

Tecnologias de recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão e usos futuros do solo

Ana Carolina Vicenzi Franco¹
Maria Paula Casagrande Marimon²

INTRODUÇÃO

Drenada pelas bacias hidrográficas dos rios Tubarão, Urussanga e Araranguá, a região carbonífera catarinense, localizada no sul do Estado de Santa Catarina, caracteriza-se pelo alto grau de comprometimento da qualidade ambiental, sendo reconhecida pelo decreto federal 85.206/80 como a 14ª Área Crítica Nacional em termos de controle da poluição ambiental. Essa região apresenta sérios problemas de contaminação dos recursos hídricos e solos, principalmente relacionados à má disposição do estéril e rejeitos da atividade mineradora de carvão, que contém rochas sedimentares, restos de carvão e pirita. De acordo com Alexandre e Krebs (*apud* GALLATO *et al.*, 2007) e IPAT-UNESC (*apud* GALLATO *et al.*, 2007), na região em questão existem cerca de 5.000 ha de áreas degradadas pela extração do carvão, com 2/3 dos cursos d'água comprometidos pela drenagem ácida de mina.

A disposição dos rejeitos a céu aberto é responsável pela acidificação do aquífero freático subjacente e pela contaminação das águas superficiais, a partir da reação de oxidação da pirita (ou sulfeto de ferro). Segundo Mendonça *et al.* (2002), a acidificação das drenagens é desencadeada pela oxidação do sulfeto de ferro (FeS₂) presente nos rejeitos do carvão, que são expostos à ação do oxigênio e em menor proporção no contato com a água, em minas abandonadas ou em operação.

Os carvões brasileiros classificam-se como betuminoso e sub-betuminoso, apresentando elevados teores de pirita (FeS₂) e metais pesados. “Os teores de cinza resultantes da queima são também elevados, da ordem de 50%” (BORMA *et al.*, 2003 p. 03). Em função disso, os autores afirmam que os depósitos de resíduos gerados nos processos de lavra e beneficiamento (estéreis e rejeitos) e na combustão (cinzas) devem ser planejados levando-se em conta a não contaminação da água e do solo.

Em 1993, as empresas carboníferas, o Estado de Santa Catarina e a União Federal sofreram ação civil pública do Ministério Público Federal, visando à recuperação ambiental das áreas degradadas pela atividade mineradora. De acordo com a Lei 9.985, de 18 de julho de 2000 (Sistema Nacional de Unidades de Conservação - SNUC), a *recuperação* consiste na restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original. Os réus foram condenados a apresentarem projetos de recuperação para as áreas degradadas. O MPF (2007) define *área degradada* como aquela que teve alterada por ação antrópica alguma de suas características físicas, químicas e biológicas, alterando a estabilidade do ecossistema e afetando negativamente seu potencial sócio-econômico.

A recuperação das áreas mineradas, pela recomposição da paisagem e o monitoramento das águas superficiais, subterrâneas e dos solos permite propor novos usos às áreas. Cabe ressaltar, entretanto, que a definição dos usos do solo mais apropriados a cada área deve considerar o tempo e grau de recuperação da qualidade ambiental, importantes parâmetros para o planejamento territorial de usos futuros de áreas degradadas.

¹ Graduanda do curso de Geografia da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

² Orientadora, professora do Departamento de Geografia da UDESC.

DESENVOLVIMENTO

Rubio e Tessele (2002), referindo-se à atividade de lavra em geral, descrevem seus principais impactos associados: geração de ruído e poeira, contaminação de solos (em alguns casos pelos explosivos derivados da glicerina), geração de drenagem ácida, derrame de óleos, graxas e solventes orgânicos, emissão de gases, descarte de plásticos, formação de lodos (precipitados) e rejeitos produtores de ácidos, poluição visual, alterações da biodiversidade, deposição e estocagem de rejeitos (em bacias/cavas), geração de radioatividade, e combustão espontânea.

Farias (2002) aponta quatro classes de problemas decorrentes das atividades de mineração no Brasil: poluição da água, poluição do ar, poluição sonora e subsidência do terreno. Pode-se considerar a afirmação de Farias (2002) válida para atividades de lavra do carvão por mineração subterrânea, onde a subsidência do terreno é um problema relacionado com o desmonte dos pilares nas galerias. No Brasil, desde 1990, a prática de desmonte dos pilares está proibida, devendo a mina permanecer estruturalmente íntegra após o esgotamento do depósito (GOMES *et al.*, 2003).

Para atividades de mineração à céu aberto, o problema da alteração topográfica está relacionado à abertura das cavas de extração e à disposição dos estéreis em pilhas, formando as paisagens lunares. Com efeito, o World Coal Institute (2005) aponta como problemas associados à mineração de superfície: alteração da paisagem, erosão do solo, poluição do ar (emissão de material particulado), poluição sonora (ruído), impactos na biodiversidade local e poluição hídrica.

A poluição das águas superficiais e subterrâneas pela mineração de carvão se dá pelo processo de oxidação de minerais sulfetados (principalmente pirita) presente nos rejeitos ou estéreis pelo oxigênio gasoso, e lixiviação do oxidado pela água, que dá origem a um efluente conhecido por drenagem ácida de mina (DAM). No Brasil, um dos problemas mais sérios de geração de DAM ocorre nas minerações de carvão de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (UBALDO *et al.*, 2006).

Em contato com a água, os produtos da oxidação são solubilizados dando origem à drenagem ácida de mina (DAM). Essa solução, em contato com outras substâncias existentes, dissolve outros metais, devido ao baixo pH decorrente do contato da água com o material oxidado, acarretando a solubilização de diversos elementos químicos como o ferro, manganês, cálcio, magnésio, o sódio, além de alguns traços de arsênio, selênio e outros (SANTA CATARINA, 1990). Com o baixo pH, o corpo receptor (subterrâneo ou superficial) mantém dissolvida grande parte dos metais pesados liberados da pirita durante sua oxidação. De acordo com Machado *et al.* (1984), a oxidação de 1 mol de pirita resulta em 2 moles de ácido sulfúrico, dando início a um processo crescente de formação de sulfatos férrico e ferroso e mais ácido sulfúrico.

Estratégias para minimização da oxidação dos sulfetos devem ser adotadas tanto durante as atividades de lavra quanto na etapa do fechamento de mina, incluindo o monitoramento da área por longo tempo. Possa e Santos (2003) afirmam que, devido às múltiplas combinações de acidez e constituintes metálicos presentes em cada drenagem ácida, estas possuem caráter único, o que implica variações nos tipos de tratamento mais adequados entre um lugar e outro.

