolveram e aplicaram técnicas de beneficiamento para seus carvões difíceis. Sua indústria é destacada e a produção, significativa. Nós desenvolvemos a tecnologia mas a indústria não a aplicou...

## Cominuição do carvão

O carvão é um material heterogêneo em termos de constituição petrográfica e estrutural. Os seus diversos macerais e litotipos têm comportamento diferenciado à cominuição. Ele possui uma quantidade enorme de poros, trincas, interfaces e capilaridades, em tal extensão que pode ser considerado um sólido pré-fraturado. Finalmente, todos estes vazios costumam estar cheios d'água, o que faz com que qualquer amostra de carvão tenha uma umidade muito maior do que a de qualquer outra substância mineral, umidade esta que nem sempre é discernível aos nossos sentidos, pois está contida no interior das partículas de carvão e não na sua superfície, como nos outros minerais.

Estas características próprias afetam a cominuição dos carvões, a distribuição de tamanhos obtida e tanto o comportamento das partículas como os equipamentos usados na separação de tamanhos (peneiramento e classificação).

## Distribuição de tamanhos

Na Inglaterra, durante a II Guerra Mundial, uma comissão de produtores e distribuidores de carvão tentou padronizar os tamanhos de comercialização, de modo a propiciar o melhor aproveitamento possível. Após três anos de trabalho, concluiu-se que o mercado já se havia auto-regulamentado de modo a aproveitar o carvão integralmente (Brown, 1960). O fato é que em 1933, Rosin e Rammler já haviam descoberto que os tamanhos dos finos de carvão se distribuem segundo uma lei exponencial. Bennet, em 1936, demonstrou que esta lei era extensiva a todos os tamanhos de ROM. E, posteriormente, ficou demonstrado que ela era válida também para os produtos de cominuição (Foreman, 1979). O que o mercado fazia era especificar o produto de modo a utilizar da melhor maneira as frações granulométricas.

Em conseqüência, todo produto de cominuição de qualquer carvão obedece a esta lei (de Rosin-Rammler). Como resultado:

- 1 – Qualquer carvão conterà quantidade significativa de finos.
- 2 – O cuidado tomado para evitar a geração de finos (cominuição e manuseio) pode resultar em partículas de tamanhos maiores. Entretanto, isto ocorre às custas da resistência mecânica destas partículas e qualquer esforço sofrido causará a reversão imediata à distribuição estável de tamanhos.
- 3 – O *rank* dos carvões não afeta este fato, embora as propriedades de cominuição, abrasão e dureza sejam diferentes.

A presença dos finos é portanto um problema inevitável e realmente sério (poeiras, contaminação de águas e do solo, perdas, conflitos com a vizinhança) e só pode ser enfrentado com a aplicação correta de tecnologia.

## Cominuição

O *work index* de Bond não se aplica aos carvões. Isto é, os resultados obtidos a partir deste ensaio não correspondem à realidade do consumo energético na britagem e moagem de carvões. Entretanto, desde 1935, isto é, mais que vinte anos antes de Bond, já havia um ensaio padrão, que, de tão importante, foi aceito como norma ASTM já em 1951 (ASTM D 409-51) para determinação da moabilidade dos carvões. O próprio Bond, em 1956, correlacionou o índice obtido deste ensaio (índice de moabilidade Hardgrove) ao seu *work index*.

Este índice Hardgrove expressa a quantidade de finos gerada num ensaio de moagem padrão, feito num moinho pendular. Quanto maior o índice, mais fácil a moabilidade, quanto menor, mais duro é o carvão. Este índice varia com o rank, aumentando na faixa dos carvões betuminosos para cair a partir do antracito.

Chaves e Peres (2006, p. 666ss) fazem uma boa revisão dos equipamentos de cominuição de carvão. Passaremos apenas pelos aspectos mais relevantes.

Os britadores são especiais e tiram partido da fragilidade do carvão. O britador primário padrão é o britador Bradford, que é um britador autógeno. A britagem seguinte é usualmente feita em britadores de impacto, que têm relação de redução maior que os britadores de mandíbulas ou da família dos giratórios, e por isso, permitem o uso de apenas um estágio adicional. A moagem é feita em moinhos pendulares, muitas vezes com secagem dentro do próprio moinho.

As minas de carvão também são diferentes das de outras substâncias minerais; são depósitos sedimentares, horizontais ou quase, e que se estendem por dezenas de quilômetros. A escavação se desenvolve no próprio corpo de carvão e não nas rochas encaixantes. Em consequência, são minas muito extensas, de pé-direito baixo, pois altear o teto escavando-o pode comprometer a sua resistência mecânica e causar desabamentos.

Nas minas subterrâneas, as frentes de lavra rapidamente se afastam dos poços ou rampas de acesso. O transporte torna-se caro, e as primeiras minas subterrâneas a precisarem apelar para o transporte contínuo em transportadores de correia foram as minas de carvão.

Para transportar qualquer granel em transportadores de correia, este precisa estar britado a um tamanho compatível com a largura da correia. Entretanto, a mina de carvão sendo baixa e a frente de lavra deslocando-se continuamente, ficava difícil criar uma caverna de tamanho suficiente para instalar os britadores usuais - britadores de impacto. Foram então desenvolvidos os alimentadores-quebradores (*feeder breakers*), mostrados na figura 2.



Figura 2 - Feeder breaker (Chaves e Peres, 2006)

Trata-se dum alimentador de arraste que força a passagem do carvão ROM através dum rolo dentado. Ele descarrega o carvão britado num transportador de correia, que o encaminha para o sistema de transportadores da mina.

Este mesmo conceito foi aplicado pelos australianos e ingleses para desenvolverem os britadores conhecidos como sizers (Chaves e Peres, 2006, p. 496-7), britadores de dois rolos, nos quais a alimentação é feita por cima. A figura 3 mostra um equipamento destes (esquerda) e o detalhe dos rolos (direita). Existem barras limpadoras que desprendem o carvão grudado aos dentes. Os rolos foram substituídos por conjuntos de anéis montados lado a lado, o que facilita a manutenção e aumenta a vida útil do equipamento.

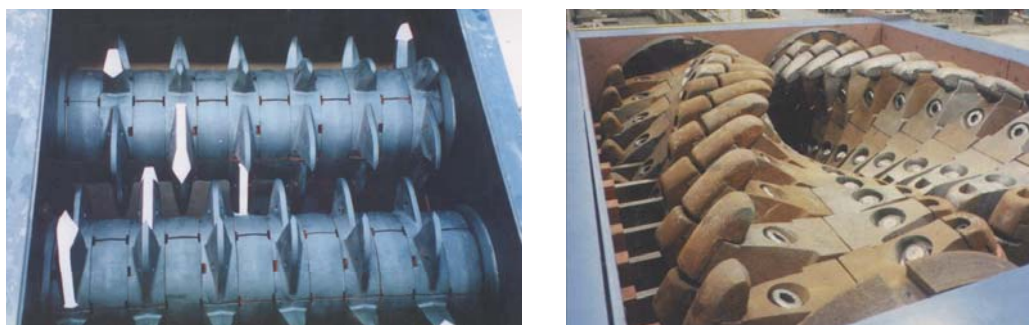


Figura 3 - Sizer

O sucesso deste britador estendeu a sua aplicação a outros minérios tão problemáticos quanto os carvões em termos de manuseio (grudentos, pegajosos e viscosos), como as bauxitas, lateritas de níquel, fosfatos alterados e minério de nióbio. No Brasil, em poucos anos, temos uma população significativa deles. O minério grudento acaba sendo empurrado para baixo pela ação dos rolos e dentes e não fica preso na câmara de britagem como acontecia com os britadores de impacto anteriormente utilizados. As barras de limpeza mantêm a câmara limpa e forçam a passagem das lamas para o produto de britagem.

## Peneiramento

O peneiramento de carvão a seco é muito difícil devido à elevada umidade deste material. A experiência com os minerais usuais considera difícil o peneiramento a seco com minerais com umidade (base seca) maior que 3%, muito difícil com 5% de umidade e impossível acima de 9%.

Qualquer carvão tem umidade muitas vezes superior a estes valores, mesmo que externamente não aparente isso. Quando as partículas começam a ser agitadas pela vibração da peneira, esta umidade flui para fora dos poros e vazios e empasta tudo, tanto o material como as telas de peneiramento. Recomenda-se, sempre que possível, fazer o peneiramento via úmida, isto é, lavando o carvão sobre a peneira.

Quando não, telas auto-limpantes ou telas de malhas alongadas que permitam que os fios vibrem em ressonância com a peneira são recomendadas. Telas de poliuretana, desde que o polímero tenha sido formulado para obter este efeito de vibração, podem resultar no mesmo.

## Classificação

A classificação, seja em classificadores espiral, de rastelos ou em ciclones, também é difícil. As partículas de carvão são muito mais leves que as dos minerais de ganga. Ocorre *sorting* conforme o peso das partículas e não conforme o seu diâmetro: partículas grossas de carvão têm o mesmo peso que partículas finas de ganga.

## Separação densitária

A separação densitária reina absoluta no campo do tratamento de carvões. Para se ter uma idéia da importância desta arte no domínio dos carvões, cito alguns desenvolvimentos teóricos e de equipamentos:

- O conceito de curva de partição foi desenvolvido por Tromp, técnico holandês, em 1937, trabalhando com carvões.
- Terra, francês, em 1938, desenvolveu o primeiro modelo matemático para a separação de carvões em equipamentos densitários. Seu modelo permaneceu válido desde então até os anos 70, quando a crise energética provocada pelo embargo ao petróleo pelos países da OPEP provocou uma corrida aos carvões e forçou a retomada dos aspectos teóricos do seu beneficiamento, agora com melhores conhecimentos estatísticos e apoio de recursos de computação (Gottfried e Jacobsen, 1977).
- A peneira DSM foi desenvolvida, também pelos holandeses, para auxiliar no tratamento de carvões em meio denso.
- Os grandes jigues, Baum, Tacuba e Batac, foram desenvolvidos para tratar carvões e somente depois, aplicados a outros minerais.

O Brasil tem tradição neste aspecto. Em Santa Catarina eram usados jigues Baum para fazer a pré-concentração na boca da mina. Separavam-se 2/3 de massa de rejeitos xistosos e piritosos, e o carvão pré-lavado seguia para um lavador central, em Tubarão, onde era beneficiado em ciclones de meio denso. O tratamento dos finos, nas minerações era feito em mesas vibratórias e depois em espirais concentradoras.

No Paraná, a mineração ali atuante usa um jigue Hartz para separar o carvão e jigues Denver para separar a pirita do rejeito obtido no primeiro jigue.

No Rio Grande do Sul, havia um lavador com jigues na mina do Leão e um lavador com ciclones de meio denso na usina siderúrgica de Charqueadas (então Aços Finos Piratini).

O beneficiamento gravítico consome muita água. É necessário, portanto, recuperá-la sob pena de impactar significativamente o meio ambiente, especialmente no que diz respeito aos cursos d'água.

A disposição dos rejeitos piritosos também exige cuidados especiais devido à geração de águas ácidas.

## Flotação

Hoje, apenas três minerações utilizam esta operação: a Metropolitana, a Criciúma e a Rio Deserto, todas em Santa Catarina.

Como o carvão é muito leve, o limite inferior de tamanho passível de tratamento em jigues e em equipamentos de meio denso é a malha 35 Tyler (0,417 mm). É um tamanho muito grande se comparado aos de outros minerais tratados, por exemplo, minérios de ouro, que vão até 200 mm em equipamentos convencionais (equipamentos centrífugos permitem estender este tamanho para baixo) (Peres et al., 2002).

Partículas menores que este limite eram usualmente descartadas e se constituíam em problema ambiental muito grave, pois tornavam as águas extremamente turvas (*black water*) e consumiam todo o oxigênio em solução, matando algas e peixes. A flotação dos carvões foi, portanto, desenvolvida como uma operação auxiliar para diminuir a poluição causada pelo tratamento das frações grosseiras: historicamente, estas águas negras começaram a ser tratadas em células de flotação para retirar as partículas carbonosas suspensas. Verificou-se que se tratava duma operação muito eficaz, barata e que produzia um subproduto de elevada qualidade, além de já naturalmente fino.

Do ponto de vista teórico, os carvões betuminosos constituem um dos exemplos clássicos de substâncias naturais flotáveis apenas com o auxílio de espumantes, sem a necessidade do uso de coletor. Esta flotabilidade natural decorre da sua estrutura química, constituída de hidrocarbonetos de cadeia muito longa e estruturas cíclicas (Menezes et al., 2006).

Os reagentes utilizados - hidrocarbonetos líquidos, derivados de petróleo, como querosene, diesel e óleo combustível - não são coletores no sentido estrito do termo. Deveriam ser melhor chamados de "reforçadores da hidrofobicidade" pois a superfície do carvão betuminoso já é naturalmente repelente à água e estes produtos apenas reforçam este caráter.

Os hidrocarbonetos são emulsionados e adicionados à polpa. Eles adsorvem sobre a superfície do carvão como resultado do que se chama de *squeezing out effect* ou efeito de segregação: tanto carvão como óleos têm maior afinidade entre si e pela fase gasosa que pela fase aquosa. Os óleos são segregados da fase aquosa, indo se depositar na superfície carbonosa e assim reforçando a adsorção das bolhas de ar para que ocorra a flotação. Isto se torna importante na medida em que a superfície do carvão esteja oxidada ou contaminada com outras espécies minerais, como é o caso do carvão brasileiro.

É convicção generalizada que alguns espumantes, especialmente o óleo de pinho, têm ação coletora verdadeira sobre o carvão. Como os espumantes são moléculas polares-não polares, pode haver uma atração elétrica entre a porção polar da molécula e os sítios portadores de minerais na superfície do carvão, caracterizando assim o efeito coletor. Outros autores, entretanto, atribuem este resultado apenas à consistência da espuma, que - como a do óleo de pinho - seria capaz de arrastar mecanicamente partículas carbonosas (Chaves, 1983). O metil-isobutil-carbinol, que gera espumas mais ralas tem, via de regra, menor recuperação mássica, mas fornece flotados de menor teor de cinzas.

São usados depressores para os minerais de ganga: para a pirita, cal, cloretos de sódio ou potássio, cloreto férrico; para os minerais silícicos, silicato de sódio.

A prática operacional da flotação de carvões também tem peculiaridades muito próprias, diferentes das práticas de outras substâncias minerais (Chaves, 1983):

- Usualmente a flotação é feita em apenas um estágio. Raramente se faz cleaner e mais raramente ainda, scavenger.
- A flotação dos carvões opera com granulometrias muito mais grossas do que as dos minérios. Isto só é possível devido ao baixo peso específico do carvão.
- O processo gera melhores resultados com grandes quantidades de bolhas de ar de pequeno diâmetro, fato justificável pelo tamanho maior das partículas.
- A flotação do carvão opera com diluições extremamente altas se comparadas com as usuais - da ordem de 3 a 8% em peso.
- A velocidade de flotação (cinética) varia com o *rank* do carvão, cresce conforme melhora a aeração da polpa e é relativamente constante nas polpas diluídas. Ela cai quando a porcentagem de sólidos excede 13% (Aplan, 1967).

O circuito costuma ser extremamente simples. Usualmente há apenas um estágio rougher e raramente se usa um estágio adicional. Além disto, a flotação do carvão é feita em diluições extremamente altas, o que acarreta a necessidade de um grande volume de células. Introduzir uma etapa adicional significa duplicar o volume de células. Vale registrar que as células de grande volume, com projeto baseado em agitadores, hoje padrão na grande mineração, foram desenvolvidas para a flotação de carvão.

Estudos desenvolvidos por vários autores propuseram melhorias nos circuitos de beneficiamento de finos de carvão mineral, buscando tanto uma maior recuperação das frações carbonosas finas e ultrafinas, quanto a redução nos teores de cinzas (Lima et al., 1992; Oliveira e Peres, 1992).

A separação da pirita da matéria carbonosa, através de flotação, pode ser feita pela utilização da diferença em suas cinéticas de flotação, pela flotação do carvão e depressão da pirita ou pela depressão do carvão e flotação da pirita.



Os indianos aplicaram com muito sucesso a flotação aglomerante (*oil agglomeration*) a seus carvões. Estudos feitos pela extinta Paulo Abib Andery, em 1976, demonstraram a aplicabilidade deste processo a um grande número de carvões brasileiros.

## Referências

- ALPERN, B. Le pouvoir reflecteur des charbons français. Applications et repercussions sur la theorie de A. Duparque. In: **Annales Soc. Geol. Nord**, T LXXXIX, 2, p. 143 (1969).
- APLAN, F.F. Coal flotation. In: **Froth Flotation**: Nova York, AIME, 1967.
- BROWN, R.L. Problems of fracture and structure of coal. In: **Crushing and grinding - a bibliography**. Londres: Chemical Publishing, 1960.
- CHAVES, A.P. **Estrutura e comportamento do carvão**. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1972.
- CHAVES, A.P. **Flotação de carvão de Santa Catarina**. São Paulo, Epusp. Tese (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.
- CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C. **Teoria e prática do Tratamento de Minérios** (3ª edição), São Paulo, Signus, 2006.
- FOREMAN, W.E. Screening. In LEONARD (ed.) **Coal preparation**, New York, SME, 1979, ch. 8, p. 8-30.
- GOTTFRIED, B.S.; JACOBSEN, P.S. **Generalized distribution curve for characterizing the performance of coal-cleaning equipment**. Washington, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1977. Report of Investigations 8238.
- LIMA, R.M.F.; CORREIA, J.C.G.; CAMPOS, A.R. Flotação em Coluna de Finos de Carvão. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 1992, São Lourenço, Minas Gerais. Anais do XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia. São Lourenço: Salum, M.J.G.; Ciminelli, V.S.T. (eds), 1992, p. 389-402.
- MENEZES, C.B.; ESCOBAR, A.T.; CHAVES, A.P. Flotação do carvão. In: **Flotação, o estado da arte no Brasil**. São Paulo: Signus, 2006, p. 369 ss.
- OLIVEIRA, M.L.M.; PERES, A.E.C. Flotação em Coluna Aplicada ao Beneficiamento de Carvão. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 1992, São Lourenço, Minas Gerais. Anais do XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia. São Lourenço: Salum, M.J.G.; Ciminelli, V.S.T. (eds), 1992, p. 403-421

PERES, A.E.C.; CHAVES, A.P.; LINS, F.A.F.; TOREM, M.L. Beneficiamento de minérios de ouro. In: TRINDADE, BARBOSA FILHO (Ed.) Extração de ouro, Rio de Janeiro, Cetem/MCT, 2002, p. 23 ss.

YANCEY, H.F. Hardness, strength and grindability of coal. In: **Chemistry of coal utilization**, N. York, J.Willey: 1960, v.1, p. 145.

# A lavra de carvão e o meio ambiente em Santa Catarina

Jair Carlos Koppe; João Felipe Coimbra Leite Costa

A lavra de carvão em Santa Catarina teve início no final do século XIX conduzida por empresa de origem britânica. Dada a baixa qualidade do produto, o desenvolvimento da indústria não foi expressivo. A Primeira Guerra Mundial permitiu, num primeiro momento, um crescimento da produção de carvão na região incentivando o ingresso de empresas nacionais, algumas das quais em atividade até o presente momento, entre elas destacaram-se a Companhia Carbonífera Urussanga (1918) e a Companhia Carbonífera Próspera (1921). Posteriormente, no Governo de Getúlio Vargas, foi implementada a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN, 1946). Além dessas empresas, pequenos produtores dominaram as atividades no período 1940-1960. A partir de 1970, o número de empresas em atividade foi reduzido a onze, na maioria pertencentes a empresários locais. Nesse período, a crise do petróleo, em 1973, favoreceu o desenvolvimento da lavra de carvão até o início da década de 90, quando a desregulamentação do uso do carvão provocou uma crise nas atividades de mineração. As perspectivas para o século XXI não estão ainda definidas claramente e dependem fundamentalmente do papel que o carvão poderá assumir na matriz energética brasileira.

Os métodos de lavra utilizados em Santa Catarina desde o início dos trabalhos de mineração envolveram a lavra a céu aberto e subterrânea. Inicialmente os métodos tiveram características essencialmente manuais, gradando para uma fase semimecanizada e, posteriormente, mecanizada. Este capítulo descreve os principais métodos empregados e os que atualmente estão em uso em Santa Catarina. Na Tabela 1, são apresentadas as empresas que atuam em Santa Catarina, os métodos de lavra utilizados e a produção ROM (*run of mine*) no ano de 2005.

Tabela 1– Produção de carvão em Santa Catarina no ano de 2005. Dados em toneladas de carvão ROM por empresa

Empresa	Produção (t)	Método de lavra
Metropolitana	1.059.492	Câmaras e pilares, desmonte convencional e minerador contínuo.
Criciúma	1.374.513	Câmaras e pilares, desmonte convencional.
Cocalit	164.328	Céu aberto, depósitos de rejeitos.
Comin	499.470	Céu aberto, depósitos de rejeitos.
São Domingos	464.462	Céu aberto, depósitos de rejeitos.
Catarinense	1.089.072	Câmaras e pilares, desmonte convencional.
Rio Deserto	931.199	Câmaras e pilares, desmonte convencional e minerador contínuo.
Cooperminas	1.146.043	Câmaras e pilares, desmonte convencional.
Belluno	790.537	Câmaras e pilares, desmonte convencional.
Gabriella	134.276	Céu aberto, depósitos de rejeitos.
Siderópolis	155.288	Céu aberto, depósitos de rejeito.
Minageo	Não informado.	Câmaras e pilares, minerador contínuo.
Total	7.808.680	

Fonte: DNPM e SIESESC, 2006

## Lavra a céu aberto

### Método de lavra em tiras (*strip mining*)

A lavra de carvão a céu aberto é desenvolvida essencialmente pelo método de lavra em tiras (*strip mining*). As camadas de solo superficial e de outras formações sedimentares que recobrem as camadas de carvão, constituindo a cobertura estéril, são removidas no estágio inicial de lavra propiciando a descobertura da camada de carvão que é, posteriormente, lavrada. Esse tipo de lavra envolve genericamente a remoção de grandes volumes de estéril para cada tonelada de carvão produzida, podendo causar sério impacto ambiental, caso a lavra não seja adequadamente planejada e a recuperação da área degradada definida e executada desde seu início (Koppe e Costa, 2002).

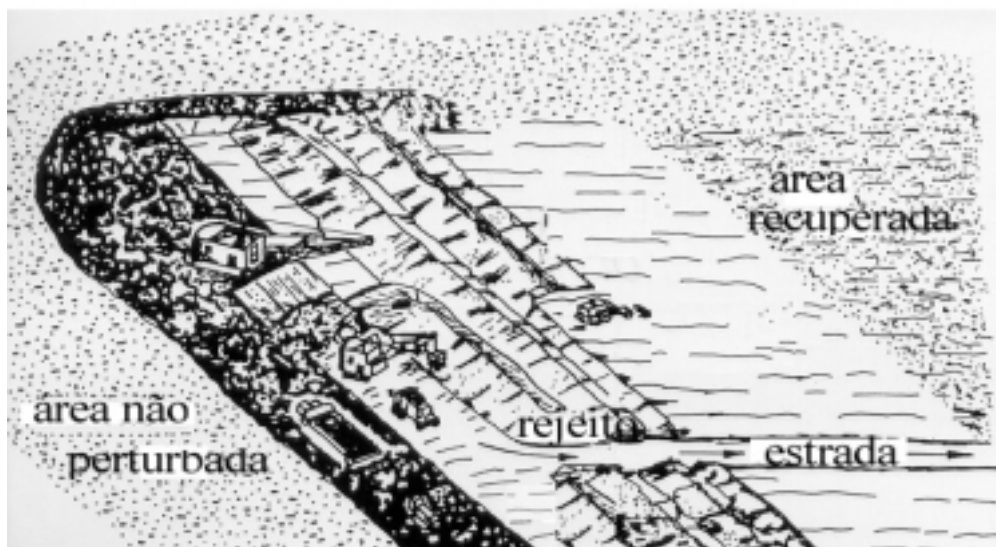
Em decorrência do fato de que a área de lavra de carvão a céu aberto ser relativamente irrestrita comparada à lavra em subsolo, grandes equipamentos de escavação, transporte e carregamento podem ser envolvidos. A seleção do sistema de mineração a ser utilizado precisa levar em consideração diversos fatores, incluindo tamanho do depósito de carvão, distribuição das camadas de carvão, controle estrutural do depósito, disponibilidade de equipamentos e compatibilidade com outros equipamentos, vida útil do depósito e taxa de produção de carvão.

A seleção de um método específico de lavra de carvão a céu aberto está geralmente condicionada ao sistema de remoção da cobertura, tendo em vista que essa operação unitária de lavra envolve os maiores capitais e custos operacionais. Uma vez determinado o método de descobertura e o equipamento complementar, sistemas de equipamentos compatíveis são escolhidos para as outras operações unitárias de lavra, como desmonte da camada, carregamento e transporte do carvão e outras de apoio. O objetivo primordial é retirar o máximo de carvão a um custo mínimo e, ao mesmo tempo, reduzir o impacto ambiental promovido pela mineração. Os principais métodos de lavra a céu aberto são a seguir descritos.

### Método de lavra de descobertura com *dragline* (*dragline stripping method*)

Um dos métodos de lavra utilizados em Santa Catarina pela CSN foi o de descobertura, que emprega *dragline* como equipamento fundamental e envolve a abertura de um corte inicial, removendo o carvão exposto nesse corte e colocando o material de cobertura do próximo corte longitudinal dentro desse corte inicial. O procedimento é repetido corte a corte. O método é empregado em depósitos de carvão com camadas horizontalizadas ou moderadamente inclinadas, com espessuras relativamente constantes do material de cobertura. A Figura 1 mostra esquematicamente o desenvolvimento desse método.

As *draglines* são escolhidas para esse tipo de operação em função basicamente de sua versatilidade em diversas condições de operação e do custo unitário de material escavado. As *draglines* podem lidar com espessuras variáveis de cobertura e com camadas múltiplas mudando apenas o modo de operação.

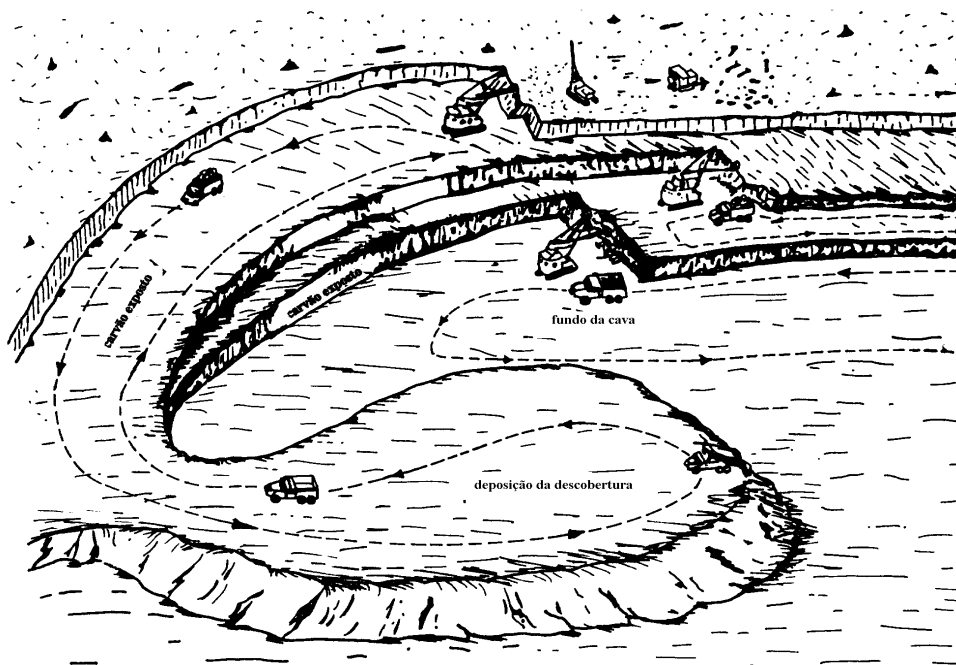


Fonte: modificado de Hartman, 1992

Figura 1 – Desenvolvimento esquemático da lavra de carvão por descobertura com *dragline*

### Método de lavra em bancadas/escavadeira – caminhões

A Carbonífera Treviso utilizou o método de lavra de carvão em bancadas combinando o uso de escavadeira e caminhões (Figura 2). Esse método é utilizado principalmente em depósitos cujas camadas de carvão são relativamente espessas, horizontalizadas ou levemente inclinadas e apresentam baixa razão de descobertura (*stripping ratio*). O método inicia com a abertura de uma cava colocando-se a cobertura em uma área de bota-fora temporária. A seguir, o carvão é removido da cava inicial, e o próximo corte é feito na direção do avanço da lavra, sendo que a cobertura é transportada para a área já lavrada onde é depositada. O carvão é removido e o processo se repete à medida que a cava avança.



Fonte: modificado de Hartman, 1992

Figura 2 – Método de lavra em bancadas com combinação de escavadeira e caminhões

Nos diferentes métodos de lavra de carvão apresentados anteriormente, poderá haver necessidade de camadas de rocha da cobertura ou mesmo do carvão serem desmontados com auxílio de explosivos. Geralmente, o material deve ser bem fragmentado e liberado do maciço rochoso com pequenos deslocamentos laterais, facilitando, dessa forma, a atuação dos equipamentos de carregamento e transporte.

### **A lavra a céu aberto e o meio ambiente**

As atividades de lavra a céu aberto, em Santa Catarina, nas décadas passadas não foram desenvolvidas com um adequado planejamento e nem observaram os padrões de recuperação necessários e indispensáveis para manter a qualidade do meio ambiente no entorno das áreas mineradas. O material estéril (compreendendo o material de descobertura) e os rejeitos foram dispostos sem controle, e o solo não foi preservado. Muitas áreas foram simplesmente abandonadas. Isso gerou diversos problemas, que incluíram, entre outros, geração de drenagem ácida de mina, impacto visual, erosão e liberação de gases para a atmosfera, o que comprometia a qualidade do ar. Alguns desses impactos ainda persistem na região. O conjunto da obra gerou um clamor popular de tal ordem que praticamente a lavra a céu aberto de carvão desapareceu do cenário de mineração no estado de Santa Catarina.

No entanto, o método de lavra em tiras permite que a área impactada tenha uma possibilidade de recuperação com resultados muito satisfatórios, como comprovam as atividades similares de lavra no Rio Grande do Sul, onde a mineração de carvão tem desenvolvido um excelente programa de recuperação ambiental, reconhecido pelos órgãos ambientais que fiscalizam os trabalhos. Os trabalhos de recuperação iniciam com a remoção e preservação do solo de cobertura. Na seqüência, o material removido de um corte irá preencher a fatia minerada buscando-se manter a seqüência estratigráfica original. Posteriormente, o solo preservado recobre o material repostado. Controle de erosão e correção de acidez do solo devem ser efetivados anteriormente ao programa de plantio de revegetação da área, para garantir uma recuperação mais eficiente. Infelizmente essa boa prática não foi desenvolvida em Santa Catarina fazendo com que hoje muitas das empresas envolvidas tenham que implantar programas de recuperação do passivo ambiental, por exigência do poder público.

## **A lavra subterrânea**

A mineração de carvão em subsolo no Brasil foi desenvolvida essencialmente a partir do método de lavra de câmaras e pilares, sendo dominante nos dois principais estados produtores de carvão, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Em Santa Catarina, encontra-se atualmente as principais minas subterrâneas em atividade. Poucas experiências tiveram sucesso com outros métodos de lavra.

### **Método de câmaras e pilares**

A popularidade do método de câmaras e pilares na lavra de carvão é atestada pelo fato de que cerca de 90% das atividades de lavra de carvão em subsolo nos Estados Unidos são ou foram desenvolvidas por essa técnica (Bullock, 1982; Hartman, 1992). Igualmente no Brasil, esse método foi e continua sendo a principal técnica empregada na lavra de carvão em subsolo.

O método de câmaras e pilares é utilizado basicamente em depósitos com camadas horizontais ou levemente inclinadas nos quais o teto é sustentado primeiramente por pilares naturais. O carvão é extraído a partir de câmaras retangulares deixando partes do carvão entre as câmaras como pilares para sustentar o teto. Geralmente, os pilares são organizados em forma regular ou quadrada para simplificar o planejamento e as operações de lavra. As dimensões das câmaras e pilares dependem de diversos fatores, que incluem a espessura e profundidade do depósito, a estabilidade do teto e a resistência do pilar. A extração máxima de carvão compatível com a segurança dos trabalhos é o principal objetivo a ser alcançado.

Os pilares de carvão são considerados genericamente como irrecuperáveis. Porém, poderão ser recuperados por uma lavra em retração, permitindo o desabamento do teto. Esse procedimento foi utilizado durante muitos anos em Santa Catarina sendo, posteriormente, proibido pelo Departamento Nacional da Produção Mineral.



O dimensionamento de aberturas subterrâneas em minas de carvão que adotam o método de câmaras e pilares tem como principal objetivo a determinação das dimensões dos pilares, os quais são a base de sustentação do teto. Para elaboração do projeto de dimensionamento de pilares necessita-se de dois parâmetros essenciais: (i) o campo de tensões no maciço rochoso e (ii) a resistência do pilar. O campo de tensões na camada de carvão ou no seu entorno é representado pelas tensões verticais e horizontais. Nos métodos empíricos de dimensionamento de pilares, apenas a tensão vertical é considerada no carregamento sobre o pilar (Salamon e Munro, 1967). Entretanto, a tensão horizontal tem importância principalmente na borda do pilar, a qual é afetada pelo desmonte, e por ser uma zona em que não existe confinamento lateral.

A unidade básica do método câmaras e pilares é o painel que define a área a ser minerada e ventilada. No painel, há duas fases principais nas quais as câmaras são primeiro desenvolvidas, isolando-se pilares ao longo da extensão do painel. Dessa forma, os pilares podem ser extraídos na direção reversa. Correias transportadoras, carregadeiras frontais e demais serviços de apoio são estendidos com o avanço da lavra e retirados durante a retirada dos pilares em retração.

Em muitos casos de lavra de carvão em subsolo, são utilizados parafusos de teto para sustentação temporária do teto das câmaras, constituindo-se no mais barato método para manter a estabilidade do teto durante o desenvolvimento da lavra. No passado, era utilizado essencialmente escoramento com madeira.

Os sistemas cíclicos de lavra de carvão compõem o método convencional de câmaras e pilares, envolvendo desmonte do carvão com explosivos (furação, detonação) ou equipamentos mecânicos, transporte/carregamento e escoramento. Muito mais produtivos e mais usual em minas mecanizadas são os sistemas contínuos de mineração. Como o próprio nome indica, esse sistema reduz o número de operações unitárias de lavra.

## **Estudo de caso**

Para ilustrar o método de câmaras e pilares empregado em Santa Catarina foi utilizado o exemplo das Minas Esperança, Mel e Fontanela. Esse conjunto de minas pertence à Carbonífera Metropolitana S/A, localizando-se no Município de Treviso produzindo atualmente 1.100.000 t de carvão ROM/ano, com 450.000 t beneficiadas distribuídas entre finos, carvão energético CE 4500 e CE 5400.

O método empregado nas três operações é o de câmaras e pilares com conjuntos mecanizados. O acesso à camada de carvão é feito por plano inclinado e poços verticais. A área a ser lavrada é dividida em painéis de produção. São construídas sete galerias centrais no eixo mais favorável da área, formando o eixo principal de transporte no subsolo. Perpendicularmente a elas são abertas galerias centrais de cada painel, distantes 216 metros. As galerias têm 6 m de largura, cortando-se travessões, também com 6 m de

largura, e individualizando-se pilares com dimensões em sua maior parte de 12 x 12 metros, devendo crescer com a profundidade. Os painéis têm largura total de 210 m e são formados por 11 galerias e 12 pilares, sendo que essas medidas são definidas pelo alcance dos cabos elétricos das máquinas.

A lavra é desenvolvida em avanço. No painel em avanço, desenvolve-se a mineração somente em galerias, deixando-se os blocos que suportam o teto da mina até o fim do painel. Anteriormente era feita, também, uma lavra em retração com a recuperação dos pilares. Na retração, abria-se uma galeria com 6 m no centro dos pilares, deixando-se sem recuperação dois pilares laterais de 3 x 12 metros. Com o enfraquecimento do pilar, o teto da mina ia se abatendo. Posteriormente, o DNPM proibiu a lavra em retração buscando eliminar problemas de subsidência, e a técnica foi abandonada.

A recuperação na área dos painéis era de aproximadamente 55% em avançamento e 23% em retração, totalizando uma recuperação de 78% da área ocupada pela camada de carvão, abandonando-se como pilares necessários ao controle do teto 22% da área. Atualmente, a recuperação fica em torno de 55% da área.

Os principais equipamentos empregados no subsolo compreendem: perfuratriz de frente de lavra elétrica, cortadeira universal de carvão (Figura 3), carregador, carros transportadores (*shuttle-car*), quebrador-alimentador de correia transportadora, centro de força e perfuratriz de teto (Figura 4).

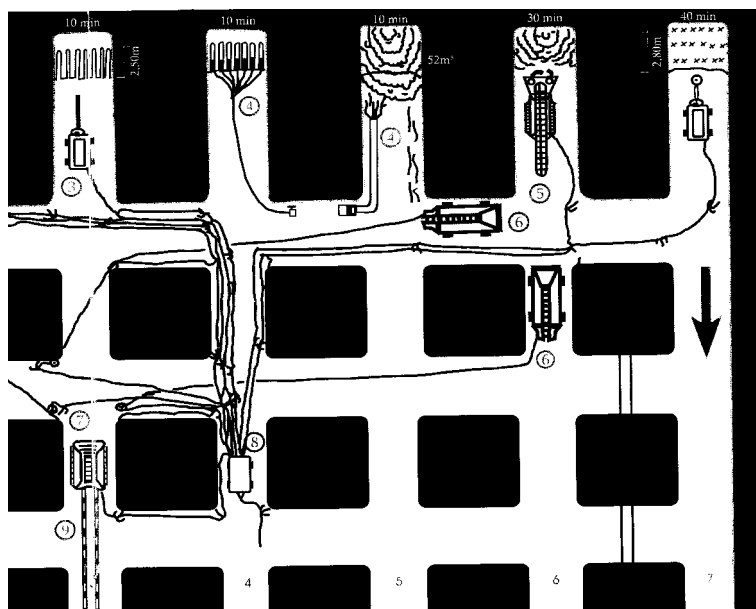


Figura 3 – Cortadeira de carvão: 16,8 m<sup>2</sup> / corte



Figura 4 – Perfuratriz de teto com colocação de um parafuso por m<sup>2</sup>

A Figura 5 apresenta um desenho esquemático das operações envolvidas na Mina Esperança.



Fonte: Carbonifera Metropolitana S.A.

Figura 5 – Operações unitárias de lava do método câmaras e pilares empregado na Mina Esperança. 1- Direita topo: perfuratriz de teto. 2- Direita centro: seta mostrando avanço da lava. 3- Perfuratriz de frente. 4- Desmonte. 5- Carro carregador. 6- Carro transportador. 7- Alimentador. 8- Centro de força. 9- Correia transportadora

O desmonte de carvão é feito, na maioria das minas, de forma convencional com utilização de explosivos. No caso apresentado, dois métodos têm sido empregados: (i) pilão do tipo *undercut* – é feito um corte próximo à base da galeria por máquina cortadeira de carvão (Figura 4) e os furos são carregados observando-se essa superfície livre e (ii) furação com pilão em leque. Em geral, essas metodologias têm provocado danos e gerado uma inadequada formatação aos pilares (variando tamanho e forma). Está sendo utilizado experimentalmente um minerador contínuo para o desmonte do carvão. Nessa técnica, os pilares são preservados na sua forma prevista, diminuindo-se, também, os danos ao pilar. Outras empresas já estão adotando mineradores contínuos nas suas operações.

## **A lavra subterrânea e o meio ambiente**

A lavra subterrânea é vista como uma alternativa para a mineração no que diz respeito ao impacto visual ocasionado pela lavra a céu aberto, e hoje constitui a prática mais aceita em Santa Catarina. Até mesmo em profundidades pequenas, em que a lavra a céu aberto seria recomendada pelo aspecto econômico, adota-se a lavra subterrânea.

Apesar desse aspecto positivo inicial, persistem, no entanto, vários problemas comuns às duas práticas, e os impactos ambientais podem ser muito significativos. Os rejeitos da usina de beneficiamento são ainda dispostos na superfície. A possibilidade de uso desses rejeitos como *backfill* ainda não ganhou corpo em Santa Catarina. Estudos específicos poderão indicar a viabilidade do uso dessa técnica o que ajudaria significativamente a recuperação ambiental nas áreas impactadas.

As áreas de disposição de rejeito a céu aberto somadas a aberturas subterrâneas antigas que não foram seladas contribuem para a geração de drenagem ácida de mina, que impacta fortemente a região carbonífera.

A lavra subterrânea tem provocado localmente alterações no comportamento do lençol freático gerando reclamações da população local. Piezômetros instalados na região servem para acompanhamento da variação dos níveis de água subterrânea e verificação da qualidade da água.

Subsidência nas áreas de lavra subterrânea foram fatores marcantes de reclamações da comunidade pela repercussão gerada na superfície e danos provocados em passado recente. Com a proibição da lavra em retração dos pilares esse problema foi diminuído. No entanto, em algumas minas começou a ocorrer o colapso de pilares com imediata repercussão em superfície com subsidência associada sendo observada. A vida útil dos pilares não é conhecida e no futuro poderão ocorrer problemas relacionados à ruptura desses pilares. Como essa vida útil pode ser de aproximadamente cem anos, e considerando-se o crescimento urbano da região, a subsidência poderá afetar futuramente zonas urbanas, com repercussões bem mais negativas do que se estivessem ocorrendo atualmente nas zonas rurais.

Nas minas subterrâneas em Santa Catarina, também, podem ser observados alguns problemas com ventilação, gerando acumulação de gases e poeiras na atmosfera da mina com implicações diretas na saúde e segurança dos mineiros.

Apesar desses problemas, melhores práticas de engenharia começaram a ser aplicadas nos últimos anos e isso tem beneficiado a recuperação do meio ambiente.

## Referências

BULLOCK, R. L. General Mine Planning. In: HUISTRULID, W. A. **Underground Mining Methods Handbook**. Littleton: SME, 1982. p. 113-137.

DNPM. **Sumário Mineral de 2005**. Departamento Nacional da Produção Mineral, 2006, Brasília.

HARTMAN, H.L. **SME Mining Engineering Handbook**. 2<sup>nd</sup> Ed. Littleton: SME, 1992. vol. 2, p. 1273-2260.

KOPPE, J.C. & COSTA, J.F.C.L. Mineração. In: TEIXEIRA, E. C. **Meio Ambiente e Carvão: Impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre: FEPAM, 2002. cap. 1, p. 15-28.

SALAMON, M. D. G. & MUNRO, A. H. **A study of the strength of coal pillars**. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., Johannesburg, v. 68, p. 55-67, 1967.

# Evolução da gestão ambiental na indústria carbonífera em Santa Catarina: um caso de sucesso

Carlos Henrique Schneider

A contínua demanda por produtos primários, destinados à aplicação nos mais diferenciados setores da atividade humana, passa tanto pela produção de metais ferrosos e não ferrosos quanto por combustíveis fósseis não renováveis.

A obtenção destes produtos envolve processos de mineração, cuja expansão vem pressionando cada vez mais a qualidade dos recursos naturais. Tal fato tem contrariado a sociedade civil organizada, que entende a necessidade do desenvolvimento econômico e social, mas, por outro lado, espera que os empreendimentos encontrem meios de produção que assegurem a preservação dos recursos naturais para as futuras gerações.

Ciente de que a sobrevivência dos empreendimentos de mineração depende de um eficaz controle dos seus impactos sobre o meio ambiente, as empresas organizadas passam a adotar códigos voluntários de conduta, para o qual lançam mão das ferramentas de gestão ambiental como meio capaz de promover a sustentabilidade de seus empreendimentos.

O presente artigo aborda o caso de uma mina de carvão de grande porte, implantada no sul de Santa Catarina, no início da década de 80. Nesta mina as melhores práticas ambientais são implementadas à medida que as exigências dos órgãos de fiscalização passam a ser acompanhadas pelo desenvolvimento tecnológico na área ambiental, transformando uma unidade convencional de elevado potencial poluidor em um modelo de gestão ambiental, a ponto de receber, em fevereiro de 2007, a certificação ISO 14001:2004.

## Histórico

A Revolução Industrial, que teve início na Inglaterra do século XVIII, foi impulsionada pelo desenvolvimento da tecnologia para fabricação do aço, processo no qual, o carvão mineral tem participação fundamental.

Em decorrência disto, tanto o Reino Unido quanto as demais nações detentoras de reservas de carvão mineral passaram a desenvolver equipamentos e ferramentas de aço, dentre os quais caldeiras, locomotivas e equipamentos industriais, que acabaram substituindo a força animal e hídrica pela mecânica.

Por razões naturais associadas ao estabelecimento de melhores condições de vida para o ser humano, este período foi marcado por um rápido crescimento populacional. Países detentores de reservas naturais de minério de ferro e carvão tiveram um poder econômico e político sem igual na sua história.

## Evolução do carvão e sua política

Em 1822, a notícia da descoberta de carvão mineral em Santa Catarina levou autoridades da corte imperial a empreender várias missões de pesquisadores e cientistas à região sul de Santa Catarina. Concluiu-se à época que o carvão mineral encontrado por tropeiros que trilhavam a chamada Serra do Rio do Rastro (então Serra do 12), em Santa Catarina, era de boa qualidade.

Isto foi decisivo para atrair investimentos na atividade de mineração de carvão nesta região, o que levou a estudos para a caracterização do minério e da sua viabilidade econômica a partir de amostras enviadas ao continente Europeu. Tal fato levou o Visconde de Barbacena a empreender, em 1876, a primeira tentativa de exploração comercial de carvão mineral no Município de Lauro Müller. Nesta ocasião, foram introduzidos os primeiros conceitos e técnicas empregados na mineração praticada no Velho Continente.

No início do século XX, a fim de acelerar a indústria do carvão, o Governo Brasileiro criou a “Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra no Brasil”, cujos trabalhos foram confiados ao geólogo do estado de West Virginia (USA), Dr. Israel C. White. No período compreendido entre julho de 1904 e fevereiro de 1906, White produziu um vastíssimo acervo de dados sobre a estratigrafia e paleontologia da bacia do Paraná, assim como dos carvões sul-brasileiros. Estes estudos foram condensados em um monumental relatório sobre a geologia local, propondo a clássica coluna estratigráfica do Gondwana mundial, hoje conhecida como Coluna White.

Várias tentativas para consolidar a exploração do carvão local aos padrões internacionais foram tentadas, como em 1914, com a eclosão da 1ª Guerra Mundial, bem como em 1941, em plena 2ª Guerra Mundial, com a criação da Companhia Siderúrgica Nacional, em Volta Redonda. Em 1954 foi criado o “Plano Nacional do Carvão” para

desenvolvimento da siderurgia nacional, incluindo o carvão nacional na matriz de recursos estratégicos, com Santa Catarina como o principal fornecedor de carvão metalúrgico.

Posteriormente, com o advento da primeira crise mundial do petróleo, em 1973, o Governo Federal tratou de investir e incentivar a Indústria Carboquímica como resposta à alta dependência nacional ao combustível fóssil importado. Foram criadas linhas de crédito para a modernização das minas, implantando o que havia de mais moderno em termos de tecnologia da lavra e beneficiamento de carvão mineral. Este novo programa foi responsável por um rápido e vigoroso crescimento da produção de carvão mineral, o que na época foi considerado um sucesso, embora tenham sido desconsiderados os impactos que esta nova escala de produção traria ao meio ambiente.

Com o fim do “Milagre Econômico”, na década de 80, o Estado passa a intervir cada vez menos, chegando, em 1990, a desobrigar as siderúrgicas a comprar carvão metalúrgico nacional. A Indústria Carboquímica Catarinense foi fechada neste período, encerrando, desta forma, o projeto para produção de ácido sulfúrico a partir do rejeito piritoso.

Assim, no curso de um século de atividades minerárias, este setor vem observando períodos de grande desenvolvimento econômico alternados a períodos de crise exacerbada, evidenciando a falta de uma política pública capaz de assegurar um ambiente produtivo e institucionalmente equilibrado.

## **Questão ambiental**

O trato dos impactos ambientais da atividade humana, em particular aquela associada às atividades industriais, para ficar só nestas, evidencia quatro formas distintas praticadas ao longo dos tempos na abordagem do problema, as quais podem ser resumidas em quatro conceitos, a saber: diluição da poluição; tratamento das emissões; integração de controles às práticas e processos industriais; incorporação dos controles à gestão administrativa.

Assim, o primeiro aspecto perceptível em determinadas atividades industriais sobre o meio ambiente, residia na possibilidade de que os impactos negativos destas atividades fossem diluídos ao longo do tempo e/ou espaço. Este princípio, todavia, deixou de ter sentido frente ao aumento populacional, o qual acarreta aumento do consumo e conseqüente incremento da atividade industrial, trazendo consigo uma maior diversificação e formas de poluição incapazes de serem absorvidas pelo meio ambiente natural.

Na década de 70, o enfoque das empresas passa a ser dirigido para o controle da poluição industrial, que, nos países desenvolvidos, se deu pelo estabelecimento de limites legais de emissões. Neste tempo, empresas e governos passaram a desenvolver sistemas e equipamentos antipoluentes, que passaram a incorporar ao processo produtivo. É a



chamada tecnologia aplicada ao ponto de emissão (*end of pipe*), levando a uma série de mecanismos de incentivo financeiros, ou de mercado, responsáveis pelo abrandamento dos custos finais de produção, paulatinamente absorvidos pela criação de um novo mercado de produtos e serviços para a depuração da poluição.

A partir da década de 80, a redução dos impactos ambientais das empresas passa a ser preventiva, com ênfase no ciclo de vida dos produtos, o que compreende a introdução de processos de produção menos poluentes, alteração das matérias-primas empregadas, cuidados com a destinação do lixo industrial e seus produtos após o uso. Tudo isto leva à redução do desperdício de energia, matérias-primas e recursos naturais com concomitante redução dos custos envolvidos no controle ambiental.

Já em meados da década de 90, toma corpo a área de pesquisa e desenvolvimento das indústrias, que passam a encarar os problemas ambientais como oportunidades, entendendo que seus processos de controle da poluição também podem resultar em subprodutos economicamente viáveis, financiando, desta forma, os custos envolvidos na despoluição ou controle ambiental.

Em outras palavras, o atual enfoque da questão ambiental compreende o tratamento sistêmico dentro das organizações, integrando, por assim dizer, os sistemas de garantia da qualidade, da segurança, do gerenciamento ambiental, agora apoiados na pesquisa para desenvolvimento de soluções ambientais capazes de cumprir com um preceito muito popular: “transformar o limão em limonada”. Sob este prisma, as companhias que levam a sério o meio ambiente tendem a mudar tanto os seus processos e produtos quanto a forma de operação, incluindo suas responsabilidades ambientais como parte da política da empresa.

## **Cenário ambiental**

Segundo dados disponíveis no setor ([www.siecesc.com.br](http://www.siecesc.com.br)), as três bacias hidrográficas da região carbonífera (Tubarão, Urussanga e Araranguá) apresentam um conjunto de 786 Km de rios contaminados por drenagem ácida, 115 depósitos de rejeitos pirítico-carbonosos e 77 lagoas ácidas, todos cadastrados no projeto de Recuperação Ambiental desenvolvido pelo Comitê Gestor de Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera de Santa Catarina. Tais índices devem-se, em grande parte, à herança de um século de mineração sem projetos acompanhados de um planejamento mínimo voltado ao controle dos impactos desta atividade sobre o seu meio ambiente, justificadamente pela inexistência de recursos técnicos aplicáveis. Além disso, a total descapitalização do setor por conta dos fatores já mencionados obrigou as empresas a deixarem de lado todos os projetos de desenvolvimento tecnológico e ambiental, pelo menos até a recuperação econômica das mesmas<sup>1</sup>.

Voltando à realidade da indústria do carvão nacional, pelo relato do histórico de desenvolvimento desta atividade é forçoso admitir que, até o final da década de 90, inexistem evidências de que o processo de degradação ambiental tenha diminuído de ritmo, embora possamos relacionar três novos fatores que passam a interagir no sentido da reversão desta tendência:

- O primeiro, representado pela desvinculação da atividade setorial com o Estado, o qual deixa de tutelar as operações comerciais, que passam a ser ditadas pelas regras do mercado;
- O segundo, centrado no aperfeiçoamento do sistema jurídico, que introduz o instrumento da Lei dos Crimes Ambientais – Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998;
- O terceiro, relacionado ao saneamento econômico do setor, o que se deu graças ao início da operação da 3ª Unidade Termelétrica - Usina Jorge Lacerda e a formalização de contratos para fornecimento de combustível a preços competitivos, restabelecendo as condições básicas para o planejamento financeiro das empresas do setor.

Em virtude dos fatos acima citados, o setor chega ao século XXI com outra visão de seu “negócio”, passando a agir pró - ativamente, retomando a pesquisa tecnológica, diversificando seus produtos e gerenciando os controles ambientais, razão pela qual passa a promover diversas ações envolvendo a adequação das suas unidades operacionais à Norma ABNT - ISO 14001:2004.

Este esforço, em paralelo aos projetos de recuperação dos passivos ambientais da bacia carbonífera, vem estimulando cada vez mais o desenvolvimento de metodologias capazes de promover soluções ambientais técnica e economicamente viáveis.

## Um caso prático

Dentre os empreendimentos de mineração de carvão instalados no Sul do Brasil, o presente artigo toma como exemplo a metodologia aplicada pela Carbonífera Criciúma no equacionamento dos problemas ambientais decorrentes de sua operação na UM II – Verdinho, unidade mineira instalada no Município de Forquilha - SC, cuja base econômica da população está centrada na agroindústria, mais especificamente, no extensivo cultivo de arroz irrigado.

---

<sup>1</sup> Em 1987 foi decretada a falência da mais tradicional mineradora da região, sucedânea da Lage e Irmãos, com operações nos Municípios de Criciúma e Lauro Muller. Em 1990 foram desativados dois dos maiores empreendimentos Federais na região: a CSN, que desativou todas as suas unidades mineiras; e a Petrobras, que desativou suas instalações na área da carboquímica.

À época em que o projeto de implantação da UM II – Verdinho foi elaborado (anos 70), os aspectos considerados com maior profundidade diziam respeito apenas a questões tecnológicas envolvendo a caracterização da jazida, sua lavra e beneficiamento, além dos aspectos econômicos relativos à avaliação da viabilidade do empreendimento. Neste sentido, a variável ambiental abordou apenas os aspectos mais visíveis da operação, tais como os sólidos em suspensão presentes nas emissões do beneficiamento e a combustão espontânea na pilha de rejeitos pirítico-carbonosos, sendo pouco conhecidos os mecanismos envolvidos na geração e controle da drenagem ácida, assim como a dimensão do seu impacto sobre o meio ambiente.

Esta consciência passa a freqüentar o dia-a-dia das empresas, à medida que os efeitos desta atividade vão se materializando, paralelamente a gradual pressão da sociedade e ao aumento das exigências dos órgãos de fiscalização, fatores decisivos na progressiva introdução das melhores práticas ambientais vigentes, responsáveis pela transformação de uma unidade mineira convencional em um modelo de gestão ambiental certificado pela Norma ISO 14001:2004.

### **Aspectos fisiográficos locais**

As instalações industriais da UM II - Verdinho estão situadas numa área drenada por dois rios: Mãe Luzia (Oeste) e Sangão (Leste), ambos tributários da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, cuja rede hidrográfica compreende, segundo GAPLAN (1986), o Sistema da Vertente Atlântica que deságua no Oceano Atlântico.

Sendo o clima regionalmente controlado por massas de ar de origem tropical marítima, o chamado Anticiclone do Atlântico Sul, e polar marítima, também designada como Anticiclone Polar, as oscilações térmicas são definidas segundo as diferentes estações do ano, com média variando entre 21,8°C (Itajaí) no litoral, e 13,0° C no planalto, em São Joaquim. O regime pluvial reflete uma amplitude menor em relação a outras regiões do estado, tais como Xanxerê (2.373 mm), no oeste, e Araranguá (1.219 mm), sendo a precipitação média de 1.254 mm.

As atividades de lavra transcorrem em subsolo, a uma profundidade de aproximadamente 150 m abaixo do nível do mar, cujo acesso se dá através de dois poços verticais e um plano inclinado. Para isto, a unidade mineira conta com instalação de apoio formada por escritórios, oficinas, pátios para estacionamento e manutenção da frota de veículos, além de área para estocagem de produtos acabados e rejeitos.

Estas instalações integram uma área contínua, visualizada na Figura 1, a qual ocupa uma superfície total de 130 ha, cujo entorno mantém as manchas de mata nativa preservadas em meio a extensos campos usados no cultivo de arroz irrigado.

O método de lavra empregado na extração do minério, de câmaras e pilares sem desmonte destes, permite a manutenção das condições superficiais do terreno, haja visto o fato do minério estar associado à seqüência estratigráfica da Formação Rio Bonito, definida por White em 1906.



Figura 1 – Situação da área física onde está implantada a UM II - Verdinho

A combinação da natureza deste jazimento com os referidos aspectos fisiográficos da região explica a natureza do principal impacto observado nesta atividade, que é a formação da drenagem ácida de mina (DAM). A DAM promove a dissolução de metais ao mesmo tempo em que favorece a propagação dos agentes nocivos, contaminando desta forma o solo com o qual entra em contato, assim como os corpos hídricos que o drenam.

### **Controle ambiental**

Todo plano para controle da poluição hídrica depende da identificação das fontes de contaminação e da compreensão dos mecanismos envolvidos no processo, adiantando que os sulfetos metálicos presentes no minério são a principal fonte de drenagem ácida.

Os estudos desenvolvidos no empreendimento ao longo da década de 90 permitiram a realização de um diagnóstico, identificando as principais fontes geradoras de drenagem ácida e suas possíveis formas de controle, o que resultou num plano de controle,

implantado no primeiro semestre de 2000, e que envolve todos os tipos de efluentes gerados no âmbito deste complexo industrial.

O primeiro aspecto considerado diz respeito à natureza do minério extraído, o qual é caracterizado pela incidência de sedimentos incombustos, tais como folhelhos, siltitos e argilitos, além da própria pirita, todos intercalados a leitos de carvão. Isto obriga o beneficiamento do minério bruto, resultando numa série de produtos divididos entre o carvão comercializável, dos tipos energético e metalúrgico, e uma parcela significativa conhecida como rejeitos, que é descartada, conforme mostra a representação esquemática da Figura 2.

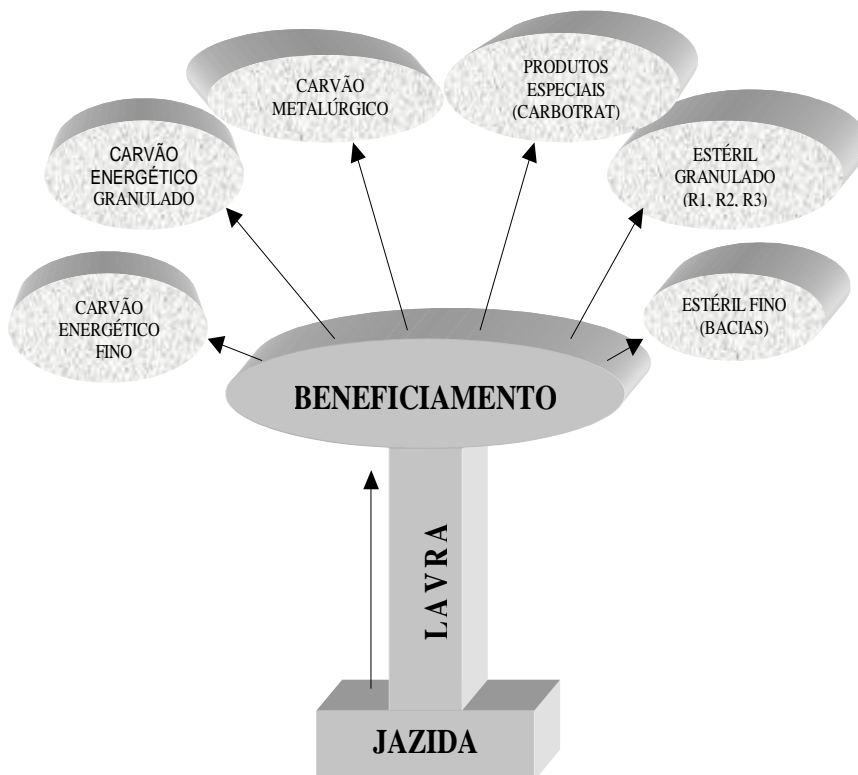


Figura 2 – Diagrama esquemático dos produtos de beneficiamento do carvão

O processo industrial envolve não apenas a extração e beneficiamento e comercialização do minério, mas também a disposição dos resíduos gerados pela atividade. Estes resíduos constituem a principal fonte de acidez presente nas drenagens da bacia carbonífera de Santa Catarina.

Isto fica evidenciado pela caracterização feita neste estéril, a qual seguiu um elenco de normas técnicas estabelecidas pela ABNT. Tais normas envolvem análises para classificação dos resíduos, que, no caso presente, são determinantes do potencial de geração de acidez e de neutralização.

O teste para previsão do potencial de geração de acidez (AP) e de alcalinidade (NP) segue a metodologia Sobek, a partir da qual são calculados o potencial de neutralização líquido (NNP) e a razão do potencial de neutralização (NPR), conforme evidenciado na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados da determinação do Potencial de Neutralização e do Potencial de Acidez

Parâmetros	R1	R2	R3
NP	4,85	10,63	29,53
AP	300,31	177,81	214,69
NNP	- 295,46	- 167,18	- 185,16
NPR	0,016	0,060	0,137

NP = Potencial de Neutralização

AP = Potencial de Acidez

NNP = Potencial de Neutralização Líquido (NNP=NP-AP)

NPR = Razão do Potencial de Neutralização (NPR=NP/AP)

Os resultados indicados na tabela acima confirmam uma situação real, evidenciada na imagem da Figura 3, na qual as águas drenadas diretamente dos depósitos de rejeitos acabaram comprometendo a vegetação que teve contato com este tipo de emissão.

Vale destacar que a NBR 10004:2004 também adota procedimentos para classificação de resíduos sólidos em relação ao seu grau de periculosidade, podendo os mesmos ser enquadrados em duas classes principais: Classe I (resíduos perigosos) e Classe II (resíduos não perigosos), sendo esta última subdividida entre subclasses A (não inertes) e B (inertes).

Os rejeitos produzidos na UM II foram submetidos a testes que avaliaram o grau de lixiviação e solubilização destes materiais, conforme determina a referida norma, a partir da qual se chegou aos resultados que levaram ao enquadramento destes rejeitos (R1, R2 e R3) na Classe II A, ou seja, resíduos não perigosos e não inertes.



Figura 3 – Registro dos efeitos do depósito de rejeitos sobre a vegetação junto ao flanco sul do módulo B de rejeitos (janeiro/1997)

A imagem acima, portanto, corresponde aos efeitos de um resíduo não perigoso e não inerte, disposto de forma não controlada em condições atmosféricas, prática comum na região carbonífera até final da década de 90. Este quadro é caracterizado pela falta de sistemas de contenção da lixívia formada e pela ausência de sistemas eficientes capazes de tratar este tipo de emissão.

### **Gestão de rejeitos**

Muito embora ao final dos anos 90 houvesse algum conhecimento acerca de formas convencionais para tratamento de drenagem ácida, sua implementação, na época, era economicamente inviável, além de depender de uma série de ações e controles complementares envolvendo a gestão da atividade de forma integrada. Medidas para controle e disposição de rejeitos sólidos passaram a ser reguladas a partir da norma NBR 13029, de 30.08.1993, cujos conceitos técnicos passam a ser adaptados aos depósitos já implantados, como no caso da UM II – Verdinho, que adaptou, entre outras medidas, canais de contenção e drenagem de águas lixiviadas de depósitos de rejeito (Figura 4).



Figura 4 – Canal de contenção responsável pela drenagem das águas de lixívia de rejeitos, integrado ao sistema de drenagem e tratamento de DAM (janeiro/2000), na mesma perspectiva da figura 3

Desta forma foram introduzidos os conceitos técnicos da norma, aplicáveis à disposição dos rejeitos, concomitantemente às soluções para gerenciamento da DAM a estes associada. A implantação de um sistema capaz de captar todas as águas de lixívia e de superfície, aduzindo-as ao sistema de tratamento desenvolvido na própria unidade mineira, foi fundamental para compensar as vazões excedentes de DAM.

A propósito da implantação deste sistema de tratamento, apto a tratar vazões superiores a uma média diária de 10.000 m<sup>3</sup>, sua implantação e operação só foram viabilizadas pelos baixos custos envolvidos.

### **Gestão dos efluentes**

O gerenciamento dos efluentes consiste na contenção da DAM no âmbito do Complexo Industrial da UM II – Verdinho, assim como no tratamento da vazão excedente. Para tanto, a implantação dos canais e diques de contorno periférico foi fundamental, pois respondem pela captação, contenção e recalque dos efluentes gerados no âmbito do complexo industrial da UM II – Verdinho.

Tais efluentes compreendem o conjunto das águas drenadas do subsolo, as quais, juntamente com as águas de escoamento superficial e de lixívia drenada nos depósitos de rejeitos, as quais são captadas e direcionadas para adução à usina de beneficiamento.



A implantação do sistema de tratamento da DAM a partir da usina de beneficiamento, esquematicamente representada no fluxograma da figura 5, incorpora os princípios de uma estação convencional para tratamento primário de efluentes. Tais princípios envolvem as misturas de reagentes, processos de aeração, floculação e decantação, todos desenvolvidos em instalações já existentes para beneficiamento do carvão mineral.

É justamente aí que a Carbonífera Criciúma S.A. inovou com seu sistema de tratamento (Pedido de Patente nº. 0301571-8, publicado no RPI nº. 1783 de 08/05/2005).

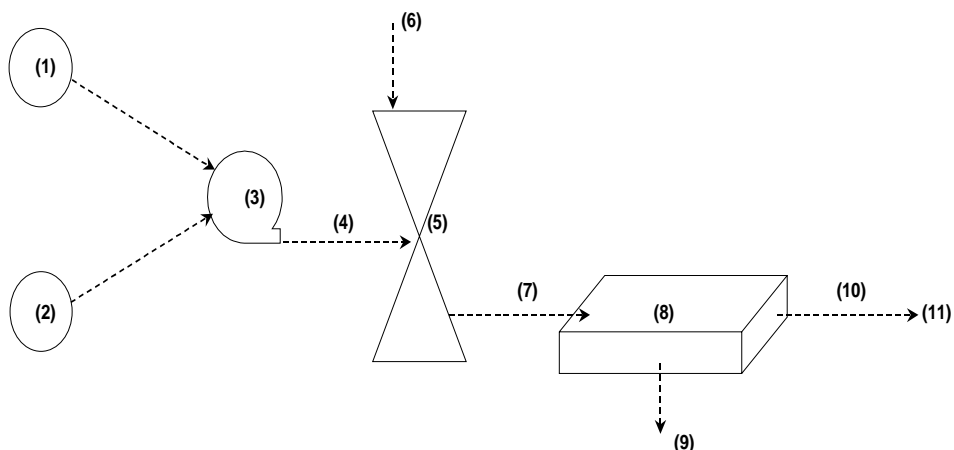


Figura 5 – Fluxograma esquemático do sistema de tratamento da UM II

- (1) – reagentes alcalinos
- (2) – efluente ácido a ser tratado
- (3) – estação de bombeamento adutora ao beneficiamento
- (4) – efluente neutralizado
- (5) – usina de beneficiamento
- (6) – carvão ROM
- (7) – efluente da usina do beneficiamento
- (8) – lagoas de decantação
- (9) – finos de minério e lodo
- (10) – efluente tratado
- (11) – corpo receptor

Pelo fluxograma acima, os efluentes envolvidos no âmbito do complexo industrial da UM II - Verdinho compreendem o conjunto das águas drenadas do subsolo, que juntamente com as águas de escoamento superficial, bem como as de lixívia drenadas dos depósitos de rejeitos, são captadas e direcionadas para adução à usina de beneficiamento.

Este efluente é neutralizado já no bombeamento do mesmo para a usina, a partir do qual passa por todo processo de aeração e floculação verificado nas estações convencionais.

O diferencial está na dinâmica do processo de jigagem do carvão, o qual permite maior interação entre as partículas que passam a precipitar com maior velocidade relativa, arrastando consigo os metais hidrolizados que permanecem retidos no lodo decantado (figura 6).



Figura 6 – Seqüência da decantação do efluente de beneficiamento (no detalhe).

Esta dinâmica é responsável pela maior interação dos íons originalmente presentes na polpa presente na água de processo no beneficiamento de carvão, na qual flocos de partículas alumino-silicatadas, óxidos metálicos e sólidos diversos são favorecidos pelas colisões promovidas no fluxo turbilhonar que resulta numa emissão líquida. Esta verdadeira polpa, caracterizada pelo elevado conteúdo de sólidos suspensos em solução alcalina (pH 8 a 9), é descartada em bacias para decantação visualizadas na figura 6.

Nestas bacias, 25% das partículas em suspensão passam a decantar num processo de separação sólido-líquido favorecido pela floculação dos hidróxidos metálicos juntamente

com as partículas alumino-silicatadas, restando uma fase líquida sobrenadante que passa a apresentar um padrão físico-químico condizente aos parâmetros legais de emissão estabelecidos na Lei Estadual nº. 5.793, de 15 de outubro de 1980.

Este efluente é, então, direcionado para a área designada ao projeto de tratamento passivo (ETD 5), denominada Bacia Biológica (11), a partir da qual é descartado para a drenagem local.

## Avaliação do sistema de controle implantado

O processo de escolha do sistema para controle ambiental, considerando a natureza e os objetivos envolvidos no projeto, tende a recair sobre soluções tecnologicamente complexas e sofisticadas, o que muitas vezes se deve a pressão por soluções rápidas. Tal fato pode acarretar investimento inicial e custo operacional tão elevados que uma decisão pela sua implantação pode vir a ser protelada. Neste caso, é extremamente útil priorizar soluções simples em relação a modelos padronizados, normalmente carregados de sofisticação e tecnologia, o que não significa abrir mão da qualidade e princípios tecnologicamente consagrados.

O princípio da simplificação está materializado no sistema de gerenciamento e tratamento de efluentes implantado em 2000 na UM II – Verdinho, o qual responde pela emissão de mais de 10.000 m<sup>3</sup>/dia de efluentes dentro dos padrões legais exigidos, o que foi fundamental no processo de implantação do sistema de gestão ambiental que se seguiu na empresa.

Em outros termos, considerando a diferença do teor em metais e acidez presentes na DAM (Tabela 2) em relação ao efluente liberado, considerando a vazão anual de aproximados 2,76 milhões de metros cúbicos tratados (Tabela 3), calcula-se o abatimento anual, que equivale a 1.300 toneladas de acidez, 166 toneladas de ferro, 100 toneladas de alumínio e 12 toneladas de manganês.

Tabela 2 – Registro médio anual da DAM aduzida ao beneficiamento (mg/L)

ANO	pH	Acidez	Fe Total	Al	Mn (tot.)	Zn	Cu	Sol. Tot.	Sulfatos
2001	3,22	223,92	21,56	16,76	4,73	1,14	0,04	2408,00	1221,67
2002	3,00	327,00	39,10	15,76	4,82	1,68	0,03	2316,18	1254,91
2003	3,20	626,90	95,70	31,27	6,35	2,13	0,08	2531,50	1492,52
2004	2,95	481,72	33,68	13,84	3,81	0,18	0,08	1464,60	1062,50
2005	2,94	355,67	47,35	23,46	3,80	1,62	0,04	2251,50	1271,42
2006	2,86	477,88	60,37	37,83	4,57	1,85	0,05	2245,83	1330,60

Tabela 3 – Registro médio anual da emissão final tratada e descartada (mg/L)

ANO	pH	Acidez	Fe Total	Al	Mn (tot.)	Zn	Cu	Sol. Tot.	Sulfatos
2001	6,69	11,66	0,75	0,25	4,78	0,18	< 0,01	2724,07	1392,91
2002	6,82	11,64	0,53	0,96	3,05	0,13	< 0,01	2540,64	1440,18
2003	6,75	5,35	0,24	0,14	2,38	0,22	0,27	2679,04	1441,72
2004	6,65	3,75	0,38	0,02	0,73	0,03	0,20	1587,10	1431,25
2005	6,79	5,42	0,21	0,87	0,78	0,04	0,01	2507,93	1441,69
2006	6,23	6,98	0,13	0,64	0,20	0,06	0,02	2487,67	1212,98

Os registros de monitoramento da DAM (Tabela 2) e respectivo efluente tratado (Tabela 3) apontam para uma crescente concentração da acidez, o que se deve ao fato de o fechamento do circuito de drenagem favorecer a participação das águas de lixívia, as quais são sabidamente mais concentradas em relação às demais águas do circuito.

Da mesma forma, é possível observar uma redução dos teores médios do Mn total no efluente descartado. Isto deve ao ajuste do pH, haja vista a dissolubilização do Mn em pH mais elevados, razão pela qual a dosagem dos reagentes é controlada pela faixa de pH entre 8,5 e 9,0. A partir desta faixa, as emissões passaram a teores sempre abaixo de 1 mg/L.

O sistema de gestão ambiental passou a ser implantado a partir deste momento. Após três anos de trabalhos para sua implantação baseada na norma NBR ISO 14000:2000, e em fevereiro de 2007, recebeu o correspondente certificado.

## Conclusões

As principais fontes de acidez e metais identificadas nesta unidade mineira provêm da drenagem de galerias e da lixívia dos depósitos de rejeitos, havendo um considerável volume de efluentes responsável por um significativo potencial de contaminação ambiental, o qual é basicamente associado aos rejeitos pirítico-carbonosos. Estes rejeitos são caracterizados pela NBR 10.004 como Resíduos Classe II-A (não perigoso e não inerte), com alto potencial de geração de acidez.

Portanto, o maior desafio na implantação do sistema de gestão ambiental em mineração de carvão reside no gerenciamento dos efluentes gerados no empreendimento, o que exige a adoção das melhores técnicas, que neste caso, são acompanhadas por conceitos inovadores.

Tais conceitos partem do estabelecimento de um circuito fechado de drenagens e aproveitamento das instalações existentes para implantação do sistema de tratamento em si.

O sistema de tratamento de efluentes concomitante ao beneficiamento mineral proporciona um maior contato entre partículas finas a ultrafinas dos minerais carbonosos e alumino-silicatados com os hidróxidos metálicos, favorecendo a formação de flocos. Desta forma, a precipitação dos sólidos e hidróxidos em suspensão é acelerada, permitindo o atendimento a praticamente todas as necessidades ambientais da UM II – Verdinho: reduzido investimento inicial, baixo custo operacional, eficiência na remoção de metais (incluindo o Mn), simplicidade de operação e manutenção. Dentre os benefícios indiretos foram verificados custos reduzidos para manutenção de equipamentos, mudança da mentalidade administrativa, melhoria na performance econômica, produtiva e ambiental, além da possibilidade de ampliação dos serviços e produtos.

A relação entre carvão produzido e volume de efluentes líquidos tratados foi de 2,5 m<sup>3</sup> de efluente por tonelada de minério ROM. A metodologia de tratamento de efluentes implantada na UM II – Verdinho resulta num custo médio em torno de 0,45 R\$/m<sup>3</sup>. Sua eficiência, no entanto, vem acarretando problemas operacionais associados à crescente concentração de acidez e episódios de transbordamento em períodos de maior concentração pluviométrica.

Atendendo ao princípio da melhoria contínua, e com vistas à mitigação dos problemas constatados ao longo destes anos de operação, fez-se necessária uma reavaliação deste sistema, a qual levou à implantação de uma série de obras complementares contemplando projetos para redução dos volumes de água incidente no empreendimento, desenvolvimento de novos produtos e serviços, implantação de sistemas passivos (químicos e biológicos), além da melhoria dos controles e processos, sempre buscando a simplificação daquilo que pode ser simplificado.

A experiência colhida ao longo deste processo evidencia que, ao contrário do temor inicial em torno da questão econômica, os efeitos práticos refletem na economia decorrente da melhoria da imagem da empresa e consolidação de uma mentalidade pró-ativa em relação ao trato das questões ambientais.

## Referências

- BELOLLI, Mário et al. (2002). História do carvão de Santa Catarina. Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina, 296 p. V1.
- ABNT/NBR 9252. 1986. Solo- Determinação do Grau de Acidez. Método de Ensaio. Fev, 1986, 2p.
- ABNT/NBR 10004. 2004. Resíduos Sólidos - Classificação. 1987, 63p.
- ABNT/NBR 10005. 2004. Solubilização de Resíduos. ~ 7p.
- ABNT/NBR 10006. 2004. Lixiviação de Resíduos. 2p.
- ABNT/NBR 10007. 2004. Amostragem de Resíduos. Procedimento. 21p.

- ABNT/NBR 13292. 1995. Solo- Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de solos granulares e de carga constante. 8p.
- BRASIL, DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL (1988), VII Simpósio Internacional do Gondwana, São Paulo, [edição Fac-Similar do relatório Final da Comissão de Estudos das minas de Carvão de Pedra do Braz, 1 de julho de 1904 a 31 de maio de 1906, por I. C. White]... Brasília,1988.
- BACK, A. J. 1997. Determinação da precipitação efetiva para irrigação suplementar pelo balanço hídrico horário: Um caso – estudo em Urussanga, SC. Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre. 132p.
- CETEM (2000) – Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense. Relatório Técnico elaborado pelo CETEM/MCT ao SIECESC. 3 V, 55p. Rio de Janeiro - RJ.
- KÖPPEN, W. (1948) - Climatologia. México, Fundo de Cultura Econômica. 380p.
- REDIVO, R. Análise do Potencial de Acidificação e de Neutralização em Rejeitos do Beneficiamento do Carvão Mineral da Região Carbonífera. Relatório Técnico, Empresas Rio Deserto. Criciúma, SC, 2004.
- RÜBENSAN, L.A. et al. Diagnóstico Ambiental da UM II - Verdinho. Criciúma: GEOLÓGICA, nov. 2001. (Diagnóstico Ambiental Contratado pela Carbonífera Criciúma S.A. junto à empresa GEOLÓGICA – Engenharia e Meio Ambiente Ltda.), 2001.
- SDM (1997) - Bacias hidrográficas do estado de Santa Catarina : Diagnóstico geral. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. 1997 Florianópolis Santa Catarina. 163p.
- SOBEK, A.A., SCHULLER, W.A, FREEMAN, J.R., SMITH, R.M. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Minesoils, EPA 600/2-78-054, 1978, 203p.
- WHITE, I.C. (1908) - Relatório Final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra no Brasil. Rio de Janeiro: Departamento Nacional da Produção Mineral, Parte I, p. 1-300.
- SIECESC – Homepage do Sindicato da Indústria das Empresas de extração de carvão do Estado de Santa Catarina acessada em 19.06.2007 < <http://www.siecesc.com.br> >

# Emprego da tecnologia de *backfilling* na gestão de resíduos sólidos da mineração de carvão

Roberto Heemann; Jose Carlos Franco Costa

Dentre as principais vantagens da utilização da tecnologia de preenchimento mineral (*backfilling*) em minas subsolo de carvão destacam-se: i) redução significativa da deposição de rejeitos em superfície, ii) confinamento dos pilares de carvão evitando a perda de área devido à queda progressiva de laterais, iii) minimização dos riscos e efeitos de subsidência em superfície aumentando a estabilidade em subsolo (Hu, 2001) e iv) aumento das taxas de extração de carvão.

