

## PROBLEMAS AMBIENTAIS DECORRENTES DA EXPLORAÇÃO DO CARVÃO MINERAL E A APLICAÇÃO DA ECOTOXICOLOGIA AQUÁTICA COMO FERRAMENTA DE BIOMONITORAMENTO

*Nelissa Camargo Torrezani<sup>1,\*</sup> and Edson Fontes de Oliveira<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, *Campus* Londrina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA), Laboratório de Ecologia Teórica e Aplicada, Avenida dos Pioneiros, 3131, Londrina, PR, Brasil, CEP: 86036-370.  
E-mails: neutorrezani@yahoo.com.br, edsfontes@gmail.com.

### RESUMO

O carvão mineral é considerado um combustível fóssil altamente energético e ao mesmo tempo agressivo ao ambiente. Historicamente, sua exploração iniciou-se na Primeira Revolução Industrial do século XVIII. Trata-se de uma rocha sedimentar sólida, cuja composição é predominantemente carbono, elemento que juntamente com outros compostos orgânicos e inorgânicos agregados e soterrados por muitos anos em ambientes saturados com água, apresentam efeito tóxico quando reagem com o oxigênio. Nesse contexto, para a avaliação dos riscos de contaminação no meio aquático pelo processamento do carvão mineral, a inserção dos ensaios ecotoxicológicos como ferramenta de avaliação ambiental tem se mostrado essencial para verificar os níveis dos contaminantes presentes no ambiente afetado. Desta forma, em razão dos efeitos negativos do carvão mineral, o presente estudo tem como objetivo avaliar criticamente as informações disponíveis na literatura acerca dos possíveis problemas ambientais advindos desse minério, bem como identificar o papel da ecotoxicologia aquática nesse processo, seus respectivos ensaios e os principais bioindicadores utilizados. As análises ecotoxicológicas apresentam-se como uma importante ferramenta no biomonitoramento dos ecossistemas naturais, tendo como bioindicadores microcrustáceos, moluscos, peixes, anfíbios e mamíferos. Entretanto, é extremamente necessária a utilização de meios que minimizam e remédiam os impactos ambientais durante a produção e exploração do carvão mineral, evitando-se gastos com a recuperação de compartimentos afetados e contribuindo para a qualidade ambiental.

**Palavras-chave:** bioindicadores; contaminação; impacto ambiental; pirita; recursos hídricos.

### ABSTRACT

#### ***ENVIRONMENTAL PROBLEMS ASSOCIATED WITH THE EXPLOITATION OF COAL AND APPLICATION OF AQUATIC ECOTOXICOLOGY AS A TOOL FOR BIOMONITORING.***

Coal is considered a fossil fuel with a high energy content that is, at the same time, aggressive to the environment. Historically, the exploitation of coal began in the First Industrial Revolution of the Eighteenth Century. Coal is a sedimentary solid rock composed predominantly of carbon. Coal buried with organic and inorganic aggregates for many years in environments saturated with water produces toxic effects when it reacts with oxygen. The assessment of the risks arising from contamination of the aquatic environment by coal processing requires means to check the levels of contaminants, for which an essential tool has been applied ecotoxicology. This study aims to critically evaluate the information available in the literature about the possible environmental problems associated with the exploitation of coal, as well as identifying the role of aquatic ecotoxicology in this process. Ecotoxicological assays are presented as an important tool in monitoring natural ecosystems, having as their main bioindicators microcrustaceans, mollusks, fish, amphibians, and mammals. It is vital to use strategies that minimize and remedy the environmental impacts occurring during the production, processing and exploitation of coal, thereby avoiding expenditure on the recovery of affected environments, and contributing to environmental quality.

**Key words:** bioindicators; contamination; environmental impacts; pyrite; water resources.

### INTRODUÇÃO

O carvão mineral está entre os recursos energéticos não renováveis mais importantes na reserva energética mundial a longo prazo, ocupando a primeira posição em abundância e perspectiva de vida útil (Aguiar & Balestieri 2007). Vale ressaltar que o carvão mineral é uma das primeiras fontes energéticas exploradas em grandes proporções pelo homem. Na década de 70 tal exploração experimentou rápido crescimento em resposta à crise do petróleo, tornando-

se neste momento um dos combustíveis fósseis mais requisitados, tanto pelas grandes reservas, quanto pelos preços acessíveis (Aneel 2008). No Brasil, os Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná são os responsáveis pelas principais jazidas de carvão, com cerca de 28,8 bilhões, 3,4 bilhões e 100 milhões de toneladas, respectivamente (Nascimento *et al.* 2002). Em 2012 o carvão mineral respondia com 28% na matriz de Oferta Interna de Energia (OIE) mundial, enquanto no Brasil essa participação chegou entorno de 5,4% na matriz da OIE no mesmo ano (Filho 2013).

Por outro lado, sabe-se que a exploração desse minério, apesar de suas vantagens econômicas, causa sérios problemas sócio-ambientais durante o seu processamento, seja na mineração, beneficiamento ou combustão. Nas três fases de exploração ocorre liberação de poluentes que impactam negativamente os ambientes naturais e urbanos, gerando problemas que podem ser irreversíveis. Tem sido verificado que o uso intensivo do carvão mineral na região Sul do Brasil tem provocado alterações significativas da qualidade ambiental em determinadas áreas, como no município de Candiota no Rio Grande do Sul, onde se concentra a maior parte das jazidas brasileiras (Migliavacca *et al.* 2005, Monteiro 2004).

A principal fonte geradora de impacto ambiental a partir do processamento do carvão mineral está relacionada à formação de estéreis e rejeitos ricos em dissulfeto de ferro ( $\text{FeS}_2$ ), conhecido como pirita, os quais se oxidam na presença do ar, da água e da ação de algumas bactérias, tais como *Thiobacillus ferroxidans* (Temple & Colmer 1951; Ordem Acidithiobacillales, Família Acidithiobacillaceae), gerando drenagens ácidas de minas (DAM), comumente associadas à dissolução de metais em minas abandonadas (Fungaro & Izodoro 2006). Os mesmos autores mencionam que no Brasil esse evento tem sido registrado em várias regiões carboníferas, como nas bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga, em Santa Catarina, consideradas impactadas devido às atividades de mineração de carvão mineral.

Além disso, tem-se verificado a formação de lagoas ácidas próximas a mineradoras ou empresas exploradoras de carvão, em razão da dissolução da pirita ( $\text{FeS}_2$ ), a qual promove a diminuição do pH das águas e solubilização de vários metais, afetando as áreas circunvizinhas imediatas e mediatas (ACP do carvão 2006). A pirita, quando em contato com o oxigênio da água ou do ar atmosférico, sofre reação de oxidação e forma compostos químicos altamente ácidos, susceptíveis à lixiviação e com potencial de acidificar o meio aquático.

A formação da pirita é comumente relacionada a fontes internas, ou seja, com o enxofre intrínseco à matéria orgânica, ou a fontes externas, como gás sulfúrico presente nas turfeiras ou associados à intrusão de sedimentos marinhos (Rigotti 2002). Evangelou (1995) menciona que a pirita encontrada no carvão, linhito ou outras rochas sedimentares provém da

associação de sedimentos marinhos e estuarinos ricos em sulfato ( $\text{SO}_4$ ), durante o processo de deposição. Esse sulfato em ambiente anaeróbico e rico em matéria orgânica é reduzido a sulfeto, o qual se combina com o ferro ( $\text{Fe (II)}$ ) resultando na pirita. Além disso, tanto o enxofre quanto o ferro da pirita são submetidos a diversas alterações, devido principalmente às propriedades do próprio ferro, formando o processo de drenagem ácida. Esta pode ser entendida como a oxidação natural de sulfetados que ocorre em rochas ou resíduos no ar e na água (Bullock 1996 citado em Teixeira *et al.* 2002). Desta forma, é visto que as atividades de extração e processamento de carvão comprometem seriamente algumas populações biológicas. Experimentações de campo e laboratório já demonstraram influência deletéria dessas fontes de poluição sobre a classe de anfíbios, especialmente na Europa e Estados Unidos (Bohmer & Rahman 1990a, 1990b, 1991, Raimondo *et al.* 1998, Rowe *et al.* 1998). A literatura ainda revela alta toxicidade dos microcrustáceos *Artemia* sp. (Pilla & Beardmore 1994; Ordem Anostroca, Família Artemiidae) e *Daphnia magna* (Straus 1820; Ordem Cladocera, Família Daphniidae) quando submetidos à drenagem ácida de mina (Geremias *et al.* 2008). Borges (2009) também encontrou elevada toxicidade dos mesmos microcrustáceos quando expostos às águas do Rio Urussanga, que possivelmente estão contaminadas devido à proximidade de áreas de mineração de carvão. Pesquisas demonstram que o peixe *Oreochromis niloticus* (Linnaeus 1758; Ordem Perciformes, Família Cichlidae) tem sofrido dano oxidativo em lipídios e no ácido desoxirribonucleico (DNA), bem como comprometimento das defesas antioxidantes como a catalase, superóxido dismutase, glutathione S transferase, glutathione reduzida em razão da exposição a efluentes de carvão (Benassi *et al.* 2006). Com *Allium cepa* (Linnaeus 1753; Ordem Asparagales, Família Alliaceae) foi observado que a drenagem ácida de mina gerou expressiva inibição do crescimento das raízes, além de efeitos oxidativos em proteínas, lipídios e DNA (Geremias 2009).