Controle e tratamento da drenagem ácida de mina

De acordo com Mendonça *et al.* (2002) e Ubaldo *et al.*, (2006), dois aspectos devem ser considerados na avaliação dos impactos da drenagem ácida de minas: primeiro, a extensão do impacto não fica circunscrita à área do empreendimento, podendo contaminar cursos

d'água superficiais e subterrâneos. Segundo, a reação química envolvida no processo é lenta, tornando o problema presente mesmo depois de cessada a extração do carvão. Segundo Trindade e Soares (2004), a DAM é um dos mais graves impactos ambientais ligados à atividade extrativa de carvão, devido ao caráter duradouro de seu potencial poluidor.

Levando-se em conta esses aspectos, Mendonça *et al.* (2002) citam dois enfoques possíveis para a minimização da geração da DAM. O primeiro atua na prevenção da formação da drenagem ácida, através da utilização de sistemas passivos; e o segundo consiste na remediação do problema, através do tratamento das águas que lixiviam a pirita oxidada, a partir de processos ativos e/ou passivos.

O tratamento da drenagem ácida por sistemas passivos consiste basicamente no cobrimento da área com potencial de geração da DAM com água (cobertura úmida) ou com camadas de solo (cobertura seca). O objetivo desse procedimento é minimizar o ingresso de oxigênio e água para dentro do material reativo, diminuindo dessa forma a geração de acidez.

Possa e Santos (2003) destacam que o princípio do tratamento ativo é o fornecimento de reagentes alcalinos como forma de neutralizar a acidez e promover a precipitação dos íons metálicos. De acordo com esses autores, o efluente resultante pode ser reutilizado ou descartado em rios conforme o estipulado pela legislação federal, estadual ou municipal. Medidas de remediação da DAM utilizando métodos passivos incluem, segundo Rubio e Tessele (2002), a descontaminação do efluente em banhados ou sistemas de terras úmidas (wetlands). Para Menezes *et al.* (2004), os métodos de remediação do tipo passivo representam importante alternativa técnica frente aos sistemas convencionais, mas ressaltam que são eficientes somente no tratamento de efluentes com cargas reduzidas de contaminantes.

Caracterização da área de estudo

A região carbonífera catarinense faz parte, geologicamente, da Bacia Intracratônica do Paraná, e de acordo com Machado *et al.* (1984), ocorrem, regionalmente “rochas Pré-Gonduânicas representadas pelo Complexo Metamórfico-Migmático, rochas gonduânicas representadas pelas formações Rio do Sul, Rio Bonito, Palermo, Irati, Estrada Nova, Rio do Rasto, Botucatu e Serra Geral e sedimentos quaternários constituídos por aluviões”. Nesta região afloram rochas sedimentares e ígneas, ocorrendo também extensos depósitos de leques aluviais junto aos cursos d'água (KREBS, 2004).

Segundo Krebs (2004) as três bacias hidrográficas que drenam a região carbonífera são impactadas pela mineração de carvão, sendo a bacia do rio Araranguá a que se encontra em situação mais crítica, com cerca de 80% das atividades de lavra ocorrendo em seus limites.

A sub-bacia do rio Mãe Luzia, onde se encontram as atividades carboníferas, está comprometida em praticamente toda a sua extensão. Segundo o documento “Plano de gestão e gerenciamento da bacia do Rio Araranguá”, nessa sub-bacia estiveram concentradas em torno de 70% das minerações de carvão do país durante as décadas de 70 e 80. Na confluência com o rio Fiorita (latitude 28°36'24" e longitude 49°28'57"), a situação torna-se ainda mais complexa, uma vez que esse corpo d'água encontra-se completamente degradado pela mineração a céu aberto (SANTA CATARINA, 1997).

Alguns trabalhos desenvolvidos em Santa Catarina

Em Santa Catarina, a CSN realiza trabalhos de recuperação ambiental em várias áreas mineradas pela empresa. No Campo Morozini (Treviso), uma antiga área de mineração à céu aberto com 221 ha, o projeto teve as obras iniciadas em junho de 2006 e a expectativa de conclusão é para o final de 2009.

Os trabalhos incluem a remoção e isolamento de 90.000 m³ de rejeitos em célula geotecnicamente impermeabilizada e compactada a $k = 10^{-7}$ cm/s. A célula de rejeitos do Campo Morozini possui 2 m de material inerte acima do rejeito, de forma a evitar a infiltração do H₂O e possível oxidação do sulfato ferroso. A recomposição topográfica já foi finalizada, com a movimentação de 1.900.000 m³ de estéreis. Atualmente (agosto de 2008), os trabalhos encontram-se em fase de recobrimento dos estéreis remodelados com camadas de calcário (na proporção de 49 ton/ha), argila (50 cm), calcário (21 ton/ha), cama de aviário, fertilizantes e turfa ambiental, e semeadura de espécies de inverno: aveia (*Avena L.*), azevem (*Lolium L.*) e ervilhaca (*Vicia L.*), e verão: grama missioneira (*Axonopus*), pensacola (*Paspalum sauriae*) e estilozantes (*Stylosante L.*).

Concomitante à reconstrução da topografia são realizadas as obras de construção da rede de canais de drenagem, que tem por objetivo a coleta das águas da chuva, evitando ao máximo sua infiltração, minimizando assim a possibilidade de geração de drenagem ácida de mina. Esses canais são construídos numa perspectiva naturalística, a partir da utilização de troncos de eucalipto para compor as paredes do canal e brita em seu leito.

A escolha dos materiais para construção dos canais de drenagem foi feita em detrimento dos canais de concreto por ser mais apropriada às condições do terreno remodelado, que possui tendência à compactação. A estrutura rígida dos canais de concreto não permite sua acomodação ao terreno. Com o tempo sua função coletora fica prejudicada, pois ao ceder do terreno estes ficam suspensos e ocorre erosão nas bordas. Os canais de drenagem do Campo Morozini são construídos em madeira, com toras de eucalipto e leito de brita, que proporcionam alto coeficiente de rugosidade. Sua estrutura permite a acomodação ao trabalho do terreno. Outra vantagem apresentada é a durabilidade do material, que se incorpora ao terreno e à paisagem na medida em que envelhece, sendo naturalmente decomposto com o tempo (ver figuras 1 e 2), permanecendo apenas o leito de drenagem natural.