Em termos ambientais, devido às baixas recuperações da camada total de carvão nas unidades de beneficiamento (podendo ser inferiores a 30%), há excesso de geração de rejeitos na região. O grande volume de rejeitos gerados demanda uma extensiva atividade de deposição de resíduos em superfície. Os custos de manutenção somados aos riscos ambientais inerentes ao processo de deposição tornam as operações complementares de *backfilling* de extrema relevância.

Em contrapartida, o principal risco ambiental relacionado ao preenchimento com rejeitos de carvão é a possibilidade de geração de drenagem ácida de mina (DAM) e de contaminação devido a variações sazonais do nível freático. A oxidação da pirita e a geração de minerais secundários são processos que ocorrem durante e após o ciclo de produção-beneficiamento e preenchimento mineral em subsolo.

Neste estudo, a área selecionada para a aplicação da metodologia de *backfilling* situa-se no município de Lauro Müller-SC, na porção norte da Bacia Carbonífera Sul-Catarinense. As atividades de preenchimento mineral foram executadas na Camada de Carvão Bonito Inferior na mina subsolo denominada Bonito-I, de propriedade da empresa Carbonífera Catarinense Ltda.

## Principais tipos de preenchimentos utilizados

Foram utilizados na Mina Bonito-I preenchimentos hidráulicos, de rocha e pastas minerais, ambos com ou sem a adição de cimento. Em determinadas áreas, foram combinados preenchimentos de fragmentos de rocha estéril com pasta mineral e polpa de cimento. Os métodos de transporte da mistura de rocha com cimento envolvem, após a homogeneização, a introdução, via tubulação, da mistura completa ou o transporte, via percolação, da polpa sobre os fragmentos de rocha estéril previamente dispostos em subsolo.

O preenchimento hidráulico é preparado a partir da drenagem dos rejeitos do lavador até uma densidade de polpa de aproximadamente 65-70% de sólidos. Posteriormente a polpa passa em hidrociclones para remover o excesso de finos a fim de aumentar a taxa de percolação do preenchimento. A mistura de preenchimento mineral é hidráulicamente bombeada da superfície através de uma rede de tubulações (76,20mm) e furos de sonda.

Uma pasta mineral pode ser considerada uma polpa não segregada (80-90% de sólidos em peso), o que significa que ela apresenta pouco excesso de água, quando estacionária, e permanece essencialmente como uma única fase homogênea (Henderson, 2006). A pasta mineral também pode ser definida como um sistema coloidal com características de um fluido homogêneo, no qual não ocorre significativa segregação granulométrica das partículas (Araújo, 2006).

Os preenchimentos por pasta mineral (*pastefill*) utilizados na Mina Bonito-I foram depositados em células-teste e também em zonas que delimitam as áreas circundantes ao painel preenchido por rocha estéril e rejeitos. Desta forma foi possível encapsular as áreas de *rockfill* do painel, reduzindo os custos de adição de cimento (Ferreira, 2007), devido à redução do volume de pasta mineral cimentada. Em determinadas travessas, foram depositadas camadas de preenchimento hidráulico constituído por finos seguidas pela deposição de pasta mineral cimentada. A deposição por camadas minimiza os riscos inerentes à percolação de águas.

## Vantagens e desvantagens dos preenchimentos minerais (*backfilling*)

As principais vantagens, custos e riscos (econômicos, de segurança e ambientais) resultantes da utilização do preenchimento mineral nas atividades de mineração são listados de forma resumida na Tabela 1. Dependendo do objetivo a ser alcançado, o preenchimento mineral pode representar a melhor alternativa técnica (relação custo-benefício) para uma situação específica de lavra, tanto a curto como a médio e longo prazo.



Tabela 1 – Principais vantagens e desvantagens da utilização de preenchimentos minerais na mineração

Benefícios	Custos & Riscos
<b>ECONÔMICOS:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permitem aumentar as taxas de extração de minérios</li> <li>• Reduzem a diluição</li> <li>• Auxiliam a recuperação de pilares</li> </ul>	<b>ECONÔMICOS:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maiores custos se o <i>backfill</i> utilizar agregantes</li> <li>• Atrasos no ciclo operacional da mina</li> <li>• Mão-de-obra e estrutura adicionais</li> <li>• Custos adicionais de drenagem</li> <li>• Diluição devido ao <i>backfill</i></li> </ul>
<b>SEGURANÇA:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoram a estabilidade regional da mina</li> <li>• Podem reduzir riscos de caimentos</li> </ul>	<b>SEGURANÇA:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Risco devido à quebra de barreiras e liquefação dos rejeitos (Aref, 1989)</li> <li>• Risco devido ao colapso das paredes consolidadas do <i>backfill</i></li> </ul>
<b>MEIO AMBIENTE:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispõem resíduos em subsolo minimizando os distúrbios em superfície</li> </ul>	<b>MEIO AMBIENTE:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Risco de contaminação de água subterrânea</li> </ul>

Fonte: Modificado de MiningLife, 2007

De modo similar, os aspectos ambientais, quando comparados com uma relação custo-benefício acrescida aos riscos inerentes ao processo de estocagem e manutenção em superfície, tornam-se econômicos a curto e médio prazos. Os custos de manutenção e logística de transporte a longo prazo dependem do planejamento global do sistema de preenchimento mineral. Os custos são normalmente incorporados nas taxas de extração de minério *Run of Mine (ROM)*.

## Estudo de caso

A área selecionada para a aplicação da metodologia de preenchimento mineral em subsolo é parte constituinte da Mina Bonito-I, que explora desde 1999 a camada de Carvão Bonito Inferior, no Município de Lauro Müller-SC. A camada Bonito Inferior pertence a Fm. Rio Bonito e ocorre, na área de estudo, a uma cobertura média de 60 metros de profundidade.

O painel selecionado para a aplicação do preenchimento mineral (P2-SE) situa-se próximo à boca da mina e à usina de beneficiamento Lavador Boa Vista. O painel foi minerado entre os meses de outubro e novembro de 2000 e abrange uma área total de 10.890m<sup>2</sup>. O volume livre estimado para o preenchimento mineral é de 32.700m<sup>3</sup>, considerando

uma altura média de camada total (C.T) de carvão de 3,05m e pilares com dimensões de 12m x 12m e 15m x 12m. A camada de carvão possui mergulho suave ( $1^{\circ}$  -  $2^{\circ}$ ) no sentido sudoeste. O rejeito de carvão utilizado como material de preenchimento mineral percorre distâncias de 200m a 1000m até o ponto de descarga e estocagem pré-estabelecidos.

Para limitar a área de estocagem do *backfill*, impedir a ocorrência de vazamentos ou perdas de polpa de cimento, bem como evitar riscos de deslizamentos do *backfill*, foram construídas barreiras de contenção em subsolo. São utilizados, para a construção das barreiras, blocos de concreto porosos e, em determinadas áreas, preenchimento de rocha cimentado (*rockfill*). As barreiras construídas com blocos de concreto permeáveis e furos de escoamento com tela, para minimizar o bloqueio ocasionado por resíduos finos, facilitam a drenagem. Os sistemas de drenagem são também utilizados porque os preenchimentos com baixo conteúdo de água impõem menores pressões às barreiras de contenção e, conseqüentemente, menores riscos em casos de ruptura (Bridges, 2003).

As barreiras de contenção do painel P2-SE da Mina Bonito-I também são construídas em forma curva, para desenvolverem um arco mais eficiente do que uma barreira planar em relação às rochas encaixantes, quando submetidas à carga de pressões. Porém, interações complexas entre tensões e deformações ocorrem nas terminações das barreiras sob carga, considerando ainda os perfis irregulares das superfícies das litologias. Até o momento foram construídas vinte e três (23) barreiras de contenção de rejeitos em subsolo. Tais barreiras possuem sistema de drenagem escalonado utilizado também para o monitoramento e amostragem da qualidade da água.

A taxa de percolação, para preenchimentos hidráulicos, é o critério mais importante do projeto. Uma taxa de percolação mínima de 10 cm/hora é uma regra comum em muitas minas, facilitando a drenagem do preenchimento com baixo potencial de liquefação. O teste de percolação deve ser conduzido de maneira contínua até atingir uma taxa de percolação constante (*steady state*). É importante notar que a taxa de percolação inicial é mais alta e decresce gradualmente já que o movimento da água na coluna do preenchimento contribui para aumentar a densidade. No caso da Mina Bonito-I, para evitar problemas de liquefação e otimizar o sistema de drenagem a deposição ocorreu em camadas, com intervalos de recolocação superiores a uma semana.

Considerando o volume disponível em subsolo para o retorno dos rejeitos e o fator empolamento (aumento do volume), que é variável com o tamanho da partícula, temos, para cada metro cúbico *in situ* de camada de carvão ( $\rho=2,1\text{t/m}^3$ ), após o desmonte, britagem primária em subsolo e secundária no Lavador Boa Vista (LBV), resultam aproximadamente  $1,51\text{ m}^3$  de material com peso específico aparente de  $\rho=1,39\text{ t/m}^3$  para a camada total de carvão (C.T), com granulometria de  $1^{1/2}$ " polegadas.

Após as etapas de desmonte e britagem, a C.T de carvão é processada no LBV, onde são recuperados, em média, 30% de um produto C.E 4.100 kcal gerando 70% em volume de rejeitos disponíveis para o preenchimento mineral. Em termos gerais, considerando a adição de 5% de cimento, volume bloqueado por condições de lavra, acesso, capacidade de carga e grau de compactabilidade, o *backfill* representa um retorno médio de 80% do volume total de rejeitos gerados pela usina de beneficiamento.

## Caracterização do material de preenchimento

As características e propriedades mais importantes do material empregado no preenchimento que devem ser consideradas no projeto de *backfilling* são: i) mineralogia, ii) peso específico, iii) umidade, iv) percentual de sólidos, v) razão de vazios, vi) porosidade, vii) reologia, viii) distribuição granulométrica, ix) resistência à compressão uniaxial e x) resistência ao cisalhamento.

A caracterização mineralógica é importante porque determinados minerais (particularmente o quartzo) são muito abrasivos e podem causar desgaste nas tubulações do *backfill*. Alguns minerais causam a quebra do cimento com o passar do tempo, e minerais com hábito placoso assentam mais devagar do que partículas arredondadas. A distribuição granulométrica determina, portanto, a permeabilidade do preenchimento; quanto maior o conteúdo de finos menor a taxa de percolação e vice-versa.

Os minerais originais constituintes da camada total de carvão *in situ* são estáveis naquele ambiente, entretanto a oxidação do *backfill*, após a sua estocagem em subsolo e antes da inundação da mina, pode liberar metais e produzir precipitados de minerais secundários, como o sulfato Halotrichite ( $Zn, Fe, Mn$ )  $Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$  e o mineral sulfato de ferro hidratado Melanterita ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ), que ocorrem na Mina Bonito-I (Figura 1). Os minerais secundários são mais solúveis do que os minerais originais. Portanto, pode ocorrer uma concentração inicial mais elevada de metais, seguida por uma depleção de concentração com o decorrer do tempo, após a inundação dos painéis.

## Materiais de preenchimento e materiais utilizados

Os materiais empregados nas atividades de preenchimento mineral podem ser agrupados conforme o método de preenchimento utilizado. Para o preenchimento do tipo *rockfill*, realizado na Mina Bonito-I, são utilizadas rochas estéreis, subproduto da exploração da camada total de carvão em subsolo. As litologias estéreis são constituídas por siltitos e arenitos finos que ocorrem intercalados com os leitos de carvão e/ou por fragmentos (blocos ou matacões) que deslocaram do teto imediato da mina ou resultaram de caimentos em subsolo.

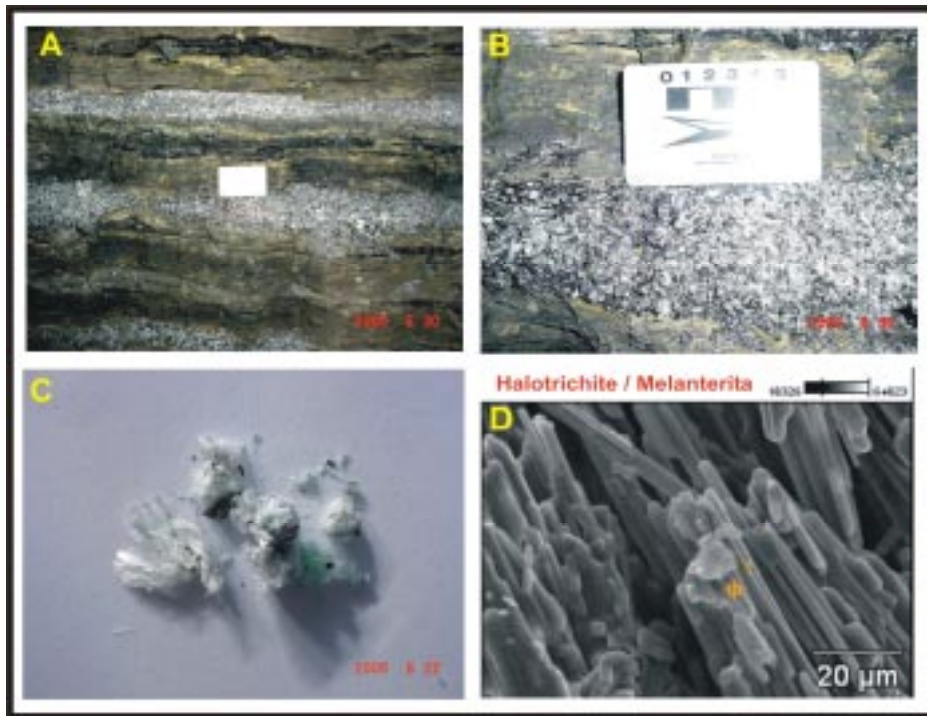


Figura 1 – Minerais secundários (Halotrichite e Melanterita) formados a partir da alteração por hidratação da marcassita (pirita) na Mina Bonito-I (Lauro Müller-SC). A-Pilar de carvão do painel P2-SE; B-Detalhe do nível de ocorrência; C-Hábito fibroso dos minerais secundários; D-Análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) - Laboratório de Mineralogia e Gemologia (UFRGS)

Para compor o preenchimento hidráulico e por pasta mineral, são utilizados os rejeitos finos a ultrafinos depositados nas bacias de decantação da unidade de beneficiamento Lavador Boa Vista. O preenchimento hidráulico é bombeado por tubulações com densidades médias de polpa não superior a 60% em peso de sólidos. Em relação ao preenchimento por meio de pasta mineral (*pastefill*) na Mina Bonito-I são empregados ambos os rejeitos das bacias de decantação e todos os rejeitos sólidos do processo de beneficiamento (rejeito 1, rejeito 2 e rejeito 3). O percentual de sólidos do *pastefill* é superior a 75%. Além dos rejeitos acima discriminados, são utilizadas quantidades variáveis de cimento. O cimento utilizado é o Cimento Portland Composto CP II – E-32, com características físico-químicas especificadas conforme a NBR 11578/1991.

Dentre as principais propriedades de interesse de uma pasta mineral, destacam-se: i) características reológicas, como a tensão de escoamento e a viscosidade; ii) altura de abatimento, que é determinada através do teste de abatimento; iii) ângulo de repouso, o qual pode ser determinado mediante a utilização do teste de calha; e iv) propriedades mecânicas da pasta cimentada.

O comportamento do *backfill* cimentado com alto conteúdo de enxofre (rejeitos de carvão) está sujeito a mudanças físicas, mineralógicas e químicas (alteração) que ocorrem com o decorrer do tempo e podem afetar a resistência mecânica do preenchimento. O referido mecanismo de alteração consiste tipicamente do ataque sulfático. Este processo pode ocorrer rapidamente durante a cura e depende dos agregantes usados em conjunto com o cimento. A reação envolve a dissolução das fases cálcicas hidratadas, seguida pela formação de fases expansivas, resultando na degradação das propriedades mecânicas do *backfill*.

Em conjunto com o cimento são utilizados outros agregantes, como as cinzas volantes (*fly ash*), as quais são produzidas em grandes quantidades pela combustão do carvão na geração de termelétrica (Usina Jorge Lacerda – Capivari de Baixo/SC). A utilização de cinzas-volantes como um agregado (Tabela 2) na indústria do concreto (ACI, 1990) e para aumentar a consistência da pasta mineral em minas de carvão é de comprovada eficiência (Gillet, 1998). O Backfill com adição de cinzas volantes fornece suporte, confinando os pilares de carvão, minimizando a ocorrência de vazamentos de água em subsolo, e reduzindo a disposição de resíduos da queima do carvão na superfície.

A natureza pozzolânica das cinzas volantes, bem como a distribuição de tamanho ultrafino torna as cinzas volantes ideais para utilização em misturas de pasta mineral.

Tabela 2 – Composição média das cinzas volantes (*fly ash*) subproduto da queima do carvão energético CE-4500 kcal (43% cinzas) de 100 ensaios executados nas frações <0,6mm e >0,6mm

Composição média das cinzas volantes ( <i>flyash</i> )			
Elemento	Percentual %	Elemento	Percentual %
SiO <sub>2</sub>	57,01	MgO	0,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,99	Na <sub>2</sub> O	0,20
TiO <sub>2</sub>	1,20	K <sub>2</sub> O	2,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,50	SO <sub>3</sub>	2,40
CaO	1,70	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10

Fonte: SIECESC Usina Termelétrica Jorge Lacerda-Capivari de Baixo-Santa Catarina (03/2007)

Conforme verificado em experimentos realizados na Mina Bonito-I o uso de cinzas volantes (*fly ash*), as quais são mais resistentes ao ataque ácido, em geral reduz a deterioração do *backfill*. Amostras de pasta mineral cimentada contendo cinzas volantes foram mantidas em subsolo simulando ataque ácido *in situ*. Os corpos-de-prova sofreram efeitos mínimos quando comparados com aqueles que não utilizaram o agregante cinzas volantes.

## Ensaios de consistência e resistência

A reologia é o estudo do comportamento das tensões de cisalhamento em líquidos. A viscosidade é a medida da resistência ao cisalhamento ou da resistência ao movimento entre diferentes camadas de um fluido ou mistura. Na terminologia da indústria do concreto, a viscosidade é também conhecida como trabalhabilidade (definida através do ensaio de abatimento).

As misturas de pasta mineral possuem comportamento de fluidos não-newtonianos, isto é, não exibem viscosidade constante com a variação da taxa de fluxo. Pesquisas e experimentos indicam que pastas minerais podem ser consideradas fluidos plásticos, exibindo viscosidade constante com o aumento da velocidade de fluxo, após o limite de tensão diferencial ser ultrapassado.

Para estimar a consistência da pasta mineral, são executados testes de abatimento. Os abatimentos em pastas minerais utilizadas na Mina Bonito-I são, em média, de 6-10 polegadas. O *pastefill* necessita de menor quantidade de cimento para atingir resistências equivalentes, quando comparado a preenchimentos hidráulicos convencionais.

A viscosidade de uma mistura de pasta mineral é difícil de prever, pois é influenciada por muitos fatores incluindo: densidade de polpa, tamanho de grão, mineralogia e forma dos grãos. O teste de abatimento (ABNT, 1992) é utilizado como uma medida de viscosidade da pasta mineral. Misturas de pastas minerais normalmente mostram abatimentos de 15-20 cm (6 "-10") utilizando um cone padrão de 12".

A resistência à compressão não confinada (*Unconfined Compressive Strength-UCS*) é medida em preenchimentos cimentados utilizando corpos-de-prova cilíndricos com diâmetros de 75-100-150 mm, no caso de rejeitos de pasta mineral. Tamanhos de amostras de até 300 mm ou mais são desejáveis para testes de *rockfill* já consolidado. O resultado do ensaio UCS é normalmente usado como uma medida indireta da resistência ao cisalhamento do preenchimento, que, por sua vez, é medida por testes diretos de cisalhamento ou triaxiais. O módulo de elasticidade também é calculado por meio do teste UCS.

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram executados nos laboratórios de mecânica de rochas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS-DEMIN), em Porto Alegre-RS, e na Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), no laboratório do IPAT, em Criciúma-SC. O tempo de cura do cimento é considerado nos ensaios, sendo utilizados principalmente os intervalos de 07 – 28 e 35 dias de cura. O objetivo dos ensaios é verificar a resistência mecânica das misturas de rocha e rejeitos e sua relação com as variações de adição de cimento e agregantes. É também analisada a influência entre a distribuição de faixas granulométricas na mistura e a sua respectiva resistência.

Em termos de resistência, testes executados na Mina Bonito-I, em pastas minerais cimentadas contendo 77% rejeitos, 3% *fly ash*, com abatimentos de 175 mm e 250 mm e conteúdo de 5% de cimento em relação ao peso de rejeitos sólidos secos atingiram resistências UCS de 2,10-8,15 Mpa (Figura 2). Após o intervalo de tempo de cura de 28 dias os resultados mostraram ganhos significantes em resistência com a adição de 3% e 5% em peso de cimento. As pastas preparadas com cimento e *fly ash* apresentaram as maiores resistências (> 9 Mpa). Os testes de abatimento mostraram que, na maioria das misturas, o aumento da fração de finos causou aumento na viscosidade das pastas minerais.



Figura 2 – Corpos-de-prova de pasta mineral com rejeitos totais R1-R2-R3 do LBV (Camada Bonito) com adição de cimento NPC (5%), fly ash (5%) e botton ash

## Transporte do preenchimento mineral

O transporte dos resíduos de carvão é uma das mais importantes atividades relacionadas ao sucesso da implementação da metodologia de preenchimento mineral. A mistura ótima para as características específicas do material a ser utilizado no preenchimento deve ser criteriosamente especificada e testada. Como o *pastefill* é um preenchimento mineral de alta densidade com baixa razão de vazios, é necessária uma fração componente de finos na polpa da mistura, para viabilizar o transporte do preenchimento ao longo da rede de tubulações.

Os resíduos finos minimizam a perda de água, facilitando o transporte da pasta mineral. Como regra geral, para otimizar a transportabilidade da pasta mineral, em média 15% do total da mistura é constituída de resíduos finos. Uma mistura com 15% de finos (lodo

da bacia) tem influência na consistência, isto é, excede o volume de poros das partículas maiores e apresenta área superficial úmida suficiente para trapear a mistura de água na matriz da pasta, evitando a segregação da matriz e a conseqüente perda de água. Se o conteúdo for inferior a 15%, a água é liberada formando “pacotes de areia” (*sand-pack*) nas tubulações, efeito materializado quando o transporte é reiniciado. Se o conteúdo for superior a 15%, a menor quantidade de água livre representa maior densidade e maior resistência ao fluxo.

O estudo reológico das propriedades de fluxo (abatimento) e de resistência (UCS) da pasta mineral é fundamental para definir a mistura de menor custo e eficiência para as operações da mina. É possível obter medidas diretas e também simular o projeto do sistema de distribuição de tubulações utilizando testes em *loop* da tubulação (USGS, 1995) tanto em laboratório como em escala operacional (*pipe loop testing*). Em termos gerais, o *pastefill* preparado com alta densidade de polpa tem maiores resistências em comparação com aqueles preparados com densidades de polpa inferiores. Na prática, isto significa que um *pastefill* com alta resistência pode ser preparado com menores custos utilizando densidades de polpa mais elevadas, ao invés de adicionar maiores quantidades de cimento.

O transporte de rejeitos na Mina Bonito-I (Figura 3) é executado por meio de tubulação, no caso de preenchimento hidráulico e pasta mineral (*pastefill*), e por intermédio de caminhões, *LHDs* e tratores de esteira, no caso de preenchimento de rocha (*rockfill*). Em determinadas condições, é utilizada uma estação para mistura de cimento em subsolo, para complementar a matriz do preenchimento de rocha.



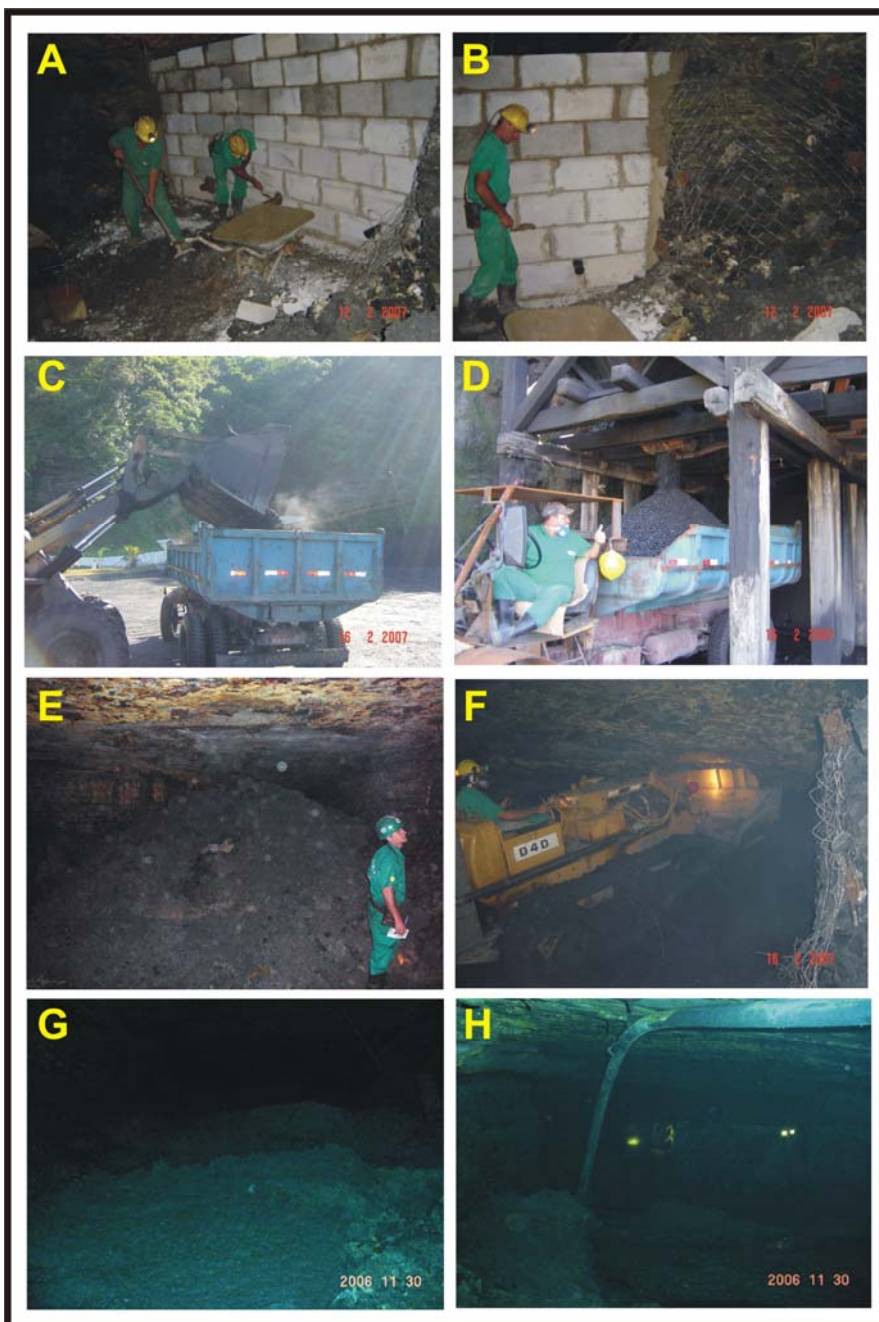


Figura 3 — Principais etapas de transporte e deposição do backfill em subsolo. A-B: construção das barreiras de contenção curvas e com sistemas de drenagem; C-D: transporte de rejeitos totais (C) e seleção de rejeitos R2 por caminhão (D); E-F: deposição de rejeitos totais (R1+R2+R3) e compactação com trator de esteira (F); G: deposição de camadas de pasta mineral por tubulação de teto (H)

Foram também testadas células de *backfill* isoladas com a alternância de camadas de preenchimento hidráulico, *rockfill* e pasta mineral (*pastefill*) para simular as condições de resistência, selagem, percolação e ataque ácido. A tipologia e quantidade de cimento utilizado devem prever as distâncias e tempos de transporte dos resíduos para que o tempo de cura do cimento seja compatível com o ciclo global de operação do sistema de *backfilling*.

Embora os rejeitos totais da usina possam ser utilizados na pasta, não há espaço suficiente para colocar todo o volume em subsolo, uma vez que a densidade do *pastefill* é significativamente menor do que a do minério extraído. O balanço suprimento-demanda ocorre mesmo onde uma quantidade substancial de minério concentrado é removido durante o processamento mineral (lavadores).

Em termos gerais, quanto maior a concentração da densidade de polpa menor o abatimento. A quantidade de cimento utilizado no *pastefill* oscila entre 3% e 6% do percentual em peso. Pequenas mudanças na densidade de polpa podem resultar em um grande aumento na pressão da tubulação, principalmente nas pastas minerais. Em preenchimentos hidráulicos, quanto maior o tamanho do grão, mais rápida a velocidade final de assentamento. Além disso, a velocidade da polpa na tubulação deve exceder a velocidade de assentamento.

A distribuição do tamanho de grão afeta a razão de vazios, e por extensão, a resistência do preenchimento mineral, além da transportabilidade do preenchimento. Preenchimentos com distribuição mais uniforme apresentam menores taxas de vazios e maior resistência. Os dois principais requisitos para o desempenho do *pastefill* são: i) as propriedades de fluxo para o transporte da pasta e ii) alcance da estabilidade requerida para o preenchimento. As taxas de preenchimento estão relacionadas com a velocidade de extração do minério e, é claro, com a capacidade de geração de rejeitos da usina de beneficiamento.

Quanto maior o tempo em que a pasta mineral fica inativa na tubulação, maiores as tensões diferenciais (*yield stress*) para reiniciar o fluxo. Se a tensão diferencial é alta e não há energia suficiente para remobilizar a pasta, a tubulação será obstruída.

Os rejeitos totais são usados com frequência na preparação da pasta, mas, muito raramente, podem ser completamente usados, devido ao aumento de volume resultante da trituração e cominuição do minério. As vantagens da utilização de rejeitos totais são: i) os rejeitos são depositados com maior densidade reduzindo o volume de estoque e ii) a permeabilidade do preenchimento depois de depositado é significativamente menor.

O fluxo, nas tubulações do *pastefill*, tem as seguintes vantagens (Henderson, 2006): i) velocidades baixas na tubulação, resultando em menor desgaste da tubulação e furos e ii) fragmentos grossos, tais como rocha triturada, podem ser seguramente transportados

na matriz da pasta mineral. Os testes efetuados com pastas contendo 75-85% de sólidos e *fly ash*, com abatimentos entre 150 mm e 250 mm, solidificaram em menos de 48 horas.

No caso dos preenchimentos hidráulicos previamente testados na Mina Bonito-I, verifica-se que é preciso adotar um consumo de água menor no preenchimento para diminuir o consumo de cimento e agregantes. Para o transporte são necessárias velocidades de fluxo maiores que 2 m/s para manter uma dispersão homogênea dos componentes de preenchimento na polpa.

## Impactos ambientais

Os impactos ambientais resultantes da atividade de preenchimento mineral em subsolo estão principalmente relacionados ao processo de oxidação da pirita e posterior geração de drenagem ácida de mina (DAM) em subsolo. A ocorrência de DAM concomitante à inundação da mina, após o fechamento ou flutuações do nível freático, pode iniciar o processo de contaminação de águas subterrâneas.

Foram coletadas e analisadas amostras de água dos efluentes utilizados para a mistura de água + polpa + rejeitos sólidos durante o transporte da pasta mineral (*pastefill*). Amostras coletadas do sistema de drenagem do backfill depositado há 15 meses e amostras de água representativas do *rockfill* também foram analisadas. Porém, devido as condições secas do local de deposição, foram simulados os processos de alteração e DAM em subsolo (Figura 4).

Dependendo do tipo de preenchimento mineral utilizado e da adição ou não de cimento (com ou sem outros agregantes), os impactos ambientais são efetivamente minimizados. Através de furos de sonda e dos sistemas de drenagem, são obtidas amostras de água para análises químicas a fim de determinar os fatores físicos e químicos que controlam a liberação de metais pesados para as águas subterrâneas.



Fonte: Gilda de Souza R. da Silva- Resp. LAEC

Figura 4 – Experimento de ensaio cinético realizado pelo Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão (LAEC) para simular a alteração e geração de DAM de amostras de carvão e resíduos.

Os procedimentos do ensaio cinético realizado no LAEC com o objetivo de simular a alteração das amostras envolvem a coleta de amostras representativas de 1 kg de resíduos por célula (seca). A temperatura da água deve variar de 28 a 32° C e a granulometria em +/- 6 mm. A amostra deve ser lixiviada com 500 a 1000 ml de água destilada por aproximadamente duas horas. Após sucessão de exposição de três dias de ar seco (sílica) e três dias de ar úmido, inicia-se nova lixiviação. O ciclo de lixiviação - ar seco - ar úmido deve ser realizado por um período mínimo de 20 semanas. Após a secagem e pesagem, é realizada a coleta e análise dos resíduos líquidos para os parâmetros Fe, Zn, Al, Mn, SO<sub>4</sub>, pH, condutividade, acidez e alcalinidade.

A definição e quantificação dos impactos ambientais resultantes do preenchimento mineral cimentado ou não utilizando rejeitos de carvão deve considerar os seguintes aspectos físico-químicos e de monitoramento (USGS, 1996):

- Coleta de dados: campo x laboratório (análise mineralógica e química dos resíduos).
- Lixiviação e solubilização - dissolução e filtragem dos constituintes solúveis do preenchimento por fluidos através de percolação.
- Distribuição do tamanho das partículas de amostras de rejeitos.
- Hidroquímica x permeabilidade do ar x saturação de água.

- Capacidade de neutralização ácida do *backfill* cimentado, cimento *portland* e resíduos.
- Lavagem com água deionizada. Concentração de elementos em amostras contendo cimento depois de lavadas com água deionizada por sete (07) dias;
- Lavagem com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), determinar: i) potencial de neutralização de amostras do *backfill* cimentado e ii) a concentração de elementos do *backfill* cimentado após lavagem em  $H_2SO_4$  por 227 dias.
- Qualidade da água, incluindo índices de saturação e a média e variações de concentração de elementos em amostras de água do *backfill* cimentado.

## Considerações finais

O estudo de caso e a análise dos resultados obtidos utilizando os rejeitos da mineração de carvão da Camada Bonito Inferior (Lavador Boa Vista), no município de Lauro Muller-SC, mostram que:

- Os resultados obtidos indicaram que a aplicação de preenchimentos hidráulicos, por pastas minerais e rocha estéril em minas subsolo de carvão mostrou-se uma alternativa viável e eficaz às práticas convencionais de disposição subaquática e superficial de rejeitos de carvão. A redução da deposição de rejeitos em superfície pode ser superior a 80%. Não há registros, até o momento, de impactos ambientais significativos relativos à contaminação de águas subterrâneas. Porém, estudos complementares em execução irão investigar os efeitos a longo prazo da estocagem do *backfill* em subsolo.
- Com relação ao objetivo de manter a integridade dos pilares de carvão, este é alcançado com visível redução do processo de perda de área útil dos mesmos, minimizando desta forma os riscos de subsidência em superfície. O fator confinamento, resultante do preenchimento mineral, se mostra eficaz na ação de minimizar os efeitos estruturais resultantes da ocorrência de sistemas de fraturas e queda de laterais ou blocos dos pilares de sustentação da mina Bonito-I.
- A retenção de água é maior no *backfill* cimentado em comparação com o não cimentado. A maior retenção de água reduz a área superficial exposta à oxidação, reduzindo a quantidade de ácido produzido. O ácido é neutralizado pelo cimento (c.f. Collepari, 1996) e por minerais contidos no *backfill*.
- A adição do cimento altera as características físico-químicas do *backfill*, diminuindo as reações de oxidação que produzem ácidos, resultando em uma menor mobilização de metais. As mudanças na estrutura física do *backfill* com a adição de cimento corroboram com o aumento da capacidade do preenchimento em reter água. As maiores retenções de água reduzem a permeabilidade do *backfill* ao ar e diminuem a área superficial total de sulfetos disponível para a oxidação direta. Além desse fator, a adição

de cimento reduz significativamente a condutividade hidráulica do *backfill*, reduzindo o transporte de metais por meio da redução da taxa de fluxo de água subterrânea no *backfill* que está sendo inundado. Com a inundação da mina, a redução da quantidade de oxigênio limitará a oxidação de sulfetos, bem como a precipitação de hidróxidos metálicos. A geração ácida e liberação de íons metálicos em *backfill* cimentado é menor do que em preenchimentos não cimentados.

- A distribuição granulométrica e a homogeneização dos rejeitos afetam a integridade estrutural do *backfill* cimentado sob ataque por água ácida; a quebra da estrutura libera mais rapidamente materiais neutralizantes. A água em excesso evapora deixando vazios, criando tensões e fissuração, caminhos preferenciais para o ataque ácido (Figura 5A). Porém, amostras com controle de processamento e homogeneizadas com a polpa de cimento mostram efeitos mínimos de deterioração (Figura 5B) em subsolo.

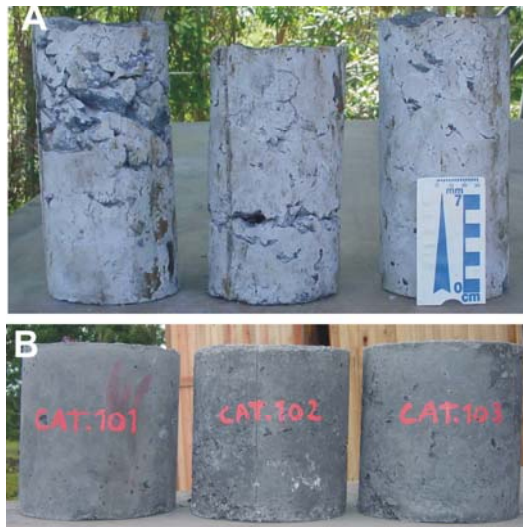


Figura 5 – (A) Corpo-de-prova de pastefill cimentado (5% NPC), não classificado submetido à simulação de DAM in situ com mistura não homogênea de cimento, após 227 dias. (B) Corpo de prova de backfill cimentado (5% NPC), com adição de cinzas volantes (3%) e R2+R3 (75%) homogeneizado e classificado submetido à simulação de DAM in situ, após 315 dias. Mina Bonito-I (Carbonífera Catarinense Ltda)

- O preenchimento mineral deve ser considerado uma componente integral do processo de mineração, concomitante às atividades de exploração e não apenas um procedimento complementar pós-extração das camadas de carvão. Em média 80% dos rejeitos gerados são consumidos pelas atividades de *backfilling* minimizando os impactos ambientais resultantes da deposição e os efeitos de subsidência em superfície, além de maximizar a vida útil dos pilares de carvão (sustentação da mina).

## Referências

- ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Use of fly ash in concrete. ACI 226 3R-87. In: **ACI Manual of Concrete Practice 1990, part 1, Materials and General Properties of Concrete**. Detroit. ACI COMMITTEE 226, 1990.
- ARAUJO, A. C.; VALADÃO, G. E. S.; GAMA, E. M. Consistencia, Fluidéz y Viscosidad de Pastas Minerales de Relaves de Hierro. **Revista Información Tecnológica del Chile**, La Serena - Chile, v. 17, n. 2, p. 71-79, 2006.
- AREF, K., HASSANI, F.P. AND CHURCHER, D. **A study on liquefaction potential of paste backfill** in: **Innovations in Mining Backfill Technology**, Hassani et al. (eds), Balkema, Rotterdam, p. 405-414, 1989.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7223 **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578–**Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro 1991.
- BRIDGES, M.C; GRICE, T. **Digging Deeper**. AMC Consultants Pty Ltda, 2003.
- COLLEPARDI, M. Concrete **deterioration from sulfate and acid attacks**. Course on Durability of concrete. In: **International Congress Highperformance Concrete – Performance and Quality of Concrete Structures**. SC-Brazil, 1996.
- FERREIRA, Z. P. Relatório Técnico Mina Bonito-I. **Consultoria prestada a empresa Carbonífera Catarinense Ltda**. Lauro Müller - Santa Catarina, 2007.
- GILLETT, P. **A Study into the utilisation of flyash in a paste consistency to backfill underground coal mines**. Mining . UNSW . EDU .AU pag 10-20, 1998.
- HENDERSON, P. **Deep and High Stress Mining 2006- Paste Fill** Melbourne, Australia, 2006.
- HU, B.; ZHAO, Q.; FAN, S.; HAO, J., 2001. Study on Subsidence and Interaction Between Backfill and Pillar in Coal Mining. In: **Minefill 2001: Proceedings of the 7 Th International Symposium on Mining with Backfill**. p.181-185.
- MININGLIFE, 2007**. Disponível em: < [www.mininglife.com/Miner/Backfill/Types](http://www.mininglife.com/Miner/Backfill/Types) > . Acesso em: 12 mar. 2007.

USGS. United States Bureau of Mines & United States Department of the Interior. **Environmental Impacts of Cemented Mine Waste Backfill**. Report of Investigations (RI) n° 9599, p.1-23, 1996.

USGS. United States Bureau of Mines & United States Department of the Interior. **Transport of Total Tailings Paste Backfill: Results of Full-Scale Pipe Test Loop Pumping Tests**. Report of Investigations (RI) n° 9573, p.1-37, 1995.



# Emprego da tecnologia de *backfilling* na gestão de resíduos sólidos da mineração de carvão

Roberto Heemann; Jose Carlos Franco Costa

Dentre as principais vantagens da utilização da tecnologia de preenchimento mineral (*backfilling*) em minas subsolo de carvão destacam-se: i) redução significativa da deposição de rejeitos em superfície, ii) confinamento dos pilares de carvão evitando a perda de área devido à queda progressiva de laterais, iii) minimização dos riscos e efeitos de subsidência em superfície aumentando a estabilidade em subsolo (Hu, 2001) e iv) aumento das taxas de extração de carvão.

Em termos ambientais, devido às baixas recuperações da camada total de carvão nas unidades de beneficiamento (podendo ser inferiores a 30%), há excesso de geração de rejeitos na região. O grande volume de rejeitos gerados demanda uma extensiva atividade de deposição de resíduos em superfície. Os custos de manutenção somados aos riscos ambientais inerentes ao processo de deposição tornam as operações complementares de *backfilling* de extrema relevância.

Em contrapartida, o principal risco ambiental relacionado ao preenchimento com rejeitos de carvão é a possibilidade de geração de drenagem ácida de mina (DAM) e de contaminação devido a variações sazonais do nível freático. A oxidação da pirita e a geração de minerais secundários são processos que ocorrem durante e após o ciclo de produção-beneficiamento e preenchimento mineral em subsolo.

Neste estudo, a área selecionada para a aplicação da metodologia de *backfilling* situa-se no município de Lauro Müller-SC, na porção norte da Bacia Carbonífera Sul-Catarinense. As atividades de preenchimento mineral foram executadas na Camada de Carvão Bonito Inferior na mina subsolo denominada Bonito-I, de propriedade da empresa Carbonífera Catarinense Ltda.

## Principais tipos de preenchimentos utilizados

Foram utilizados na Mina Bonito-I preenchimentos hidráulicos, de rocha e pastas minerais, ambos com ou sem a adição de cimento. Em determinadas áreas, foram combinados preenchimentos de fragmentos de rocha estéril com pasta mineral e polpa de cimento. Os métodos de transporte da mistura de rocha com cimento envolvem, após a homogeneização, a introdução, via tubulação, da mistura completa ou o transporte, via percolação, da polpa sobre os fragmentos de rocha estéril previamente dispostos em subsolo.

O preenchimento hidráulico é preparado a partir da drenagem dos rejeitos do lavador até uma densidade de polpa de aproximadamente 65-70% de sólidos. Posteriormente a polpa passa em hidrociclones para remover o excesso de finos a fim de aumentar a taxa de percolação do preenchimento. A mistura de preenchimento mineral é hidráulicamente bombeada da superfície através de uma rede de tubulações (76,20mm) e furos de sonda.

Uma pasta mineral pode ser considerada uma polpa não segregada (80-90% de sólidos em peso), o que significa que ela apresenta pouco excesso de água, quando estacionária, e permanece essencialmente como uma única fase homogênea (Henderson, 2006). A pasta mineral também pode ser definida como um sistema coloidal com características de um fluido homogêneo, no qual não ocorre significativa segregação granulométrica das partículas (Araújo, 2006).

Os preenchimentos por pasta mineral (*pastefill*) utilizados na Mina Bonito-I foram depositados em células-teste e também em zonas que delimitam as áreas circundantes ao painel preenchido por rocha estéril e rejeitos. Desta forma foi possível encapsular as áreas de *rockfill* do painel, reduzindo os custos de adição de cimento (Ferreira, 2007), devido à redução do volume de pasta mineral cimentada. Em determinadas travessas, foram depositadas camadas de preenchimento hidráulico constituído por finos seguidas pela deposição de pasta mineral cimentada. A deposição por camadas minimiza os riscos inerentes à percolação de águas.

## Vantagens e desvantagens dos preenchimentos minerais (*backfilling*)

As principais vantagens, custos e riscos (econômicos, de segurança e ambientais) resultantes da utilização do preenchimento mineral nas atividades de mineração são listados de forma resumida na Tabela 1. Dependendo do objetivo a ser alcançado, o preenchimento mineral pode representar a melhor alternativa técnica (relação custo-benefício) para uma situação específica de lavra, tanto a curto como a médio e longo prazo.

Tabela 1 – Principais vantagens e desvantagens da utilização de preenchimentos minerais na mineração

Benefícios	Custos & Riscos
<b>ECONÔMICOS:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permitem aumentar as taxas de extração de minérios</li> <li>• Reduzem a diluição</li> <li>• Auxiliam a recuperação de pilares</li> </ul>	<b>ECONÔMICOS:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maiores custos se o <i>backfill</i> utilizar agregantes</li> <li>• Atrasos no ciclo operacional da mina</li> <li>• Mão-de-obra e estrutura adicionais</li> <li>• Custos adicionais de drenagem</li> <li>• Diluição devido ao <i>backfill</i></li> </ul>
<b>SEGURANÇA:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoram a estabilidade regional da mina</li> <li>• Podem reduzir riscos de caimentos</li> </ul>	<b>SEGURANÇA:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Risco devido à quebra de barreiras e liquefação dos rejeitos (Aref, 1989)</li> <li>• Risco devido ao colapso das paredes consolidadas do <i>backfill</i></li> </ul>
<b>MEIO AMBIENTE:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispõem resíduos em subsolo minimizando os distúrbios em superfície</li> </ul>	<b>MEIO AMBIENTE:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Risco de contaminação de água subterrânea</li> </ul>

Fonte: Modificado de MiningLife, 2007

De modo similar, os aspectos ambientais, quando comparados com uma relação custo-benefício acrescida aos riscos inerentes ao processo de estocagem e manutenção em superfície, tornam-se econômicos a curto e médio prazos. Os custos de manutenção e logística de transporte a longo prazo dependem do planejamento global do sistema de preenchimento mineral. Os custos são normalmente incorporados nas taxas de extração de minério *Run of Mine (ROM)*.

## Estudo de caso

A área selecionada para a aplicação da metodologia de preenchimento mineral em subsolo é parte constituinte da Mina Bonito-I, que explora desde 1999 a camada de Carvão Bonito Inferior, no Município de Lauro Müller-SC. A camada Bonito Inferior pertence a Fm. Rio Bonito e ocorre, na área de estudo, a uma cobertura média de 60 metros de profundidade.

O painel selecionado para a aplicação do preenchimento mineral (P2-SE) situa-se próximo à boca da mina e à usina de beneficiamento Lavador Boa Vista. O painel foi minerado entre os meses de outubro e novembro de 2000 e abrange uma área total de 10.890m<sup>2</sup>. O volume livre estimado para o preenchimento mineral é de 32.700m<sup>3</sup>, considerando

uma altura média de camada total (C.T) de carvão de 3,05m e pilares com dimensões de 12m x 12m e 15m x 12m. A camada de carvão possui mergulho suave ( $1^{\circ}$  -  $2^{\circ}$ ) no sentido sudoeste. O rejeito de carvão utilizado como material de preenchimento mineral percorre distâncias de 200m a 1000m até o ponto de descarga e estocagem pré-estabelecidos.

Para limitar a área de estocagem do *backfill*, impedir a ocorrência de vazamentos ou perdas de polpa de cimento, bem como evitar riscos de deslizamentos do *backfill*, foram construídas barreiras de contenção em subsolo. São utilizados, para a construção das barreiras, blocos de concreto porosos e, em determinadas áreas, preenchimento de rocha cimentado (*rockfill*). As barreiras construídas com blocos de concreto permeáveis e furos de escoamento com tela, para minimizar o bloqueio ocasionado por resíduos finos, facilitam a drenagem. Os sistemas de drenagem são também utilizados porque os preenchimentos com baixo conteúdo de água impõem menores pressões às barreiras de contenção e, conseqüentemente, menores riscos em casos de ruptura (Bridges, 2003).

As barreiras de contenção do painel P2-SE da Mina Bonito-I também são construídas em forma curva, para desenvolverem um arco mais eficiente do que uma barreira planar em relação às rochas encaixantes, quando submetidas à carga de pressões. Porém, interações complexas entre tensões e deformações ocorrem nas terminações das barreiras sob carga, considerando ainda os perfis irregulares das superfícies das litologias. Até o momento foram construídas vinte e três (23) barreiras de contenção de rejeitos em subsolo. Tais barreiras possuem sistema de drenagem escalonado utilizado também para o monitoramento e amostragem da qualidade da água.

A taxa de percolação, para preenchimentos hidráulicos, é o critério mais importante do projeto. Uma taxa de percolação mínima de 10 cm/hora é uma regra comum em muitas minas, facilitando a drenagem do preenchimento com baixo potencial de liquefação. O teste de percolação deve ser conduzido de maneira contínua até atingir uma taxa de percolação constante (*steady state*). É importante notar que a taxa de percolação inicial é mais alta e decresce gradualmente já que o movimento da água na coluna do preenchimento contribui para aumentar a densidade. No caso da Mina Bonito-I, para evitar problemas de liquefação e otimizar o sistema de drenagem a deposição ocorreu em camadas, com intervalos de recolocação superiores a uma semana.

Considerando o volume disponível em subsolo para o retorno dos rejeitos e o fator empolamento (aumento do volume), que é variável com o tamanho da partícula, temos, para cada metro cúbico *in situ* de camada de carvão ( $\rho=2,1\text{t/m}^3$ ), após o desmonte, britagem primária em subsolo e secundária no Lavador Boa Vista (LBV), resultam aproximadamente  $1,51\text{ m}^3$  de material com peso específico aparente de  $\rho=1,39\text{ t/m}^3$  para a camada total de carvão (C.T), com granulometria de  $1^{1/2}$  polegadas.

Após as etapas de desmonte e britagem, a C.T de carvão é processada no LBV, onde são recuperados, em média, 30% de um produto C.E 4.100 kcal gerando 70% em volume de rejeitos disponíveis para o preenchimento mineral. Em termos gerais, considerando a adição de 5% de cimento, volume bloqueado por condições de lavra, acesso, capacidade de carga e grau de compactabilidade, o *backfill* representa um retorno médio de 80% do volume total de rejeitos gerados pela usina de beneficiamento.

## Caracterização do material de preenchimento

As características e propriedades mais importantes do material empregado no preenchimento que devem ser consideradas no projeto de *backfilling* são: i) mineralogia, ii) peso específico, iii) umidade, iv) percentual de sólidos, v) razão de vazios, vi) porosidade, vii) reologia, viii) distribuição granulométrica, ix) resistência à compressão uniaxial e x) resistência ao cisalhamento.

A caracterização mineralógica é importante porque determinados minerais (particularmente o quartzo) são muito abrasivos e podem causar desgaste nas tubulações do *backfill*. Alguns minerais causam a quebra do cimento com o passar do tempo, e minerais com hábito placoso assentam mais devagar do que partículas arredondadas. A distribuição granulométrica determina, portanto, a permeabilidade do preenchimento; quanto maior o conteúdo de finos menor a taxa de percolação e vice-versa.

Os minerais originais constituintes da camada total de carvão *in situ* são estáveis naquele ambiente, entretanto a oxidação do *backfill*, após a sua estocagem em subsolo e antes da inundação da mina, pode liberar metais e produzir precipitados de minerais secundários, como o sulfato Halotrichite ( $Zn, Fe, Mn$ )  $Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$  e o mineral sulfato de ferro hidratado Melanterita ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ), que ocorrem na Mina Bonito-I (Figura 1). Os minerais secundários são mais solúveis do que os minerais originais. Portanto, pode ocorrer uma concentração inicial mais elevada de metais, seguida por uma depleção de concentração com o decorrer do tempo, após a inundação dos painéis.

## Materiais de preenchimento e materiais utilizados

Os materiais empregados nas atividades de preenchimento mineral podem ser agrupados conforme o método de preenchimento utilizado. Para o preenchimento do tipo *rockfill*, realizado na Mina Bonito-I, são utilizadas rochas estéreis, subproduto da exploração da camada total de carvão em subsolo. As litologias estéreis são constituídas por siltitos e arenitos finos que ocorrem intercalados com os leitos de carvão e/ou por fragmentos (blocos ou matacões) que deslocaram do teto imediato da mina ou resultaram de caimentos em subsolo.

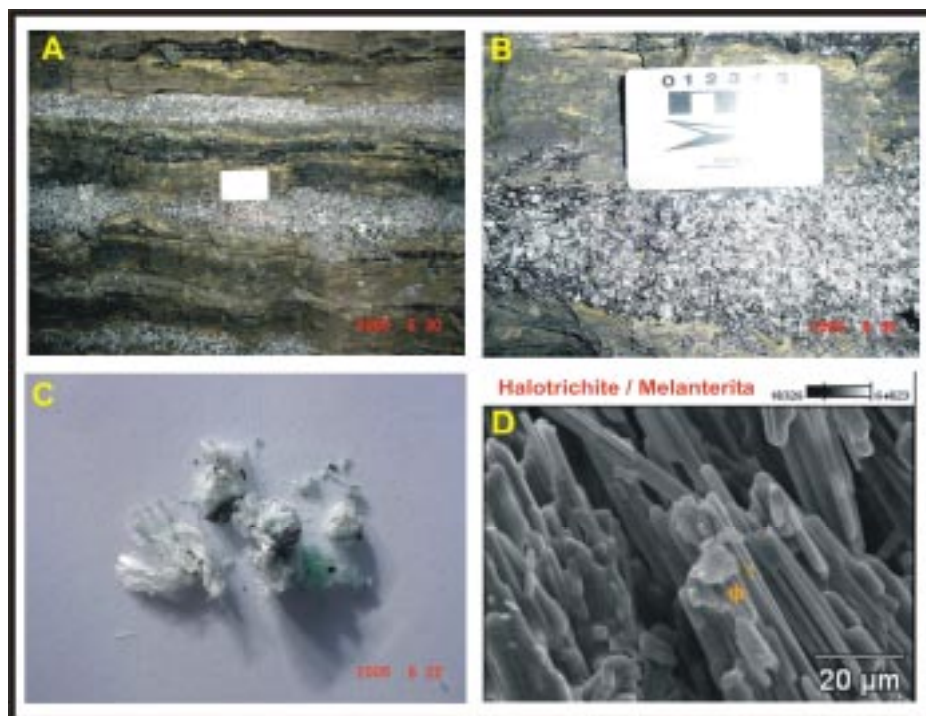


Figura 1 – Minerais secundários (Halotrichite e Melanterita) formados a partir da alteração por hidratação da marcassita (pirita) na Mina Bonito-I (Lauro Müller-SC). A-Pilar de carvão do painel P2-SE; B-Detalhe do nível de ocorrência; C-Hábito fibroso dos minerais secundários; D-Análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) - Laboratório de Mineralogia e Gemologia (UFRGS)

Para compor o preenchimento hidráulico e por pasta mineral, são utilizados os rejeitos finos a ultrafinos depositados nas bacias de decantação da unidade de beneficiamento Lavador Boa Vista. O preenchimento hidráulico é bombeado por tubulações com densidades médias de polpa não superior a 60% em peso de sólidos. Em relação ao preenchimento por meio de pasta mineral (*pastefill*) na Mina Bonito-I são empregados ambos os rejeitos das bacias de decantação e todos os rejeitos sólidos do processo de beneficiamento (rejeito 1, rejeito 2 e rejeito 3). O percentual de sólidos do *pastefill* é superior a 75%. Além dos rejeitos acima discriminados, são utilizadas quantidades variáveis de cimento. O cimento utilizado é o Cimento Portland Composto CP II – E-32, com características físico-químicas especificadas conforme a NBR 11578/1991.

Dentre as principais propriedades de interesse de uma pasta mineral, destacam-se: i) características reológicas, como a tensão de escoamento e a viscosidade; ii) altura de abatimento, que é determinada através do teste de abatimento; iii) ângulo de repouso, o qual pode ser determinado mediante a utilização do teste de calha; e iv) propriedades mecânicas da pasta cimentada.

O comportamento do *backfill* cimentado com alto conteúdo de enxofre (rejeitos de carvão) está sujeito a mudanças físicas, mineralógicas e químicas (alteração) que ocorrem com o decorrer do tempo e podem afetar a resistência mecânica do preenchimento. O referido mecanismo de alteração consiste tipicamente do ataque sulfático. Este processo pode ocorrer rapidamente durante a cura e depende dos agregantes usados em conjunto com o cimento. A reação envolve a dissolução das fases cálcicas hidratadas, seguida pela formação de fases expansivas, resultando na degradação das propriedades mecânicas do *backfill*.

Em conjunto com o cimento são utilizados outros agregantes, como as cinzas volantes (*fly ash*), as quais são produzidas em grandes quantidades pela combustão do carvão na geração de termelétrica (Usina Jorge Lacerda – Capivari de Baixo/SC). A utilização de cinzas-volantes como um agregado (Tabela 2) na indústria do concreto (ACI, 1990) e para aumentar a consistência da pasta mineral em minas de carvão é de comprovada eficiência (Gillet, 1998). O Backfill com adição de cinzas volantes fornece suporte, confinando os pilares de carvão, minimizando a ocorrência de vazamentos de água em subsolo, e reduzindo a disposição de resíduos da queima do carvão na superfície.

A natureza pozzolânica das cinzas volantes, bem como a distribuição de tamanho ultrafino torna as cinzas volantes ideais para utilização em misturas de pasta mineral.

Tabela 2 – Composição média das cinzas volantes (*fly ash*) subproduto da queima do carvão energético CE-4500 kcal (43% cinzas) de 100 ensaios executados nas frações <0,6mm e >0,6mm

Composição média das cinzas volantes ( <i>flyash</i> )			
Elemento	Percentual %	Elemento	Percentual %
SiO <sub>2</sub>	57,01	MgO	0,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,99	Na <sub>2</sub> O	0,20
TiO <sub>2</sub>	1,20	K <sub>2</sub> O	2,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,50	SO <sub>3</sub>	2,40
CaO	1,70	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10

Fonte: SIECESC Usina Termelétrica Jorge Lacerda-Capivari de Baixo-Santa Catarina (03/2007)

Conforme verificado em experimentos realizados na Mina Bonito-I o uso de cinzas volantes (*fly ash*), as quais são mais resistentes ao ataque ácido, em geral reduz a deterioração do *backfill*. Amostras de pasta mineral cimentada contendo cinzas volantes foram mantidas em subsolo simulando ataque ácido *in situ*. Os corpos-de-prova sofreram efeitos mínimos quando comparados com aqueles que não utilizaram o agregante cinzas volantes.

## Ensaio de consistência e resistência

A reologia é o estudo do comportamento das tensões de cisalhamento em líquidos. A viscosidade é a medida da resistência ao cisalhamento ou da resistência ao movimento entre diferentes camadas de um fluido ou mistura. Na terminologia da indústria do concreto, a viscosidade é também conhecida como trabalhabilidade (definida através do ensaio de abatimento).

As misturas de pasta mineral possuem comportamento de fluidos não-newtonianos, isto é, não exibem viscosidade constante com a variação da taxa de fluxo. Pesquisas e experimentos indicam que pastas minerais podem ser consideradas fluidos plásticos, exibindo viscosidade constante com o aumento da velocidade de fluxo, após o limite de tensão diferencial ser ultrapassado.

Para estimar a consistência da pasta mineral, são executados testes de abatimento. Os abatimentos em pastas minerais utilizadas na Mina Bonito-I são, em média, de 6-10 polegadas. O *pastefill* necessita de menor quantidade de cimento para atingir resistências equivalentes, quando comparado a preenchimentos hidráulicos convencionais.

A viscosidade de uma mistura de pasta mineral é difícil de prever, pois é influenciada por muitos fatores incluindo: densidade de polpa, tamanho de grão, mineralogia e forma dos grãos. O teste de abatimento (ABNT, 1992) é utilizado como uma medida de viscosidade da pasta mineral. Misturas de pastas minerais normalmente mostram abatimentos de 15-20 cm (6 "-10") utilizando um cone padrão de 12".

A resistência à compressão não confinada (*Unconfined Compressive Strength-UCS*) é medida em preenchimentos cimentados utilizando corpos-de-prova cilíndricos com diâmetros de 75-100-150 mm, no caso de rejeitos de pasta mineral. Tamanhos de amostras de até 300 mm ou mais são desejáveis para testes de *rockfill* já consolidado. O resultado do ensaio UCS é normalmente usado como uma medida indireta da resistência ao cisalhamento do preenchimento, que, por sua vez, é medida por testes diretos de cisalhamento ou triaxiais. O módulo de elasticidade também é calculado por meio do teste UCS.

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram executados nos laboratórios de mecânica de rochas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS-DEMIN), em Porto Alegre-RS, e na Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), no laboratório do IPAT, em Criciúma-SC. O tempo de cura do cimento é considerado nos ensaios, sendo utilizados principalmente os intervalos de 07 – 28 e 35 dias de cura. O objetivo dos ensaios é verificar a resistência mecânica das misturas de rocha e rejeitos e sua relação com as variações de adição de cimento e agregantes. É também analisada a influência entre a distribuição de faixas granulométricas na mistura e a sua respectiva resistência.



Em termos de resistência, testes executados na Mina Bonito-I, em pastas minerais cimentadas contendo 77% rejeitos, 3% *fly ash*, com abatimentos de 175 mm e 250 mm e conteúdo de 5% de cimento em relação ao peso de rejeitos sólidos secos atingiram resistências UCS de 2,10-8,15 Mpa (Figura 2). Após o intervalo de tempo de cura de 28 dias os resultados mostraram ganhos significantes em resistência com a adição de 3% e 5% em peso de cimento. As pastas preparadas com cimento e *fly ash* apresentaram as maiores resistências (> 9 Mpa). Os testes de abatimento mostraram que, na maioria das misturas, o aumento da fração de finos causou aumento na viscosidade das pastas minerais.



Figura 2 – Corpos-de-prova de pasta mineral com rejeitos totais R1-R2-R3 do LBV (Camada Bonito) com adição de cimento NPC (5%), fly ash (5%) e botton ash

## Transporte do preenchimento mineral

O transporte dos resíduos de carvão é uma das mais importantes atividades relacionadas ao sucesso da implementação da metodologia de preenchimento mineral. A mistura ótima para as características específicas do material a ser utilizado no preenchimento deve ser criteriosamente especificada e testada. Como o *pastefill* é um preenchimento mineral de alta densidade com baixa razão de vazios, é necessária uma fração componente de finos na polpa da mistura, para viabilizar o transporte do preenchimento ao longo da rede de tubulações.

Os resíduos finos minimizam a perda de água, facilitando o transporte da pasta mineral. Como regra geral, para otimizar a transportabilidade da pasta mineral, em média 15% do total da mistura é constituída de resíduos finos. Uma mistura com 15% de finos (lodo

da bacia) tem influência na consistência, isto é, excede o volume de poros das partículas maiores e apresenta área superficial úmida suficiente para trapear a mistura de água na matriz da pasta, evitando a segregação da matriz e a conseqüente perda de água. Se o conteúdo for inferior a 15%, a água é liberada formando “pacotes de areia” (*sand-pack*) nas tubulações, efeito materializado quando o transporte é reiniciado. Se o conteúdo for superior a 15%, a menor quantidade de água livre representa maior densidade e maior resistência ao fluxo.

O estudo reológico das propriedades de fluxo (abatimento) e de resistência (UCS) da pasta mineral é fundamental para definir a mistura de menor custo e eficiência para as operações da mina. É possível obter medidas diretas e também simular o projeto do sistema de distribuição de tubulações utilizando testes em *loop* da tubulação (USGS, 1995) tanto em laboratório como em escala operacional (*pipe loop testing*). Em termos gerais, o *pastefill* preparado com alta densidade de polpa tem maiores resistências em comparação com aqueles preparados com densidades de polpa inferiores. Na prática, isto significa que um *pastefill* com alta resistência pode ser preparado com menores custos utilizando densidades de polpa mais elevadas, ao invés de adicionar maiores quantidades de cimento.

O transporte de rejeitos na Mina Bonito-I (Figura 3) é executado por meio de tubulação, no caso de preenchimento hidráulico e pasta mineral (*pastefill*), e por intermédio de caminhões, *LHDs* e tratores de esteira, no caso de preenchimento de rocha (*rockfill*). Em determinadas condições, é utilizada uma estação para mistura de cimento em subsolo, para complementar a matriz do preenchimento de rocha.

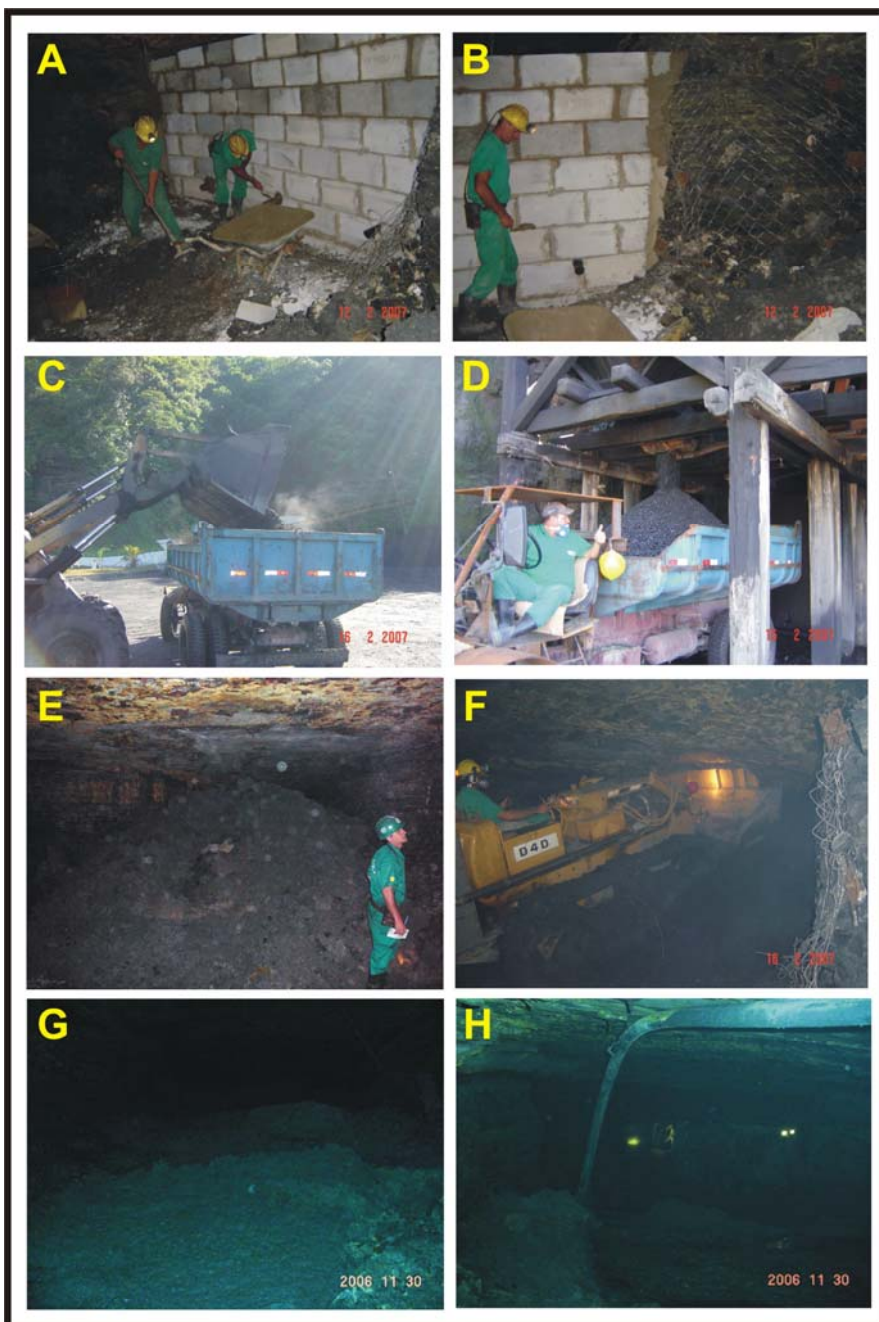


Figura 3 — Principais etapas de transporte e deposição do backfill em subsolo. A-B: construção das barreiras de contenção curvas e com sistemas de drenagem; C-D: transporte de rejeitos totais (C) e seleção de rejeitos R2 por caminhão (D); E-F: deposição de rejeitos totais (R1+R2+R3) e compactação com trator de esteira (F); G: deposição de camadas de pasta mineral por tubulação de teto (H)

Foram também testadas células de *backfill* isoladas com a alternância de camadas de preenchimento hidráulico, *rockfill* e pasta mineral (*pastefill*) para simular as condições de resistência, selagem, percolação e ataque ácido. A tipologia e quantidade de cimento utilizado devem prever as distâncias e tempos de transporte dos resíduos para que o tempo de cura do cimento seja compatível com o ciclo global de operação do sistema de *backfilling*.

Embora os rejeitos totais da usina possam ser utilizados na pasta, não há espaço suficiente para colocar todo o volume em subsolo, uma vez que a densidade do *pastefill* é significativamente menor do que a do minério extraído. O balanço suprimento-demanda ocorre mesmo onde uma quantidade substancial de minério concentrado é removido durante o processamento mineral (lavadores).

Em termos gerais, quanto maior a concentração da densidade de polpa menor o abatimento. A quantidade de cimento utilizado no *pastefill* oscila entre 3% e 6% do percentual em peso. Pequenas mudanças na densidade de polpa podem resultar em um grande aumento na pressão da tubulação, principalmente nas pastas minerais. Em preenchimentos hidráulicos, quanto maior o tamanho do grão, mais rápida a velocidade final de assentamento. Além disso, a velocidade da polpa na tubulação deve exceder a velocidade de assentamento.

A distribuição do tamanho de grão afeta a razão de vazios, e por extensão, a resistência do preenchimento mineral, além da transportabilidade do preenchimento. Preenchimentos com distribuição mais uniforme apresentam menores taxas de vazios e maior resistência. Os dois principais requisitos para o desempenho do *pastefill* são: i) as propriedades de fluxo para o transporte da pasta e ii) alcance da estabilidade requerida para o preenchimento. As taxas de preenchimento estão relacionadas com a velocidade de extração do minério e, é claro, com a capacidade de geração de rejeitos da usina de beneficiamento.

Quanto maior o tempo em que a pasta mineral fica inativa na tubulação, maiores as tensões diferenciais (*yield stress*) para reiniciar o fluxo. Se a tensão diferencial é alta e não há energia suficiente para remobilizar a pasta, a tubulação será obstruída.

Os rejeitos totais são usados com frequência na preparação da pasta, mas, muito raramente, podem ser completamente usados, devido ao aumento de volume resultante da trituração e cominuição do minério. As vantagens da utilização de rejeitos totais são: i) os rejeitos são depositados com maior densidade reduzindo o volume de estoque e ii) a permeabilidade do preenchimento depois de depositado é significativamente menor.

O fluxo, nas tubulações do *pastefill*, tem as seguintes vantagens (Henderson, 2006): i) velocidades baixas na tubulação, resultando em menor desgaste da tubulação e furos e ii) fragmentos grossos, tais como rocha triturada, podem ser seguramente transportados

na matriz da pasta mineral. Os testes efetuados com pastas contendo 75-85% de sólidos e *fly ash*, com abatimentos entre 150 mm e 250 mm, solidificaram em menos de 48 horas.

No caso dos preenchimentos hidráulicos previamente testados na Mina Bonito-I, verifica-se que é preciso adotar um consumo de água menor no preenchimento para diminuir o consumo de cimento e agregantes. Para o transporte são necessárias velocidades de fluxo maiores que 2 m/s para manter uma dispersão homogênea dos componentes de preenchimento na polpa.

## Impactos ambientais

Os impactos ambientais resultantes da atividade de preenchimento mineral em subsolo estão principalmente relacionados ao processo de oxidação da pirita e posterior geração de drenagem ácida de mina (DAM) em subsolo. A ocorrência de DAM concomitante à inundação da mina, após o fechamento ou flutuações do nível freático, pode iniciar o processo de contaminação de águas subterrâneas.

Foram coletadas e analisadas amostras de água dos efluentes utilizados para a mistura de água + polpa + rejeitos sólidos durante o transporte da pasta mineral (*pastefill*). Amostras coletadas do sistema de drenagem do backfill depositado há 15 meses e amostras de água representativas do *rockfill* também foram analisadas. Porém, devido as condições secas do local de deposição, foram simulados os processos de alteração e DAM em subsolo (Figura 4).

Dependendo do tipo de preenchimento mineral utilizado e da adição ou não de cimento (com ou sem outros agregantes), os impactos ambientais são efetivamente minimizados. Através de furos de sonda e dos sistemas de drenagem, são obtidas amostras de água para análises químicas a fim de determinar os fatores físicos e químicos que controlam a liberação de metais pesados para as águas subterrâneas.



Fonte: Gilda de Souza R. da Silva- Resp. LAEC

Figura 4 – Experimento de ensaio cinético realizado pelo Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão (LAEC) para simular a alteração e geração de DAM de amostras de carvão e resíduos.

Os procedimentos do ensaio cinético realizado no LAEC com o objetivo de simular a alteração das amostras envolvem a coleta de amostras representativas de 1 kg de resíduos por célula (seca). A temperatura da água deve variar de 28 a 32° C e a granulometria em +/- 6 mm. A amostra deve ser lixiviada com 500 a 1000 ml de água destilada por aproximadamente duas horas. Após sucessão de exposição de três dias de ar seco (sílica) e três dias de ar úmido, inicia-se nova lixiviação. O ciclo de lixiviação - ar seco - ar úmido deve ser realizado por um período mínimo de 20 semanas. Após a secagem e pesagem, é realizada a coleta e análise dos resíduos líquidos para os parâmetros Fe, Zn, Al, Mn, SO<sub>4</sub>, pH, condutividade, acidez e alcalinidade.

A definição e quantificação dos impactos ambientais resultantes do preenchimento mineral cimentado ou não utilizando rejeitos de carvão deve considerar os seguintes aspectos físico-químicos e de monitoramento (USGS, 1996):

- Coleta de dados: campo x laboratório (análise mineralógica e química dos resíduos).
- Lixiviação e solubilização - dissolução e filtragem dos constituintes solúveis do preenchimento por fluidos através de percolação.
- Distribuição do tamanho das partículas de amostras de rejeitos.
- Hidroquímica x permeabilidade do ar x saturação de água.

- Capacidade de neutralização ácida do *backfill* cimentado, cimento *portland* e resíduos.
- Lavagem com água deionizada. Concentração de elementos em amostras contendo cimento depois de lavadas com água deionizada por sete (07) dias;
- Lavagem com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), determinar: i) potencial de neutralização de amostras do *backfill* cimentado e ii) a concentração de elementos do *backfill* cimentado após lavagem em  $H_2SO_4$  por 227 dias.
- Qualidade da água, incluindo índices de saturação e a média e variações de concentração de elementos em amostras de água do *backfill* cimentado.

## Considerações finais

O estudo de caso e a análise dos resultados obtidos utilizando os rejeitos da mineração de carvão da Camada Bonito Inferior (Lavador Boa Vista), no município de Lauro Muller-SC, mostram que:

- Os resultados obtidos indicaram que a aplicação de preenchimentos hidráulicos, por pastas minerais e rocha estéril em minas subsolo de carvão mostrou-se uma alternativa viável e eficaz às práticas convencionais de disposição subaquática e superficial de rejeitos de carvão. A redução da deposição de rejeitos em superfície pode ser superior a 80%. Não há registros, até o momento, de impactos ambientais significativos relativos à contaminação de águas subterrâneas. Porém, estudos complementares em execução irão investigar os efeitos a longo prazo da estocagem do *backfill* em subsolo.
- Com relação ao objetivo de manter a integridade dos pilares de carvão, este é alcançado com visível redução do processo de perda de área útil dos mesmos, minimizando desta forma os riscos de subsidência em superfície. O fator confinamento, resultante do preenchimento mineral, se mostra eficaz na ação de minimizar os efeitos estruturais resultantes da ocorrência de sistemas de fraturas e queda de laterais ou blocos dos pilares de sustentação da mina Bonito-I.
- A retenção de água é maior no *backfill* cimentado em comparação com o não cimentado. A maior retenção de água reduz a área superficial exposta à oxidação, reduzindo a quantidade de ácido produzido. O ácido é neutralizado pelo cimento (c.f. Collepari, 1996) e por minerais contidos no *backfill*.
- A adição do cimento altera as características físico-químicas do *backfill*, diminuindo as reações de oxidação que produzem ácidos, resultando em uma menor mobilização de metais. As mudanças na estrutura física do *backfill* com a adição de cimento corroboram com o aumento da capacidade do preenchimento em reter água. As maiores retenções de água reduzem a permeabilidade do *backfill* ao ar e diminuem a área superficial total de sulfetos disponível para a oxidação direta. Além desse fator, a adição

de cimento reduz significativamente a condutividade hidráulica do *backfill*, reduzindo o transporte de metais por meio da redução da taxa de fluxo de água subterrânea no *backfill* que está sendo inundado. Com a inundação da mina, a redução da quantidade de oxigênio limitará a oxidação de sulfetos, bem como a precipitação de hidróxidos metálicos. A geração ácida e liberação de íons metálicos em *backfill* cimentado é menor do que em preenchimentos não cimentados.

- A distribuição granulométrica e a homogeneização dos rejeitos afetam a integridade estrutural do *backfill* cimentado sob ataque por água ácida; a quebra da estrutura libera mais rapidamente materiais neutralizantes. A água em excesso evapora deixando vazios, criando tensões e fissuração, caminhos preferenciais para o ataque ácido (Figura 5A). Porém, amostras com controle de processamento e homogeneizadas com a polpa de cimento mostram efeitos mínimos de deterioração (Figura 5B) em subsolo.