Outro impacto ambiental que deve ser considerado refere-se à precipitação ácida proveniente da emissão de poluentes atmosféricos (ex: dióxido de enxofre -  $\text{SO}_2$ , óxidos de nitrogênio -  $\text{NO}_x$ , compostos orgânicos voláteis - VOCs e aerossóis), gerados a partir da combustão do carvão mineral por termelétricas, siderúrgicas ou outras indústrias consumidoras.

Nesse contexto, para a avaliação dos riscos de contaminação do meio aquático pelo processamento do carvão mineral, a inserção dos ensaios ecotoxicológicos como ferramenta de avaliação ambiental tem se mostrado essencial para verificar os níveis dos contaminantes presentes no ambiente afetado. Desta forma, em razão dos efeitos negativos do carvão mineral, o presente estudo tem como objetivo avaliar criticamente as informações disponíveis na literatura acerca dos possíveis problemas ambientais advindos desse minério, bem como identificar o papel da ecotoxicologia aquática nesse processo, seus respectivos ensaios e os principais bioindicadores utilizados.

## MATERIAL E MÉTODOS

Primeiramente foram realizadas consultas em livros e artigos de periódicos científicos para a elaboração do referencial teórico e utilização da internet para a obtenção de informações acerca de pesquisas ecotoxicológicas com o carvão mineral. Além de livros, artigos e sites, foram pesquisados dados científicos já catalogados em monografias de especialização, dissertações de mestrado e teses de doutorado, colunas técnicas especializadas em revistas, jornais e sites específicos.

A partir da revisão bibliográfica foram selecionados os principais temas relacionados com as causas e consequências dos impactos gerados nos ambientes atmosféricos terrestres e aquáticos pela exploração do carvão mineral, os quais foram avaliados e discutidos a luz dos conceitos relativos à estrutura e dinâmica de comunidades biológicas e do ambiente físico, bem como dos procedimentos ecotoxicológicos.

## O CARVÃO MINERAL

O carvão mineral é uma rocha sedimentar sólida, cuja composição é predominantemente carbono. O tempo de formação deste minério está relacionado ao acúmulo e soterramento continuado dos vegetais, especificamente seus compostos orgânicos (hidrocarbonetos voláteis, dentre outros) e inorgânicos (minerais sulfetados de pirita e marcassita), os quais se encontram normalmente disponíveis em ambientes saturados com água. Nesses locais, o processo de formação do carvão é diretamente influenciado por parâmetros específicos do ambiente, tais como elevadas temperatura e pressão. O acúmulo e

soterramento gradativo da matéria orgânica na formação do minério promovem a expulsão do hidrogênio ( $H_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ) (processo de carbonificação), favorecendo as concentrações de carbono, principal constituinte do carvão mineral (Pitt & Millward 1979).

O carbono disponível no carvão apresenta-se em concentrações diferenciadas: no primeiro estágio de formação se tem a turfa com 60% de carbono, seguida pelo linhito com 70%, hulha ou carvão betuminoso com 80 a 85% e antracito com 90% (Monteiro 2004). Além do  $H_2$ ,  $O_2$  e carbono, é possível constatar a presença de outros elementos químicos no carvão mineral, tais como nitrogênio ( $N_2$ ) e enxofre (Peralba 1989). Outros fatores como clima, localização geográfica, evolução geológica do local de depósito, regressões e transgressões marinhas, circulação de águas salobras, deposição sedimentar e transformações físico-químicas podem interferir no processo de formação e composição do minério (Monteiro 2004).

## PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CARVÃO MINERAL

O processo de produção de carvão mineral é dividido em três fases: mineração, beneficiamento e combustão. No Brasil os principais métodos de mineração compreendem a lavra em céu aberto e a lavra subterrânea, os quais promovem graves impactos negativos para o ambiente (Koppe & Costa 2002).

A lavra de carvão a céu aberto é comumente desenvolvida pelo método de lavra em tiras. Nesse caso, o solo superficial ou formações sedimentares que recobrem as camadas de carvão mineral são retirados para permitir o acesso à camada do minério, para que então possa ser lavrada. Um dos problemas desse método é a remoção de enormes quantidades de solo estéril para cada tonelada de carvão produzido. Além disso, há o envolvimento de grandes equipamentos para escavação, transporte e carregamento (Koppe & Costa 2002), os quais podem gerar sérios impactos ambientais secundários. A lavra de carvão em subsolo no Brasil é realizada a partir do método de lavra de câmaras e pilares, o qual é utilizado basicamente em depósitos com camadas horizontais ou levemente inclinados, onde 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 (Koppe & Costa 2002).

A segunda fase corresponde ao beneficiamento, quando são empregadas técnicas que visam separar as impurezas envolvidas no carvão, tais como a argila, elemento responsável pela formação das cinzas geradas após a combustão, e a pirita, elemento responsável pelo teor de enxofre, o qual é tóxico ao ambiente. O beneficiamento do carvão utiliza água para a retirada dessas impurezas, a qual é filtrada ou espessada após esse processo e parcialmente reaproveitada. A outra parte da água não utilizada deve sempre passar pelos mesmos procedimentos de filtração ou espessamento antes do seu descarte no ambiente (Sampaio 2002).

A fase de combustão do carvão mineral promove o lançamento de gases extremamente tóxicos e cinzas que produzidas ao longo do processo também podem ser lixiviadas no próprio local, transportadas pelos ventos ou pela erosão hídrica, contaminando o solo e os recursos hídricos do entorno (Alloway & Ayres 1996, Benito *et al.* 2001).

#### CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS - O CARVÃO MINERAL E OS SEUS EFEITOS NO SOLO

Na exploração do carvão mineral, as enormes quantidades de rejeitos colocados em forma de pilhas e barragens próximas às áreas mineradas influenciam na qualidade do solo. A oxidação química da pirita em condição aeróbia é acelerada quando os rejeitos de carvão encontram-se depositados sobre as superfícies das áreas mineradas, promovendo decaimento do pH (Moses *et al.* 1987, Prochnow & Porto 2000). Essa acidez se deve essencialmente a oxidação da pirita ao longo da sua intemperização química, quando podem ser produzidos quatro moles de  $H^+$  na oxidação completa de um mol de pirita (Carson *et al.* 1982). Esse processo de oxidação também provoca a aceleração do intemperismo das argilas que se encontram presentes nos estéreis e rejeitos de mineração, fazendo que a drenagem superficial contenha, além de contaminantes característicos dos rejeitos da mineração, maior concentração de metais na drenagem superficial (Zanardi Jr. & Porto 1991).

Frequentemente, o pH em solos minerados pode diminuir até valores menores de 3,0 durante alguns meses, dificultando o desenvolvimento das plantas (Daniels 1996). A acidificação gerada interfere no crescimento e desenvolvimento da vegetação devido à deposição de metais pesados como ferro (Fe), alumínio (Al) e magnésio (Mg), além de promover a

fixação de fósforo, aumentar o potencial de lixiviação de nutrientes catiônicos do solo (Baird & Cann 2011) e reduzir a população edáfica de bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico (Daniels 1996). Outro parâmetro responsável pelas reações da pirita no solo é a temperatura, pois ela não apenas interfere nas atividades das bactérias, como *Thiobacillus* spp. (Beijerinck 1904; Ordem Hydrogenophiales, Família Hydrogenophilaceae), mas também influencia na oxidação da pirita por meio do  $O_2$  (Nordstrom 1982). Um aumento de 10% na temperatura é o suficiente para duplicar a velocidade desta reação (Nordstrom 1982).