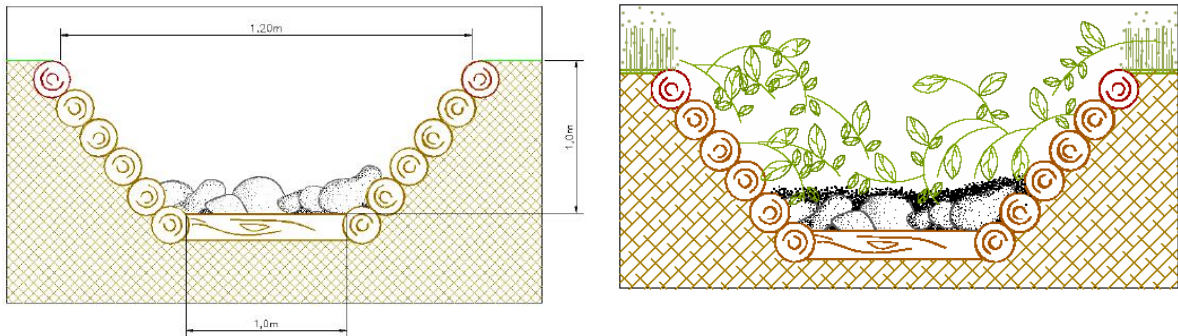


Figuras 1 e 2: Canal de drenagem recém-construído no Campo Morozini (data: 29 de agosto de 2008), e canal já escondido pela vegetação e incorporado à paisagem, indicado pela seta vermelha, no Campo Malha II Leste, construído em 2004 (data: 29 de agosto de 2008). Fotos: Ana Carolina Vicenzi Franco.

Oliveira e Ugioni (2006) descrevem três etapas de desenvolvimento desses canais de drenagem nas áreas de recuperação ambiental. Na primeira fase, com o canal recém-implantado (figura 3) o coeficiente de rugosidade se apresenta alto em função do diâmetro das

pedras (brita ou seixo rolado) do leito do canal, funcionando como um dissipador de energia para o escoamento das águas, o que tem como objetivo a redução da possibilidade de erosão do canal. Num segundo momento, entre o plantio, germinação e adensamento da vegetação o leito do canal sofre sedimentação pelo carreamento de argilas, impactando no coeficiente de rugosidade. Nesta etapa a vegetação faz o papel de dissipador de energia.

Na terceira etapa (figura 4) a formação vegetal se encontra completamente desenvolvida, tendo como resultado a redução do coeficiente de escoamento superficial. Segundo os autores, nesta etapa o processo de sedimentação do leito tende a cessar, alcançando a estabilidade.



Figuras 3 e 4: Canal de drenagem na primeira etapa do processo, recém-implantado e canal de drenagem na terceira etapa do processo, com cobertura de vegetação e leito de pedras recoberto por sedimentos.

Fonte: Oliveira e Ugioni, 2006.

A área conhecida como Campo Mina Malha II situa-se a nordeste da cidade de Siderópolis (ver figura 5), na sub-bacia do rio Fiorita, e segundo o IPAT/UNESC (2005), foi dividida em duas áreas para efeito de diagnóstico e projeto de recuperação ambiental (PRAD³): Campo Mina Malha II Leste (135 ha) e Campo Mina Malha II Oeste (60 ha).

Estudos de caracterização geológica e geotécnica identificaram que as pilhas de estéreis que se encontravam na área da Malha II Leste eram constituídas por blocos de arenitos, siltitos e folhelhos, de granulometria centimétrica a métrica. Esses blocos representam as rochas da Formação Rio Bonito e originalmente se intercalavam em camadas superpostas, acima da camada de carvão Barro Branco (IPAT/UNESC, 2002c). No Campo Malha II Oeste a constituição das pilhas de estéril se apresentava variável, mas com predomínio de blocos centimétricos a métricos de arenitos quartzosos, friáveis ou maciços, muitas vezes portadores de pirita ou marcassita, siltitos e folhelhos, e, esporadicamente depósitos de rejeito de carvão (IPAT/UNESC, 2005). Ensaio de solubilização a que foram submetidas amostras de estéreis e rejeitos de carvão do Campo Malha II Oeste indicaram liberação de soluções ácidas quando intemperizadas, com teores de ferro, sulfatos e alumínio além do estabelecido nas normas ABNT/NBR 10004 e 10006, caracterizando os resíduos como não inertes (IPAT/UNESC, 2005). A figuras 6 e 7 ilustram uma área no Campo Malha II Oeste antes e após os trabalhos de retaludamento e revegetação.

³ PRAD: Projeto de Reabilitação de Área Degradada. Instrumento legal previsto pelo Decreto nº 97.632/1989. Em Santa Catarina, o licenciamento ambiental do PRAD é função da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FATMA). No caso das áreas degradadas que são objeto da Ação Civil Pública nº 2000.72.04.002543-9/SC, o PRAD deverá, além de ser aprovado pela FATMA, sofrer avaliação do Ministério Público Federal e ser homologado pelo Juiz (MPF, 2007).

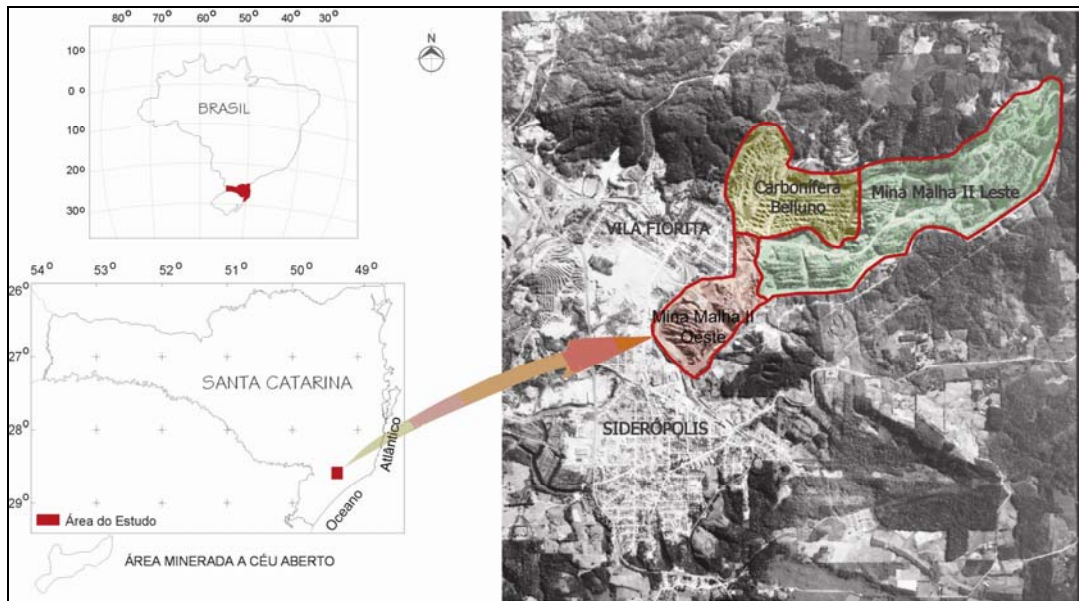


Figura 5: Localização dos Campos Mina Malha II Leste e Mina Malha II Oeste. Modificado de IPAT/UNESC (2002c).