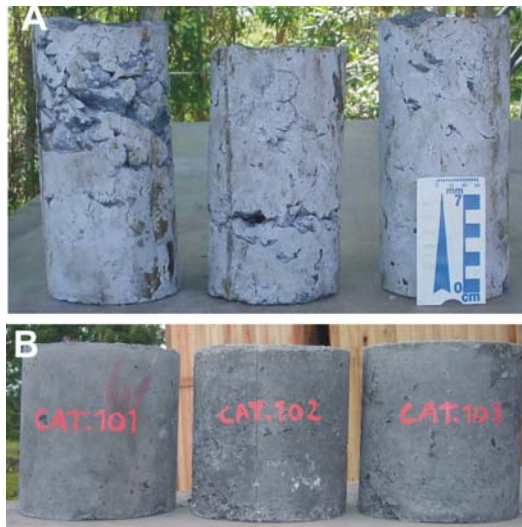


Figura 5 – (A) Corpo-de-prova de pastefill cimentado (5% NPC), não classificado submetido à simulação de DAM in situ com mistura não homogênea de cimento, após 227 dias. (B) Corpo de prova de *backfill* cimentado (5% NPC), com adição de cinzas volantes (3%) e R2+R3 (75%) homogeneizado e classificado submetido à simulação de DAM in situ, após 315 dias. Mina Bonito-I (Carbonífera Catarinense Ltda)

- O preenchimento mineral deve ser considerado uma componente integral do processo de mineração, concomitante às atividades de exploração e não apenas um procedimento complementar pós-extração das camadas de carvão. Em média 80% dos rejeitos gerados são consumidos pelas atividades de *backfilling* minimizando os impactos ambientais resultantes da deposição e os efeitos de subsidência em superfície, além de maximizar a vida útil dos pilares de carvão (sustentação da mina).



## Referências

- ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Use of fly ash in concrete. ACI 226 3R-87. In: **ACI Manual of Concrete Practice 1990, part 1, Materials and General Properties of Concrete**. Detroit. ACI COMMITTEE 226, 1990.
- ARAUJO, A. C.; VALADÃO, G. E. S.; GAMA, E. M. Consistencia, Fluidéz y Viscosidad de Pastas Minerales de Relaves de Hierro. **Revista Información Tecnológica del Chile**, La Serena - Chile, v. 17, n. 2, p. 71-79, 2006.
- AREF, K., HASSANI, F.P. AND CHURCHER, D. **A study on liquefaction potential of paste backfill** in: **Innovations in Mining Backfill Technology**, Hassani et al. (eds), Balkema, Rotterdam, p. 405-414, 1989.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7223 **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578–**Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro 1991.
- BRIDGES, M.C; GRICE, T. **Digging Deeper**. AMC Consultants Pty Ltda, 2003.
- COLLEPARDI, M. Concrete **deterioration from sulfate and acid attacks**. Course on Durability of concrete. In: **International Congress Highperformance Concrete – Performance and Quality of Concrete Structures**. SC-Brazil, 1996.
- FERREIRA, Z. P. Relatório Técnico Mina Bonito-I. **Consultoria prestada a empresa Carbonífera Catarinense Ltda**. Lauro Müller - Santa Catarina, 2007.
- GILLETT, P. **A Study into the utilisation of flyash in a paste consistency to backfill underground coal mines**. Mining . UNSW . EDU .AU pag 10-20, 1998.
- HENDERSON, P. **Deep and High Stress Mining 2006- Paste Fill** Melbourne, Australia, 2006.
- HU, B.; ZHAO, Q.; FAN, S.; HAO, J., 2001. Study on Subsidence and Interaction Between Backfill and Pillar in Coal Mining. In: **Minefill 2001: Proceedings of the 7 Th International Symposium on Mining with Backfill**. p.181-185.
- MININGLIFE, 2007**. Disponível em: < [www.mininglife.com/Miner/Backfill/Types](http://www.mininglife.com/Miner/Backfill/Types) > . Acesso em: 12 mar. 2007.

USGS. United States Bureau of Mines & United States Department of the Interior. **Environmental Impacts of Cemented Mine Waste Backfill**. Report of Investigations (RI) n° 9599, p.1-23, 1996.

USGS. United States Bureau of Mines & United States Department of the Interior. **Transport of Total Tailings Paste Backfill: Results of Full-Scale Pipe Test Loop Pumping Tests**. Report of Investigations (RI) n° 9573, p.1-37, 1995.

# Recuperação de áreas impactadas pela mineração de carvão a céu aberto em Santa Catarina: gestão de rejeitos e revegetação

James Alexandre Polz

A Companhia Siderúrgica Nacional, CSN, atuou na exploração do carvão mineral na região sul de Santa Catarina por aproximadamente 45 anos, encerrando essa sua atividade no estado em 1990, após a desregulamentação da atividade carbonífera pelo governo federal (Portaria nº. 801, de 17 de setembro de 1990), que estabelecia, entre outras medidas, o fim da obrigatoriedade de consumo do carvão nacional, a liberação dos preços do carvão metalúrgico e energético, a extinção dos sistemas de cotas de produção de carvão, a livre importação de carvão com alíquota zero e a retirada da CSN das atividades ligadas ao carvão (Rebouças, 1997).

Entre os métodos de extração do carvão adotados na época, tem-se a mineração a céu aberto, desenvolvida principalmente na região do município de Siderópolis, visando suprir com carvão metalúrgico a demanda originada no país pela instalação da CSN e, posteriormente, dos complexos siderúrgicos da USIMINAS, COSIPA e CST.

A lavra a céu aberto tinha por finalidade expor as camadas de carvão existentes no subsolo da região à superfície, permitindo então sua extração. Para tanto, toda a cobertura existente sobre o mesmo era removida, utilizando-se para isso máquinas de grande porte, tais como tratores de esteiras e escavadeiras tipo *dragline* e *shovell*, promovendo a descaracterização da paisagem natural.

O processo, que inicialmente revertia simplesmente as camadas de cobertura, depositando o solo superficial no fundo das cavas e expondo à superfície as rochas das camadas inferiores, foi sendo otimizado, principalmente a partir do final da década de 70, quando o solo superficial passou a ser armazenado para posterior uso na cobertura da superfície remodelada e em recuperação.

Os problemas ambientais oriundos da mineração a céu aberto, principalmente naquelas áreas operadas sem os cuidados citados no parágrafo anterior, persistem até os dias atuais. A razão fundamental é a característica peculiar do carvão e das rochas encaixantes, ricas em pirita e marcassita, conseqüentemente, em enxofre, ferro, manganês, alumínio, entre outros. Para cada tonelada de produto bruto extraído, somente 350 kg de carvão, com 42% de cinzas, eram de fato recuperados no seu beneficiamento, nos ditos “lavadores”. Os 650 kg de material restantes, denominados de rejeitos, ricos em pirita, eram depositados em áreas junto aos “lavadores” e parte retornava aos campos de mineração para forração de estradas. Com a exposição desses rejeitos e dos demais minerais escavados, também conhecidos por estéreis, ao ambiente, portanto, ao oxigênio e à água livres em superfície, se oportunizava a formação da chamada drenagem ácida de mina - DAM, desencadeada pela oxidação dos minerais sulfetados, provocando a alteração do pH natural dos solos em contato e das águas da região em seus leitos de drenagem (Waterloo, 2001).

O desafio de recuperar o meio ambiente afetado por estes problemas somente foi possível a partir do conhecimento de suas diversas características ambientais (qualidade das águas superficiais e subterrâneas, dos solos, da fauna, da flora, etc.), acompanhadas de amplas discussões por profissionais das áreas pertinentes, o que permitiu a elaboração e implantação de projetos ambientalmente sustentáveis.

Os trabalhos desenvolvidos pela CSN em suas antigas áreas impactadas já completam sete anos, sendo possível verificar os primeiros resultados positivos, conforme atestam os relatórios de monitoramento em execução. A experiência da CSN é relatada neste capítulo, buscando colaborar com as discussões que o tema envolve e ampliar o seu entendimento.

## **O diagnóstico ambiental - DIA**

A atividade carbonífera desenvolvida no passado promoveu significativos impactos ao meio ambiente, minimizando as possibilidades de sua auto-regeneração. Diante desse fato e com o objetivo de implantar projetos de recuperação ambiental exeqüíveis, eficazes e, acima de tudo, sustentáveis, viu-se a necessidade de se gerar consistentes diagnósticos ambientais que subsidiassem subseqüentes ações de recuperação. Assim, optou-se pela contratação do Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas (IPAT), da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), para a avaliação do estado das áreas e a elaboração dos projetos para sua recuperação ambiental.

## Principais características das áreas impactadas pela mineração de carvão a céu aberto

### Paisagem descaracterizada

A operação de decapeamento do carvão, ou escavação superficial profunda, promovia o surgimento de cavas na paisagem natural, com a deposição do material escavado (estéreis) em pilhas com até 30 m de altura, dispostas ao longo da área minerada. Inicialmente, essa operação era realizada sem maiores cuidados com a preservação do solo e da vegetação instalada, expondo as camadas litológicas inferiores e os minerais sulfetados agregados a ela à superfície, conforme apresentado na Figura 1.



Figura 1 – Vista aérea do campo de mineração a céu aberto Malha II Oeste, em Siderópolis/SC (foto de 2004)

Posteriormente, já no final da década de 70, esse método foi aprimorado, reservando-se todo o solo de superfície para posterior uso na cobertura do terreno remodelado.

### Solos ácidos

O substrato existente nas áreas lavradas é caracterizado por um elevado grau de desestruturação, pH ácido (3,7 a 4,6) e textura bastante friável, sendo muito suscetível a processos erosivos. Suas propriedades físicas e a baixa reserva de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas impõem severas restrições ao seu uso agrícola e florestal (Figura 2).



Figura 2 – Detalhes da superfície das áreas impactadas pela mineração de carvão

### **Acidez das águas**

As áreas mineradas foram, em grande parte, utilizadas como depósitos de rejeitos e estéreis da mineração do carvão por várias mineradoras da região. A exposição desses materiais às condições atmosféricas e, conseqüentemente, dos seus minerais sulfetados, possibilitou a formação de drenagem ácida, provocando a alteração da qualidade das águas pela diminuição do pH, afetando as águas subterrâneas e superficiais dos rios formadores da sub-bacia hidrográfica do Rio Mãe Luzia, entre os quais o rio Fiorita (Waterloo, 2001; IPAT 2002a).

A acidificação das águas levou ao desaparecimento de peixes, crustáceos e demais populações do meio em diversos pontos dos rios, afetando também o aproveitamento das águas na agricultura, pecuária, indústria e abastecimento das cidades.

### **Fauna e flora**

Apesar de as áreas mineradas apresentarem um substrato impactado, foram encontrados pequenos bolsões de vegetação entre as pilhas de estéreis, caracterizados por plantas rasteiras, pouco diversificadas, não muito exigentes na fertilidade do solo e de elevada resistência a estiagens (Citadini-Zanette, 1992), conforme Figura 3.

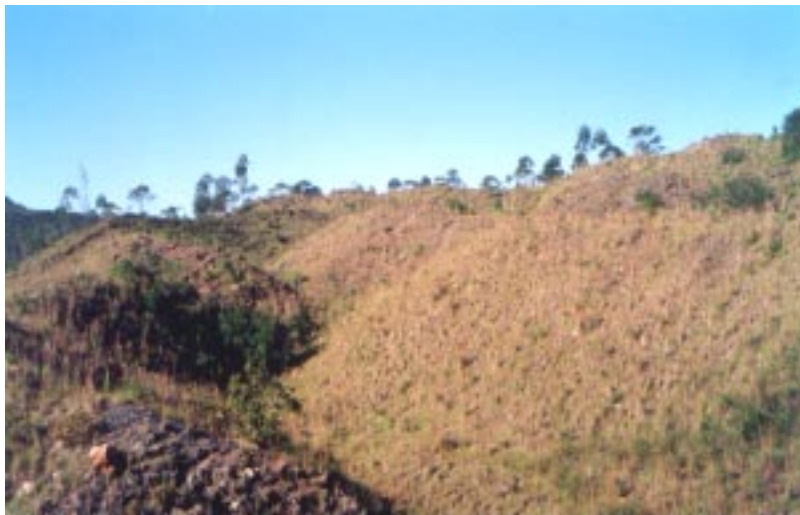


Figura 3 - Vegetação natural das áreas mineradas a céu aberto não recuperadas

Com grande capacidade de adaptação e competição ao meio, também foram identificadas espécies exóticas invasoras, como o pinus e o eucalipto, oriundas, pela “chuva de sementes”, de sistemas agro-florestais do entorno da região minerada.

Ainda que as áreas impactadas não apresentem uma vegetação nativa necessária ao suporte de uma fauna permanente, com o agravante da ausência quase total da mata ciliar, vários indícios da presença de tatus, capivaras e “mão-pelada” foram encontrados. A avifauna foi o grupo que apresentou maior diversidade de espécies registradas no estudo das áreas, com hábito alimentar predominantemente granívoro. A hipótese mais provável para esse comportamento é a existência ainda de formações vegetais relativamente conservadas próximas das áreas mineradas, proporcionando abrigo e alimento às espécies vagantes (IPAT, 2002c). Contudo, os grupos faunístico mais impactados localmente são os organismos aquáticos, especialmente peixes e crustáceos, afetados pela alteração da qualidade das águas.

## O projeto de recuperação ambiental das áreas degradadas - PRAD

Partindo do conhecimento levantado pelos diagnósticos ambientais, os projetos de recuperação buscaram inicialmente propor ações que fizessem cessar ou, pelo menos, minimizar a dinâmica dos processos de degradação instalados.

É fato que o ambiente não poderia ser restaurado ao seu estado original. Todavia, nos projetos da CSN, a diretriz adotada para a recomposição das áreas impactadas pela mineração de carvão a céu aberto, foi a sua reintegração à paisagem sob a condição de “áreas-verdes”, possibilitando que processos naturais de degradação de matéria orgânica, ciclagem de nutrientes, “chuva de sementes”, sucessão vegetal, entre outros, viabilizassem a reabilitação do ambiente ao longo do tempo.

## Ações de recuperação

### Isolamento das fontes poluidoras

Encontramos nos rejeitos do beneficiamento do carvão e nos estéreis escavados, as principais fontes de alteração da qualidade das águas e do solo, haja vista a presença em seu meio de minerais sulfetados. A solução encontrada para obstar a poluição do ambiente por estes materiais foi distinta: (1) para os rejeitos, sua disposição final no solo, confinados no interior de compartimentos especialmente construídos (células de depósito de rejeitos); (2) para os estéreis, retorno à sua condição original no interior do perfil do solo, porém distribuídos sob camadas de argila (remodelamento topográfico/reconstrução do solo).

### Células de depósito de rejeitos

A disposição final dos rejeitos no interior do solo, confinados em compartimentos especialmente construídos, conhecidos como “células de depósito de rejeitos” ou simplesmente, “células de rejeitos”, teve por objetivo o isolamento destes do contato com o oxigênio e a água, evitando a geração de drenagem ácida de mina e a conseqüente solubilização de seus constituintes.

A “célula de rejeitos” foi concebida e executada conforme modelo apresentado na Figura 4, com visualização da sua implantação no campo na Figura 5.

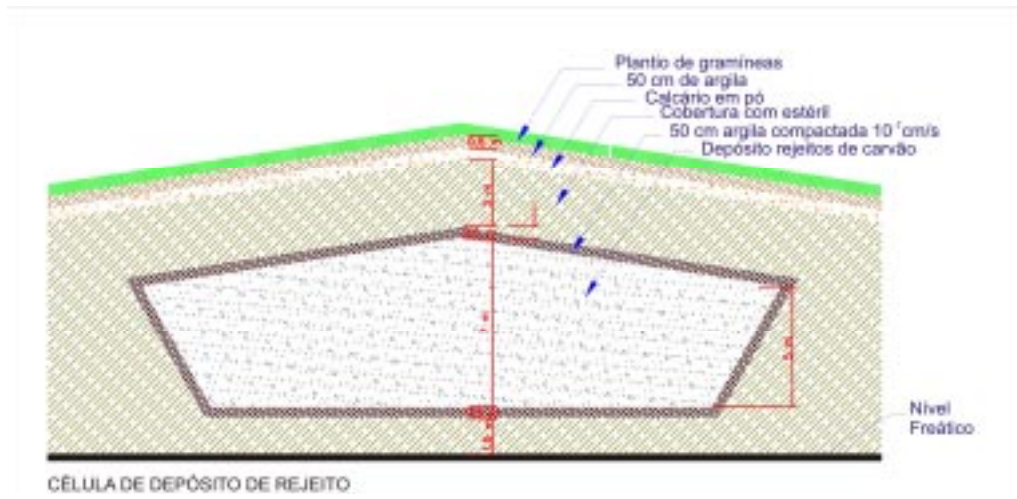


Figura 4 – Aspectos construtivos da “célula de rejeitos”





Figura 5 – Implantação da “célula de rejeitos” no campo

### **Remodelamento topográfico dos estéreis**

O remodelamento foi realizado a partir da “quebra” das pilhas de estéreis, algumas com até 30 m de altura, distribuindo seus materiais de forma controlada ao longo das áreas, fazendo surgir uma nova paisagem de relevo levemente ondulado.

O “espalhamento” e a acomodação dos estéreis seguiu um projeto diferenciado para o perfil do terreno, sempre com encostas inclinadas entre 3 e 12%, buscando uma rápida condução das águas pluviais superficiais até sistemas de drenagem projetados, minimizando sua infiltração no perfil e conseqüente contato com minerais poluentes. Para proteção dos estéreis à ação direta das intempéries, camadas de solo argiloso com 0,20 a 0,50 m de espessura foram utilizadas na sua cobertura. Tais camadas foram na seqüência fertilizadas e vegetadas, conforme modelo apresentado na Figura 6.

Prevendo um aumento da permeabilidade da camada de argila em superfície, ocasionada ao longo do tempo, pela ação das raízes da vegetação implantada e dos movimentos da fauna do solo, uma camada de calcário dolomítico foi estrategicamente interposta entre essa superfície e os estéreis. Desse modo, quando da eventual passagem das águas meteóricas pelo perfil do solo, a solução alcalina produzida impedirá a geração de drenagem ácida de mina, não comprometendo assim o interior do solo, as águas subsuperficiais ou profundas e, ao final, o corpo receptor.

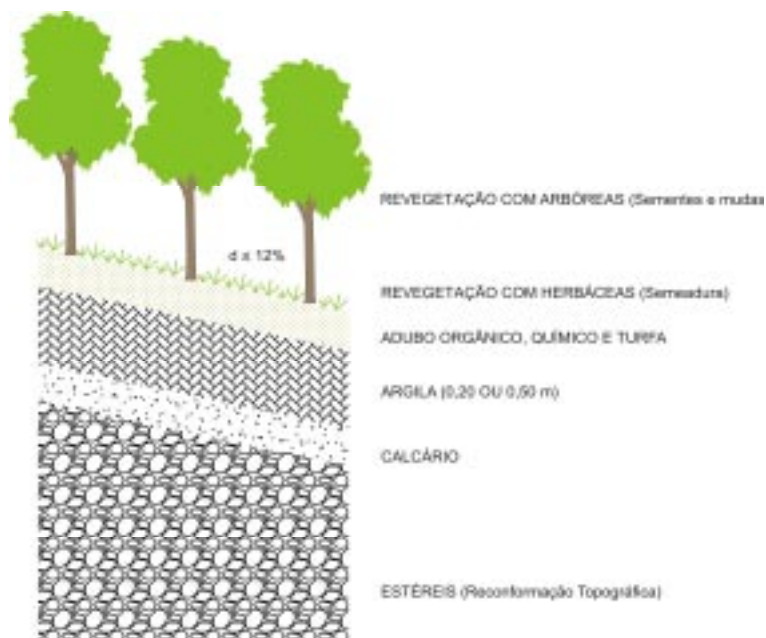


Figura 6 – Remodelamento, fertilização e revegetação do terreno

### Reconstrução do solo

O solo argiloso, dessa forma utilizado na cobertura dos estêreis, cumpriu adequadamente sua função no isolamento destes materiais ao meio externo. Contudo, mostrava-se necessário adequar suas propriedades físicas, químicas e biológicas para o suporte e estabelecimento da vegetação, minimizando os riscos da transformação do ambiente. Portanto, um novo solo foi construído a partir desse substrato argiloso, buscando um produto final com características similares aos solos naturalmente encontrados em toda a região.

A criação desse solo iniciou-se com uma nova aplicação de calcário sobre a superfície da argila. Nutrientes foram também incorporados ao seu perfil, sob a forma de fertilizantes orgânicos e organo-minerais, complementando suas novas propriedades agrônomicas, em linha com o disposto na Figura 6. A execução destes trabalhos pode ser verificada na Figura 7.



Figura 7 – Vista aérea dos trabalhos de remodelamento, cobertura com argila e de construção do novo solo (fertilização)

### **Sistema de drenagem**

Para que toda essa estrutura de solo construída sobre os estéreis se mantivesse protegida e funcional, principalmente no período em que a vegetação estivesse se estabelecendo, um sistema de drenagem de superfície foi executado para captação e direcionamento do excesso hídrico pluvial. O sistema, composto por curvas em desnível, bacias de contenção de sedimentos, escadarias de drenagem com dissipadores de energia e canaletas de plataforma, permitiu que as águas pluviais fossem conduzidas rápida e seguramente aos corpos receptores, sem se contaminarem e sem erodirem o solo criado.

Na implantação das estruturas de drenagem, a empresa executora sugeriu a substituição do concreto e do ferro por materiais alternativos, tais como troncos de eucalipto, pedras e geotêxtil, indicando locais no Brasil e no exterior onde a técnica havia sido implantada com sucesso. A alternativa foi aceita pelo projetista e pela CSN e adotada no projeto, viabilizando a integração harmoniosa da engenharia ao meio ambiente (engenharia naturalística), conforme pode ser visto na Figura 8.



Figura 8 – Drenagem naturalística implantada nas áreas em recuperação

## Revegetação

A vegetação para recomposição das áreas impactadas teve por desafio selecionar espécies que atendessem as necessidades diversas do projeto, tais como o isolamento dos estêreis da superfície pela camada de argila, como também permitir a formação natural, nessa camada de argila, de “áreas verdes” estruturadas na diversidade do bioma da Mata Atlântica. A solução para essas questões, envolvendo todas as particularidades que o assunto requer, foi alcançada pela introdução de espécies pioneiras diversas, apoio ao seu estabelecimento, acompanhamento do processo sucessório e promoção do aumento da biodiversidade local.

Plano estratégico adotado para a vegetação das áreas em recuperação:

- Semeio de espécies herbáceas e arbóreas nativas pioneiras nas áreas remodeladas, com aplicação concomitante de “turfa ambiental”;
- Adensamento dos remanescentes florestais com espécies arbóreas nativas secundárias e climácias;

- Recomposição da mata ciliar com espécies arbóreas pioneiras, secundárias e climácias nativas;
- Implantação de poleiros artificiais “secos” e “verdes”;
- Implantação de “Ilhas de Diversidade” no tempo da recomposição das áreas pelas espécies arbóreas pioneiras.

### Considerações sobre a revegetação

As primeiras espécies vegetais herbáceas e a arbórea pioneira selecionadas para cobertura do solo recém-construído foram: o capim gordura (*Melinis minutiflora*), a braquiaria humidicola (*Brachiaria humidicola*) e a pensacola (*Paspalum sauræ*), entre as herbáceas, e a bracatinga (*Mimosa scabrella*), como arbórea. A escolha por um consórcio dessas espécies é justificada em grande parte pela sua baixa exigência quanto à fertilidade do solo, por apresentarem rápido desenvolvimento inicial, por serem espécies produtoras de grande biomassa, terem capacidade de gerar um ambiente favorável à introdução de espécies arbóreas de outras categorias sucessórias e, principalmente, por haver disponibilidade de sementes no mercado.

A oferta de espécies nativas no mercado agrícola é bastante limitada, principalmente de sementes de forrageiras. Essa condição de um mercado direcionado para o sistema agropastoril, acaba por conduzir os projetos de recuperação ambiental a uma indesejável recomposição das paisagens com o uso de espécies exóticas.

Merece destaque negativo o potencial de ocupação demonstrado pelo capim gordura, dominando grandes extensões da área recuperada, expondo as mesmas ao risco de incêndios naturais ou provocados, conforme apresentado na Figura 9.



Figura 9 – Potencial de ocupação do capim gordura, com a ocorrência de incêndio na área ocupada pelo mesmo

Buscando minimizar os efeitos da dominância dessas espécies na paisagem recuperada, foi aplicado também “turfa ambiental” ao solo, cujo banco de sementes naturalmente adaptado ao meio ácido se mostrou bastante competente na ocupação da área, apresentando uma formação bastante variada, ideal à instalação dos processos sucessórios da vegetação.

Ao longo da implantação dos projetos, verificando-se a resposta positiva da vegetação aos solos recém-construídos e os reflexos negativos da ocupação pelas espécies exóticas, passou-se a ponderar com os projetistas e executores dos trabalhos de recuperação a possibilidade da introdução de novas espécies, mais adequadas às necessidades do projeto, resultando na proposta de espécies apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Espécies propostas para as obras de recuperação em andamento

Período de semeio	Espécies	Nome Popular	Hábito
Primavera/Verão	<i>Axonopus compressus</i> <i>Axonopus affinis</i>	Grama missioneira	Gramínea, herbácea com crescimento rizomatoso.
	<i>Paspalum sauræ</i> <i>Paspalum dilatatum</i>	Paspalum Grama comprida	Gramínea perene, herbácea com crescimento cespitoso.
	<i>Arachis pintoi</i>	Amendoim forrageiro	Leguminosa, herbácea com crescimento rizomatoso.
	<i>Stylosanthes capitata</i> + <i>S. macrocephala</i>	Estilosantes “Campo Grande”	Leguminosa, herbácea, cespitosa.
	<i>Sesbania virgata</i>	Sesbânia	Leguminosa, arbórea, tolerante ao fogo, seca e alagamento.
	<i>Mimosa scabrella</i>	Bracatinga	Leguminosa arbórea
	<i>Schinus terebinthifolius</i>	Aroeira	Arbórea
Outono /Inverno	<i>Paspalum sauræ</i>	Paspalum	Gramínea perene, herbácea com crescimento cespitoso.
	<i>Vicia sativa</i>	Ervilhaca	Leguminosa, decumbente e trepador.
	<i>Lolium multiflorum</i>	Azevém	Gramínea, herbácea com crescimento cespitoso.
	<i>Avena strigosa</i>	Aveia preta	Gramínea, herbácea de porte ereto.
	<i>Sesbania virgata</i>	Sesbânia	Leguminosa, arbórea, tolerante ao fogo, seca e alagamento.
	<i>Mimosa scabrella</i>	Bracatinga	Leguminosa, arbórea
	<i>Schinus terebinthifolius</i>	Aroeira	Arbórea

A busca da ocupação das áreas em recuperação pela maior diversidade possível de espécies vegetais, também levou à implantação de poleiros artificiais “verdes” e “secos” para atração da fauna, conforme Figura 10.



Figura 10 – Poleiro “seco” implantado para atração da avifauna

Outra técnica utilizada na recomposição da diversidade vegetal das áreas em recuperação é a implantação de “ilhas de diversidade”. A técnica consiste na introdução localizada de espécies secundárias e climáticas nativas da Mata Atlântica, ocorrendo somente em áreas onde se verifica a existência do sub-bosque, conforme Figura 11.



Figura 11 – Abertura de covas para plantio de espécies secundárias e climáticas

Apesar do ambiente da Mata Atlântica não ser suscetível a incêndios, as futuras formações implantadas terão suas glebas protegidas por aceiros e cortinas verdes. Compostas pelas espécies caliandra (*Calliandra tweedii*) e sansão do campo (*Mimosa caesalpineaeifolia*), essas formações terão como função principal atuar como barreiras à dispersão do fogo, confiando mais segurança no estabelecimento das formações e atenuando os impactos sobre a flora e a fauna em caso de tais ocorrências.

## Monitoramento ambiental

Os programas de monitoramento ambiental realizados nas áreas recuperadas, têm como finalidade acompanhar a evolução, ou involução, da qualidade ambiental das áreas em recuperação, suportando a tomada de decisões acerca da condução dos trabalhos (IPAT, 2003).

Esta observação contínua das áreas em transformação e a avaliação de seus diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos têm apresentado resultados positivos e animadores, demonstrando até aqui a eficácia dos métodos aplicados.

Resultados alcançados até o momento

## Reabilitação da paisagem

A remodelagem e a revegetação dos antigos campos de mineração a céu aberto transformaram a paisagem antes impactada em ambientes cheios de vida, com cores e formas variadas a cada estação, integrando esta paisagem novamente a fisionomia regional, conforme apresentado nas Figuras 12 e 13.



Figura 12 – Fotos do Campo Malha II Leste antes e após a recuperação





Figura 13 – Fotos aéreas dos Campos Malhas II Leste e Oeste em 2002 (estado após mineração) e em 2006 (após a implantação dos projetos de recuperação ambiental)

## Solos

A eficácia dos trabalhos de recuperação não permitiu a instalação de processos erosivos significativos nas áreas recuperadas, resultado da rápida cobertura pela vegetação e pela drenagem superficial instalada.

A acidez do solo tem diminuído, melhorando o equilíbrio e a disponibilidade dos nutrientes incorporados às plantas. O pH médio, em torno de 4,9, é significativamente superior àquele diagnosticado na sua condição original (pH 4,1), como também de um remanescente florestal próximo, com pH 4,3. Os teores de matéria orgânica são considerados baixos (1,3 a 1,9%), porém ainda dentro dos limites para camadas superficiais de solos minerais, nos quais a variação se encontra entre 0,5 a 5%.

## Águas

Os trabalhos executados no isolamento dos rejeitos e dos estéreis nas antigas áreas mineradas da CSN têm apresentado reflexos bastante positivos sobre a qualidade das águas do rio Fiorita. É verificado que seu pH tem se elevado, passando de 3,8 medido na fase de diagnóstico, para atuais 4,5. Em se tratando de sua carga poluente, houve uma redução de 74% na carga de acidez; 93% na carga de ferro total; 57% na carga de manganês e 64% na carga de alumínio, demonstrando uma melhora na sua condição ambiental.

Também as lagoas têm registrado valores de pH mais elevados que aqueles diagnosticados inicialmente, com remoção de 72% de sua acidez; 76% para ferro total; 43% para o manganês e 64% para o alumínio. Quanto aos seus sedimentos, o calcário adicionado

em superfície tem apresentado um efeito positivo quanto à manutenção do ferro, manganês e alumínio nos mesmos, controlando sua indisponibilidade para o ambiente.

### **Fauna e flora**

Os levantamentos realizados demonstraram que a qualidade dos ambientes aquáticos evoluiu, quando comparados com os dados dos diagnósticos, situação que já oferece condições de abrigo e alimento para espécies pioneiras, como o cará e o lambari, observadas recolonizando o rio ao longo de todo antigo campo minerário.

Novas espécies da mastofauna foram observadas utilizando as áreas em reabilitação, como preás, lebres e até furões, além daquelas registradas nos diagnósticos. A avifauna verificada ainda se caracteriza pelo elevado número de espécies de hábitos granívoros e insetívoros, situação que tende a se modificar com a sucessão da vegetação introduzida e a implantação das “ilhas de diversidade” com espécies vegetais frutíferas.

O levantamento florístico já identificou 78 espécies vegetais distribuídas em 29 famílias, sendo as famílias *Asteraceae*, *Poaceae* e *Cyperaceae* as mais representativas quanto à riqueza de espécies.

Nas áreas incendiadas, verificou-se o surgimento de até oito espécies no recobrimento do solo, porém tendo novamente como principal representante o capim gordura, demonstrando que a espécie já integra o banco de sementes do solo. Contudo, nas áreas não atingidas pelo fogo, o paspalum começa a destacar-se frente àquela espécie exótica, merecendo atenção especial o seu comportamento nos próximos monitoramentos. Vestígios da sucessão inicial também já podem ser observados em várias áreas, pelo estabelecimento de espécies pioneiras arbóreas em regeneração natural.

## Números da recuperação ambiental

Os esforços empregados na recuperação de áreas impactadas pela mineração envolvem normalmente grandes números, os quais são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Quantitativo de materiais e insumos empregados na recuperação ambiental

<b>Área já recuperada</b>	227 ha
<b>Movimentação de materiais</b>	
Estéreis	3.300.000 m <sup>3</sup>
Rejeitos	157.000 m <sup>3</sup>
Argila compactada 10 <sup>-7</sup> cm/s	17.400 m <sup>3</sup>
Argila de recobrimento	488.000 m <sup>3</sup>
<b>Corretivo e fertilizantes</b>	
Calcário em pó e granulado	5.400 t
Turfa ambiental aplicada	32.000 m <sup>3</sup>
Fertilizante orgânico	5.400m <sup>3</sup>
Fertilizante organo-mineral	78 t
<b>Revegetação</b>	
Sementes	8 t
Mudas	13.700 un
<b>Obras</b>	
Canaletas semicirculares	10.200m
Canaletas de plataforma de madeira	3.400m
Escadarias d'água de madeira	1.070 m
Poleiros artificiais "verdes" e "secos"	137 un

## Considerações finais

Os trabalhos de recuperação ambiental realizados pela CSN em suas antigas áreas de mineração a céu aberto têm apresentado resultados bastante promissores, demonstrando que a ação do homem pode contribuir muito para a instalação e aceleração dos processos de reabilitação da natureza nesses ambientes.

Desde o início da implantação dos projetos, um curto período de tempo se passou, e toda percepção ainda é bastante motivada pela grande transformação da paisagem. Porém, é necessário dar continuidade aos programas de monitoramento das áreas, conhecer seus indicadores ambientais e as tendências do seu desenvolvimento, identificando as suas reações para ter-se a certeza de que o caminho certo está sendo percorrido.

## Referências

- CITADINI-ZANETTE, V.; BOFF, V.P. Levantamento florístico em áreas mineradas a céu aberto na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil. Florianópolis: Secretaria de Estado da Tecnologia, Energia e Meio Ambiente, 1992. 160p.
- IPAT – Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense. Diagnóstico Ambiental Mina Malha II Leste – Santa Catarina. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Relatório técnico. Criciúma, 2002a, 121p.
- \_\_\_\_\_. Diagnóstico Ambiental Mina Malha II Oeste Siderópolis – Santa Catarina. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Relatório técnico. Criciúma, 2002c, 111p.
- \_\_\_\_\_. Diagnóstico Ambiental de Áreas Impactadas pela atividade extrativa de carvão mineral no Campo Morozini - Treviso – Santa Catarina. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 2003, vol.i.
- \_\_\_\_\_. Programa de Monitoramento do Projeto de Recuperação Ambiental do Campo Malha II Leste – Santa Catarina. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 2007, 9º relatório.
- \_\_\_\_\_. Programa de Monitoramento do Projeto de Recuperação Ambiental do Campo Malha II Oeste – Santa Catarina. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 2007, 6º relatório.
- REBOUÇAS, Aldo da Cunha et al. Revista de Tecnologia e Ambiente. Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma. V. 3, janeiro /junho de 1997.
- WATERLOO, Brasil Ltda. Avaliação Hidrogeológica e Modelagem Matemática – Campo Morozini. Companhia Siderúrgica Nacional. Criciúma, 2001.

## Recuperação de áreas degradadas

Mário Dukas da Silva; José Adolpho de Carvalho Júnior; Alexandre Bugin;  
Fábio A. M. Rodriguez

As ações de recuperação de áreas mineradas iniciaram-se no Brasil, no final da década de 70. Algumas das maiores empresas de mineração do centro do País (ALCOA, ALCAN, MBR, MRN e VALE DO RIO DOCE) começaram a desenvolver seus projetos de recuperação atendendo aos padrões internacionais de suas sedes antecipando-se às exigências legais ambientais que foram criadas no Brasil a partir de 1981. Estas empresas localizadas, principalmente, nos estados de Minas Gerais e na região Norte do Brasil, serviram de exemplos para o setor mineral brasileiro demonstrando a execução da exploração mineral com viabilidade ambiental.

No início dos anos 80, a partir dos primeiros resultados concretos de recuperação, esta atividade começou a ser propagada pelo setor mineral, o que propiciou outras inúmeras iniciativas dessa ordem por empresas brasileiras de menor porte inclusive. Nesse momento, também eram criados dispositivos legais e os órgãos de licenciamento ambiental começaram a exigir ações para recuperar as áreas degradadas.

Por esta época, no Rio Grande do Sul, começaram a ser implementadas ações de recuperação de áreas mineradas, justamente na exploração do carvão mineral. A Copelmi Mineração e a Companhia Riograndense de Mineração implementaram medidas a partir dos exemplos do centro do país. Esses projetos desenvolvidos pela mineração de carvão do estado serviram, no final da década de 80, como modelos para os outros setores da mineração gaúcha.

É incontestável que qualquer atividade industrial provoca uma alteração no ambiente que a envolve. A atividade mineira leva consigo o estigma de ser um ramo da indústria gerador de elevados níveis de poluição. No entanto, com o planejamento racional das operações unitárias de produção, voltado para a minimização dos impactos ao meio ambiente, torna-se possível a operação de uma unidade mineira dentro de uma faixa bastante aceitável de distúrbio ambiental. É comum em minas europeias, e há casos também no Brasil, em que a recomposição ambiental, após a atividade mineira, recupera os terrenos de tal maneira que se torna difícil diferenciá-los dos setores não minerados.

A inclusão dos cuidados com o meio ambiente no planejamento de lavra, juntamente com o trabalho de conscientização e capacitação de todos os funcionários envolvidos nas diferentes atividades de produção quanto às suas responsabilidades pela recuperação ambiental, são condições essenciais para a prevenção dos impactos ambientais e para facilitar a recuperação das áreas mineradas.

### **Influência das operações de mineração na recuperação ambiental**

O carvão mineral ocorre em jazimento sedimentar com forma tabular e, por isso, exige uma área de mineração maior, se comparada a outros tipos de minérios. O método de mineração a céu aberto consiste na extração na forma de cavas em que o material decapado é depositado no corte já explorado, recontendo o terreno já minerado. Estas operações de descobertura e preenchimento da cava já minerada é o principal determinante no grau do impacto ambiental provocado por uma mina de carvão.

A perda das camadas superficiais de solo vegetal e de argilas, provocada pelo enterro destas ou pela inversão das camadas, provocam prejuízos irreversíveis e dificultam muito os modelos de recuperação ambiental. Por outro lado, o planejamento dessa operação de lavra, em que está definido preliminarmente a localização dos bota-foras e os locais para colocação dos materiais decapados (solo vegetal, argilas e estéreis), permite uma recuperação adequada, sendo os resultados obtidos com custos muito mais baixos, se comparados ao procedimento incorreto.

Está comprovado por inúmeros exemplos que a rotina operacional de lavra que contempla a recuperação ambiental e as medidas preventivas não apresenta diferenças significativas em termos de custos operacionais e não deve ser justificativa para seu não emprego. A racionalização dessas operações e esses procedimentos preventivos provocam, muitas vezes, aumento de qualidade, produtividade e ganhos econômicos para as empresas.

## Procedimentos corretos de operação

- Planejamento das atividades.
- Definição das áreas que receberão os materiais de decapagem.
- Preservação do solo vegetal que não pode ser aproveitado imediatamente após a decapagem.
- Colocação de argilas sobre o material estéril (siltitos) com uma espessura não inferior a 1 m. Quanto maior for esta espessura, mais fácil sua recuperação;
- Colocação de solo vegetal nas áreas reconstituídas topograficamente em camadas com espessura suficiente para a revegetação. Quanto maior for esta camada, melhores serão os resultados. No mínimo 30 cm.
- Evitar a reconstituição topográfica com declividades acentuadas e taludes.



Fonte: Copelmi Mineração

Figura A – Vista da operação correta de reconstituição topográfica e de solo de uma área minerada. Ao fundo observam-se as áreas sendo revegetadas. Mina do Recreio em Butiá – RS

## Recuperação das áreas mineradas e depósitos antigos

A recuperação das áreas mineradas e áreas utilizadas como depósitos, consiste na realização de todas as etapas descritas. Após executadas, visam recompor a paisagem alterada durante a extração mineral, e proporcionar ao solo a capacidade de retornar a atividade produtiva. Para que se alcance um nível de recomposição equivalente às condições iniciais, devem-se fornecer as condições para que o solo inicie o processo de recuperação.

Após o recondicionamento topográfico, iniciam-se as atividades de recuperação com o preparo do solo, aplicação de calcário e adubo para a correção do mesmo. Uma das etapas mais importantes desse processo é o controle de erosão dessas áreas (fig. A). Por isso, conforme o local, são construídos terraços ou drenagens de contenção visando reduzir as velocidades de escoamento das águas pluviais e as perdas de solos. A conclusão destas atividades ocorre dentro de 10 a 30 dias após o recondicionamento topográfico

A seguir, inicia-se a etapa de revegetação com o plantio de vegetação rasteira (gramíneas e leguminosas) que objetiva iniciar o processo de regeneração do solo e da biota da área. Após a consolidação dessa vegetação rasteira, de seis a doze meses após seu plantio, é executado o plantio das espécies arbóreas em algumas áreas pré-definidas. Esta vegetação, que tem por finalidade a proteção do solo, pode ser utilizada para o desenvolvimento de floresta comercial ou para o plantio de árvores nativas, visando a preservação das áreas ou recomposição de mata ciliar. Todas as áreas recuperadas recebem tratamento permanente de manutenção e monitoramento visando garantir o processo implantado.

### Objetivos de recuperação

Ao planejar o trabalho de recuperação de uma área, deve-se definir os diversos objetivos que se deseja alcançar, havendo a necessidade de listá-los por ordem de importância, a fim de se obter resultados satisfatórios.

#### Curto prazo:

- Controle de erosão
- Revegetação
- Correção de níveis de fertilidade

#### Médio prazo:

- Extinção do Processo de erosão
- Surgimento de sucessão vegetal



- Indícios de reestruturação das propriedades físicas do solo e início de reciclagem de nutrientes, vegetação e organismos vivos (microfauna)
- Aparecimento de fauna

### **Longo prazo:**

- Auto-sustentação do processo de recuperação
- Retorno da fauna na área
- Novos equilíbrios entre solo-planta-animal
- Uso futuro da área

Os objetivos de curto prazo devem apresentar respostas imediatas a fim de que se alcancem os resultados planejados a longo prazo. Além disso, deve-se ter uma atenção muito grande, quando se destina uma área ao retorno da exploração agrícola, pois dependendo das condições pode-se inverter o processo de recuperação e iniciar novamente a degradação.

Para atingir os objetivos de curto prazo utilizaram-se técnicas previamente estabelecidas, de acordo com os seguintes critérios, por ordem de importância.

- Práticas de conservação do solo
- Seleção de espécies vegetais que serão utilizadas
- Uso futuro da área
- Aspectos estéticos

### **Revegetação**

A revegetação é a etapa do processo de recuperação da área em que são adotadas as medidas para implantação de uma cobertura vegetal, visando não somente a recuperação paisagística, mas também o controle dos processos erosivos, recuperação das propriedades do solo e a atração da fauna local. A escolha adequada das espécies vegetais que devem ser utilizadas é importante, pois a obtenção de um novo nível de equilíbrio e evolução da recuperação do local depende dos resultados do desenvolvimento dessa vegetação.

As etapas de trabalho apresentadas a seguir têm o objetivo de satisfazer as medidas gerais propostas para a revegetação da área minerada.

### **Colocação de solo vegetal**

A camada fértil de solo é reaproveitada na etapa de revegetação, nos trabalhos de recuperação das áreas degradadas, servindo como substrato para a vegetação a ser introduzida, bem como para a ocorrência dos processos de sucessão natural. O volume

de solo oriundo da decapagem deverá ser utilizado imediatamente na recomposição ou armazenado em áreas específicas para depósito deste material. Este solo será utilizado na recuperação dos bota-foras, no recapeamento da área da praça (cota inferior) da cava de mineração. A camada mínima para o revestimento destas áreas é de aproximadamente 30 cm devendo-se, imediatamente após a recolocação da camada de solo, criar as condições necessárias para a revegetação, por meio da correção do solo.

### **Correção do solo**

Para o rápido estabelecimento e desenvolvimento de uma cobertura vegetal, após a recolocação da camada de solo, faz-se necessárias implantar medidas de correção da acidez e fertilidade.

A quantidade de calcário a ser aplicada é dividida em duas parcelas. A primeira é realizada no mínimo três meses antes do preparo para o plantio e a segunda é realizada no momento de preparo do solo, no momento de lavração do solo e adubação.

### **Controle da erosão**

A ocorrência de processos erosivos é uma das principais conseqüências das operações de mineração a céu aberto. Seu controle deverá ser realizado durante todas as fases da atividade de mineração, através de sistemas de drenagem de contenção.

O controle da altura e inclinação dos taludes, bem como a execução de bancadas de recuperação, também são medidas de atenuação dos processos erosivos previstas no plano de lavra,

Como práticas agronômicas de controle da erosão (Fig. B), imediatamente após a recolocação de solo, serão utilizadas espécies herbáceas (gramíneas e leguminosas) de cobertura do solo, comprovadamente eficazes no controle da erosão. Devem também ser utilizadas espécies arbóreas e arbustivas de acordo com o plano de uso futuro da área em recuperação.



Fonte: Copelmi Mineração

Figura B – Vista da área minerada em processo inicial de revegetação com espécies rasteiras. Controle de erosão e no fundo área com acácia. Mina do Recreio em Butiá – RS

### **Escolha das espécies**

As espécies vegetais propostas para a revegetação de áreas degradadas são escolhidas, considerando-se os seguintes aspectos:

- aptidão à formação de uma rápida cobertura do solo promovendo o controle dos processos erosivos;
- capacidade de auxiliar na reestruturação do solo através do sistema radicular e reposição constante de matéria orgânica;
- espécies nativas da região;
- hábitos, ciclos e portes das diversas espécies visando a recuperação paisagística da área;
- espécies adaptadas às condições físicas e climáticas da área;
- atratividade para a fauna regional.

## **Espécies arbóreas nativas e exóticas e arbustivas**

Recomenda-se, no processo de recuperação da área, a introdução de elementos arbóreos nativos da região, buscando-se o enriquecimento do ecossistema e o aprimoramento da paisagem, assim como o controle dos processos erosivos. As espécies arbóreas e arbustivas serão introduzidas após uma primeira etapa da revegetação, quando a cobertura vegetal formada por espécies herbáceas (gramíneas e leguminosas) já estiver bem estabelecida.

As espécies arbóreas e arbustivas poderão ser introduzidas também em algumas regiões já arborizadas naturalmente, para adensamento da cobertura vegetal.

Deverão ser utilizadas espécies florestais pioneiras ocorrentes nos capões. As espécies pioneiras citadas a seguir (quadro 1) são heliófitas, necessitando de luz direta para o crescimento, sendo precursoras no desenvolvimento da comunidade florestal.

Recomenda-se a introdução destas espécies em maciços arbóreos e arbustivos existentes (para adensamento) nos platôs das bancadas da cava de mineração e como linhas protetoras próximo aos escoadouros naturais. São também adequadas para formação de cortinamento vegetal, minimizando o impacto visual das cavas em relação às estradas que circundam a área de mineração.

Além dos objetivos acima descritos, algumas espécies são também indicadas por serem atraentes à fauna como, por exemplo, a árvore chal-chal, atrativa da avifauna, e o umbu, atrativo de abelhas.

A seleção das espécies arbóreas e arbustivas nativas baseia-se na capacidade de adaptação destas às condições da área de estudo e de seu bom desenvolvimento na mesma. O Quadro1 apresenta uma relação de espécies nativas arbóreas e arbustivas recomendadas para o processo de recuperação da área.

Quadro 1 – Espécies nativas arbóreas e arbustivas recomendadas para recuperação

FAMÍLIA	NOME CIENTÍFICO	NOME COMUM
ANACARDIACEAE	<i>Litsea brasiliensis</i>	Aroeira-preta
	<i>Schinus terebinthifolius</i>	Aroeira-vermelha
ARALIACEAE	<i>Didymopanax morototoni</i>	Caixeta
BIGNONIACEAE	<i>Tabebuia alba</i>	Ipê-da-serra
BORAGINACEAE	<i>Patagonula americana</i>	Guajuvira
	<i>Cordia trichotoma</i>	Louro pardo
EUPHORBIACEAE	<i>Alchornea triplinervia</i>	Tapiá-guaçú *1
	<i>Sebastiania Klotzchiana</i>	Branquilha *2
FLACOURTIACEAE	<i>Casearia sylvestris</i>	Chá-de-bugre
LAURACEAE	<i>Ocotea pulchella</i>	Canela-lageana
	<i>Ocotea puberula</i>	Canela-guaicá
LEGUMINOSAE	<i>Parapiptadenia rigida</i>	Angico vermelho *3
	<i>Machaerium stipitatum</i>	Marmeleiro do mato
MYRSINACEAE	<i>Rapanea umbellata</i>	Capororoca
MYRTACEAE	<i>Blepharocalix salicifolium</i>	Murta
	<i>Campomanesia xanthocarpa</i>	Guabirobeira
	<i>Feijoa sellowiana</i>	Goiaba da serra
	<i>Eugenia rostrifolia</i>	Batinga
	<i>Eugenia uniflora</i>	Pitangueira
SOLANACEAE	<i>Brunfelsia uniflora</i>	Manacá
PALMAE	<i>Arecastrum romanzoffianum</i>	Gerivá
ROSACEAE	<i>Prunus sellowii</i>	Pessegueiro-bravo
RUBIACEAE	<i>Randia armata</i>	Limoeiro-bravo
RUTACEAE	<i>Helietta longifoliata</i>	Canela de veado*5
SAPINDACEAE	<i>Allophylus edulis</i>	Chal-chal*4
	<i>Cupania vernalis</i>	Camboatá-vermelho
TILACEAE	<i>Luehea divaricata</i>	Açoita-cavalo
ULMACEAE	<i>Trema micrantha</i>	Grandiúva

\*1 - Boa adaptação aos mais variados tipos de solo;

\*2 - Adaptada a locais úmidos e abertos;

\*3 - Adaptada a locais pedregosos, mas necessita de muita umidade;

\*4 - Frutos, atrativos para avifauna;

\*5 - Adaptada a solos erodidos, rasos, pedregosos e bem drenados

## Métodos de plantio

As espécies herbáceas de cobertura do solo (gramíneas e leguminosas) serão introduzidas por semeadura a lanço imediatamente após a recolocação, preparo e correção da fertilidade do solo, em condições adequadas de umidade, preferencialmente em dia chuvoso. As densidades de plantio recomendadas para o estabelecimento de cobertura em área degradada excedem, significativamente, ao proposto no plantio convencional.

As espécies trepadeiras nativas, utilizadas para o revestimento dos taludes rochosos, devem ser plantadas nas beiradas do platô das bancadas e nas margens da cava de mineração.

As espécies arbustivas e arbóreas serão introduzidas nos platôs das bancadas, nas margens dos cursos hídricos, nos bota-foras, formando pequenos maciços e acortinamentos arbóreos. Deverão ser plantadas em mudas, obtidas em viveiros qualificados, preferencialmente da própria região do empreendimento.

O plantio das espécies arbóreas e arbustivas será realizado em épocas chuvosas, em covas com dimensões de 0,30 x 0,30 x 0,30 metros, utilizando-se adubação orgânica. O espaçamento utilizado será de 2,5 x 3,0 metros entre plantas, não devendo ser formados alinhamentos homogêneos, com finalidade de propiciar melhores efeitos paisagísticos.

## Manutenção da área

Após a fase de plantio, realizam-se observações periódicas na área recuperada. Esta fase é muito importante, pois se não forem tomadas as devidas providências poderá ocorrer a reversão do processo. Os fatores mais importantes a serem observados são os seguintes:

- Condições dos Terraços: contenção de processos erosivos, manutenção das estruturas de drenagem;
- Germinação das sementes: replantio e/ou trocas de espécies no caso da implantação de cobertura vegetal com espécies não perenes (principalmente quando as atividades de revegetação se iniciarem no período de inverno, sendo a maioria das espécies de ciclo anual) ou falhas na cobertura vegetal implantada;
- Cobertura: ressemeadura em locais com solo descoberto visando evitar a formação de processos erosivos;
- Estado Nutricional da Vegetação: identificar sintomas de carência nutricional e saná-los através de adubação de cobertura;
- Controle de Pragas e Doenças: identificar sintomas de ataque de insetos ou doenças de plantas, fazendo a proposição de medidas de controle.

## Estudos de caso

Como exemplos de reabilitação de áreas para exploração econômica posterior a mineração ou outras atividades agressivas, podem ser citados: a pecuária desenvolvida na Mina do Butiá-Leste, o cultivo de acácias na Mina do Recreio, as atividades de piscicultura desenvolvidas nas Minas do Recreio e do Faxinal, o fornecimento de água bruta para abastecimento da cidade de Butiá a partir de um lago construído em área recuperada na Mina do Recreio e a utilização de uma cava final de mina como aterro sanitário de resíduos domésticos.

### a) Recuperação ambiental da Mina do Butiá-Leste

Com a entrada em vigor em 1986 da Resolução CONAMA nº 001, a COPELMI tornou-se a primeira mineradora do Rio Grande do Sul a concluir, e aprovar um relatório EIA/RIMA. Este trabalho licenciou para operação a Mina do Butiá-Leste, a qual teve suas atividades de lavra iniciadas em 1987, mantendo-se em operação até hoje. Nesta unidade as áreas mineradas e recuperadas até o ano 2000 foram devolvidas ao superficiário e são atualmente utilizadas para pecuária com nível muito alto de produtividade em termos de qualidade de pastagens. A área minerada na Mina do Butiá-Leste completou todo o ciclo, ou seja, sofreu estudo de impacto ambiental, foi licenciada para operação, foi minerada, foi reabilitada ambientalmente, foi devolvida ao superficiário e, por fim, foi empregada para fins agropecuários (plantação de eucaliptos e criação de gado de corte). Trata-se de um exemplo de execução da mineração com responsabilidade visando ao desenvolvimento sustentável.

### b) Cultivo de acácias na Mina do Recreio (Butiá – RS)

Em meados da década de 80, a COPELMI começou a desenvolver pesquisas visando à utilização de espécies gramíneas e arbóreas que melhor se adaptassem às condições do solo reconstruído pela operação de lavra. Buscava-se identificar espécies de rápido crescimento que, com suas raízes, fixassem o solo de modo a evitar ou minimizar o processo de erosão deste tipo de solo. A espécie arbórea que melhor se adaptou foi a acácia negra. Embora seja uma espécie exótica, esta árvore é intensamente explorada nas fazendas da região onde se situam as minas, pois é utilizada para fins comerciais. De sua casca é obtido o tanino, e sua lenha é empregada para produção de celulose e geração de energia. Trata-se de uma árvore de vida curta (5 a 10 anos), que não apresenta rebrota da cepa (não inibe a sucessão local), apresenta uma ação recuperadora dos solos de baixa fertilidade, principalmente porque enriquece o solo pela deposição de folheto, riquíssimo em nitrogênio e matéria orgânica. A acácia é plantada na seqüência do plantio de espécies gramíneas de rápido crescimento. Usualmente, o plantio da acácia ocorre no segundo ano após o plantio das gramíneas.

A COPELMI reabilitou cerca de 200 ha de áreas mineradas da Mina do Recreio com o plantio de acácia negra. Boa parte destas áreas está no segundo ciclo de

plantio. A empresa tem desenvolvido estudos em conjunto com o Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria visando à melhoria da qualidade da mata plantada. Recentemente foi firmada uma parceria com a empresa SETA S.A. para o plantio e manejo de acácia em várias áreas mineradas também da Mina do Recreio. Esta parceria tem como objetivo buscar a sustentabilidade da produção florestal através de um manejo que considere os aspectos sociais, ambientais e econômicos.

Esta experiência da COPELMI também comprova que se pode obter uma utilização e uma exploração racional das áreas após a mineração atendendo a todas as exigências e condicionantes ambientais.

#### c) Fornecimento de água bruta para abastecimento da cidade de Butiá

O tipo de método de lavra empregado pela empresa tem a peculiaridade de poder transformar o último corte de lavra de uma determinada área da mina em um lago. Isto ocorreu no Bloco Charrua (Mina do Recreio), minerado entre 1992 e 1994. A construção do lago foi concluída em 1996.

Em 1997, devido a uma grande seca ocorrida na região, o reservatório de água utilizado pela CORSAN para atender a cidade de Butiá estava numa situação bastante crítica, pondo em risco o abastecimento da cidade. Isto fez com que a CORSAN buscasse alternativas para solucionar o problema. Foi quando esta empresa tomou conhecimento do lago construído pela COPELMI no Bloco Charrua. A água foi analisada e constatou-se que a mesma poderia ser empregada como fonte de água bruta para o abastecimento de Butiá. Assim, em regime de urgência, foi construída uma adutora no lago e uma tubulação interligando o lago e o reservatório da cidade. Desde então, esta alternativa tem sido empregada nos períodos de seca intensa.

No mesmo lago, instalou-se, em 1999, uma estação experimental de piscicultura. O experimento teve a duração de 10 meses, tendo sido empregada a técnica de piscicultura intensiva com a utilização de 20 tanques redes de aproximadamente 1m<sup>3</sup> de volume cada. Durante o período foram produzidos aproximadamente 20 t de Tilápias (*Oreochromis niloticus*) mostrando assim mais uma possibilidade de uso sustentável das áreas recuperadas após a mineração.

#### d) Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos

A COPELMI desenvolveu uma alternativa para a solução de um dos grandes problemas que afligem os centros urbanos hoje. Foi construído, na Mina do Recreio um aterro sanitário a partir de uma cava final de mina, cuidadosamente preparado para receber resíduos domésticos e não gerar contaminação do solo de seu entorno.

O aterro ocupa uma área de 25 ha e possui uma capacidade para receber cerca de 5.5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Foi construído com as mais modernas técnicas, buscando uma operação dentro dos mais rigorosos padrões ambientais.



A impermeabilização da base e dos taludes do aterro foi executada através da deposição e compactação de camadas de argilas com baixíssimo coeficiente de permeabilidade, intercaladas por uma camada de areia para detecção de eventual vazamento, tudo isto sobreposto por uma geomembrana de polietileno. O efluente (chorume) e os gases gerados através da decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos são retirados do aterro através de tubulações na base do aterro interligadas com uma rede de drenos verticais. Os gases são queimados na superfície através de queimadores instalados na boca dos drenos verticais, enquanto o líquido é conduzido para uma bacia intermediária localizada junto ao aterro. A partir deste ponto o líquido é transportado para a estação de tratamento de efluentes (ETE) projetada e construída especificamente para este fim. A ETE é composta por duas bacias anaeróbias e três bacias aeróbias.

A operação do aterro se dá durante 24 horas por dia e seis dias por semana. Os resíduos são descarregados no interior das células construídas, nas quais tratores de esteiras efetuam a sua compactação. O recobrimento dos resíduos é realizado continuamente através do material movimentado pela atividade de mineração que se desenvolve nas proximidades.

Este tipo de operação (aterro + mina) traz uma série de vantagens em relação aos aterros convencionais, pois é possível manter uma área de resíduos descoberta bastante pequena. Com isto, é evitada ou minimizada a presença de vários vetores comuns neste tipo de obra, tais como: moscas, mau cheiro, urubus, ratos, etc. Também é evitada catação de resíduos no local, além da existência de monitoramento das águas, gases e da impermeabilização do aterro. Outras vantagens apresentadas por este aterro são: as condições geológicas e hidrológicas favoráveis; a grande disponibilidade de materiais utilizados para realizar o confinamento (impermeabilização) e recobrimento dos resíduos; toda área é de propriedade da empresa, sendo toda cercada e com vigilância permanente; a disponibilidade de uma cava aberta de grande volume e com possibilidade de expansão; a localização em uma área rural.

Atualmente, este aterro é responsável pelo recebimento do lixo urbano de 150 municípios do estado do Rio Grande do Sul (inclusive da cidade de Porto Alegre), o que representa cerca de 30% da população do estado.

O aterro, da forma como foi projetado e é operado, serve de local seguro para a disposição final destes resíduos urbanos e impede a degradação de áreas de muitos municípios do estado do Rio Grande do Sul, que inevitavelmente seriam utilizadas para este fim.

## Conclusão

Através de uma política de desenvolvimento socioambiental a COPELMI tem desenvolvido programas e ações que incidem na mudança de comportamento e atitudes dos colaboradores e comunidade.

A empresa conduz os negócios empresariais de tal maneira que a torna parceira e co-responsável pelo desenvolvimento social e sustentável. O controle dos impactos ambientais das operações da COPELMI é cuidadosamente feito por meio do estabelecimento de programas claros e apropriados para cada caso, monitorando-se os objetivos alcançados em relação às metas propostas. Assim pode-se afirmar que a gestão de Responsabilidade Socioambiental da COPELMI é um jeito de fazer mineração de forma comprometida com as gerações futuras.

## Referências

- ALCOA, ALUMÍNIO S/A. Coletânea de trabalhos sobre reabilitação de áreas mineradas de bauxita. Fábrica de alumínio de Poços de Caldas. Minas Gerais, 1985, 123 p.
- BARTH, R.C. Reclamation technology for tailing impoundments. Part 1 and 2. Colorado school of Mines. Golden, USA, 1986, 105 p.
- BARTH, R.C. Avaliação da reabilitação de áreas mineradas no Brasil. Relatório de Visita. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 1987, 52 p.
- BRADY, C. N. Natureza e propriedades dos solos. Biblioteca Universitária Freitas Bastos. 6. Ed. Rio de Janeiro, 1983, 647 p.
- BRAZISUL. Catálogo de sementes e forrageiras. Porto Alegre, 1986, 15 p.
- FARSUL. Seminário sobre Pastagens - de que pastagens precisamos. Anais. Porto alegre, 1983, 120p.
- GARICLIO, M.A. Utilização de revestimento vegetal na proteção contra erosões. Artigo Técnico 13, ABGE, Minas Gerais, 1987.
- GRIFFITH, J. J. Recuperação conservacionista de superfícies mineradas: Uma revisão de literatura. n° 2, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 1980.
- SECRETARIA DA AGRICULTURA Manual de Conservação do Solo e Água. 2. ed. Porto Alegre, 1983.
- SHETRON, S.G et al. Manual de reabilitação de minas. Universidade Tecnológica de Michigan. Michigan, EUA, s.d.

# O papel da hidrogeologia como instrumento de gestão ambiental na mineração de carvão

Antônio Silvio Jornada Krebs; Mario Valente Possa

A Bacia Carbonífera do Sul de Santa Catarina possui uma área aproximada de 1.625km<sup>2</sup>, dos quais cerca de 490km<sup>2</sup> foram diretamente impactados pela atividade carbonífera. Conseqüentemente, as bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga, que perfazem uma área total de aproximadamente 10.000km<sup>2</sup> (Figura 1), foram também afetadas.

A região apresenta interesses conflitantes no que diz respeito ao planejamento territorial, ao desenvolvimento urbano, à utilização dos recursos hídricos, dos recursos minerais e à preservação ambiental. Na mineração de carvão, cerca de 80% da produção se localiza na bacia do rio Araranguá; o restante, nas bacias dos rios Urussanga e Tubarão.

Do ponto de vista geológico, nesta área afloram rochas sedimentares e efusivas básicas e intermediárias, que constituem a seqüência da borda leste da Bacia do Paraná. Na região costeira, ocorre uma diversidade enorme de depósitos de cascalho, areia, siltes e argila, relacionados a processos marinhos e continentais. O embasamento cristalino regional compõe-se de rochas granitóides tardi a pós-tectônicas, não aflorantes na área desta bacia.

Segundo SEDUMA (1997), a área correspondente à região carbonífera é um dos pontos considerados mais críticos no estado em relação à disponibilidade hídrica e à qualidade das águas, pois cerca de 2/3 dos seus rios encontram-se poluídos. Nesta área, concentram-se diversas atividades, tais como mineração de carvão, cerâmica de revestimento e estrutural, indústria metal-mecânica, curtume e agroindústria.

A degradação ambiental, em especial o comprometimento dos recursos hídricos, motivou o Ministério Público Federal a mover, em janeiro de 2000, uma ação pública cuja sentença condenou solidariamente a União, o Estado de Santa Catarina e as carboníferas a promoverem a recuperação ambiental da área atingida pela extração de carvão.

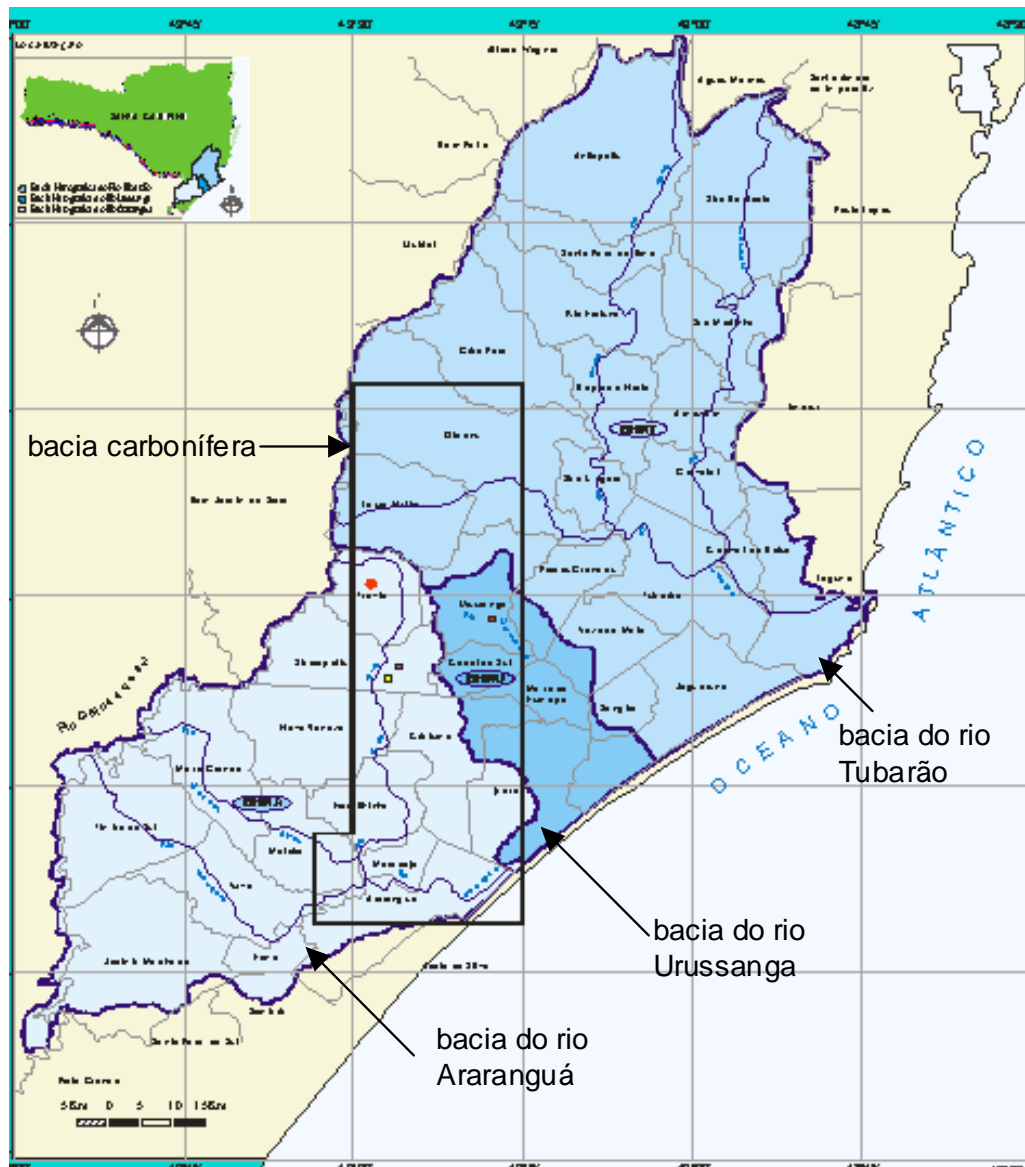


Figura 1 – Localização da bacia carbonífera em relação às bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Urussanga e Tubarão

Em 2006, as carboníferas firmaram com a FATMA (Fundação do Meio Ambiente) um Termo de Ajuste de Condutas (TAC) visando a estabelecer as obrigações mínimas a serem cumpridas por cada uma delas de forma a possibilitar a adequação legal de suas atividades de mineração. Dentre essas obrigações, as carboníferas se comprometeram a implantar um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) em suas respectivas unidades mineiras.

Para que se tenha uma eficiente gestão ambiental dos recursos hídricos, é fundamental que os estudos levem em consideração não apenas as águas superficiais, mas também as águas subterrâneas representadas pelos aquíferos, o que confere à hidrogeologia um papel relevante. Dentro do escopo de um estudo hidrogeológico, além de informações relacionadas aos aspectos geológicos e estruturais, a elaboração de mapas de vulnerabilidade natural e de mapas hidroquímicos, a avaliação de riscos de contaminação e a elaboração de gráficos semilogarítmicos de Schöeller e diagramas de Stiff e de Piper são importantes instrumentos a nossa disposição.

## **Caracterização hidrogeológica**

Na região carbonífera ocorrem rochas com diferentes características granulométricas, texturais e estruturais. Ao longo das três bacias hidrográficas (Araranguá, Tubarão e Urussanga) existem porções mineradas a céu aberto ou em subsolo bem como locais cobertos por rejeito, o que reforça a necessidade de se avaliar, através de uma caracterização hidrogeológica, a possibilidade de intercomunicação entre os diferentes intervalos aquíferos e as fontes de poluição ali presentes.

Conhecer o condicionamento geológico-estrutural de uma determinada região é fundamental para a determinação de estruturas aquíferas. Sabe-se que a maior ou menor capacidade de armazenamento e de transmissão de água está diretamente relacionada à existência de sistemas de juntas, fraturas ou falhas na rocha. A caracterização e a perfeita identificação desses parâmetros são atividades importantes para que os problemas de infiltração e, por consequência, de geração de drenagem ácida no interior da mina sejam minimizados.

A caracterização hidrogeológica e hidroquímica permitirá o conhecimento do comportamento das águas subterrâneas do ponto de vista quantitativo e qualitativo. Estas informações são essenciais à definição das ações que visam à preservação ambiental da região.

## **Principais aquíferos da região carbonífera**

Estudos realizados por Krebs (2004) demonstraram que, na região carbonífera, ocorrem aquíferos relacionados aos diferentes tipos de rochas e de sedimentos ali presentes. As rochas ígneas constituem os aquíferos do tipo fraturado, e as rochas sedimentares gonduânicas, os sedimentos terciários e/ou quaternários constituem os aquíferos do tipo poroso.

No domínio das rochas sedimentares bem como dos sedimentos terciários e/ou quaternários, o armazenamento é controlado pelo maior ou menor grau de permeabilidade das rochas ou dos sedimentos. Assim, quanto mais arenosa for a rocha ou o sedimento, haverá uma maior quantidade de espaços intergranulares e, conseqüentemente, terá uma maior permeabilidade. No caso das rochas cristalinas, o armazenamento é controlado pelas fraturas. Desta forma, quanto mais fraturadas estiverem as rochas na área, maior será a probabilidade de ocorrência de água subterrânea.

No caso da região carbonífera, o aquífero relacionado aos Depósitos de Leques Aluviais e o relacionado à Formação Rio Bonito se destacam por sua importância como fontes de abastecimento para fins domésticos ou industriais. As rochas areníticas da Formação Rio Bonito constituem o aquífero profundo e os depósitos aluviais, o aquífero mais próximo à superfície.

### **Aquífero relacionado à formação Rio Bonito**

#### **a) Caracterização hidrogeológica**

A Formação Rio Bonito ocorre ao longo de toda a área da bacia carbonífera. Do ponto de vista litológico, constitui-se de arenitos finos a médios, quartzosos, bem selecionados, porosos e permeáveis. Em menor proporção ocorrem arenitos médios a grossos, feldspáticos, com matriz areno-argilosa, também bastante permeáveis. Intercalam camadas de siltitos carbonosos e de carvão.

As correlações litofaciológicas realizadas entre perfis de furos de sonda demonstraram que a Formação Rio Bonito constitui um sistema aquífero com múltiplos intervalos aquíferos, relacionados geneticamente às diferentes associações litofaciológicas presentes. Por suas características litológicas e granulométricas, posicionamento estratigráfico e distribuição na área, conclui-se que este aquífero possui porosidade intergranular e é extenso. Nas áreas onde as camadas areníticas deste aquífero são aflorantes, ele geralmente se comporta como aquífero livre. Onde as camadas de arenito são capeadas por camadas de siltitos ou carvão ou ainda onde é capeada pela Formação Palermo, comporta-se como aquífero confinado. Localmente, onde ocorre interseção de diferentes sistemas de falhas, pode se comportar como aquífero intergranular fraturado, livre ou confinado.

O modelo hidrogeológico, estabelecido através das linhas de fluxo, bem como informações geológicas e geomorfológicas indicam claramente que suas áreas de recarga estão situadas nas encostas do planalto gonduânico e nos morros. Esta conformação hidrodinâmica mostra a contribuição de duas fontes principais de infiltração. Nas bordas da bacia, principalmente na borda oeste-noroeste e nas proximidades do Montanhão, em que as declividades do terreno são acentuadas e as velocidades da circulação são elevadas, a recarga se realiza por drenança das águas dos aquíferos fraturados, relacionados às rochas ígneas, e drenança das demais formações geológicas e depósitos

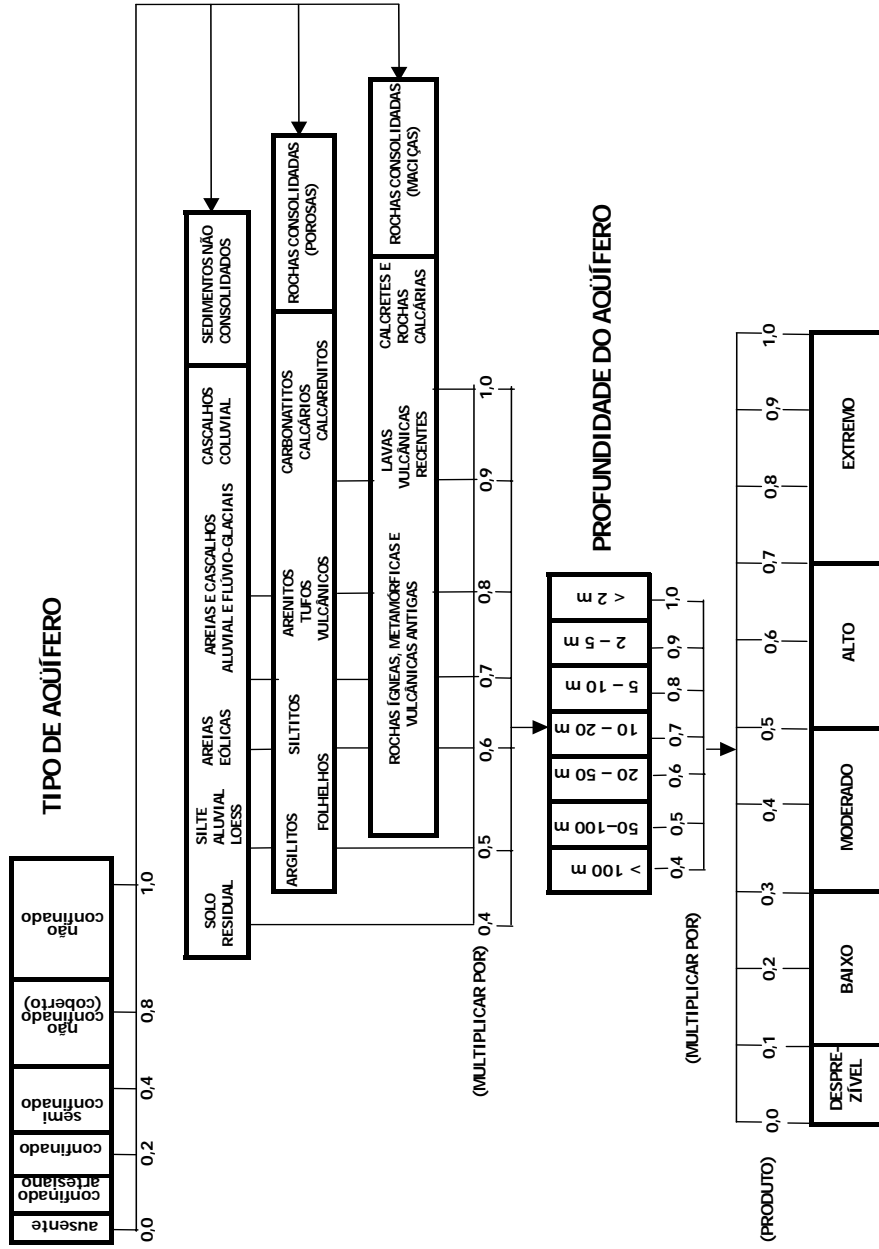
de tálus, sobrepostos à Formação Rio Bonito, que afloram nas encostas do planalto gonduânico. Na área de afloramento desta formação, a recarga dá-se por infiltração direta, a partir das precipitações, através dos solos residuais e transportados.

Na maior porção da área estudada, a drenagem superficial não atua na realimentação do aquífero, pois os rios têm caráter efluente, isto é, recebem contribuições dos aquíferos, à exceção de locais específicos onde afloram rochas areníticas da Formação Rio Bonito ou onde ocorrem falhas com caráter distensional.

#### b) Vulnerabilidade natural e riscos de contaminação

O conceito de vulnerabilidade natural dos aquíferos baseia-se no fato de que o meio físico possui características capazes de atenuar e de proteger a água disposta no subsolo de cargas contaminantes específicas, quer sejam naturais ou de natureza antrópica. É importante o entendimento claro das diferenças entre risco e vulnerabilidade à contaminação, uma vez que o conceito de risco é muito comumente confundido com o de vulnerabilidade natural do sistema aquífero. Porém, é importante ressaltar que o primeiro envolve a existência de uma fonte potencial contaminante, enquanto o segundo depende apenas das características do meio físico.

Para a elaboração de mapas de vulnerabilidade, uma vasta gama de métodos e de metodologias pode ser encontrada na literatura. Entretanto, dentre eles destaca-se o método DRASTIC, definido por Aller et al. (1987), e o método GOD, definido por Foster; Hirata (1993), referências para praticamente todos os estudos sobre vulnerabilidade natural de aquíferos e amplamente adotados no Brasil e no mundo. Com as informações disponíveis na região carbonífera, constatou-se que o método GOD apresenta melhores resultados, visto que, para aplicar-se o método DRASTIC, torna-se necessário detalhar melhor os aspectos do meio físico, principalmente no que se refere aos diferentes tipos de solo, ao comportamento da zona vadosa, à declividade do terreno e às áreas de recarga. A Figura 2 apresenta o esquema de combinação dos parâmetros utilizados no método GOD (Foster; Hirata, 1993).