A presença de água em solos impactados pelo carvão mineral é menor do que em solos naturais (Skousen *et al.* 1998). Isto ocorre por que há predomínio de frações mais grosseiras e menor quantidade de matéria orgânica, o que tende a aumentar a infiltração (Skousen *et al.* 1998). Associado a isso, solos formados após a mineração do carvão a céu aberto apresentam-se estruturalmente fracos, com baixa permeabilidade da camada superficial à água e baixa capacidade de retenção da água, limitando os processos de construção do solo (Pitchel *et al.* 1994). Portanto, modificações na morfologia e nos parâmetros físicos do solo em construção podem ocorrer, resultando em um inadequado desenvolvimento da vegetação e problemas como erosão, assoreamento e contaminação dos recursos hídricos (Nunes 2002). Uma das alternativas para a recuperação dos solos contaminados por pirita está na utilização de calcário (CaO), o qual é comumente utilizado como corretivo em solos com alta acidez, promovendo a neutralização e tamponamento do pH na faixa alcalina e afetando a cinética da oxidação da pirita (Moraes 2010).

#### CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS - O CARVÃO MINERAL E OS SEUS EFEITOS NA ATMOSFERA

O ambiente atmosférico é outro compartimento ambiental que sofre grave impacto da exploração do carvão mineral. Os principais elementos químicos lançados na atmosfera são:  $SO_2$ , óxidos de enxofre ( $SO_x$ ),  $NO_x$  e material particulado ou cinzas volantes (Pires 2002). Na combustão, o enxofre proveniente da pirita é oxidado totalmente em  $SO_2$  e logo depois em trióxido de enxofre ( $SO_3$ ), porém em um processo mais lento. Os sulfatos são formados em decorrência da concentração de  $SO_x$  nas cinzas (Pires 2002).



Nas termelétricas do mundo e principalmente na China, o carvão mineral é o combustível que mais contribui no lançamento de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) para cada watt gerado, além disso, trata-se de um composto abundante e de custo acessível, condições que favorecem o seu uso por países emergentes asiáticos. Vale ressaltar que o carvão mineral assume uma condição de destaque, uma vez que, 40% da energia elétrica mundial provém da queima desse combustível (Aneel 2007).

Elementos-traço (ex: arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), chumbo (Pb) e selênio (Se)) são outros compostos que se encontram associados ao carvão mineral e podem ser lançados juntamente com as cinzas na atmosfera e lixiviados pelas águas pluviais (Martins 2002). Algumas pesquisas mostram que as concentrações de metais nas cinzas podem ser superiores ao encontrado em seu carvão de origem (Adriano *et al.* 1980, Pires *et al.* 2002). Os mesmos autores mencionam que esta diferença de concentração pode ser atribuída ao processo de enriquecimento do carvão durante a combustão. Segundo Davidson *et al.* (1974) e Nastuch *et al.* (1974), este enriquecimento ocorre devido aos mecanismos de volatilização e condensação do carvão mineral, uma vez que na combustão alguns elementos volatilizam e logo se condensam sobre a superfície das cinzas quando os gases são resfriados. A presença de elementos-traço nas cinzas se deve à associação com os minerais aluminossilicatos, os quais não são volatilizados durante a combustão. Já os elementos-traço disponíveis nas frações orgânicas e sulfetadas tendem a ser emitidos durante a queima do minério (Pires & Teixeira 1991).

Os compostos oriundos da decomposição da pirita, como aqueles oriundos das cinzas na combustão do carvão, comprometem a qualidade do ar em diferentes aspectos (Scheibe 2002). Em humanos, a exposição crônica de sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), absorvido pelas vias aéreas pode causar problemas irreversíveis aos sistemas nervoso central e respiratório (Mainer & Viola 2005).

Monteiro (2004) relata que os principais problemas em relação à dispersão dos poluentes à saúde humana, podem ser:

(i) O material particulado de frações menores e inaláveis (PM10) penetram profundamente no sistema respiratório em direção às árvores bronquiolares. As partículas em suspensão na poeira, decorrentes do

processo de mineração, potencializam os efeitos dos gases poluentes presentes no ar. Além disso, a queima do carvão é responsável pelas grandes quantidades de partículas finas presentes na fumaça. O  $\text{SO}_2$  do ar é absorvido por essas partículas finas, e juntamente com a umidade formam as partículas ácidas, ocasionando grandes impactos tanto ambientais quanto à saúde do homem.

(ii) O  $\text{SO}_2$  é um elemento químico que contribui para o aparecimento de doenças respiratórias. Esse gás apresenta características irritantes e está diretamente relacionado aos problemas de bronquites crônicas, resfriados e disfunções no sistema imunológico. Nas folhas das plantas o  $\text{SO}_2$  pode provocar danos agudos e crônicos, e, além disso, danificar tintas, metais e camadas descobertas ao ataque da oxidação.

(iii) Os  $\text{NO}_x$ , elementos com alta capacidade de se solubilizar em contato com o sistema respiratório, pode originar substâncias carcinogênicas, como as nitrosaminas. Este gás promove o aparecimento de edemas e danos nos tecidos pulmonares e vias respiratórias.

(iv) O monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) é um gás tóxico e asfixiante para o ser humano, o seu efeito no organismo diminui as concentrações de  $\text{O}_2$  a níveis críticos, em decorrência da sua maior afinidade com as hemácias, sendo por isso considerado competidor do  $\text{O}_2$  pela ligação com a hemoglobina (Ribeiro 2002).

#### CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS - O CARVÃO MINERAL E OS SEUS EFEITOS NA ÁGUA

Na idade média surgiram os primeiros problemas de poluição relacionados à contaminação por metais pesados provenientes das atividades mineradoras, que se intensificaram no começo do século XIX com o processamento de metais em indústrias químicas e de fundição (Trein 2008). No Brasil e principalmente em alguns municípios de Santa Catarina a exploração de carvão mineral trouxe vários benefícios econômicos, porém tem ocasionado inúmeros impactos aos sistemas aquáticos relacionados a todas as etapas do processamento, desde a lavra, beneficiamento, disposição de resíduos sólidos, efluentes líquidos até a combustão (Menezes 2003, Pavei 2007). Nestas regiões já foram identificadas centenas de bocas de minas abandonadas, nas quais tendem a persistir a drenagem ácida (Amaral *et al.* 2008).

A drenagem ácida é a principal forma de poluição hídrica em áreas mineradas, diminuindo o pH e liberando substâncias e elementos traços com alto potencial de toxicidade (Clarke 1995). Além das mudanças físicas, organolépticas e biológicas nos corpos hídricos, a geoquímica dos sedimentos também é alterada devido a sua capacidade de acumulação e fixação de poluentes lançados nos cursos d'água e pela liberação de contaminantes autóctones ao longo do período (Ortiz & Teixeira 2002). Em descargas de drenagens ácidas provenientes da mineração, a disposição de rejeitos e a exposição das rochas ricas em sulfeto lançam quantidades enormes de metais nas águas superficiais (Ortiz & Teixeira 2002). Nessa situação, os poluentes presentes acabam associando-se aos sedimentos, conferindo-lhe cor alaranjada devido à adsorção das partículas coloidais ou pela precipitação conjunta com hidróxidos de ferro. Menos de 1% das substâncias que atingem o sistema aquático são dissolvidas e, por outro lado, mais de 99% são armazenadas no compartimento sedimentar (Vestena 2008). Por esta razão, o sedimento é uma valiosa ferramenta para verificar o grau de contaminação de um determinado poluente (Ribeiro *et al.* 2007).

Os metais traços são constituintes naturais e essenciais para os solos, águas e organismos dos ecossistemas naturais. Porém, em concentrações um pouco mais elevadas provocam efeitos seríssimos às comunidades aquáticas, modificando sua estrutura e distribuição (Linnik e Zubenko 2000). A quantidade de agentes nocivos lançados nas águas é relativamente maior do que aquele emitido no compartimento atmosférico (Felleberg 1980, Genda 1982). Essa situação não somente desequilibra as condições químicas e físicas da água, como também a sobrevivência dos organismos. Naturalmente os metais provenientes de áreas mineradas que são lixiviados até os corpos hídricos acabam bioacumulando nos vegetais e animais e, conseqüentemente, em toda cadeia alimentar, ou seja, essas substâncias químicas são assimiladas pelos organismos aquáticos através das vias de respiração, nutrição e epiderme (Spice 1995). Mishra *et al.* (2008) citam que as macrófitas aquáticas contaminadas por metais podem ser fontes de alimentos para herbívoros e detritívoros, favorecendo a transferência desses metais para os níveis tróficos subsequentes, processo denominado biomagnificação.