Figuras 6 e 7: Pilhas de estéril e Lagoa Azul, antiga cava de mineração no Campo Malha II Oeste, antes dos trabalhos de recuperação (Sem data. Fonte: IPAT/UNESC, 2005); e a mesma área, após trabalhos de recuperação. Data: 19 de fevereiro de 2008. Foto: Maria Paula Casagrande Marimon.

O IPAT/UNESC (2002c) identificou 6 zonas litológicas no domínio da Malha II Leste: a área conhecida como Projeto “M” (projeto piloto de recuperação desenvolvido na década de 1990), os depósitos de rejeitos, localizados ao longo das estradas de acesso local, os depósitos de estéreis constituídos por arenitos quartzosos, os arenitos piritosos, os folhelhos carbonosos e uma associação de siltitos, folhelhos e arenitos. As análises químicas dos constituintes dessas litologias demonstraram que os resíduos das amostras de algumas dessas zonas litológicas não são inertes, constituindo fontes ativas de poluição, indicando a necessidade de isolamento ambiental.

Os estudos com os solos locais identificaram que o material de origem constitui-se de siltitos, folhelhos carbonosos, arenitos quartzosos e arenitos piritosos. A caracterização de suas propriedades físicas mostrou um substrato com elevada desestruturação, textura arenosa, elevada pedregosidade, alta friabilidade, e com ausência de horizontes. “O solo desenvolvido sobre estéreis, com baixa fertilidade, altos teores de alumínio trocável, excessiva acidez e baixa capacidade de retenção de água constituíram-se em fatores de seleção para o estabelecimento das espécies nas referidas áreas” (IPAT/UNESC, 2002c). Na Malha II Oeste,

o substrato se apresentou nas mesmas condições que na Malha II Leste, com elevado teor de acidez (pH 3,7 a 4,6), desestruturado, friável, com textura arenosa e elevada pedregosidade.

Os teores de matéria orgânica apresentavam-se variáveis, onde predominavam os níveis baixos, médios e suficientes. Em algumas áreas, os níveis de matéria orgânica se apresentavam altos, e nestes locais o crescimento da vegetação ocorria espontaneamente (IPAT/UNESC, 2005). Em termos gerais, a vegetação encontrada nas Malhas Leste II e Oeste constituía-se de plantas pioneiras e ruderais, pouco exigentes em fertilidade de solo, resistentes a estiagens e com grande capacidade de competição e adaptação (IPAT/UNESC, 2002c, 2005).

A caracterização da qualidade das águas superficiais na Malha II Leste, coletadas em rios e lagos artificiais à montante, dentro da área e à jusante da mesma indicou concentração de poluentes na parte mais baixa da sub-bacia, especialmente de metais. Na Malha II Oeste, as águas superficiais apresentaram variações em termos de qualidade, indicando ambientes severamente degradados em duas lagoas, intermediário (uma lagoa) e com boa qualidade em outra, com presença de organismos aquáticos, inclusive peixes (IPAT/UNESC, 2005).

As análises de água do lençol freático, coletadas em dois poços piezométricos mostraram que as águas subterrâneas são impróprias para consumo humano. Entretanto, o IPAT/UNESC (2002c) comenta que as amostras apresentaram características bem superiores em comparação com águas normalmente encontradas em mineração de carvão, evidenciando a associação litológica das camadas e os rejeitos depositados sob as pilhas de estéreis não têm influência significativa na geração de drenagem ácida conduzida ao freático e captada nesses dois poços.

Tecnologias utilizadas na recuperação das áreas da CSN – Siderópolis

Os trabalhos de recuperação das áreas Campo Mina Malha II Leste e Oeste foram realizados de acordo com as seguintes etapas (IPAT/UNESC, 2002c, 2005):

- Separação e isolamento dos rejeitos em células compactadas e geotecnicamente isoladas;
- Remodelagem do terreno por trabalhos de terraplanagem, baseada em estudos geotécnicos;
- Incorporação de calcário em pó aos estéreis remodelados na proporção de 25 a 30 t/ha;
- Recobrimento da camada de estéreis com argila (de 20 a 50 cm – variável com a litologia sobreposta);
- Incorporação de calcário, turfa e adubos ao solo argiloso;
- Incorporação de cama de aviário ao solo construído;
- Recobrimento do solo com turfa de raspagem estabilizada;
- Implantação de canaletas de concreto para drenagem das águas superficiais;
- Revegetação de herbáceas com sementeira a lanço e arbóreas (bracatinga – *Mimosa scabrella*) com saraquá;
- Abertura de covas, correção do solo e plantio de mudas de espécies pioneiras, secundárias e climácicas em toda a área;
- Monitoramento da qualidade das águas superficiais e subsuperficiais, solo, suscetibilidade à erosão, fauna e flora, durante o período de reabilitação e prolongando-se 60 meses após a conclusão das obras.

Os projetos de reabilitação dos Campos Malha II Leste e Oeste previam, originalmente a construção de duas células de rejeitos, uma em cada área. Entretanto, o rejeito possui em torno de 6 a 8% de carvão mineral, sendo passível de rebeneficiamento. Assim, antes da

execução (remoção e confinamento), a CSN questionou a proprietária legal da área (Carbonífera Belluno) sobre seu interesse no mesmo.

A carbonífera então removeu e rebeneficiou parte dos rejeitos da Malha II Leste. Os rejeitos do rebeneficiamento foram acondicionados em depósito de rejeitos de propriedade da Carbonífera Belluno, fora do domínio das Malhas II Leste e Oeste. A parte não removida pela empresa, assim como os rejeitos da Malha II Oeste, foi disposta numa célula de rejeitos (ver figura 8) construída a partir da compactação⁴ de uma camada uniforme de 0,5 m de argila no fundo e nas laterais da cava, dentro da área da Malha II Leste.

