Recuperação de áreas mineradas

José Maria Filippini Alba
Editor Técnico

2ª edição revista

Embrapa

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Clima Temperado
Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Recuperação de áreas mineradas

2ª edição revista

José Maria Filippini Alba
Editor Técnico

Embrapa Informação Tecnológica
Brasília, DF
2010

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Informação Tecnológica
Parque Estação Biológica (PqEB)
Av. W3 Norte (final)
70770-901 Brasília, DF
Fone: (61) 3448-4236
Fax: (61) 3448-2494
vendas@sct.embrapa.br
www.embrapa.br/liv

Embrapa Clima Temperado
Rodovia BR 392, km 78
Caixa Postal 403
96001-970 Pelotas, RS
Fone: (53) 3275-8100
Fax: (53) 3275-8221
sac@cpact.embrapa.br
www.cpact.embrapa.br

Coordenação editorial
Fernando do Amaral Pereira
Mayara Rosa Carneiro
Lucilene Maria de Andrade

Supervisão editorial
Wesley José da Rocha

Revisão de texto
Everaldo Correia da Silva Filho

Normalização bibliográfica
Márcia Maria Pereira de Souza

Projeto gráfico e capa
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Foto da capa
Júlio Skalski Junior

1ª edição
1ª impressão (2007): 50 exemplares

2ª edição
1ª impressão (2010): 1.000 exemplares

Todos os direitos reservados
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo
ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Informação Tecnológica

Recuperação de áreas mineradas / editor técnico, José Maria Filippini Alba. – 2. ed. rev. – Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2010.
326 p. : il. ; 16 cm x 22 cm.

ISBN 978-85-7383-496-3

1. Recurso natural. 2. Deterioração do solo. 3. Mineração. I. Alba, José Maria Filippini. II. Embrapa Clima Temperado.

CDD 333.714

© Embrapa 2010

Autores

Adalberto Koiti Miura
Biólogo, M.Sc. em Engenharia Florestal, pesquisador da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS,
amiura@cpact.embrapa.br

Alexander Silva de Resende
Engenheiro florestal, Dr. em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ,
alex@cnpab.embrapa.br

Alexandre Franco de Castilho
Engenheiro-agrônomo da Mineração Rio do Norte, Oriximiná, PA,
alexandre.castilho@cvrd.com.br

Antonio Sálvio Mangrich
Químico, Dr. em Química, professor titular sênior da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR,
mangrich@ufpr.br

Avílio Antônio Franco
Engenheiro-agrônomo, Dr. em Recuperação de Áreas Degradadas, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ,
avilio@cnpab.embrapa.br

Claudia M. B. F. Maia
Engenheira-agrônoma, Dra. em Química, Pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR,
claudia.maia@cnpf.embrapa.br

Claudio Costa Neto
Engenheiro químico, Dr. em Química Orgânica, professor emérito da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ,
ccostaneto@terra.com.br

Clenio Nailto Pillon
Engenheiro-agrônomo, Dr. em Agronomia, pesquisador da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS,
clenio.pillon@cpact.embrapa.br

Cristiane Regina Budziak
Química, Dra. em Química Inorgânica, professora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR,
cristianerbf@utfpr.edu.br

Domingos Campos Neto
Engenheiro florestal do Consórcio de Alumínio do Maranhão (Alumar), São Luís, MA,
domingos.campos@alcoa.com.br

Eduardo Francia Carneiro Campello
Engenheiro florestal, Dr. em Ciência Florestal, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ,
campello@cnpab.embrapa.br

Eloy Antonio Pauletto
Engenheiro-agrônomo, Dr. em Solos e Nutrição de Plantas, professor da Universidade Federal de Pelotas (Ufpel), Faem, Pelotas, RS,
pauletto@ufpel.tche.br

Flavia Fontana Fernandes
Engenheira-agrônoma, Dra. em Ciências do Solo, professora da Universidade Federal de Pelotas (Ufpel), Faem, Pelotas, RS,
flaviaff@ufpel.tche.br