#### A ECOTOXICOLOGIA COMO FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS IMPACTANTES DA EXPLORAÇÃO DO CARVÃO MINERAL

A Ecotoxicologia é “a ciência que estuda os efeitos das substâncias naturais ou sintéticas sobre os organismos vivos, populações e comunidades, animais ou vegetais, terrestres ou aquáticos, que constituem a biosfera, incluindo assim a interação das substâncias com o meio nos quais os organismos vivem num contexto interligado” (Plaa 1982, Cairns & Niederlehner 1995 citado em Zagatto & Bertolotti 2006). Dessa forma, a Ecotoxicologia tem se revelado uma importante ferramenta para a avaliação dos efeitos impactantes de compostos xenobiontes, como aqueles derivados do carvão mineral.

#### ENSAIOS ECOTOXICOLÓGICOS

A Ecotoxicologia tem como objetivo avaliar a toxicidade de um determinado agente químico a partir da análise das respostas dos organismos-teste, as quais podem ser estimadas por parâmetros biológicos, tais como letalidade, imobilidade, alterações no desenvolvimento, crescimento, reprodução, metabolismo, fisiologia e comportamento (Aragão & Araújo 2006).

Os testes ecotoxicológicos verificam os níveis de toxicidade das substâncias sobre os organismos-teste por meio de ensaios experimentais, sejam provenientes de efluentes industriais ou amostras ambientais. A água ou sedimento industrial e/ou ambiental é avaliado por meio das respostas de bioindicadores, os quais são submetidos a diferentes concentrações de amostras (Ribo 1997, Dornfeld 2002).

Os ensaios ecotoxicológicos com organismos representativos do ambiente aquático podem fornecer informações essenciais sobre a toxicidade de um agente químico disponível e estabelecer os limites permissíveis de substâncias químicas no ambiente. Os testes podem ser de curto prazo para a avaliação dos efeitos agudos dos compostos xenobiontes ou de longo prazo para análise de efeitos crônicos (Aragão & Araújo 2006).

Quanto ao bioindicador, Rand & Petrocelli (1985) sugerem que a espécie utilizada no teste de ecotoxicidade seja um organismo ecologicamente representativo do ambiente, de fácil acesso e monitoramento, baixo custo de manutenção, sensível

ao teste aplicado, que forneça dados úteis para avaliação de riscos e que os resultados possam expressar com clareza os efeitos ambientais de determinado poluente. Dentre os diversos bioindicadores utilizados nas análises ecotoxicológicas, podemos citar os microcrustáceos, moluscos, peixes, anfíbios e mamíferos (Zagatto & Bertolotti 2006). Os peixes são organismos que respondem de forma variada quando em contato com os poluentes tóxicos sendo, portanto, ótimos indicadores de efeitos carcinogênicos, mutagênicos e genotóxicos (Al-sabti & Metcalfe 1995). Quanto à dinâmica das cadeias tróficas, os peixes são vetores diretos de contaminantes para seus consumidores, via biomagnificação (Al-sabti & Metcalfe 1995).

Nos testes ecotoxicológicos, organismos-teste são colocados em recipientes com amostras em concentrações diferentes, além do controle, por um determinado período. Nos testes de toxicidade aguda busca-se investigar efeitos severos e rápidos sofridos pelos organismos, imersos em soluções com agente químico e por curto prazo, avaliando-se suas imobilidade e mortalidade. Já nos ensaios crônicos, os organismos-teste ficam expostos a níveis subletais dos poluentes, tendo como princípio a análise dos distúrbios fisiológicos e/ou comportamentais nos animais a longo prazo (Aragão & Araújo 2006).

No biomonitoramento, os efeitos dos contaminantes podem ser verificados em diferentes níveis de organização biológica: molecular/bioquímico, genético, celular, fisiológico, morfológico, população, comunidade e ecossistema (Adams *et al.* 1990). As alterações biológicas em fluidos corporais, células ou tecidos são denominados como biomarcadores, capazes de sinalizar toda e qualquer alteração bioquímica quando estes organismos se encontram expostos a um ambiente desequilibrado (Van Der Oost *et al.* 2003).

Nos níveis de população, comunidade e ecossistema os monitoramentos biológicos podem ser realizados através da análise dos seguintes parâmetros: a) população: mortalidade, alterações na estrutura genética, doenças e alterações de abundância; b) comunidade: perdas de espécies, alterações em índices biológicos (riqueza, diversidade, índices bióticos) e alterações taxonômicas; c) ecossistema: eutrofização, produtividade, decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes, estrutura de cadeias tróficas, resistência e resiliência (Buss *et al.* 2008).

Desta forma, os ensaios ecotoxicológicos se apresentam como uma ferramenta potencial muito importante para avaliar os efeitos impactantes dos produtos químicos liberados no ambiente durante o processo de exploração do carvão mineral. Nesse contexto, o uso de espécies representativas dos ecossistemas em análises ecotoxicológicas revela-se crucial para a obtenção de resultados mais precisos e confiáveis.

#### A ECOTOXICOLOGIA AQUÁTICA E O CARVÃO MINERAL

Um dos fatores que favorecem a formação de lagoas ácidas, como resultado da oxidação da pirita em ambientes minerados, é a não cobertura do subsolo original pelo solo vegetal após a lavra. O ambiente lavrado, estando descoberto, favorece o aumento de acidez do solo devido à precipitação e a conseguinte percolação das águas em áreas contaminadas (Vaz & Mendes 1997). A acidez nos corpos hídricos interfere na sobrevivência de vários organismos, alterando o padrão natural do ciclo de nutrientes e afetando diretamente os peixes no período de reprodução - ovulação e desovas (Sanchez & Formoso 1990).

As respostas físicas, químicas e biológicas dos organismos à ação de metais dissolvidos na água e ao pH baixo são também avaliadas por meio de alterações nos processos enzimáticos e acumulação nos tecidos (Esteves 1988). Os metais dissolvidos nas águas tendem a ser rapidamente incorporados pelos organismos que estão em contato direto ou indireto com os recursos hídricos (Rand & Petrocelli 1985).

Entretanto, cabe ressaltar que a incorporação de metais pelos seres vivos não ocorre da mesma forma nos distintos grupos biológicos. Fatores como velocidade de absorção e excreção, tamanho do corpo, hábito alimentar, habitat, variação sazonal e afinidade individual pelo metal influenciam na absorção do contaminante (Mance 1990, Jallet Tariq *et al.* 1996). O fluxo de incorporação e excreção do metal depende da capacidade de regulação osmótica do organismo (Förstner & Wittman 1981). Em situações de estresse, alguns organismos, como os peixes, possuem mecanismos de defesas naturais contra determinados xenobióticos, em especial os metais (Rand & Petrocelli 1985). As metalotioneínas (MTs) são proteínas de alto teor de cisteína capazes de formar complexos que eliminam os metais por meio das fezes e urina (Rand & Petrocelli 1985). Sua descoberta ocorreu em 1957,

quando Margoshes e Valle identificaram em córtex de rim equino uma proteína responsável pelo acúmulo natural de Cd neste tecido (Margoshes e Valle 1957). Desta forma, investigações mais detalhadas foram realizadas, pois a existência de diversos metais na estrutura da macromolécula poderia estar relacionada a uma função nos sistemas biológicos. Para as espécies aquáticas, as MTs foram relatadas em peixes marinhos, como *Sebastes seboides* (Cuvier 1829; Ordem Scorpaeniformes, Família Sebastidae) e posteriormente em outras espécies como *European eel* (Linnaeus 1758; Ordem Anguilliformes, Família Anguillidae), *Cyprinus carpio* (Linnaeus 1758; Ordem Cypriniformes, Família Cyprinidae) e *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum 1792; Ordem Salmoniformes, Família Salmonidae). Portanto, as MTs continuam a ser pesquisadas quanto a sua estrutura química e físico-química (Nordberg 1998), porém já se tem evidências que estas proteínas não ocorrem somente no reino animal, mas também em microorganismos procarióticos e eucarióticos e em plantas superiores (Isart & Vasak 2002). Os contaminantes, além de gerar respostas fisiológicas nos organismos devido à toxicidade, também podem induzir processos mutagênicos e carcinogênicos ao ocasionar alterações na estrutura do DNA (Keller *et al.* 2005, Mashi *et al.* 2005 citado em Antonelli 2005).