Fonte: Foster et al., 1987

## ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DO AQUIFERO

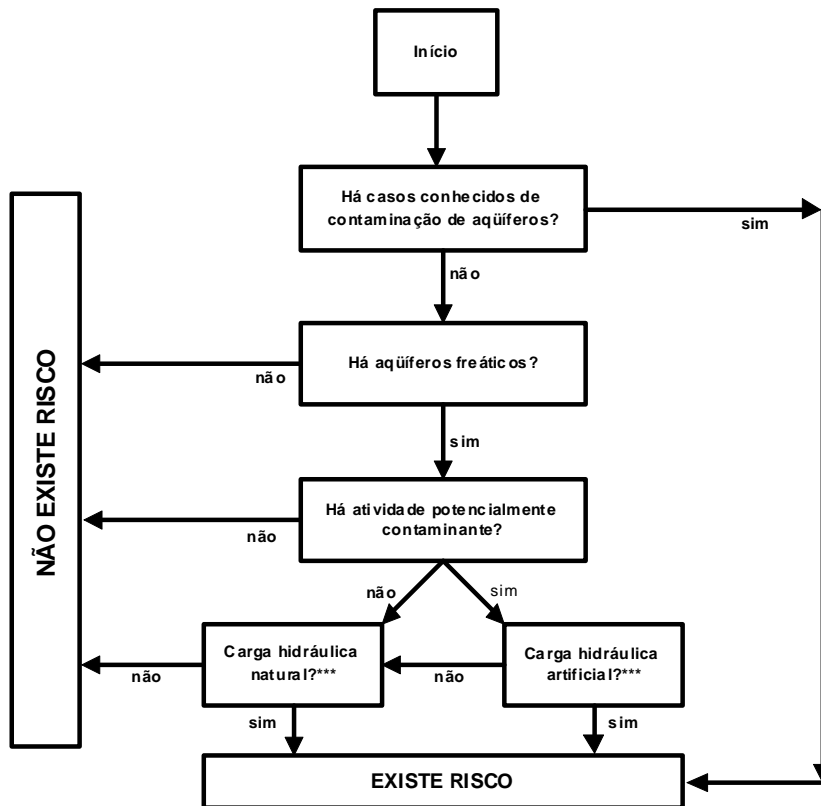
Figura 2 – Esquema de combinação dos parâmetros utilizados no método GOD.



Devido às atividades de mineração de carvão, os aquíferos múltiplos têm comportamentos bastante distintos no que diz respeito à vulnerabilidade e aos riscos de contaminação. O risco de contaminação é obtido a partir da correlação do mapa de vulnerabilidade e do mapa de fontes de poluição, de acordo com a metodologia proposta por Foster; Hirata (1993). Esta metodologia baseia-se na avaliação do fluxograma apresentado na Figura 3.

De acordo com Krebs (2004), os aquíferos do topo da Formação Rio Bonito, tanto aqueles relacionados à Seqüência Superior (Areias Transgressivas) como os da Seqüência Média (Seqüência Barro Branco), são aflorantes em parte da área estudada e constituem-se, predominantemente, de litologias arenosas. Estas características conferem aos respectivos aquíferos alta vulnerabilidade natural (Figura 4). A existência de pilhas de rejeito piritoso sobre estas rochas arenosas confere aos aquíferos elevado risco de contaminação.

Os intervalos aquíferos relacionados à Seqüência Inferior (Seqüência Bonito) e aqueles relacionados à base da Formação Rio Bonito (Membro Triunfo), pelo fato de estarem capeados por uma seqüência de rochas predominantemente argilosas, apresentam vulnerabilidade e risco de contaminação que variam de baixos a moderados. No caso da presença de falhas distensionais, a área contígua à zona de falha apresenta alta vulnerabilidade e alto risco de contaminação.



Fonte: Foster; Hirata, 1993

\* Atividades que incluem principalmente: urbanização com saneamento *in situ*, indústrias que utilizam substâncias tóxicas, aterro sanitário e lixões, reuso de águas servidas, rios contaminados, agricultura de cultivo intensivo, atividade mineral e petrolífera; acidentes ambientais, vazamentos de rede de esgoto e tanques de armazenamento, cemitérios etc., que podem causar riscos de contaminação.

\*\* Carga hidráulica artificial associada ao contaminante e dirigida ao subsolo.

\*\*\* Carga hidráulica natural que possibilita a lixiviação de resíduos sólidos.

Figura 3 – Avaliação de risco de contaminação das águas subterrâneas.

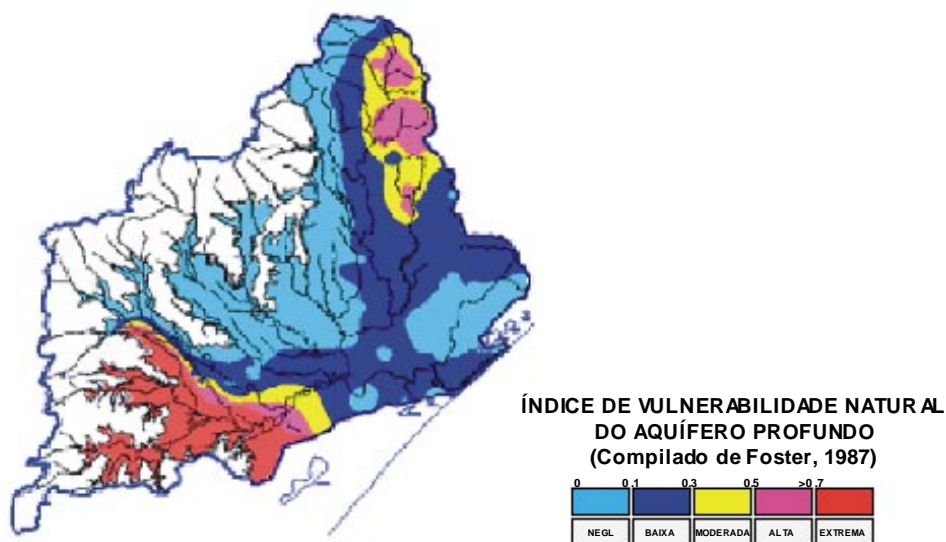


Figura 4 – Mapa de vulnerabilidade natural do aquífero da Formação Rio Bonito

### c) Aspectos hidroquímicos

Antes de se abordarem as características físico-químicas e microbiológicas das águas deste sistema, é importante que se comentem alguns fatores que influenciam direta ou indiretamente a qualidade das suas águas.

Inicialmente cabe ressaltar que a Formação Rio Bonito contém, entre suas litologias, importantes camadas de carvão, desde há muito tempo lavradas. A natureza predominantemente arenosa de seus litótipos confere-lhe uma boa potencialidade como aquífero. Porém, minas a céu aberto e minas de subsolo bem como grandes pilhas de rejeito piritoso alteram suas características como aquífero.

Outro fator a ser considerado relaciona-se aos aspectos geológicos e estruturais. O mapeamento litofaciológico demonstrou que, nesta formação geológica, são freqüentes as variações laterais e verticais de fácies litológicas. Demonstrou-se também que, no âmbito desta formação, ocorrem freqüentes falhas geológicas que provocam basculamento dos blocos rochosos. Muitas vezes nestas falhas encaixam-se diques de diabásio. Todos estes fatores interferem no comportamento hidrogeológico desta Formação assim como nos aspectos hidroquímicos de suas águas. Pelo exposto, pôde-se constatar que é difícil definir uma assinatura hidrogeoquímica padrão para as águas desta Formação.

Na caracterização hidroquímica, emprega-se normalmente os gráficos semilogarítmicos de Schöeller e os diagramas de Stiff e de Piper. Para a elaboração dos diagramas de Stiff e de Piper, torna-se necessário, inicialmente, determinar os teores ( $\text{mg. L}^{-1}$ ) dos seguintes parâmetros: alcalinidade total, cálcio, magnésio, sódio, potássio, sulfato e cloreto. Posteriormente, determinam-se as concentrações expressas em miliequivalentes por litro ( $\text{meq.L}^{-1}$ ) de cada íon. No diagrama de Stiff, as concentrações iônicas (em  $\text{meq.L}^{-1}$  ou % de  $\text{meq.L}^{-1}$ ) são representadas sobre linhas paralelas horizontais. Ao serem ligados todos os respectivos pontos, obtém-se uma figura característica para a água analisada. No diagrama de Piper, os  $\text{meq.L}^{-1}$  são ponderados em relação a 100 e plotados nos respectivos triângulos de cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Mg}^+$ ) e de ânions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$ ). A projeção destes pares de ponto no losango do diagrama determina a classificação da água. Com os diagramas de Stiff e de Piper, pode-se elaborar o mapa hidroquímico e realizar a classificação hidroquímica das águas. O gráfico semilogarítmico de Schöeller pode ser utilizado para correlações entre várias análises de água de um mesmo ponto em épocas diferentes ou de diferentes pontos.

Os diagramas de Piper e Stiff são traçados utilizando-se *softwares* comerciais consagrados dentre os quais o Aquachen ou o Qualigraf. Na Figura 5, utilizando-se o Qualigraf, apresenta-se o diagrama de Piper, no qual é possível observar que as águas do aquífero da Formação Rio Bonito possuem grande variação composicional, sem apresentar uma herança específica de cada intervalo litológico correspondente aos diferentes intervalos aquíferos presentes nesta Formação, tanto para o conteúdo total de íons dissolvidos quanto para íons individuais.

Constata-se que 48,5% das amostras foram classificadas como águas sulfatadas ou cloretadas sódicas; 24,2%, como águas sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas; 18,2%, como águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas; e 9,1%, como águas bicarbonatadas sódicas. Nesta área, o fluxo das águas subterrâneas ocorre em um meio de grande complexidade estrutural, caracterizado pela presença de galerias em subsolo e de falhas geológicas. Em diversos locais, a recarga deste sistema aquífero é realizada em áreas onde já houve atividades de lavra ou que se encontram cobertas por pilhas de rejeito piritoso. Por isso, as águas presentes nestas porções do aquífero classificam-se predominantemente como sulfatadas.

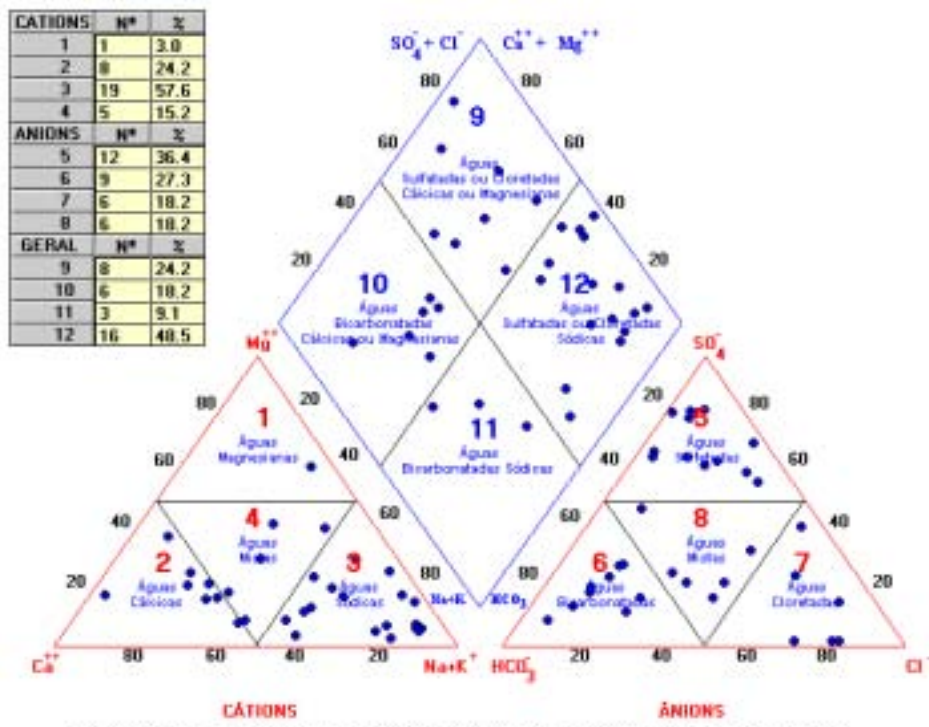


Figura 5 – Diagrama de Piper para as águas do aquífero da Formação Rio Bonito

A Figura 6 apresenta o diagrama de Stiff para uma amostra de água do aquífero da Formação Rio Bonito, coletada no subsolo da Mina Verdinho, da Carbonífera Criciúma S.A. Constatou-se que esta água pode ser classificada como sendo cloretada sódica com um viés de sulfatada.

A Figura 7 mostra o gráfico semilogarítmico de Schöeller no qual se observa o comportamento de duas amostras de poços tubulares (PVA) e duas de poços escavados (EA), relacionados ao aquífero da Formação Rio Bonito, nas proximidades da cidade de Siderópolis. Constatou-se que os valores de sulfato total e ferro total são elevados, indicando que nesta porção as águas subterrâneas já apresentam comprometimento pelas atividades de lavra e de beneficiamento de carvão (Krebs, 2004).

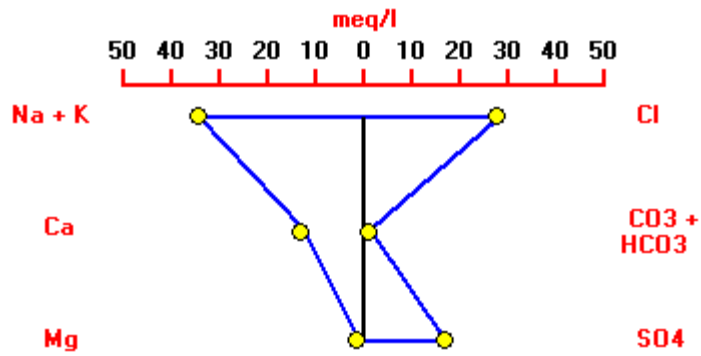


Figura 6 – Diagrama de Stiff para água do aquífero da Formação Rio Bonito coletada no subsolo da Mina Verdinho

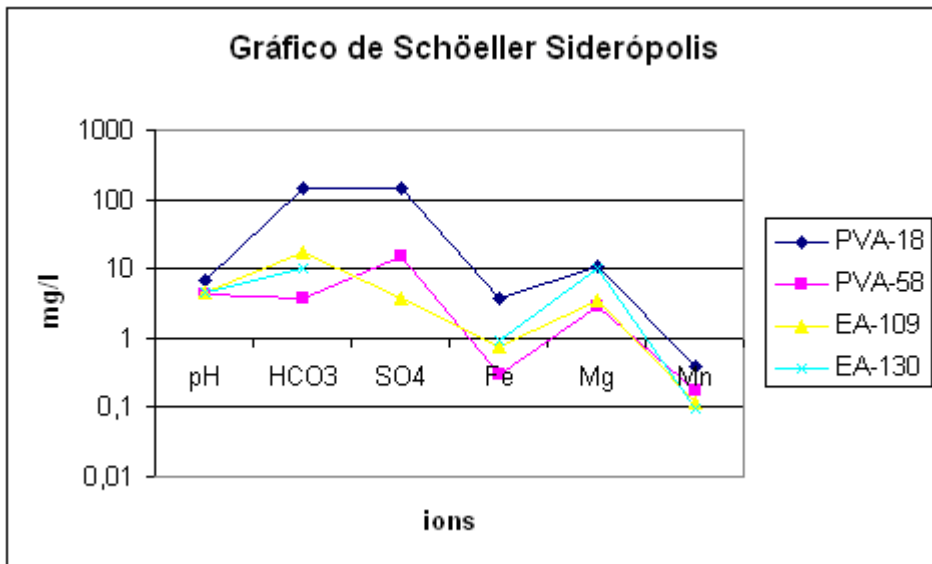


Figura 7 – Comportamento das águas subterrâneas no município de Siderópolis em poços tubulares e poços escavados

## Aqüífero relacionado aos depósitos de leques aluviais

### a) Caracterização hidrogeológica

O aquífero relacionado aos Depósitos de Leques Aluviais ocorre de maneira contínua a partir da encosta inferior do planalto gonduânico e dos morros testemunhos ao longo de toda a bacia hidrográfica do rio Araranguá. Ao sul, os Leques Aluviais são cobertos pelos depósitos arenosos de origem marinha e retrabalhamento eólico e por depósitos síltico-arenosos de origem flúvio-lagunar.

Litologicamente estes depósitos são formados por grânulos, seixos, cascalhos e blocos de rochas basálticas e, em menor proporção, areníticas ou pelíticas, com ou sem matriz arenosa. Na porção da bacia onde o fluxo já está desconfinado, estes conglomerados são clastos-suportados e, em geral, possuem pouca ou nenhuma matriz, o que lhes confere uma alta permeabilidade. A geometria das camadas é lenticular. Porém, em nível de afloramento, apresentam uma forma aproximadamente tabular.

O modelo hidrogeológico, estabelecido a partir das características de relevo, características granulométricas, mudanças litológicas, variações de permeabilidade, linhas equipotenciais, sugere tratar-se de um aquífero extenso com porosidade intergranular, com regime de fluxo livre, semiconfinado ou confinado, com nível estático próximo à superfície.

A recarga se processa de maneira direta a partir das precipitações através dos próprios Depósitos de Leques Aluviais ou de seus solos residuais. De maneira indireta, dá-se a partir da infiltração de água nas encostas e de seu deslocamento para as planícies onde se encontram os leques, isto é, no sentido do declive hidráulico.

As verificações realizadas em minas de subsolo permitiram constatar que, em alguns trechos, os rios Mãe Luzia, Pio e Rocinha contribuem para a recarga do aquífero relacionado à Formação Rio Bonito, subjacente aos leques. Este fato permite afirmar que os referidos cursos d'água contribuem também para a recarga do aquífero relacionado aos leques aluviais.

Na bacia do rio Araranguá, há extensas áreas de cultivo de arroz irrigado. De acordo com Krebs (2004), há evidências de que grande parte das áreas de rizicultura seja irrigada com águas ácidas aduzidas do rio Mãe Luzia. Esta prática continua causando uma recarga artificial do aquífero relacionado aos Depósitos de Leques Aluviais, contribuindo conseqüentemente para a degradação do referido aquífero.

## b) Vulnerabilidade natural e risco de contaminação

O mapa de vulnerabilidade, apresentado na Figura 8, mostra que o aquífero de Depósitos de Leques Aluviais possui vulnerabilidade natural entre moderada e extrema. Em suas porções mais distais, a vulnerabilidade é moderada porque nestas porções os leques possuem cobertura de material siltico-argiloso, originada a partir de processos de transbordamento. À medida que se aproximam da linha de costa, estes depósitos de leques são encobertos por depósitos arenosos marinhos com retrabalhamento eólico. Na porção média dos Depósitos de Leques Aluviais, ocorre uma faixa com elevada vulnerabilidade. Em suas áreas proximais, estes depósitos rudáceos com alta permeabilidade não possuem cobertura e são extremamente vulneráveis. Cabe ressaltar que a recarga deste aquífero se dá nas porções com gradientes topográficos mais elevados.

A Figura 9 apresenta o mapa de fontes de poluição identificadas para a Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá. O risco de contaminação é obtido a partir da correlação do mapa de vulnerabilidade e o mapa de fontes de poluição, de acordo com a metodologia proposta por Foster; Hirata (1993), apresentada na Figura 3.

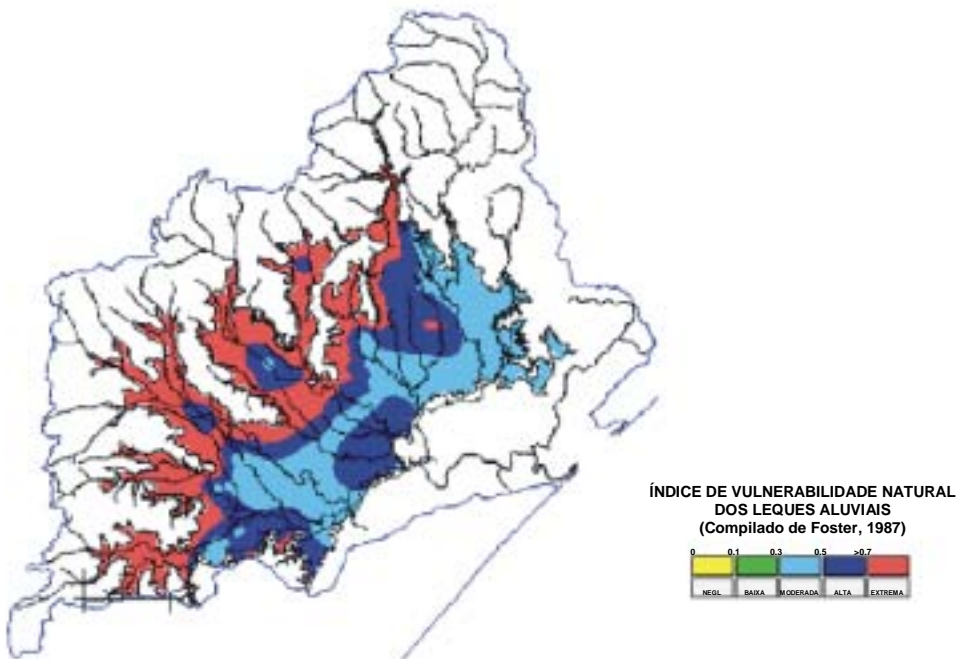


Figura 8 – Mapa de vulnerabilidade natural do aquífero relacionado aos Depósitos de Leques Aluviais



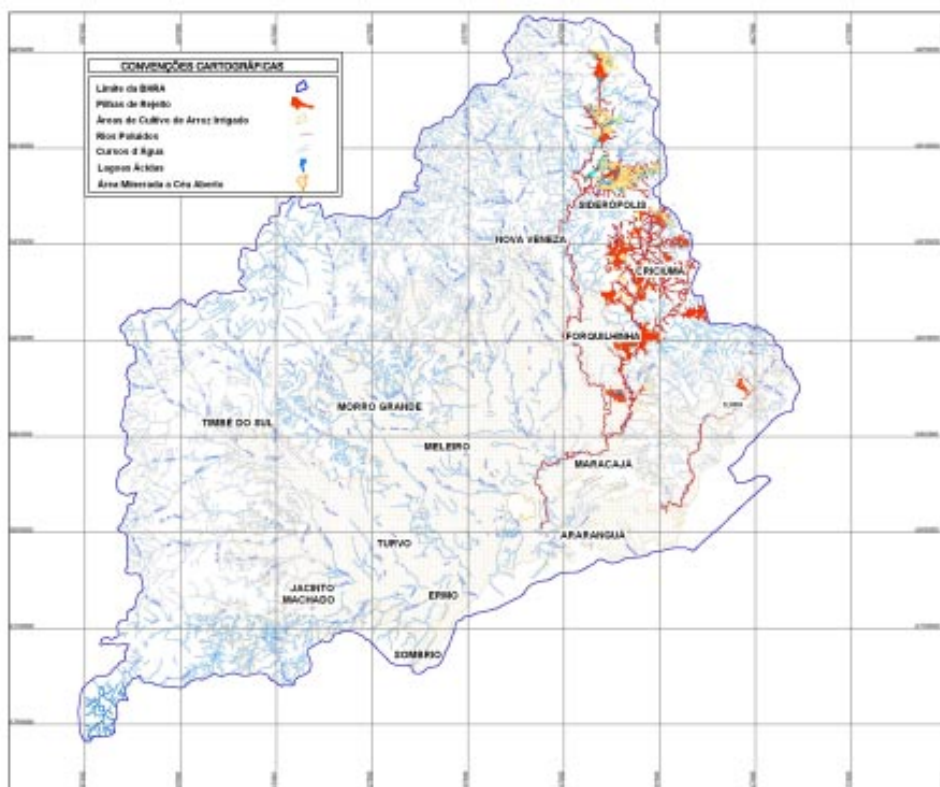


Figura 9 – Mapa de fontes de poluição para a Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá

### c) Aspectos hidroquímicos

A leitura do diagrama de Piper (Figura 10) mostra três famílias de água bem definidas neste sistema aquífero. O grupo principal, constituído por 51,6% das amostras, concentra-se no campo das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas; 25,8% foram classificadas como águas sulfatadas ou cloretadas sódicas; e 16,1%, como bicarbonatadas sódicas. Somente 6,5% foram classificadas como sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas. Considerando-se o campo dos cátions, verifica-se que a maioria das águas, ou seja, 54,8% classificam-se como águas mistas e 41,9%, como águas sódicas. Considerando-se o campo dos ânions, constata-se que 67,7% são classificadas como águas bicarbonatadas e 25,8%, como águas cloretadas.

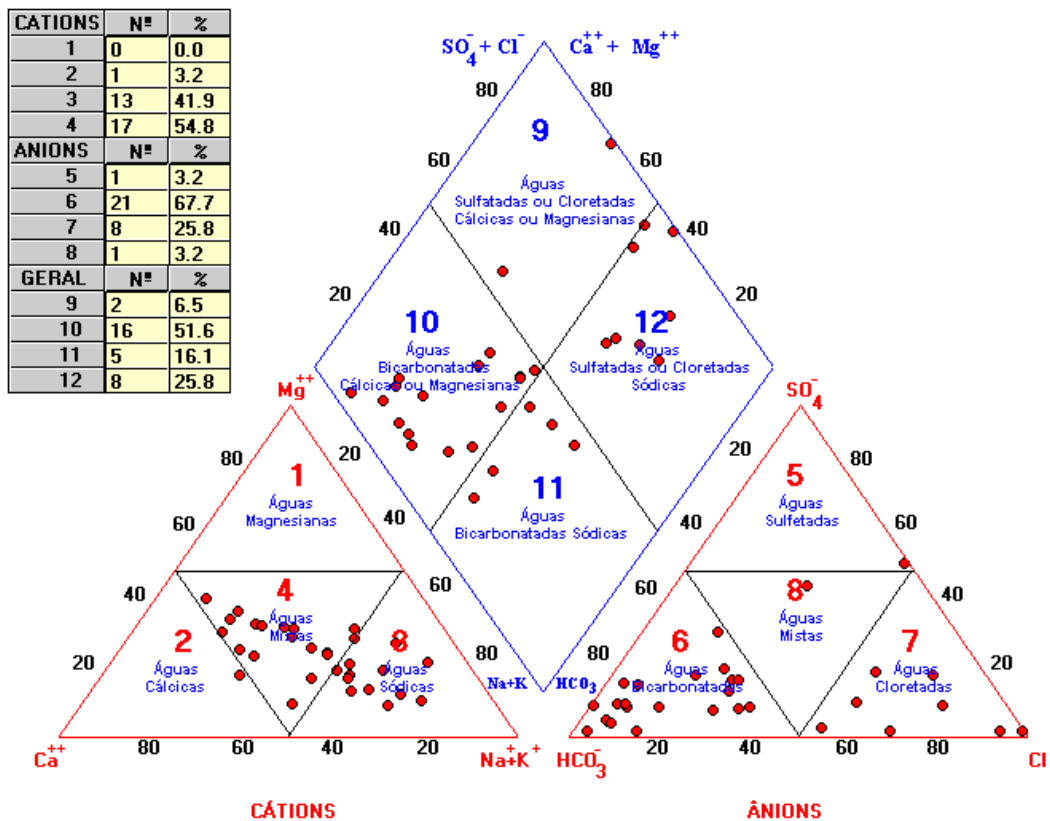


Figura 10 – Diagrama de Piper para as águas do aquífero dos Depósitos de Leques Aluviais

A Figura 11 apresenta o mapa hidroquímico da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, determinado a partir da classificação das águas obtida pelo diagrama de Piper.

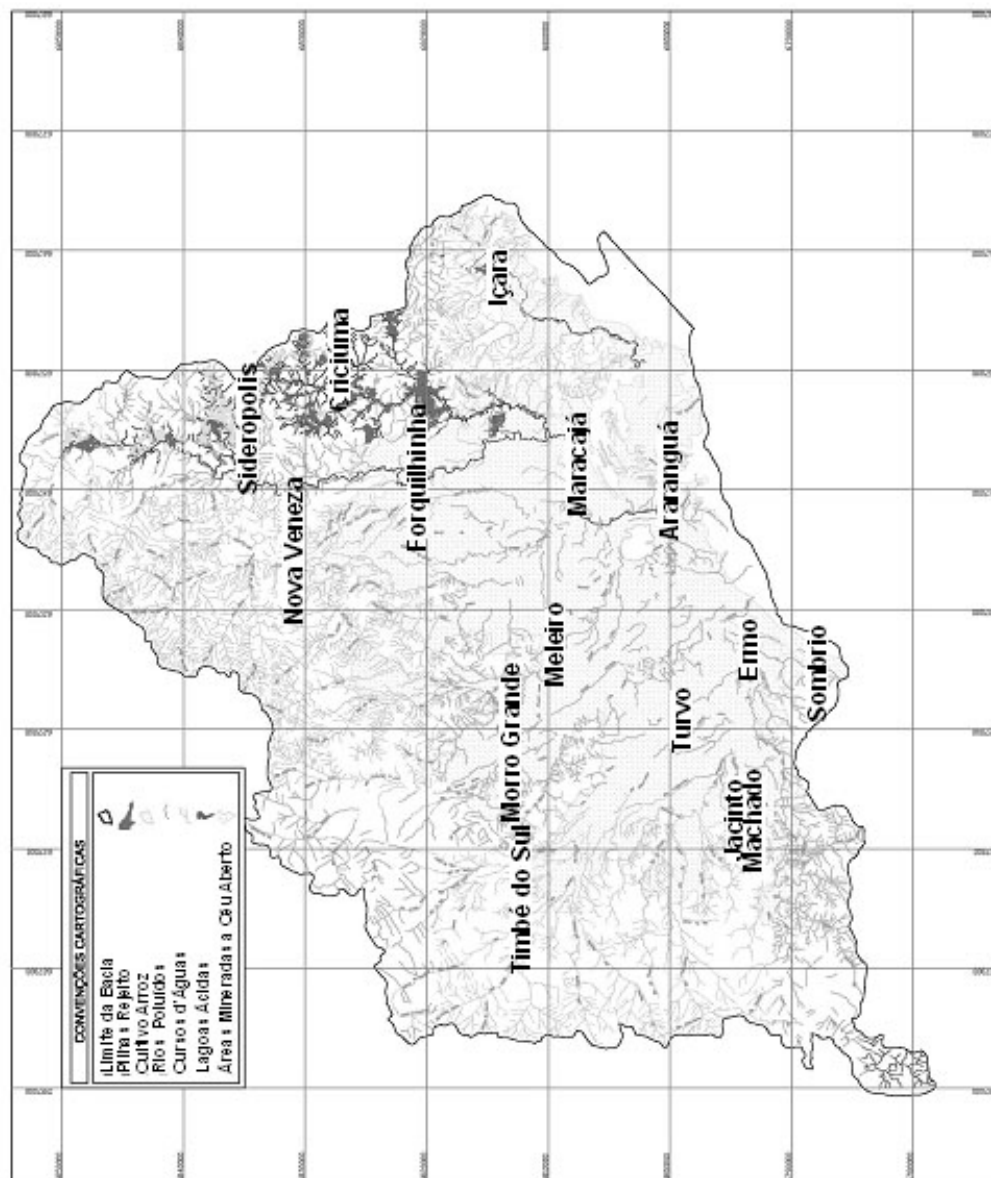


Figura 11 – Mapa hidroquímico para a Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá

## Considerações finais

A gestão dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica tem como escopo principal promover ações visando ao uso racional da água disponível bem como prevenir a mistura e a contaminação das águas superficiais e dos aquíferos. Além disso, conhecer os recursos hídricos subterrâneos do ponto de vista da hidrogeologia é, sem sombra de dúvida, a única forma de termos consciência de sua importância, porquanto estão ligados aos recursos hídricos superficiais e com estes interagem. Este conhecimento poderá reverter a situação de descaso que se tem verificado para com os recursos hídricos, tanto superficiais como subterrâneos.

No estudo hidrogeológico da Bacia Carbonífera do Sul de Santa Catarina, já se tem um razoável conhecimento dos aquíferos presentes em face da existência de cerca de 250 poços tubulares, dos quais quase a metade capta água do aquífero da Formação Rio Bonito. Dentro do domínio do aquífero dos Depósitos de Leques Aluviais, quase todas as comunidades rurais dos municípios localizados na área desta bacia usam água subterrânea, captada por meio de poços escavados, para suprir suas demandas.

No entanto, pode-se constatar que apesar da importância dos recursos hídricos subterrâneos, existem fatores que comprometem sua utilização plena, destacando-se entre eles perfuração indiscriminada de poços, ausência de saneamento básico nos municípios da região e poços abandonados e/ou mal construídos. Estes fatores, associados à alta, e em alguns casos extrema, vulnerabilidade natural dos aquíferos, ressaltam a necessidade urgente de políticas de gestão para uma exploração racional deste recurso.

Pode-se verificar também que, em diversos locais da Bacia Carbonífera ocorre conexão vertical do aquífero freático com os intervalos do aquífero profundo, provocando a mistura de águas. Esta conexão ocorre em áreas de falhas e de fraturas como, por exemplo, através da Falha Mãe Luzia, no município de Maracajá, e da Falha Criciúma, no município homônimo. Este fato comprova a necessidade de se ter um completo conhecimento de geologia estrutural quando da realização dos estudos de hidrogeologia de uma região.

A mistura de águas pode ser provocada também por furos de sondagem não concretados, utilizados para a passagem de cabos de energia para as minas subterrâneas, bem como por furos realizados para a pesquisa de carvão em épocas passadas. Nas áreas mineradas a céu aberto, também há conexão de ambos os aquíferos. Uma vez aberta a cava, ocorre a exposição do intervalo aquífero relacionado ao arenito de cobertura da camada de carvão Barro Branco. Normalmente esta cava é então preenchida com estéril de cobertura ou rejeito de beneficiamento de carvão. Com o passar do tempo, o aquífero freático fica contido nesta cava preenchida. Tal procedimento propicia a conexão vertical dos dois aquíferos.

Requer-se especial atenção para as águas que chegam no subsolo das minas. Deve-se promover ações para que estas águas permaneçam ali o menor tempo possível para

evitar a geração de drenagem ácida e, com isso, o comprometimento da qualidade das águas do aquífero.

Por uma das cláusulas do Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) assinado pelas carboníferas, elas se comprometem a implantar um Sistema de Gestão Ambiental (SGA). Neste sentido, os estudos hidrogeológicos constituem uma ferramenta muito importante para a definição de medidas mitigadoras que visem à preservação e à reabilitação do meio ambiente nesta região.

## Referências

- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H.; PETY, R. J.; HACKET, G. DRASTIC. A standardized system for evaluating groundwater pollution hydrological settings. In: **National water well association - US-EPA Office of Research and Development, USA, 621 p., 1987.**
- FOSTER, S. S. D.; VENTURA, M.; HIRATA, R. **Contaminación de las aguas subterráneas: un enfoque ejecutivo de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable.** Lima: OMS/OPS-HPE/CEPIS. 42 p., 1987.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. **Determinação do risco de contaminação das águas subterráneas: um método baseado em dados existentes.** Instituto Geológico n. 10, v.1. São Paulo, 92p, 1993.
- KREBS, A.S.J. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterráneos da área correspondente à bacia hidrográfica do Rio Araranguá, SC.** 2v., 376p., Tese (Doutorado) - Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- SEDUMA - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. **Bacias hidrográficas do estado de Santa Catarina: diagnóstico geral.** Florianópolis - SC, 173p., 1997.

# Controle e mitigação dos impactos da drenagem ácida em operações de mineração

Mariluce de Oliveira Ubaldo; Vicente Paulo de Souza

Cada vez mais, a indústria mineira movimentada crescentes quantidades de minérios, devido à automação dos processos e às novas técnicas capazes de obter maior eficiência na lavra e no processamento (Farfan *et al*, 2004). Com o aumento da produção destas indústrias, aumenta-se também a quantidade de resíduos sólidos (estéreis e rejeitos) ricos em sulfetos, gerados a partir das operações de lavra e processamento mineral que são muitas vezes dispostos de forma inadequada, provocando impactos ao meio ambiente.

Destacam-se como principais problemas ambientais relacionados à atividade de mineração: alteração do lençol freático; assoreamento; erosão; impactos sobre a fauna; impactos sobre a flora; desestabilização de taludes, encostas e terrenos; mobilização de solos; poluição do ar; poluição da água; poluição do solo e poluição sonora (Mendonça, 2005).

No entanto, na região carbonífera do estado de Santa Catarina, a poluição hídrica, contaminação de corpos hídricos superficiais e subterrâneos, causada pelas drenagens ácidas é provavelmente o impacto ambiental mais significativo das operações de mineração de carvão (Farfan *et al*, 2004).

Embora a drenagem ácida tenha sua ocorrência relacionada com a exploração de outros minerais além do carvão, tais como, ouro, níquel, cobre, zinco e urânio (Borma e Soares, 2002), o presente capítulo apresenta um enfoque voltado para os impactos ambientais provenientes da drenagem ácida das minerações de carvão.

Segundo dados do DNPM (2005), as reservas medidas de carvão mineral no Brasil estão presentes nos estados do Maranhão, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo, sendo que 99,87% destas reservas estão concentradas nos estados do Rio Grande do Sul, com 78,65%, e Santa Catarina, com 21,22%. Os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, juntos, comercializaram 5.275.353 toneladas de carvão mineral beneficiado no ano de 2004.

Estima-se que para cada tonelada de carvão comercializado são gerados aproximadamente 0,5 – 0,6 tonelada de resíduos. Tomando o ano de 2005 como base, foram produzidas  $7.809 \times 10^3$  t carvão ROM em Santa Catarina e  $4.250 \times 10^3$  t no Rio Grande do Sul. São gerados, por ano, milhões de toneladas de rejeitos contendo, dentre outros minerais, a pirita. Em sua grande maioria, esses rejeitos são dispostos no meio ambiente de forma inadequada, fazendo com que os mesmos estejam propensos a geração da drenagem ácida.

Como o tema “drenagem ácida em minerações” é bastante extenso, o presente capítulo descreve apenas alguns tópicos considerados mais relevantes para introduzir o tema ao leitor. Com este propósito, o texto que se segue encontra-se dividido em quatro tópicos. O primeiro traz o conceito e o princípio da geração da drenagem ácida; o segundo apresenta os métodos existentes para avaliar o potencial de geração de drenagem ácida dos rejeitos e estéreis da indústria mineral; o terceiro descreve os fundamentos da prevenção, controle e mitigação das drenagens ácidas e o quarto comenta alguns aspectos importantes da concepção de um projeto de cobertura seca.

## Drenagem ácida de mina

A drenagem ácida de mina (DAM) é um sério problema de poluição ambiental e resulta, principalmente, da oxidação da pirita ou pirrotita, bem como da presença de outros sulfetos no material de interesse. A solução ácida gerada é extremamente acidificada (pH inferior a 2.0) e enriquecida em ferro, alumínio, sulfato e metais pesados, tais como chumbo (Pb), manganês (Mn), cádmio (Cd) e, em alguns casos específicos, os radionuclídeos tório (Th) e urânio (U).

Os resíduos provenientes dos processos de lavra e beneficiamento do carvão mineral são divididos em estéreis e rejeitos. Os estéreis podem ser os materiais de cobertura, camadas intermediárias ou circundantes do mineral de interesse, extraídos fisicamente através do uso de explosivos ou escavadeiras; os rejeitos são resíduos sólidos resultantes das operações de beneficiamento.

Em alguns casos, no lugar do termo DAM usa-se a denominação drenagem ácida de rochas (DAR), que é normalmente usada quando se faz referência às drenagens ácidas geradas a partir de depósitos ou pilhas de material estéril produzido nas operações de lavra. O termo DAR é também usado para denominar a drenagem ácida que pode

ocorrer como resultado de atividades não relacionadas à mineração, como, por exemplo, quando um material rico em sulfetos é movimentado em trabalhos de construção civil (Borma e Soares, 2002).

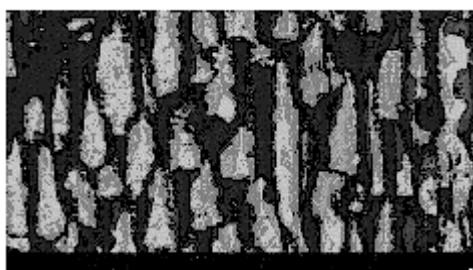
Uma vez que a drenagem ácida tratada neste capítulo está sempre associada a atividades de mineração de carvão, será utilizada no texto apenas a denominação drenagem ácida de mina (DAM).

### Geração de acidez

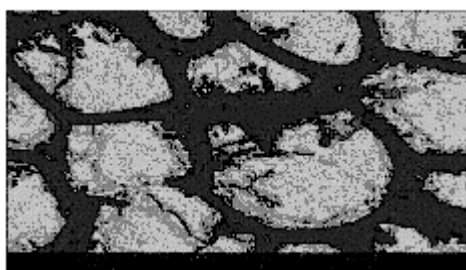
As duas formas predominantes do bissulfeto de ferro ( $\text{FeS}_2$ ) nos estratos geológicos são a pirita e a marcassita. Ambas apresentam a mesma composição química, mas diferem em suas formas cristalográficas.

A estrutura da marcassita é ortorrômbica, enquanto a da pirita é isométrica (Stumm e Morgan, 1970 *apud* Evangelou, 1995). Devido a sua estrutura particular, a marcassita é menos estável do que a pirita. Com base na mineralogia, a pirita é a forma predominante nos carvões (Geer, 1977; Lorenz e Tarpley, 1963; Grady, 1977 *apud* Evangelou, 1995).

Em muitas partes do mundo, a pirita geralmente ocorre associada ao carvão (Fotomicrografia 1-a), encontrando-se também associada a muitos outros minérios incluindo zinco, cobre, urânio, ouro e prata, dentre outros. Por outro lado, também ocorre liberada como se observa na Fotomicrografia 1-b.



(a)

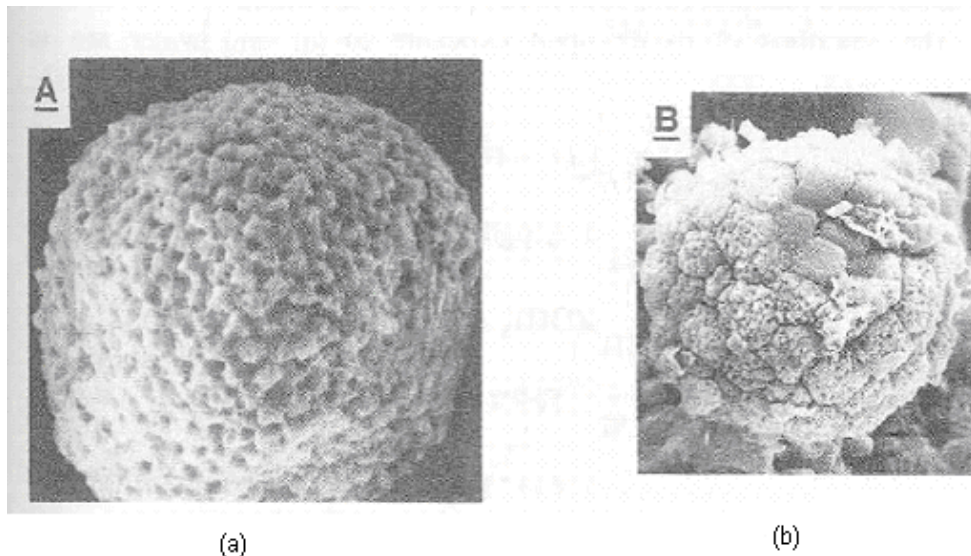


(b)

Fonte: Souza (2001)

Figura 1 – Fotomicrografias: 1-a - Pirita incluída nos interstícios do carvão – Mina Candiota / RS  
e 1-b - Grãos de pirita liberados – Mina Candiota / RS





Fonte: Evangelou (1995)

Figura 2 – Fotomicrografias: 2-a - Grão de pirita com elevada área superficial e porosidade e 2-b - Grão de pirita poliframboidal.

Por outro lado, resalte-se que os fatores mineralógicos, tais como natureza da ganga, textura, tamanho de partícula, policristalinidade, porosidade, estrutura cristalina do mineral, dentre outros, são fatores de grande importância no processo de oxidação. Caruccio (1968) *apud* Evangelou (1995) demonstrou que a pirita de forma framboidal é a mais reativa devido à presença de grânulos com  $d_m < 0,5\mu\text{m}$ , como pode ser visto nas Fotomicrografias 2-a e 2-b.

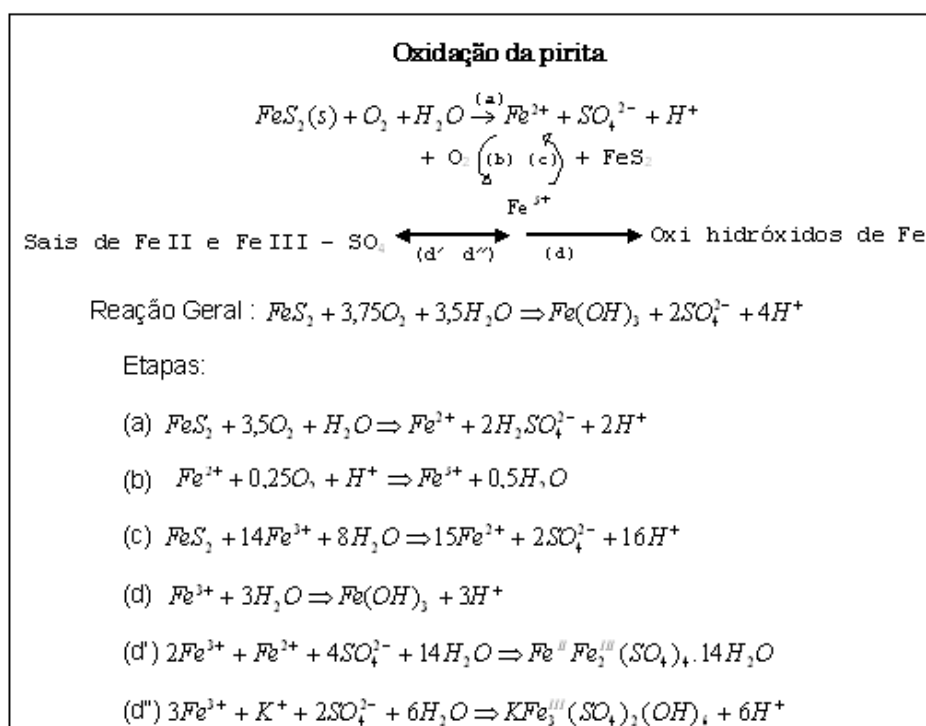
A reação geral estequiométrica que representa a oxidação da pirita e da marcassita normalmente é a seguinte:

Na equação (1) acima, a pirita sólida, oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) são os reagentes, e o hidróxido de ferro sólido, sulfato, íons e o calor são os produtos.

Na maioria das amostras de drenagem oriundas de mineração do carvão, a abundância de ferro ferroso dissolvido ( $\text{Fe}^{2+}$ ) indica que as reações químicas estão em um estágio intermediário de uma série de reações que, em conjunto representam a oxidação da pirita (Equação 1). As equações (a), (b), (c) e (d), apresentadas na Figura 3, caracterizam os vários estágios da reação geral (Stumm e Morgan, 1981 *apud* Rose e Cravotta III, 1998). A geoquímica das drenagens ácidas tem sido motivo de numerosas pesquisas. Algumas referências gerais sobre o assunto podem ser encontradas nas publicações de

diversos autores como: Temple e Koehler, 1954; Singer e Stumm, 1970; Kleinmann et al., 1981; Nordstrom, 1982; Williams et al., 1982; Hornberger et al., 1990; Alpers e Blowes, 1994; Blowes e Jambor, 1994; Evangelou, 1995; Nordstrom e Alpers, 1996.

As equações (a) e (b), que envolvem a oxidação do enxofre e ferro da pirita e da pirrotita, respectivamente, pelo oxigênio gasoso ou dissolvido ( $O_2$ ), podem ser catalisadas por várias espécies de bactérias oxidantes do ferro e do enxofre, sendo a espécie *Thiobacillus Ferrooxidans* a mais importante. Essas bactérias, que requerem somente  $CO_2$ ,  $O_2$  dissolvidos, uma forma reduzida de *Fe* ou *S* e pequenas quantidades de *N* e *P* para seus metabolismos, produzem enzimas que catalisam as reações de oxidação e usam a energia liberada para transformar o carbono inorgânico em matéria celular (Temple e Delchamps, 1953; Kleinmann et al., 1981; Nordstrom, 1982; Ehrlich, 1990 apud Rose e Cravotta III, 1998).

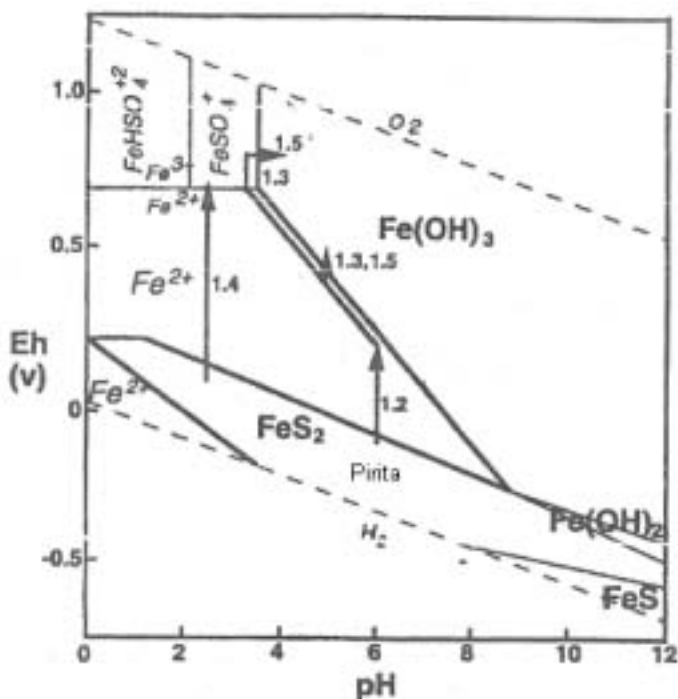


Fonte: modificado a partir de Stumm e Morgan, 1981, apud Rose e Cravotta III, 1998

Figura 3 – Modelo para a oxidação da pirita. Os passos (d') e (d'') representam a formação dos minerais ferro - sulfatados, os quais podem armazenar acidez, íons férricos e sulfato

Na reação (c), o  $Fe^{+3}$  dissolvido, produzido pela reação representada pela equação (b), é o agente oxidante da pirita. Estudos cinéticos (Garrels e Thompson, 1960; McKibben e Barnes, 1986; Moses et al., 1987; Moses e Herman, 1991; Williamson e Rimstidt, 1994 *apud* Rose e Cravotta III, 1998), mostraram que, em condições ácidas (baixo pH), a velocidade de oxidação da pirita pelo  $Fe^{3+}$  é muito mais rápida do que a oxidação pelo  $O_2$  (equação a). Por outro lado, em ambientes geradores de ácido bem estabelecidos, a seqüência típica é a reação de oxidação da pirita pela equação (c) para produção de  $Fe^{2+}$ , o qual é então oxidado para  $Fe^{3+}$  pela bactéria através a equação (b), ficando o  $Fe^{3+}$  disponível para posterior oxidação da pirita. Embora o  $O_2$  não seja diretamente consumido na etapa de oxidação da pirita, ele é necessário para regeneração do  $Fe^{3+}$  a fim de que o ciclo de oxidação da pirita continue.

Como passo final, a totalidade do ferro deve precipitar parcialmente como  $Fe(OH)_3$  ou minerais correlatos (equação d). Devido à relativa insolubilidade do  $Fe^{3+}$ , a maior parte do Fe dissolvido em soluções com pH maior do que 3,5 ocorre como Fe - ferroso. As águas ácidas (DAM) normalmente apresentam valores de pH e Eh alocados (plotados) ao longo ou próximo da linha que delimita o campo do par  $Fe^{2+} - Fe(OH)_3$ , no diagrama Eh-pH da Figura 4.



Fonte: adaptado de Rose e Cravotta III, 1998

Figura 4 – Diagrama Eh-pH mostrando os campos de estabilidade termodinâmica para o sistema Fe – O – H – S. As setas com os números referem-se às reações de oxidação da Figura 3

Considerando-se o acima exposto, fica evidente que a oxidação de minerais sulfetados e a produção da DAM ocorrem devido à presença de dois constituintes básicos: oxigênio e água. O oxigênio gasoso é o principal componente responsável pela oxidação dos sulfetos metálicos, e a água, em abundância, é a responsável pela formação da drenagem ácida, pois a água de chuva que não evapora nem escoar superficialmente infiltra e percola através do resíduo, constituindo-se no principal veículo de transporte das substâncias químicas para além da área de disposição.

Portanto, para efeito de controle da drenagem ácida, alternativas são construídas de forma a minimizar a entrada de oxigênio e água de chuva para dentro do material reativo.

## **Avaliação do potencial de drenagem ácida**

Para estimar o risco que as drenagens ácidas produzem ao meio ambiente, é necessário desenvolver estratégias de predição, prevenção e remediação. Muitas destas estratégias estão sendo executadas pelos organismos privados e ao mesmo tempo pelos organismos governamentais. Estes últimos vêm desenvolvendo leis rigorosas capazes de contribuir para a redução e emissão dos agentes contaminantes.

Para um determinado corpo mineral, o prognóstico (predição) sobre a potencialidade de geração de drenagens ácidas e o tempo de duração dessas drenagens é um dos parâmetros importantes para que se estabeleça previamente medidas visando-se evitar outras perturbações futuras ao meio ambiente. Sendo assim e em linhas gerais, os métodos preditivos podem ser agrupados em duas categorias: estáticos e cinéticos, embora muitos outros testes sejam indicados para casos específicos de caracterização.

## **Amostragem e preparação da amostra**

A amostragem bem como o método a ser utilizado (chaminé, amostras retiradas com o martelo, testemunho de sondagem, galerias, canais, etc.) deverão ficar a cargo do Geólogo ou Engenheiro de Minas da empresa, sendo que a representatividade dos materiais que serão submetidos aos ensaios é de extrema importância para os resultados a serem obtidos. De um modo geral, sabe-se que a obtenção de uma "amostra representativa" de uma pilha de estéril constitui-se em um desafio. Por ocasião da coleta deve-se decidir aspectos relativos às características, parâmetros estáticos e estratégias serão adotados para determinar a quantidade de amostras requeridas e os locais de coleta. Segundo Knapp, R.A., Pettit, C. M., Martin, J.C. 1995, deve-se assegurar um plano de amostragem bem definido que envolva a modelagem matemática para determinação dos pontos de coleta e número de amostras. O ideal é que o plano de amostragem seja baseado no plano de lavra da mina. Tal procedimento é essencial para a estimativa dos custos envolvidos na amostragem.

Em linhas gerais, por ocasião dos ensaios de laboratório, deve-se observar o seguinte:

- as amostras devem ser representativas de todas as unidades litológicas;
- o ensaio deve considerar o maior número e tipo de amostras possíveis;
- as amostras devem ser recentes sem sinais de oxidação;
- como regra geral, amostras mineralogicamente distintas devem ser ensaiadas individualmente e não como amostra composta;
- mesmo que o programa de predição envolva testes em duplicata, uma variação considerável pode se verificar nos resultados obtidos na mesma amostra. Nesses casos deve ser realizado um terceiro teste nessa amostra para identificar o resultado correto;
- por ocasião do recebimento das amostras no laboratório, amostras de contraprova deverão ser arquivadas para eventual necessidade de futuros esclarecimentos;
- rejeito e/ou estéril que não sejam potencialmente geradores de acidez apresentam grande possibilidade de serem utilizados como material de cobertura.

O beneficiamento de carvão das carboníferas de Criciúma, em sua maioria, é composto pelos circuitos de grossos e finos, gerando os denominados rejeitos R1, R2 e R3 e rejeitos finos. Os rejeitos R1, R2 e R3 apresentam material com “top size” na ordem de 37 a 25 mm, sendo os finos na ordem de 1mm. Basicamente, esses rejeitos/estéreis são formados por pirita, folhelhos, argilitos e carvão.

As amostras das pilhas de estéril para esta etapa podem ser obtidas, por exemplo, abrindo-se trincheiras na superfície da pilha com dimensões de 100 x 100 x 40cm. O material amostrado de cada trincheira será quarteadado pelo método do cone e reduzido a uma determinada quantidade a ser estabelecida em função dos ensaios de laboratório. A Figura 5 apresenta um fluxograma do quarteadamento das amostras.

O material restante deverá ser acondicionado e guardado. Partículas com diâmetros superiores a 10cm deverão ser propositadamente descartadas, devido ao diâmetro das colunas utilizadas no laboratório. Em função disto, o tamanho máximo deverá girar em torno de 5cm de diâmetro.

A preparação das amostras poderá seguir os passos apresentados no fluxograma da Figura 6, no qual as amostras depois de secas serão reduzidas a uma granulometria de diâmetro máximo igual a 2,5cm, seguindo-se à homogeneização em homogeneizador mecânico em forma de “V”. Em seguida forma-se uma pilha triangular, da qual deverão ser retiradas duas amostras de 1 kg cada, sendo uma para análise química e outra para análise granulométrica e caracterização mineralógica. A metodologia a ser empregada na caracterização mineralógica e determinação dos sulfetos deve envolver as etapas de preparação, concentração e análise dos sulfetos. O fluxograma apresentado na Figura 6

poderá ser adotado como modelo de procedimento. A caracterização química envolve análises por espectrometria de absorção atômica para os elementos maiores (Si, Fe, Al, Ti, K) e outros com menores teores, como Mn, Ca, Na, Mg e Zr. A análise pelo Leco visa a determinação do  $S_{\text{total}}$  e ou  $S_{\text{pirítico}}$ .

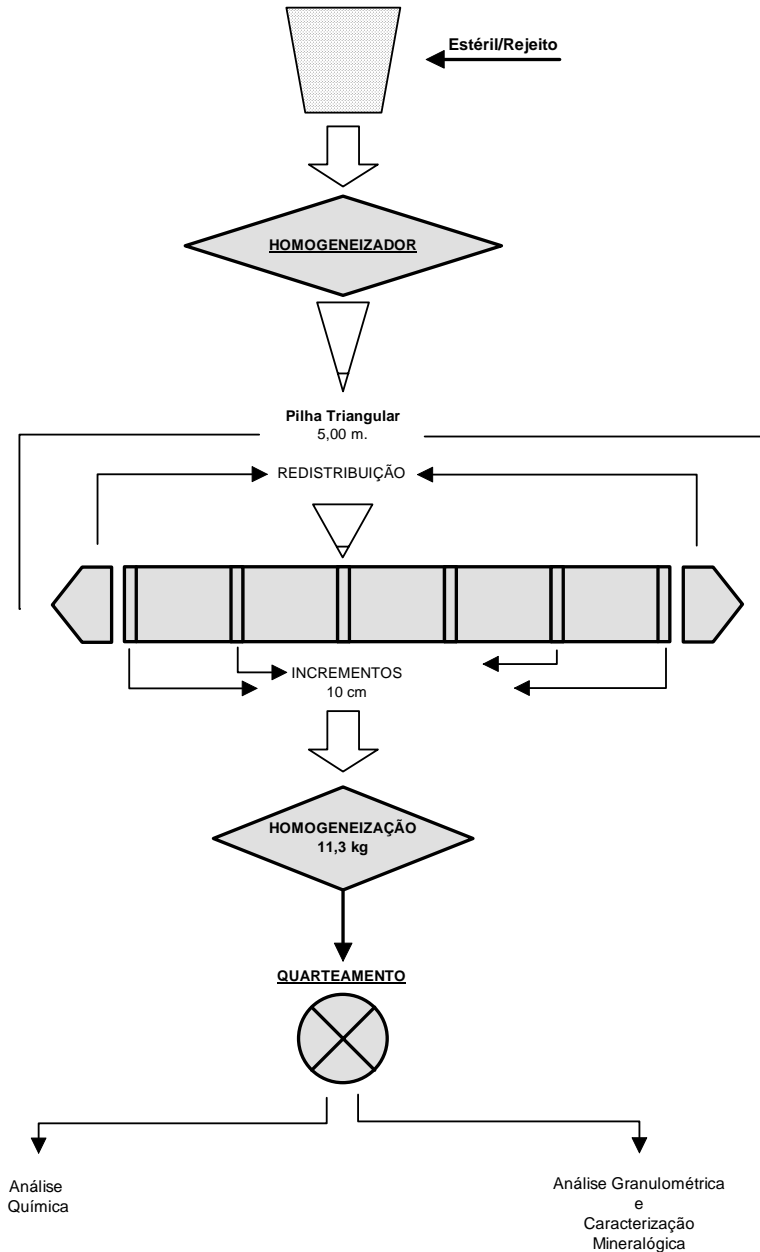


Figura 5 – Fluxograma de preparação da amostra

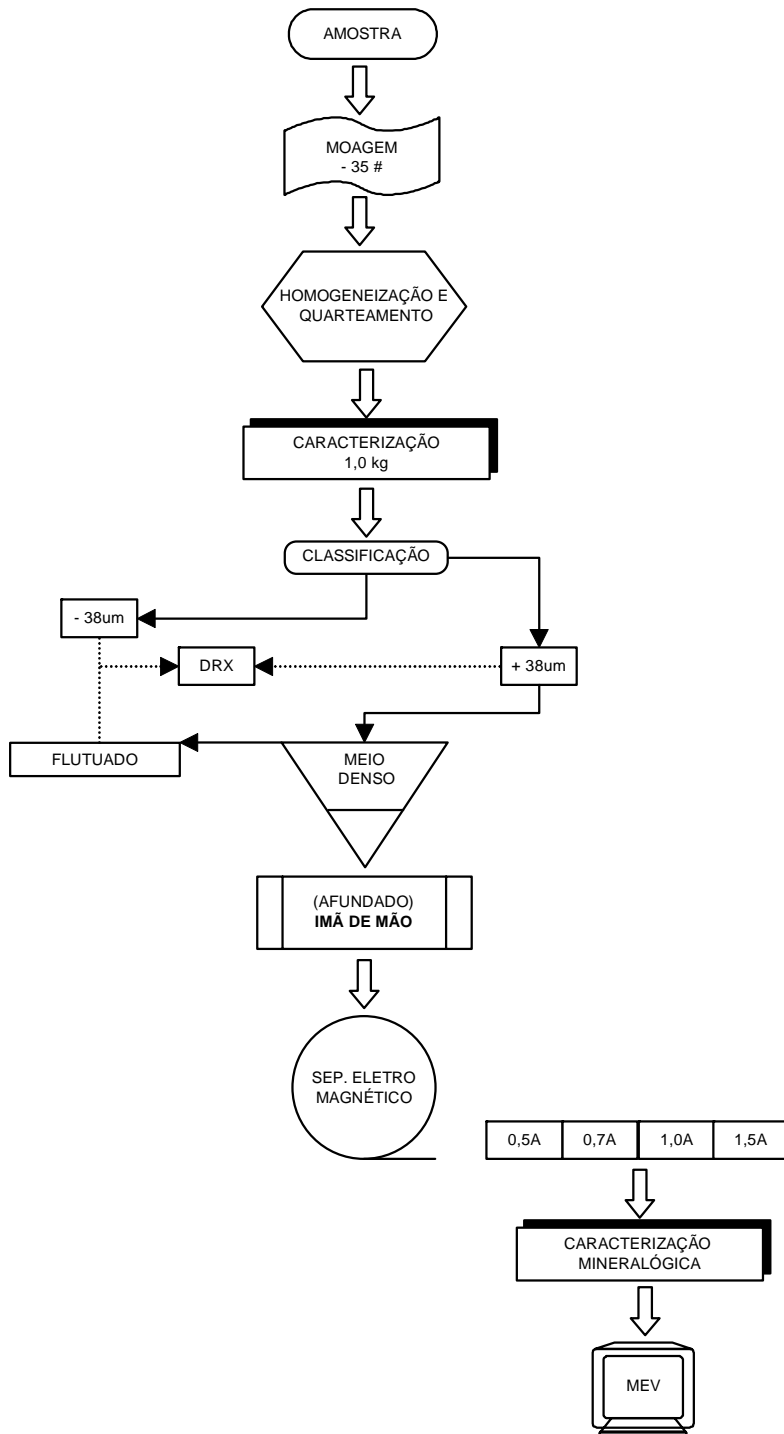


Figura 6 – Fluxograma da caracterização mineralógica

## Ensaio de laboratório nos estéreis/rejeitos

A seqüência dos ensaios que se pode realizar nos rejeitos e estéreis está apresentada no fluxograma da Figura 7.

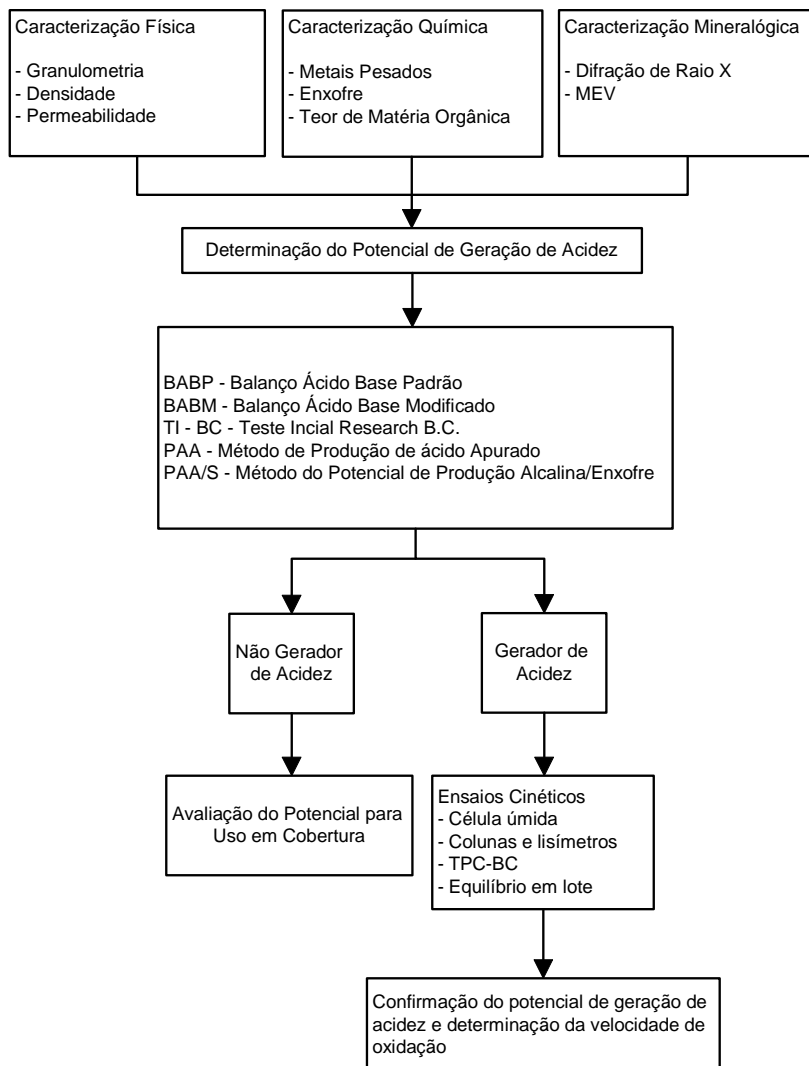


Figura 7 – Fluxograma dos ensaios de bancada para os rejeitos

## Determinação do potencial de geração de acidez

Diversos métodos são usados para avaliar e prever o potencial de formação da drenagem ácida. Apesar das várias pesquisas realizadas na busca de um método único para fornecimento de toda a informação na avaliação de geração de ácido, o consenso existente ainda hoje é de que a combinação de dois ou mais métodos proporciona uma



avaliação mais exata. Sua realização visa, segundo Skousen et. al., 1995 *apud* Farfán et al, 2004, a obtenção de dois importantes resultados:

- o potencial de geração de ácido e o potencial de neutralização dos diversos minerais que serão expostos durante o processo de exploração e exploração mineral;
- o potencial de liberação de elementos tóxicos (metais) dos minerais que estarão expostos e podem atingir ao meio ambiente.

Os ensaios de laboratório realizados para efeito de avaliação do potencial de oxidação de um material sulfetado podem ser divididos em ensaios estáticos e ensaios cinéticos. A diferença básica entre eles reside no fato de que os ensaios estáticos não consideram a cinética das reações envolvidas no processo de oxidação e/ou neutralização dos sulfetos. Por esse motivo, tais ensaios são utilizados apenas como indicativos de potenciais problemas. A confirmação da geração de acidez, o tempo envolvido no processo e o potencial de liberação de outros contaminantes, tais como os metais pesados e os sulfatos, é obtida de maneira mais precisa nos ensaios cinéticos.

Um programa para se obter informações sobre as características de uma determinada amostra quanto ao seu potencial para geração de ácido pode compreender alguns poucos testes realizáveis em pouco tempo e a um baixo custo, ou pode envolver ensaios mais extensos e análises dentro de um programa mais complexo que demanda meses. Como consequência da escolha da segunda opção, os custos serão mais elevados, e o grau do trabalho requerido para a avaliação dependerá do estágio particular de desenvolvimento do projeto de reabilitação e de uma série de fatores específicos do local.

### **Ensaio estático**

A rigor, o termo “teste estático” é utilizado para referir-se a um ensaio que fornece como resposta um balanço de massas entre as substâncias potencialmente geradoras de drenagem ácida e as substâncias potencialmente neutralizadoras dessa acidez.

Conforme exposto no fluxograma apresentado na Figura 7, com base nos resultados desses ensaios, pode-se avaliar, de forma preliminar, o potencial de geração de acidez de um dado material. Não apresentando geração de acidez, o material pode ser aproveitado para fins de cobertura. Caso contrário, deve-se proceder aos ensaios cinéticos para avaliação mais detalhada de como isso ocorre e em qual velocidade.

### **Ensaio cinético**

O objetivo dos métodos cinéticos é prever o potencial de drenagem ácida a longo prazo dos materiais de mineração (rejeitos e estéreis), simulando condições ambientais em função do tempo. Usualmente, os métodos cinéticos são o passo seguinte após a

determinação do potencial de geração de acidez a partir dos ensaios estáticos. Os objetivos dos ensaios cinéticos são os seguintes:

- confirmação do potencial de geração de DAM;
- avaliação das taxas de oxidação de enxofre e de geração do ácido;
- determinação da relação, se existir, entre o início da DAM e o esgotamento do potencial da neutralização;
- determinação do efeito das bactérias;
- avaliação do grau de metais lixiviáveis e indicativo das concentrações de cátions/ânions que se pode esperar nas drenagens ácidas;
- seleção do teste para avaliar e gerenciar os resíduos, áreas de disposição e respectivas estratégias de controle.

A maioria dos métodos cinéticos fornecem ótimos resultados, mas apresentam determinadas características que fazem deles difíceis de serem aplicados. Dentre estas dificuldades podemos citar, segundo o MEND Project 1.16.1b:

- complexidade no procedimento e interpretação dos resultados;
- prolongados tempos para obtenção dos resultados;
- custos maiores na realização dos ensaios.

## **Mitigação da drenagem ácida**

Há duas principais razões para a realização de projetos com o objetivo de minimizar a geração da drenagem ácida. Em áreas mineradas que apresentam problemas de produção de acidez, os impactos não se restringem apenas à área minerada, podendo atingir corpos hídricos superficiais e subterrâneos distantes do empreendimento. Por outro lado, as reações químicas envolvidas no processo de geração de acidez ocorrem por muitos anos, mesmo depois de esgotado o depósito mineral (Barbosa et al., 2001).

Como mencionado anteriormente, a água, o oxigênio e os sulfetos são os principais reagentes que devem estar simultaneamente em contato para a geração de drenagens ácidas de mina. Uma estratégia eficiente consiste em limitar este contato, e as alternativas usuais empregadas para minimizar a geração de acidez em resíduos de mineração são as chamadas coberturas úmidas e coberturas secas.

### **Cobertura úmida**

A estratégia de uso de cobertura úmida para a minimização da geração da DAM consiste na inundação controlada de áreas de disposição de resíduos ou na elevação do nível d'água dentro delas.

Uma vez que o coeficiente de difusão do oxigênio na água é cerca de quatro ordens de grandeza menor do que seu coeficiente de difusão no ar, a disposição subaquática de materiais geradores de acidez pode evitar a oxidação por meio do bloqueio da entrada de oxigênio no sistema. Para o emprego deste tipo de disposição são fundamentais estudos sobre a geoquímica dos resíduos, a atividade biológica e o transporte dos contaminantes (MEND/CANMET, 1994).

O uso de coberturas úmidas é atraente, sobretudo em locais onde o nível do lençol freático pode ser restabelecido ou elevado de forma a submergir os rejeitos geradores de acidez (Borma e Soares, 2002).

### **Cobertura seca**

A cobertura seca ou cobertura de solo é uma alternativa quando os aspectos climáticos, topográficos, hidrológicos, ambientais ou econômicos não favorecem a inundação da área de disposição de resíduos como solução para mitigação da geração de drenagens ácidas. Cobertura seca tem sido aplicada em larga escala na América do Norte e Austrália (Borma e Soares, 2002).

Embora cobertura seca seja geralmente constituída de camadas de solos de diferentes propriedades, estas camadas podem ser substituídas por camadas de materiais alternativos, como geossintéticos ou resíduos provenientes de outras atividades, desde que esses materiais apresentem as propriedades necessárias para esta substituição.

O principal objetivo da cobertura seca é impedir a formação da drenagem ácida, seja formando uma barreira de transporte de oxigênio, barreira hidráulica ou barreira capilar. Essas três formas de barreira são tratadas a seguir:

### **Barreira de transporte de oxigênio**

Na prática, o oxigênio pode ser transportado para o interior dos depósitos de resíduos segundo os seguintes mecanismos: dissolvido na água da chuva; por difusão através dos poros preenchidos com ar e pela ação do vento sobre as pilhas. No entanto, a forma mais significativa de transporte de oxigênio para o resíduo se dá por meio da difusão (Yanful, 1993). Sob condições não saturadas, o fluxo difusivo do oxigênio no solo ocorre inteiramente na fase gasosa. Quando o teor de umidade aumenta, a área da seção transversal e a tortuosidade da fase gasosa diminuem, reduzindo o coeficiente de difusão efetivo e, conseqüentemente, o fluxo de oxigênio. Quando o solo se encontra em condição saturada, o fluxo difusivo ocorre inteiramente na fase de solução, o que o torna até quatro ordens de magnitude menor do que o fluxo sob condições secas (Nicholson et al., 1989). Portanto, uma camada de solo argiloso compactado que mantenha um elevado grau de saturação, independente da condição climática, pode funcionar como barreira ao transporte de oxigênio.

Segundo Yanful (1993), experimentos em laboratório têm demonstrado que o coeficiente de difusão de oxigênio em uma camada de solo é inversamente proporcional ao grau de saturação de água dessa camada. Valores de coeficiente de difusão do oxigênio da ordem de  $8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  foram reportados pelo referido autor, para valores de grau de saturação entre 95 e 85%.

Uma barreira para minimização do fluxo de oxigênio seria mais adequada para aplicação em depósitos de resíduos de disposição recente, pouco oxidados e em áreas de reduzida precipitação de chuvas, onde o controle da disponibilidade de oxigênio para reação de oxidação seria mais importante na redução da geração de drenagem ácida do que a redução do fluxo de água através do resíduo (Borma e Soares, 2002).

### **Barreira hidráulica**

O principal objetivo dessa cobertura é limitar a infiltração, reduzindo assim o volume de percolado que atravessa a zona oxidada do interior da pilha de resíduo podendo alcançar as águas subterrâneas.

Uma camada de argila compactada funciona como barreira ao fluxo de oxigênio e também pode atuar como barreira hidráulica, impedindo o fluxo de água para dentro do depósito. Para que a camada de solo argiloso tenha um bom funcionamento como barreira hidráulica, o ideal é que ela tenha uma condutividade hidráulica igual ou inferior a  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$  (Shackelford, 1997).

O uso de coberturas para controle do fluxo de água seria mais adequado em depósitos de resíduos de disposição antiga e já extensivamente oxidados, nos quais usualmente é encontrada grande quantidade de produtos de reações de oxidação e ácidos. Neste caso, o objetivo é diminuir ou interromper o transporte do material solúvel já oxidado (Borma e Soares, 2002).

### **Barreira capilar**

A barreira capilar é constituída de camadas de solos ou materiais alternativos e funciona simultaneamente como uma barreira ao transporte do oxigênio e como barreira hidráulica.

O funcionamento de uma barreira capilar baseia-se no contraste da condutividade hidráulica não saturada de camadas de solos superpostas (Shackelford, 1997). Uma camada de material argiloso (ou material fino) sobre uma camada de material granular forma uma barreira capilar simples (Figura 8-a), desde que as curvas de condutividade hidráulica dos dois materiais se interceptem de forma que, para determinados valores de sucção ( $S$ ), a condutividade hidráulica do material granular ( $K < K'$ ) seja menor do que a condutividade hidráulica do material argiloso (Figura 9).

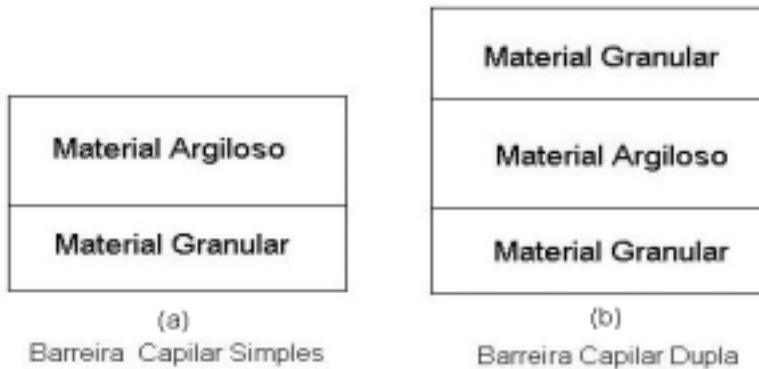


Figura 8 – Esquemas de barreira capilar: (a) simples e (b) dupla

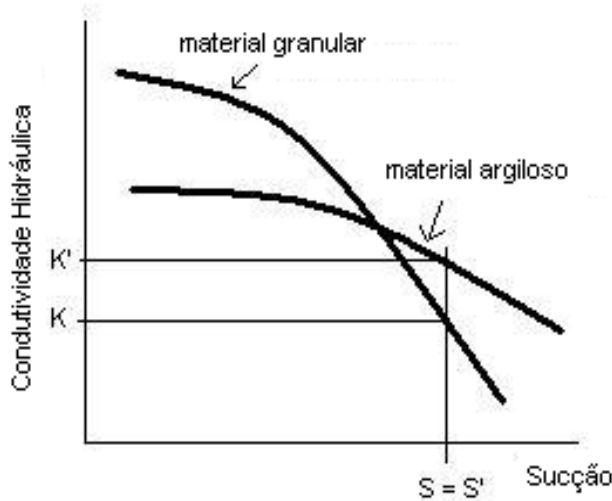


Figura 9 – Princípio do funcionamento da barreira capilar

Por isso, na condição não saturada, a camada de material argiloso tende a reter a água no seu interior, devido ao efeito de sucção, e a camada granular, por sua vez, apresenta baixo valor de condutividade hidráulica, devido à presença de ar nos poros do material granular, que reduz a interligação dos vazios preenchidos por água. Dessa forma, a água fica impedida de percolar da camada argilosa para a granular, em direção ao rejeito.

Vale ressaltar que é a manutenção do grau de saturação da camada argilosa que garante a eficiência desse sistema de cobertura como barreira à difusão do oxigênio (Yanful, 1993; Yanful et al., 1993; Nicholson et al., 1989). Portanto, para que a parte superior da

camada argilosa não perca água por evaporação e com isso deixe de ter um bom funcionamento como barreira à difusão de oxigênio, acrescenta-se mais uma camada de material granular acima da camada de material argiloso, formando assim a barreira capilar dupla (Figura 8-b).