Os rejeitos foram compactados na medida em que eram dispostos dentro da célula. Após o preenchimento do depósito, foi realizado seu selamento com argila compactada ($k = 1 \times 10^{-7}$ cm/s). A célula impermeabilizada foi então recoberta com uma camada de estéreis argilosos, siltosos e arenosos, com blocos menores que 0,2 m. A camada de estéreis recebeu uma camada de calcário para correção da acidez. Essa camada foi recoberta por 0,5 m de argila (com calcário incorporado). A argila, além de servir de substrato para a vegetação, também, de acordo com Skousen et al (*apud* IPAT/UNESC, 2002d) funciona como barreira à penetração de oxigênio e água no depósito de rejeitos, sem prejudicar a troca de umidade e oxigênio entre o solo e a atmosfera.

Dessa maneira, as plantas e microorganismos presentes no estrato superior limitam a penetração de oxigênio ao substrato, formando uma zona consumidora de O_2 . Segundo estudos realizados por Erickson (*apud* IPAT/UNESC, 2005) a zona de mais alta oxidação em um depósito de rejeitos se constitui naquela situada até 1,5 m abaixo da superfície. De acordo com o IPAT/UNESC (2005), a construção do depósito 2,0 m abaixo da superfície foi realizada de forma a dificultar a geração da drenagem ácida. Sobre a área do depósito foram utilizadas apenas espécies herbáceas. Poços piezométricos construídos a montante e a jusante da célula permitem o monitoramento da efetividade do lacre.

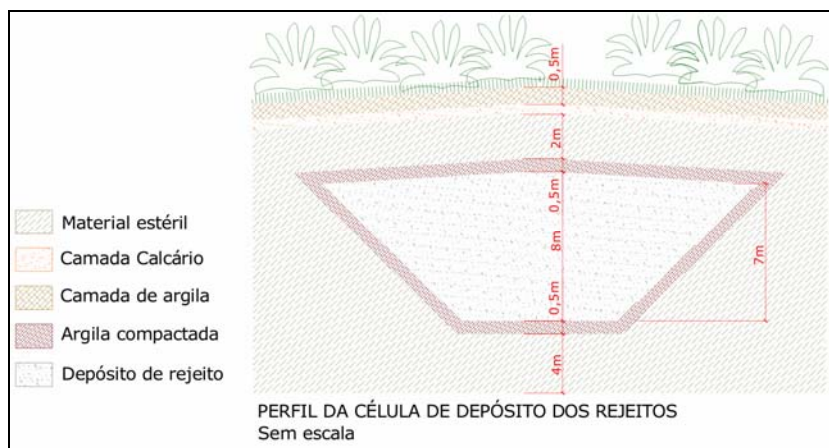


Figura 8: Perfil esquemático do depósito de rejeitos de carvão construído no Campo Malha II Leste. Fonte: IPAT/UNESC, 2005.

A recomposição topográfica foi realizada pelo desmonte das pilhas de estéril e remodelagem do terreno por trabalhos de terraplanagem, com o objetivo de torná-lo mais plano (declividades inferiores a 20%). Também foi realizado o retaludamento das margens do Rio Fiorita, de uma lagoa na Malha II Oeste e o aterramento de três lagoas, também na Malha II Oeste.

Segundo o IPAT/UNESC (2005), a reconfiguração do terreno foi realizada pelo recobrimento dos blocos decimétricos a métricos de estéreis piritosos com uma camada de 2,0 m de espessura de estéreis siltosos ou argilosos, de forma a garantir um substrato de sustentação para o solo reconstruído. Em seguida aos trabalhos de reconformação do terreno,

⁴ Segundo Massad (*apud* IPAT/UNESC, 2003), a compactação de um solo pode ser definida como a redução, mais ou menos rápida, do índice de vazios formado pelos poros do solo, utilizando processos mecânicos.

foi feita a correção de acidez do substrato com aplicação de calcário PRNT mínimo de 75,1% (Classe C) sobre os estéreis e incorporado aos mesmos. De acordo com o IPAT/UNESC (2002c, p. 19), adição de calcário em pó tem por finalidade corrigir a acidez do substrato e, ao mesmo tempo, tornar indisponíveis (reter) metais poluentes presentes no solo como, por exemplo, o Ferro, o Alumínio e o Manganês, evitando que os mesmos sejam carreados.

A seguir aplicou-se uma camada de argila de 0,2 m sobre estéreis inertes e 0,5 m sobre estéreis piritosos. A argila recebeu mais uma camada de calcário, na proporção de 30 t/ha sobre a camada de 0,2 m e 40 t/ha sobre a camada de 0,5 m. Foram colocados então 20 t/ha de cama de aviário e 150 t/ha de turfa. Os canais de drenagem foram construídos em concreto, concomitantemente à reintrodução da vegetação (IPAT/UNESC, 2002c, 2005).

Nos trabalhos de revegetação foram implantadas, nas áreas de grande declividade como taludes do rio Fiorita e nas pilhas não remodeladas, medidas de estabilização de encostas que consistem no plantio de mudas em linha, seguindo uma curva de nível, conhecidas como “cordões vivos” (ver figura 9). Foram abertas covas de 0,50 m x 0,50 m x 0,50 m, espaçadas 1,5 m, preenchidas com argila e condicionantes de solo. A espécie escolhida para o plantio (Bracatinga – *Mimosa scabrella*) possui desenvolvimento rápido e é bem adaptada às condições da região (IPAT/UNESC, 2002c).

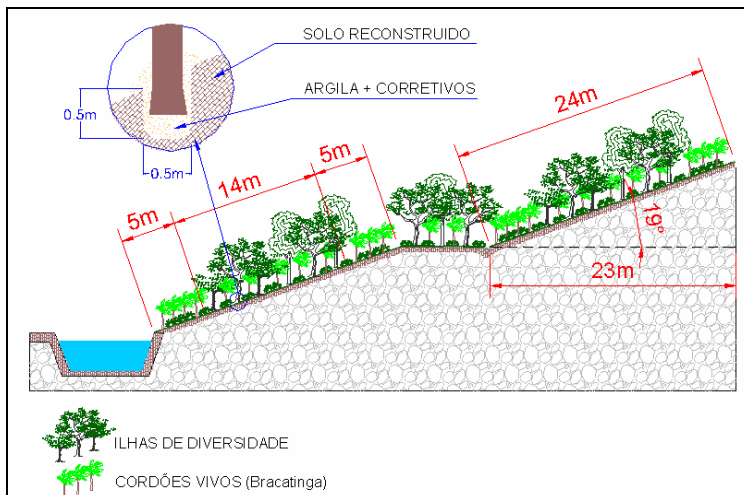


Figura 9: Croqui esquemático indicando a configuração dos taludes após remodelagem e revegetação com plantio de sementes de herbáceas a lanço, bracatinga (*Mimosa scabrella*) com saraquá e arbóreas em covas. Fonte: IPAT/UNESC, 2005.