Henrique K. Porto Alegre
Geólogo, M.Sc. em Geologia Ambiental, geólogo sênior da Petrobrás,
portoalegre@brturbo.com.br

Hildebrando Herrmann
Advogado, Dr. em Geociências e Meio Ambiente, professor da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Instituto de Geociências, Campinas, SP,
herrmann@ige.unicamp.br

Iberê Farina Machado
Biólogo, M.Sc. em Biologia, consultor ambiental da Biota Soluções Ambientais, São Leopoldo, RS,
iberemachado@gmail.com

James Jackson Griffith
Bacharel em Filosofia, Dr. em Ciências Florestais, professor titular da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Florestal, Viçosa, MG,
griffith@ufv.br

Jorge Luís de Oliveira Fortes
Engenheiro-agrônomo, Dr. em Ciência do Solo, professor da Universidade Estadual do Maranhão (Uema), São Luís, MA,
jlofortes@bol.com.br

José Eduardo Figueiredo Dornelles
Biológo, Dr. em Geociências, professor da Universidade Federal de Pelotas (Ufpel), Laboratório de Zoologia, Pelotas, RS,
dornelles@ufpel.edu.br

José Maria Filippini Alba
Químico, Dr. em Geoquímica Superficial, pesquisador da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS,
jose.filippini@cpact.embrapa.br

Joventino Fernandes Moreira
Engenheiro-agrônomo, Dr. em Ciência do Solo, autônomo, Rio de Janeiro, RJ,
jovfm@yahoo.com.br

Júlio Skalski Junior
Engenheiro florestal, M.Sc. em Gestão Ambiental, gestor de meio ambiente na Gerência de Mineração da SIX/Petrobras, Contratec Engenharia Ltda., São Mateus do Sul, PR,
julio.contratec@petrobras.com.br

Lenise da Silva
Licenciada e Bacharel em Química, M.Sc. em Química, professora de Química da Rede Estadual de Ensino do Paraná, Curitiba, RS,
lenisebohr@bol.com.br

Luis Enrique Sánchez
Engenheiro de minas e geógrafo, Dr. em Economia dos Recursos Naturais e do Desenvolvimento, professor da Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP,
lsanchez@usp.br

Luís Sérgio Cerqueira (in memoriam)

Luiz Eduardo Dias
Engenheiro-agrônomo, Dr. em Recuperação de Áreas Degradadas, professor da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Solos, Viçosa, MG,
ledias@ufv.br

Luiz Fernando Spinelli Pinto
Geólogo, Dr. em Ciência do Solo, professor da Universidade Federal de Pelotas (Ufpel), Faem, Departamento de Solos, Pelotas, RS,
lfspin@ufpel.tche.br

Marcos Back
Engenheiro-agrônomo, M.Sc. em Geografia, professor da Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas (Ipat), Criciúma, SC,
mba@unesc.net

Rafael Gustavo Becker
Biólogo, M.Sc. em Biologia, consultor ambiental da Biota Soluções Ambientais, São Leopoldo, RS,
rgbecker@terra.com.br

Robson dos Santos
Biólogo e químico industrial, Dr. em Engenharia, professor da Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma, SC,
rsa@unesc.net

Roger Borges da Silva
Biólogo, M.Sc. em Biologia, consultor ambiental da Biota Soluções Ambientais, São Leopoldo, RS,
bio.roger@gmail.com

Rosa Lia Barbieri
Bióloga, Dra. em Genética e Biologia Molecular, pesquisadora da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS,
lia.barbieri@cpact.embrapa.br

Sebastião Pinheiro
Engenheiro-agrônomo, professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS,
juquira@yahoo.com

Sérgio Miana de Faria
Engenheiro florestal, Dr. em Recuperação de Áreas Degradadas, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ,
sdefaria@cnpab.embrapa.br

Sueli Yoshinaga Pereira
Geóloga, Dra. em Geociências, professora da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Instituto de Geociências, Campinas, SP,
sueliyos@ige.unicamp.br

Tomás Fleck
Biólogo, M.Sc. em Biologia, consultor ambiental da Biota Soluções Ambientais, São Leopoldo, RS,
tofleck@gmail.com

Vanilde Citadini-Zanette
Bióloga, Dra. em Ecologia e Recursos Naturais, professora da Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma, SC,
vcz@unesc.net

Agradecimentos

Aos autores pela sua colaboração irrestrita na elaboração e revisão dos artigos.