Na barreira capilar dupla, a camada de material granular superior exerce duas funções importantes: na época de seca ela impede que a água armazenada na camada de material fino migre por capilaridade para as camadas de topo, minimizando assim o efeito de perda de umidade por secagem e evaporação. Na época de chuva, essa camada funciona como um dreno, conduzindo lateralmente a água que infiltra na cobertura e prevenindo, dessa forma, a saturação da camada de material fino. Esse efeito pode ser maximizado por meio da inclinação da superfície, que favorece o escoamento lateral. Isso é bastante importante para a maioria dos climas das regiões brasileiras, que apresentam períodos de seca bem definidos no inverno e elevadas precipitações no verão (Borma et al., 2002; Souza et al., 2003). Sobre a barreira capilar dupla é usual adicionar-se ainda camadas que têm por finalidade proteger a barreira capilar, fornecer suporte à vegetação e, ao mesmo tempo, controlar o balanço hídrico (Borma et al., 2002).

As condições climáticas predominantes na região onde se localiza a área de disposição devem ser levadas em conta para os projetos da cobertura úmida ou seca. É importante ter em mente que um projeto de cobertura desenvolvido para uma determinada área pode não ser transposto com sucesso para outro local de condições climáticas diferentes.

O uso de coberturas (úmidas ou secas), embora reduza substancialmente o volume de DAM gerado e, conseqüentemente os custos de sistemas de tratamento de efluentes, não elimina por completo a necessidade destes sistemas. Na prática, uma solução integrada de prevenção e controle da geração de DAM envolve, em geral, o uso de coberturas, sistemas de drenagem (canais, diques, poços, etc) e uma unidade de tratamento de efluentes. É recomendável que, ao se escolher uma estratégia para mitigação da DAM, sejam comparados os custos e eficiência das alternativas envolvendo soluções com e sem o uso de coberturas (Borma e Soares, 2002).

## **Concepção de um projeto de cobertura seca**

O estágio atual do conhecimento acerca do desenvolvimento de projetos de cobertura seca sobre depósitos de rejeitos reativos requer um projeto que envolve algumas fases. A fim de garantir que um sistema de cobertura colocado sobre um depósito de rejeito reativo seja confiável as fases a serem desenvolvidas são as seguintes (O’Kane et al., 2002):

- Fase 1: Preparação do programa de investigação e seleção dos materiais disponíveis na região.
- Fase 2: Programa de amostragem e caracterização de campo.

- Fase 3: Programa de ensaios de laboratório.
- Fase 4: Modelagem numérica do sistema de cobertura.
- Fase 5: Construção e monitoramento da unidade piloto.

#### Fase 1 – Seleção dos materiais

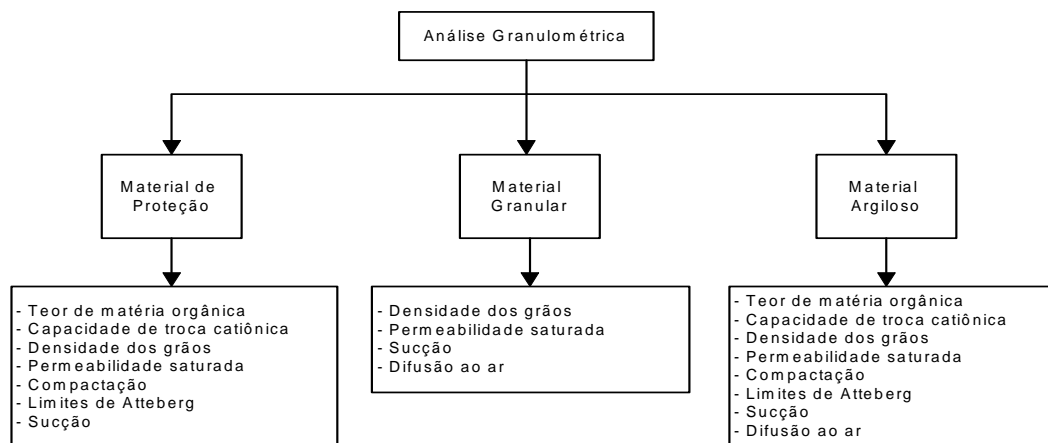
A investigação de materiais disponíveis na região compreende um levantamento dos tipos de rejeitos gerados e dos materiais disponíveis nas proximidades do depósito quanto ao potencial de utilização em sistemas de coberturas secas. Por materiais disponíveis entende-se não somente as jazidas de argila e areia, mas também os materiais alternativos.

#### Fase 2 – Programa de amostragem e caracterização de campo

O programa de campo consiste na escavação de poços, coleta de amostras para os ensaios geoquímicos e geotécnicos, realização de ensaios de campo e informações a respeito das condições climáticas locais. Os ensaios de campo mais comumente realizados são: teor de umidade *in situ*, massa específica aparente de campo e ensaio de infiltração.

#### Fase 3 – Ensaios de laboratório

O programa de ensaios de laboratório difere para os diferentes tipos de materiais em estudo. Para os materiais com potencial de utilização na cobertura, a seqüência de ensaios a ser realizada está apresentada na Figura 10. O objetivo desta seqüência de ensaios é determinar as características físico-químicas, geotécnicas e hidráulicas relevantes ao desempenho dos materiais no sistema de cobertura seca. A relação de ensaios para estêreis e rejeitos foi apresentada anteriormente no tópico 3.2.



Fonte: modificado de Borma et al., 2002

Figura 10 – Fluxograma de ensaios de laboratório para os materiais de cobertura

#### Fase 4 – Modelagem numérica

Modelos computacionais são muito úteis no dimensionamento da cobertura e avaliação do desempenho no campo. No entanto, deve-se lembrar que os resultados obtidos a partir destes modelos são apenas aproximações razoáveis da realidade para condições previamente especificadas (O’Kane et al., 2002).

O programa computacional SoilCover, desenvolvido na Universidade de Saskatchewan, Canadá, é considerado o estado da arte, em termos de modelagem, para prever o desempenho de um sistema de cobertura de resíduos geradores de acidez, em particular para regiões de climas áridos e semi-áridos onde a evapotranspiração tem grande relevância no desempenho da cobertura (Newman et al., 2001). O SoilCover é um modelo de elementos finitos 1-D que determina a carga de pressão e temperatura em perfis de solo em resposta às condições climáticas atuantes. O aspecto chave deste programa é a habilidade de prever não somente o fluxo de água, mas também o fluxo de calor e umidade, através do movimento de vapor, bem como o fluxo de oxigênio. Os efeitos da vegetação sobre a evapotranspiração também são computados pelo programa (Borma et al., 2002).

O outro programa que também tem sido bastante utilizado é o a VADOSE (GEOSLOPE) que é um modelo de elementos finitos 2-D que apresenta dados de entrada e saída semelhantes ao SoilCover.

Utilizando-se modelos de fluxo uni ou bidimensionais, o transporte de água é simulado incorporando as condições de contorno apropriadas: clima, propriedades do solo e geometria. O fluxo de umidade é então estimado para se avaliar os coeficientes de difusão do oxigênio ao longo de todo o período de simulação.

#### Fase 5 – Construção e monitoramento da unidade piloto

Devido aos grandes volumes de rejeitos a serem cobertos, o que requer um elevado investimento a ser aplicado nestas coberturas, é importante a construção de unidades piloto como forma de testar em campo as soluções escolhidas.

Como na unidade piloto as dimensões a serem cobertas são bem menores que na escala real das coberturas, é comum que seja testado mais de uma solução de cobertura. O’Kane et al. (2002) sugere que essas unidades devem ser monitoradas por um período de 2 a 5 anos, de forma a caracterizar o comportamento durante os períodos de seca e chuva.

Na concepção de um projeto de unidade piloto é comum o uso de lisímetros. Lisímetros são simplesmente recipientes enterrados dentro do rejeito que têm como objetivo coletar, em menor volume, o efluente gerado no interior do rejeito.

O dimensionamento de lisímetros é tido como conceitualmente simples. Porém, na realidade, o projeto, a instalação e a operação dos lisímetros requerem grande cuidado para garantir que os objetivos dos ensaios sejam alcançados.



Um dos grandes problemas nos projetos de lisímetros é garantir que o fluxo dentro e fora dos recipientes seja uniforme, ou seja, que a sucção dentro do lisímetro não seja diferente da sucção no entorno do mesmo, para que não haja fluxo em excesso saindo ou entrando no lisímetro. Alcançar esse objetivo não é uma tarefa fácil, devido à grande complexidade envolvida na previsão dos fluxos.

Programas computacionais podem ser utilizados para auxiliar o projetista a dimensionar e localizar o lisímetro no interior do rejeito. Como por exemplo o programa SEEP/W (GEOSLOPE), que é um programa de modelo bidimensional, que emprega elementos finitos e permite calcular o fluxo da água em meio saturado e não-saturado.

Além do dimensionamento do lisímetro, um outro aspecto merece igual atenção no projeto do lisímetro: a densidade de compactação do material dentro e no entorno do lisímetro devem ser a mesma, para evitar fluxo preferencial de água onde o material estiver menos denso.

A unidade piloto, além de permitir a coleta e análise do efluente gerado no interior do resíduo, como forma de averiguar o desempenho dos tipos de cobertura estudados, também deve ter um acompanhamento do funcionamento das camadas que compõem a cobertura. Este acompanhamento é comumente realizado através de instrumentação de campo, composta de sensores que medem temperatura, umidade e sucção do solo e difusão de oxigênio.

A unidade piloto monitorada constantemente por meio destes sensores, além de testar o desempenho da cobertura, serve como fonte de dados para calibração do programa computacional utilizado no projeto de dimensionamento de cobertura.

## Comentários finais

Atualmente, a preocupação da sociedade com o meio ambiente tem se tornado cada vez maior e, na tentativa de minimizar os impactos causados pela drenagem ácida de minas no meio ambiente, duas alternativas são apresentadas: cobertura úmida e a cobertura seca. A cobertura úmida consiste no cobrimento da área do depósito com água e a cobertura seca, no cobrimento da área do depósito com camadas de solo. Em ambos os casos, o objetivo é minimizar a entrada de oxigênio para dentro do material reativo, minimizando assim o processo gerador de acidez. As coberturas secas têm também por objetivo minimizar a entrada de água. Seu desempenho depende fortemente dos materiais utilizados e das condições climáticas. Um tipo de cobertura seca adequado para climas úmidos é aquela que utiliza o princípio de barreira capilar. A barreira capilar impede a passagem de oxigênio e água para o rejeito de mineração e, ao mesmo tempo, é capaz de manter um elevado grau de saturação entre as camadas, mesmo durante o período seco.

Para iniciar um projeto de cobertura seca devemos primeiramente realizar um levantamento dos materiais disponíveis na região, seguido de um programa de amostragem e de caracterização destes materiais. Com conhecimento dos materiais disponíveis e das suas características, é possível fazer, através de modelos computacionais, o dimensionamento da cobertura. Ressalte-se, no entanto que os dados do dimensionamento são aproximados e não precisos. Portanto, para que o desempenho da cobertura seja adequado, é necessária a realização de ensaios em escala piloto no próprio local do empreendimento mineiro. Estes ensaios deverão envolver a construção de uma cobertura instrumentada em menor escala, a qual deve ser monitorada por alguns anos. O' Kane et al. (2002) recomenda o monitoramento de 2 a 5 anos.

## Referências

- BARBOSA, J. P.; SOARES, P. S. M.; BORMA, L. S., *et al.* Projeto conceitual para recuperação ambiental da bacia carbonífera sul catarinense. Relatório Técnico elaborado pelo CETEM, Vol 1, 2001. 78p.
- BORMA, L. S.; MENDONÇA, R. M. G.; SOUZA, V. P. Processo de mitigação da formação de drenagens ácidas utilizando coberturas secas. Relatório Técnico elaborado para o SIECESC pelo CETEM, 2002.
- BORMA, L. S.; SOARES, P. S. M. Resíduos sólidos de mineração e drenagens ácidas. In: TRINDADE, R. B. E.; BARBOSA FILHO, O. Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2002. 344p.
- DNPM - Anuário Mineral Brasileiro 2005. Parte III – Estatística por substâncias. Carvão Mineral. Disponível em: < [www.dnpm.gov.br](http://www.dnpm.gov.br) > . Acesso em: 23 out. 2006.
- EPA, Acid mine drainage prediction. Environment Protection Agency December, 1994.
- EVANGELOU, V.P. Pyrite oxidation and its control, Estados Unidos, 1995. 293 p.
- FARFAN, J. R. J. Z., BARBOSA FILHO, O., SOUZA, V. P. Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral. Série Tecnologia Ambiental, CETEM/MCT, Rio de Janeiro, v. 29, 58p, 2004.
- FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. 1a edição, John Wiley & Sons, Estados Unidos, 1993. 517p.
- Knapp, R.A., Pettit, C. M., Martin, J.C. 1995. " Waste rock sampling techniques for acid rock drainage (ARD) assessment". In: Proceedings of Sudbury '95 - Mining and Environment Symposium . Sudbury, Ontario, May 28 - June 01. Vol. 2. pp 589-585.

- MEND/CANMET-Technical Report: Evaluation of alternate dry covers for the inhibition of acid mine drainage from tailings, Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program, ed. by Canada Centre for Mineral and Energy Technology - CANMET, Ottawa, Canada, 1994.
- MENDONÇA, R. M. G. Carvão mineral: origem, extração, beneficiamento, problemas ambientais associados a medidas mitigadoras. Seminário de Qualificação ao Doutorado apresentado ao programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, 105p. 2005.
- NEWMAN, G.; LOUDON, S.; WELS, C. Modeling of Alternative Cover Scenarios for Mine Rock Piles at the Zortman and Landusky Mine Sites. National Association of Abandoned Mine Lands Annual Conference, Athens, Ohio, pp. 1-18, 2001.
- NICHOLSON, R.V.; GILLHAM, R.W.; CHERRY, J. Reduction of Acid Generation in Mine Tailings through the use of Moisture-Retaining Cover Layers as Oxygen Barriers, Canadian Geotechnical Journal, 26(1): 1-8, 1989.
- O'KANE, M.; AYRES, B.; CHRISTENSEN, D.; et al. Manual on cover system design for reactive mine waste CANMET-CETEM OKC Report no 689-01, 2002.
- ROBERTSON, W. D. Sulfide Oxidation Mechanisms: Controls and Rates of Oxygen Transport, MAC Short Course Handbook Vol. 22, pp. 163 -183, Jambor J. L ; Blowes D. W. (eds.), Waterloo, Ontario, May 1994.
- ROSE, A. W.; CRAVOTTA III, C., A Chapter I - Geochemistry of Coal Mine Drainage. In: Coal Mine Drainage Prediction and Pollution. p.1-8, 1998.
- SHACKELFORD, C. D. Modeling and Analysis in environmental geotechnics: An overview of practical applications. Second International Congress on Environmental Geotechnics, V.3, pp. 1375-1404, Osaka, Japan, nov. 1997.
- SHACKELFORD, C. D.; NELSON, J. D. Geoenvironmental Design Considerations for Tailings Dams. In: Proceedings of the International Symposium on Seismic and Environmental Aspects of Dams Design: Earth, Concrete and Tailings Dams, v.1., pp. 131-186, Santiago, Chile, out. 1999.
- SOUZA, V. P. Formação de Barreira Geoquímica para o abatimento de drenagens ácidas de pilha de estéril piritoso. Depto. Eng. Minas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

- SOUZA, V. P.; BORMA, L. S.; MENDONÇA, R. M. G. Projeto de coberturas secas para controle da drenagem ácida em depósitos geradores de acidez. Seminário Brasil – Canadá de Recuperação Ambiental de áreas Mineradas, Florianópolis, SC, 301p. p.253, 2003.
- YANFUL, E. K. Oxygen diffusion through soil covers on sulfidic mill tailings, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 119 (8), p. 1207-28, 1993.
- YANFUL, E. K.; BELL, A. V.; WOYSHNER, M. R. Design of a composite soil cover for an experimental waste rock pile near Newcastle, New Brunswick, Canada, Canadian Geotechnical Journal, 30: p. 578-587, 1993.

## Poluição atmosférica associada ao uso do carvão no Brasil

Elba Calesso Teixeira; Eduardo Rodrigo Ramos de Santana

A abundância das reservas de carvão e o desenvolvimento de tecnologias de combustão e de controle das emissões atmosféricas, conjugados à necessidade de expansão dos sistemas elétricos e restrições ao uso de outras fontes, indicam que o carvão mineral continuará sendo, por muitas décadas, uma das principais fontes de geração de energia elétrica no Brasil.

Dentre os recursos energéticos não renováveis, o carvão ocupa a primeira colocação em abundância e perspectiva de vida útil, sendo a longo prazo a mais importante reserva energética mundial.

Cerca de 80% do consumo energético mundial ainda provém das três grandes energias fósseis: petróleo, gás e carvão (Chevalier, 2001). Vários outros estudiosos também crêem que o mundo ainda será dependente dos combustíveis fósseis por muito tempo (Huffman e Wender, 2001; Tissot, 2001). O petróleo, apesar da sua grande participação, é um dos maiores poluidores do ar e suas reservas se distribuem em poucos países que controlam o mercado. Contudo, não se admite mais ficar dependente de crises petrolíferas e de cartéis como a Opep. O custo do barril já foi inferior a 2 dólares (1950-1963) e subiu a U\$ 12 em 1973, devido ao boicote da Opep, que reduziu a produção em 25% na época. Uma segunda crise, a Revolução Islâmica do Irã em 1979, reduziu novamente a produção elevando o preço do barril a U\$ 40. Em 1999, a Opep decidiu novamente reduzir a produção triplicando o preço do barril de petróleo. Mas sabe-se, atualmente, que o fim das reservas não é tão eminente quanto se pensava. Em 2040, a produção deve chegar ao seu ápice e só então deverá decrescer (Dieguez, 2001). O uso do gás

natural como fonte energética está “em moda” por ser menos poluente e gerar menos CO<sub>2</sub> na atmosfera, mas tem inconvenientes não divulgados.

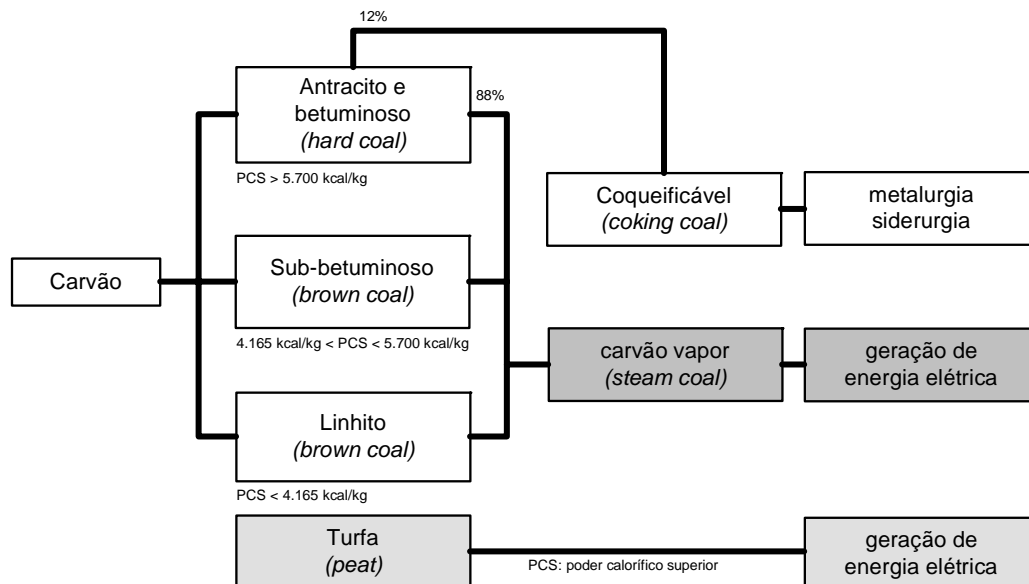
Em nível mundial pode-se comparar a distribuição de algumas reservas energéticas em toneladas equivalentes de petróleo (t.e.p.), que é uma unidade relativa que permite comparar combustíveis com propriedades características diferentes, assim elas se distribuem desta forma:

- Carvão: 10 trilhões de t.e.p.;
- Petróleo: 100 bilhões de t.e.p.;
- Óleo dos folhelhos oleígenos: 1 trilhão de t.e.p.;
- Gás natural: 100 bilhões de t.e.p. e
- Urânio: 3,8 trilhões de t.e.p.

Em 1985, estimava-se que o consumo mundial de carvão, 15 bilhões de t.e.p., poderia duplicar em meados do século XXI, tendo como consequência a redução das reservas petrolíferas mundiais em 43%, de gás natural em 23%, enquanto as reservas de carvão seriam reduzidas em apenas 1,4%, o que lhe daria uma sobrevida de cerca de 200 anos de consumo. Esta estimativa se confirmou, pois, de acordo com levantamentos de reservas energéticas (BP, 2006), o consumo de carvão realmente duplicou, alcançando o montante de aproximadamente 30 bilhões de t.e.p.. Destaca-se a China como principal produtora e consumidora de carvão mineral.

O carvão tem sido usado para geração de calor, energia elétrica, aquecimento industrial, geração de vapor, aquecimento doméstico, etc. Também é utilizado para produzir coque, gás combustível e subprodutos líquidos. Entre as razões para o consumo do carvão estão: grande disponibilidade, relativa estabilidade dos preços e poucos problemas para a disposição do resíduo da combustão (cinzas), se comparado às usinas de energia nuclear. Assim, o carvão tem sido utilizado em várias indústrias, como as de ferro, aço, alimentos, celulose, química, papel, tijolos, produtos cerâmicos, cimento e também por vários consumidores para aquecimento residencial bem como em instalações governamentais locais e federais, forças armadas e pequenas indústrias.

A aplicabilidade do carvão depende de seu *rank* conforme ilustrado na Figura 1.



Fonte: MME, 2006

Figura 1 – Empregos usuais para o carvão

Conforme dados da *BP Statistical Review of World Energy (2006)*, a disponibilidade primária mundial de carvão coqueificável (antracito e betuminoso) é da ordem de 908 milhões de toneladas. A Europa, Ásia, Oceânia e os Estados Unidos concentram 92,3% das reservas mundiais. O Brasil participa com 1,1% no total destas reservas.

A produção mundial de carvão representa, na atualidade, o mais rápido crescimento dentre os minerais energéticos fósseis. Nos últimos 25 anos, China, Índia e Estados Unidos comandaram o crescimento da produção de carvão no mundo, haja visto que em 1980 respondiam por 39% da produção mundial e, na atualidade, respondem por 61% do total. Já a Europa reduziu sua produção em, aproximadamente, 40% ante a produção mundial no mesmo período (EIA, 2004). A China consumiu 37% de carvão mineral no mundo, absorvendo quase toda a produção interna. Em 2005, este país, individualmente, representou 77% do crescimento do consumo. Fora a China, o consumo foi bem modesto, elevando-se em apenas 1,8%, entretanto acima da média dos últimos dez anos, que foi de 1,5%. Os Estados Unidos e a Índia dividiram este papel, o primeiro para atenuar os efeitos do aumento no preço do gás e o segundo, por substituir a importação de petróleo e gás.

A Tabela 1 mostra as reservas de carvão no mundo em centenas de milhões de toneladas.

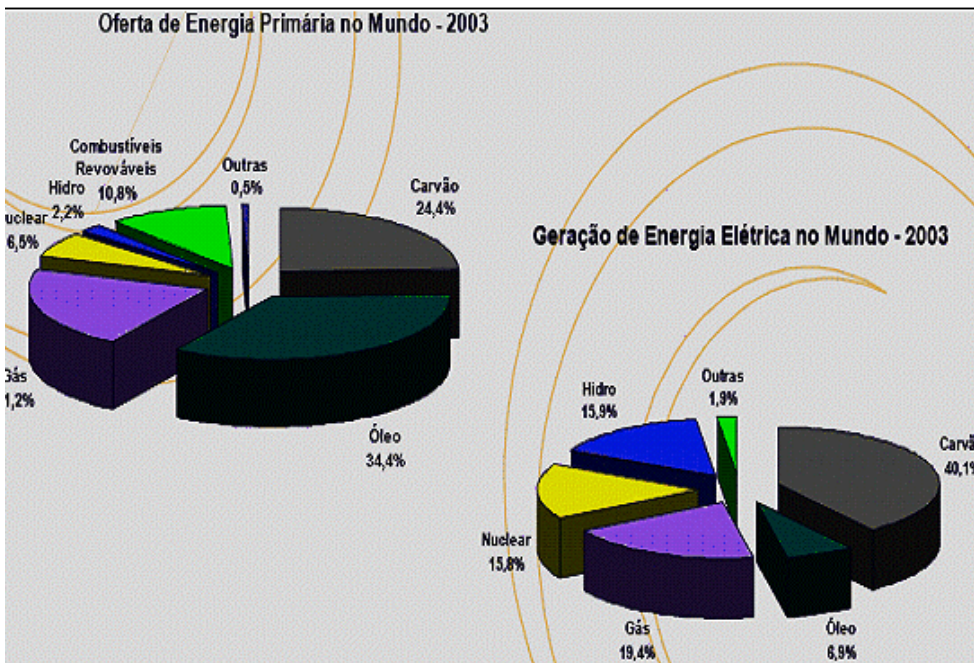
Tabela 1 – Reserva e produção mundial de carvão

	Reservas (R)		Produção (P)		Consumo		R/P*
	10 <sup>6</sup> ton	Participação no total	10 <sup>6</sup> ton	Participação no total	10 <sup>6</sup> tEP	Participação no total	Anos
América do Norte	257.783,0	26,2%	1.072,2	22,2%	591,5	24,7%	240,4
América do Sul e Central	21.752,0	2,2%	53,8	1,1%	17,8	0,7%	404,3
Europa e antiga URSS	355.370,1	36,1%	1.161,0	24,0%	506,1	21,1%	306,1
África e Oriente Médio	57.077,0	5,8%	231,0	24,0%	99,0	4,1%	373,4
Ásia (Pacífico)	292.471,0	2,7%	2.314,7	47,9%	1.183,5	49,4%	126,4
Total	984.453,1	100,0%	4.832,7	100,0%	2.397,9	100,0%	203,7
Brasil	11.929,0	1,2%	5,80	0,1%	12,0	0,5%	> 500

(\*) Tempo que as reservas durariam, sem novas descobertas e com nível de produção de 2002.

Fonte BP, 2006

Em 2003, o carvão teve uma contribuição expressiva na oferta de energia primária e geração de energia elétrica no mundo, conforme levantamento da Agência Internacional de Energia (Figura 2).

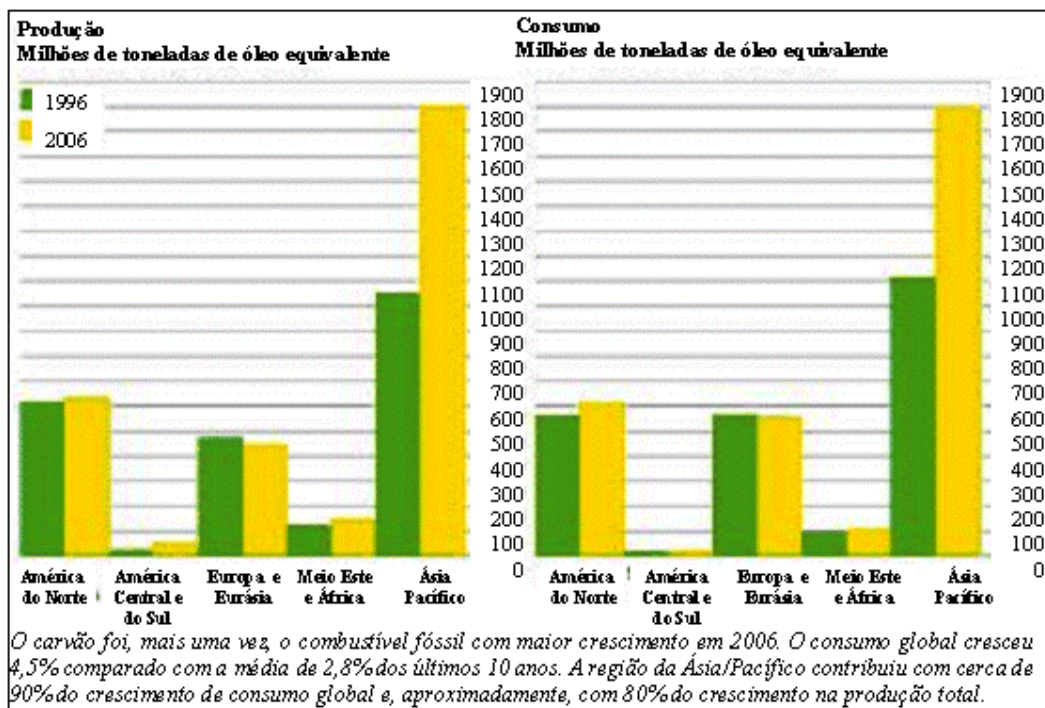


Fonte: EIA, 2004

Figura 2 – Carvão: oferta de energia primária e geração de energia elétrica no mundo

A Figura 3 mostra a produção e consumo comparativo de carvão por continente nos anos de 1996 e 2006 (BP, 2007). Nesta figura fica evidenciado que os mercados mais desenvolvidos se encontram na China, Estados Unidos e Europa.



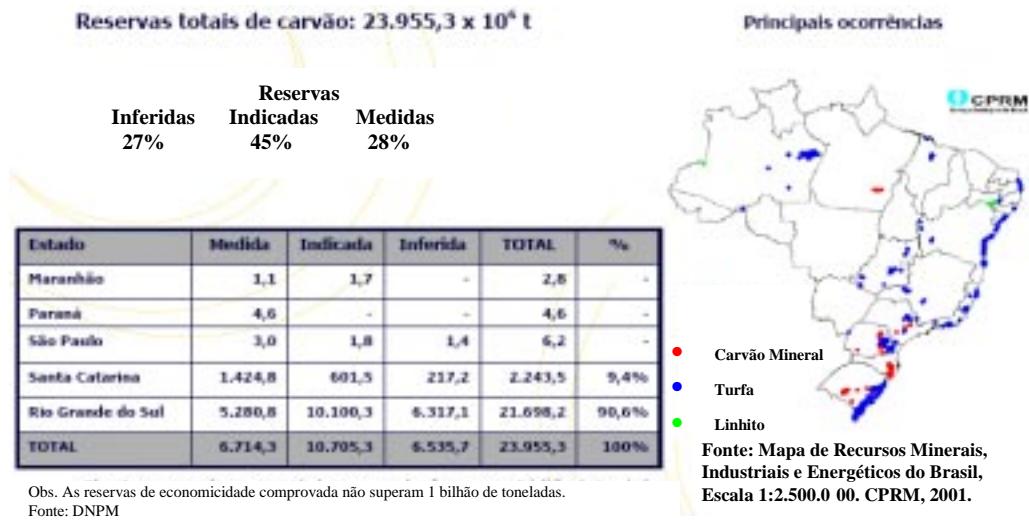


Fonte: BP, 2006

Figura 3 – Produção e consumo comparativos de carvão por continente nos anos de 1996 e 2006 (BP, 2007)

No Brasil as reservas de carvão são de aproximadamente 32 bilhões de toneladas e correspondem a 60% das reservas não renováveis. Este montante representa quantidade equivalente a 27 bilhões de barris de petróleo, suficiente para abastecer todo mercado brasileiro por cerca de 60 anos.

Na Figura 4 são reportados dados do Rio Grande do Sul, que responde por mais de 90% das reservas totais de carvão do País.



Fonte: DNPM,2005

Figura 4 – Dados de reservas totais de carvão e principais ocorrências

As maiores reservas brasileiras de carvão estão concentradas no Rio Grande do Sul e estas podem ser verificadas no mapa da Figura 5 (Holz e De Ros, 2000). As reservas provadas ou estimadas destas jazidas são as seguintes:

- Candiota (11,5 b.t.);
- Leão-Butiá (3,0 b.t.);
- Charqueadas (1,3 b.t.);
- Morungava-Chico Lomã (3,1 b.t.);
- Iruí (1,7 b.t.);
- Santa Terezinha (4,3 b.t.) e

A Tabela 2 mostra algumas características dos carvões brasileiros. Verifica-se o elevado teor de cinzas e elevado teor de enxofre dos carvões do Paraná e de Santa Catarina.

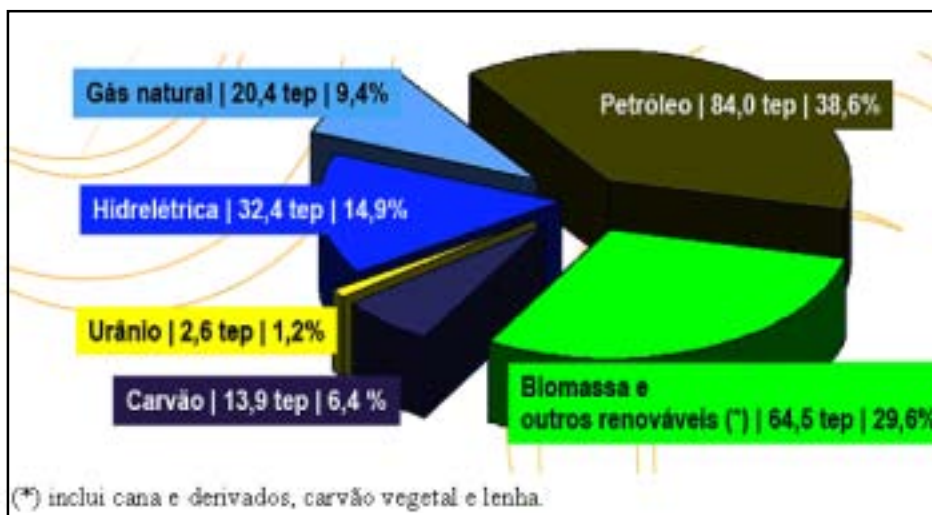
Tabela 2 – Características de carvões brasileiros

	PCS Kcal/Kg	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Paraná	4.850	30	44	7,0
Sta. Catarina	2.750	21-26	58-62	4,3-4,7
Candiota	3.200	23	52	1,6
Outros RS	3.000-4.500	23-30	40-55	0,5-2,5

PCS : Poder Calorífico Superior

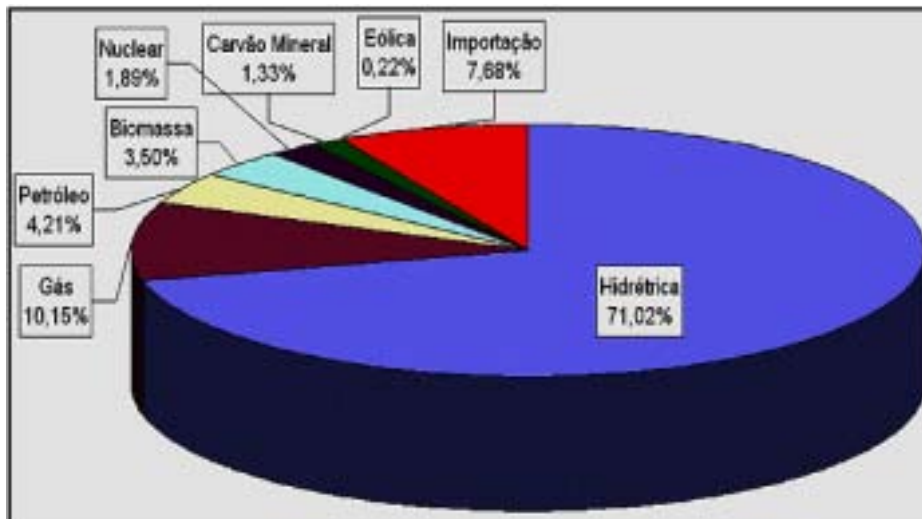
Fonte:MME, 2006.

Em 2005, o carvão mineral representou 6,4% da oferta nacional de energia primária (Figura 5a) e 1,3% da oferta nacional de energia elétrica (Figura 5b).



Fonte: MME, 2006

Figura 5a – Oferta nacional de energia primária em 2005



Fonte: ANEEL, 2007

Figura 5b – Oferta nacional de energia elétrica em 2006

Em 2002, o Brasil tinha uma capacidade de produção de 74.000 MW, sendo que a energia era predominantemente de origem hídrica (97%). Depois da crise de 2001, em que os reservatórios de água caíram a 32% de sua capacidade, devido a um longo período de estiagem, o perfil da matriz energética foi alterado.

Atualmente, de acordo com dados da ANEEL (2007), o Brasil tem uma capacidade instalada de 106.382 MW, produzindo 98.212 MW em 1.608 empreendimentos e com previsão de incremento de 25.967 MW nos próximos anos. Como demonstra a Figura 5b, ilustrada anteriormente, ainda predomina a geração de energia hidrelétrica, mas sua participação na geração energética foi reduzida de 97% para 71%. Em consequência disto, houve um incremento da geração termelétrica a partir da biomassa e gás natural. O carvão teve um aumento de consumo, mas proporcionalmente ainda tem uma contribuição bem modesta e aquém de suas possibilidades.

### **Emprego do carvão para geração de energia elétrica no Brasil**

No início da queima de carvão mineral no Brasil, não se obteve muito êxito, pois a tecnologia estrangeira utilizada não se adequava às propriedades dos nossos carvões, principalmente no que diz respeito ao teor de cinzas. Desta forma, o carvão passou para segundo plano em favor do petróleo. Mesmo assim, graças a alguns pesquisadores do setor siderúrgico, centros tecnológicos e universidades, a pesquisa na área do carvão se manteve acesa.

Com a crise do petróleo em 1973, o preço deste combustível subiu muito e o Brasil começou a investir em outras fontes energéticas. Os projetos de usinas hidrelétricas de médio e grande porte e de algumas termelétricas a óleo (Região Sudeste) e a carvão (Região Sul) começaram ter maior importância. O carvão, até então, tinha seu uso limitado a instalações de geração termelétrica e era muito pouco utilizado para gerar calor. As usinas hidrelétricas se propagaram em grande número e passaram a contribuir, junto com o carvão e petróleo, com o parque elétrico nacional em proporções de 97,36%, 1,65% e 0,02%, respectivamente.

No entanto, embora as hidrelétricas sejam consideradas mais “limpas”, o maior problema é a frequência e duração das estiagens, o que limita a capacidade de produção destas não ocorrendo o mesmo com as termelétricas.

A combustão do carvão se limitava à queima pulverizada, sem muita eficiência, em decorrência do uso de equipamentos dimensionados para outros carvões com propriedades distintas dos nossos. Também havia alguma prática com a combustão em grelhas móveis (esteira com espalhador, esteira com gaveta e grelha tipo cascata).

Em decorrência dos problemas de adaptação de tecnologia verificados, começaram a surgir as primeiras pesquisas visando a otimizar os processos e equipamentos utilizados. A Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) realizou uma série de testes visando à regulagem da combustão com carvões de diferentes teores de enxofre, o qual, além do impacto ambiental que causa, provoca a formação de escória aderente às paredes da fornalha e superfícies de troca térmica. Outros estudos ainda tinham por objetivo especificar métodos de manuseio de carvão e mistura com biomassa, como casca de arroz, para melhores condições de queima.

Alguns centros tecnológicos e órgãos, como a CEEE, Eletrosul, Centro de tecnologia PROMON, CIENTEC, UNICAMP, COPPE, Petrobras, Universidade de Maringá (PR) e Universidade de São Carlos (SP), desenvolveram tecnologias e adaptações das técnicas convencionais de acordo com as características dos nossos carvões. Também foram desenvolvidas novas técnicas de queima, como a combustão fluidizada e a combustão das misturas óleo/carvão e água/carvão. A Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC) também merece destaque pelo seu trabalho com os projetos de combustão do carvão, como o CICOM. Este projeto foi iniciado em 1978 e visava à geração de vapor e calor industrial a partir do carvão ROM e/ou rejeitos de beneficiamento. Outro projeto, MERNAK, tratava da conversão das caldeiras a lenha da MERNAK S/A para combustão do carvão em leito fluidizado. A fornalha desenvolvida para este projeto também foi usada para combustão do carvão nacional, xisto betuminoso, madeira picada, carvão vegetal, serragem, bagaço de cana, caroço de babaçu, aparas de couro e casca de arroz. A CIENTEC se destacou ainda na gaseificação do carvão em leito fluidizado, cujo propósito era obter gases combustíveis de baixo e médio poder

calorífico através dos projetos CIVOGÁS e CEEEGÁS. Também no Rio Grande do Sul, algumas empresas como a Aracruz, Copesul e indústrias cimenteiras utilizam carvão para geração de vapor, calor e/ou energia (térmica ou elétrica).

## **Termelétricas a carvão no Brasil**

Com a necessidade de suprir a falta de energia no Brasil, as termelétricas a carvão tornaram-se uma opção interessante. A construção de novas termelétricas a carvão somente é permitida se a avaliação custo-benefício do ponto de vista econômico e ambiental for cumprida e assim se adequar ao modelo de desenvolvimento sustentável.

Embora fontes renováveis (como biomassa, solar e eólica) venham a ocupar maior parcela na matriz energética mundial, o carvão deverá continuar sendo, por muitas décadas, o principal insumo para a geração de energia elétrica, especialmente nos países em desenvolvimento (EIA, 2004). Para isso, no entanto, são necessários avanços na área de P&D, visando atender aos seguintes requisitos: i) melhorar a eficiência de conversão; ii) reduzir impactos ambientais (principalmente na emissão de gases poluentes); iii) aumentar a competitividade comercial desta matriz energética.

Uma maior utilização do carvão no sul do Brasil é inevitável devido ao esgotamento da capacidade hidrelétrica de geração de energia (Dieguez, 2001). Segundo dados da Eletrobrás, o setor elétrico planeja aumentar a participação das termelétricas a carvão mineral entre 10 e 15% da capacidade de geração, num prazo de 20 anos.

Atualmente, há sete centrais termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil totalizando 1.415 MW de potência instalada, todas utilizando a tecnologia de carvão pulverizado (PC) (Tabelas 3a e 3b).

Tabela 3a – Termelétricas em operação em 2003, no Brasil

Usina	Potência (MW)	Destino da Energia	Proprietário	Município
Charqueadas	72	PIE	Tractebel Energia S/A	Charqueadas – RS
Figueira	20	SP	COPEL	Figueira - PR
Jorge Lacerda I e II	232	PIE	Tractebel Energia S/A	Capivari de Baixo - SC
Jorge Lacerda III	262	PIE	Tractebel Energia S/A	Capivari de Baixo - SC
Jorge Lacerda IV	363	PIE	Tractebel Energia S/A	Capivari de Baixo - SC
Presidente Médici A/B	446	SP	CGTEE	Candiota – RS
São Jerônimo	20	SP	CGTEE	São Jerônimo - RS

Tabela 3b – Termelétricas em fase de construção e em fase de viabilização e/ou licenciamento

Em fase de construção				
Usina	Potência (MW)	Destino da Energia	Proprietário	Município
Candiota III	350	PIE	CGTEE	Candiota - RS
Jacuí	350	PIE	ELEIA	Charqueadas - RS
Em fase de viabilização e/ou licenciamento				
Figueira (ampliação)	125	COPEL	Figueira +COPEL	Figueira - PR
Seival	500	PIE	COPELMI	Candiota - RS
CTSul	650	PIE	Grupo Chinês	Cachoeira do Sul - RS
Sul-Catarinense	440	PIE	USITESC	Santa Catarina - SC

Fonte: ANEEL, 2003

Atualmente os dois pólos termelétricos Jorge Lacerda e Candiota consomem cerca de 50% da produção de carvão brasileira e representam mais de 90% da potência instalada do parque termelétrico, o que ratifica a importância do nosso carvão como fonte energética bem como o fato de não podermos ignorar nossas reservas.

## Impacto ambiental

A gravidade dos impactos ambientais vai depender, em grande parte, da fonte de energia usada na geração da eletricidade. O emprego de fontes não renováveis, como o petróleo, o gás natural, o carvão mineral, está associado a maiores riscos ambientais, tanto locais (poluição do ar) como globais (efeito estufa). Já as fontes de energia renováveis, como a água, o sol, os ventos e a biomassa, são consideradas as formas de geração mais limpas que existem, embora também possam afetar o meio ambiente, dependendo das formas de utilização desses recursos.

A queima de carvão em indústrias e termelétricas causa graves impactos ambientais, em face da emissão de material particulado e de gases poluentes, dentre os quais se destacam o material particulado, o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ). Além de prejudiciais à saúde humana, esses gases são os principais responsáveis pela formação da chamada chuva ácida, que provoca a acidificação do solo e da água e, conseqüentemente, alterações na biodiversidade, entre outros impactos negativos, como a corrosão de estruturas metálicas.

Nos países desenvolvidos da Europa, que utilizam há mais tempo o carvão em termelétricas, os efeitos da diminuição da visibilidade e da chuva ácida se apresentaram com mais frequência.

Assim em âmbito internacional, em função dos órgãos ambientalistas, foram estabelecidos limites e padrões de emissão bem como tecnologias de controle e, principalmente, para dessulfuração do carvão.

Da mesma forma, no Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da resolução 005/89, instituiu o Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR) como um instrumento para gestão ambiental, proteção da saúde, bem-estar da população e estabelecimento de parâmetros de controle.

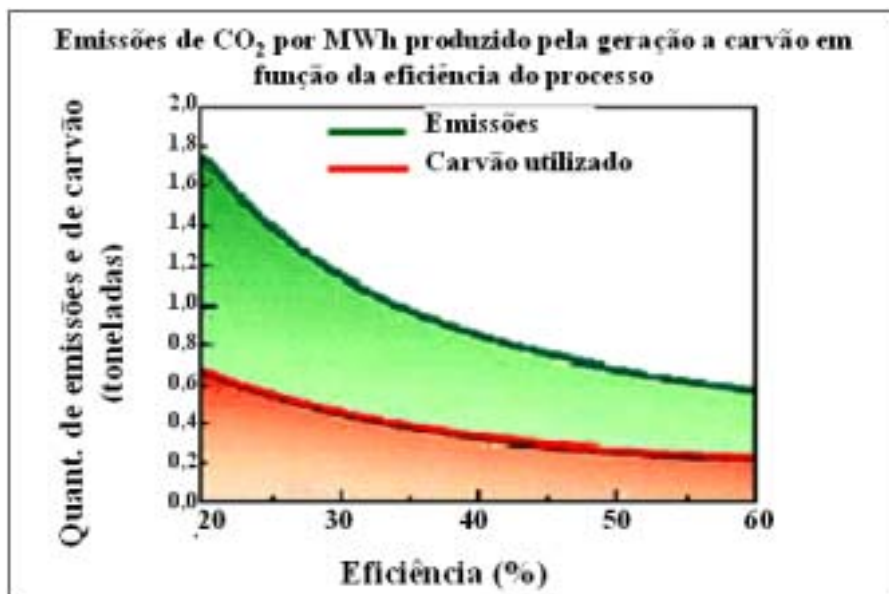
A indústria do carvão precisará se adaptar às novas normas internacionais estabelecidas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Esses gases, provenientes da combustão do carvão, do petróleo, do gás, são apontados como os causadores do aumento da temperatura global. Diante disso, a pressão ambientalista contra o carvão tem sido intensa, principalmente com o advento das teorias do aquecimento global e da redução da camada de ozônio, dentro da reivindicação do controle e da redução das emissões de poluentes para a atmosfera, mas a posição desse bem mineral vem se mantendo relativamente inabalável no cenário mundial.

Diante dos problemas ambientais, “a pressão” sobre a indústria carbonífera aumentará. Mas “o carvão irá continuar sendo a fonte principal de energia pelo menos nas duas décadas seguintes”. O carvão satisfaz, atualmente, 40% das necessidades elétricas mundiais. Essa proporção deverá chegar a 45% em 2030, segundo Fatih (2007).



Ao contrário do petróleo, cujas reservas estão situadas principalmente no Oriente Médio, uma região politicamente instável, o carvão está distribuído de maneira mais equilibrada pelo globo, além de ter um custo mais atrativo. Isso faz dele uma opção de matéria-prima, em particular para países emergentes, como a China e a Índia.

Em parte, o sucesso da resistência do carvão se deve ao extraordinário progresso da tecnologia de prevenção e recuperação de danos ambientais em sua mineração e queima, ocorrido nos últimos anos. As tecnologias de combustão limpa de carvão (*Clean Coal Technologies*) evoluíram muito. Entre estas destacam-se: a combustão em leito fluidizado (atmosférico, circulante e pressurizado), gaseificação integrada (com ciclo combinado ou célula combustível) e combustão direta (turbina ou diesel). Também avançam os sistemas de controle de emissões. O aumento da eficiência de aproveitamento energético contribui para redução das emissões de CO<sub>2</sub> (Figura 6), um dos “vilões” do efeito estufa. Paralelo a isto, pesquisas com intuito de captura do dióxido de carbono avançam consideravelmente.



Fonte: MME, 2006

Figura 6 – Redução das emissões de CO<sub>2</sub> com o incremento da eficiência de combustão

### Elementos - traço

A matéria mineral presente no carvão na queima com temperatura aproximada de 1400°C (típica da combustão pulverizada que, aliás, é empregada no Brasil), sofre processos de decomposição, fusão, aglomeração e volatilização para determinados elementos - traço

(Swaine e Goodarzi, 1995). Minerais sulfetos (pirita, calcopirita) e carbonatos (calcita, siderita, dolomita) são decompostos, produzindo óxidos metálicos,  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  e  $\text{CO}_2$ , respectivamente. Os constituintes principais das cinzas volantes são o quartzo, óxido de ferro, caulinita, muscovita, mulita e outros aluminossilicatos (Santana, 2002).

A formação das cinzas e sua característica física, mineralógica e química dependem de diversos fatores, entre os quais citam-se: o tipo de carvão, o processo de combustão (temperatura, tempo de exposição, etc.) e o equipamento de controle (precipitadores eletrostáticos, filtros, ciclones, etc.). Associado ao tipo de carvão, ressaltamos a distribuição geoquímica dos elementos - traço no carvão, que exerce, também, influência significativa nas emissões de particulados com metais associados. Os equipamentos de controle, apesar de sua alta eficiência de retenção (frequentemente maior que 99,9%), têm performance reduzida para partículas mais finas (inaláveis:  $< 10\mu\text{m}$ ) e, conseqüentemente, quantidades consideráveis de aerossóis podem ser emitidas à atmosfera. Estas partículas finas podem acarretar sérios problemas ao ser humano, pois permanecem longo tempo na atmosfera, são transportadas a centenas de quilômetros da fonte emissora e podem ser capturadas pelos alvéolos pulmonares (Querol et al., 1995).

A emissão dos elementos - traço à atmosfera é função de sua associação nas diferentes frações que compõem o carvão. Segundo diversos autores (Querol et al., 1995; Davidson e Clarke, 1996; Swaine e Goodarzi, 1995; Clarke e Sloss, 1992; Teixeira et al., 1992; Pires e Teixeira, 1992), os elementos associados às frações orgânicas e sulfetos volatilizam durante a combustão, enquanto nos elementos associados aos minerais não sulfetos (aluminossilicatos, etc.) o mecanismo volatilização - condensação, provavelmente, não ocorre. Clarke e Sloss (1992) reportaram a classificação dos elementos- traço conforme o processo de queima. Os resultados evidenciaram sobreposição de determinados elementos entre grupos classificados segundo os mecanismos de volatilização - condensação.

Outros estudos (Querol et al., 1995; Teixeira et al., 1992; Davidson e Clarke, 1996) realizados mostraram que determinados elementos apresentavam comportamento volátil e outros mostraram partição entre as diferentes frações das cinzas. Yokoyama et al. (1991) reportaram a formação de óxidos metálicos traços como produtos da combustão na superfície das partículas.

Tumati e DeVito (1993) sugerem que o comportamento de partição dos metais nas cinzas pode ser também associado à bimodalidade da distribuição do tamanho de partículas. A dependência da concentração dos elementos - traço em função do tamanho de partícula tem sido estudada por diversos autores citados em vários trabalhos (Davidson e Clarke, 1996; Clarke e Sloss, 1992). Estes trabalhos visam à classificação dos elementos - traço segundo suas propriedades de volatilização durante a combustão com conseqüente condensação nas frações geradas (cinzas leves de chaminé, cinzas leves retidas no precipitador, cinzas pesadas ou de fundo). A classificação é mencionada em várias

publicações dentre as quais cita-se Davidson e Clarke (1996) e Teixeira et al. (1992). Estes resultados revelam que o comportamento de determinados elementos apresenta concordância entre vários autores, enquanto existe uma certa discordância entre os dados obtidos por outros pesquisadores (Teixeira et al., 1992; Davidson e Clarke, 1996; Esenlik et al., 2006, entre outros).

No caso de carvões brasileiros, em função do elevado teor de cinzas geradas na combustão (cerca de 50% de cinzas) e da presença de elementos - traço potencialmente tóxicos neste resíduo, sua disposição final e utilização requer cuidados especiais, incluindo a seleção de áreas e formas adequadas de destinação, visando à proteção das águas superficiais adjacentes. Geralmente, o destino das cinzas é o interior das cavas das minas a céu aberto abandonadas, como ocorre em Candiota, ou simplesmente locais situados em áreas urbanas ou próximos a rios e arroios, como banhados e terrenos sem uso (Baixo Jacuí, Tubarão e Criciúma).

## **Óxidos de enxofre**

A queima de combustíveis fósseis (principalmente petróleo e carvão) tem afetado a qualidade do ar, principalmente devido às emissões de óxidos de enxofre e nitrogênio. Estes compostos são os principais responsáveis pelos indícios de chuva ácida no ambiente.

Muitos estudos confirmam que a quantidade de enxofre liberado pelas emissões do processo de combustão de carvão é maior do que a de outros combustíveis fósseis (Isobbe et al., 2005).

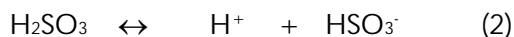
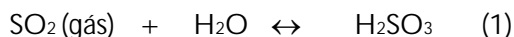
A presença de emissões de óxidos de nitrogênio e enxofre na atmosfera proveniente da queima de combustíveis fósseis ocorre, principalmente, sob a forma  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$ . Os óxidos de enxofre convencionais,  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ , são encontrados como produtos estáveis e são resultantes da combustão a altas temperaturas. A relação de equilíbrio termodinâmico é expressa pela equação (1). Baseando-se nas constantes de equilíbrio  $K_p$ , da oxidação de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ , torna-se evidente que a reação de equilíbrio favorece a formação de  $\text{SO}_3$  a baixas temperaturas e de  $\text{SO}_2$  a altas temperaturas. Diante disso, é esperado encontrar pequenas quantidades deste óxido na zona da chama e grandes quantidades nos gases frios da combustão, supondo que o equilíbrio se desloca com a temperatura.

O  $\text{SO}_2$  é o principal óxido de enxofre formado nos processos de combustão, apesar da existência de forças termodinâmicas que devem promover intensamente as reações até o  $\text{SO}_3$ . A conversão final de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  na atmosfera deveria ser um processo lento, devido às baixas taxas de conversão à temperatura ambiente. Porém, uma vez presente na atmosfera, a taxa de oxidação do  $\text{SO}_2$  será influenciada por catalisadores heterogêneos, presentes nas superfícies das partículas em suspensão. Estas provocam um aumento da taxa de conversão de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  associado ao incremento de formação de sulfatos na forma de aerossol.

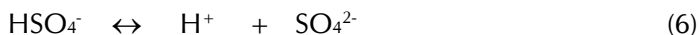
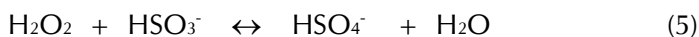
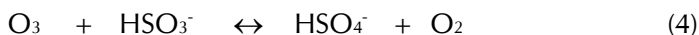
O  $\text{SO}_2$  tem uma forte tendência a reagir com o oxigênio do ar. Porém, na fase gasosa a taxa de reação deste composto é lenta, mesmo com o uso de catalisadores (Pienaar e Helas, 1996). O  $\text{SO}_3$ , quando formado, reage rapidamente com vapor d'água formando  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . A taxa de oxidação do  $\text{SO}_2$  é estimada em 0,7% por hora para uma média de 24 horas em um típico dia de verão, sem nuvens e com a troposfera relativamente limpa (Seinfeld e Pandis, 1998).

Mello e Motta (1987) relataram que o  $\text{SO}_2$  é altamente solúvel nas nuvens ou nas gotas de chuva, gerando em fase aquosa o íon  $\text{HSO}_3^-$  (bissulfito). Este íon reage com  $\text{H}_2\text{O}_2$ , sendo rapidamente convertido a  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , que nestas condições se dissocia liberando dois tipos de íons:  $\text{H}^+$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ .

A seqüência das principais reações de formação do  $\text{H}_2\text{SO}_3$  é citada por Wellburn (1988). Na reação (1), o  $\text{SO}_2$  gasoso reage com a  $\text{H}_2\text{O}$  formando  $\text{H}_2\text{SO}_3$ , que se encontra dissociado nas formas iônicas de  $\text{H}^+$  e  $\text{HSO}_3^-$ . As duas primeiras reações são as mais relevantes na formação da acidez das gotas d'água, pois o pKa da reação (3) é aproximadamente neutro (7,2). Assim a pequena concentração de  $\text{SO}_3^{2-}$  (sulfito) presente na reação (3) apresenta valores de  $\text{pH} < 5,6$ .



Este mesmo autor relatou que alguns agentes oxidantes formados na atmosfera, tais como  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , peroxiacetil nitrato (PAN - Peroxi acetil nitrato) ou radicais orgânicos livres ( $\text{CH}_3\text{O}_2\cdot\text{H}$  e  $\text{CH}_3\text{COO}_2\cdot\text{H}$ ), não reagem com o  $\text{SO}_2$  na forma gasosa. No entanto, quando dissolvidos nas gotas d'água, podem oxidar o  $\text{HSO}_3^-$  (reações 4 e 5) a  $\text{SO}_4^{2-}$ , acidificando o meio:



Pienaar e Helas (1996) reportaram a presença de  $\text{SO}_2$  na troposfera, embora na fase líquida estivesse em menor quantidade (0,004 a 4,0% de  $\text{SO}_2$  líquido). Desta forma, as reações químicas que envolvem gotículas d'água, como nuvens, névoa ou chuva, podem afetar a composição da atmosfera.

Os  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_2$  são oxidados na troposfera pelos agentes oxidantes formados na fase gasosa.  $\text{SO}_2$  pode reagir com radical hidroxil na atmosfera para produzir  $\text{SO}_3$ , que reage rapidamente com vapor d'água para produzir ácido sulfúrico. Dependendo das condições meteorológicas do local e da disponibilidade de substâncias oxidantes, o  $\text{SO}_2$  pode ser transportado centenas de quilômetros antes de reagir (Erduran e Tuncel, 2001).

## Óxido de nitrogênio

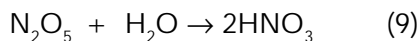
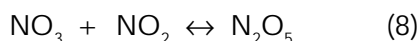
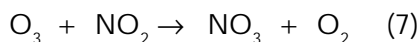
Os poluentes na atmosfera sofrem processos de oxidação e estes ocorrem através de diferentes reações que dependem das substâncias químicas prevalentes e das condições físicas. O  $\text{HNO}_3$  é formado na atmosfera por compostos gasosos. O início do mecanismo se processa através da reação entre o  $\text{NO}_2$  e os radicais de hidroxila, sendo a remoção realizada através da dissolução nas nuvens e do arraste durante a chuva (Mello e Motta, 1987). O  $\text{HNO}_3$  em fase aquosa mantém-se dissociado sob a forma iônica de  $\text{H}^+$  e  $\text{NO}_3^-$ . A taxa de conversão a  $\text{HNO}_3$ , em dias de verão e sem a presença de nuvens, pode atingir cerca de 20 %/hora. O nitrato é formado pela oxidação do nitrito e o equilíbrio da reação se processa através da troca com outro nitrato, resultando na desorção do  $\text{NO}_2$  (Pienaar e Helas, 1996).

Dentre os processos que formam  $\text{NO}_x$  e, conseqüentemente,  $\text{HNO}_2$  e  $\text{HNO}_3$ , destacam-se combustão em temperaturas elevadas, utilização do nitrato de amônia como fertilizante, reações fotoquímicas e formação do PAN (Wellburn, 1988). No entanto, mais de 90% do  $\text{NO}_x$  produzido pelo homem se origina do consumo de combustíveis. Este mesmo autor relata que, aproximadamente, a metade do  $\text{NO}_2$  provém de fontes estacionárias e o restante é originário de fontes móveis. O consumo de combustíveis em fontes estacionárias, incluindo usinas termelétricas, representa cerca de 56% de 25,4 milhões de ton/ano, e 40% podem ser atribuídos a fontes móveis.

Além das emissões de fontes antropogênicas, fatores na atmosfera, como mudanças de temperatura, luz solar e colisão de moléculas, átomos e radicais livres, podem influenciar na formação dos  $\text{NO}_x$ . Este composto é muito complexo, pois a meia-vida das espécies que reagem na atmosfera se diferencia muito em relação ao nível do solo.

O tempo de permanência das espécies químicas na atmosfera pode ser curto ou longo, sendo que as partículas mais leves e/ou finas têm a possibilidade de serem transportadas a longas distâncias.

O  $\text{NO}_2$  se hidrolisa a  $\text{HNO}_3$  na atmosfera, precipitando, por sua vez, como nitrato. Como possíveis reações atmosféricas para a formação do  $\text{HNO}_3$  têm-se:



Em temperaturas mais baixas, a quantidade de NO formada (< 1500 K) é insignificante, apesar de a quantidade de NO ultrapassar a de  $\text{NO}_2$ . No entanto, em temperaturas mais elevadas, convencionais de combustão (> 1500 K), ocorre nos gases de combustão a formação apreciável de NO, que é arrastado à atmosfera, porém com quantidades

insignificantes de  $\text{NO}_2$ . A reação de oxidação do NO a  $\text{NO}_2$  ocorre na atmosfera durante um período determinado pela cinética das reações.

De forma geral, pode ser enfatizada a importância dos parâmetros temperatura e tempo na formação do  $\text{NO}_x$ . Basicamente em temperaturas elevadas ( $> 1.900 \text{ K}$ ) tanto a termodinâmica como a cinética favorece a formação de NO. Portanto, os picos de temperaturas podem ser evitados de duas formas: através do impedimento de altas taxas de liberação de calor e de altas taxas de remoção de calor. Outra forma de resultado seria limitar a um tempo mínimo de residência e evitar pico de temperatura.

Para  $\text{NO}_x$ , muitas das emissões resultam da oxidação de nitrogênio no ar às altas temperaturas dos processos de combustão. A extensão desta reação depende sensivelmente das condições de combustão.

Produtos da reação de  $\text{NO}_x$ , formados na atmosfera, incluem ambos nitratos gasosos e particulados. Os óxidos de nitrogênio,  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ), principalmente emitidos à atmosfera como NO e subseqüentemente transformados em  $\text{NO}_2$  e outras espécies nitrogenadas, são constituintes muito importantes da poluição do ar.  $\text{NO}_x$  e OH são precursores de formação de ozônio ( $\text{O}_3$ ) e outros foto - oxidantes.

$\text{NO}_x$  é produzido na estratosfera através da reação de  $\text{N}_2\text{O}$  com átomos de  $\text{O}(^1\text{D})$ . O tempo de mistura entre a estratosfera e troposfera é longo em comparação com o tempo de vida químico de  $\text{NO}_x$ . Como resultado, a maioria do  $\text{NO}_x$  é convertido para  $\text{HNO}_3$ .

Durante o dia, a mais importante fonte de ácido nítrico é a reação de  $\text{NO}_2$  com o radical hidroxil. Durante a noite, o radical livre  $\text{NO}_3$  é a fonte de  $\text{HNO}_3$  troposférico.  $\text{NO}_3$  é relativamente insignificante durante a luz do dia e é destruído facilmente através de sua rápida fotólise com a luz solar e pela sua rápida reação com NO.

## Estudos realizados sobre impacto ambiental

Vários trabalhos (Dallarosa et al., 2005; Migliavacca et al., 2005a; Flues et al., 2002; Braga et al., 2002) em áreas de influencia de queima de carvão demonstram implicações ambientais (regiões de Candiota, Santa Catarina e Paraná) com alterações da qualidade do ar.

Estes trabalhos cobrem de forma parcial lacunas e permitem um conhecimento sobre o assunto evitando a repetição de trabalhos já executados e apontando áreas em que o atual conhecimento ainda é fragmentado.

## Elementos - traço

No estudo de elementos no carvão de Candiota (Pires et al., 2001) foi observado que alguns elementos apresentaram concentrações superiores às indicadas na literatura, destacando-se Ta (sete vezes maior), Cs, Gd, Dy, Yb, Er e Rb. Tal fato pode estar associado a aspectos geoquímicos específicos do carvão estudado.

Através da análise das concentrações dos elementos - traço nas cinzas leves e pesadas e de seus enriquecimentos ou depleções em relação ao carvão, classificaram-se esses elementos em três grupos:

- Grupo I - Voláteis: As, B, Bi, Cd, Mo, Pb, S, Zn e outros.
- Grupo II - Intermediários: Ca, Co, Fe, Mg, Mn, Ni e outros.
- Grupo III - não-voláteis: Al, Ba, Be, Ce, Cr, Cs, Na e outros.

A análise da concentração dos elementos - traço em sete frações granulométricas (Impactador em Cascata - IC) da cinza leve (-63  $\mu\text{m}$ ) foi dividida em três grupos, em função da variação do Fator de Enriquecimento entre as frações finas e grossas:

- Ca, Mg.....com  $\Delta EF < 10$ .
- Na, Cr, Cu.....com EF entre 10 e 50.
- As, Ni, Mo, Pb, Zn.....com  $\Delta EF > 50$ .

Na região de Candiota, foi verificado, no estudo de partículas atmosféricas com  $\text{PM}_{10}$ , que a concentração média em massa (13,09  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) foi inferior aos padrões de qualidade do ar diário (150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e anual médio (50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) da legislação nacional vigente para o período estudado (2001-2002). No entanto, verificou-se enriquecimento de elementos metálicos de S, Ni, Cu e Zn nas partículas mais finas (2,5 $\mu\text{m}$ ) enquanto Si, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co e Br mostraram-se mais significativos nas partículas grossas (10-2,5  $\mu\text{m}$ ) (Braga et al., 2004). Esta caracterização mostra influência de diversas fontes, como a combustão de carvão utilizado na produção de energia elétrica, as contribuições naturais e dos sais marinhos provenientes das massas de ar tropical e polar marítimas.

## Precipitação atmosférica

O aumento das emissões atmosféricas tem provocado um desequilíbrio do meio ambiente, originando a formação de chuva ácida. As reações de umidade e/ou gotas de chuva suspensas na atmosfera com os óxidos de enxofre e nitrogênio, resultantes da queima de combustíveis fósseis e das atividades industriais, são os fatores principais que podem causar o aumento da acidez da precipitação atmosférica. Os compostos na atmosfera são dependentes das condições meteorológicas e estas vão exercer influência significativa no tempo de residência e no transporte dos poluentes, provocando a formação de chuva ácida a centenas ou milhares de quilômetros do local de emissão (Da Silva Filho, 1993).

As emissões antropogênicas, como as de  $\text{SO}_2$ , provenientes principalmente da queima de combustíveis fósseis, têm provocado alterações na composição iônica da chuva aumentando os níveis de acidificação.

A precipitação úmida contém diferentes espécies químicas iônicas e não iônicas. As espécies ionizadas desempenham um papel preponderante nos processos de acidificação. Além das espécies carbonatadas, destacam-se os cátions e ânions inorgânicos:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ . Outras espécies iônicas também podem estar presentes nas precipitações úmidas, porém em concentrações menores, entre elas cita-se: o fluoreto, fosfatos e ânions orgânicos como formiato, acetato e oxalato. Essas espécies, geralmente secundárias nas precipitações de regiões urbanas poluídas, podem ter um papel destacado na acidificação da deposição úmida de regiões continentais remotas ou marinhas.

Os valores de pH abaixo de 5,65, encontrados nas precipitações úmidas em diversas regiões do mundo, devem-se à formação/dissolução de ácidos fortes nos hidrometeoros. O  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$  presentes na atmosfera, principalmente em regiões poluídas, são oxidados por diferentes processos resultando na formação dos ácidos fortes  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{HNO}_3$ , respectivamente. Esses ácidos, ao serem absorvidos pela água das nuvens e pelas gotas de chuva, regressam à superfície como precipitação ácida.

Os dados obtidos de precipitação atmosférica para o ano de 2001 revelaram a ocorrência de precipitação ácida em aproximadamente 70% das amostras analisadas com valores de  $\text{pH} < 5,65$ . Dentre as estações observadas, Aceguá, amostrada em 2001, apresentou resultado médio de  $\text{pH} 5,0$ , cujo valor não correspondeu ao resultado obtido por Zunchel et al. (2003),  $\text{pH} (5,6)$ . Estes autores também pesquisaram a composição da precipitação úmida da mesma área do presente estudo, fronteira Brasil-Uruguai, porém em diferente período (1999-2000).

Além do pH, na estação de Aceguá do lado do Uruguai, as concentrações em  $\mu\text{eq l}^{-1}$  de sulfato (11,04  $\mu\text{eq l}^{-1}$ ), nitrato (7,5), flúor (5,79) e cloro (11,24) foram inferiores àquelas determinadas por Zunchel et al. (2003) para sulfato (63,5), nitrato (13,9), flúor (10,8) e cloro (27,4).

As diferenças entre os resultados podem ser atribuídas aos diferentes procedimentos experimentais de amostragem (período, frequência) e tratamento (filtração utilizando membranas de porosidades diferentes. Enquanto, Zunchel et al. (2003) utilizaram membranas com diâmetro de poro de 0,45 $\mu\text{m}$ , este projeto utilizou membranas com diâmetro de poro de 0,22 $\mu\text{m}$ ) e outro tipo de análise química.

As contribuições de fontes reportadas pelos autores Migliavacca et al. (2005b) e Zunchel et al. (2003) se diferenciam. Os que estudaram do lado Uruguai (Zunchel et al., 2003) não evidenciaram influência da termelétrica, enquanto do lado brasileiro (Migliavacca et al., 2005b) foram verificadas influências de concentração de  $\text{SO}_4^{2-}$ . O ácido sulfúrico parece ser o maior responsável pela chuva ácida em Candiota. Níveis de Emissão de  $\text{SO}_2$  têm sido reportados como maiores do que aqueles de  $\text{NO}_x$  e estes podem aumentar com o aumento da capacidade da termelétrica (350 MW) e a futura termelétrica Seival (500 MW).



A avaliação da termelétrica de 10 MW na precipitação atmosférica na cidade de Figueira no Estado do Paraná foi também estudada por Flues et al. (2002). Os dados revelaram durante um ano de amostragem de junho de 1999 a junho 2000, elevada concentração de  $\text{SO}_4^{2-}$ , seguido pelo  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$ . A alta concentração de sulfato era esperada devido à presença de  $\text{SO}_2$  na atmosfera local. Os resultados indicaram que a precipitação na região é ligeiramente ácida, sendo o sulfato elevado responsável pela acidez. Os valores de pH obtidos nas amostras de precipitação não foram tão baixos, quanto esperados, indicando que as espécies alcalinas  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  ou  $\text{NH}_4^+$  estão provavelmente neutralizando a ação do íon sulfato, diminuindo o impacto ao meio ambiente.

### **Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs)**

HPAs são compostos orgânicos constituídos de C e H, formados durante a combustão incompleta de matéria orgânica, tais como carvão, petróleo, óleo e madeira. Veículos automotores podem ser considerados como principais fontes de HPAs.

Os HPAs na atmosfera estão presentes na fase vapor ou predominantemente adsorvidos no material particulado. Os HPAs mais leves são formados na fase gasosa, enquanto aqueles com quatro ou mais anéis são encontrados principalmente na fase particulada. HPAs intermediários, como Pireno e Antraceno, encontram-se distribuídos em ambas as fases gasosa e aerossol (Seinfeld, 1998).

A concentração dos HPAs atmosféricos é fortemente dependente do tamanho das partículas, sendo que as maiores concentrações encontram-se na faixa de tamanho de partículas respiráveis ( $< 2,5 \mu\text{m}$ ) (Lodovici et al., 2003). Estas partículas podem, através da inalação, depositar-se em brônquios e alvéolos. Isto implica na preocupação com os níveis elevados de HPAs, devido à possibilidade destas substâncias serem prejudiciais à saúde (Caricchia et al., 1999; Lodovici et al., 2003).

Estudo dos HPAs associados às partículas atmosféricas menores que  $10 \mu\text{m}$  e à identificação das suas fontes emissoras foi realizado na região de Candiota (Dallarosa et al. 2005). Neste estudo foram consideradas diferentes fontes de poluição, destacando-se as emissões veiculares, combustão de carvão e de madeira e combustão de óleos e combustíveis, responsáveis pelos principais compostos de HPAs encontrados na região.

Os 16 HPAs prioritários foram identificados em quase todas as amostras, com exceção de naftaleno e acenafetaleno, que estiveram sempre abaixo do limite de quantificação ( $0,01 \text{ ng m}^{-3}$ ). As concentrações médias dos HPAs variaram entre 0,051 e  $1,791 \text{ ng m}^{-3}$ , sendo o composto fenantreno encontrado em maior abundância no período amostrado, apresentando valor máximo de concentração de  $9,190 \text{ ng m}^{-3}$ .

Devido ao fato de os HPAs serem formados a partir de diversas fontes, a contribuição de cada emissão acaba por tornar o sistema atmosférico bastante complexo, dificultando a identificação e separação das principais fontes emissoras.

## Modelo RAMS

Tendo em vista a complexidade da dinâmica atmosférica, sistemas de modelos numéricos que simulam as condições da atmosfera e o transporte de poluentes passaram a ser utilizados como ferramentas de controle ambiental em países desenvolvidos. Muitos estudos nesta área têm sido realizados no Brasil, porém ainda muitos avanços precisam ser encaminhados para que a modelagem matemática, com fins estratégicos, possa ser utilizada no controle das emissões atmosféricas.

O impacto ambiental das emissões de poluentes, decorrentes da combustão do carvão mineral, está associado aos processos de dispersão destes poluentes na atmosfera. A trajetória dos poluentes atmosféricos e, conseqüentemente, suas concentrações ambientais são determinadas em função das condições meteorológicas, as quais estão interligadas à topografia, ao uso e à ocupação do solo.

Estudos de qualidade do ar têm sido realizados aplicando-se modelo de mesoescala *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) de área limitada, desenvolvido para simulação e previsão de fenômenos meteorológicos (Pielke et al., 1992), designados para simular circulações atmosféricas que vão desde a micro até a grande escala.

Paz et al. (2007) estudaram o comportamento atmosférico nos processos de dispersão dos poluentes emitidos pela Usina Termoeletrica Presidente Médici (UTPM), Candiota – RS, através de modelagem numérica. Neste estudo, foi aplicado o modelo de mesoescala RAMS para simular as condições atmosféricas e as concentrações de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), material particulado (PM<sub>10</sub>) e óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>).

Na aplicação de modelo numérico na região de Candiota, analisando os dados em pontos situados próximos a UTPM, verificou-se concentrações superiores a 60 µg m<sup>-3</sup> de SO<sub>2</sub> e da ordem de 65 µg m<sup>-3</sup> para NO<sub>x</sub>, no dia 25/04/2004. Provavelmente, o transporte de poluentes foi dificultado pela direção e intensidade dos ventos, associado à entrada de uma massa de ar mais fria e seca, portanto mais estável, inibindo o transporte vertical.

De forma geral, Paz et al. (2007) verificaram maior variação das concentrações próxima à fonte emissora e menores em locais mais distantes desta. Outros estudos realizados na região de Candiota (Alves, 1996; Karam et al., 1996) evidenciaram o acúmulo das concentrações de poluentes próximo à fonte emissora quando da ocorrência de ventos fracos e da influência das características orográficas como determinantes no escoamento do vento e na dispersão dos poluentes. Os resultados mostraram a influência significativa das emissões geradas pela usina termoeletrica na concentração dos poluentes estudados.

Alguns autores (Karam et al., 1996) realizaram estudo de simulação numérica da dispersão de SO<sub>2</sub> na região de Candiota aplicando um modelo aleatório de partículas (RDM), em 11/02/1995. Os resultados apresentados de concentração média diária simulada para a superfície foram valores máximos entre 60 e 80 µg m<sup>-3</sup>. Estes dados, originários de anos

diferentes, mesmo simulados, revelam que houve uma redução nos níveis de  $\text{SO}_2$  para o último ano.

## **Oxidantes fotoquímicos**

A gravidade dos impactos ambientais depende do tipo de fonte utilizada na geração de energia. O emprego de fontes não renováveis, principalmente o carvão mineral, está associado a maiores riscos ambientais.

Oxidantes fotoquímicos são formados na atmosfera como resultado de reações químicas envolvendo compostos orgânicos, óxidos de nitrogênio, oxigênio e radiação solar. Sendo assim, os oxidantes fotoquímicos são considerados quase exclusivamente poluentes secundários.

Estudos na região de Candiota (Dallarosa et al., 2005) foram realizados com a finalidade de investigar a variação da concentração de ozônio e seus precursores  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) na emissão da termelétrica a carvão, aplicando modelo numérico.

Os resultados da simulação revelaram altos níveis de ozônio no período quente, sendo estes níveis relacionados a altas temperaturas e concentração de vapor d'água. A concentração simulada foi localizada longe das fontes de emissão, favorecendo reação e tempo de misturas, e entre precursores, para formar ozônio. Simulação de ventos de pequenas intensidades favoreceu o transporte de ozônio, misturando e acumulando em áreas distantes das fontes de emissão (Dallarosa et al., 2007).

De acordo com estes mesmos autores, as concentrações de ozônio simuladas no período de verão apresentaram médias de 12,7 ppbv, no dia 24/01/2003, de 71,6 e 23,5 ppbv para os dias 25 e 26/01/2003, respectivamente. Analisando as concentrações horárias dos dias simulados foi verificado que os valores máximos de concentração ocorreram durante a tarde, alcançando seus maiores índices próximo às 14 horas. Os picos de concentração simulados para os dias 24 e 25/01/2003 foram de 35 ppbv e 210 ppbv de  $\text{O}_3$ , na estação Candiota e, no dia 26/01/2003, a concentração máxima encontrada foi de 149 ppbv, na estação Três Lagoas.

Esta mesma autora mostra que os resultados simulados para os dias 25 e 26 de janeiro de 2003, no período da tarde, estiveram acima do valor determinado pela legislação Brasileira (CONAMA, 1990), caracterizando a influência da queima de carvão pela UPME na região estudada.

## **Considerações finais**

O presente capítulo evidencia a necessidade de diversificação da matriz energética no Brasil e no mundo. A região Sul, que possui mais de 90% das reservas de carvão, necessita aproveitar este potencial. Contudo, a aplicação de tecnologias de combustão limpa e o emprego de melhores sistemas de controle de emissão são imperativos. Verifica-se que

os trabalhos realizados ainda não são suficientes para se ter um conhecimento real de regiões atingidas pela influência da queima de carvão. Mais estudos precisam ser desenvolvidos para compreender os mecanismos de formação dos poluentes, em especial os orgânicos, bem como sua dispersão, que depende de aspectos meteorológicos e orológicos.