No restante da área não remodelada foram semeadas, além do cordão vivo, bracatinga (*Mimosa scabrella*) com saraquá e gramíneas como o capim gordura (*Melinis minutiflora*) e leguminosas a lanço. Segundo o IPAT/UNESC (2002c) as espécies herbáceas (gramíneas e leguminosas) apresentam rápida emergência e desenvolvimento. Quando plantadas em consórcio, contribuem para melhorar as características físico-químicas do solo, para a fixação de partículas, ajudando na contenção do solo e evitando processos erosivos iniciais.

Nas áreas remodeladas o plantio foi realizado a partir do princípio das “ilhas de diversidade”, que consiste na introdução de uma espécie clímax, rodeada por espécies secundárias iniciais e tardias, espaçadas 2,0 m umas das outras. Assim, proporciona-se o retorno da área a uma condição florística auto-sustentável e são oferecidas à fauna condições de retorno às áreas recompostas, pelo aumento da oferta de habitats (IPAT/UNESC, 2002c, 2005).

A semeadura foi realizada com saraquá, e inicialmente foi introduzida a bracatinga (*Mimosa scabrella*) como espécie pioneira. Após um ano foi feito o raleio (retirada de alguns exemplares), de forma a criar condições para a introdução de novas espécies pioneiras e para o bom desenvolvimento dos outros exemplares. No terceiro ano foram introduzidas as espécies climáticas e secundárias, através do sistema de “ilhas de diversidade” (IPAT/UNESC, 2002c).

O capim gordura (*Melinis minutiflora*) é uma espécie que apresenta como vantagem a característica de rápido recobrimento do solo, aspecto desejável do ponto de vista do controle de erosão. Entretanto, seu uso apresenta desvantagens, por tratar-se de uma espécie que dificulta a entrada e a regeneração de espécies nativas, impedindo a sucessão natural (IPAT/UNESC, 2007a). Além disso, é altamente comburente, apresentando riscos ao processo de revegetação, sendo necessário adotar medidas preventivas de controle ao fogo (IPAT/UNESC, 2002c). A CSN já abandonou o uso desta espécie em áreas atualmente em recuperação (Campo Morozini), e estuda a possibilidade da substituição do capim-gordura na área das Malhas II Leste e Oeste.

Enquanto a área revegetada ainda não apresentava condições para o pouso de pássaros, com o desenvolvimento das espécies arbóreas em estado inicial, foram introduzidos na área poleiros construídos em bambu (ver figura 10). O objetivo da implantação dessas estruturas foi servir de ponto de descanso de aves locais e migratórias, e possibilitar o incremento de espécies vegetais locais pela presença de sementes nos excrementos das aves.

Foram realizadas ainda intervenções em dois lagos na Malha II Leste, através da adição de agentes neutralizantes (CaCO_3) ao corpo hídrico, com o objetivo de remover a acidez e recuperar a qualidade ambiental dos mesmos (IPAT/UNESC, 2002c).



Figura 10 - Capim gordura (*Melinis minutiflora*), bracatinga (*Mimosa scabrella*) e poleiros para pássaros. Campo Malha II Leste. Data: 29 de agosto de 2008. Foto: Ana Carolina Vicenzi Franco.

Resultados alcançados

Conforme o IPAT/UNESC (2007a, 2007b), os trabalhos de recuperação executados nos Campos Mina Malha II Leste e Oeste se mostraram eficazes na inibição de processos erosivos, tendo sido identificados apenas problemas pontuais que não comprometem a totalidade dos trabalhos. Os problemas identificados referem-se àquelas áreas onde foram feitas intervenções ou complementações nos sistemas de drenagem superficial, e que ainda não haviam sido recobertas pela vegetação. Outras áreas, tais como aquelas que não haviam recebido cobertura vegetal ou áreas pisoteadas por animais (bovinos e eqüinos), e ainda aquelas usadas por trilheiros, também apresentaram problemas pontuais de erosão.

O monitoramento identificou aumento nos valores de pH do solo, entretanto, em faixa ainda abaixo da ideal para o desenvolvimento das plantas. Em contrapartida, os solos analisados apresentaram valores médio a alto de nutrientes (NPK), e alta capacidade de troca de cátions. Esta, por sua vez, apresenta-se em grande parte (65%) ocupada por cátions tóxicos (Al^{+3} e H^+), reduzindo a disponibilidade de cátions nutrientes necessários ao adequado desenvolvimento das plantas, sendo ainda caracterizado como um substrato pobre. Segundo o

relatório, o substrato construído ainda não alcançou a estabilidade com as condições do ambiente, estando sujeito a alterações em suas propriedades químicas (IPAT/UNESC, 2007a, 2007b).

No Campo Mina Malha II Leste, as duas lagoas que sofreram intervenção por adição de calcário apresentaram remoção de 82% e 62,5% de acidez, 87% e 64% de ferro total, 49% e 36% de manganês, e 73% e 55% de alumínio, respectivamente. Em maio de 2007 (data do monitoramento em questão) foram identificados os maiores valores de pH dessas lagoas. Três lagoas apresentaram piora nos parâmetros físicos, químicos e biológicos em relação ao diagnóstico. Numa delas, o nível da água apresentou-se mais baixo durante o monitoramento do que no diagnóstico, o que contribui para a concentração de poluentes. Em outra lagoa, a manutenção de uma área próxima com estêreis, com o objetivo de preservar o remanescente florestal existente é a provável causa de contaminação dessa lagoa, pela lixiviação das pilhas e carreamento de materiais durante os trabalhos de remoção de estêreis e rejeitos em suas proximidades. Da mesma forma, a piora na qualidade da água da terceira lagoa pode ser explicada por processos erosivos em suas proximidades, associados a eventos de chuva, pelo arraste de materiais para o leito do corpo hídrico (IPAT/UNESC, 2007a).