A exposição de *D. magna* às águas e sedimentos contaminados por efluentes de mineração de carvão, apresentam um efeito de toxicidade aguda, indicando que o pH baixo e a elevada concentrações de metais como ferro e manganês (Mn) sejam os responsáveis pelo efeito tóxico nas amostras (Soucek *et al.* 2000, Gerhardt *et al.* 2005). Neto (2010) também verificou acentuada toxicidade aguda sobre organismos, tais como os crustáceos *D. magna* e *Artemia* sp., quando expostos a diferentes concentrações de drenagem ácida de mina não remediada. Já para *Artemia* sp., uma expressiva mortalidade foi observada na região carbonífera de Criciúma, Santa Catarina, quando a espécie foi exposta às águas de drenagens de minas de subsolo (CL 50 = 3,1%), ao efluente de infiltração de bacias de decantação (CL 50 = 6,7%), assim como às águas de rios que foram contaminadas pelos efluentes de mineração de carvão (CL 50 = 2,5%) (Geremias *et al.* 2003). Esses autores sugeriram que a toxicidade tenha sido causada pela acidez da água e presença de íons dos metais Fe, Mn, cobre (Cu) e Pb nas amostras coletadas (Geremias *et al.* 2003).

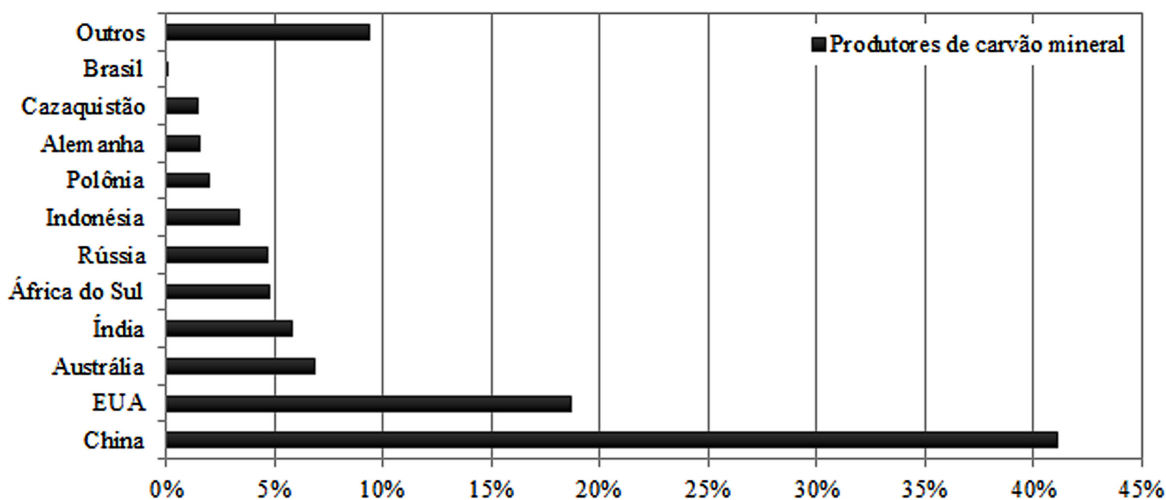
## O EMPREGO DO CARVÃO MINERAL NOS DIAS ATUAIS E A PERSPECTIVA DE CONTROLE AMBIENTAL DE SEUS IMPACTOS

As atividades humanas começaram a afetar mais significativamente o ambiente após a Revolução Industrial, particularmente no século XX, em decorrência do crescimento populacional e do grande aumento do consumo *per capita*, principalmente em países industrializados (Goldemberg 2003). A partir desse período os recursos naturais passaram a ser mais explorados para a obtenção de energia, não havendo a devida preocupação em relação às consequências que poderiam ocasionar ao ambiente. O foco principal pós-revolução industrial era o crescimento econômico e tecnológico, além do aumento da oferta e mercado.

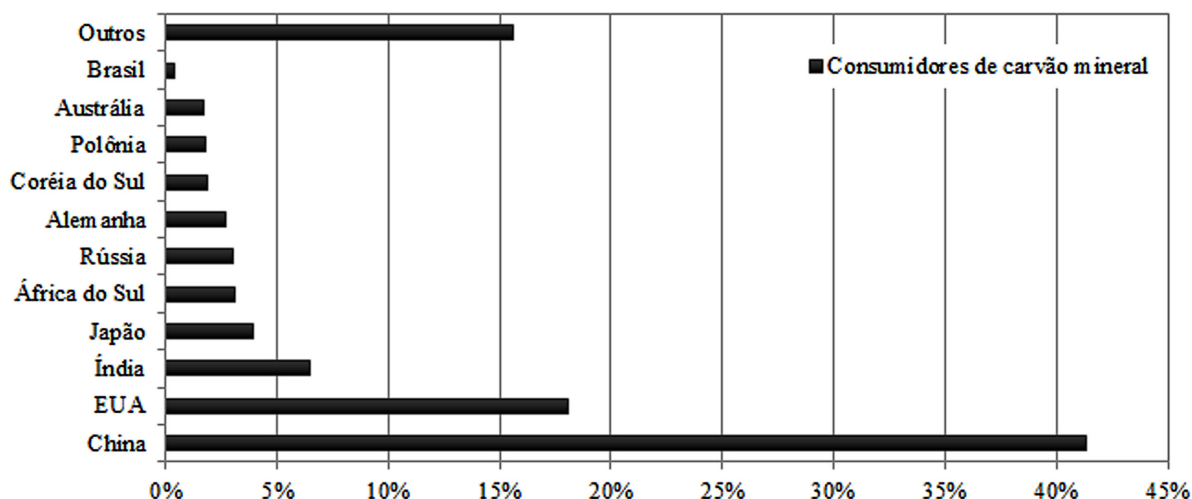
Atualmente as mineradoras, centrais termelétricas e siderúrgicas são as grandes responsáveis pela exploração de carvão mineral. Entre 1995 e 2007, a produção mundial de carvão mineral cresceu em média 3% e os principais países produtores foram China e Estados Unidos (Cano 2010). O autor supracitado ainda aponta outros países, como a Austrália, a Índia, a África do Sul e a Rússia, que responderam em conjunto por cerca de 25% da produção mundial. Cabe ressaltar que nos dias de hoje, a China é a maior produtora de carvão mineral e consumidora desse minério, conforme demonstrado nas figuras 1 e 2. Entretanto, há uma política de controle de emissões de SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, iniciado em 2011 na China, para que os níveis desses compostos químicos venham diminuir cerca de 8% até o ano de 2015 (UNECE 2011).

Atualmente temos consciência de que a exploração do carvão mineral tem que estar atrelada a investimentos em obras que busquem a mitigação e o desenvolvimento de tecnologias limpas, haja vista que este minério é responsável por entre 30 a 35% do total de emissões de CO<sub>2</sub>, um dos principais gases do efeito estufa (Aneel 2008). Além disso, não podemos desconsiderar que muitos países com condições financeiras estáveis e em desenvolvimento podem investir em alternativas ou fontes menos agressivas ao meio ambiente, substituindo o carvão por fontes eólica, hidráulica ou solar. Provavelmente, essa atitude não seria uma solução definitiva para os problemas ambientais ocasionados pela exploração do carvão, porém explorar alternativas, investir em tecnologias limpas e forçar o seu uso seria um meio de conseguir a redução da poluição ambiental.





**Figura 1.** Maiores produtores de carvão no mundo. Figura adaptada da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2008).  
*Figure 1.* The largest worldwide coal producers. Figure adapted from the National Electric Energy Agency (ANEEL) (2008).



**Figura 2.** Maiores consumidores de carvão no mundo. Figura adaptada da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2008).  
*Figure 2.* The largest worldwide coal consumers. Figure adapted from the National Electric Energy Agency (ANEEL) (2008).