## Referências

- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA -. Banco de Informações de Geração - BIG. Disponível em: [www.aneel.gov.br/](http://www.aneel.gov.br/). 2003.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA -. Banco de Informações de Geração - BIG. Disponível em: [www.aneel.gov.br/](http://www.aneel.gov.br/). 2007.
- ALVES, R. C. M. Estudo da Dispersão do SO<sub>2</sub> emitido pela Usina Termoeletrica de Candiota - RS, Brasil, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil, 130p., 1996.
- BRAGA, C.; ALVES, R.; TEIXEIRA, E. C.; PIRES, M. Aerosols concentration in the Candiota area applying different gravimetric method of sampling and numeric modelling. J. Environ. Monit., v.4, p.897 - 902, 2002.
- BRAGA, C.; TEIXEIRA, E. C.; YONEMA, M. L.; DIAS, J. F. Study of the elemental composition of aerosols in the Candiota region of Brazil using the PIXE technique. B Section of Nuclear Instruments and Methods. , v.225, p.561 - 571, 2004.
- BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY. LONDON: BP. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao(2).pdf). 2006.
- BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY. Disponível em: <http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6842&contentId=7021390>, [http://thefraserdomain.typepad.com/energy/2006/06/bp\\_download.html](http://thefraserdomain.typepad.com/energy/2006/06/bp_download.html) e <http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=9010964&contentId=7021586> . 2007.
- CARICCHIA, A. M.; CHIAVARINI, S.; PEZZA, M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmospheric particulate matter in the city of Naples (Italy). Atmospheric Environment, 33, p.3731-38, 1999.
- CHEVALIER, J.M. 2001 ENERGIE - LES DÉFIS À VENIR. Science & Vie, n.214, p.6-43, Mars 2001.
- CLARKE, L.B; SLOSS, L.L. Trace elements-emissions from coal combustion and gasification, IEACR/49. IEA Coal Research, London, 111p. 1992.

- CONAMA, 1990. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n.003 de 28 de Junho de 1990. 4 ed. Brasília, 1992.
- DA SILVA FILHO, E.V.; MARIANI, R.L.C.; MADDOCK, J.E.L. Chove chuva ácida. *Ciência Hoje*, 16(91)p. 20-26, 1993.
- DALLAROSA, J. B.; TEIXEIRA, E. C.; PIRES, M.; FACHEL, J. Study of the profile of polycyclic aromatic hydrocabons in atmospheric particles (PM10) using multivariate methods. *Atmospheric Environment*, v.39, p.6587 - 6596, 2005.
- DALLAROSA, J.B.; TEIXEIRA, E.C.; ALVES, R.C. Application of numerical Models in the Formation of Ozone and its Precursors in Areas of Influence of Coal-Fired Power Station - Brazil. *Water Air Soil Pollut.* n.178, p.385-399, 2007.
- DAVIDSON, R. M.; CLARKE, L. B. Trace elements in coal. Kluwer Academic Publishers, 59p., 1996.
- DIEGUEZ, C. O mundo com fome de energia. Disponível em: [http://www2.uol.com.br/veja/230501/p\\_130.html](http://www2.uol.com.br/veja/230501/p_130.html), 2001.
- DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL PRODUÇÃO MINERAL. Anuário Mineral Brasileiro. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=294>. Acesso em: 2005.
- EIA - ENERGY INTERNATIONAL AGENCY. Disponível em [http://useconomy.about.com/od/governmentagencies/p/DOE\\_EIA.htm](http://useconomy.about.com/od/governmentagencies/p/DOE_EIA.htm). 2004.
- ERDURAN, M.S.; TUNCEL, S.G. Gaseous and particulate air pollutants in the northeastern air pollutants in the Northeastern Mediterranean Coast. *Science of Total Environment*, 281p., p.205-215. 2001.
- ESENLIK, S.; KARAYIGIT, A.I.; BULUT, Y.; QUEROL, X.; ALASTUEY, A.; FO, O. Element behaviour during combustion in coal-fired Orhaneli power plant, Bursa-Turkey. *Geologica Acta*, v.4, n.4, p.439-449. 2006.
- FATIH, B. Relato da conferência em Paris sobre Mudanças Climáticas. Disponível em: [http://www.iaee.org/documents/washington/Fatih\\_Birol.pdf](http://www.iaee.org/documents/washington/Fatih_Birol.pdf). 2007
- FLUES, M.; HAMMA, P.; LEMES, M.J.L.; DANTAS, E.S.K; FORNARO, A. Evaluation of the rainwater acidity of a rural region due to a coal-fired power plant in Brazil. *Atmospheric Environment*, 36, p.2397, 2002.
- HOLZ, M.; DE ROS (ed) *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2000.

- HUFFMAN, G.P.; WENDER, I. Fuel Science in the year 2000: an introduction. Fuel Processing Technology, v.71, n.1-3, p.1-6, 2001.
- ISOBE, Y.; YAMADA, K.; WANG, Q.; SAKAMOTO, K.; UCHIYAMA, I.; MIZOGUCHI, T.; ZHOU, Y. Measurement of indoor sulfur dioxide emission from coal-biomass briquettes. Water, Air, and Soil Pollution 163, p.34-353, 2005.
- KARAM, H.A.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J.; CARVALHO, J.C.; MORAES, O.L.L.; DEGRAZIA, G.A.; BORNSTEIN, N, R.D.; Simulação numérica da CLP em candiota através de um modelo de mesoescala. Air Pollution and Acid Rain: The Candiota Program, Moraes, O.L.L.; Oliveira, A.P.; Caetano Neto, E.S.; Degrazia, G.A. (eds) FAPESP, Bauru (SO), Brasil, 86, 1996.
- LODOVICI, M.; VENTURINI, M.; MARINI, E.; GRECHI, D.; DOLARA, P. Polycyclic aromatic hydrocarbons air levels in Florence, Italy, and their correlation with other air pollutants, Chemosphere, 50, p. 377 - 382. 2003.
- MELLO, W.Z.; MOTTA, J.S.T. Acidez na chuva. Ciência Hoje, 6, 34, p.40-43, 1987.
- MIGLIAVACCA, D.; TEIXEIRA, E. C.; MACHADO, A.C.M.; PIRES, M. Composição química da precipitação atmosférica no sul do Brasil- Estudo preliminar.. Química Nova. , v.28, p.371-379, 2005a.
- MIGLIAVACCA, D.; TEIXEIRA, E. C.; WIEGAND, F.; SANCHEZ, J. C. D.; FACHEL, J.; RIBEIRO, M. Evaluation of the atmospheric deposition in an urban region in South Brasil. Water Air and Soil Pollution. , v.167, p.91 - 110, 2005b.
- MME - MINISTÉRIO MINAS ENERGIA. BRASIL. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 2006.
- PAZ, R.S.; ALVES, R.C.M.; TEIXEIRA, C.E.; DALLAROSA, J. Utilização de Modelagem Numérica para o Estudo da Dispersão de Poluentes Emitidos pela Usina Termoelétrica Presidente Médici. No Prelo. Química Nova. 2007.
- PIELKE, R.A.; WALKO, R.L.; EASTMAN, J.L.; LYONS, W.A.; STOCKER, R.A; ULIASZ M.; TREMBACK, C.J. Recent achievements in the meteorological modeling of local weather and air quality. Trends in Atmospheric Science, 1, p.287-307, 1992.
- PIENAAR, J.J.; HELAS, G. Chemical Transformations of atmospheric pollutants. In: Air Pollution and its Impacts on the South African Highveld, HELD, G; GORE, B. J.; SURRIDGE, A. D.; TOSEN, G. R.; TURNER, C. R.; WALMSLEY, R. D. (eds). Environmental Scientific Association, Cleveland, 76-85p. 1996.

- PIRES, M.; TEIXEIRA, E.C. Geochemical distribution of trace elements in the Leao Coal, Brazil. *Fuel*, 71, p.1093-1096, 1992.
- PIRES, M.; QUEROL, X.; TEIXEIRA, E.C. Caracterização do carvão de Candiota e de suas cinzas. *Geochimica Brasiliensis*, 15, p.113-130, 2001.
- QUEROL, X. et. al., Trace elements in coal and their behaviour during combustion in a large power station, *Fuel*, 74(3), 331-343. 1995.
- SANTANA, E.R.R. Caracterização e valorização de cinzas sulfatadas de carvão, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil. 2002.
- SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric Chemistry and Physics - From air pollution to climate change; United States of America, p. 1326. 1998.
- SWAINE, D. J.; GOODARZI, F. Environmental aspects of trace elements in coal, Kluwer Academic Publishers, 312p., 1995.
- SWAINE, D.J.; GODBEER, W.C.; MORGAN, N.C. The deposition of trace elements from the atmosphere. In: Trace elements in New Zealand: Environmental, human and animal. Proceeding of the New Zealand Trace Elements Group Conference, Caterbury, New Zealand, p.1-10. 1988.
- TEIXEIRA, E. C.; SAMANA J. C.; BRUN, A. Study of concentration of trace elements in fly ash resulting from coal combustion. *Environmental Technology*, 13, p. 995-1000, 1992.
- TISSOT, B. Quel avenir pour les combustibles fossiles ? Les avancées scientifiques et technologiques permettront-elles la poursuite d'un développement soutenable avec les énergies carbonées ?; What a future for fossil fuels? Will scientific and technological progresses warrant growth of use in carbon-based fuels? In: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, v. 333, n.12, p. 787-796, 2001.
- TUMATI, P.R.; De VITTO, M.S. Trace element emissions from coal combustion - a comparison of a bag- house and ESP collection efficiency . In: *Proceedings: effects of coal quality on power plants -Third intern. Conf. San Diego , CA USA 27 1993.* MEHTA A.K.;
- HARDINS, N.S. (eds), pp 3-35-3-48. WELLBURN, A. 1988. Air pollution and acid rain: the biological impact. New York, 274p.1993.
- WELLBURN, A. Air pollution and acid rain: the biological impact. New York, 274p., 1988.

YOKOYAMA, T; ASAKURA, K. SEKI, T. Field study of trace elements behaviour in coal-fired plants. Komae Research Laboratory report no Et 91002, Koame, CRIEPI. 53p.1991.

ZUNCKEL, M.; SAIZAR, C.; ZARAUZ, J. Rainwater composition in Northeast Uruguay. Atmospheric Environment, 37, p.1601-1611. 2003.



# **Recuperação de áreas mineradas com espécies fontes de produtos florestais não-madeiráveis: oportunidades socioeconômicas e ambientais para a região carbonífera, sul de Santa Catarina, Brasil**

Vanilde Citadini-Zanette; Raquel Rejane B. Negrelle; Tim Brigham; Tom Hobby; Darcy Mitchell

A restauração ecológica corresponde à reconstrução de um ecossistema natural ou seminatural em terras modificadas ou degradadas (Miller et al., 1995). O objetivo da restauração de ecossistemas é recuperar a composição de espécies, a estrutura e a função do ecossistema original anterior ao distúrbio (Bradshaw, 1990; MacMahon, 1997). No processo de restauração, a sucessão natural é um fator chave, acompanhada de uma estrutura ecossistêmica (composição e complexidade de espécies) e de função melhoradas. Logo, uma estratégia no trabalho de restauração consiste em acelerar e direcionar a sucessão natural.

Em geral, nenhum distúrbio destrói completamente uma área, propágulos remanescentes de plantas ou animais bem como alguma matéria orgânica proveniente do ecossistema prévio permanecem, assim como as propriedades abióticas da área. Estes remanescentes são, em essência, as matérias-primas disponíveis para a reconstrução de um ecossistema (MacMahon, 1997).

Contudo, os fatores naturais, por si só, raramente são suficientes para permitir o rápido desenvolvimento do ecossistema e deveriam ser potencializados pelo aporte humano. Para fornecer efetivamente este aporte, é necessário entender os fatores que limitam a sucessão a cada estágio e remediá-los (Bradshaw, 1990).

A completa restauração a um estado original pré-distúrbio é difícil ou mesmo impossível para algumas áreas degradadas. Informações ecológicas detalhadas sobre o ecossistema original podem não estar disponíveis, as técnicas para a recolonização de ecossistemas danificados com as espécies apropriadas podem não ser adequadas e, frequentemente, as fontes de organismos são insuficientes ou as

condições naturais corretas para a recolonização (Cairns, 1988). Neste caso, a meta é a recuperação (ou reabilitação), ou seja a transformação da terra degradada em alternativa de uso aceitável aos atores envolvidos (Bradshaw, 1990; Meffe e Carroll, 1994; Powter, 2002).

O principal objetivo da recuperação não é recriar o ecossistema original, mas sim restabelecer a produtividade do solo a um ponto no qual o ambiente se torne sustentável a longo prazo, com espécies dominantes aptas a regenerar e permanecer na área (Lugo, 1992; Brown e Lugo, 1994). A recuperação comumente consiste em selecionar um uso adequado à área degradada, estabelecendo uma topografia que permitirá ao uso selecionado a reposição de um perfil de solo adequado (profundidade e qualidade) e revegetação com espécies apropriadas ao uso desejado. Os exemplos incluem mudanças de uso agrícola ou florestal para um lago, ou de uso florestal para a pastagem aberta (Powter, 2004).

Embora os conceitos de restauração e recuperação devam incluir dimensões sociais e econômicas, a grande maioria dos planos de restauração/recuperação tem focalizado apenas os aspectos florestais e ecológicos (Engel e Parrota, 2003). A relação cultural entre as sociedades humanas e o ecossistema circundante, bem como as pressões econômicas sobre o uso da terra, desempenha um importante papel nos processos de restauração/recuperação bem sucedidos. Estes esforços tendem a ser ineficazes se o novo ambiente não for aceito, ou integrado à cultura local, ou se a comunidade local não perceber benefícios reais e diretos advindos da área recuperada a curto prazo. As comunidades locais podem também temer a perda do acesso à terra ou aos seus recursos devido ao projeto.

Para serem sustentáveis as atividades de restauração ou recuperação devem ser compatíveis com os padrões locais de uso dos recursos naturais, estilos de vida locais, conhecimento e habilidades locais, bem como responder às demandas econômicas locais (Lamb e Tomlinson, 1994; Walters, 1997). A sustentabilidade garante o atendimento à realização das necessidades e direitos humanos, enquanto mantém a integridade natural dos sistemas biofísicos que sustentam as atividades antropocêntricas por um longo prazo (Robinson et al., 1990).

A gestão ou gerenciamento de minas e a recuperação de áreas mineradas, como praticadas no sul do Brasil, falham em alcançar os princípios fundamentais de sustentabilidade: sustentabilidade ecológica, utilidade econômica e equidade social. As empresas mineradoras têm sido, conseqüentemente, compelidas a respeitar a lei e implementar programas de recuperação. Contudo, a maioria destes programas não vai ao encontro das exigências básicas da sustentabilidade, uma vez que são caracterizados pela falta de participação comunitária, uso massivo de algumas espécies exóticas (*Brachiaria* spp., *Eucalyptus* spp. e *Pinus elliottii* Engelm.) e dão pouca prioridade à redução das pressões socioeconômicas negativas geradas pela mineração de carvão.

Antagonicamente às deficiências dos programas de recuperação insustentáveis, uma estratégia empregando espécies que as pessoas utilizam tradicionalmente como fonte de produtos florestais não-madeiráveis (PFNMs) poderia fornecer uma alternativa mais sustentável para a recuperação de áreas de mineração de carvão com flora nativa (Hammett, 1999; Chamberlain et al., 2002). Os PFMNs são produtos de origem biológica derivados de florestas (excetuando-se a madeira) e de outras regiões arborizadas fora das florestas. Os exemplos de PFMNs incluem produtos usados como alimento e aditivos, fibras, resinas, gomas e produtos vegetais e animais com fins medicinais, cosméticos ou culturais. Embora a grande maioria dos PFMNs seja colhida de áreas silvestres, os sistemas agroflorestais, as plantações florestais e as áreas arborizadas fora das florestas são também fontes potenciais de PFMNs (Kuster e Belcher, 2004; Alexiades e Shanley, 2004).

Internacionalmente os PFMNs têm sido apresentados como complementos, ou alternativas ao corte de madeira ou à agricultura convencional. Em áreas tropicais e subtropicais, os PFMNs desempenham um papel significativo na subsistência rural e na mitigação da pobreza. Em áreas temperadas e boreais, mais atenção tem sido dada ao uso de PFMNs para repor parcialmente ou suplementar a renda (Mitchell, 2004). De interesse mundial é o potencial dos PFMNs de gerar renda rural enquanto conserva os recursos florestais.

Na maioria dos casos, os PFMNs são de interesse primário de comunidades ameaçadas ou economicamente marginalizadas, embora as indústrias baseadas na exploração de recursos florestais silvestres (como borracha ou fármacos) possam ser muito sofisticadas e lucrativas. Um dos aspectos mais importantes nos usos sustentáveis dos PFMNs é a determinação dos meios pelos quais os benefícios possam ser retidos, ou mais equitativamente distribuídos entre as comunidades rurais.

O uso potencial de PFMNs para a recuperação das áreas degradadas pela mineração traz consigo diversos temas relevantes ao desenvolvimento rural e à recuperação ambiental:

- Preferência pelo uso de espécies nativas para recuperação de ecossistemas alterados.
- Valorização dos recursos madeiráveis à luz de sua contribuição à subsistência da comunidade local e bem-estar econômico e cultural (não apenas seu valor absoluto no mercado).
- Envolvimento das comunidades locais no planejamento e gerenciamento dos recursos florestais, e técnicas de gerenciamento que suportem o uso sustentado a longo prazo.
- Responsabilidade das empresas extratoras em fornecer compensação às comunidades locais pelo dano econômico, social e ambiental.

## PFNMs e recuperação ambiental – perguntas mais frequentes

Algumas das questões e dúvidas associadas à implementação deste tipo de programa de recuperação utilizando espécies não-madeiráveis são apresentadas e respondidas na seqüência:

### **Existem espécies nativas com bom potencial para uso em recuperação de áreas mineradas?**

Diversos programas de pesquisa relacionados à recuperação ambiental de áreas de mineração de carvão foram conduzidos no sul do Brasil. Com base em pesquisas de florística e fitossociologia, Citadini-Zanette (1982, 1995); Citadini-Zanette e Boff (1992); Santos (2003); Santos et al. (2004); Martins et al. (2004); Klein (2006), entre outros, apontaram diversas espécies nativas que poderiam ser usadas em programas de recuperação nesta região, de acordo com seu *status* sucessional (de espécies pioneiras a espécies clímaxes). Infelizmente, pouco desse conhecimento tem sido aplicado em programas de recuperação na região carbonífera.

Através de decisão judicial, uma empresa mineradora de carvão foi compelida a criar e implementar o primeiro plano de recuperação ambiental com uso de espécies arbóreas nativas, em locais em que foram realizadas extrações a céu aberto no município de Siderópolis. Coube à UNESCO - Universidade do Extremo Sul Catarinense, contratada pela empresa para essa finalidade, a elaboração do projeto e o monitoramento após sua implementação, que tem se mostrado satisfatório.

Embora não haja exigência legal para o uso de espécies nativas, espera-se que esta prática seja implementada em um futuro próximo. Este procedimento irá acelerar a recuperação/restauração de processos ecológicos naturais que promovem o restabelecimento e a auto-regulação da biodiversidade local, evitando a fragmentação de habitats e favorecendo a colonização de áreas adjacentes (Merrian, 1991; Metzger, 1999). Portanto, o uso de espécies nativas ajudará a promover a conectividade paisagística entre fragmentos de florestas (Kageyama et al., 2003).

### **Quais espécies que, mais provavelmente, fornecerão subsistência ou benefícios comerciais, ou ambos, às comunidades locais?**

Os estudos anteriormente mencionados e diversos outros estudos florísticos e de etnobotânica conduzidos no sul do Brasil revelam um percentual muito alto de plantas nativas que têm sido regularmente utilizadas pela população local e possuem potencial significativo para atuar como importante renda adicional (e.g. Citadini-Zanette e Boff, 1992; Simões et al., 1998; Lima et al., 2000; Zoucas, 2002). A categoria ornamental está geralmente bem representada entre estas plantas utilizáveis, incluindo-se diversas bromélias epífitas (e.g. *Vriesea incurvata* Gaudich.; *Aechmea nudicaulis* (L.) Griseb.;

*Tillandsia* spp.; *Nidularium* spp.), orquídeas epífitas (*Oncidium* spp.; *Catleya* spp.; *Epidendrum* spp.), palmeiras (e.g. *Euterpe edulis* Mart.; *Geonoma* spp.; *Bactris setosa* Mart., *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman), bem como algumas samambaias (e.g. *Rumohra adiantiformis* (G.Forst.) Ching. e *Blechnum* sp.), arbustos (e.g. *Lantana camara* L., *Tibouchina ramboi* Brade) e árvores (e.g. *Senna multijuga* (Rich.) H. S. Irwin & Barneby, *Hyeronima alchorneoides* Fr. Allem., *Luehea divaricata* Mart., *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart., *Cedrela fissilis* Vell., *Tibouchina sellowiana* Cogn.). Entre essas, *L. camara*, *S. multijuga*, *L. divaricata*, *H. alchorneoides*, *T. sellowiana*, *T. ramboi* e *S. romanzoffiana* são consideradas, dentro dos grupos funcionais, como espécies secundárias iniciais com potencial para áreas abertas. As outras espécies são de estágios sucessionais mais tardios, apropriadas para áreas com coberturas fechadas ou parcialmente fechadas.

A principal característica da indústria brasileira de floricultura é ser de pequena escala, tipicamente focada na produção ao ar livre. O mercado mundial de produção de plantas ornamentais gera aproximadamente US\$ 90 bilhões/ano e está em crescimento devido, em parte, à demanda por novos produtos (SEBRAE, 2006). O mercado ornamental brasileiro reflete esta tendência ascendente. Algumas organizações e associações brasileiras estão aptas a fornecer orientação técnica em relação ao uso de espécies ornamentais em programas de recuperação. Estas organizações incluem o SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas; IBRAFLO – Instituto Brasileiro de Floricultura (<http://www.ibraflor.com.br/ibraflor>), SBFPO – Sociedade Brasileira de Floricultura e Plantas Ornamentais (<http://www.uesb.br/flower/sbfpo.html>); o Mercافلور - Associação de Santa Catarina (<http://www.mercaflor.com.br/>) e EPAGRI-SC – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural vinculada à Secretaria de Agricultura e de Desenvolvimento Rural do Estado de Santa Catarina (<http://www.epagri.rct.sc.br/epagri>).

Muitas espécies nativas possuem bom potencial como alimento para abelhas (e.g. *Clethra scabra* Pers., *Mimosa bimucronata* (DC.) Kuntze, *M. scabrella* Benth., *Luehea divaricata* Mart., *Baccharis dracunculifolia* DC.). A produção de mel é uma atividade típica de pequenos produtores, com significativo potencial para melhoria de renda. A região sul de Santa Catarina é conhecida como a segunda maior exportadora de mel do Brasil, com uma produção de 4.183,15 toneladas (avaliadas em 8,5 milhões de dólares) em 2004 (Perez et al., 2005). De acordo com Carte (2005), estudos no norte do Brasil indicam um crescimento considerável no setor da apicultura. Pequenos agricultores que antes produziam feijão, milho, algodão e outras culturas dependentes da chuva, começaram a investir na apicultura como uma forma alternativa de produção. A renda gerada pela apicultura é maior e mais consistente do que outras práticas de produção devido à expansão da demanda por produtos orgânicos e os bons preços oferecidos pelos produtos apícolas. Uma vantagem adicional da apicultura é a menor dependência da chuva em relação a outras culturas.

Outras espécies potenciais para recuperação são as que são fontes de matéria-prima para artesanato regional altamente comercializável<sup>1</sup> (e.g. *Euterpe edulis* (folhas), *Syagrus romanzoffiana* (inflorescência), *Bactris setosa* (fibras), *Geonoma gamiova* Barb. Rodr. (folhas), *Cortaderia selloana* (Schult. & Schult) Asch. & Graebn. (folhas) e *Cucurbita* sp. (fruto).

De acordo com o SEBRAE (2005), a produção de artesanato possui potencial significativo para geração de emprego e renda em todos os estados brasileiros, atuando como um eixo central para o desenvolvimento da comunidade. A missão do Programa de Artesanato do SEBRAE é contribuir para o desenvolvimento sustentável do setor de artesanato como uma estratégia para a promoção de objetivos culturais, econômicos e sociais. O SEBRAE ajuda a capacitar através da oferta de programas de treinamento e suporte organizacional e comercial às comunidades (ver [www.artesanatobrasil.com.br](http://www.artesanatobrasil.com.br)).

Muitas outras espécies possuem potencial como fonte adicional de renda em programas de recuperação. A esponja vegetal (*Luffa cylindrica* M. Roem.) é uma planta trepadeira, cuja parte usada (fruto) tem aproximadamente de trinta a sessenta centímetros de comprimento, cilíndrica e com casca macia. Seu interior apresenta uma estrutura fibrosa que pode ser seca e utilizada como uma esponja para limpeza, porém, também possui aplicações industriais (filtros d'água) (Stephens, 2005; Tropilab, 2005).

Outro exemplo é a mamona (*Ricinus communis* L.), natural da África tropical, que se adaptou em regiões úmidas tropicais e subtropicais ao redor do planeta, e que pode ser encontrada crescendo naturalmente em áreas de mineração de carvão. Embora suas sementes sejam extremamente venenosas, são fontes de numerosos produtos economicamente importantes. A mamona possui diversos usos, particularmente o óleo espesso obtido a partir das sementes. Existem inúmeras aplicações industriais para o óleo da mamona e seus derivados incluindo produção de náilon, óleos automotivos (biodiesel) e aromatizantes (aditivos) alimentares; novos usos são continuamente descobertos, incluindo a substituição de vários produtos derivados do petróleo (ver Ereno, 2005; UNDP, 2005). A mamona também apresenta bom potencial para a fitorremediação de solos contaminados por metais pesados, dada sua habilidade em acumular altas concentrações de arsênico, cromo e cobre. A mamona se adequa bem à produção agrícola de pequena escala porque se adapta a qualquer região do país e não requer inseticidas ou tecnologia especializada para sua exploração.

---

<sup>1</sup> Como definido pelo Conselho Mundial de Artesanato, a produção de artesanato é uma atividade que resulta em objetos e/ou artesanatos acabados, que são feitos à mão ou produzidos através de métodos tradicionais que demonstram habilidades, destreza, qualidade e criatividade.

*Typha latifolia* L. (taboa) é usada no Canadá para fitorremediação (absorver metais pesados em ambientes aquáticos) e, no Brasil, estudos experimentais estão examinando a absorção de cobre e alumínio em outras espécies de *Typha* (Verdade et al., 2000). *Typha domingensis* Pers. cresce em lagos impactados pela drenagem ácida superficial na região carbonífera brasileira e é objeto de pesquisas em andamento. As espécies de *Typha* estão recebendo atenção crescente, especialmente, quanto a sua utilização como despoluente. Adicionalmente, as folhas secas podem ser usadas na confecção de móveis e esteiras, e a polpa e as fibras usadas para obter papel e cordoaria. Algumas partes desta planta são também comestíveis. Os filamentos das sementes podem ser usados para enchimento de acolchoados, forramento e isolamento térmico (<http://www.ecy.wa.gov/programas/wg/plants/nativa/catattail.html>). No município de Praia Grande, sul de Santa Catarina, são fabricados artesanalmente chinelos com as folhas secas de taboa, constituindo fonte de renda para um grupo da comunidade local (Téc. em Turismo Dilton Pacheco, informação pessoal).

No estado do Rio Grande do Sul, áreas degradadas pela mineração de carvão têm sido recuperadas com acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Willd.), espécie australiana da qual se extrai o tanino para curtição de couro. Estas áreas são também replantadas com gramíneas, adequadas para fornecer forragem ao gado bovino (Grigorieff, 2004).

**Uma área recuperada com espécies fontes de PFNMs pode ser manejada para ser socioeconômica e ecologicamente sustentável a longo prazo? Ou seja, esta área deve imitar uma floresta natural e continuar a produzir valores socioeconômicos suficientes para justificar a manutenção da vegetação nativa?**

Os resultados de experimento conduzido em áreas de mineração a céu aberto abandonadas no município de Siderópolis, chamado Projeto M – Recuperação piloto de áreas mineradas a céu aberto (Santa Catarina, 1982), demonstrou que é viável manter vegetação nativa nestas áreas. Após a aplicação de técnicas apropriadas para melhorar as condições do solo, foi possível cultivar espécies nativas, promover a sucessão secundária e estabelecer o potencial econômico para o manejo sustentável (Citadini-Zanette, 2000; Remor, 2004). Infelizmente, o alto custo e as dificuldades para obtenção de mudas e de sementes de espécies nativas, fazem com que a maioria das empresas continuem com os procedimentos de plantio com eucalipto e cobertura rasteira com gramíneas exóticas.

### **Quais fatores limitam a variabilidade de espécies que podem ser utilizadas como PFNMs para recuperação?**

A contaminação do solo e a acidificação da água são graves fatores que limitam o crescimento de diversas espécies. Além disso, o enxofre, os metais pesados e os compostos orgânicos tóxicos encontrados no solo de algumas áreas de mineração podem ser absorvidos pelas plantas e potencialmente disseminados pela cadeia alimentar. Existem poucos estudos relacionados a esta questão no sul do Brasil (Zocche, 1989, 2005; Zanardi Jr., 1991, Prochnow e Porto, 2000; Santos, 2000); portanto, até que informações mais precisas estejam disponíveis, o uso de PFNMs como alimentos, fármacos ou forragem deve ser evitado em programas de recuperação de áreas de mineração de carvão.

Devido a sua condição de intensa degradação, a recuperação do solo se constituirá num processo a longo prazo, e somente espécies pioneiras irão, provavelmente, se adaptar ao uso nas fases iniciais da recuperação (ver Citadini-Zanette e Boff, 1992). O solo (substrato) nestas áreas é geralmente friável com baixas quantidades de matéria orgânica e argila, resultando em baixa fertilidade. Qualquer água de irrigação a ser usada nesta área também deve ser testada para assegurar que não levará contaminação adicional.

Os fatores limitantes descritos resultam na redução das taxas de fotossíntese e de respiração, bem como na redução de matéria vegetal seca. A compactação do solo é uma característica comum nestas áreas, obstruindo o crescimento vegetal e aumentando as taxas de mortalidade de sementes, especialmente durante as fases iniciais da recuperação (Remor, 2004). Nos locais em que o solo estiver compactado e/ou a inclinação do terreno for inadequada, a água pode se acumular e a vegetação morrer por anoxia.

### **Quais habilidades, conhecimentos, recursos financeiros e outras necessidades deveriam ser atendidas para possibilitar que as comunidades mineiras pudessem participar efetivamente no manejo, colheita, processamento e comercialização dos recursos de áreas recuperadas?**

Embora muitos problemas técnicos ainda precisem ser resolvidos, existem fortes evidências de que a incorporação da dimensão socioeconômica nos programas de recuperação represente uma excelente oportunidade para aplicar os resultados da pesquisa acadêmica ao desenvolvimento sustentável da comunidade (Walters, 1997; Engel e Parrota, 2003). Todavia, como mencionado previamente, este processo deveria ser compatível com os interesses locais e com o conhecimento relacionado ao uso de recursos naturais. A mobilização de organizações e grupos sociais – com o suporte das políticas públicas de restauração/recuperação – é fundamental ao sucesso dessas atividades (Lamb e Tomlinson, 1994; Walters, 1997).



A participação da comunidade no planejamento inicial e na implantação de programas de recuperação é a melhor maneira de minimizar os conflitos e os impactos freqüentemente associados às atividades mineiras. A disponibilidade de informação adequada, capacitação e suporte financeiro são fundamentais ao processo de recuperação. Projetos com foco na conscientização da comunidade e em seu treinamento poderiam ser subvencionados pela FATMA – Fundação do Meio Ambiente (agência ambiental do estado de Santa Catarina) utilizando recursos de multas recebidas por crimes ambientais.

Outras ações importantes (e respectivas instituições relacionadas) que poderiam subsidiar a participação de comunidades mineiras no manejo de recursos de áreas recuperadas incluem:

- Programas de pesquisa com espécies-chave, para preencher lacunas no conhecimento agrícola e ecológico (UNESC e outras universidades).
- Estabelecimento de bancos de sementes e viveiros comunitários na região, com o objetivo de sustentar atividades agrícolas (Secretaria de Estado de Agricultura – EPAGRI, CIDASC).
- Estudos de viabilidade econômica e oportunidades mercadológicas para os potenciais produtos (Secretaria de Estado, Universidades, SEBRAE).
- Capacitação em relação à colheita, processamento e comércio (EPAGRI).
- Suporte para organização e comercialização comunitárias (EPAGRI).
- Capacitação de técnicos para o licenciamento (FATMA/ empresas mineradoras/acordos municipais).

### **Quais as exigências políticas e legislativas existentes e que formas de posse da terra e de acesso seriam necessários à criação de incentivos apropriados para recuperação com PFNMs?**

A legislação ambiental brasileira exige que as empresas mineradoras recuperem áreas degradadas, restabelecendo um ambiente ecologicamente equilibrado (Machado, 2005). Esta lei deve ser respeitada em sua essência, se se pretende que todas as comunidades sejam efetivamente beneficiadas.

No que concerne ao acesso ao recurso e à terra, o estabelecimento de um contrato de comodato que permita o livre uso da terra pela comunidade, por pelo menos dez anos, parece ser a melhor opção para acesso seguro da comunidade. O suporte financeiro para estabelecer diferentes tipos de projetos, incluindo atividades de lazer, manejo de áreas com PFNMs e outros, deve ser providenciado pelas empresas mineradoras como uma compensação pela exploração do recurso e a conseqüente degradação ambiental.

Os autores reconhecem que uma alternativa mais efetiva seria instituir uma estrutura de taxas, tal como de emissões, que proveriam um incentivo econômico para as empresas reduzirem o dano ambiental, e criariam fundos para uma futura recuperação. Esta taxa somente pode ser estabelecida pelo governo federal.

## Considerações finais e conclusões

A mineração de carvão no Brasil gerou, e continua a gerar custos ambientais, sociais e econômicos significativos, muitos dos quais de especial impacto sobre as comunidades pobres. Este capítulo apresenta uma proposta que oferece benefícios econômicos e ambientais para a recuperação de áreas degradadas. Muitas espécies nativas são adequadas para o uso em projetos de recuperação e muitas destas espécies possuem valor comercial e de subsistência. Resultados de pesquisa têm demonstrado que é tecnicamente possível recuperar áreas degradadas com espécies nativas e promover sucessão secundária. A legislação brasileira especifica as exigências básicas para a recuperação e para a compensação das comunidades locais pelas perdas ambientais, sociais e econômicas. Existem, todavia, inúmeros desafios a serem superados com o objetivo de alcançar o potencial oferecido pelo uso comercial de espécies nativas na recuperação de áreas mineradas. Estes desafios incluem:

- Pouca experiência prática no uso de plantas nativas em estratégias de recuperação.
- Disponibilidade limitada ou alto custo de obtenção e uso de espécies nativas em relação às árvores e gramíneas exóticas comumente usadas.
- Contaminação do solo e da água, compactação do solo e outros fatores comuns a áreas severamente degradadas limitam o número de espécies que podem ser usadas e os possíveis usos destas espécies, por exemplo, como alimento, fitomedicamento ou forragem.
- Os acordos de posse e acesso à terra devem incluir em seu bojo investimentos na recuperação de áreas degradadas e investimentos pelas comunidades no gerenciamento de áreas recuperadas buscando benefícios econômicos, sociais e ambientais.
- O conhecimento limitado de direitos e oportunidades pelas comunidades locais e a capacidade primária de gerenciar os tipos de projetos sugeridos neste capítulo.
- Ausência de leis específicas ou orientação legal para o uso de espécies nativas com potencial comercial em estratégias de recuperação.

Existem muitos benefícios a serem obtidos a partir da recuperação de áreas degradadas com espécies nativas e seus PFNMs. Com relação aos benefícios de emprego e renda potenciais, deve-se reconhecer que PFNMs não se configuram na solução definitiva da pobreza rural ou em garantia de uso florestal sustentável. Como Belcher et al. (2003) observam, os PFNMs podem ser úteis nos esforços para reduzir a pobreza. Entretanto,

isto deverá ocorrer também através de maior e/ou mais eficiente produção comercial e melhores técnicas de negociação. Intervenções para este fim deveriam considerar que:

- A produção comercial de PFNMs está comumente integrada com outras atividades econômicas.
- Existem alguns paradoxos próprios nos quais as condições que favorecem a comercialização efetiva não são encontradas em muitas áreas pobres. Portanto, o processo de comercialização pode apresentar um viés antipobreza.
- Outra importante restrição existe fora do setor de PFNMs. Os pobres são pobres porque não têm acesso aos mercados, possuem capital humano insuficiente, capital produtivo insuficiente, instituições fracas e geralmente um fraco poder de barganha. Alguns PFNMs podem oferecer o potencial para a criação de emprego e renda, porém alcançar este potencial irá exigir investimentos em outras áreas.
- Os investimentos em PFNMs podem ser um bom ponto de partida para melhorar a capacitação e conseguir melhor acesso aos recursos. Porém, se restrições externas forem encontradas, as pessoas podem preferir outras atividades em substituição a utilização de PFNMs. Como Arnold et al. (1994) relataram, os recursos podem ser mais produtivamente enfocados no auxílio às pessoas para que encontrem atividades alternativas, do que para continuar a focar os PFNMs.

Se os PFNMs forem empregados como sugeridos, os benefícios ambientais e sociais, no que concerne a uma porção maior da sociedade, devem ser providos por investimentos externos. Não se pode presumir que os benefícios às comunidades urbanas ou rurais compensarão completamente os custos de recuperação e gerenciamento.

## Referências

- ALEXIADES, M. N.; SHANLEY, P. (Eds.) **Productos forestales, medios de subsistencia y conservación: estudios de caso sobre sistemas de manejo de productos forestales no maderables**. Bogor Barat: CIFOR, 2004. vol.3 America Latina.
- ARNOLD, J.E.M.; LIEDHOLM, C; MEAD, D.; TOWNSON, I.M. **Structure and growth of small enterprises in the forest sector in southern and eastern Africa**. OFI Occasional Papers (47), Oxford, Oxford Forestry Institute, and Growth Equity through Microenterprise Investments and Institutions (Gemini) Project Gemini Working Paper (48), Bethesda, Gemini, 1994.
- BELCHER, B.; RUIZ-PÉREZ, M.; ACHDIAWAN, R. Global patterns and trends in NTFP development. In: **International Conference on Rural Livelihoods, Forests and Biodiversity**, 19-23 May 2003, Bonn, Germany. CIFOR, Bogor, Indonesia. Disponível em: [[http:// cifor.cgiar.org/publications/corporated/cd-roms/bonn\\_results/index.html](http://cifor.cgiar.org/publications/corporated/cd-roms/bonn_results/index.html)].

- BRADSHAW, A. D. The reclamation of derelict land and the ecology of ecosystems. In: JORDAN, W.R., GILPIN, E., ABER, J.D. (Eds.), **Restoration Ecology: A synthetic Approach to Ecological Research**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. p.53-74.
- BROWN, S.; LUGO, A.E. Rehabilitation of tropical lands: a key to sustaining development. **Restoration Ecology**, Murdoch, v.2, n.2, p.97-111, 1994.
- CAIRNS, J.J. Increasing diversity by restoring damaged ecosystems. In: WILSON, E.O.; PETER F.M. (Eds.). **Biodiversity**. Washington: National Academy Press, 1988. p.333-343.
- CARTE, R. Apicultura fortalecida. **Jornal de Fato**. Disponível em: [<http://proasne.net/JornaldeFato11.htm>].- Acesso em: 12 mai.2005.
- CHAMBERLAIN, J.L.; BUSH, R.J.; HAMMETT, A.L.; ARAMAN, P.A. Eastern national forests: managing for non timber products. **Journal of Forestry**, v.100, n.1, p.8-14, 2002.
- CITADINI-ZANETTE, V. **Florística, fitossociologia e aspectos da dinâmica de um remanescente de mata atlântica na microbacia do rio Novo, Orleans, SC**. 1995. 249f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.
- \_\_\_\_\_. **Levantamento florístico da área de recuperação da mineração a céu aberto em Siderópolis, Santa Catarina, Brasil**. Florianópolis, FATMA/IOESC, 1982. 22p.
- \_\_\_\_\_. Recuperação de áreas degradadas na região carbonífera de Santa Catarina: aspectos sucessionais e interações interespecíficas. In: **Simpósio Nacional Recuperação de Áreas Degradadas**, 4., 2000, Blumenau. SOBRADE: CD-ROM.
- CITADINI-ZANETTE, V.; BOFF, V. P. **Levantamento florístico em áreas mineradas a céu aberto na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil**. Florianópolis: SDM/ FEPEMA, 1992. 160p.
- ENGEL, V.L.; PARROTA, J.A. **Definindo a restauração ecológica: tendências e perspectivas mundiais**. In: KAGEYAMA, P.Y. et al. (Orgs.), **Restauração Ecológica de Ecossistemas Naturais**. Botucatu: FEPAF, 2003, p.01-26.
- ERENO, D. **Protheses from the castor bean**. Disponível em: [<http://revistapesquisa.fapesp.br>]. – Acesso em 26/05/2005.

- GRIGORIEFF, A. A experiência da Copelmi na recuperação de áreas mineradas. In: **Seminário Regional de Recuperação Ambiental de áreas impactadas pela mineração de carvão**, 2004, Criciúma, Santa Catarina. SIECESC: 56 slides.
- HAMMETT, T. Special Forest Products: Identifying Opportunities for Sustainable Forest-based Development. **Virginia Forest Landowner Update Blacksburg**, v.13, n.1, p.1-2. 1999.
- KAGEYAMA, P.Y.; GANDARA, F.B.; OLIVEIRA, R.E. Biodiversidade e restauração da floresta tropical. In: KAGEYAMA, P.Y. et al. (Orgs.), **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: FEPAF, 2003, p.27-48.
- KLEIN, A.S. **Áreas degradadas pela mineração de carvão: vegetação versus substrato**. 2006. 87f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2006.
- KUSTER, K.; BELCHER, B. **Forest products, livelihoods and conservation: case studies of non timber forest product systems**. Bogor Barata: CIFOR, 2004, vol.1. Asia.
- LAMB, D.; TOMLINSON, M. Forest rehabilitation in the Asia-Pacific region: past lessons and present uncertainties. **Journal of Tropical Forest Science**, Kepong, v.7, n.1, p.157-170, 1994.
- LIMA, R.X.; SILVA, S.M.; KUNIYOSHI, Y.S.; SILVA, L.B. Etnobiologia de comunidades continentais da área de proteção ambiental de Guaraqueçaba-Paraná- Brasil. **Etnoecologica**, Mexico, v. 4, n.6, p.33-55, 2000.
- LUGO, A. E. Tree plantations for rehabilitating damaged forest lands in the tropics. In: WALI, M.K. (Ed.), **Ecosystem rehabilitation: ecosystem analysis and synthesis**. The Hague: SPB Academic Publishing, 1992, p. 247-255.
- MACHADO, P.A.L. **Direito Ambiental Brasileiro**. 13. ed. São Paulo: Malheiros, 2005. Cap.VIII, p. 675-678.
- MACMAHON, J.A. Ecological Restoration. In: MEFFE, G.K.; CARROLL, C.R. (Eds.). **Principles of Conservation Biology**. 2nd ed. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc. Publishers, 1997. p. 479-511.
- MARTINS, R.; CITADINI-ZANETTE, V.; SANTOS, R.; KLEIN, A. S.; REMOR, R. Subsídios para recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão: composição florística, aspectos sucessionais e interação fauna-flora. In: **Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, 10, 2004, Florianópolis, Brasil. ENTMME: p.673-680.

- MEFFE, G.K.; CARROLL, C.R. Ecological restoration. In: MEFFE, G.K.; CARROLL, C.R. (Eds), **Principles of Conservation Biology**. New York, Sunderland: Sinauer Associates Inc, 1994. p. 409-438.
- METZGER, J.P. Estrutura da paisagem e fragmentação: análise bibliográfica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v.71, p.445-463, 1999.
- MERRIAN, G. Corridors and connectivity: animal populations in heterogeneous environments. In: SAUNDERS, D.A.; HOBBS, R.J. (Eds.), **Nature conservation 2: the role of corridors**. Chipping Norton: Surrey Beatty & Sons, 1991. p.133-142.
- MILLER, K.; ALLEGRETTI, M.H.; JOHNSON, N; JONSSON, B. Measures for Conservation of Biodiversity and Sustainable Use of its Components. In: HEYWOOD, V.H.; WATSON, R.T. (Eds.). **Global Biodiversity Assessment**. Cambridge: The United Nations Environment Programme and Cambridge University Press, 1995. p. 915-1061.
- MITCHELL, D. **Many Voices, Many Values: Community Economic Diversification through Non timber Forest Products in Coastal British Columbia, Canada**. USDA Forest Service Pacific Northwest Research Station. General Technical Report PNW-GTR-604, 2004.
- PEREZ, L.H.; RESENDE, J.V.; FREITAS, B.B. **Mel**: exportações fazem produção aumentar de norte a sul. Disponível em: < [www.iea.sp.br](http://www.iea.sp.br) > - Acesso em: 18 mai. 2005.
- POWTER, C. B. **Glossary of reclamation and remediation terms used in Alberta**. 7th ed. Alberta Environment, Science and Standards Branch, Edmonton, Alberta. Pub.n. T/665. p.1- 88, 2002.
- \_\_\_\_\_. Reclamation, rehabilitation or restoration: a rose by any other name. **Canadian Reclamation**, Calgary, p.21- 23, 2004.
- PROCHNOW, T.R.; PORTO, M.L. **Avaliação de uma área de rejeitos da mineração de carvão com vistas a bioindicadores vegetais para metais pesados**. In: CENTRO DE ECOLOGIA/UFRGS (Ed), **Carvão e Meio Ambiente**, Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2000. p. 673-694.
- REMOR, R. **Regeneração natural em blocos experimentais de *Mimosa scabrella* Benth. - Bracatinga: subsídios para recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto no sul do estado de Santa Catarina, Brasil**. 2004. 109f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2004.

- ROBINSON, J.; FRANCIS, G, LEGGE, R., LERNER, S. Defining a sustainable society: values, principles and definitions. **Alternatives**, local, v.17, n.2, p.36-46, 1990.
- SANTA CATARINA. Fundação do Meio Ambiente. Engenheiros Consultores e Projetistas S.A. **Programa de Conservação e Recuperação Ambiental da Região Sul de Santa Catarina**: Recuperação piloto de áreas mineradas a céu aberto. Siderópolis, SC, p. 1-248. 1982 (Relatório).
- SANTOS, M. *Paspalum notatum* Flüge var. *notatum* (Poaceae) em ambientes com e sem rejeitos de mineração de carvão: morfo-anatomia e bioacumulação de metais pesados. 2000. 115f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Botânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- SANTOS, R. **Reabilitação de ecossistemas degradados pela mineração de carvão a céu aberto em Santa Catarina, Brasil**. 2003. 115f. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- SANTOS, R.; CITADINI-ZANETTE, V.; LEAL FILHO, L. S.; KLEIN, A. S.; MARTINS, R. Composição florística e estrutura fitossociológica de um fragmento de floresta ombrófila densa, como subsídios para reabilitação de ecossistemas degradados, região Carbonífera Catarinense, Brasil. In: **Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, 10, 2004, Florianópolis. ENTMME:p. 663-671.
- SEBRAE. Serviço de Apoio às Micros e Pequenas Empresas. **SEBRAE Handicraft Program**. Disponível em : <http://www.artesanatobrasil.com.br/frameset0.htm> - Acesso em: 15 jul.2005,
- SEBRAE. Serviço de Apoio às Micros e Pequenas Empresas. **Olho no mundo, pés no Brasil**. Disponível em < [www.sebrae.com.br/br/revista\\_agro/comercio.asp](http://www.sebrae.com.br/br/revista_agro/comercio.asp). > - Acesso em: 20 mai.2006.
- SIMÕES, C.M.O.; MENTZ, A. A.; SCHENKEL, E.P.; IRGANG, B.E.; STEHMANN, J.R. **Plantas da Medicina Popular no Rio Grande do Sul**. 5 ed. Porto Alegre: UFRGS, 1998. 593p.
- STEPHENS, J. M. **Gourd, Luffa - *Luffa cylindrica* (L.) Roem., *Luffa aegyptica* Mill., and *Luffa acutangula* (L.) Roxb**, Disponível em: <http://edis.ifas.ufl.edu/MV071> - Acesso em: 26 mai. 2005.
- TROPILAB. *Luffa cylindrica* L. - smooth luffa,. Disponível em: [<http://www.tropilab.com/luf-cyl.html>] - Acesso em 26 mai.2005.

UNDP. *Mamona the green petroleum*. Disponível em: [www.undp.org/seed/eap/montreal/docs/Brazil\\_Mamona\\_Prsnttn.pdf](http://www.undp.org/seed/eap/montreal/docs/Brazil_Mamona_Prsnttn.pdf) - Acesso em: 26 mai. 2005.

VERDADE, M.A.L.; RODRIGUEZ, M.T.R.; OLIVEIRA, M.E. de. Conteúdo de alumínio e cobre na biomassa de *Typha latifolia* L., na região carbonífera de Charqueadas e São Jerônimo, RS. In: CENTRO DE ECOLOGIA/UFRGS. **Carvão e Meio Ambiente**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2000, p. 749-757.

WALTERS, B.B. Human ecological questions for tropical restoration: experience for planting native upland and mangroves in the Phillippines. **Forest Ecology and Management**, Wisconsin-Madison, v. 99, n.1/2, p.275-290, 1997.

ZANARDI JR., V. Avaliação do sistema de lagoas em área de mineração de carvão a céu aberto: metais pesados na água, plantas e substrato. **Boletim do Instituto de Biociências**, Porto Alegre, v.49, p.1-83, 1991.

ZOCICHE, J.J. **Comunidades Vegetais de Campo e sua relação com a concentração de metais pesados no solo em áreas de mineração de carvão a céu aberto, na Mina do Recreio- Butiá- RS**. 1989. 159f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

ZOCICHE, J.J. Metales pesados (Fe, Mn e Zn) en el suelo construido y en la vegetación de las antiguas bacias de decantación del lavador de Capivari, Capivari de Baixo, SC, Brasil. In: **Simpósio Nacional e Congresso Latino-americano de Recuperação de Áreas Degradadas**, 6, 2005, Curitiba, Paraná, Brasil. SOBRADE: p.117-124.

ZOUCAS, B.C. **Subsídios para restauração de áreas degradadas: banco de dados e análise das espécies vegetais de ocorrência no sul de Santa Catarina**. 2002. 132f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.



# Fitorremediação de solos e águas subterrâneas contaminados

Gustavo Henrique de Sousa Araujo

Nossa sociedade e civilização confiam amplamente na indústria mineira para gerar e manter o conforto. No Brasil, especialmente, como um dos principais fornecedores de matérias-primas, a indústria mineira tem que se expandir continuamente para alcançar as demandas do crescimento econômico. Entretanto, a mineração transforma terras agrícolas férteis em degradadas, à medida que suas atividades geram uma vasta quantidade de resíduos sólidos que são depositados na superfície e ocupam uma área enorme de terras (Li, 2006).

Fitorremediação é a utilização de plantas para remediar parcial ou substancialmente determinados contaminantes em solos, lodos, sedimentos, águas subterrâneas, águas superficiais e efluentes contaminados. Ela utiliza diversos processos biológicos vegetais e as características físicas de plantas para ajudar na remediação da área contaminada. A fitorremediação também vem sendo chamada de remediação verde, remediação botânica, agroremediação e remediação vegetativa. A fitorremediação é um “continuum” de processos, ocorrendo em graus diferentes para distintas condições, meios, contaminantes e plantas. Uma variedade de termos tem sido utilizada na literatura para se referir a esses vários processos. Essa discussão define e usa um número de termos como um meio conveniente de introduzir e conceitualizar os processos que ocorrem durante a fitorremediação. Entretanto, deve-se levar em consideração que os vários processos descritos por todos esses termos tendem a se sobrepôr em algum grau e a ocorrer, em proporções variadas, durante

a fitorremediação. A fitorremediação engloba vários métodos diferentes que podem levar à degradação, remoção (através da acumulação ou dissipação), ou imobilização dos contaminantes.

## Processos de fitorremediação

### Fitoextração

A fitoextração é a absorção do contaminante pelas raízes com a subsequente acumulação deste na parte aérea de uma planta, geralmente seguida da colheita e a disposição final da biomassa vegetal. É um processo de remoção do contaminante que se aplica a metais (por ex., Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn), metalóides (por ex., As, Se), radionuclídeos (por ex.,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) e não metais (por ex., B) (Salt *et al.*, 1995; Kumar *et al.*, 1995; Cornish *et al.*, 1995; Bañuelos *et al.*, 1999), já que eles geralmente não são mais degradados ou modificados em suas formas dentro da planta. A fitoextração geralmente não é considerada para contaminantes orgânicos ou nutrientes absorvidos por uma planta, já que eles podem ser metabolizados, modificados ou volatilizados, portanto, evitando a acumulação do contaminante. Entretanto, alguns estudos mostraram a acumulação de contaminantes orgânicos não alterados dentro da parte aérea de uma planta.

O meio alvo geralmente é o solo, embora contaminantes em sedimentos e lodos também possam ser submetidos à fitoextração. Os metais solúveis na água superficial ou na água subterrânea extraída poderiam ser remediados de forma concebível usando a fitoextração, talvez em conjunto com a rizofiltração.

A fitoextração também é conhecida como fitoacumulação, fitoabsorção e fitosequestro (que também podem ser aplicados à acumulação de contaminantes dentro das raízes).

### Fitoestabilização

A fitoestabilização é a utilização da vegetação para conter os contaminantes do solo *in situ*, por meio da modificação das condições químicas, físicas e biológicas no solo. O transporte do contaminante no solo, sedimentos ou lodo pode ser reduzido através da absorção e acumulação pelas raízes; da adsorção nas raízes; da precipitação, complexação ou redução da valência do metal no solo dentro da zona radicular; ou se ligando à matéria orgânica através do processo de humificação. Além disso, a vegetação pode reduzir a erosão hídrica e eólica do solo, evitando assim a dispersão do contaminante no escoamento superficial ou em emissões fugitivas de poeira, e pode reduzir ou evitar a geração de lixiviados. A fitoestabilização também é conhecida como inativação *in situ* ou fitoimobilização.

As pesquisas em fitoestabilização realizadas até hoje geralmente focalizaram a contaminação por metais, sendo chumbo, cromo e mercúrio identificados como os principais potenciais candidatos à fitoestabilização (USEPA, 1997). Entretanto, deve haver um potencial para a fitoestabilização de contaminantes orgânicos, uma vez que alguns contaminantes orgânicos ou subprodutos metabólicos destes contaminantes podem ser ligados ou incorporados a componentes da planta, como a lignina (Harms e Langebartels, 1986). Esta forma de fitoestabilização foi chamada de fitolignificação (Cunningham *et al.*, 1995). Uma diferença, porém, é que a fitoestabilização de metais geralmente acontece no solo, enquanto a fitoestabilização de contaminantes orgânicos por fitolignificação pode acontecer acima do solo.

Os metais presentes na zona radicular podem ser estabilizados pela mudança de um estado de oxidação solúvel para insolúvel, através da precipitação mediada pela raiz. Por exemplo, as raízes podem mediar a precipitação de chumbo como fosfato de chumbo insolúvel (Salt *et al.*, 1995). A estabilização de metais também inclui o processo não biológico de sorção na superfície, devido à quelação, troca de íons e adsorção específica (Salt *et al.*, 1995).

## Rizofiltragem

A rizofiltragem (também conhecida como fitofiltragem) é a retirada, pelas raízes vegetais, de contaminantes em água superficial, efluentes ou águas subterrâneas, por adsorção ou precipitação pelas raízes, ou absorção nas raízes. O ambiente radicular ou os exudatos da raiz podem produzir condições biogeoquímicas que resultam na precipitação dos contaminantes nas raízes ou no corpo d'água. O contaminante pode permanecer na raiz, dentro da raiz, ou ser absorvido e translocado para outras partes da planta, dependendo do contaminante, da sua concentração e da espécie de planta.

A rizofiltragem e a fitoextração são semelhantes porque cada um dos processos resulta na acumulação do contaminante na ou sobre a planta. Entretanto, na rizofiltragem, esta acumulação pode ocorrer nas raízes ou na parte aérea, ao passo que, para uma fitoextração eficaz, a acumulação ocorre na parte aérea, não nas raízes. Além do mais, a rizofiltragem diferencia-se da fitoextração porque o contaminante está inicialmente na água, muito mais do que no solo. Assim, a rizofiltragem diferencia-se da fitoestabilização que ocorre no solo, na qual o contaminante permanece na zona radicular.

Geralmente a rizofiltragem é aplicada no tratamento de grandes volumes de água com concentrações baixas do contaminante (na escala de ppb). Ela vem sendo aplicada principalmente para metais - Pb, Cd, Cu, Fe, Ni, Mn, Zn, Cr (VI) - (Dushenkov *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 1996; Salt *et al.*, 1997) e radionuclídeos -  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$  - (Dushenkov *et al.*, 1997).

Tanto plantas aquáticas quanto terrestres podem ser usadas, desde que se dê um suporte para permitir o crescimento das plantas na água. As plantas terrestres oferecem a vantagem de uma maior biomassa e sistemas radiculares mais longos e com desenvolvimento mais rápido do que as plantas aquáticas (Dushenkov *et al.*, 1995). Recomenda-se o uso de mudas no lugar de plantas maduras, uma vez que as mudas podem absorver metais, mas não necessitam de luz ou nutrientes para a germinação e o crescimento, por até duas semanas (Salt *et al.*, 1997).

Para remediar a superfície de corpos d'água contaminados a rizofiltração pode ser conduzida *in situ*, ou *ex situ*. No segundo caso, um sistema projetado de tanques pode ser usado para manter a água contaminada introduzida e as plantas. Qualquer desses sistemas necessitará da compreensão da especificação do contaminante e das interações de todos os contaminantes e nutrientes.

### **Rizodegradação**

A rizodegradação é o aumento da biodegradação que naturalmente ocorre no solo pela influência das raízes vegetais e que idealmente levará à destruição ou desintoxicação de um contaminante orgânico. Outros termos têm sido usados por alguns autores como sinônimos de rizodegradação, tais como biodegradação melhorada da rizosfera.

Os contaminantes orgânicos no solo muitas vezes podem ser decompostos em outros produtos ou completamente mineralizados a produtos inorgânicos, tais como dióxido de carbono e água, por bactérias, fungos e actinomicetos naturalmente ocorrentes. A presença de raízes da planta normalmente aumentará o tamanho e a variedade de populações microbianas no solo do entorno das raízes (a rizosfera) ou nas micorrizas (associações de fungos e raízes da planta). Populações significativamente mais altas de heterótrofos totais, desnitrificadores, pseudomonas, degradadores de BTX (benzeno, tolueno, xilenos) e de atrazina foram encontrados no solo da rizosfera, em volta das árvores de álamo híbrido, em uma parcela de campo (*Populus deltoides* × *nigra* DN-34, Imperial Carolina) muito mais do que em solo fora da rizosfera (Jordahl *et al.*, 1997). O aumento das populações microbianas deve-se à estimulação pelos exudatos da planta, compostos produzidos pelas plantas e liberados por suas raízes. Os exudatos da planta incluem açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos, ácidos graxos, esteróis, hormônios de crescimento, nucleotídeos, flavononas, enzimas e outros compostos (Shimp *et al.*, 1993). O aumento das populações e atividades microbianas na rizosfera pode resultar no aumento da biodegradação dos contaminantes no solo, e a degradação dos exudatos pode estimular o metabolismo dos contaminantes na rizosfera. A rizodegradação ocorre principalmente no solo, embora a estimulação da atividade microbiana na zona radicular das plantas aquáticas possa ocorrer potencialmente.

Uma ampla variedade de contaminantes orgânicos é candidata à rizodegradação, tais como os hidrocarbonetos de petróleo, PAHs, pesticidas, solventes clorados, PCP, bifenilas

policloradas (PCBs) e surfactantes. Populações maiores de bactérias degradadoras de benzeno, tolueno e xileno foram encontradas no solo da rizosfera de árvores de álamo em comparação aos solos fora da rizosfera, embora não esteja claro se as populações eram de fato estatisticamente diferentes.

## Fitodegradação

Fitodegradação é a absorção, metabolização e degradação de contaminantes dentro da planta, ou a degradação dos contaminantes em solos, sedimentos, lodos, águas subterrâneas, ou águas superficiais, por enzimas produzidas e liberadas pela planta. A fitodegradação não é dependente de microrganismos associados à rizosfera. Os contaminantes sujeitos à fitodegradação incluem compostos orgânicos, como munições, solventes clorados, herbicidas, inseticidas e nutrientes inorgânicos. A fitodegradação também é conhecida como fitotransformação e é um processo de destruição do contaminante.

Para a fitodegradação ocorrer dentro da planta, esta deve ser capaz de absorver o composto. A absorção dos contaminantes requer que eles tenham um log de  $k_{ow}$  moderado. Experimentos de laboratório na Universidade de Washington indicaram que compostos alifáticos halogenados de cadeia curta poderiam ser absorvidos pelas plantas (Newman *et al.*, 1998), que podem metabolizar uma variedade de compostos orgânicos, inclusive o TCE (Newman *et al.*, 1997), o TNT (trinitrotolueno) (Thompson *et al.*, 1998) e o herbicida atrazina (Burken e Schnoor, 1997).

Em aplicações da fitodegradação, a transformação de um contaminante dentro da planta para uma forma mais tóxica, com sua liberação subsequente para a atmosfera pela transpiração, é indesejável. A formação e liberação de cloreto de vinila resultante da absorção e fitodegradação de TCE têm provocado preocupações. Porém, embora baixos níveis de metabólitos de TCE tenham sido encontrados nos tecidos da planta (Newman *et al.*, 1997), a presença do cloreto de vinila não foi relatada.

## Fitovolatilização

A fitovolatilização é a absorção de um contaminante por uma planta e a subsequente liberação de um contaminante volátil, produto da degradação de um contaminante, ou da forma volátil de um contaminante inicialmente não volátil. Para uma fitorremediação eficiente, o produto da degradação ou a forma volátil modificada devem ser menos tóxicos que o contaminante inicial.

A fitovolatilização é principalmente um processo de remoção do contaminante, transferindo-o do meio original (água superficial ou subterrânea) para a atmosfera. Porém, processos metabólicos dentro da planta podem alterar a forma do contaminante e, em alguns casos, transformá-lo em formas menos tóxicas. Exemplos disso incluem a redução

de espécies de mercúrio altamente tóxicas para mercúrio elementar menos tóxico, ou a transformação de selênio tóxico (como selenato) no gás menos tóxico dimetilseleneto (Adler, 1996).

Em alguns casos, a transferência do contaminante para a atmosfera permite a ocorrência de processos de degradação natural muito mais eficientes ou mais rápidos, como a fotodegradação. Pelo fato de a fitovolatilização envolver a transferência de contaminantes para a atmosfera, pode ser necessária uma análise de risco do impacto desta transferência no ecossistema e na saúde humana.

A fitovolatilização pode ocorrer com contaminantes inorgânicos solúveis em água subterrânea, solo, sedimentos ou lodos. Em experimentos de laboratório, o tabaco (*Nicotiana tabacum*) e uma pequena planta modelo (*Arabidopsis thaliana*), que tinham sido geneticamente modificados para incluir um gene para a produção da enzima mercúrio-redutase, converteram mercúrio iônico (Hg(II)) para a forma menos tóxica de mercúrio metálico (Hg(0)). Em seguida, o mercúrio volatilizou-se (Meagher *et al.*, 2000).

### **Controle hidráulico**

O controle hidráulico (ou controle da pluma hidráulica) é o uso da vegetação influenciando no movimento da água subterrânea e da água do solo, pela absorção e consumo de grandes volumes de água. O controle hidráulico pode influenciar e potencialmente conter o movimento de uma pluma d'água subterrânea, reduzir ou evitar a infiltração e a lixiviação e induzir o fluxo ascendente do nível d'água para a zona vadosa. Outros processos de fitorremediação, como a rizodegradação, a fitodegradação e a fitovolatilização, podem ocorrer conforme a água contaminada for levada até e para a planta. Em alguns casos e sob certas condições, o controle hidráulico vegetativo pode ser usado no lugar de, ou complementar, um sistema projetado de "pump-and-treat". A penetração das raízes por todo o solo pode ajudar a melhorar o fluxo lento da água em solos com condutividade baixa.

As taxas de absorção e transpiração da vegetação são importantes para o controle hidráulico e a remediação da água subterrânea. A absorção d'água e a taxa de transpiração dependem da espécie, idade, massa, tamanho, área da superfície foliar e o estágio de crescimento da vegetação. Elas também são afetadas por fatores climáticos, como temperatura, precipitação, umidade, insolação e a velocidade do vento, e variam sazonalmente.

As árvores decíduas ficam dormentes em uma parte do ano, resultando em taxas mais baixas de transpiração e absorção de água. Portanto, é difícil se definir taxas padrões para um dado tipo de vegetação. Por essa razão, o projeto e a operação de processos de fitorremediação por controle hidráulico provavelmente necessitarão de observações, específicas para o local, do nível d'água, dos padrões de fluxo e das taxas de absorção d'água.

## **Coberturas vegetadas**

Uma cobertura vegetada é uma cobertura de plantas auto-sustentável de longo prazo crescendo sobre materiais contaminados, projetados para minimizar as vias de exposição e o risco. O objetivo primário da vegetação é prover o controle hidráulico, impedindo ou minimizando a infiltração da precipitação na sub-superfície contaminada e, conseqüentemente, a formação de lixiviados. Para tal é preciso maximizar a evapotranspiração e a capacidade de armazenamento do solo. A vegetação também pode aumentar a estabilidade do solo, prevenindo, assim, a erosão e pode potencialmente destruir ou remover os contaminantes pela rizodegradação, fitodegradação ou fitovolatilização. Uma cobertura projetada para esse fim é chamada de cobertura de fitorremediação.

A cobertura vegetada pode ser construída por cima de aterros ou sobre solo contaminado ou água subterrânea. Pode ser necessária a manutenção da cobertura em longo prazo, ou a vegetação da cobertura pode ser projetada para permitir uma sucessão vegetal apropriada que irá manter a sua integridade.

Questões significativas a respeito do uso de coberturas vegetadas sobre aterros para o controle da evapotranspiração ou para a destruição do contaminante ainda permanecem. Isso inclui: a equivalência ao padrão regulatório aprovado para a cobertura de aterros; o potencial para a absorção do contaminante; a possibilidade das raízes vegetais romperem a integridade da cobertura; e a geração de gases nos aterros.

## **Faixas tampões e corredores riparianos**

As faixas tampões são áreas de vegetação colocadas a jusante de uma fonte ou pluma de contaminante, ou ao longo de um curso d'água (isto é, corredor ripariano). A vegetação contém, extrai e/ou destrói os contaminantes no solo, na água superficial e na água subterrânea que passa embaixo do tampão, por controle hidráulico, fitodegradação, fitoestabilização, rizodegradação, fitovolatilização e, possivelmente, fitoextração. O uso de faixas tampões pode estar limitado a compostos facilmente assimilados e metabolizados. Contaminantes relativamente solúveis, como nutrientes e alguns orgânicos (especialmente pesticidas), têm sido administrados utilizando-se faixas tampões e corredores riparianos.

Um dos objetivos das faixas tampões e dos corredores riparianos é segurar o escoamento superficial agrícola. Os benefícios adicionais dos corredores riparianos são a estabilização das margens de rios, a prevenção da erosão do solo e o melhoramento dos habitats aquáticos e terrestres. Para ser remediada, a água subterrânea deve estar dentro da profundidade de influência das raízes.

Na Tabela 1 são mencionadas as vantagens e desvantagens dos processo de fitorremediação.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos processos de fitorremediação

Vantagens	Desvantagens / Limitações
Corrigível para uma variedade de compostos orgânicos e inorgânicos.	Restrita a locais com contaminações superficiais, dentro da zona radicular das plantas utilizadas na remediação.
Possível aplicação <i>in situ</i> / <i>ex situ</i> com efluente / solo, respectivamente.	Pode levar muitos anos para remediar um local contaminado.
As aplicações <i>in situ</i> diminuem a quantidade de solo movimentado, se comparado aos métodos convencionais.	Restrita a locais com baixas concentrações do contaminante.
Reduz em até 95% a quantidade de resíduos a ser levada para aterro.	A biomassa vegetal colhida da fitoextração pode ser classificada como um resíduo perigoso, portanto, sua disposição deve ser apropriada.
As aplicações <i>in situ</i> diminuem a dispersão do contaminante por via aérea e pela água.	As condições climáticas são um fator limitante.
Não necessita de equipamentos caros ou pessoal altamente qualificado.	A introdução de espécies não nativas pode afetar a biodiversidade.
Em aplicações em grande escala, a potencial energia armazenada pode ser utilizada para gerar energia térmica.	O consumo/utilização da biomassa vegetal contaminada é uma causa de preocupação.

Fonte: Adaptado de Gosh e Singh, 2005

## Conclusões e perspectivas futuras

É evidente que a fitorremediação apresenta benefícios na restauração do equilíbrio de um ambiente perturbado, mas é importante proceder com cautela. O estudo e a utilização de modificações genéticas devem ser realizados de forma a se determinar os verdadeiros custos e benefícios dessa tecnologia ao ecossistema como um todo, antes de aplicá-la em larga escala (Gratão *et al.*, 2005).

Alguns aspectos chave para a aceitação da fitorremediação referem-se à medição de seu desempenho, à utilização final de seus subprodutos e a sua viabilidade econômica geral. Até agora, a fitorremediação comercial tem sido limitada pela expectativa de que a remediação do local deve ser realizada em um tempo comparável a outras tecnologias de limpeza. Por enquanto, a maior parte dos experimentos de fitorremediação foram realizados em escala de laboratório, nos quais as plantas cultivadas em solução hidropônica são alimentadas com dietas ricas em metais pesados. Apesar desses resultados serem promissores, os cientistas estão prontos para admitir que a cultura em solução é bastante diferente daquela realizada no solo, no qual muitos metais estão presos em formas insolúveis, e estão menos disponíveis. Esse é o maior problema.



O futuro da fitorremediação ainda está na fase de pesquisa e desenvolvimento, e há muitas barreiras técnicas que precisam ser vencidas. Tanto as práticas de manejo agrônomo quanto as capacidades genéticas das plantas devem ser otimizadas, com o objetivo de se desenvolver práticas comercialmente úteis. Muitas plantas hiperacumuladoras ainda precisam ser descobertas, e existe a necessidade de se conhecer mais sobre a sua fisiologia (Raskin *et al.*, 1994). Ainda são necessárias a otimização do processo, a compreensão apropriada do processo de absorção do metal pesado pela planta e a disposição adequada da biomassa produzida.

A fitorremediação é um campo de desenvolvimento rápido. Nos últimos dez anos, várias aplicações no campo foram iniciadas em todo o mundo. Isso inclui a Fitorremediação de Orgânicos, Inorgânicos e Radionuclídeos. Este processo sustentável e barato está emergindo rapidamente como uma alternativa viável para métodos de remediação convencionais e será mais conveniente para um país em desenvolvimento (Gosh e Singh, 2005). A maior parte dos estudos foram feitos em países desenvolvidos, e o conhecimento sobre as plantas mais adequadas é particularmente limitado no Brasil. São necessárias plantas de rápido crescimento com alta biomassa e boa capacidade de absorção de metais. Na maioria dos locais contaminados, existem espécies de ervas daninhas resistentes, tolerantes, e a fitorremediação através destas e de outras espécies não-comestíveis pode restringir a introdução dos contaminantes na cadeia alimentar. Contudo, vários métodos de disposição das plantas foram descritos, mas os dados quanto a esses métodos são escassos. A compostagem e a compactação podem ser considerados passos de pré-tratamento para a redução de volume, mas deve-se tomar cuidado para recolher o lixiviado que resulta da compactação.

## Referências

- ADLER, T. Botanical cleanup crews. *Sci. News*, v.150, p.42-43, 1996.
- BAÑUELOS, G.S.; SHANNON, M.C.; AJWA, H.; DRAPER, J.H.; JORDAHL, J.; LICHT, L. Phytoextraction and accumulation of boron and selenium by poplar (*Populus*) hybrid clones. *Int. J. Phytoremediation*, v.1, n.1, p.81-96, 1999.
- BURKEN, J.G.; SCHNOOR, J.L. Uptake and metabolism of atrazine by poplar trees. *Environ. Sci. Technol.*, v.31, p.1399-1406, 1997.
- CORNISH, J.E.; GOLDBERG, W.C.; LEVINE, R.S.; BENEMANN, J.R. Phytoremediation of soils contaminated with toxic elements and radionuclides. In: R.E. Hinchee, J.L. Means, and D.R. Burris (eds.), *Bioremediation of Inorganics*. Battelle Press, Columbus, OH. 1995, p. 55-63.
- CUNNINGHAM, S.D.; BERTI, W.R.; HUANG, J.W. Phytoremediation of contaminated soils. *Trends Biotechnol.*, v.13, p.393-397, 1995.

- DUSHENKOV, S.; VASUDEV, D.; KAPULNIK, Y.; GLEBA, D.; FLEISHER, D.; TING, K.C.; ENSLEY, B. Removal of uranium from water using terrestrial plants. *Environ. Sci. Technol.*, v.31, n.12, p.3468-3474, 1997.
- DUSHENKOV, V.; NANDA KUMAR, P.B.A.; MOTTO, H.; RASKIN, I. Rhizofiltration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environ. Sci. Technol.*, v.29, p.1239-1245, 1995.
- GOSH, M.; SINGH, S.P. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied Ecology and Environmental Research*, v.3, n.1, p.1-18, 2005.
- GRATÃO, P.L.; PRASAD, M.N.V.; CARDOSO, P.F.; LEA, P.J.; AZEVEDO, R.A. Phytoremediation: green technology for the clean up of toxic metals in the environment. *Braz. J. Plant Physiol.*, v.17, n.1, p.53-64, 2005.
- HARMS, H.; LANGEBARTELS, C. Standardized plant cell suspension test systems for an ecotoxicologic evaluation of the metabolic fate of xenobiotics. *Plant Sci.*, v.45, p.157-165, 1986.
- JORDAHL, J.L.; FOSTER, L.; SCHNOOR, J.L.; ALVAREZ, P.J.J. Effect of hybrid poplar trees on microbial populations important to hazardous waste bioremediation. *Environ. Toxicol. Chem.*, v.16, n.6, p.1318-1321, 1997.
- KUMAR, P.B.; NANDA, A.; DUSHENKOV, V.; MOTTO, H.; RASKIN, I. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environ. Sci. Technol.*, v.29, n.5, p.1232-1238, 1995.
- LI, M.S. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice. *Science of the Total Environment*, v.357, p.38-53, 2006.
- MEAGHER, R.B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Curr. Opin. Plant Biol.*, v.3, n.2, p.153-162, 2000.
- NEWMAN, L.A.; DOTY, S.L.; GERY, K.L.; HEILMAN, P.E.; MUIZNIEKS, I.; SHANG, T.Q.; SIEMIENIEC, S.T.; STRAND, S.E.; WANG, X.; WILSON, A.M.; GORDON, M.P. Phytoremediation of organic contaminants: A review of phytoremediation research at the University of Washington. *J. Soil Contam.*, v.7, n.4, p.531-542, 1998.
- NEWMAN, L.A.; STRAND, S.E.; CHOE, N.; DUFFY, J.; EKUAN, G.; RUSZAJ, M.; SHURTLEFF, B.B.; WILMOTH, J.; HEILMAN, P.; GORDON, M.P. Uptake and biotransformation of trichloroethylene by hybrid poplars. *Environ. Sci. Technol.*, v.31, p.1062-1067, 1997.

- RASKIN, I.; KUMAR, P.B.A.N.; DUSHENKOV, S.; SALT, D. Bioconcentration of heavy metals by plants. *Current Opinion Biotechnology*, v.5, p.285-290, 1994.
- SALT, D.E.; PICKERING, I.J.; PRINCE, R.C.; GLEBA, D.; DUSHENKOV, S.; SMITH, R.D.; RASKIN, I. Metal accumulation by aquacultured seedlings of Indian Mustard. *Environ. Sci. Technol.*, v.31, n.6, p.1636-1644, 1997.
- SALT, D.E.; BLAYLOCK, M.; NANDA KUMAR, P.B.A.; DUSHENKOV, V.; ENSLEY, B.D.; CHET, I.; RASKIN, I. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnol.*, v.13, p.468-474, 1995.
- SHIMP, J.F.; TRACY, J.C.; DAVIS, L.C.; LEE, E.; HUANG, W.; ERICKSON, L.E.; SCHNOOR, J.L. Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic materials. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, v.23, p.41-77, 1993.
- THOMPSON, P.L.; RAMER, L.A.; SCHNOOR, J.L. Uptake and transformation of TNT by hybrid poplar trees. *Environ. Sci. Technol.*, v.32, p.975-980, 1998.
- USEPA. Status of in situ phytoremediation technology. In: Recent developments for *in situ* treatment of metal contaminated soils. p.31-42. EPA-542-R-97-004. 1997.
- WANG, T.C.; WEISSMAN, J.C.; RAMESH, G.; VARADARAJAN, R.; BENEMANN, J.R. Parameters for removal of toxic heavy metals by water milfoil (*Myriophyllum spicatum*). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, v.57, p.779-786, 1996.

# **Análise e avaliação de risco ambiental como instrumentos de gestão em instalações de mineração**

Laís Alencar de Aguiar; Gustavo Henrique de Sousa Araujo;  
Josimar Ribeiro de Almeida; Paulo Sergio Moreira Soares; Mario  
Valente Possa

## **Aspectos ambientais associados à mineração de carvão**

A discussão dos aspectos ambientais tem sido tema recorrente na literatura técnica sobre a mineração do carvão (Hester; Harrison, 1994, Torres; Gama, 2005, Milioli, 1999; CETEM, 2000; Crepaldi, 2003). De forma resumida, pode-se afirmar que são fatores determinantes desses aspectos, entre outros: as características mineralógicas do carvão lavrado e do material estéril associado; os métodos de lavra e beneficiamento empregados; as condições climáticas, hidrogeológicas e hidrológicas da região onde se localiza a operação e as características da vizinhança da propriedade mineira (ocorrência de habitações e/ou ecossistemas protegidos, etc.).

Os principais aspectos ambientais característicos das operações de lavra e beneficiamento de carvão podem ser classificados como se segue:

### **Lavra**

A lavra pode ser a céu aberto ou subterrânea, como mostrado na Figura 1. A primeira alternativa é usualmente empregada quando as camadas de carvão são aproximadamente horizontais e ocorrem a profundidades relativamente pequenas e reduzida espessura da cobertura de estéril. A espessura que pode ser removida economicamente depende de vários fatores, entre os quais o valor do carvão e a dificuldade de remoção do estéril. A lavra, neste caso, assemelha-se a uma operação de movimentação de terra usual em operações de construção civil.

A vegetação precisa ser removida em etapa anterior à lavra, o que implica impacto sobre ecossistemas, perda de área agrícola e alterações na paisagem natural. No Brasil, a remoção e armazenamento do solo e sua recolocação no terreno após a lavra têm sido práticas comuns em minas de carvão com lavra a céu aberto localizadas no estado do Rio Grande do Sul (Schultze *et al.*, 1999; Schultze, 2001). Tal procedimento tende a facilitar a recomposição da camada vegetal após a mineração, já que sementes das espécies vegetais presentes no solo armazenado podem estar disponíveis para germinação após sua recolocação.