Alternativas de uso futuro das áreas

Para o World Coal Institute (2005), a mineração de carvão constitui apenas um uso da terra de caráter temporário, sendo vital que as operações de reabilitação sejam procedidas logo a seguir da atividade de lavra, evitando a exposição desnecessária dos rejeitos e estêreis e a formação da drenagem ácida. Em melhores práticas um plano detalhado de reabilitação ou recuperação deve ser apresentado para cada mina, contemplando desde o período do início das operações até depois de cessada a atividade. Ainda de acordo com World Coal Institute (2005), áreas reabilitadas podem ter diversos usos, incluindo agricultura, silvicultura, habitat para vida silvestre e recreação.

Na região carbonífera catarinense, o MPF (2008) determinou critérios para a definição de usos futuros das áreas recuperadas. Aquelas áreas degradadas que são legalmente caracterizadas como de preservação permanente (APP), como as áreas ribeirinhas, devem ser recuperadas à sua condição ideal. “Nenhuma atividade econômica ou edificação pode ser desenvolvida nestas áreas, que devem ter sua função ambiental recomposta” (MPF, 2008). Uso futuro diverso para essas áreas somente poderá ser admitido com base na legislação vigente (Código Florestal e Resolução CONAMA 369/2006), que apenas autoriza corte de vegetação e intervenção em APP em caso de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental.

Para outras áreas degradadas que não caracterizem APP's, o MPF (2008) considera aceitável qualquer proposta de uso futuro, desde que respeite a legislação, sobretudo o Plano Diretor do Município, e que não comprometa o trabalho de impermeabilização do solo. Áreas cuja destinação seja de ordem econômica, tais como atividades de agricultura, pecuária, implantação de indústrias ou loteamentos, o MPF (2008) assinala que os futuros usuários devem ser informados das restrições incidentes, tais como cuidados com a impermeabilização ou restrições de gabarito, para aquelas áreas que foram mineradas em subsolo.

Para as áreas cuja destinação seja econômica, pelo menos 20% deve ser averbada como reserva legal. Entretanto a área de reserva legal pode ser compensada em outra propriedade dentro dos limites da bacia hidrográfica.

No caso de áreas destinadas à conservação da natureza o MPF (2008) ressalta a necessidade de criação de uma unidade de conservação, conforme a Lei nº 9985/2000 do Sistema Nacional de Unidade de Conservação – SNUC.

A CSN pretende tornar as áreas dos Campos Mina Malha II Leste e Oeste locais de interesse recreativo, cultural e científico, oferecendo à comunidade nova opção de lazer, e ao Poder Público Municipal um atrativo turístico, uma vez que 4 ha no Campo Mina Malha II Oeste foram preservados como testemunho histórico da mineração (IPAT/UNESC, 2005).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O carvão mineral é um recurso energético com expressiva participação entre as reservas brasileiras de combustíveis fósseis, e a atividade de mineração deste bem mineral se constitui em importante dinamizador das economias locais e regionais em Santa Catarina, sendo sua exploração como recurso energético justificada.

Entretanto, à atividade de lavra do carvão, seja a céu aberto ou por subsolo, estão associados diversos impactos na paisagem, na qualidade das águas superficiais e subterrâneas, qualidade dos solos e do ar. Da mesma forma, as atividades relacionadas ao beneficiamento do carvão e seu consumo pelas usinas termoelétricas ou na indústria siderúrgica também são responsáveis pela geração de resíduos, que devem ser ambientalmente isolados pelo seu caráter potencialmente poluidor.

A drenagem ácida de mina é um dos problemas mais graves relacionados à atividade extrativa do carvão, sendo gerada tanto pela exposição dos sulfetos metálicos encaixantes do carvão à atmosfera (oxigênio e água da chuva), como pelo processo de beneficiamento - separação gravimétrica do carvão e dos rejeitos em esteiras úmidas. Da mesma forma, tecnologias de controle e tratamento da drenagem ácida de mina têm sido desenvolvidas sob dois enfoques. O primeiro visa à prevenção da DAM pelo isolamento do material reativo através do uso de coberturas secas e úmidas. O segundo prevê a remediação do problema, pela coleta e tratamento dos efluentes do beneficiamento, pela neutralização com agentes alcalinos ou pela ação de processos físicos, químicos e biológicos em sistemas passivos.

Nas áreas da CSN, em Siderópolis (Campos Mina Malha II Leste e Oeste) e Treviso (Campo Morozini), foram observadas algumas dessas tecnologias em aplicação. Os resultados obtidos até agora nos Campos Mina Malha II Leste e Oeste, expressos pelos relatórios de monitoramento das áreas, apresentam uma sensível melhora das condições ambientais, evidenciada pelo aumento nos valores de pH dos corpos hídricos e solos, e pela crescente recolonização por diversas espécies, vegetais e animais, nas áreas reabilitadas.

Entretanto, não se deve tomar o exemplo bem sucedido da CSN como uma receita a ser aplicada em qualquer área degradada pela mineração de carvão, em face de diferenciações regionais. Faz-se necessário um estudo criterioso das condicionantes ambientais de cada área, de forma a se identificar quais tecnologias se apresentam como alternativas mais adequadas. Da mesma forma pode-se dizer das atividades de lavra atuais, que devem ser planejadas levando-se em conta a reabilitação imediata à exploração, minimizando os impactos da atividade sobre o ambiente. Não se poderia ainda deixar de ressaltar a importância de um manejo adequado do processo produtivo inteiro. O planejamento da atividade de mineração deve prever a mitigação dos impactos desde a prospecção até a destinação dos resíduos do beneficiamento e consumo industrial do carvão, passando pelo planejamento dos usos futuros da área minerada. Isso implica pensar a efetividade temporal dos processos de prevenção da drenagem ácida de mina, uma vez que são tecnologias relativamente recentes, não havendo informações sobre monitoramentos a longo prazo (décadas).

Por fim, as possibilidades de uso das áreas recuperadas na região carbonífera catarinense se apresentam amplas, como evidenciado pelo Ministério Público Federal, desde que esses usos não comprometam a efetividade dos trabalhos de recuperação, em especial no que concerne à prevenção da drenagem ácida de mina. É indispensável a participação das populações locais nas decisões sobre os destinos das áreas recuperadas, numa forma de

construção conjunta (poder público – população – empresas) da paisagem futura dos municípios do sul catarinense.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORMA, L. De S. et al. **Utilização de cinza no contexto da reabilitação de áreas de mineração de carvão.** Contribuição Técnica elaborada para o V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Porto Alegre - RS, maio 2003. Disponível em <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2003-025-00.pdf>>. Acesso em 18 de abril de 2008.