À Petrobras e à Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento Agropecuário Edmundo Gestal (Fapeg) pelo suporte financeiro.

Às autoridades da Embrapa, com destaque para o Dr. Waldyr Stumpf Junior (Chefe Geral da Embrapa Clima Temperado), para o Dr. Clênio Nailto Pillon (Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa Clima Temperado) e para o Dr. João Carlos Costa Gomes (Chefe Adjunto de Comunicação e Negócios), pelo suporte oferecido e confiança depositada.

Às estagiárias Melina Linda Schwank Dutra e Lílian Garcia pelas diversas gestões perante os autores e pela correção dos gráficos de vários artigos do livro, respectivamente.

Aos pesquisadores visitantes Betânia Fraga Pereira, Sandro José Giacomini e Carlos Augusto Posser Silveira pelas contribuições relativas ao capítulo Agricultura no Contexto da Recuperação de Áreas Mineradas.

Aos colegas e pesquisadores Rosa Lia Barbieri e Carlos Alberto Flores pela revisão do capítulo Agricultura no Contexto da Recuperação de Áreas Mineradas.

Aos jornalistas Antônio Luiz Oliveira Heberlê e Sadi Macedo Sapper pelas sugestões sobre a estrutura do livro e pela revisão do inglês e do português, respectivamente.

Aos bolsistas Gisele Machado Brites e Wilian Costa Sandrini pela colaboração na formatação e na padronização do texto e das referências.

Apresentação

Este livro representa o esforço dos participantes do Workshop de Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração de Xisto, realizado em São Mateus do Sul, PR, no período de 22 a 23 de Novembro de 2005, no marco do projeto Xisto Agrícola. Esse projeto foi financiado pela Petrobras, representada pela Unidade de Negócios de Industrialização do Xisto (SIX) e executado pela Embrapa Clima Temperado, com a colaboração da Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento Agropecuário Edmundo Gastal (Fapeg).

A primeira edição, lançada em 2007 pela Embrapa Clima Temperado, foi pequena, 50 exemplares, e distribuída de forma gratuita no contexto técnico-científico dos autores. Em 2008, o Dr. João Carlos Costa Gomes (Embrapa Clima Temperado) se dispôs gentilmente a encaminhar o livro à Embrapa Informação Tecnológica, que, depois de rigorosa revisão e padronização, propôs o lançando desta segunda edição.

Participaram da elaboração do livro 37 pesquisadores, 59% locados na região Sul, 30% na região Sudeste e 11% na região Norte, representando oito estados: Maranhão, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo. Envolveram-se três Unidades da Embrapa (Agrobiologia, Clima Temperado e Florestas), quatro empresas do setor mineral (Petrobras e três empresas privadas) e onze universidades (Uema, UFPR, UFRGS, UFRJ, Ufpel, UFV, Unesc, Unicamp, Unicentro, Unisinos e USP). Na oportunidade, lamenta-se profundamente o falecimento do Engenheiro Luís Sérgio Cerqueira, em 2006, Consultor da Alunorte, que participou da elaboração do capítulo 3 da Parte 4 do livro.

A recuperação de áreas degradadas é um tema interdisciplinar e transdisciplinar, em estreita vinculação com a mineração, com fundamentos em agronomia, biologia, direito, florestação, geologia, geomorfologia e veterinária, entre outras. Essa visão encontra-se expressa no conteúdo

do livro, dividido em quatro partes: 1) Potencialidade dos subprodutos da mineração na agricultura; 2) Estratégias de gestão em recuperação de áreas degradadas por mineração; 3) Indicadores de qualidade ambiental em áreas degradadas; e 4) Experiências em projetos de recuperação de áreas degradadas por mineração.