Figura 1 – a) Lavra subterrânea de carvão. Mina Bonito - SC; b) Lavra de carvão a céu aberto. Mina de Candiota – RS

A alteração na paisagem está entre os aspectos ambientais das operações de lavra a céu aberto, uma vez que grandes extensões de terreno podem ser afetadas. Operações de lavra, seguidas de recomposição topográfica e revegetação realizadas em paralelo podem reduzir o impacto visual expondo uma menor área de terreno sem cobertura, como apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Área piloto de revegetação na Mina de carvão de Candiota - RS. Projeto conjunto CETEM - CRM - CANMET

A lavra subterrânea é empregada quando as camadas de carvão encontram-se em profundidade. Os métodos de lavra usuais, neste caso, são denominados de câmaras e pilares (*room and pillar*) ou paredes longas (*longwall*). No Brasil, as lavras subterrâneas de carvão são realizadas pelo método de câmaras e pilares.

Um dos aspectos ambientais da mineração subterrânea de carvão associa-se à subsidência que pode ocorrer como resultado dos trabalhos de subsolo ou do abatimento dos pilares de sustentação da mina após a operação de lavra. Essa remoção pode provocar danos nas construções localizadas na superfície.

Alterações do regime das águas superficiais e subterrâneas são também aspectos ambientais associados à lavra subterrânea de carvão. Durante as operações de extração, as detonações podem causar pequenas fraturas nas rochas localizadas no teto e piso das galerias das minas. Essas fraturas, além das galerias, passam a se constituir em caminhos preferenciais para a drenagem das águas. Como consequência, podem ocorrer perturbações no comportamento de recarga dos aquíferos localizados acima e abaixo do nível da lavra, com alterações de vazão e contaminação da água. Na superfície, a fratura das rochas causada pelas detonações e o avanço das galerias podem causar também perdas de poços de abastecimento de água. Tais poços podem secar em consequência da mudança da direção do fluxo preferencial das águas subterrâneas. No Brasil, o abatimento de pilares na lavra subterrânea de carvão não é praticado, o que reduz o risco da ocorrência de subsidências.

A emissão de metano também é um aspecto ambiental característico da mineração de carvão, tanto nas operações a céu aberto quanto nas subterrâneas. O metano é produzido como decorrência do processo geológico de formação do carvão e se aloja em suas fraturas e poros. A liberação desse gás para a atmosfera ocorre tanto na lavra quanto na estocagem do material. O carvão lavrado no subsolo tende a apresentar teores de metano maiores que aquele lavrado a céu aberto, devido às maiores pressões às quais é submetido nas jazidas mais profundas. Outros fatores afetam também o teor de metano em carvões, como o *rank* (linhito, sub-betuminoso, betuminoso). As emissões de metano podem ser consideradas um aspecto ambiental e de segurança ocupacional da lavra de carvão, uma vez que este gás é inflamável e pode ser explosivo nas condições de operação no subsolo. Por outro lado, o metano oriundo de minas de carvão tem uso potencial como combustível. No caso brasileiro, os níveis de metano em minas subterrâneas e a céu aberto são considerados pequenos pelas mineradoras. O aproveitamento econômico deste gás é ainda objeto de estudos (Kalkreuth *et al.*, 2003).

As emissões atmosféricas causadas pelo uso de combustíveis fósseis líquidos encontram-se também entre os aspectos ambientais das minerações de carvão a céu aberto ou minerações subterrâneas. O óleo diesel e a gasolina são regularmente empregados no abastecimento de veículos de transporte de materiais e pessoal e nos equipamentos de uso na superfície e no subsolo, entre os quais: jipes, pás carregadeiras, caminhões e retroescavadeiras.

Somam-se ainda aos aspectos ambientais citados as emissões de poeira e o ruído causados pelo tráfego de veículos e equipamentos. Além disso, podem ocorrer perturbações sobre os ciclos de energia e materiais dos ecossistemas nas adjacências da operação de mineração e possíveis alterações em sítios históricos ou arqueológicos, caso estes sejam alcançados pelas operações de lavra.

Finalmente, pode ser também considerado um aspecto ambiental da lavra de carvão, o uso intensivo de energia elétrica nos equipamentos de transporte de material no subsolo. Outro aspecto é a utilização de água nas atividades de perfuração e no abatimento de poeiras geradas pelas operações de perfuração de frente e de teto no subsolo. O abatimento de poeiras provocadas pelo tráfego de equipamentos na superfície também é incluído como aspecto decorrente.

Os principais aspectos e impactos ambientais das operações de lavra são apresentados de forma resumida na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais aspectos e impactos ambientais da lavra

Atividade/ Produto/ Serviço	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental
Preparação da frente da galeria	Uso de energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> <li>• Aquecimento global</li> <li>• Degradação da qualidade do ar</li> </ul>
	Uso de água	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> </ul>
	Derramamento de óleos e graxas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação da qualidade das águas superficiais</li> </ul>
	Geração de drenagem ácida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação da qualidade do solo</li> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> </ul>
Carregamento dos furos	Derramamento de explosivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> </ul>
Desmonte de frente da galeria	Perfuração do aquífero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depleção de recurso natural</li> </ul>
	Geração de vibrações	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Danos à saúde humana, flora e fauna</li> <li>• Danos ao patrimônio</li> </ul>
	Geração de subsidência	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depleção de recurso natural</li> <li>• Degradação da qualidade do ar</li> <li>• Danos ao patrimônio</li> </ul>
Carregamento e transporte do ROM	Uso de energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> <li>• Aquecimento global</li> <li>• Degradação da qualidade do ar</li> </ul>
Escoramento do teto	Uso de energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> <li>• Aquecimento global</li> <li>• Degradação da qualidade do ar</li> </ul>
	Uso de madeira	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> </ul>
	Uso de água	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> </ul>
	Perfuração do aquífero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depleção de recurso natural</li> </ul>
Exaustão de ar	Uso de energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> <li>• Aquecimento global</li> <li>• Degradação da qualidade do ar</li> </ul>
	Geração de ruído	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Danos à saúde humana e à fauna</li> </ul>
	Transporte de particulados, gases, óleos e vapor d'água	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Danos à saúde humana, à flora e à fauna</li> <li>• Degradação da qualidade do solo</li> <li>• Degradação da qualidade do ar</li> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> </ul>

## Beneficiamento

As operações típicas de beneficiamento mineral de carvão no Brasil envolvem a aplicação de jigues, espirais concentradoras e flotação. Em quaisquer desses processos são utilizadas suspensões (polpas) de carvão em água. Circuitos de beneficiamento denominados fechados são praticados na maior parte das empresas carboníferas brasileiras nas quais a água é reutilizada após captação realizada na bacia de disposição de rejeitos finos. A ocorrência de perdas, no entanto, pode exigir que parte da água necessária ao processo de beneficiamento seja captada nas drenagens realizadas nas frentes de lavra no subsolo.



O uso de energia elétrica para acionamento de bombas e equipamentos de concentração e a emissão de ruído e poeira podem ser apontados como principais aspectos ambientais característicos do beneficiamento.

Os principais aspectos e impactos ambientais das operações de beneficiamento são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais aspectos e impactos ambientais do beneficiamento

Atividade/ Produto/ Serviço	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental
Britagem	Uso de energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> <li>• Aquecimento global</li> <li>• Degradação da qualidade do ar</li> </ul>
	Uso de água	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> </ul>
	Geração de particulados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dano à saúde humana, à flora e à fauna</li> <li>• Degradação da qualidade do solo</li> <li>• Degradação da qualidade do ar</li> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> </ul>
	Geração de ruído	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dano à saúde humana e à fauna</li> </ul>
	Derramamento de óleos e graxas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> <li>• Degradação da qualidade do solo</li> </ul>
	Geração de vibrações	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Danos à saúde humana, flora e fauna</li> <li>• Danos ao patrimônio</li> </ul>
Estocagem de material no pátio (ROM, estéril, rejeitos e produtos)	Uso de combustível (trator)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> <li>• Aquecimento global</li> <li>• Degradação da qualidade do ar</li> </ul>
	Geração de drenagem ácida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> <li>• Degradação da qualidade do solo</li> </ul>
Concentração do carvão	Uso de energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> <li>• Aquecimento global</li> <li>• Degradação da qualidade do ar</li> </ul>
	Uso de água	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de recurso natural</li> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> </ul>
	Perdas de carvão nos processos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desperdício de recurso natural não renovável</li> </ul>
	Geração de sólidos em suspensão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> <li>• Degradação da qualidade do solo</li> </ul>
	Derramamento de óleos e graxas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação da qualidade do solo</li> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> </ul>
	Uso de reagentes orgânicos (óleos diesel e de pinho)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação da qualidade das águas</li> <li>• Degradação da qualidade do solo</li> </ul>

## Disposição de estéreis e rejeitos sólidos

Nas áreas de disposição de resíduos (rejeitos e estéreis), encontram-se também importantes aspectos ambientais da atividade de mineração de carvão.

Resíduos das lavras a céu aberto constituem-se em agentes de alterações da topografia, drenagem natural e paisagem na região da mina. O estéril removido para dar acesso à camada de carvão pode, no entanto, ser recolocado nos cortes após a lavra, no caso de métodos de lavra em tiras (*strip mining*), reduzindo essas alterações.

Nas instalações de mineração onde há beneficiamento de carvão, este usualmente opera de forma integrada com uma barragem de rejeitos para contenção de resíduos finos e uma área de disposição de rejeitos grosseiros. Em ambos os casos há a introdução de alterações na paisagem. Barragens podem oferecer riscos de rompimento e infiltrações no solo de fundação, com possível contaminação das águas subterrânea e superficial. Pilhas de rejeitos grosseiros alteram a topografia e drenagens naturais da área de disposição. Além disso, a água da chuva que percola essas pilhas pode contribuir para a contaminação e o aumento da quantidade de sólidos em suspensão nas águas superficiais e subterrâneas adjacentes à área de disposição, provocando impactos à biota.

A gestão bem sucedida de aspectos ambientais tão diversos como os citados depende fundamentalmente da disponibilidade de uma metodologia que permita avaliar, de forma sistemática, a importância e procedência de cada um. Esta avaliação é, sem dúvida, fundamental para a alocação eficiente de recursos humanos e materiais destinados à solução dos problemas ambientais de um empreendimento mineral.

A gestão de risco ambiental, como proposta nos itens seguintes, embora aplicada especificamente a um empreendimento para mineração de carvão, constitui-se em atraente instrumento para a priorização de ações na área ambiental de um empreendimento, independentemente do bem mineral produzido.

## **Gestão de risco ambiental**

A discussão sobre gestão de risco ambiental inicia-se fundamentalmente com a distinção entre as questões ambientais (risco, impacto, dano e passivo ambiental) e as ferramentas de solução existentes (análise, avaliação e gerenciamento).

Risco ambiental é o produto entre a frequência de ocorrência de um evento indesejado (perigo) e as consequências ambientais caso este evento indesejado venha ocorrer. Portanto, tem um caráter probabilístico. Já o impacto ambiental tem um caráter determinístico, visto que é definido como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II - as atividades sociais e econômicas; III - a biota; IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V - a qualidade dos recursos ambientais.

Em todas as fases do empreendimento (instalação, operação e descomissionamento), há geração de impactos ambientais, algo que é certo de ocorrer pela própria decorrência

dos aspectos ambientais do empreendimento. Porém, os riscos ambientais vinculados a estas fases, como estão associados com a probabilidade de ocorrência do evento indesejado, podem variar numa escala que vai desde desprezível (evento raro) a sério (evento certo). Contudo, uma vez que o evento indesejado ocorra (perigo ambiental), dar-se-á o impacto ambiental.

Sob condições do impacto ambiental, o mecanismo homeostático do sistema atingido é capaz (habilidade) de retornar às condições anteriores ao impacto. Na condição de dano, ou o mecanismo homeostático perde esta habilidade ou o impacto é superior à capacidade de suporte do sistema. Considera-se passivo ambiental a condição temporal do dano ambiental, ou seja, a condição de permanência do dano ao longo do tempo.

Para cada uma das questões ambientais (risco, impacto, dano e passivo) pode-se utilizar uma das ferramentas de solução (análise, avaliação e gerenciamento). Estas, se usadas de forma integrada, representam a Gestão Ambiental. A análise é a etapa em que se divide o objeto de estudo em quantas partes forem necessárias para o seu total entendimento. A avaliação pode ser entendida como um processo pelo qual os resultados da análise são comparados com padrões, com o objetivo de tomar decisões estratégicas. A etapa do gerenciamento pode ser considerada a formulação e a implantação de medidas e procedimentos que têm por finalidade prevenir, reduzir e controlar as questões ambientais (riscos, impactos, danos e passivos) presentes em uma organização. A Figura 3 apresenta graficamente as etapas da gestão do risco ambiental.

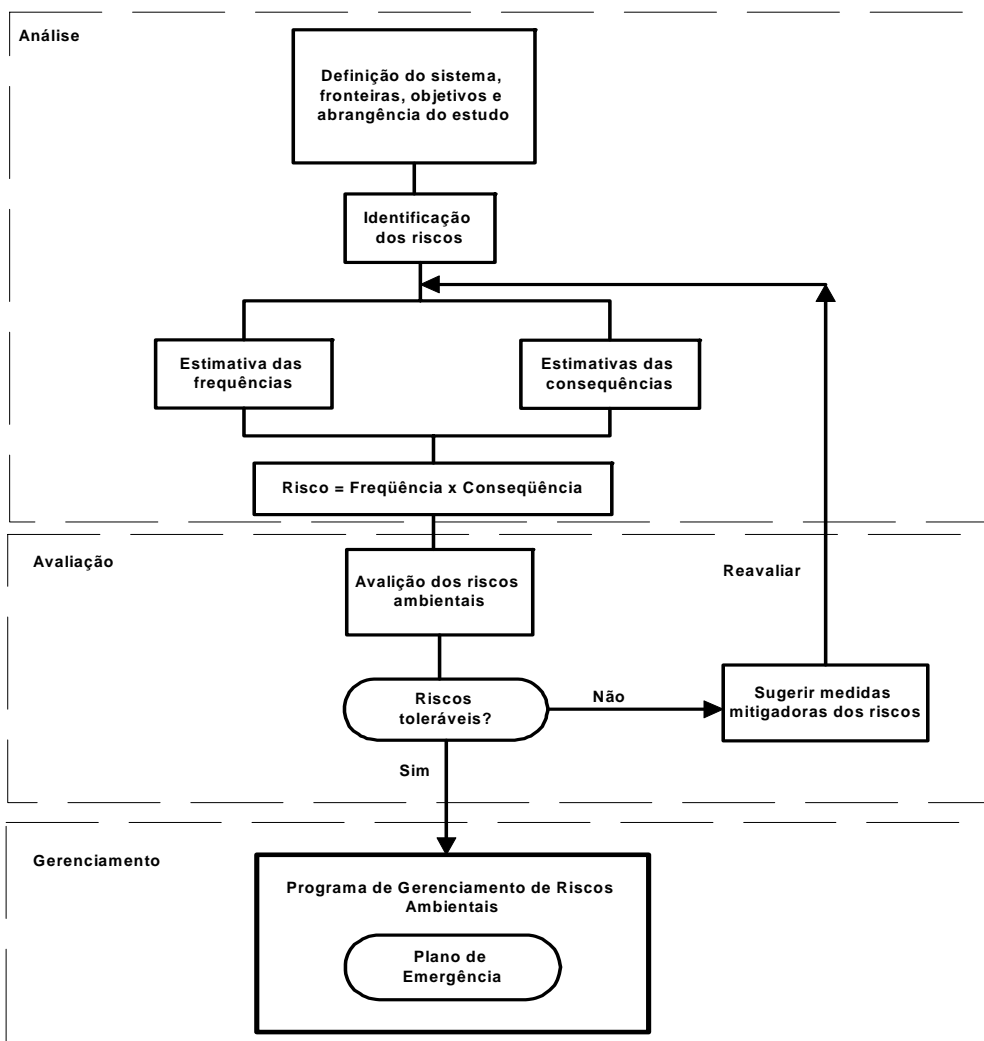


Figura 3 – Gestão de risco ambiental: análise, avaliação e gerenciamento

## Análise e avaliação de risco ambiental

Não há uma conceituação única e nem uniformidade para risco e perigo, principalmente por serem termos amplamente utilizados em várias áreas do conhecimento. Desta forma, é importante conceituá-los no presente texto.

Perigo é fonte potencial de dano pessoal e/ou ambiental e/ou material, isto é, um evento indesejado no ambiente corporativo.

Risco, por outro lado, está associado à exposição do receptor ao perigo. Os receptores podem ser representados pela tecnologia, natureza e o próprio homem (Figura 4). O

risco tem uma relação inversa com as medidas de salvaguardas existentes. Pode ser evidenciado logicamente pela expressão a seguir.

$$\text{Risco} = \frac{\text{Perigo}}{\text{Salvaguardas}}$$

As salvaguardas podem ser medidas de prevenção (atuação para minimizar a probabilidade/freqüência de ocorrência do evento/perigo) ou de proteção (atuação para minimizar as conseqüências associadas ao evento/perigo). Tais medidas devem fazer parte de Programas Ambientais para garantir a proteção da saúde humana e do meio ambiente, em consonância com os princípios e exigências nacionais e internacionais para todas as fases do empreendimento.

Para efeito deste trabalho, considera-se taxonomicamente o risco baseado nas conseqüências do evento indesejado (perigo) no receptor. Portanto, Risco Tecnológico é aquele cujo receptor independente do perigo é a tecnologia. Assim como Risco Ecológico é aquele cujo receptor é a natureza, e quando o receptor é o homem tem-se Risco Saúde Humana e Socioambiental (Figura 4).

Risco Ambiental é compreendido pelos riscos ecológico, saúde humana e socioambiental. Os riscos tecnológico e ocupacional não estão enquadrados como risco ambiental.

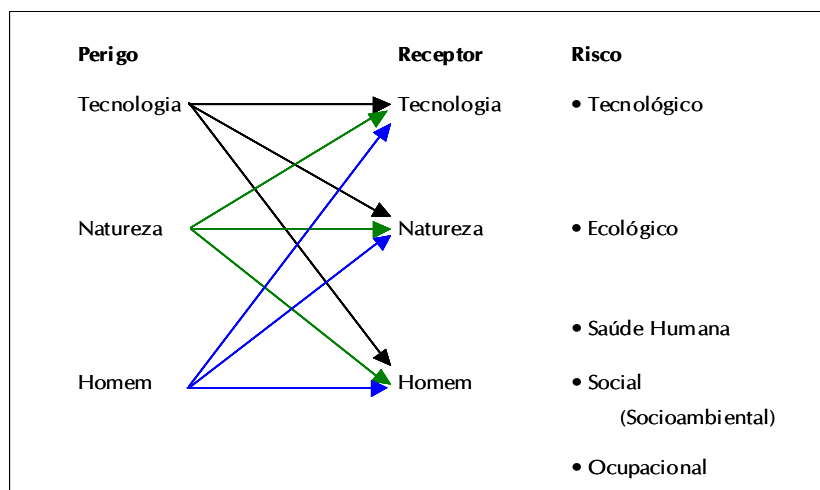


Figura 4 – Relação entre perigo e receptor e taxonomia do risco

Como definido anteriormente risco é o produto entre a freqüência de ocorrência de um evento indesejado (perigo) e as conseqüências ambientais caso este evento indesejado venha ocorrer. Logo, é função da freqüência, da conseqüência e do cenário (conjunto de fatores que podem influenciar a ocorrência do evento indesejado).

$$\text{Risco} = \text{Freqüência (ou probabilidade)} \times \text{Conseqüência}$$

No risco ecológico e no risco à saúde humana, o termo risco é comumente usado para designar tão somente as conseqüências. Para estes riscos, a prática usual não utiliza a probabilidade de ocorrência do evento indesejado para cálculo do risco. Quando é utilizada, o evento é considerado certo (probabilidade igual a 1).

No caso de substâncias reconhecidamente carcinogênicas, o risco à saúde humana é formalmente definido como a probabilidade de um indivíduo contrair câncer como resultado de uma exposição a um nível particular do carcinogênico. No caso de substâncias não carcinogênicas, o risco é avaliado comparando-se o nível de exposição ao longo de um período de tempo especificado (por exemplo, tempo de vida) com uma dose de referência, para o mesmo período de exposição (USEPA, 1989 a).

O mesmo acontece no caso do risco ecológico. O risco ecológico, no passado designado risco ambiental, refere-se à avaliação qualitativa e/ou quantitativa das conseqüências das substâncias químicas perigosas, em plantas e animais (excluindo-se pessoas e espécies domésticas) (USEPA, 1989 b).

No presente trabalho, o risco é expresso como o produto da freqüência pela conseqüência e não como conseqüência apenas. Uma vantagem desta abordagem é a possibilidade de intervir diretamente no projeto do empreendimento através de combinações de seus componentes e sistemas, com o intuito de reduzir a freqüência de ocorrência de possíveis cenários acidentais e, assim, efetivamente diminuir os riscos. Trata-se, portanto, de uma ferramenta para o gerenciamento dos riscos ambientais.

## **Gerenciamento de risco ambiental**

O controle de um determinado risco é possível por meio da implementação de ações para reduzir tanto a freqüência (ou probabilidade) do evento indesejado acontecer, como as conseqüências por ele geradas, caso venha a ocorrer. Portanto, os estudos de análise de riscos voltados para a prevenção de eventos indesejados (perigos), no contexto do controle ambiental, devem resultar na proposição de medidas para o pleno gerenciamento dos riscos ambientais do empreendimento.

Assim, pode-se definir o gerenciamento de riscos ambientais como sendo a formulação e a implantação de medidas e procedimentos que têm por finalidade prevenir, reduzir e controlar os riscos ambientais presentes em um empreendimento (adaptado de CETESB, 1994; 2003). Deve contemplar a implantação de medidas para a redução das freqüências de ocorrência dos acidentes (medidas de prevenção) e também para a minimização das conseqüências (medidas de proteção), caso esses acidentes venham a ocorrer.

A Figura 5 apresenta curvas de risco para empreendimentos com diferentes gerenciamentos de riscos. As isolinhas de riscos (R1, R2 e R3) definem o grau de qualidade de gerenciamento de riscos da empresa. Quanto mais afastada for a curva de risco dos eixos, pior é o seu gerenciamento e, quanto mais próxima a curva de risco estiver dos eixos, melhor é o gerenciamento.

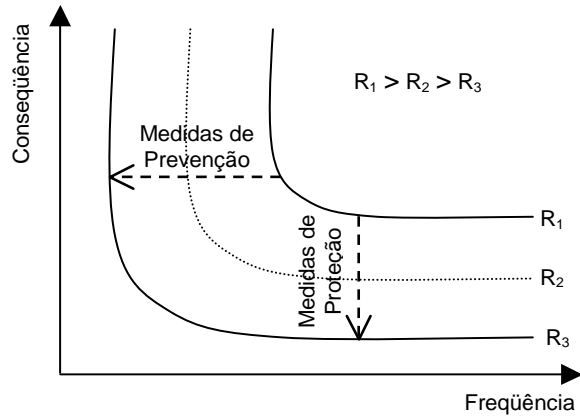


Figura 5 – Curva de riscos

Na maioria dos casos, os eventos mais freqüentes apresentam menores conseqüências, porém em uma pequena parcela dos eventos a freqüência de ocorrência é pequena, mas com grandes conseqüências.

Como o risco tem uma relação inversa com as medidas de salvaguardas existentes, a redução do risco se faz pelo aumento das medidas de proteção e prevenção. Quando medidas de prevenção são propostas, se está atuando para a diminuição da freqüência de ocorrência do evento indesejado. E quando são sugeridas medidas de proteção, se está mitigando as conseqüências do evento, caso ele venha ocorrer. E como risco é o produto entre freqüência e conseqüência, ao se diminuir a freqüência e/ou conseqüência, se diminui o risco, Figura 6.

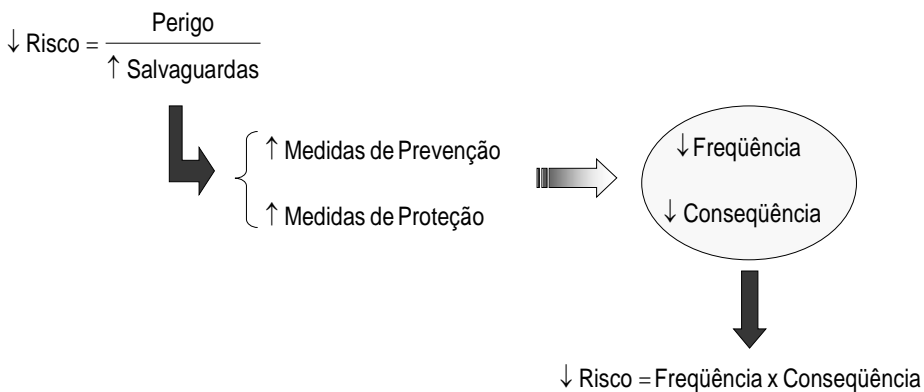


Figura 6 – Gerenciamento de risco ambiental

O Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR) é a última etapa do estudo de riscos. Representa também o início de uma nova fase que deve ser mantida ao longo da vida útil do empreendimento, de modo que ele opere dentro de padrões ambientais considerados toleráveis.

O gerenciamento de riscos deve contemplar a implantação de medidas de prevenção, cujo propósito é reduzir as frequências de ocorrência dos eventos indesejados e, também, medidas de proteção, para a minimização das conseqüências, caso esses eventos indesejados venham a ocorrer. Dentre as ações comumente contempladas em um programa de gerenciamento de riscos, podem ser destacadas:

Medidas de prevenção:

- melhoria da qualidade da instalação;
- aumento da confiabilidade dos sistemas de controle e de segurança;
- programas de inspeção e manutenção;
- programas de treinamento e capacitação técnica.

Medidas de proteção:

- ações para redução dos impactos de acidentes;
- redução do inventário de substâncias perigosas armazenadas;
- sistemas de contenção de vazamentos;
- sistemas de abatimento de vapores tóxicos ou inflamáveis;
- reforço de estruturas para a absorção de impactos decorrentes de explosões;
- ações para a proteção da população exposta;
- plano de emergência.

O plano de emergência é particularmente importante para a prevenção de impactos maiores decorrentes de distúrbios operacionais. Um plano deve ser elaborado com base nas premissas oriundas do estudo de análise de riscos, de forma que os cenários acidentais estudados sejam contemplados no plano e ações de resposta compatíveis com eles sejam definidas e implantadas. Deve-se ressaltar que um plano de emergência é uma medida de proteção que não tem função preventiva, isto é, não evita a ocorrência de um acidente, mas pode fazer com que uma ocorrência anormal não se transforme em uma tragédia.

Assim, um programa de gerenciamento de riscos ambientais deve especificar de maneira clara e objetiva as atribuições e as responsabilidades das diversas áreas da empresa envolvidas no processo. Deve contar com o apoio da alta direção e propiciar as condições para o desenvolvimento de ações integradas entre os diferentes departamentos, tais como:



produção, recursos humanos, manutenção, segurança e meio ambiente, entre outros. Alguns aspectos básicos que devem nortear o desenvolvimento de um programa de gerenciamento de riscos são: conscientização, integração, apoio da direção, documentação e controle.

## **Gestão de risco ambiental em uma instalação de mineração de carvão**

Neste item é proposta e aplicada, a título de exemplo e segundo os fundamentos apresentados anteriormente, uma metodologia para gestão do risco ambiental em uma mineração de carvão localizada no estado de Santa Catarina. O exercício de aplicação da metodologia, no entanto, não foi realizado em uma única empresa em particular. Ao invés disso, optou-se por tratar, no presente trabalho, do caso de uma instalação fictícia. Esta decisão teve como propósito não particularizar a análise de risco realizada, buscando torná-la útil a mais de uma instalação. As características técnicas e operações descritas, porém, podem ser consideradas como típicas de várias empresas que operaram na região carbonífera catarinense entre os anos de 2000 e 2006.

Trata-se, portanto, de apresentar nos subitens que se seguem uma estratégia para gestão do risco ambiental em uma mineração de carvão. Com este objetivo é inicialmente descrita a instalação à qual se aplicou a metodologia proposta. Em seguida são realizadas a análise e apresentação dos resultados da avaliação do risco ambiental. Finalmente, são tecidos breves comentários sobre o plano de gerenciamento ambiental da instalação.

### **Descrição do empreendimento**

Um empreendimento típico para exploração de carvão localizado no sul do estado de Santa Catarina, é constituído por uma mina subterrânea, instalações de beneficiamento mineral, uma área de disposição de rejeitos e instalações destinadas às atividades de transporte de produtos e manutenção de equipamentos. O empreendimento é dotado também de almoxarifados, serviços auxiliares de saúde e paiol de explosivos.

Antes que o carvão bruto (ROM - *Run of Mine*) comece a ser extraído, é necessário garantir que o sistema de ventilação no subsolo esteja operando de forma eficiente. O ciclo de extração é iniciado na galeria com a perfuração de frente. Os furos são carregados com explosivos, e o carvão bruto é desmontado com a realização da detonação. Os gases da explosão são removidos com exaustores secundários.

O carvão desmontado é carregado e transportado por *loaders* e *shuttle cars*, ou carregadeiras de pequeno porte, até o alimentador de correias. Neste alimentador é realizada a quebra dos blocos de ROM de maior dimensão, que são, então, descarregados na correia transportadora. Completando o ciclo das principais atividades da lavra, são realizados a perfuração e o escoramento do teto. Com o propósito de evitar a descontinuidade da produção, é realizada manutenção preventiva dos equipamentos no subsolo.

O ROM na correia transportadora é conduzido até a superfície onde é descarregado em uma pilha que serve como “pulmão” (estoque) no processo de beneficiamento.

O beneficiamento é iniciado com a redução de tamanho do ROM em um circuito aberto de britagem e peneiras vibratórias, de forma a obter-se um *top size* em torno de 1¼”. A seguir, o ROM é transportado por correias até a etapa de jigagem, na qual são gerados o produto (carvão beneficiado) e três tipos de rejeitos (afundados): R1 - rejeito primário (piritoso); R2 - rejeito secundário (xistoso); e R3 - rejeito terciário (carbonoso). O produto concentrado (flutuado) no jigue é peneirado em 0,8mm obtendo-se um produto grosso (CE 4500 - utilizado em termelétrica), que fica retido, e o passante, que é conduzido ao circuito de concentração de finos. Alternativamente, pode ocorrer o peneiramento prévio em 0,8mm do ROM na alimentação do jigue.

No circuito de finos o material é classificado em ciclones nos quais o *underflow* (grossos) é concentrado em espirais, mesas vibratórias ou em peneiras vibratórias. Os finos são concentrados por flotação. Diferentes produtos finos são obtidos para atender as exigências requeridas pelos compradores, inclusive são realizados outros processos subseqüentes, como secagem e moagem.

Os rejeitos do jigue são transportados por caminhões até a pilha de disposição de rejeitos grossos, e os rejeitos do circuito dos finos são bombeados até as bacias de decantação.

O produto decantado é dragado e transportado para ser disposto nas pilhas de rejeitos grossos. A água sobrenadante é retida em bacias de captação junto a outras águas provenientes da lavra e dos pátios. Parte da água das bacias de captação é utilizada nos processos de beneficiamento do ROM, e a água restante é tratada para atender as legislações ambientais e, em seguida descartada. É comum a presença de canais que circundam os depósitos de rejeitos (pilhas e bacias de decantação) com o objetivo de captar águas contaminadas por drenagem ácida, que são conduzidas posteriormente para as bacias de captação.

As águas não contaminadas provenientes de áreas a montante do empreendimento são direcionadas para canais de desvio construídos no perímetro do empreendimento. Estes canais têm como objetivo impedir que as águas a montante sejam poluídas pelo contato com rejeitos e materiais dispostos na área da mina.

## **Análise do risco ambiental**

Para a análise dos riscos ambientais existentes no empreendimento em questão, foi utilizada a metodologia conhecida como APP – Análise Preliminar de Perigo. A APP (PHA – Preliminar Hazard Analysis) é uma metodologia indutiva estruturada para identificar os potenciais perigos decorrentes do empreendimento. Teve sua origem no programa de segurança militar do Departamento de Defesa dos Estados Unidos e até hoje faz parte dele (SERPA, 2000). É uma das técnicas mais utilizadas no Brasil para

identificação de perigos, tanto pelas empresas como pelos órgãos ambientais. Por exemplo, os órgãos ambientais do RJ (FEEMA) e de SP (CETESB) indicam a utilização da APP nas análises de risco ambientais contidas nos projetos que as empresas têm que submeter a estes órgãos. As empresas utilizam esta metodologia como ferramenta para identificar os perigos industriais, ocupacionais e ambientais.

### **Análise Preliminar de Perigo (APP)**

Esta metodologia procura examinar as maneiras pelas quais a energia ou o material de processo pode ser liberado de forma descontrolada, levantando, para cada um dos perigos (eventos indesejados) identificados, as suas causas, os métodos de detecção disponíveis e os efeitos sobre os trabalhadores, a população circunvizinha e sobre o meio ambiente. Em seguida, é feita uma análise dos riscos associados, identificando-se, desta forma, aqueles que requerem priorização. Além disso, são sugeridas medidas preventivas e/ou mitigadoras dos riscos, a fim de eliminar as causas ou reduzir as conseqüências dos perigos identificados.

O escopo da APP abrange os eventos perigosos cujas causas tenham origem no empreendimento analisado, englobando tanto as falhas de componentes ou sistemas, como eventuais erros operacionais ou de manutenção (falhas humanas). O grau de risco é determinado por uma matriz de risco gerada por profissionais com experiência na unidade, sob orientação do profissional conhecedor da metodologia.

O uso da APP ajuda a selecionar as áreas do empreendimento nas quais outras técnicas mais detalhadas de análise de riscos ou de confiabilidade devam ser usadas posteriormente. A APP é precursora de outras análises e, para o caso da instalação em questão, pode ser formulada como se segue:

#### **A. Objetivo e escopo**

Esta APP tem como objetivo analisar os perigos ambientais de um empreendimento típico de extração mineral de carvão, cujas características estão descritas no item 3.1. A APP abrange as seguintes áreas: lavra, beneficiamento e transporte, disposição de rejeitos e atividades de apoio.

#### **B. Descrição da APP**

Na APP são levantadas as causas que podem promover a ocorrência de cada um dos perigos e suas respectivas conseqüências, sendo, então, feita uma avaliação qualitativa da freqüência de ocorrência das causas, da severidade das conseqüências e do risco associado. Portanto, os resultados obtidos são qualitativos, não fornecendo estimativas numéricas.

Normalmente uma APP fornece também uma ordenação qualitativa dos riscos associados aos perigos identificados, a qual pode ser utilizada como um primeiro elemento na priorização das medidas propostas para redução destes riscos do empreendimento analisado.

A metodologia de APP compreende a execução das seguintes etapas:

- definição dos objetivos e do escopo da análise;
- definição das fronteiras do processo/ instalação analisados;
- coleta de informações sobre a região, a instalação e os perigos envolvidos;
- divisão do processo/ instalação em subsistemas;
- listagem dos perigos existentes em cada subsistema;
- descrição das causas que podem promover a ocorrência de cada um dos perigos com suas respectivas conseqüências;
- classificação da freqüência de ocorrência das causas e da severidade das conseqüências do evento indesejado (perigo), ambos com base em critérios pré-estabelecidos;
- determinação do grau de risco;
- elaboração das estatísticas dos perigos identificados por categorias de risco;
- análise e comunicação dos resultados.

A realização da análise propriamente dita é feita através do preenchimento de uma planilha de APP para cada subsistema (lavra, beneficiamento, disposição de rejeitos, apoio e transporte). A planilha adotada para a realização da APP contém sete colunas, as quais foram preenchidas conforme a descrição a seguir.

1ª coluna – Perigo: Fonte potencial para causar danos às pessoas, às instalações ou ao meio ambiente. É um evento indesejado.

2ª coluna – Causas: As causas responsáveis pela ocorrência do perigo, que podem envolver tanto falhas de equipamentos como falhas humanas.

3ª coluna – Conseqüências: As conseqüências associadas ao perigo caso ele venha de fato se efetivar.

4ª coluna – Freqüência: A freqüência de ocorrência das causas é definida conforme descrito na Tabela 3.

5ª coluna – Severidade: A severidade das conseqüências é definida conforme descrito na Tabela 4.

6ª coluna – Risco: O risco é estimado a partir da matriz de risco, pela combinação da frequência e da consequência (Figura 7).

7ª coluna – Recomendações: As recomendações propostas devem ser de caráter preventivo e/ ou mitigador.

É importante observar que cada classe de severidade e frequência deve ser adequada ao tipo de sistema e empreendimento analisado, para tornar a análise do risco mais precisa e menos subjetiva.

De acordo com a metodologia da APP, os cenários de acidente devem ser classificados em categorias de frequência, as quais fornecem uma indicação qualitativa da frequência esperada de ocorrência para cada um dos cenários identificados. A Tabela 3 mostra as categorias de frequências em uso atualmente empregadas para a realização da APP.

Tabela 3 – Categorias de frequências de ocorrência dos cenários

<b>Categoria</b>	<b>Denominação</b>	<b>Faixa de Frequência (anual)</b>	<b>Descrição</b>
A	EXTREMAMENTE REMOTA	$f < 10^{-4}$	Extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil do processo/ instalação.
B	REMOTA	$10^{-4} < f < 10^{-3}$	Não esperado ocorrer durante a vida útil do processo/ instalação.
C	IMPROVÁVEL	$10^{-3} < f < 10^{-2}$	Pouco provável de ocorrer durante a vida útil do processo/ instalação.
D	PROVÁVEL	$10^{-2} < f < 10^{-1}$	Provável de ocorrer durante a vida útil do processo/ instalação.
E	FREQÜENTE	$f > 10^{-1}$	Esperado ocorrer várias vezes durante a vida útil do processo/ instalação.

Fonte: Camacho, 2004

Esta avaliação de frequência poderá ser determinada pela experiência dos componentes do grupo ou por banco de dados de eventos indesejados (próprio ou de outras empresas similares).

Os eventos indesejados também devem ser classificados em categorias de severidade, as quais fornecem uma indicação qualitativa da severidade esperada de ocorrência para cada um dos cenários identificados. As categorias de severidade foram estabelecidas a partir das categorias amplamente utilizadas nas diversas áreas e com base na experiência da equipe de analistas de riscos, levando-se em consideração o foco ambiental e a especificidade de um empreendimento de mineração de carvão. A Tabela 4 apresenta as categorias de severidade (a serem) utilizadas para a realização da APP.

Tabela 4 – Categorias de severidade dos perigos identificados

Categoria	Potencial de dano à saúde humana e segurança	Intensidade de ação sobre o receptor ambiental	Tempo de restauração (anos)	Recursos financeiros mobilizados para recuperação	Comprometimento da imagem da empresa
Menor (1)	Não ocorrem danos/mortes de funcionários, de terceiros (não funcionários) e/ou pessoas (indústrias e comunidade); o máximo que pode ocorrer são casos de primeiros socorros ou tratamento médico menor.	Efeito restrito	< 1	Pequenos	Nenhum
Moderado (2)	Danos leves em empregados, prestadores de serviço ou em membros da comunidade.	Efeito moderado	1 e 2]	Moderados	Mínimo
Crítico (3)	Danos de gravidade moderada em empregados, prestadores de serviço ou em membros da comunidade (probabilidade remota de morte).	Efeito significativo	2 e 5]	Significativos	Crítico
Catastrófico (4)	Provoca mortes ou danos graves em várias pessoas (empregados, prestadores de serviços ou em membros da comunidade).	Efeito elevado	> 5	Volumosos	Catastrófico

Para estabelecer o nível de risco, utilizou-se uma matriz, indicando a freqüência e a severidade dos eventos indesejáveis, conforme indicado na Figura 7. Após esta fase, procedeu-se à análise dos resultados obtidos, listando-se as recomendações de medidas preventivas e/ ou mitigadoras pela equipe de APP.

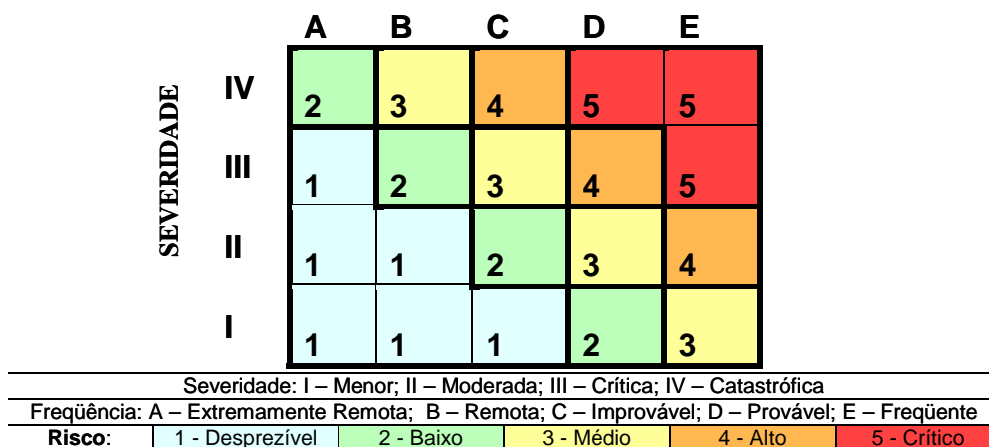


Figura 7 – Matriz de Classificação de Risco – Freqüência x Severidade

## C. Resultados

Baseado no resultado da APP, os perigos identificados foram classificados na matriz de risco, como apresentado na Figura 8. Os números apresentados em cada célula da matriz (Figura 8) representam a quantidade de perigos enquadrados em cada categoria de risco. Portanto, seis perigos foram enquadrados na categoria de risco crítico, sendo quatro classificados como freqüentes e de severidade catastrófica.

		A	B	C	D	E
		3	2	2	1	4
SEVERIDADE	IV	3	2	2	1	4
	III	1	0	1	3	1
	II	0	1	0	5	2
	I	0	0	1	1	4

Severidade: I – Menor; II – Moderada; III – Crítica; IV – Catastrófica  
 Freqüência: A – Extremamente Remota; B – Remota; C – Improvável; D – Provável; E – Freqüente

Perigos = 32 (100%)	Risco				
	1 Desprezível	2 Baixo	3 Médio	4 Alto	5 Crítico
	3 (9,4%)	4 (12,5)	12 (37,5)	7 (21,8)	6 (18,8)

Figura 8 – Estatística dos perigos por categoria de riscos

Entre os perigos identificados (32), 9,4% apresentam risco ambiental desprezível, 12,5%, baixo, 37,5%, médio, 21,8%, alto e 18,8%, crítico.

Os perigos (eventos indesejados) e as causas detectadas durante a elaboração da APP, cujo risco ambiental associado foi identificado como alto (4) e crítico (5), são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Causas normais e anormais de operação

Perigo	Causas normais	Causas anormais (acidentais)
<b>Lavra</b>		
1- Rompimento de aquífero	- Furação do teto p/ escoramento - Desmonte (detonação p/ avanço da galeria)	- Rompimento de pilar
2 – Geração de DAM	- Emprego de água na furação (teto/frente) - Infiltração de água de aquífero no teto	- Rompimento de aquífero
3 – Vazamentos de óleo hidráulico e óleo diesel e de graxas dos veículos e equipamentos	- Manutenção deficiente - Falta de treinamento - Desgaste precoce - Irregularidade do piso	
6 – Subsidência		- Dimensionamento inadequado de pilares - Escoramento inadequado - Incompetência da rocha (falhas e fraturas)
<b>Beneficiamento e Transporte</b>		
11 – Geração de ruídos	- Operação de britagem - Operação de jigagem - Manutenção deficiente	
12 – Geração de DAM	- Armazenamento de ROM e de produtos do beneficiamento no pátio - Carregamento e transporte do minério e rejeito	
14 - Derramamento de carvão no beneficiamento	- Processos de beneficiamento inadequados - Processos de beneficiamento não otimizados	- Ruptura de correia transportadora
16 - Explosão / incêndio na unidade de secagem		- Combustão espontânea de finos de carvão - Explosão do secador
19 – Incêndio no estoque de carvão granulado		- Condições atmosféricas - Teor de umidade do produto
<b>Disposição de Rejeitos</b>		
20 – Geração de DAM nas pilhas de rejeitos	- Características mineralógicas do rejeito - Condições climáticas - Cobertura vegetal e cobertura de solo inadequadas	- Falha de projeto - Falha nas operações - Tempo excessivo de exposição dos rejeitos às intempéries
21 – Combustão espontânea		- Falha de projeto do depósito - Falha nas operações - Tempo excessivo de exposição dos rejeitos às intempéries - Cobertura vegetal e cobertura de solo inadequadas
23 – Infiltração/ extravasamento de DAM nas bacias de decantação		- Falta de impermeabilização - Talude mal dimensionado - Falta de desassoreamento



## Gerenciamento do risco ambiental

Durante a realização da Análise Preliminar de Perigos, foram propostas recomendações de medidas para redução de risco. Estas recomendações têm como objetivo aprimorar as condições de segurança dos sistemas analisados, no sentido de reduzir a frequência esperada (medidas de prevenção) ou as conseqüências dos eventos indesejados (medidas de proteção).

Deve ser designado um setor da organização responsável pela avaliação e implementação das recomendações geradas para o gerenciamento ambiental dos riscos associados ao empreendimento.

Para o controle da implementação destas medidas, é sugerida a adoção, por parte da alta administração do empreendimento, de um sistema de gerenciamento que estabeleça responsabilidades e prazos de execução para cada uma delas, bem como um acompanhamento das implementações destas recomendações.

## Considerações finais

Um empreendimento de mineração pode ser considerado particularmente complexo do ponto de vista ambiental, na medida em que apresenta rigidez de localização. Com isso, pode ser impossível deixar de afetar ambientes sensíveis. Neste contexto, a gestão ambiental assume um papel fundamental na viabilização de empreendimentos minerais ambientalmente sustentáveis. Instrumentos que permitam aperfeiçoar esta gestão são, portanto, importantes e desejáveis.

A gestão de riscos ambientais, como proposta, embora aplicada para um empreendimento de mineração de carvão, pode ser considerada como instrumento eficiente para priorização de ações de caráter ambiental em qualquer empreendimento de mineração.

## Referências

- CAMACHO, E. N. Uma Proposta de Metodologia para Análise Quantitativa de Riscos Ambientais. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 2004.
- CETEM - Projeto conceitual para a recuperação ambiental da bacia carbonífera sul catarinense. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2000. CD-ROM.
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de Riscos. São Paulo, Cetesb, 1994.
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de Riscos. São Paulo, Cetesb, 2003.

- CREPALDI, C. Análise de parâmetros do monitoramento ambiental da mina do trevo. Siderópolis – SC, Universidade de São Paulo, EPUSP, 2003.
- HESTER, R. E.; HARRISON, R.M. (eds). Mining and its environmental impact, RSC - Royal society of chemistry, London, UK, 1994
- KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; KERN, M.; BURGER, H.; SCHUF, A.; PRISSANG, R.; SOUSA, M. L.; RODRIGUES, C. The coal bed methane potential of the Parana basin, Brazil. In: 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e gás, Rio de Janeiro – RJ, 2003.
- MILIOLI, G. Abordagem ecossistêmica para a mineração: uma perspectiva comparativa para Brasil e Canadá, Departamento de Eng. Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- SCHULTZE, J. P. Mineração e a questão ambiental: estudo do caso da Mina de Carvão de Candiota (RS). Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, out. 2001.
- SCHULTZE, J. P.; ISSOPO, J.P.S.; RENÊ, E. Contribuições para um programa de gerenciamento ambiental voltado à recuperação de áreas degradadas. Revista do CCEI, Editora da UNICAMP, v.3, n 3, pp. 16-22, jun, 1999.
- SERPA, R.R. Acidentes Industriais Ampliados. Ed. FIOCRUZ. 2000.
- TORRES, V. F. N.; GAMA, C. D. Engenharia ambiental subterrânea e aplicações, CETEM/ CYTED, Rio de Janeiro, 2005.
- US Environmental Protection Agency (a). Risk Assessment Guide for Superfund, vol I, 1989.
- US Environmental Protection Agency (b). Risk Assessment Guide for Superfund, vol II, 1989.

# Aplicação das geotecnologias à gestão ambiental da atividade minerária

Luzia Alice Ferreira de Moraes; Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos

As geotecnologias também conhecidas como “geoprocessamento”, são o conjunto de tecnologias utilizadas na coleta, processamento, análise, atualização e disponibilização de informações georreferenciadas.

Dentre as geotecnologias estão os GIS - Sistemas de Informação Geográfica, Cartografia Digital, Sensoriamento Remoto, Sistema de Posicionamento Global, Aerofotogrametria, Geodésia , Topografia Clássica, dentre outros.

A aplicação do geoprocessamento vem crescendo mundialmente e influenciando as áreas de cartografia, análise de recursos naturais, transportes, mineração, comunicações, energia, planejamento urbano e regional (Silva & Zaidan, 2004).

Um dos exemplos mais recentes são os trabalhos realizados pela Diretoria de Licenciamento e Qualidade Ambiental (DILIQ) do IBAMA, orientados para o controle da qualidade ambiental de áreas destinadas à exploração dos recursos naturais. Estes trabalhos se efetivam, mediante a apresentação de relatórios de monitoramento da qualidade ambiental, bem como com posteriores vistorias no local realizadas pelos técnicos do IBAMA, mas também com a utilização do geoprocessamento na organização dos dados e informações.

A viabilidade ambiental de um empreendimento depende dos Estudos de Impactos Ambientais (EIAs/RIMAs, planos de controle ambiental, planos de recuperação de áreas degradadas, entre outros), que são baseados nos métodos de avaliação de impactos ambientais.

Nesse contexto, o geoprocessamento é uma ferramenta tecnológica de grande potencialidade que pode contribuir tanto na fase de diagnóstico ambiental, antes da implantação da atividade minerária, como também nas fases posteriores de implantação, operação e licenciamento ambiental.

Este capítulo apresenta algumas das possibilidades de uso do geoprocessamento como ferramenta de apoio nas fases de implantação da atividade de exploração mineral.

## **Atividade minerária**

A mineração é a base da sociedade industrial moderna, fornecendo matéria-prima para todos os demais setores da economia, sendo, portanto essencial ao desenvolvimento.

No entanto, por se tratar da extração de recursos naturais não renováveis da crosta terrestre, a mineração geralmente é vista por uma grande parcela da sociedade, como sendo uma atividade altamente impactante e não sustentável.

No Brasil, como na maioria dos países, os depósitos minerais (jazimentos) são bens públicos, extraídos por concessão do Estado. Os efeitos ambientais e socioeconômicos decorrentes do aproveitamento destes jazimentos dependem, principalmente, da forma como esta atividade será planejada e, fundamentalmente, como será desenvolvida.

A atividade minerária possui etapas sucessivas que vão desde a pesquisa mineral, implantação, operação e desativação.

O controle da atividade de exploração mineral ou mineração é realizado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral/ DNPM, do Ministério de Minas e Energia - MME, em consonância com o licenciamento ambiental, segundo regulamentação dos órgãos estaduais, distrital e federal de meio ambiente.

### **Indicadores da atividade de mineração**

Levando-se em consideração os indicadores PEIR: Pressão, Estado, Impacto e Resposta pode-se levantar algumas fases em que em que a atividade minerária causa impactos ou modificações no ambiente.

A pressão da atividade de mineração inicia quando determinado minério é descoberto, mas também com as condições de exploração no ambiente e da gestão da atividade, que poderá causar maiores ou menores impactos no meio.

Alguns tipos de pressão dentre os apontados na Tabela 1 são: o tipo de extração e beneficiamento desse minério, a proximidade de áreas urbanas, de unidades de conservação, de terras indígenas, de terras de valor arqueológico. Leva-se em consideração também as condições abióticas do local como: o clima, a topografia, os aquíferos.

A pressão de qualquer atividade no meio modificará o estado desse ambiente, o que significa uma alteração na qualidade do meio: solo, água e ar.

A implementação da atividade minerária pode, ainda, causar vários impactos no ambiente como: desmatamento, queimada, poluição, erosão, assoreamento, contaminação, geração de rejeitos da atividade extrativa, e outros resíduos, emissões atmosféricas, dentre outros. A Tabela 1 ilustra alguns indicadores da atividade de mineração, quando da implantação do empreendimento.

Tabela 1 – Indicadores PEIR das atividades minerárias

Indicadores da Atividade de mineração	
Pressão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extração e beneficiamento dos minérios</li> <li>• Proximidade de áreas urbanas (habitadas)</li> <li>• Proximidade de áreas de proteção ambiental</li> <li>• Proximidade de terras indígenas</li> <li>• Proximidade de terras de valor arqueológico</li> <li>• Topografia</li> <li>• Condições climáticas</li> <li>• Biodiversidade</li> <li>• Natureza mineralógica do depósito</li> <li>• Uso imediato na construção civil (areia, brita e argila)</li> </ul>
Estado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualidade do ar</li> <li>• Qualidade do solo</li> <li>• Qualidade da água</li> <li>• Ruído</li> <li>• Paisagem</li> <li>• Erosão</li> <li>• Uso do solo e da água</li> <li>• Assoreamento</li> </ul>
Impacto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desmatamentos</li> <li>• Queimadas</li> <li>• Alteração do regime hidrológico dos cursos d' água</li> <li>• Processos erosivos</li> <li>• Mortalidade da ictiofauna</li> <li>• Fuga de animais silvestres</li> <li>• Problemas de saúde na população</li> <li>• Poluição de águas superficiais</li> <li>• Aumento da turbidez das águas</li> <li>• Rejeitos</li> <li>• Contaminação das águas pela drenagem ácida</li> <li>• Emissão de particulados</li> <li>• Degradação do patrimônio espeleológico e arqueológico</li> </ul>
Resposta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proteção e conservação</li> <li>• Controle e monitoramento</li> <li>• Descomissionamento e fechamento</li> <li>• Remediação e restauração</li> </ul>

## **Aplicação do geoprocessamento nas diferentes fases de implantação da atividade minerária**

O geoprocessamento utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica (Moreira, 2005). As ferramentas computacionais para o geoprocessamento, chamadas de sistemas de informação geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados (Câmara e Medeiros, 1998).

Normalmente, os primeiros estudos para avaliação dos depósitos minerais são utilizados para justificar os investimentos em sondagens ou em programas geoquímicos ou geofísicos.

Essas avaliações ou estudos serão baseados nas informações disponíveis sobre o local na época da concepção do projeto, tais como:

- geologia, mineralogia, geoquímica, geografia e infra-estrutura do depósito;
- altimetria e hidrologia do local de implantação;
- aspectos técnicos da mineração, processamento e transporte.

Segundo Florenzano (2002), a delimitação por meio de imagens de área com provável ocorrência de minerais diminui a quantidade de locais pesquisados em campo, o que permite uma economia de tempo e custo com esse tipo de tarefa, que envolve a prospecção mineral.

As técnicas de geoprocessamento podem ser utilizadas, desde a fase preliminar do planejamento do projeto da atividade minerária, durante a exploração propriamente dita mas também para o monitoramento de resíduos (Frauendorf et al.2005).

A Tabela 2 ilustra a aplicação do geoprocessamento nas quatro fases de implantação da atividade minerária: diagnóstico, implantação, operação e descomissionamento ou fechamento do empreendimento.

Tabela 2 – Aplicação de técnicas de geoprocessamento na implantação da atividade minerária

Fases de Implementação	Aplicação do Geoprocessamento
Diagnóstico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escolha e mapeamento das áreas com potencial para a atividade minerária (definição das reservas minerais)</li> <li>• Mapeamento de uso, ocupação e aptidão do solo</li> <li>• Escolha e mapeamento de pontos para controle e monitoramento da qualidade ambiental (solo, água e ar)</li> <li>• Diagnóstico da Paisagem</li> <li>• Determinação de processos erosivos</li> <li>• Mapeamento da hidrologia da área de influência (rios, açudes, córregos)</li> <li>• Estudo da planialtimetria do local; estudos geomorfológicos (caso a área esteja em planície, entre colinas, etc)</li> <li>• Proximidade de áreas urbanas (adensamento urbano)</li> <li>• Biota, mapeamento da fauna e da flora da área de implantação do empreendimento</li> <li>• Mapeamento de pontos notáveis como: patrimônio arqueológico, espeleológico</li> </ul>
Implantação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rejeitos da construção</li> <li>• Desmatamentos</li> <li>• Queimadas</li> <li>• Estudo e mapeamento da Alteração do regime hidrológico dos cursos d'água</li> <li>• Mapeamento das alteração do perfil topográfico</li> <li>• Mapeamento das Emissões atmosféricas</li> <li>• Mapeamento de Processos erosivos (observar e avaliar presença ou ausência de erosão laminar e em sulcos)</li> <li>• Problemas de saúde na população e dos trabalhadores</li> <li>• Rejeitos</li> <li>• Águas superficiais e subterrâneas</li> <li>• Ar (emissão de particulados, poluição)</li> <li>• Degradação do patrimônio espeleológico e arqueológico</li> <li>• Ruídos</li> <li>• Mapeamento e controle dos tipos de lavras: pedreiras, cavas, lavras em fatias, dragagens e lavras subterrâneas</li> <li>• Lavra subterrânea (danos às rochas adjacentes por desmoronamentos e explosões)</li> </ul>
Operação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoramento da progressão das lavras</li> <li>• Definição de área e volume da bacia de rejeitos</li> <li>• Controle</li> <li>• Monitoramento da área de lavra (praça e taludes das bancadas)</li> <li>• Monitoramento dos depósitos de estéril e rejeitos</li> <li>• Águas superficiais e subterrâneas (efluentes, resíduos, contaminação pela drenagem ácida)</li> <li>• Controle das emissões dos empreendimentos de extração mineral de acordo com o tipo de beneficiamento</li> </ul>
Descomissionamento e fechamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controle e monitoramento dos locais revegetadas</li> <li>• Gestão de resíduos no fechamento</li> <li>• Ordenamento territorial</li> <li>• Zoneamento ecológico/econômico</li> <li>• Programas de estabilização de áreas, e de reconformação da drenagem para condições de longo prazo</li> <li>• Águas superficiais e subterrâneas (efluentes, resíduos, contaminação pela drenagem ácida)</li> <li>• Remediação</li> <li>• Restauração</li> </ul>

## Etapas metodológicas do geoprocessamento

### Aquisição de informações

- Dados matriciais ou raster – são as imagens de satélite, ortofotos, cartas topográficas ou mapas temáticos tais como: de geologia, de geomorfologia, de pedologia, de população, de áreas vegetadas, entre outros
- Dados vetoriais (ex: hidrografia, pontos de sondagens, etc)
- Dados numéricos – são os que possuem uma variação contínua de seus valores numéricos em função de sua posição na superfície (ex.: altimetria, pH, etc)
- Dados alfanuméricos, também chamados de dados tabulares (ex: índices pluviométricos, temperatura, umidade, etc)

### Vetorização

A vetorização pode ser do tipo manual, semi-automática ou automática. A obtenção dos dados vetoriais pode ser feito em formato digital (ex. formato shp, dwg, dxf) ou podem ser digitalizados, a partir de um mapa temático ou uma carta topográfica.

A vetorização manual envolve uma etapa preliminar para escanear o documento original (mapa, carta topográfica etc), utilizando essa imagem como *background* ou pano de fundo. Os vetores são obtidos por meio da digitalização sobre a imagem apresentada na tela de computador. A digitalização também pode ser realizada utilizando mesa digitalizadora.

A vetorização semi-automática é feita combinando os dois métodos, ou seja, utilizando programas específicos mas com a intervenção conjunta do usuário. Quanto mais superposições de feições diferentes existirem no desenho original, mais dificuldade se terá em utilizar o processo automático.

No processo automático, o programa assume determinadas tarefas e realiza vetorizações sem o auxílio do operador. Este processo mais automatizado é muito dependente do tipo de feição que deve ser vetorizada. É normalmente empregado em feições contínuas e sem superposição como, por exemplo, as curvas de nível.

### Manipulação de imagens

As imagens produzidas por sensores remotos, sejam elas fotografias aéreas ou imagens de satélites, apresentam distorções espaciais. Esses erros podem ser resultantes da rotação ou curvatura da Terra, mas também de distorções topográficas, variações de altitude, entre outros.



A correção geométrica ou georreferenciamento é feita pelo ajuste de uma imagem ou arquivo vetorial a um, espaço definido por um sistema de coordenadas de referência. A correção geométrica se faz pela indicação do sistema de referência (ex. latitude/longitude), dos sistemas de projeção (ex. UTM), e das coordenadas dos limites esquerdo, direito, superior e inferior.

Antes, porém, que ocorra a manipulação da imagem é feito um ajuste de histograma para melhorar a qualidade dessa imagem. A manipulação de contraste pode ser efetuada através de várias opções tais como: MinMax, Linear, Raiz Quadrada, Quadrado, Logaritmo, entre outros. Cada opção para contraste utiliza uma equação matemática diferente.

## Classificação

A classificação é o processo que permite a extração de informações de imagens para reconhecer padrões e/ou objetos homogêneos. Consiste no estabelecimento de um processo de decisão no qual um grupo de *pixels* é definido como pertencente a uma determinada classe. A partir da classificação pode-se identificar as áreas ocupadas pelas diferentes classes temáticas.

A classificação estatística é o procedimento convencional mais utilizado na análise digital de imagens. A informação de uma cena pode ser representada por uma imagem espectral, na qual cada "*pixel*" tem as coordenadas espaciais  $x$ ,  $y$  e a coordenada espectral  $L$ , que representa a radiância de um alvo no intervalo de comprimento de onda de uma banda espectral. É característico, ainda, que cada "*pixel*" de uma banda possua uma correspondência espacial com um outro "*pixel*", em todas as outras bandas. Assim, para uma imagem de  $k$  bandas, existem  $k$  níveis de cinza associados à cada "*pixel*", sendo um para cada banda espectral.

Segundo alguns autores (Venturieri & Santos, 1998), o método de classificação é dito supervisionado, quando existe algum conhecimento prévio de algumas áreas em que se deseja trabalhar, o que permite a seleção de amostras de treinamento confiáveis. A vantagem do uso da classificação supervisionada é que o analista pode eliminar, em alguns casos, a ida ao campo.

O treinamento supervisionado de classificação (Richards, 1999) deve ser realizado por meio da escolha de amostras significativas e, ao mesmo tempo, incluir toda a variabilidade dos níveis de cinza do tema em questão, para evitar/diminuir a ocorrência de confusão dos alvos espectrais.

O método MAXVER é um método de classificação supervisionada que classifica a imagem "*pixel a pixel*", considerando a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos (Schowengerdt, 1997, Blaschke & Strbl, 2002; Atkinson, 2004).

O método é dito não-supervisionado quando o classificador não utiliza, *a priori*, algum conhecimento sobre as classes existentes na imagem e define, sem a interferência do analista, a estratificação da cena, atribuindo a cada *pixel* uma determinada classe.

Na classificação não-supervisionada pode-se utilizar algoritmos como o Iseseg por meio do qual a imagem é segmentada em regiões. Entende-se por regiões um conjunto de "*pixels*" contíguos, que se espalham bidirecionalmente e que apresentam uniformidade. A região agrupa *pixels* semelhantes que, dependendo do grau de similaridade, poderá abranger diferentes extensões de áreas. A medida de similaridade é baseada na distância euclidiana entre os valores médios dos níveis de cinza de cada região. Duas regiões são consideradas distintas se a distância entre as médias for superior ao limite de similaridade escolhida.

A partir da classificação da imagem pode-se determinar, por exemplo, as áreas de lavra, de recuperação, de uso restrito, entre outras.

### **Modelo Numérico de terreno**

O modelo numérico de terreno (MNT) é a representação matemática da distribuição espacial de uma determinada característica, que está vinculada a uma superfície real. Dentre alguns de seus usos pode-se citar: armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos, elaboração de mapas de declividade, análise de variáveis geofísicas e geoquímicas, apresentação tridimensional dos alvos de interesse.

É possível gerar os MNT a partir de uma grade de pontos, regular e irregular, que permite calcular áreas, volumes, gerar imagens em 3D, relevo sombreado, vista perspectiva, vista panorâmica, fatiamentos nos intervalos desejados, gerar mapas de declividade, perfil, aterros, etc.

As grades retangular e triangular são geradas a partir dos dados amostrados. A quantidade de dados está diretamente relacionada à qualidade do produto final.

Um dos métodos de modelagem de superfície é o da triangulação de Delaunay. Esta modelagem, considerando as arestas dos triângulos, permite que as informações morfológicas importantes, como as discontinuidades que são representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas durante a geração da grade triangular, possibilitando, assim, modelar a superfície do terreno, preservando as feições geomorfológicas da superfície.

## Considerações finais

O Sistema de Gestão Ambiental das empresas de mineração compõe o Sistema Integrado de Gestão que também envolve as Gestões de Saúde Ocupacional, Segurança e Qualidade.

Esta premissa está fundamentada no compromisso da empresa de mineração em ter uma atuação socialmente responsável, ambientalmente correta e economicamente viável, que são princípios básicos do desenvolvimento sustentável.

A Gestão Ambiental compreende, pois, a identificação, o tratamento e o gerenciamento dos impactos resultantes da operação da empresa, que está sempre conciliada com a proteção responsável do meio ambiente.

A partir da utilização de geotecnologias associadas a outras de controle ambiental, pode-se realizar a gestão de uso de solos, de recursos hídricos, de recursos atmosféricos e de resíduos, sendo que deste modo, também se pode racionalizar o uso dos recursos naturais e energéticos.

A gestão da qualidade do ar, do solo e da água na região minerária pode ser avaliada a partir de medições e do constante monitoramento, que é realizado em estações de controle mapeadas, podendo-se identificar focos, em áreas comprometidas, como também dispersões de poluentes, sendo, portanto, ações que nos permitem a caracterização, redução e controle das fontes de emissão.

A partir da sobreposição de camadas matriciais e vetoriais pode-se então obter um mosaico onde se visualiza a situação ambiental do local de implantação da atividade. Os resultados se referem ao acompanhamento dos processos erosivos e assoreamentos, mapeamentos das sondagens, definição das reservas de minérios para lavra, acompanhamento e medição de pilhas de rejeitos, monitoramento de poluição, estudos de remediação de contaminação.

As principais tendências na gestão ambiental na mineração, como para todos os demais empreendimentos, apontam na direção de que as empresas tenham sistemas de gestão ambiental formais e certificados, ao menos segundo a ISO 14.000.

Deste modo, a gestão ambiental da atividade minerária, implica em obter respostas eficientes e eficazes que visem a conservação do ambiente, o controle dos resíduos e a remediação ou restauração dos prováveis danos. A reabilitação concomitante à lavra evita o acúmulo dos passivos ambientais gerados pelas áreas degradadas.

Este capítulo mostra que as tecnologias de geoprocessamento podem auxiliar de modo eficiente e eficaz, no gerenciamento e zoneamento da atividade minerária, mas também em várias outras atividades que causem impactos ambientais.

A disponibilidade de softwares, inclusive gratuitos como o SPRING, facilita a utilização dessa ferramenta tanto em nível educacional, como de pesquisa e consultoria. O banco de dados pode ser atualizado constantemente, facilitando a análise evolutiva da situação.

A possibilidade de se trabalhar com o gerenciamento de grande base de dados, a agilidade na execução das tarefas e a possibilidade de se trabalhar com redes locais e remotas, podendo interligar dados alfanuméricos com a base cartográfica, permite as mais variadas análises conjuntas. Isso possibilita a visão mais ampliada e embasada da situação ambiental, a partir da integração e correlação dos vários parâmetros analisados.

## Referências

- Atkinson, P.M. Spatially weighted supervised classification for remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5: 277-291, 2004.
- Blaschke T., J. Strobl,. What ´s wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *GeoBIT/GIS: J. Spatial Inform. Decision Making*, 6/2001, p..12-17, 2002.
- Câmara G.; Medeiros J. S.: Modelagem de dados em geoprocessamento, *In: ASSAD, E.D.; SANO, E.E. eds. Sistemas de Informação Geográfica: Aplicações na Agricultura*, Brasília: Embrapa, p.47-66, 2005.
- Florenzano, T. G. *Imagens de Satélite para Estudos Ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- Frauendorf, J., C. Glässer, C. Olbert & J. Fisher. Monitoramento hiperspectral de lagoas de resíduos de mineração de linhita a céu aberto com métodos inovadores. *In: Sensoriamento Remoto e Sig Avançados*, p: 61-70, 2005.
- Moreira, M. A. *Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação*, Viçosa:Ed.UFV, 2005
- Richards, J.A. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction* (3rd revised and enlarged edition). Springer-Verlag, Heidelberg, 1999.
- Schowengerdt, R.A. *Remote Sensing, models and methods for image processing*. Academic Press, 2a. edição, 1997.
- Silva J. X. da , Zaidan, R. T. *Geoprocessamento e Análise Ambiental-Aplicações* , Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.
- Spring. *Manual do Spring*. Disponível em :<http://www.inpe.br/spring>
- Venturieri, A.; Santos, J.R.dos. Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal. *In: Sistemas de Informações Geográficas: Aplicação na Agricultura*, Brasília: Embrapa, 351-371p, 1998.

# Projeto de recuperação ambiental da bacia carbonífera de Santa Catarina

Cléber José Baldoni Gomes; Jonathan Jurandir Campos; Roberto Romano Neto; Márcio Zanuz

A mineração de carvão em Santa Catarina se desenvolveu, em seu período inicial, de 1895 a 1945, com a produção de carvão para fins energéticos. Os principais mercados eram a Central do Brasil (ferrovias) e a Companhia de Força e Luz do Rio de Janeiro (iluminação pública). De 1945 a 1990, a atividade tomou impulso com a implantação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). As usinas nacionais compravam todo o carvão metalúrgico produzido na região para suprir a produção nacional de aço e o carvão energético, produzido no lavador de Capivari. O subproduto da fração metalúrgica era destinado ao consumo no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda.

O choque do petróleo, na década de 1970, fez aumentar o consumo do carvão energético, que passou, graças aos subsídios, a ser utilizado no país inteiro como energético aplicado à produção, ao consumo e ao transporte, substituindo o óleo combustível. Neste período, o carvão passou a ser explorado em grandes minas, amplificando os problemas relacionados com a higiene e a saúde do trabalhador, aumentando os acidentes e propiciando o aparecimento da pneumoconiose entre os trabalhadores. No meio ambiente, se alastraram os problemas de contaminação decorrentes da disposição descontrolada de rochas da cobertura das camadas e rejeitos do beneficiamento do carvão, que contém minerais sulfetados e que provocam a acidificação e a contaminação dos recursos hídricos.

A partir do ano de 1990, com a desregulamentação promovida pelo governo Collor, o setor perdeu repentinamente o mercado de carvão metalúrgico, e as empresas enfrentaram sérias dificuldades, com a

redução de 60% do seu faturamento. A situação só veio a se estabilizar a partir de 1997 quando, com a conclusão da usina Jorge Lacerda IV, foi ampliado o consumo de carvão energético.

O setor carbonífero catarinense começou a se organizar somente a partir de 1945, com a criação, dentro do Sindicato Nacional da Indústria da Extração de Carvão (SNIEC), da Comissão Executiva de Santa Catarina. Em outubro de 1987, a Comissão se transformou em ACIEC - Associação Catarinense da Indústria de Extração do Carvão que, em outubro de 1989, tornou-se o SIECESC - Sindicato da Indústria da Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina. O SIECESC reúne hoje as empresas carboníferas Rio Deserto, Metropolitana, Criciúma, Cooperminas, Comin, Minageo, Catarinense, Belluno, Siderópolis e Gabriella.

Com o aumento do mercado de carvão energético, as empresas remanescentes retomaram os projetos de recuperação de passivos e reduziram significativamente seu impacto ambiental. Isto se deu principalmente a partir da adoção e aprimoramento de controles nos depósitos de rejeitos, na mineração sem desmonte de pilares, no controle da drenagem, na implantação de estações de tratamento de efluentes e na introdução de Sistemas de Gestão Ambiental em todas as unidades das empresas filiadas ao SIECESC. Este trabalho já resultou na certificação ISO – 14.001 de duas empresas de mineração de carvão no Brasil, sendo que outra deve ser certificada em breve e as demais têm a meta de certificação até meados de 2008.

Em 2006, as empresas carboníferas assinaram um Termo de Ajustamento de Conduta com a Fundação do Meio Ambiente – FATMA, através do qual se comprometeram, num prazo de 12 meses, a enquadrar todas as unidades que apresentavam ainda algum desvio com relação aos padrões ditados pela resolução 357/2005 do CONAMA e decreto estadual 14.250/81. Até maio de 2007, todas as unidades deverão estar adequadas e devidamente licenciadas. As novas unidades em implantação seguem rigorosamente o processo de licenciamento requisitado pela Fundação do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina – FATMA, que é acompanhado de perto pelo Ministério Público Estadual e Federal.

Com relação aos passivos ambientais, as empresas vêm desenvolvendo, desde maio de 2000, o *Projeto de Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera do Sul de Santa Catarina*, elaborado pelo Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT, em parceria com o Canada Center for Mineral and Energy Technology - CANMET, e com apoio do Núcleo de Meio Ambiente do SIECESC. O desenvolvimento deste projeto consiste numa ação conjunta do setor na busca do cumprimento da sentença da Justiça Federal, publicada em janeiro de 2000, que condenou solidariamente a União Federal, o Estado de Santa Catarina e as empresas mineradoras. O projeto, que não encontra paralelo na América Latina, está estruturado nas linhas de drenagem superficial, organismos vivos, mapeamento, geologia e hidrogeologia, engenharia de reabilitação, biologia e revegetação e aspectos socioeconômicos.

O trabalho técnico é coordenado pelo Núcleo de Meio Ambiente do SIECESC, apoiado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil. As competências necessárias são obtidas mediante convênios com instituições, como a Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e Unisul - Universidade do Sul de Santa Catarina. Além de universidades, também são firmados convênios com organismos estaduais, como a Fundação do Meio Ambiente – FATMA, federais, como o Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM e o Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, e internacionais, como o Central Mining Institute da Polônia, a universidade de Saint-Etienne na França e o Departamento de Proteção Ambiental da Pensilvânia, nos Estados Unidos.

A recuperação ambiental tem como seu principal indicador a melhoria da condição das águas superficiais. Para isto é mantido um sistema de monitoramento em 140 pontos espalhados pelas três bacias hidrográficas atingidas (Rios Araranguá, Tubarão e Urussanga).

A cartografia está apoiada em ortofotocartas na escala 1:5.000. As informações produzidas estão sendo estruturadas num Sistema de Informações Geográficas com base no ArcView®. O acompanhamento dos trabalhos de reabilitação é realizado através de fotos aéreas e de imagens de satélite de alta resolução espacial QuickBird®.

Existe ainda na região uma diversidade de fontes de contaminação já identificadas pelos levantamentos da CPRM. Além da mineração do carvão, atividades como a rizicultura, a fumicultura, a avicultura, a suinocultura, a atividade industrial (cerâmica, metalúrgica, plásticos, tintas e solventes, alimentos e metal-mecânica), os curtumes, os cemitérios e, principalmente, os dejetos urbanos que são lançados, na sua maioria, *in natura* nos rios. A interação destes elementos potencializa a degradação ambiental verificada na região.

Em virtude da diversidade das fontes de contaminação, os mapeamentos de hidrologia e hidrogeologia são realizados em toda extensão das bacias hidrográficas e buscam a interação entre essas fontes. Como resultado, tem-se a produção de mapas de fontes de poluição, de cadastro de pontos de captação e uso de águas subterrâneas, mapa hidrogeológico, mapa hidroquímico das águas subterrâneas e de vulnerabilidade dos aquíferos.

Na região carbonífera, existe uma grande quantidade de rejeitos com teores baixos de carvão que podem ser valorizados econômica e ambientalmente. Um dos projetos para a utilização dos rejeitos carbonosos é a usina termelétrica a leito fluidizado da USITESC, que prevê a queima de um combustível composto pela mistura de R.O.M. (Run Of Mine) e até 30% de rejeitos antigos. O processo de retirada do enxofre possibilitará a produção de matéria-prima para a fabricação de fertilizantes (sulfato de amônia). A cinza resultante da queima e oriunda do processo de dessulfuração poderá ser utilizada na recuperação de áreas degradadas e como fonte de neutralização da drenagem ácida.

A resolução dos problemas ambientais causados pela mineração de carvão na região sul do estado de Santa Catarina não pode ser feita de forma isolada, e sim pela interação de recursos entre as partes interessadas e pela soma de pequenas ações objetivas. O desenvolvimento e a adaptação de tecnologias, a formação de massa crítica e o envolvimento da comunidade local são passos fundamentais para a obtenção dos resultados esperados.

## **Mapeamento das áreas impactadas**

Em 2000, na etapa conceitual do projeto, foi elaborado um mapa que consolidava as bases cartográficas do IBGE na escala 1:50.000, na área da bacia carbonífera, e reunia as informações levantadas pela Agência de Cooperação Internacional do Japão – JICA em 1998, com aquelas contidas em trabalho do DNPM de dezembro de 1999, na bacia hidrográfica do rio Araranguá, e que consistiu na diagnose dos impactos das atividades de mineração e beneficiamento de carvão na região sul do estado de Santa Catarina.

Este mapa representou a síntese dos conhecimentos levantados até aquele momento. Porém, apesar de embasado em levantamento aerofotogramétrico de 1996, reconhecidamente, não representava a totalidade do impacto causado pela mineração de carvão, tendo em vista que este mapa se baseou somente nas informações da época do levantamento e não abrangia toda a extensão da bacia carbonífera, além de não considerar a presença de minas subterrâneas e não estar apoiado em levantamentos de campo.

O mapa do DNPM, realizado a partir de voo aerofotogramétrico da USAF em 1966, centrava suas atenções no trabalho de monitoramento da qualidade das águas superficiais e utilizava-se da base cartográfica do IBGE. Este mapa utilizou o mesmo tema das áreas impactadas pela mineração de carvão do mapa da JICA publicado em 1998. Nenhum destes trabalhos, portanto, representava integralmente o impacto causado pelas atividades de mineração de carvão na região sul de Santa Catarina ao longo dos 120 anos de sua existência.

Trabalhos anteriores (ECP, 1982 e JICA, 1998) descrevem uma grande quantidade de rios atingidos por drenagem ácida nas bacias hidrográficas dos Rios Araranguá, Tubarão e Urussanga, porém não quantificando a extensão de cursos d'água impactados e a real extensão do impacto sobre os rios destas bacias. A contaminação dos recursos hídricos tem origem na drenagem ácida proveniente de áreas mineradas a céu aberto, depósitos de rejeitos, além de lagoas ácidas e minas subterrâneas.