GOMES, A. J. P. CRUZ, P. R. BORGES, L. P. **Recursos Mineraiis Energéticos: Carvão e Urânio.** In: Geologia, Tectônica e Recursos Mineraiis do Brasil L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.) CPRM, Brasília, 2003. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/publique/media/capXI_a.pdf>. Acesso em 20 de abril de 2008.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e meio ambiente no Brasil.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 2002. Disponível em <http://www.cgee.org.br/prospeccao/doc_arq/prod/registro/pdf/regdoc1022.pdf>. Acesso em 25 de agosto de 2008.

GALLATO, S. L. *et al.* Emprego de coberturas secas no controle da drenagem ácida de mina: estudos em campo. **Engenharia Sanitária e Ambiental.** Eng. Sanit. Ambient. [online]. v. 12, n. 2, p. 229-236, abr/jun 2007. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v12n2/a14v12n2.pdf>>. Acesso em 10 de novembro de 2008.

IPAT/UNESC – INSTITUTO DE PESQUISAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS/UNIVERSIDADE DO EXTREMO-SUL CATARINENSE. **Projeto de Reabilitação Ambiental de Áreas Degradadas pela atividade extrativa de carvão mineral:** Campo Malha II Leste, Siderópolis – Santa Catarina. v. 2. Projeto descritivo. Criciúma, 2002c.

IPAT/UNESC – INSTITUTO DE PESQUISAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS/UNIVERSIDADE DO EXTREMO-SUL CATARINENSE. **Depósito de rejeitos do Campo Malha II Leste.** Criciúma, 2002d.

IPAT/UNESC – INSTITUTO DE PESQUISAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS/UNIVERSIDADE DO EXTREMO-SUL CATARINENSE. **Of. Nº 031/2003 IPAT.** Compactação do depósito de rejeitos PRAD Malha II Leste. Criciúma, 2003.

IPAT/UNESC – INSTITUTO DE PESQUISAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS/UNIVERSIDADE DO EXTREMO-SUL CATARINENSE. **Projeto de Reabilitação Ambiental de Áreas Degradadas pela atividade extrativa de carvão mineral:** Campo Malha II Oeste, Siderópolis – Santa Catarina. Criciúma, 2005.

IPAT/UNESC – INSTITUTO DE PESQUISAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS/UNIVERSIDADE DO EXTREMO-SUL CATARINENSE. **Programa de monitoramento do projeto de recuperação ambiental Campo Malha II Oeste: 6º relatório de monitoramento.** Criciúma, maio 2007a.

IPAT/UNESC – INSTITUTO DE PESQUISAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS/UNIVERSIDADE DO EXTREMO-SUL CATARINENSE. **Programa de monitoramento do projeto de recuperação ambiental Campo Malha II Leste: 8º relatório de monitoramento.** Criciúma, ago 2007b.

KREBS, A. S. J. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá: SC.** 2004. 375 p. v. 1. Tese (Doutorado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

MACHADO, J. L. F. PERUFFO, N. LIMA, J. do E. S. **Programa Nacional de Prospeção para carvão, linhito e turfa:** Projeto estudo da vulnerabilidade à contaminação dos mananciais subterrâneos decorrentes da extração do carvão mineral. Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais - Departamento Nacional de Produção Mineral. Relatório técnico. Porto Alegre, 1984.

MENDONÇA, R. M. G. et al. **Uso do solo argiloso compactado para minimização da drenagem ácida em rejeitos da mineração de carvão na região sul do Estado de Santa Catarina.** CETEM/MCT. Rio de Janeiro, set. 2002. [Contribuição Técnica elaborada para II Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e II Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea, Belo Horizonte, IBRAM]. Disponível em <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2002-150-00.pdf>>. Acesso em 18 de abril de 2008.

MENEZES, C. T. B. *et al.* **Tratamento de drenagem ácida de mina:** experiência da Carbonífera Metropolitana. 2004. Disponível em: <http://www6.ufrgs.br/ltn/attachments/208_DAMFAD.pdf>. Acesso em 10 de novembro de 2008.

MPF - MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL. **Critérios para recuperação ou reabilitação de áreas degradadas pela mineração de carvão.** Criciúma, 2007.

OLIVEIRA, T. de S. UGIONI, D. O. **Canais auto-sustentáveis em recuperação de áreas degradadas pela mineração do carvão:** a contribuição para a melhoria da paisagem. In: COBRAC · Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis, 2006. Disponível em <http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/cobrac_2006/156.pdf>. Acesso em 21 de novembro de 2008.

POSSA, M. V. SANTOS, M. D. C. dos. **Tratamento de drenagem ácida de mina por processo de neutralização controlada.** CETEM/MCT. Rio de Janeiro, dez. 2003. CT – 2003-074-00. Contribuição Técnica elaborada para o Seminário Brasil-Canadá de Recuperação Ambiental de Áreas Mineradas. 2003: Florianópolis. Disponível em <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2003-074-00.pdf>>. Acesso em 18 de abril de 2008.

RUBIO, J. TESSELE, F. Processos para o tratamento de efluentes na mineração. In: **Tratamento de minérios.** Luz, A. B.; Sampaio, J. A.; Monte, M. B.; Almeida, S. L. (Ed.), CETEM/CNPQ/MCT. p. 637-697. 3 ed. 2002. Disponível em <http://www6.ufrgs.br/ltn/attachments/175_Cap16.pdf>. Acesso em 21 de novembro de 2008.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia, das Minas e Energia. **Diagnóstico do carvão mineral catarinense**. Florianópolis, 1990.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente/Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura. **Plano de gestão e gerenciamento da bacia do Rio Araranguá**. V. 1. Florianópolis, 1997.

TRINDADE, R. de B. E. SOARES, P. S. M. **Tecnologia de sistemas passivos para o tratamento de drenagem ácida de minas**. Série Tecnologia Mineral, v 30. Rio de Janeiro. CETEM/MCT. 2004. Disponível em <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CETEM_STA_30.pdf>. Acesso em 18 de abril de 2008.

UBALDO, M. de O. BORMA, L. de S. BARBOSA, M. C. **Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas**. Série Gestão e Planejamento Ambiental, v 4. Rio de Janeiro. CETEM/MCT. 2006. Disponível em <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2006-103-00.pdf>>. Acesso em 18 de abril de 2008. [Versão provisória].

WORLD COAL INSTITUTE. **The Coal Resource: a Comprehensive Overview of Coal**. London, 2005. Disponível em <<http://www.worldcoal.org>>. Acesso em 19 de agosto de 2008.