As informações sobre a aplicação de testes de controle ecotoxicológico por termoelétricas, siderúrgicas e as que consomem o carvão mineral em seus processos industriais comumente não são publicadas, a despeito dos testes terem sido estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 357/2005 (CONAMA 2005). Os esforços voltados à análise e tratamento de ambientes extremamente impactados pela mineração ou combustão do carvão mineral, infelizmente não são prioridades das empresas poluidoras, haja vista as evidências de contaminação proveniente de exploração de carvão mineral no ambiente. Vale salientar que a Portaria/Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) nº 917, de 06 de julho de 1982, DOU de 08/07/82, considera a “necessidade de conciliar a

expansão da produção e uso do carvão mineral com a preservação da integridade do meio ambiente” (DNPM 1982, p. 1), destacando algumas obrigatoriedades a serem cumpridas pelas empresas mineradoras. Todavia, nas últimas décadas as empresas não têm demonstrado conscientização global em relação aos efeitos nocivos advindos do carvão mineral, principalmente quanto às alterações provocadas nas comunidades biológicas, bem como aos ambientes terrestres e aquáticos. Em Criciúma, SC, a Justiça Federal concedeu ao Ministério Público Federal (MPF) liminar que estabelece 22 determinações, entre elas fiscalizações periódicas nas minas pelo DNPM e Fundação do Meio Ambiente (FATMA), para melhorar as condições de segurança e prevenir os danos por causa da lavra de carvão mineral em subsolo em

municípios da região. Segundo alegações do MPF os corpos d'água vêm sofrendo prejuízos em função da mineração do subsolo (JusBrasil 2010). Nesse contexto, a Ecotoxicologia pode ser aplicada com o intuito de complementar as análises ambientais, desvendando os efeitos dos poluentes sobre organismos e como esses interagem com os seus habitats. Desta forma, há evidências de que se as mineradoras, termelétricas e siderúrgicas ou qualquer indústria que utilize o carvão mineral em seus processos industriais não começarem a se conscientizar e agir, vários problemas tanto para o ambiente quanto para o próprio homem poderão ocorrer em larga escala e com consequências gravíssimas a longo prazo. Para que estes agravamentos ambientais sejam amenizados, tecnologias e metodologias limpas devem ser implementadas para a melhoria do ambiente. Nesse ponto, é essencial a participação das empresas poluidoras, inclusive financiando parte do desenvolvimento tecnológico requerido para que essas mudanças ocorram, não apenas esperando uma iniciativa do poder público, incluindo as universidades.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

O carvão mineral, apesar do seu alto potencial energético, gera impactos severos ao ambiente quando submetido a processos de produção e exploração. Sua toxicidade para os organismos é evidente quando a pirita encontrada no carvão mineral é oxidada na presença de O<sub>2</sub> do ar ou da água. Nesse contexto, o emprego das análises ecotoxicológicas pode se constituir em uma importante ferramenta para promover um eficiente biomonitoramento de ecossistemas naturais. Como forma de minimização e remediação de impactos ambientais provocados pelo processamento do carvão mineral são necessários investimentos públicos e privados em tecnologias limpas e novos protocolos metodológicos que visem à recuperação do ambiente degradado.

**AGRADECIMENTOS:** Agradecemos à CAPES/Ministério de Educação do Brasil pela concessão de bolsa de Mestrado à discente Nelissa Camargo Torrezani e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Londrina, pelo apoio logístico.

### REFERÊNCIAS

ACP do Carvão (Ação Civil Pública do Carvão). 2006. Reparação de danos ambientais em áreas mineradas na bacia carbonífera do Sul do estado de Santa Catarina. *Informação*

*Técnica*. 31p.

Adams, S.M.; Shugart, L.R.; Southworth, G.R. and Hinton, D.E. 1990. Application of bioindicators in assessing the health of fish populations contaminant stress. Pp. 333-353. In: J.F. McCarthy and L.R. Shugart (eds.). *Biomarkers of Environmental Contamination*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 457p.

Adriano, D.C.; Page, A.L.; Elseewi, A.A.; Chang A.C. and Strgham, I. 1980 Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystem: a review. *Journal of Environment Quality*, 9: 333-334.

Aguilar, C.D. and Balestiere, P.A.J. 2007. Carvão Mineral: um estudo sobre o consume nacional e respectivas emissões de CO<sub>2</sub>. Pp. 2-10. In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. A energia que move a produção: um diálogo sobre integração, projeto e sustentabilidade. Paraná, Brasil. <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007tr570426\\_8796.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007tr570426_8796.pdf)>. (Acesso em 07/03/2014).

Alloway, B.J. and Ayres, D.C. 1996. *Schadstoffe in der Umwelt: chemische Grundlagen zur Beurteilung von Luft, Wasser – und Bodenverschmutzungen*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, BW. 170p.

Al-Sabti, K. and Metcalfe, C.D. 1995. Fish micronuclei for assessing genotoxicity in water. *Mutation Research*, 343: 121-135.

Amaral, J.E.; Krebs, A.S.J. and Pazzetto, M.B. 2008. Mapeamento de Bocas de Minas abandonadas na região carbonífera de Santa Catarina. Pp. 26-31. In: 44º Congresso Brasileiro de Geologia. Curitiba, PR, Brasil.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). 2007. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Terceira edição. TDA Comunicação, Brasília, DF. 159p. <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas\\_par3\\_cap9.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap9.pdf)>. (Acesso em 22/03/2012).

\_\_\_\_\_. (Agência Nacional de Energia Elétrica) 2008. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Terceira edição. TDA Comunicação, Brasília, DF. 159p. <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas\\_par3\\_cap9.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap9.pdf)>. (Acesso em 22/03/2012).

Antonelli, P.J. 2005. Avaliação da toxicidade de efluentes de mineração de carvão antes e após a sua remediação, utilizando-se parâmetros físico-químicos e bioindicadores. Pp.01 - 35. In: II Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão, V Seminário de Iniciação Científica. UNESC. Criciúma, SC, Brasil.

Aragão, A.M. and Araújo, A.P.R. 2006 Métodos de ensaio de toxicidade com organismos aquáticos. Pp. 117-152. In: A.P. Zagatto and E. Bertoletti (eds.). *Ecotoxicologia Aquática: princípios e aplicação*. Rima, São Carlos, SP, Brasil. 478p.

Baird, C. and Cann, M. 2011. *Química Ambiental*. Quarta Edição. Bookman, Porto Alegre, RS. 334p.

Benassi, J.C.; Laus, R.; Geremias, R.; Lima, P.L.; Menezes C.T.; Laranjeira M.C.; Wilhelm-Filho D.; Fávere V.T and Pedrosa R.C. 2006. Archeology Evaluation of Remediation of Coal Mining Wastewater by Chitosan Microspheres Using Biomarkers. *Environmental Contamination Toxicology*, 51: 633-640.

Benito, Y.; Ruiz, M.; Cosmen, P. and Merino, J.L. 2001. Study of leaches obtained from the disposal of fly ash from PFBC process. *Journal of Chemical Engineering*, 84: 167-171.

Bohmer, J. and Rahmann, H. 1990a. Influence of surface water acidification on amphibians. Pp. 287-309. In: F.G. Verlarg (ed.). *Biology and Physiology of Amphibians*. Wilfried Hanke, Stuttgart, NY. 413p.

\_\_\_\_\_. 1990b. Ultrastructural localization of aluminum in amphibian larvae. *Ultramicroscopy*, 32: 18-25.

\_\_\_\_\_. 1991. Ultrastructural aluminum detection in amphibian tissues by electron spectroscopic imaging and electron

energy-loss spectroscopy. *Journal of Microscopy*, 162: 115-122.

Borges, B.A. 2009. Estudos de toxicidade das águas da Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga, utilizando-se organismos bioindicadores *Artemia* sp. e *Daphnia magna* antes e após a remediação com rejeito de mineração de carvão. *Monografia*. Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, SC, Brasil. 35p. <<http://189.114.223.236:8484/dspace/bitstream/123456789/1263/1/Alexandre%20Borges.pdf>>. (Acesso em 10/01/2013).

Buss, F.D.; Oliveira, B.R. and Baptista, F.D. 2008. Monitoramento biológico de ecossistemas aquáticos continentais. *Oecologia Brasiliensis*, 12: 339-345.

Cano, M.T. 2010. Carvão Mineral. *Departamento Nacional de Produção Mineral*. <[https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3970](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3970)> (Acesso em 03/05/2012).

Carson, C.D.; Fanning, D.S. and Dixon, J.B. 1982. Alfisols and Ultisols with acid sulfate weathering features in Texas. Pp. 127-145. In: J.A. Kittrick, D.S. Fanning and L.R. Hossner (eds.). Acid sulfate weathering. Special Publication Soil Science Society of America, 10. Madison, WI. 225p.

Clarke, L.B. 1995. *Coal mining and water quality*. IEA Coal Research, London, UK. 99p.