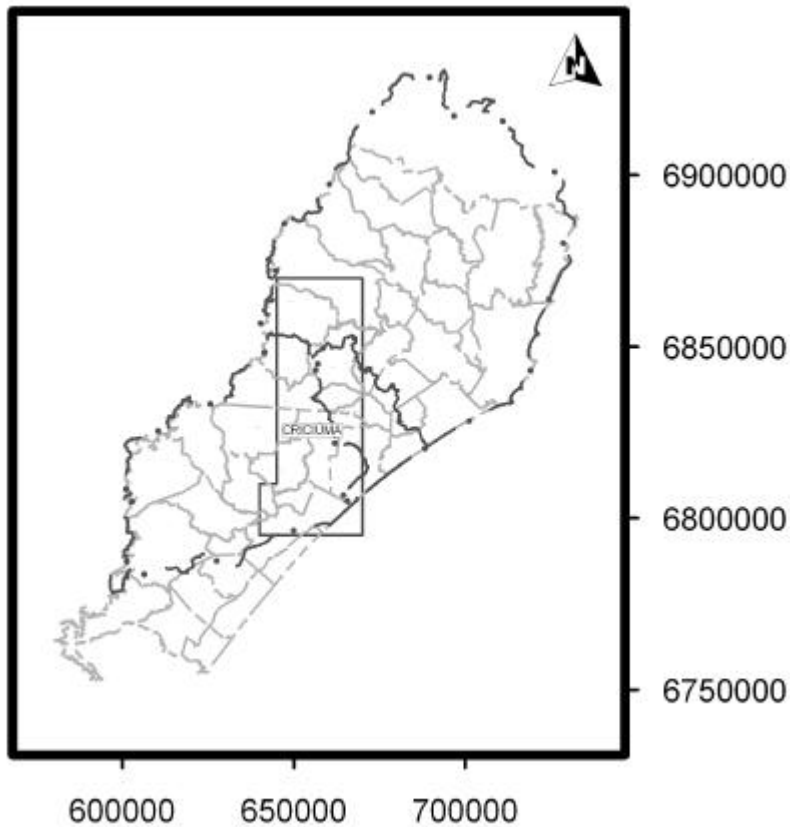


Figura 1 - Localização das bacias hidrográficas no sul de Santa Catarina e da área do projeto de recuperação ambiental

O mapa da Figura 1 mostra as três bacias hidrográficas: ao sul, a bacia do Rio Araranguá; a nordeste, a bacia do Rio Tubarão; e a menor, mais ao centro, a bacia do Rio Urussanga. A área das três bacias hidrográficas somadas totaliza 8.948,92 km<sup>2</sup>. O polígono definido como Bacia Carbonífera tem uma área aproximada de 1.200 km<sup>2</sup> e foi individualizado em 17 distritos que juntos somam uma área de aproximadamente 465 km<sup>2</sup>. Nestes distritos, foram mapeados aproximadamente 5.500 ha (55 km<sup>2</sup>) diretamente afetados em superfície pela mineração de carvão.

Na região são diretamente atingidos 26 municípios, sendo quatro da Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense – AMESC (Maracajá, Araranguá, Meleiro e Turvo), onze da Associação dos Municípios da Região Carbonífera - AMREC (Orleans, Lauro Müller, Urussanga, Treviso, Siderópolis, Cocal do Sul, Morro da Fumaça, Nova Veneza, Criciúma, Içara e Forquilha) e nove da Associação dos Municípios da Região de Laguna - AMUREL, (Capivari de Baixo, Gravatal, Imaruí, Imbituba, Pedras Grandes, Sangão, Treze de Maio, Jaguaruna, Laguna, São Ludgero e Tubarão), nos quais vivem 724.353 habitantes, de acordo com os dados do Censo IBGE de 2004.

O projeto conceitual elaborado pelo CETEM salientou a necessidade de um mapa que representasse fielmente a localização e a extensão das áreas impactadas pela mineração de carvão como peça básica e fundamental para a elaboração de um plano integrado que contemplasse a recuperação ambiental e o atendimento da sentença.

A realização deste trabalho foi possível através de um voo aerofotogramétrico na escala 1:20.000, realizado em janeiro e fevereiro de 2002 e financiado pela Secretaria de Minas e Metalurgia do Ministério do Meio Ambiente e pelo DNPM. A partir deste voo, foram produzidas ortofotocartas na escala 1: 5.000 com curvas de nível de 5 em 5 metros, que se constituíram na nova base cartográfica para os trabalhos de recuperação ambiental e para a complementação do mapa de localização das áreas impactadas pela mineração.

A compilação das informações disponíveis nos mapas de acompanhamento da lavra das empresas e a identificação das atividades de mineração na análise multitemporal das diversas fotos aéreas tomadas em vôos realizados em 1956-CEPCAN, 1966-USAF, 1976/78, 1980, 1996-JICA e 2002-SMM/DNPM permitiram o mapeamento, na base das ortofotocartas, da totalidade do impacto superficial oriundo da mineração de carvão na bacia carbonífera do sul de Santa Catarina.

A partir da compilação deste mapa foi iniciado o trabalho de validação de campo das áreas impactadas que, além de conferir a dimensão e a natureza dos impactos, possibilita a identificação dos elementos necessários para a complementação da diagnose, permitindo a definição das primeiras ações de monitoramento ou mitigação. Com a finalização da validação de campo, em dezembro de 2007, será possível completar o inventário do impacto causado pela atividade carbonífera.

## **Projeto de monitoramento da qualidade de águas superficiais**

O monitoramento da qualidade dos recursos hídricos é um instrumento de avaliação da qualidade ambiental e é feito a partir da caracterização físico-química e de medidas de vazão realizadas em 140 pontos de amostragem localizados nos cursos d'água que drenam áreas antigas e atuais de mineração de carvão.

Em alguns rios também são feitas amostragens para análises bacteriológicas. O monitoramento é realizado uma vez a cada semestre, de acordo com o regime hidrológico.

Com os resultados das análises físico-químicas, são determinadas as cargas de acidez e de metais dos rios, o que permite a localização das principais fontes de poluição dos recursos hídricos superficiais e sua participação no impacto ambiental da bacia.

O monitoramento dos rios é essencial como instrumento de avaliação da eficácia dos trabalhos de reabilitação das áreas degradadas pela mineração de carvão em curso na bacia carbonífera de Santa Catarina.

## Histórico

O trabalho de monitoramento das águas superficiais foi iniciado em março de 2002 através de convênio de cooperação técnica entre o DNPM, o CNPq, a UNESCO e a UNISUL. Esse convênio estendeu-se até dezembro de 2003, tendo sido realizadas 10 campanhas de amostragem.

O projeto teve continuidade nos anos de 2004 e 2005 através de convênio do DNPM com a SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina. As campanhas 11, 12 e 13 foram realizadas nesta fase.

A partir da não renovação do convênio com o DNPM, os recursos para a realização do monitoramento passaram a ser integralmente suportados pelo SIECESC, tendo sido realizadas, em 2006, as campanhas 14 e 15.

## Metodologia

Inicialmente, foram projetadas 299 estações de amostragem e medidas de vazão nas três bacias hidrográficas (Araranguá, Urussanga e Tubarão). Destes 299 pontos, 276 foram, efetivamente, monitorados em alguma das campanhas realizadas.

O número de estações foi reduzido para 140, eliminando-se os pontos com influência das variações de maré nas bacias do Araranguá e Tubarão e aqueles com representatividade local. A distribuição dos 140 pontos (Figura 2) foi feita de modo que todas as áreas impactadas pela mineração de carvão sejam monitoradas a montante e a jusante.



Figura 2 - Monitoramento ao longo das bacias hidrográficas do projeto

A medição de vazão é realizada conforme norma da ANA (Agência Nacional de Águas). O procedimento consiste na divisão da seção do rio em uma série de linhas verticais paralelas distribuídas uniformemente, de modo a garantir representatividade das variações existentes no leito e nas laterais do curso d'água. O espaçamento horizontal inicia com 0,20 m da margem, aumentando para intervalos de 1 m ao longo da seção transversal. Em trechos de rios com lâmina d'água superior a 1 m, as medidas são feitas com auxílio de embarcação.

Tabela 1 – Parâmetros medidos na 15ª campanha, realizada em setembro e novembro de 2006

• pH <sup>1</sup>	• Condutividade <sup>1</sup>
• Acidez total	• Oxigênio dissolvido
• Sulfato total	• Temperatura <sup>1</sup>
• Fe total	• Vazão
• Al total	• Precipitação <sup>2</sup>
• Mn total	• Coliformes fecais e totais <sup>3</sup>

<sup>1</sup>campo e laboratório

<sup>2</sup>estações meteorológicas das empresas carboníferas

<sup>3</sup>alguns pontos

## Análise e representação dos resultados

Os resultados obtidos são representados a partir da avaliação das principais sub-bacias afetadas pela contaminação provocada pela atividade de mineração de carvão: rios Mãe Luzia, dos Porcos, Urussanga e Tubarão. As cargas e concentração de sulfato, acidez, metais (Fe e Mn) e o pH são indicadores utilizados na avaliação da poluição hídrica.

A representação dos resultados é feita em gráficos *box plot* e gráficos lineares com as indicações da média aritmética, quartil superior e inferior, valores máximos e mínimos (Figura 4).

Essa forma de representação permite a identificação imediata das principais fontes de contaminação, seus limites de concentração, carga e amplitude, assim como as variações observadas em cada campanha. Além dos indicadores de qualidade ambiental citados, são representadas, também, em gráficos lineares, a vazão e a precipitação.

São utilizados mapas para a representação dos rios por faixas de pH (Figura 3), assim como a representação das cargas e concentrações de outros parâmetros.

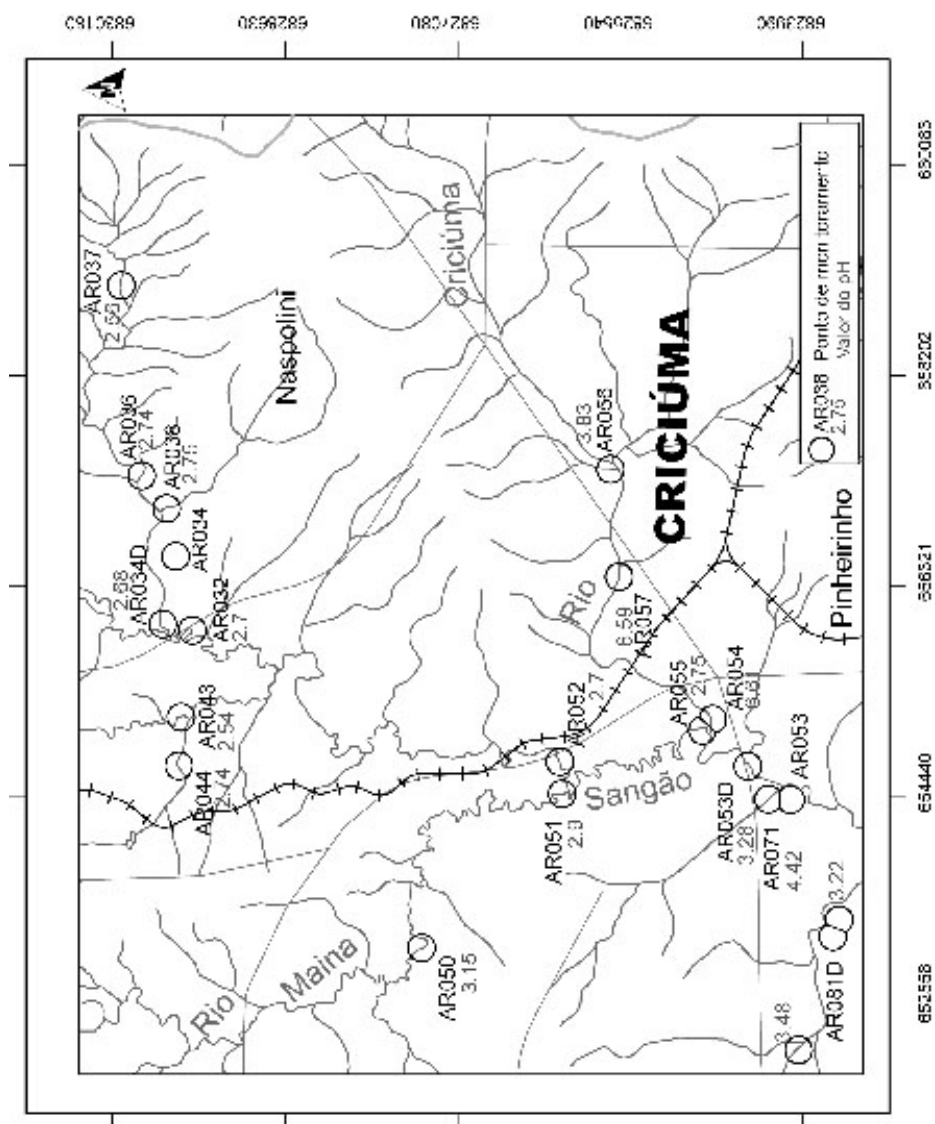
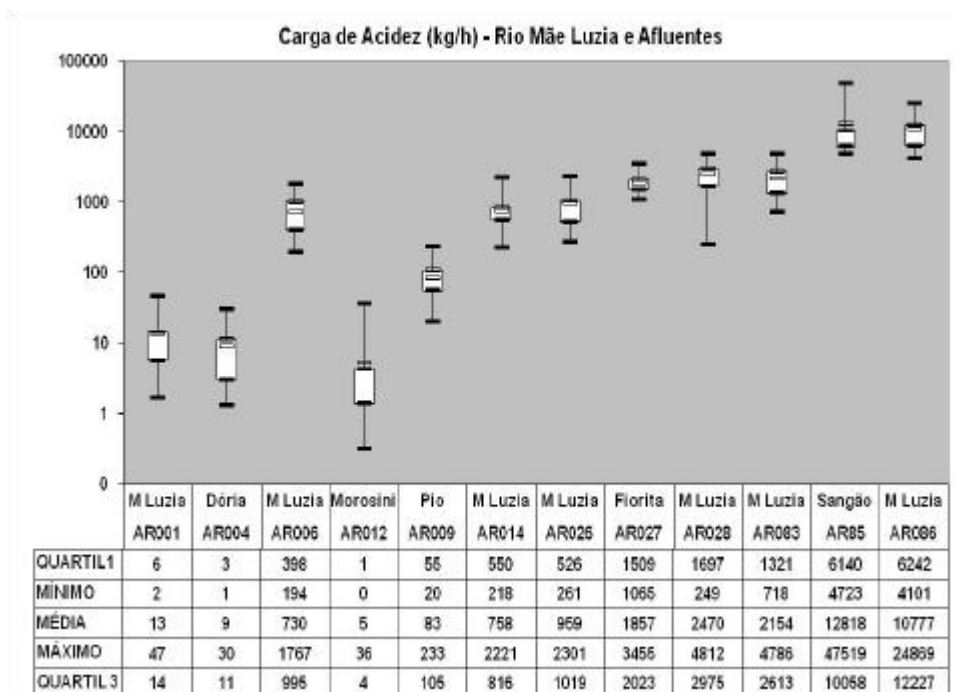


Figura 3 - Detalhe do mapa com indicação do valor de pH nos pontos de monitoramento

Tabela 2 – Análise das bacias hidrográficas com poluição gerada pela atividade de mineração de carvão

FAIXA DE pH	BACIA HIDROGRÁFICA								
	ARARANGUÁ			URUSSANGA			TUBARÃO		
	SEGMENTOS	km	%	SEGMENTOS	km	%	SEGMENTOS	km	%
2 a 4	231	338	6,26	57	154	12,06	126	242	1,86
4 a 6	14	23	0,42	5	7	0,56	9	22	0,17
> 6	7004	5034	93,31	1890	1119	87,38	24962	12755	97,97
TRECHOS CONTAMINADOS	245	361	6,69	62	162	12,62	135	264	2,03
TOTAL DE RIOS	7249	5395	100	1952	1281	100	25097	13019	100
ÁREA DA BACIA km <sup>2</sup>	3455			658			4836		
DENSIDADE HÍDRICA km/km <sup>2</sup>	1,56			1,95			2,69		



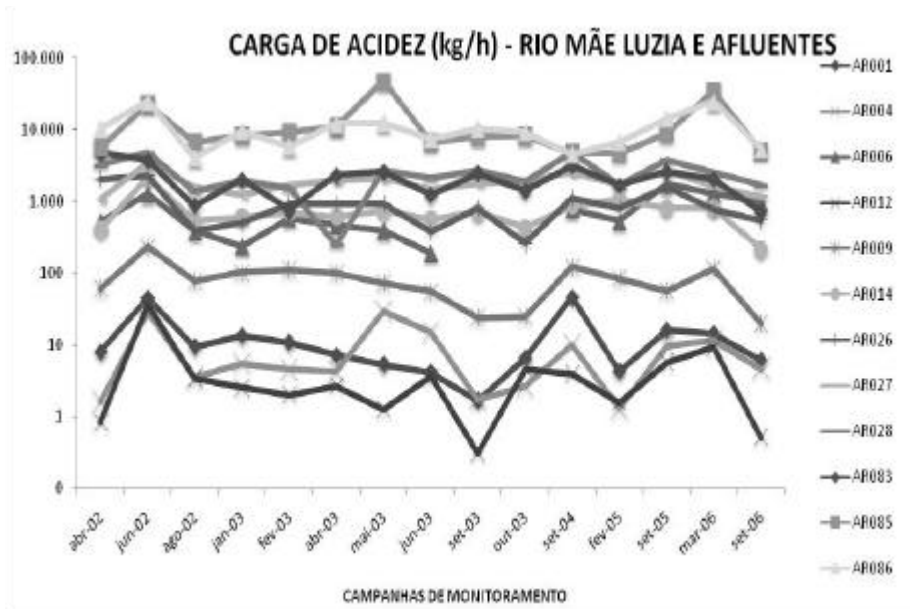


Figura 4 – Representação dos resultados de 15 campanhas de monitoramento na sub-bacia rio Mãe Luzia e afluentes

## Mapeamento e cadastro das bocas de minas abandonadas

Denominam-se bocas de minas abandonadas (BMA) todas as aberturas de minas utilizadas para a exploração e exploração do carvão, necessárias à pesquisa, acesso e ventilação dos trabalhos mineiros ou decorrentes da lavra, incluindo-se: galerias de encosta, poços de ventilação e serviço, planos inclinados, caimentos de mina e furos de sondagem. O mapeamento das BMA faz parte do Projeto de Monitoramento da Qualidade das Águas da Bacia Carbonífera de Santa Catarina e vem sendo realizado desde setembro de 2002. A área piloto compreendeu o entorno do Morro Cechinel, no perímetro urbano da cidade de Criciúma/SC. O trabalho de levantamento das BMA foi concluído na porção sul da bacia carbonífera, nos municípios de Criciúma, Forquilha e Içara.

Na maioria dos casos, há facilidade de acesso às bocas de minas, o que implica, além dos problemas ambientais, riscos de acidentes pessoais, principalmente nos poços de ventilação ou serviço abertos.

As frentes de urbanização avançam sobre as áreas mineradas antigas à revelia de estudos técnicos, constituindo-se em áreas com risco ocupacional.

Desde o início do século XX, existem minas de carvão na região sul de Santa Catarina. Dados históricos registram a existência de 93 minas subterrâneas de carvão nos vales dos rios Sangão, Criciúma e Mãe Luzia, em 1942. Muitas das bocas dessas minas antigas foram mapeadas e cadastradas e outras tantas não foram localizadas ainda ou foram

aterradas à medida que houve um avanço da ocupação desorientada do solo, não restando vestígios de sua localização. O levantamento e a elaboração de projetos de fechamento e recuperação das bocas de minas de carvão abandonadas da bacia carbonífera de Santa Catarina é parte integrante do *Projeto de Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera do Sul de Santa Catarina* e foi criado com o objetivo de eliminar os riscos ambientais e de acidentes pessoais decorrentes da existência das bocas de minas. O mapeamento e cadastro das BMA é um trabalho conjunto realizado por técnicos do SIECESC e da CPRM, Núcleo de Criciúma.

As bocas de minas abandonadas, estimadas em cerca de mil na bacia carbonífera, constituem áreas que apresentam riscos que envolvem o meio ambiente, a segurança e a saúde. São fontes, em muitos casos, de surgência de água ácida, contribuindo como fontes de poluição dos recursos hídricos.

## **Objetivos**

Como objetivos gerais, o projeto de levantamento das BMA serve para reunir informações para a elaboração de projetos executivos de fechamento e recuperação, sendo orientado pelos seguintes objetivos específicos:

- a) Ambiental – identificar todas as aberturas de mina, caracterizando, através de indicadores de poluição hídrica (pH, condutividade) e medidas de vazão, o potencial poluidor daquelas que apresentam drenagens ácidas de mina (DAM) e drenam águas de superfície;
- b) Fornecer informações que, em conjunto com dados de geologia, permitam a modelagem estrutural para estabelecer o fluxo da água de percolação no subsolo;
- c) Hidrologia e hidrogeologia – estimar a recarga da água de superfície e determinar a carga hidráulica para baixa, média e alta pluviosidade;
- d) Segurança, meio ambiente e saúde – classificar as aberturas segundo critérios de riscos.

## **Bocas de minas abandonadas no contexto da mineração de carvão**

A área do projeto insere-se no contexto geológico como um segmento da borda leste da Bacia do Paraná, tendo como limite leste a cobertura cenozóica sedimentar da bacia costeira. Divergindo para N-NE, seus limites adentram aos domínios do embasamento granítico, representado, nessa porção, pelos granitóides da Suíte Intrusiva Pedras Grandes.

A seqüência litológica aflorante e de interesse para a mineração inicia ao nível de topo da Formação Rio Bonito (Membro Siderópolis) com arenitos finos a médios, quartzosos, consistentes, alternando horizontes com laminações e leitos maciços, intercalado com



as camadas de carvão Barro Branco, Irapuá, Ponte Alta e Bonito Inferior. O contato com a unidade superior é transicional e marcado pela passagem dos arenitos inferiores para siltitos cinzas a amarelos (quando alterados) da Formação Palermo.

As estruturas de origem tectônica foram as responsáveis pela compartimentação da bacia carbonífera. Os paleovales formados por blocos abatidos serviram como locais preferenciais de acumulação e diagênese das diversas camadas de carvão. Eventos ligados a diversas reativações das falhas regionais determinaram a formação de um mosaico de sub-blocos abatidos e soerguidos que delimitaram áreas para extração das camadas de carvão a céu aberto e subterrânea.

O carvão na região de Criciúma foi descoberto em 1883 e, desde então, sua exploração passou por várias fases de desenvolvimento: da metodologia manual de extração passou-se à mecanização das minas em meados da década de 1970. Em 1942, havia 117 minas de carvão na bacia carbonífera (Belolli, 2002), sendo 93 na região de Criciúma. A maior parte das minas existentes era explorada pelos donos da terra onde aflorava a camada de carvão, desenvolvendo-se a lavra até o limite suportável da ventilação. Muitas dessas galerias antigas foram encontradas na área piloto. Em 1951, havia 26 minas de carvão no entorno do Morro Cechinel, em Criciúma, 14 das quais já abandonadas naquela época (Putzer, 1952).

### **Aspectos ambientais**

Não obstante o benefício social e econômico gerado pela mineração de carvão que, além dos seus resultados diretos, foi determinante para o surgimento, sustentação e diversificação industrial da região carbonífera, o custo ambiental mostra-se elevado face à degradação da qualidade do ar, do solo e da água. As mineradoras de carvão e a União foram solidariamente responsabilizadas pelo cenário de comprometimento ambiental, através de uma ação do Ministério Público Federal.

Ações voltadas ao controle ambiental das minas em operação e recuperação das minas antigas praticadas pelas mineradoras vêm reduzindo, gradativamente, esses impactos. Isto pode ser constatado a partir da quantificação da carga poluidora das principais áreas-foco de poluição hídrica, que estão tendo alguns parâmetros físico-químicos monitorados.

As bocas de minas abandonadas contribuem para geração de drenagem ácida, uma vez que, do total de 505 bocas de minas cadastradas até março de 2007, 52 estão alimentando as bacias dos rios Araranguá, Urussanga e Tubarão. Outras 31 apresentam afluência de água de superfície (drenagem natural, aquífero e água pluvial ou esgoto doméstico) para o seu interior. A contribuição das bocas de minas abandonadas com a drenagem ácida é maior do que aquele levantamento até o momento, uma vez que, com o desenvolvimento urbano das cidades, há o aterramento das bocas de mina e a canalização de suas drenagens efluentes.

## Metodologia

Os trabalhos consistiram no levantamento de todas as informações disponíveis sobre a mineração de carvão realizada na área do projeto, envolvendo as seguintes etapas:

1) Georreferenciamento dos mapas e plantas das minas existentes na região carbonífera, com a identificação das galerias avançadas até a linha de afloramento e poços de ventilação; identificação de indícios da existência de depósitos de rejeitos de mina (ponta de pedra) posicionados ao nível da camada de carvão Barro Branco, através da interpretação de fotografias aéreas;

2) Na fase de mapeamento, os indícios da presença de bocas de minas observadas nas fotos aéreas são levantados em campo anotando-se: a localização, com o auxílio de aparelho GPS; a base cartográfica utilizada, fornecida pelo DNPM através das ortofotocartas geradas no voo realizado em fevereiro de 2002 (escala 1:5.000); as dimensões e orientação magnéticas; a descrição geomecânica relacionada com o grau de decomposição das rochas encaixantes, caimentos, infiltrações de água (corrente, por saturação); a identificação e caracterização dos pontos de surgência de água de mina e de adução de água de superfície (chuva, aquíferos e drenagem) com indicadores de poluição (pH e condutividade); tomadas fotográficas.

Os dados do levantamento são registrados em sistema geográfico de informações, com a apresentação dos resultados em mapa no qual são indicados o tipo e o nível de prioridade para recuperação de cada BMA.

## Monitoramento das bocas de minas

As bocas de minas abandonadas contribuem para a geração de drenagem ácida, originada a partir das reações de oxidação e hidratação da pirita existente na camada de carvão e encaixantes com a água de superfície e dos aquíferos.

Campanhas de monitoramento vêm sendo realizadas, desde 2002, em 19 bocas de minas com drenagem ácida, utilizando-se os parâmetros pH, acidez, condutividade, Fe, Al e Mn como indicadores físico-químicos e medidas de vazão para a determinação da carga de acidez e metais.

Tabela 3 – Monitoramento do efluente da boca de mina 16

BOCA DE MINA	CAMPANHA	pH	ACIDEZ (mg/l)	COND. (uS/cm)	SULFATO (mg/l)	Al (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Zn (mg/L)
02BM0016	1					17,00	nr	0,76	1,30	nr
	2					27,32	0,44	1,15	1,72	0,20
	3									
	4									
	5					4,57	nd	2,31	2,70	1,09
	6	3,00	388,50		1.010,00	38,30	0,07	1,68	2,58	0,94
	7	3,16	389,00		nr	35,60	nr	1,81	1,75	nr
	8	2,94	332,80		745,80	24,51	nd	1,98	2,47	0,22
	9									
	10	2,95	349,00	1727,05	850,00	36,35	0,03	1,81	2,79	0,91
	11									
	12	3,18	156,60	960,00	nr	20,25	nd	2,66	1,03	0,48
	13	2,95	262,60	1470,95		31,32	nd	1,89	1,71	0,74
	14	2,91	315,00	1673,15	686,00	40,16	0,01	5,60	1,76	0,93
	15	3,02	265,00	1528,85	165,80	29,36	nr	1,69	1,78	nr
	16	3,06	265,00	1436,45	706,40	37,47	0,07	1,05	1,66	0,81
	17	2,99	304,70	1757,50	669,60	36,04	ND	1,30	2,12	0,40
	18	3,06	302,50	1317,15	673,20	40,02	nr	2,02	1,93	nr

## Análise de risco

Todas as bocas de minas estão associadas a algum tipo de risco. O risco ambiental está relacionado com a geração de drenagem ácida de mina. Com a infiltração de água, seja de origem superficial, subterrânea ou de esgoto doméstico ou pluvial, todos os produtos da oxidação dos sulfetos são incorporados à água criando-se um ciclo contínuo de contaminação dos recursos hídricos.

Pode haver risco à saúde pública, à medida que as BMA são utilizadas como depósitos de lixo, constituindo focos de doenças cuja dispersão pode ser promovida através da água.

Além dos riscos associados ao meio ambiente e à saúde pública, existem os riscos de acidentes pessoais provocados pelas quedas em poços de ventilação e serviço, caimentos. A entrada de pessoas em galerias também pode causar acidentes pela exposição a quedas eventuais do teto imediato ou pela baixa concentração de oxigênio.

O reconhecimento desse cenário levou à necessidade de se estabelecer prioridades para os trabalhos de recuperação e fechamento das bocas de minas em função dos riscos associados, adotando-se os seguintes critérios para a execução dos projetos executivos:

- Prioridade 1: bocas de minas abertas que apresentam riscos relacionados com acidentes pessoais, como poços de ventilação ou serviço, planos inclinados abertos e galerias;
- Prioridade 2: bocas de minas que apresentam riscos relacionados com meio ambiente, como as galerias abertas com drenagem ácida de mina, caimentos de mina e furos de sondagem com drenagem ácida de mina;

– Prioridade 3: bocas de minas com riscos relacionados à saúde pública, como as galerias fechadas por caimentos naturais ou aterros com ou sem drenagem ácida e as bocas de minas utilizadas para escoamento de drenagem pluvial, esgoto doméstico e depósito de lixo. A execução dos projetos para essas BMA depende da integração com o poder público municipal.

O balanço geral do mapeamento das bocas de minas abandonadas (BMA), até março de 2007, coordenado pelo SIECESC, é apresentado de forma resumida na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo do mapeamento das bocas de minas abandonadas até março de 2000

BMA	CLASSIFICAÇÃO DE RISCO			TOTAL	%
	PRIORIDADE				
	1	2	3		
<b>Abertas</b>	133			133	26,3
<b>Abertas com DAM</b>		52		52	10,3
<b>Abertas com água afluyente</b>	31			31	6,1
<b>Fechadas</b>			254	254	50,4
<b>Fechadas com DAM</b>		35		35	6,9
<b>TOTAL</b>	164	87	254	505	100,0

## Projeto de fechamento

O projeto de fechamento e recuperação das BMA será elaborado para que as suas ações sejam desenvolvidas em três fases. Na fase inicial, são realizados os trabalhos de mapeamento e cadastro. A fase seguinte contempla a elaboração dos projetos executivos, a partir dos quais serão realizadas as obras necessárias à recuperação e ao fechamento das bocas de minas. Os projetos executivos serão elaborados seguindo-se uma ordem de prioridade estabelecida a partir de critérios dos riscos ambientais e pessoais associados.

De acordo com o levantamento realizado, constatou-se a necessidade de detalhamento diferenciado para cada boca de mina, haja visto as características locais associadas com a topografia, cobertura de solo, rede de drenagem, disponibilidade de áreas de empréstimo, etc.

## Área piloto de fechamento

Uma área piloto para fechamento de BMA foi definida no bairro Napolini, região urbana de Criciúma (Figuras 5 e 6). Foram fechadas e recuperadas numa área de 5 hectares pela empresa COOPERMINAS – Cooperativa de Extração de Carvão Mineral dos Trabalhadores de Criciúma, quatro poços de ventilação, sete caimentos de mina e uma galeria de encosta.

A avaliação dos resultados desses trabalhos de fechamento e recuperação serve como modelo a ser aplicado em outras regiões com bocas de minas abandonadas.



Figura 5 – Fechamento de poço de ventilação. Bairro Naspolini, Criciúma/SC



Figura 6 - Trabalhos de fechamento de poço de ventilação com argila. Bairro Naspolini, Criciúma/SC

## Resultados esperados

As ações abaixo objetivam aos seguintes resultados:

- a) Eliminação do risco de acidentes com pessoas, através do fechamento das bocas de minas, caimentos e poços de ventilação abertos;
- b) Redução da entrada de ar para o interior das minas;
- c) Preservação das drenagens naturais não contaminadas, através do seu desvio das bocas de minas drenantes;
- d) Redução da vazão e do nível de contaminação das drenagens ácidas de minas, através do desvio das drenagens superficiais;
- e) Disponibilização das fontes de água não contaminadas para consumo;
- f) Ocupação racional e sustentável dos terrenos situados em áreas com bocas de minas abandonadas com a eliminação dos riscos de adensamentos do terreno provocados por caimentos de mina;

g) Otimização das metodologias de fechamento e recuperação como modelos a serem utilizados em outras regiões da bacia carbonífera com bocas de minas abandonadas.

### **Utilização dos dados cadastrados para subsidiar o planejamento da região**

Desde a sua criação em maio de 2000, o Núcleo de Meio Ambiente do SIECESC sempre teve uma destacada participação em fóruns institucionais ligados à discussão da recuperação ambiental. Primeiramente, integrou o Comitê para a Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, que foi idealizado a partir da necessidade de se criar uma estrutura gerencial mínima capaz de garantir a implementação do Plano de Recuperação Ambiental com um Sistema de Gestão Integrado. A partir daí, passou a compor outros fóruns de discussões, com destaque para os comitês de gerenciamento das bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Urussanga e Tubarão, Conselho Municipal de Meio Ambiente de Treviso e, mais recentemente, no Núcleo Gestor de Revisão do Plano Diretor Participativo do município de Criciúma.

Em todos esses fóruns, diversas entidades interessadas no debate em torno do meio ambiente e do planejamento da cidade estão lado a lado, opinando e trocando as informações que detêm. Invariavelmente, esses debates somente puderam ser realizados mediante uma visão global daquilo que se discute, tendo sido, muitas vezes, fundamentais os mapeamentos regionais executados no âmbito do *Projeto de Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera de Santa Catarina*.

Um dos levantamentos mais comumente solicitados por diversas entidades é o mapeamento e cadastro de bocas de minas abandonadas e de áreas mineradas em subsolo. Essa recorrência se explica pelo fato de Criciúma, cidade pólo da região carbonífera do sul do estado de Santa Catarina, possuir muitas áreas de adensamento urbano em cima de áreas mineradas em subsolo ou antigas áreas de disposição de rejeitos carbonosos. Não raro, construções executadas em locais onde não foi feito um prévio estudo geotécnico sofrem perturbações dessas minas abandonadas, sofrendo prejuízos em suas estruturas e colocando em risco seus ocupantes. O caso narrado a seguir serve para ilustrar uma situação de ocupação do solo e a existência de áreas mineradas em subsolo.

Em fevereiro de 2005, o SIECESC foi comunicado que, no pátio de uma residência localizada no bairro Maria Céu, em Criciúma, havia aparecido um buraco para onde percolava toda a água de chuva, que naquele mês ocorria intensamente na região. Tal buraco assustou os moradores, pois quando do seu surgimento um forte estrondo foi ouvido. Em uma averiguação no local, foi possível constatar que o buraco no terreno era resultado de um caimento de teto de mina, cuja galeria se encontrava a poucos metros da superfície, conforme mostra a Figura 7.



Figura 7 – Buraco surgido no pátio de uma residência no bairro Maria Céu em Criciúma/SC, revelando uma área minerada em subsolo

Com base no mapa de áreas mineradas em subsolo, foi possível identificar a empresa responsável pela mineração naquele local. De posse dessa informação, um relatório detalhado foi elaborado e entregue para a empresa Cooperminas – Cooperativa de Extração de Carvão Mineral dos Trabalhadores de Criciúma Ltda, empresa sucessora da CBCA, que originalmente executou a mineração na área.

A solução foi rapidamente encaminhada pela empresa, que providenciou o escoramento do alicerce da casa, executou o escoramento da galeria e a preencheu com material de aterro para aumentar a segurança (Figura 8).



Figura 8 - Escoramento e aterro realizado na galeria abaixo da residência

A solução para este caso foi relativamente simples, apesar do perigo que a situação representava. Entretanto, existem, no município, outras situações semelhantes a essa, em que a solução é bem mais complicada.

Preocupada em inserir o setor carbonífero nas discussões de planejamento da cidade, a prefeitura de Criciúma convidou o SIECESC para participar do Núcleo Gestor do Plano Diretor de Criciúma. Trata-se de um colegiado responsável pelo acompanhamento da revisão do plano diretor participativo do município, composto por diversos segmentos da sociedade: setor empresarial, órgãos públicos, ONG's, representantes de bairros e demais interessados. A inclusão do setor carbonífero neste tipo de discussão representou um significativo avanço, pois, até então, essa questão era negligenciada, apesar do forte relacionamento entre o crescimento de Criciúma e a Região Carbonífera e a atividade de extração e beneficiamento de carvão mineral.

Logo, as questões relacionadas à ocupação do solo e ao planejamento do desenvolvimento da cidade necessitaram de um apoio cartográfico nesse sentido, motivo pelo qual a prefeitura de Criciúma solicitou as informações que o SIECESC dispõe sobre bocas de minas, áreas mineradas em subsolo, áreas de deposição de rejeitos, áreas mineradas a céu aberto, áreas com cobertura de argila, áreas urbanizadas, áreas vegetadas e ocorrência de lagoas ácidas dentro do município.



Essas informações foram repassadas ao Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas da Universidade do Extremo Sul Catarinense – IPAT/UNESC, que havia sido contratado pela prefeitura para, entre outras, elaborar mapas temáticos que servirão de subsídios para a revisão do plano diretor. A Figura 9 mostra um desses mapas temáticos, elaborado a partir das informações que foram cedidas pelo SIECESC. Um exemplo da aplicação prática dessa base cartográfica para o setor de planejamento da prefeitura é a elaboração de termos de referência para a execução de estudos geotécnicos nos lotes antes da construção. Esses termos de referência poderão ter diferentes níveis de exigência, em função de uma maior ou menor proximidade com as áreas mineradas em subsolo. Independentemente do nível de exigência que um estudo desses tenha, eles são imprescindíveis para que a cidade cresça de forma organizada e segura.

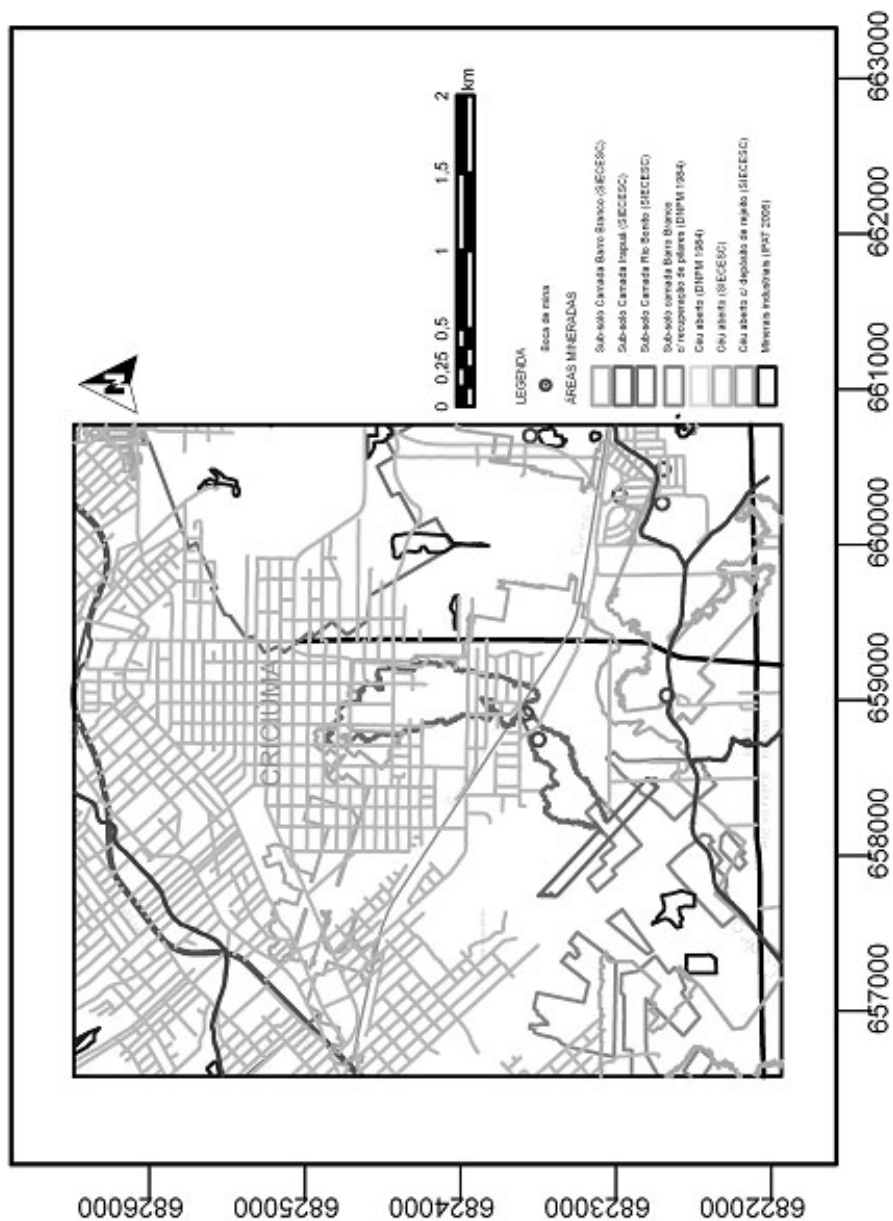


Figura 9 - Mapa de áreas mineradas no município de Criciúma

## Conclusões

O *Projeto de Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera de Santa Catarina*, desde o seu início, integrou informações que, anteriormente, estavam disponíveis de forma dispersa e fora do contexto regional no qual o problema precisava ser estudado.

Esse projeto demandou a realização de novos estudos, em escala regional, para caracterização e conhecimento dos impactos originados pela atividade carbonífera. As informações obtidas consolidaram a base de dados necessária para dar seqüência aos projetos conceituais e, em certos casos, executivos, de recuperação ambiental.

O projeto transcendeu aos objetivos inicialmente propostos, uma vez que sua base de dados passou a ser utilizada como fonte de consulta para outros projetos de alcance social e de planejamento urbano.

Suas ações e objetivos foram incorporados em nível institucional e, muitas vezes, seus conceitos foram desenvolvidos dentro de convênios com importantes instituições ligadas à recuperação ambiental da atividade de mineração.

Dentro dos resultados já obtidos, destacam-se: o monitoramento sistemático dos recursos hídricos superficiais que permitiu localizar as principais fontes de poluição hídrica; o levantamento das bocas de minas abandonadas que estão com projetos de recuperação em andamento ou sendo recuperadas; o estudo de tratamento físico-químico de drenagem ácida, em escala piloto, para reuso da água e o mapeamento das áreas degradadas, cuja base serve como material de consulta em diversos projetos de engenharia dentro da região.

A seqüência do desenvolvimento dos trabalhos desse projeto prevê o acompanhamento e a avaliação da eficácia dos projetos executados na região carbonífera, a contribuição para a sua otimização e, caso necessário, a readequação das ações.

## Referências

- AIDA, Y. **The feasibility study on recuperation of mined out areas in South Region of Santa Catarina State**. JICA. 1998.
- BELOLLI, M; QUADROS, J. e GUIDI, A. **A história do carvão de Santa Catarina**. Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil. 2002.
- BRUM VAZ, Paulo Afonso, **Sentença Nº 20.097 de 05 de janeiro de 2000**, Poder Judiciário, Justiça Federal, Seção Judiciária de Santa Catarina, 1ª Vara da Circunscrição Judiciária de Criciúma SC, pp 1.485 a 1.556.
- CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, **Projeto Conceitual para a Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera de Santa Catarina**, CD-ROM, 1ª Edição, ISBN 85-7227-143-0, [www.cetem.gov.br](http://www.cetem.gov.br), 2001.

- CHEN, P. **The entity-relationship model - toward a unified view of data.** *ACM Transactions on Database Systems*, v.1,n., p.9-36,1976.
- COSTA, P.A.S. – Monitoramento Ambiental. Fundação de Amparo à Tecnologia e Meio Ambiente. **Programa de Conservação e Recuperação Ambiental da Região Sul de Santa Catarina.** ECP Engenheiros Consultores Projetistas S.A. Volume 1C – Campanha de Campo – Água, 185 pp, 1982.
- ECP – Engenheiros Consultores Projetistas S/A . Minuta do Relatório Final, Vol. II. **Correção da poluição do sistema hídrico afetado pela mineração de carvão.** FATMA – Fundação de Meio Ambiente de Santa Catarina. 1982.
- GOMES, Cleber J.B, et al. 2006, **The abandoned mine openings mapping on coal mining reclamation program of the Santa Catarina State – Brazil.** 7<sup>th</sup> ICARD, march 26-30, 2006, St. Louis MO. ASMR, 3134 Montavesta Rd, Lexington, KY 40502.
- GOMES, Cleber J. B. **Projeto para recuperação ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense de Santa, relatório de atividades** – Junho de 2003. Disponível em [www.siecesc.com.br/meio ambiente](http://www.siecesc.com.br/meio ambiente). Acesso em 11/04/2007.
- GRAY, T., GRAY, R.E. (1998), **Mine closure, sealing, and abandonment.** Mining Engineering Handbook, chapter 8.7, pp. 659-673.
- KONTOPOULOS, A. 1998. Acid mine drainage control. In: Castro, S.H., Vergara F. e Sánchez, M.A., **Effluent treatment in the mining industry.** University of Concepción, Chile,57-118.
- MACHADO, J.F.L. Mineração de carvão: contaminação e vulnerabilidade dos mananciais. **Anais do Simpósio Sul Brasileiro de Geologia.** V1. Florianópolis/SC. 1985.
- MAGUIRE, D.; GOODCHILD, M.F.; RHIND, D. (Ed). Geographical information systems applications. 2.ed. London: **Longman Scientific & Technical**, 1991. v.2, 447 pp.
- MENEZES, C.T.B. et al. 2002. **Tratamento de drenagens ácidas de mina (DAM).** XIX ENTMME, Recife, 226-232.
- MOEBS, N.N., KRICKOVIC, S. **Air sealing coal mines to reduce water pollution.** Report of Investigation 7354, US Bureau of Mines, 33p. 1970.
- NETO, S. L. R. **Análises morfométricas em bacias hidrográficas integradas a um sistema de informações geográficas.** Dissertação (Curso de Mestrado). Departamento de Geociências. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. PR. 1994.

- PEREIRA, R.S. Sensoriamento remoto e o geoprocessamento aplicado a recursos hídricos. *In: Água: uso y manejo sustentable*. Ed.Universitaria de Buenos Aires. Argentina. 1997.
- PUTZER, H. 1952. **Boletim técnico da divisão de fomento da produção mineral do DNPM: camadas de carvão mineral e seu comportamento no sul de Santa Catarina**. Rio de Janeiro, boletim n° 91, 01-182.
- PUTZER, H. **Camadas de carvão mineral e seu comportamento no sul de Santa Catarina**. DNPM. Boletim n° 91. 1952.
- RIBEIRO, Gilberto; CAMARA, G.; **Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica**. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap3-arquitetura.pdf>. Acessado: 09/03/2007.
- SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental – teoria e prática**. São Paulo – SP: Oficina de Textos, 2004.
- SOARES, Paulo Sérgio M., Recuperação ambiental de áreas mineradas: uma experiência de gestão. **XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia**, Recife – Pernambuco – 2002.
- VALIATI, D., FREITAS, J.O., MAEYAMA, O., KIHARA, Q. Diagnóstico da Qualidade da Água na Bacia do Rio Araranguá. **Controle da poluição hídrica decorrente da atividade de mineração**. DNPM / 2° DS. Relatório Final.
- ZETA Engenharia e Planejamento Ltda, IESA – Internacional de Engenharia S/A (1985). Projeto preservação do meio ambiente. **Relatório Descritivo e Justificativo**. 1985.

# **Meio ambiente urbano, desenvolvimento sustentável e qualidade de vida em áreas degradadas pela mineração de carvão no sul de Santa Catarina: o caso dos bairros de São Sebastião e Paraíso (Criciúma) e Rio Fiorita (Siderópolis)**

Geraldo Milioli; Angelita Schütz Santos; Marta Oliveira Miranda

A mineração de carvão no sul de Santa Catarina apresenta importantes dimensões econômicas, sociais, políticas, culturais e ambientais.

As referências do passado, no entanto, sugerem um aprendizado por parte das empresas, dos empresários, dos mineiros, das Ongs, da sociedade civil organizada, dos sindicatos das empresas de extração, assim como dos trabalhadores e da população em geral. Nesse sentido, muitos seriam os caminhos a serem percorridos para apresentar e analisar as dimensões da complexidade regional e a relação conflituosa que se estabelece entre mineração, desenvolvimento, meio ambiente e qualidade de vida.

O propósito desse artigo não é ser exaustivo com dados da realidade da região carbonífera, conhecidos nacional e internacionalmente e debatidos por muitos pesquisadores, mas apresentar, em síntese, resultados e análises de pesquisas realizadas com as comunidades, nos municípios de Criciúma e Siderópolis, que habitam próximo às atividades de mineração e ocupam espaços sobre os rejeitos de carvão. Busca-se também lançar recomendações que contribuam para o planejamento do desenvolvimento local baseado na idéia do desenvolvimento sustentável.

## **Mineração de carvão e meio ambiente no sul de Santa Catarina**

O estado de Santa Catarina representa cerca de 1,1% do território nacional brasileiro e concentra 3,0% de sua população, o que equivale a 95.346,181 km<sup>2</sup> e a aproximadamente 5.866.568 de habitantes (IBGE, 2006).

A região sul de Santa Catarina, especificamente, é composta por 42 municípios. Tem uma extensão de 9.553 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 9,95% da superfície do estado e sua população é estimada em aproximadamente 800.000 habitantes (Milioli, 1995; 1999; 2005).

A problemática da mineração de carvão no sul de Santa Catarina, por sua vez, remonta ao século passado; desde 1832 já era conhecida sua existência. No transcorrer do século XIX, a atividade passa a se constituir variável de inegável importância social e econômica para a região e de importante referência energética para o país (Milioli, 1995; 1999; 2005; Glauser, et al, 2005).

Na trajetória do carvão, é fundamental citar, entre outras, sua contribuição para o desenvolvimento da região sul do estado de Santa Catarina, o incremento da indústria siderúrgica, metalúrgica, cerâmica e para o “*cluster*” que se forma em razão de sua penetração econômica. Aliado a esse rol, cabe destacar sua contribuição notadamente com a crise do petróleo na década de 70, para a produção de energia elétrica através do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, situado no município de Capivari de Baixo (SC), hoje pertencente à Tractebel S.A., Empresa do Grupo Suez (França).

Não obstante sua importância econômica, a questão socioambiental é também histórica e ainda extremamente preocupante. Nas reflexões de Milioli (1995; 1999; 2005):

[...] o processo de exploração desse recurso natural não renovável (métodos de lavra, beneficiamento e disposição dos rejeitos, transporte, usos e transformações) adotados nas últimas décadas tem respondido por um conjunto expressivo de impactos destrutivos sobre o meio biofísico e as culturas, no quadro de um estilo de “mal-desenvolvimento” regional.

Dos esforços para mitigar e solucionar o passivo ambiental e os problemas socioambientais da região (áreas degradadas, rios poluídos, urbanização descontrolada, problemas de saúde, odores, transporte inadequado de minérios, emissão de gases e material particulado, entre outros), realidade esta de magnitude, inegável e reconhecida nacional e internacionalmente, cabe destacar nos últimos anos as iniciativas, ações e medidas técnicas implementadas pelo SIECESC, empresas mineradoras, FATMA, CETEM, cooperações entre instituições e órgãos nacionais e internacionais, a contribuição de pesquisadores e universidades, Ongs, entre outros. Essas medidas, de escala temporal de curto-médio-longo prazos para a realidade da região carbonífera, sugere, para o futuro, oportunidades para a recomposição do ambiente natural e melhores condições / qualidade de vida para a população. Essa perspectiva indica ainda chances para a dinamização de outros setores produtivos e o desenvolvimento regional, avançando a perspectiva de restauração meramente cosmética no sentido da sustentabilidade (Milioli 1995; 1999; 2005).

O desafio para a região e a perspectiva anteriormente colocada não são pequenos quando se observa o conjunto de habitantes, os recursos, os índices de poluição e de problemas socioambientais, a região e a responsabilidade principalmente da Associação dos Municípios da Região Carbonífera (AMREC) e dos municípios diretamente envolvidos com a economia do carvão.

Do universo dos municípios envolvidos na AMREC, para os propósitos desse estudo, foram selecionados por suas peculiaridades, Siderópolis e Criciúma, dois municípios que guardam referências da dinâmica histórica da atividade do carvão e de sua relação com o meio ambiente e o desenvolvimento.

### **Siderópolis e o bairro Rio Fiorita**

O município de Siderópolis tem uma população de cerca de 13.590 habitantes distribuída em 263 km<sup>2</sup>, aproximadamente 75% desta está no meio urbano (IBGE, 2006). De colonização predominantemente italiana, a Nova Belluno foi fundada em 1891. Hoje município de Siderópolis, esteve na condição de Vila até dezembro de 1958, data em que se registra sua emancipação do município de Urussanga.

Ainda jovem, o município interrompeu sua vocação agrícola com a chegada e dinamização econômica proporcionada pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), instalada na região na década de 50. Com a crescente importância da mineração de carvão, notadamente a partir da década de 60 e fortalecida com a crise do petróleo, o município passou a experimentar uma realidade vivenciada por outros da região. A vocação mineral impulsionou a abertura de muitas minas, fortalecendo o carvão como uma importante atividade para a região Sul (Volpato, 1994).

A interrupção do processo de desenvolvimento de atividades econômicas diversas pode ser constatada pela pouca penetração do município nos setores primário, secundário e terciário, primeiro, pelo alto índice de poluição, da área total do município, aproximadamente 4% (9,3 km<sup>2</sup>) está degradada pela atividade de mineração, notadamente pelo processo de extração a céu aberto. Também seus cursos d'água estão comprometidos devido aos resíduos da extração (Santa Catarina, 1996).

Outro ponto a ser destacado é a proximidade do município – agora com seus recursos naturais destruídos, um significativo passivo ambiental e fortes demandas sociais, de infra-estrutura e de qualidade de vida – a outros municípios de vocação econômica mais variada e competitiva, como Criciúma, por exemplo.

Seu processo de urbanização está marcado por ocupações desordenadas (também de áreas degradadas) e por muitos problemas de ordem socioambiental, aspectos esses percebidos próximo a cidade, em alguns bairros e notadamente no bairro Rio Fiorita (Figura 1), que se constituiu a partir da instalação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e que, atualmente, se dinamiza envolto de passivo ambiental, lavadores e minas de extração de carvão.



A pesquisa identificou que o bairro Rio Fiorita, situado a nordeste do município de Siderópolis, possui uma área de aproximadamente 752,55 m<sup>2</sup>, onde residem 241 famílias, com população de faixa etária entre 36 a 45 anos, possuindo uma renda familiar que varia entre três e quatro salários mínimos.



Figura 1 – Perímetro do bairro Rio Fiorita, Siderópolis/SC

### **Criciúma e os bairros de São Sebastião e Paraíso**

Fundada em 1880 e considerada uma das importantes cidades do estado de Santa Catarina, o município de Criciúma, que compreende uma área de 210 km<sup>2</sup> e concentra atualmente sua população basicamente no meio urbano, é marcado por sua forte miscigenação cultural, primeiro com a chegada dos grupos de imigrantes italianos e, posteriormente, por poloneses, germânicos, portugueses e africanos.

Atualmente, com uma população de aproximadamente 188.233 habitantes (IBGE, 2006), o município, até 1920, teve na agricultura sua principal economia, posteriormente substituída pelas indústrias de cerâmica, química, plástico, vestuário, metal-mecânica e de extração de carvão, referência cultural / histórica da economia regional.

A mineração de carvão gerou capitais, sendo, inegavelmente, responsável pela formação da base industrial da região carbonífera a partir dos anos 50. Muito embora o século XIX apresente momentos de sazonalidade da produção mineral e crises no setor (Volpato 1994; Milioli, 1995; 1999; 2005; Belolli, et al., 2002), a atividade sempre se manteve fortalecendo o município e a perspectiva de utilização do carvão, ao mesmo tempo em

que busca demonstrar a importância desse mineral (com suas características inerentes) para o desenvolvimento da região e do país.

Nessa conjunção histórica de crescimento da atividade e oportunidades de trabalho e perspectivas de melhores condições de vida, muitas pessoas migraram para Criciúma, município esse que, com o tempo, concentra impactos da poluição e problemas socioambientais de toda ordem, citados anteriormente. Aliado a isso, muitas comunidades se formaram na periferia da cidade, sem infra-estrutura e de maneira desordenada, sobre os rejeitos piritosos e próximos às empresas de mineração.

Para nossos propósitos aqui, dois desses bairros podem ser destacados: São Sebastião e Paraíso.

O bairro São Sebastião (Figura 2) tem aproximadamente 241 famílias, cadastradas no Cadastro Único de Saúde (CAD) da Prefeitura Municipal de Criciúma (PMC, 2003), com salários inferiores a um salário mínimo. Este bairro localiza-se 4 Km a leste da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) e a aproximadamente 7,5 km do centro da cidade. Além dos agravantes do passivo ambiental e da ocupação desordenada, nesta área registra-se ainda uma mineradora em atividade, que, por extensão, gera sérios problemas socioambientais.



Figura 2 – Localização da área de estudo do bairro São Sebastião, Criciúma/SC

O bairro Paraíso (Figura 3), por sua vez, é constituído por um universo de 130 famílias, que recebem menos de um salário mínimo e estão cadastradas no Cadastro Único de Saúde CAD - ÚNICO da Prefeitura Municipal de Criciúma (PMC, 2003). Esta área

localiza-se 2 Km a nordeste da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) e a aproximadamente 3 km do centro da cidade. Neste bairro, ocorre uma ocupação desordenada sem infra-estrutura adequada sobre e/ou próximo às áreas de depósitos e aterros de rejeitos piritosos, nas proximidades da ferrovia e também na margem do rio Criciúma.



Figura 3 – Localização da área de estudo bairro Paraíso, Criciúma/SC

## Considerações teórico-conceituais

### Desenvolvimento urbano e meio ambiente

As questões urbana e do desenvolvimento têm sido amplamente discutidas, especialmente após a Rio-92 e por ocasião do Fórum Brasileiro de ONGs e Movimentos Sociais para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (1997) e de acordo com o documento *Brasil século XXI, os caminhos da sustentabilidade*:

*Os impactos gerados pelo desenvolvimento urbano ocorrem, entre outros fatores, porque os municípios não possuem capacidade institucional e econômica para administrar o problema, enquanto os Estados e a União estão distantes demais para buscar uma solução gerencial adequada que os apóie. Cada um dos problemas é tratado de forma isolada, sem um planejamento preventivo ou mesmo curativo dos processos. Como consequência, observam-se prejuízos econômicos, forte degradação da qualidade ambiental e de vida, com retorno de doenças de*

*veiculação hídrica, atmosféricas, mortes, perdas de moradias e bens, interrupção de atividade comercial e industrial em algumas áreas, entre outros problemas e impactos socioambientais. O custo de controle da fase de planejamento é muito menor que o curativo, depois que os problemas ocorrem.*

O valor da terra é controlado pela limitação da oferta, perante uma sempre crescente demanda. Harvey (1992) debate essa questão enquanto um paradoxo. Para esse autor:

*A riqueza, na economia de mercado, é produzida em um sistema que depende da escassez para funcionar. Enquanto um estoque de lotes centrais e dotados de infraestrutura é deixado ocioso por especuladores que aguardam sua valorização, como forma de controlar a oferta, aqueles que precisam de um teto para seus filhos são forçados a buscar sua alternativa habitacional na irregularidade das periferias desprovidas de serviços públicos. O termo periferia assume, além de seu conceito geográfico de o que está à margem, o conceito social de exclusão.*

Neste sentido, o presente capítulo encontra também em Santos (1998) referências para discutir o processo de urbanização ocorrido em bairros do município de Criciúma, particularmente aqueles estabelecidos em áreas degradadas decorrentes da mineração de carvão. Para Santos (1998):

*O valor do indivíduo depende do lugar em que está e que, desse modo, a igualdade dos cidadãos supõe, para todos, uma acessibilidade semelhante aos bens e serviços, sem os quais a vida não será vivida com aquele mínimo de dignidade que se impõe. Isso significa, em outras palavras, um arranjo territorial desses bens e serviços de que, conforme a sua hierarquia, os lugares sejam pontos de apoio, levando em conta a densidade demográfica e econômica da área e a sua fluidez.*

A complexidade que remete para a instalação das cidades e a questão do meio ambiente e os muitos problemas de ordem socioambiental resultantes das atividades humanas, sugerem que a perspectiva de soluções para o meio ambiente urbano precisa ser focado não só em aspectos tecnológicos, mas também políticos, socioeconômico e cultural.

## **Meio ambiente urbano e qualidade de vida**

A questão urbana está diretamente relacionada a indicadores de bem-estar e de qualidade de vida, variando de uma matriz cultural e de uma sociedade para outra.

Sobre esta ótica Jacobi (2000) afirma que:

*A partir da segunda metade deste século, que encerra o segundo milênio, a população humana quase que dobrou e suas crescentes necessidades vão esgotando o espaço nos territórios habitáveis. Os recursos naturais de que ainda dispomos*

*vêm sofrendo uma veloz devastação, acompanhada de perda na qualidade. O Brasil é testemunha desse drama, preanunciado nas ficções do passado e que hoje é uma triste realidade que se comprova dia-a-dia, na extinção das florestas e das espécies, no ar contaminado das grandes cidades, nas praias e nos rios poluídos, e em nossos alimentos contaminados por agrotóxicos e rejeitos industriais. Ao mesmo tempo em que a humanidade aumenta vertiginosamente sua capacidade de conhecer e entender o significado da matéria de que está formado o universo, incluindo a dos seres vivos, caminhamos inexoravelmente para a deterioração do nosso meio ambiente e para a autodestruição.*

Os casos encontrados em Criciúma e na região Sul podem ser considerados de amplitude global. Nestas localidades, a urbanização não estabelece o padrão de qualidade de vida para muitos, submetidos a lugares não adequados para a saúde humana e ambiental, referência esta que remete para fatos decorrentes do crescimento industrial no cenário nacional e mundial.

Ao analisar a atividade de exploração do carvão mineral, Milioli (1995), relata que:

*O processo dinamizador associado às atividades de mineração propiciou a agravante de problemas característicos da urbanização descontrolada. Imprimindo marcas profundas nos ecossistemas locais, a mineração responde por processos de desmatamento, erosão, deslizamentos e poluição dos solos, ar e água, além de outros impactos destrutivos de ordem sociocultural, política e institucional. Tais repercussões contribuíram para afetar, em maior e menor grau, a qualidade de vida dos habitantes.*

A noção de qualidade de vida, segundo Galloping (apud Gonçalves, 2003), relativiza e contextualiza a questão das necessidades humanas e do processo social para satisfazê-las a partir de duas características: a) da lógica de mercado, satisfação através de bens, serviços e geração de produtos; b) qualitativa, em que as condições de vida se traduzem na degradação do bem-estar, provocada pela crescente produção de mercadorias e pela deterioração dos recursos naturais, dos serviços públicos básicos e da homogeneização dos padrões de consumo.

Esse debate encontra eco também em Souza (2000). O autor argumenta que qualidade de vida engloba necessidades individuais e coletivas que não podem ser simplesmente adquiridas no mercado e muitas vezes nem podem ser mensuradas, mas que interferem no bem-estar dos cidadãos. A preocupação do autor recai, portanto, na idéia do direito à cidadania.

Por fim, como um primeiro esforço em teorizar a questão, vale destacar que a dimensão cultural é também fundamental à noção de qualidade de vida. Em outras palavras, a maneira como as pessoas e as comunidades, a partir de suas aspirações objetivas e

subjetivas, realizam a satisfação de suas necessidades. Estas podem ser entendidas como bem-estar, desejo de cidadania, direitos e bens comuns, como esperança, harmonia, solidariedade, liberdade e felicidade.

Baseando-se nesse entendimento enfatizamos a importância do desenvolvimento sustentável para a questão urbana e o meio ambiente.

## **O desenvolvimento sustentável e sua importância para o meio ambiente urbano**

Segundo Leff (2001; 2006), a degradação ambiental, o risco de colapso ecológico e o avanço da desigualdade e da pobreza são sinais eloqüentes da crise do mundo globalizado. A sustentabilidade é o signifiante de uma falha fundamental na história da humanidade crise de civilização que alcança seu momento culminante na modernidade, mas cujas origens remetem à concepção do mundo que serve de base à civilização ocidental. A sustentabilidade é o tema do nosso tempo, do final do século XX e da passagem para o terceiro milênio, da transição da modernidade truncada e inacabada para uma pós-modernidade incerta, marcada pela diferença, pela diversidade, pela democracia e pela autonomia.

Ainda segundo a visão de Leff (2001):

*O princípio de sustentabilidade surge no contexto da globalização como marca de um limite e o sinal que reorienta o processo civilizatório da humanidade. A crise ambiental veio questionar a racionalidade de paradigmas teóricos que impulsionaram e legitimaram o crescimento econômico, negando a natureza. A sustentabilidade ecológica aparece assim como um critério normativo para a reconstrução da ordem econômica, como uma condição para a sobrevivência humana e um suporte para chegar a um desenvolvimento duradouro, questionando as próprias bases da produção.*

A reflexão pessimista sobre nosso destino provoca inicialmente alarme e depois uma enorme preocupação. Por esse motivo as comunidades mais esclarecidas, conscientes da necessidade de deter e reverter o processo de degradação do meio ambiente, devem então promover ações que assegurem a nossa sobrevivência. Nessa direção, Jacobi (2000) enfatiza que:

*É uma dura tarefa que demanda perseverança, trabalho e uma visão altruísta do futuro. Tarefa que vem sendo realizada por cientistas, políticos, educadores, artistas, religiosos e muitos outros segmentos de nossa sociedade, num esforço coletivo que permita resolver o dilema do progresso da humanidade compatível com a utilização racional dos limitados recursos do planeta, o chamado desenvolvimento sustentável.*

Nos últimos anos, muitas conferências (Estocolmo, Rio-92, entre outras), autores, como Ignacy Sachs, Paulo Freire Vieira, Franz J. Brüzeke, Dália Maimon, Dimas Floriani, Enrique Leff, Eduardo Viola, Leila da Costa Ferreira, Enrique Rattner, Moacir Gadotti (para citar alguns) e relatórios importantes como *Nosso Futuro Comum*, têm debatido a questão do desenvolvimento sustentável e da possibilidade de sua operacionalização em um mundo cada vez mais marcado pela desigualdade e pela degradação socioambiental (Milioli, 1999).

No relatório *Nosso Futuro Comum* (1987), importante documento de referência internacional, presidido pela norueguesa Gro Harlem Brundtland, encontra-se o conceito que caracteriza bem a preocupação trazida pelo enfoque: “o desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades”.

O referido relatório e os desdobramentos teóricos enfatizam a importância das aspirações humanas, as quais são fundamentais para qualquer objetivo do desenvolvimento sustentável. Sendo assim, não só as necessidades básicas devem ser atendidas, mas também as questões inerentes a uma melhor qualidade de vida (Milioli, 1995; 1999; 2005). Para a comissão do relatório *Nosso Futuro Comum*, num mundo onde a pobreza e a injustiça são endêmicas, poderá ocorrer crescimento sustentável, porém é preciso que todos tenham atendido as suas necessidades básicas e lhes sejam proporcionadas oportunidades de concretizar suas aspirações a uma vida melhor.

Nesse sentido, consideramos fundamental o pensamento de Sachs (1993; 2002), para quem o planejamento do desenvolvimento precisa levar em conta e responder, simultaneamente, as cinco dimensões de sustentabilidade: social, cultural, econômica, política, espacial e ecológica.

Essa busca de respostas a partir da abordagem interdisciplinar (Floriani, 2004; Leff, 2006) deve-se à constatação de que os problemas que afetam e mantêm a vida no nosso planeta são de natureza global e que suas causas não podem restringir-se apenas aos fatores estritamente biológicos, revelando por extensão dimensões políticas, econômicas, institucionais, sociais e culturais.

Esses problemas e mudanças, bem como a idéia do desenvolvimento sustentável para a gestão ambiental das cidades (Menegat & Almeida, 2004), podem ser observados no momento da produção do espaço urbano, onde o centro é apenas uma parte da totalidade – a cidade, o entendimento das partes só poderá ser feito pelo todo, portanto, numa perspectiva (Capra 1982). Sendo assim, não podemos apenas estudar o espaço particularizado, sem, no entanto, inseri-lo no espaço da cidade de Criciúma e Siderópolis, formados por um centro, vários bairros e periferias.

## Meio ambiente urbano e qualidade de vida em áreas degradadas pela mineração de carvão: o caso dos bairros São Sebastião e Paraíso (Criciúma) e Rio Fiorita (Siderópolis)

Como objetivo do estudo, buscou-se descrever e analisar o processo e o contexto da urbanização em áreas degradadas pela mineração (bairros São Sebastião e Paraíso, em Criciúma, e bairro Rio Fiorita, no município de Siderópolis), identificando os principais problemas socioambientais, a qualidade de vida, e apontando elementos que contribuam para a estrutura de um banco de dados sobre a degradação ambiental e problemas socioambientais inerentes à atividade de mineração no sul de Santa Catarina. Buscou-se, ainda, fornecer elementos que contribuam para o planejamento do desenvolvimento nessas áreas, embasados no desenvolvimento sustentável. Não obstante, cientes de que essa não se constitui tarefa fácil considerando a complexidade de tal realidade (Morin, 1996) e a necessidade de se buscar alternativas que estejam em sintonia com a idéia de uma nova aliança entre economia, natureza e sociedade, o exercício aqui é refletir tais possibilidades (Prigogine & Stengers, 1997).

O procedimento metodológico percorreu seis etapas: pesquisa bibliográfica e documental; revisão bibliográfica; análise da formação espaço-temporal e histórico dos bairros; caracterização dos instrumentos de coleta e análise de dados; uso de técnicas de análise social e sistematização e análise dos dados. A seguir, num esforço de síntese, apresentamos uma narrativa dos resultados e discussões comparativos das questões mais relevantes no tocante à mineração, ao meio ambiente e à qualidade de vida.

### Resultados e discussões

Com base nos dados obtidos, é possível constatar a realidade particular de cada bairro e pode-se perceber a diferença entre os mesmos.

A pesquisa ressalta a desigualdade social nos bairros em estudo. A realidade socioambiental de um contingente populacional está caracterizada pela dimensão da exclusão, dos problemas, dos riscos, da falta de informação e dos canais de participação. A pesquisa também mostra o nível de complexidade, principalmente em relação às condições de acesso/não acesso aos serviços públicos e aos riscos ambientais decorrentes do fato de habitarem em bairros urbanizados precariamente (Figura 4). A possibilidade de ter maior acesso à informação pode promover as mudanças comportamentais necessárias para uma atuação mais orientada para o interesse geral.





Figura 4 – Vista parcial do bairro São Sebastião, Criciúma / SC

Embora exista a percepção dos problemas ambientais nos bairros estudados, no município de Criciúma, observa-se que, geralmente, os moradores aceitam a convivência com esses agravos, assumindo frequentemente uma atitude passiva em face da existência do problema. Constata-se ainda a ausência e/ou precariedade da ação dos municípios na proteção/prevenção de agravos na questão ambiental (Figura 5), a qual, por não assegurar um nível adequado de condições de vida, gera impactos profundos no cotidiano das famílias e em suas práticas. Isto configura uma certa dinâmica de enfrentamento/convivência dos habitantes do local com os problemas ambientais, em virtude das suas limitações socioeconômicas.

Já no bairro Rio Fiorita, a falta de áreas de lazer no bairro é motivo de preocupação para os moradores, assim como a falta de perspectivas profissionais no município.

Apesar da infra-estrutura oferecida no passado aos funcionários da CSN e seus familiares, o que os favoreceu por determinado tempo, os moradores do bairro Rio Fiorita sentem os impactos resultantes da mineração descontrolada, ainda percebidos na localidade, relacionando-os com a atividade desenvolvida no passado e com os problemas socioambientais que o bairro apresenta hoje.



Figura 5 – Vista parcial do bairro Rio Fiorita, Siderópolis / SC

Esta abordagem enfatiza a necessidade de se conhecer e identificar as percepções e práticas da população face aos principais problemas por ela enfrentados, isto é, a natureza das dificuldades enfrentadas, principalmente pela população de baixa renda.

Ainda segundo a ótica dos moradores do bairro Paraíso (Figura 6), o impacto negativo do conjunto de problemas é resultado da precariedade dos serviços públicos e da negligência e/ou omissão do poder público na prevenção das condições de vida da população. Segundo os entrevistados, na maioria das vezes, são solicitadas soluções, mas nem sempre estas são eficazes.



Figura 6 – Vista parcial do bairro Paraíso, Criciúma / SC

Quanto aos motivos que remetem para o fato de as comunidades em estudo continuarem residindo no mesmo bairro, apesar dos problemas identificados por elas, a pesquisa verificou o sentimento de ligação pessoal ao espaço físico, além do valor econômico, já que os domicílios na sua maioria são autoconstruções. Isto representa uma referência na trajetória de vida de cada um, da sua família e do grupo de relações sociais. A comunidade enxerga no espaço o valor do sentimento ou consciência de “pertencer ao lugar”, já que muitos moradores estão no local há mais de 10 anos. Porém, no bairro Paraíso, muitos entrevistados fazem referência à falta de condições financeiras que os possibilite mudar para um local com melhor infra-estrutura. Mas, mesmo assim, de maneira muitas vezes contraditória, apesar dos problemas enfrentados, a preferência da grande maioria dos moradores dos bairros estudados recai por continuar residindo no mesmo local.

## Conclusão

Considerando o esforço de uma análise síntese, a meta aqui é concluir recomendando e apontando sugestões que contribuam para um redirecionamento da realidade estudada. Ou seja:

- Buscar maior aproximação entre prefeitura municipal, comunidade, iniciativa privada e a sociedade como um todo, visando melhorar a performance dos serviços públicos e buscar uma interação com os moradores, incentivando-os a participar, aprofundando suas percepções, direcionando atitudes e possíveis soluções para os problemas socioambientais identificados;

- Avaliar e considerar os caminhos para aproximar as empresas de mineração às comunidades, oportunizando diálogos e soluções compartilhadas para os problemas socioambientais e a melhoria da qualidade de vida;
- Implantar ações que possibilitem ao Poder Público supervisionar e executar políticas públicas, informando e orientando as comunidades, através de campanhas educativas, e estimulando a dinâmica de responsabilidade comum da comunidade na prevenção dos problemas socioambientais;
- Buscar igualdade no acesso a recursos e serviços sociais, já que a idéia de sustentabilidade passa também pelo indivíduo, a sociedade e o meio ambiente em que estes estão inseridos, fato que, no caso dos bairros em estudo, remete para as questões relacionadas à dignidade e justiça social;
- Intensificar ações buscando uma adequada instalação das comunidades, lembrando que o investimento necessário para a recuperação ambiental é maior do que os custos de preservação;
- Reivindicar o direito à cidadania, o que engloba a qualidade de vida e a satisfação das necessidades individuais e coletivas, que, se não administradas, interferem no bem-estar dos cidadãos. Vale destacar a importância da dimensão cultural, pois esta é também fundamental à noção de qualidade de vida;
- Por fim, seria desejável a implementação de uma Agenda 21, a fim de que os bairros experimentassem e tivessem oportunidades a um planejamento baseado no enfoque da sustentabilidade.

## Referências

- BELOLLI, M. et al.; QUADROS, J.; GUIDI, A. A História **do Carvão de Santa Catarina**. Criciúma, SC, IOESC, 2002. 295 p.
- CAPRA, Fritjof. O ponto de mutação. São Paulo: Cultrix, 1982, 445p.
- CENTRO DE ECOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Carvão e meio ambiente**. Porto Alegre, Ed. da UFRGS, 2000.
- FLORIANI, D. Conhecimento, meio ambiente & globalização. Curitiba, Juruá, 2004.
- Fórum Brasileiro de ONGs e movimentos sociais para o meio ambiente e desenvolvimento. Brasil século XXI os caminhos da sustentabilidade cinco anos depois da RIO-92, Rio de Janeiro, 1997.
- FATMA - Fundação do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina. Diagnóstico Ambiental de Santa Catarina. Florianópolis, (MIMEO), 1991.

GLAUSER, S. et al; MCALLISTER, M. L.; MILIOLI, G. The challenges of sustainability in mining regions: the coal mining region of Santa Catarina, Brazil. *Natural Resources Forum*. USA, UN: Blackwell Publishing, 2005. p. 1 - 11

GONÇALVES, M. T. Meio ambiente e questão urbana. *Revista de Ciências Sociais*, v. 39, n. 163. São Leopoldo, UNISINOS, 2003.

HARVEY, D. *A condição pós-moderna*. São Paulo: Loyola, 1992.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, *Contagem populacional*, 2006. CD-rom.

JACOBI, P. R. *Cidade e meio ambiente: percepções e práticas em São Paulo*. São Paulo, Annablume, 2000.

**KOPEZINSKI, I.** *Mineração x meio ambiente: considerações legais, principais impactos ambientais e seus processos modificadores*. Porto Alegre, UFRGS, 2000.

LEFF, E. *Epistemologia Ambiental*. São Paulo, Cortez, 2001.

\_\_\_\_\_. **Racionalidade ambiental: a reapropriação social da natureza**. Rio de Janeiro, Civilização Brasileira, 2006.

MENEGAT, R.; ALMEIDA, G (Orgs.). *Desenvolvimento sustentável e gestão ambiental nas cidades: estratégias a partir de Porto Alegre*. Porto Alegre, Ed. da UFRGS, 2004.

MILIOLI, G. *Mineração de carvão e desenvolvimento sustentado no sul de Santa Catarina: estudo exploratório de percepção, valores e atitudes do meio ambiente num bairro do município de Criciúma*. Criciúma, Luana, 1995.

\_\_\_\_\_. *Abordagem Ecológica para a Mineração: uma Perspectiva Comparativa para Brasil e Canadá*. Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 1999.

\_\_\_\_\_. *Mining, environment, and development in southern Santa Catarina, Brazil: non-governmental organization, Terra Verde and its ideas for sustainability*. *Environments: a Journal of Interdisciplinary Studies*. Waterloo, Ca, 2005. p. 25 – 40.

MORIN, E. *O problema epistemológico da complexidade*. 2. ed., Portugal, 1996.

NOSSO FUTURO COMUM. *Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento*. Rio de Janeiro, Ed. FGV 1988.

PETRAGLIA, I. C. *Edgar Morin: a educação e a complexidade do ser e do saber*. Petrópolis, Ed. Vozes, 1995. 115 p.

PMC- Prefeitura Municipal de Criciúma. Cadastro Único de Saúde, 2003.

PMC- Prefeitura Municipal de Siderópolis. Entrevista realizada junto a Secretaria de Saúde e Secretaria de Planejamento, 2006.

PRIGOGINE, I; STENGERS, E. A nova aliança: metamorfose da ciência. Brasília, Editora da Universidade de Brasília, 1997.

SACHS, I. Caminhos para o desenvolvimento sustentável: Idéias Sustentáveis. Rio de Janeiro, Garamond, 2002.

\_\_\_\_\_. Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente. São Paulo, Studio Nobel, 1993.

SANTA CATARINA. Secretaria do Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, Diretoria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Federação Catarinense de Associações de Municípios, Associação dos Municípios da Região Carbonífera. 1996.

SANTOS, M. O espaço do cidadão. 4. ed., São Paulo, Nobel, 1998.

SOUZA, M. L. S. Dos problemas sócio-espaciais à degradação ambiental – e de volta aos primeiros. In: O desafio metropolitano: um Estudo sobre a Problemática Sócio-espacial nas Metrôpoles Brasileiras. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2000.

SPOSATI, A. Mapa da exclusão / inclusão social da cidade de São Paulo. São Paulo, EDUC, 1996.

VOLPATO, T.G. A pirita humana. Florianópolis, SC: Ed. UFSC: Assembléia Legislativa do Estado de Santa Catarina, 1994.