CONAMA. (Conselho Nacional do Meio Ambiente). 1990. Ministério do Meio Ambiente. Resolução no 003, de 28 de junho de 1990. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF.

CONAMA. (Conselho Nacional do Meio Ambiente). 2005. Ministério do Meio Ambiente. Resolução no 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF.

Daniels, W.L. 1996. Manipulating the chemical properties of soil and mining wastes. Pp. 869 - 897. In: V. V. H. Alvarez, L. E. F. Fontes and M. P. F. Fontes (eds). O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. SBSC/UFV, Viçosa, MG. 930p.

Davidson, R.S.; Natusch, D.F.S.; Wallace, J.R. and Evans JR., C.A. 1974. Trace elements in fly ash: dependence of concentration on particle size. *Environmental Science Technology*, 8: 1107-1113.

DNPM. (Departamento Nacional de Produção Mineral). 1982. Portaria no 917, de 06 de julho de 1982, DOU de 08/07/82.

Dornfeld, C.B. 2002. Utilização de análises limnológicas, bioensaios de toxicidade e macroinvertebrados bentônicos para o diagnóstico ambiental do reservatório de Salto Grande (Americana, SP). *Dissertação de Mestrado*. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, Brasil. 23p. <<https://www.google.com.br/url?sa=t&ndrc=http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-14072005-153541/pt-br.php>>. (Acesso em 15/01/2013).

Esteves, F.A. 1988. *Fundamentos de Limnologia*. Segunda edição. Interciência/Finep, Rio de Janeiro, RJ. 575p.

Evangelou, V.P. 1995. *Piryte oxidation and its control*. CRC Press, New York, NY. 293p.

Felleberg, G. 1980. *Introdução aos problemas de poluição ambiental*. Epu, São Paulo, SP. 216p.

Filho, V.A. 2013. Porque a hidroeletricidade no mundo e no Brasil? Aspectos Energéticos, Econômicos e Socioambientais. *Fórum Nacional - Sessão Especial*, 517: 1-24.

Förstner, U. and Wittmann, G.T.W. 1981. *Metal pollution in the aquatic environment*. Second Edition. Springer - Verlag, Berlin, NY. 397p.

Fungaro, A.D. and Izidoro, C. de J. 2006. Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão. *Química Nova*, 29: 735-740.

Genda, A. 1982. *Saneamento do meio*. Fundação centro, São Paulo, SP. 235p.

Geremias, R. 2009. Utilização de rejeito de mineração de carvão como adsorvente para redução da acidez e remoção de íons de metais em drenagem ácida de mina de carvão. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. 121p. <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/91093/262183.pdf?sequence=1>>. (Acesso em 20/09/2013).

Geremias, R.; Laus, R.; Macan, J.M.; Pedrosa, R.C.; Laranjeira, M.C.; Silvano, J. and Fávere, F.V. 2008. Use of coal mining waste for the removal of acidity and metal ions Al (III) and Mn (II) in acid mine drainage. *Environmental Technology*, 29: 863-869.

Geremias, R.; Pedrosa, R.C.; Benassi, J.C.; Fávere, V.T.; Stolberg, J.; Menezes, C.T.B. and Laranjeira, M.C. 2003. Remediation of coal mining wastewaters using chitosan microspheres. *Environmental Technology*, 24: 1509-1515.

Gerhardt, A.; De Bisthoven, L.J. and Soares, A.M. 2005. Evidence for the Stepwise Stress Model: Gambusia Holbrook and *Daphnia magna* under acid mine drainage and acidified reference water stress. *Environmental Science Technology*, 39: 4150-4158.

Goldemberg, J. and Villanueva, L. D. 2003. *Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. Segunda Edição. Edusp, São Paulo, SP. 440p.

Isart, N.R. and Vasak M. 2002. Advances in the structure and chemistry of metallothioneins. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 88: 388-396.

Jaliet Tariq, M.; Ashraf, M. and Afzal, M. 1996. Pollution status of the Indus river, Pakistan, through heavy metal and macronutrient contents of fish, sediments and water. *Water Research*, 30: 1337-1344.

JUSBRSIL. 2010. Criciúma - Liminar fixa determinações para mineração em subsolo. <<http://jf-sc.jusbrasil.com.br/noticias/2092921/criciuma-liminar-fixa-determinacoes-para-mineracao-em-subsolo>>. (Acesso em 21/12/2013).

Koppe, C.J. and Costa, L.C.F.J. 2002. Processo de Lavra e Beneficiamento de Carvões, Mineração. Pp. 14 -27. In: C. E. Teixeira and R. J. M. Pires (eds.). Meio Ambiente e Carvão: Impactos de Exploração e Utilização. Fepam, Porto Alegre, RS. 498p.

Linnik, P.M. and Zubenko, I.B. 2000. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 5: 11-21.

Mainer, F.B. and Viola, E.D.M. 2005. O sulfeto de Hidrogênio e o Meio Ambiente. Pp. 612-618. In: II Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Rio de Janeiro, RJ. Brasil <[http://www.aedb.br/seget/artigos05/261\\_H2S.pdf](http://www.aedb.br/seget/artigos05/261_H2S.pdf)>. (Acesso em 09/03/2014).

Mance, G. 1990. *Pollution threat of heavy metals in aquatic environments*. First Edition. Springer, London, UK. 372p.

Margoshes M. and Vallee, B.L. 1957. A cadmium protein from equine kidney cortex. *Journal American Chemical Society*, 79: 4813-4814.

Martins, A.F. 2002. Elementos traços em matrizes ambientais. Pp. 229-252. In: C.E. Teixeira and R.J.M. Pires (eds.). Meio Ambiente e Carvão: Impactos de Exploração e Utilização. Fepam, Porto Alegre, RS. 498p.

Menezes, C.T.B. 2003. Tratamento de efluentes ácidos de mina por neutralização e remoção de metais. *Tese de Doutorado*.

- Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, São Paulo, SP, Brasil. 123p. <<http://www.prpg.usp.br/usprio/?q=trabalhos/tratamento-de-efluentes-%C3%A1cidos-de-mina-por-neutraliza%C3%A7%C3%A3o-e-remo%C3%A7%C3%A3o-de-metais>>. (Acesso em 15/01/2013).
- Migliavacca, D.M.; Teixeira, E.C. and Machado, A.C.M. 2005. Composição química da precipitação atmosférica no Sul do Brasil. *Química Nova*, 38: 371-379.
- Mishra, V.K.; Upadhyay, A.R.; Pandey, S.K. and Tripathi, B.D. 2008. Concentrations of heavy metals and aquatic macrophytes of Govind Ballabh Pant Sagar an anthropogenic lake affected by coal mining effluent. *Environmental Monitoring and Assessment*, 141: 49-58.
- Monteiro, V.K. 2004. *Carvão: O Combustível de Ontem*. Núcleos Amigos da Terra Brasil, Porto Alegre, RS. 80p.
- Moraes, C.N. 2010. Abatimento de drenagem ácida de mina com cobertura de entulho de construção civil: uma proposta de reabilitação de uma antiga mina de pirita. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 206p. <<http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2392/1/DISSERTA%C3%87%C3%83OAbatimentoDrenagem%C3%81cida.pdf>>. (Acesso em: 08/08/2013).
- Moses C.O.; Nordstrom D.K.; Herman J.S. and Mills A.L. 1987. Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 561-1571.
- Nascimento, F.M.F.; Mendonça, R.M.G.; Macêdo, M.I.F. and Soares, P.S.M. 2002. Impactos Ambientais nos Recursos Hídricos da Exploração de Carvão em Santa Catarina. In: I Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e II Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Natusch, R.S.; Wallace, J.R. and Evans, C.A. 1974. Toxic trace elements: preferential concentration in respirable particle. *Science*, 121: 202-204.
- Neto, P.H.A. 2010. Avaliação toxicológica da eficácia do sistema de tratamento de drenagem ácida de mina da empresa Cooperminas utilizando *Allium cepa*, *Daphnia magna*, e *Artemia* sp. como organismos bioindicadores. *Monografia*. Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, SC, Brasil. 67p. <<http://www.bib.unesc.net/biblioteca/sumario/000044/00004485.pdf.pdf>>. (Acesso em 15/01/2013).
- Nordberg M. 1998. Metallothioneins: historical review and state of knowledge. *Talanta*, 46: 243-254.
- Nordstrom, D.K. 1982. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron mineral. Pp. 37-56. In: J.A. Kittrick, D.S. Fanning and L.R. Hossner (eds.). Acid sulfate weathering. Special Publication Soil Science Society of America, 10. Madison, WI. 225p.
- Nunes, M.C.D. 2002. Condições físicas de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota – RS. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, RS, Brasil. 131p.
- Ortiz, L. and Teixeira, E.C. 2002. Influência das atividades de processamento do carvão sobre a qualidade dos recursos hídricos superficiais. Pp. 301-340. In: C.E. Teixeira and R.J.M. Pires (eds.). Meio Ambiente e Carvão: Impactos de Exploração e Utilização. Fepam, Porto Alegre, RS. 498p.
- Pavei, P.T. 2007. Caracterização e estudo do comportamento de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em ecossistemas aquáticos contaminados pelas atividades mineração de carvão. *Dissertação de Mestrado*. Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, SC, Brasil. 110p. <<http://www.bib.unesc.net/biblioteca/sumario/000035/0000359F.pdf>>. (Acesso em 20/01/2013).
- Peralba, M.C. 1989. Caracterização Química dos Hidrocarbonetos de Betumes de Carvões Sul Brasileiros. *Tese de Doutorado*. Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, Brasil. 126p. <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28215/000128354.pdf?sequence=1>>. (Acesso em 15/01/2013).
- Pires, M. and Teixeira, E.C. 1991. Distribuição geoquímica dos elementos traço no carvão de Leão, RS. *Geochimica Brasiliensis*, 5: 45-52.
- Pires, M. 2002. Emissões oriundas da combustão do carvão. Pp. 253-274. In: C.E. Teixeira and R.J.M. Pires (eds.). Meio Ambiente e Carvão: Impactos de Exploração e Utilização. Fepam, Porto Alegre, RS. 498p.
- Pitchel, J. R.; Dick, W.A and Sutton, P. 1994. Comparison amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine lands. *Journal Environmental Quality*, 23: 766-772.
- Pitt, G.J. and Millward, G.R. 1979. *Coal and Modern Coal Processing and Introduction*. Academic Press, London, UK. 210p.
- Prochnow, T.R. and Porto, M.L. 2000. Avaliação de uma área de rejeitos da mineração de carvão com vistas à bioindicadores vegetais para metais pesados. Pp.673-694. In: Centro de Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (org.). Carvão e meio ambiente. UFRGS, Porto Alegre, RS. 1006p.
- Raimondo, S.M.; Rowe, C.L. and Congdon, J.D. 1998. Exposure to coal ash impacts swimming performance and predator avoidance in larval bullfrogs (*Rana catesbeiana*). *Journal of Herpetology*, 32: 289-292.
- Rand, G.M. and Petrocelli, S.R. 1985. Introduction. In: G.M. Rand and S.R. Petrocelli (eds.). Fundamentals of Aquatic Toxicology. Hemisphere Publishing Corporation, New York, NY. 662p.
- Ribeiro, H. and Assunção, de V. J. 2002. Efeitos das queimadas na saúde humana. *Estudos Avançados*. *SciELO*, 16: 125-148.
- Ribeiro, T.S.; Almeida, M.G.; Oliveira, K.C.; Souza, C.M.M.; Azevedo, R.A.; Rezende, C. and Vitória, A.P. 2007. Metais pesados em sedimentos dos Rios Imbé (MG) e alto, médio e baixo Paraíba do Sul (RJ/SP). Pp. 01-04. In: XI Congresso Brasileiro de Geoquímica. Sociedade Brasileira de Geoquímica (orgs.). Atibaia, SP, Brasil. <[http://www.institutomilenioestuarios.com.br/pdfs/ParticipacaoEventos/4\\_Congresso\\_Geoquimica/06\\_Ribeiro\\_et\\_al.pdf](http://www.institutomilenioestuarios.com.br/pdfs/ParticipacaoEventos/4_Congresso_Geoquimica/06_Ribeiro_et_al.pdf)>. (Acesso em 11/03/2014).
- Ribo, J.M. 1997. Interlaboratory comparison studies of the luminescent bacteria toxicity bioassay. *Environmental Toxicology and Water Quality*, 12: 283-294.
- Rigotti, N. 2002. Recuperação de áreas degradadas: estudo de caso. Pp. 99-113. In: C.E. Teixeira and R.J.M. Pires (eds.). Meio Ambiente e Carvão: Impactos de Exploração e Utilização. Fepam, Porto Alegre, RS. 498p.
- Rowe, C.L.; Kinney, O.M. and Congdon, J.D. 1998. Oral deformities in tadpoles of the bullfrog (*Rana catesbeiana*) caused by conditions in a polluted habitat. *Copeia*, 1: 244 - 246.
- Sampaio, H.C. 2002. Processo de Lavra e Beneficiamento de Carvões, Beneficiamento. Pp. 20-43. In: C.E. Teixeira and R.J.M. Pires (eds.). Meio Ambiente e Carvão: Impactos de Exploração e Utilização. Fepam, Porto Alegre, RS. 498p.
- Sanches, J.C.D. and Formoso, M.L.L. 1990. Utilização do carvão e meio ambiente. *Boletim Técnico*. Cientec, Porto Alegre. 34p.
- Scheibe, L.F. 2002. O carvão em Santa Catarina: mineração



e consequências ambientais. Pp. 45-64. *In*: C.E. Teixeira and R.J.M. Pires (eds.). *Meio Ambiente e Carvão: Impactos de Exploração e Utilização*. Fepam, Porto Alegre, RS. 498p.

Skousen, J.; Sexstone, A.; Garbutt, K. and Sencindiver J. 1994. Acid mine drainage treatment with wetlands and anoxic limestone drains. Pp.263-281. *In*: D. M. Kent (ed.). *Applied wetlands science and technology*. Lewis Publication, Boca Raton, FL. 448p.

Soucek, D.J.; Cherry D.S. and Trent, G.C. 2000. Relative acute toxicity of acid mine drainage water column and sediments to *Daphnia magna* in the Puckett's Creek Watershed, Virginia, USA. *Archive Environmental Contamination Toxicology*, 38: 305-310.

Spice, A.; McCarty, L.S. and Rand, G. M. Bioaccumulation and bioavailability in multiphase system. *In*: M. Rand Gary (ed.). *Fundamentals of Aquatic Toxicology - Effects, Environmental Fate and Risk Assessment*. Taylor and Francis, Philadelphia, PA. 1083p.

Teixeira, C.E.; Pires, R.J.M.; Fiedler, D.H.; Rocha, C.J. and Cheriaf, M. 2002. *Meio Ambiente e Carvão: Impactos da exploração e utilização*. Fepam, Porto Alegre, RS. 498p.

Trein, H.A.A. 2008. Implicação antrópica na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Urussanga – SC. *Tese de Doutorado*. Universidade Estadual Paulista. São Paulo, SP, Brasil. 149p. <<http://www.cprm.gov.br/>

[publique/media/dou\\_heinz\\_trein.pdf](http://publique/media/dou_heinz_trein.pdf)>. (Acesso em 25/01/2013).

United Nations Economic Commission for Europe - UNECE. 2011. Improving Energy Efficiency by Co-control Approach: China's Experiences in Power Sector. <[http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/eneff/IEEForumDushanbeSept2011/1.4.4\\_Qian.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/eneff/IEEForumDushanbeSept2011/1.4.4_Qian.pdf)>. (Acesso em: 02/10/2013).

Van Der Oost, R.; Beyer, J. and Vermeulen, N.P.E. 2003. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 13: 57-149.

Vaz, P.A.B. and Mendes, M. 1997. Meio Ambiente e Mineração. *Revista de Tecnologia e Ambiente*, 3: 55-67.

Vestena, L.R. 2008. Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, Brasil. 268p. <[http://www.labhidro.ufsc.br/Projetos/TCC/TESE\\_Vestena.pdf](http://www.labhidro.ufsc.br/Projetos/TCC/TESE_Vestena.pdf)>. (Acesso em: 20/01/2013).

Zagatto, A.P. and Bertoletti, E. 2006. *Ecotoxicologia Aquática: Princípios e Aplicações*. Rima, São Carlos, SP. 464p.

Zanardi, JR.V. and Porto, M.L. 1991. Avaliação do sistema de lagoas em áreas de mineração de carvão a céu aberto: metais pesados em água, planta e substrato. *Boletim do Instituto de Biociências*, 49: 1-83.

Submetido em 04/11/2013

Aceito em 06/12/2013