Foram considerados diversos temas inovadores, como direito, gestão, planejamento e qualidade ambiental, segurança alimentar ou novos insumos para a agricultura. Em termos de indicadores, foram consideradas as substâncias húmicas, a drenagem ácida, a fauna, a paleodiversidade e as características dos solos. Há também relatos de estudos de caso conduzidos por três grupos de pesquisa reconhecidos, envolvendo a Petrobras – SIX (São Mateus do Sul, PR), a Unesc (Criciúma, SC) e a Embrapa Agrobiologia (Seropédica, RJ), relacionados ao setor de petróleo Brasileiro, ao setor carbonífero de Santa Catarina e ao setor de alumínio da região Norte.

Waldyr Stumpf Jr.
Chefe-Geral da Embrapa Clima Temperado

Sumário

Parte 1
Potencialidade dos subprodutos da mineração na agricultura

Capítulo 1
Potencialidades da xistoquímica para a agricultura 13

Capítulo 2
Agricultura no contexto da recuperação de áreas mineradas 31

Capítulo 3
Lições das rochas: a energia suprema 47

Parte 2
Estratégias de gestão em recuperação de áreas degradadas por mineração

Capítulo 1
Cinco subsistemas de recuperação ambiental: uma proposta de gestão holônica 81

Capítulo 2
Planejamento e gestão do processo de recuperação de áreas degradadas 103

Capítulo 3
Recuperação socioambiental de áreas mineradas 123

Parte 3
Indicadores de qualidade ambiental em áreas degradadas

Capítulo 1
Avaliação ambiental por meio de ácidos húmicos na área de mineração do xisto em São Mateus do Sul, PR 147

Capítulo 2
Impacto da drenagem ácida na água subterrânea 161

Capítulo 3
Monitoramento de áreas em recuperação: padrões de colonização da comunidade de vertebrados terrestres 181

Capítulo 4
Paleodiversidade comentada dos folhelhos e siltitos da formação Irati da área de extração do "xisto" e região: um resgate fossilífero 223

Capítulo 5
Recuperação de solos degradados pela mineração: da teoria termodinâmica à prática nas áreas regeneradas da mina de carvão de Candiota, RS 237

Parte 4
Experiências em projetos de recuperação de áreas degradadas por mineração

Capítulo 1
O processo da Petrobras na recuperação das áreas mineradas para exploração do xisto em São Mateus do Sul, PR 257

Capítulo 2
Reabilitação de áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto no sul de Santa Catarina 281

Capítulo 3
Revegetação de áreas degradadas pela mineração e processamento de bauxita 303

Anexo 323

Parte 1

Potencialidade dos subprodutos da mineração na agricultura

Capítulo 1

Potencialidades da xistoquímica para a agricultura

Claudio Costa Neto

Introdução

Xistoquímica é definida como a química dos xistos oleígenos, com particular ênfase no uso da química voltada para o bom aproveitamento dos xistos oleígenos em benefício da sociedade[1].

Por ter como destino a sociedade, a xistoquímica requer, desde a sua concepção: o quê, porquê, como, onde..., à sua expressão: o fazer acontecer. E que, mais do que só a ciência e a técnica, estejam presentes os elementos da ética, o respeito às pessoas e à natureza que nos abriga. E que há de haver um embasamento filosófico para orientar a sua utilização.

Os xistos oleígenos, pelo vulto de suas proporções e importância, são um bem social e, como tal, o seu aproveitamento tem de trazer benefícios a todos. Por isso, a sua utilização deve ser tratada com a mesma visão holística como devem ser tratados os assuntos de Estado. Há que se ter à visão econômica, é claro – quem vai arcar com os custos do investimento? Como serão pagos os investimentos feitos? Mas os interesses econômicos não poderão predominar sobre os interesses da sociedade: há que se buscar e manter, sempre, um equilíbrio estável e sustentável entre custos e benefícios sociais.

A química é a ciência das transformações da matéria descritas em termos de moléculas, que lega à xistoquímica a arte, a ciência e a técnica de reconstruir a natureza e rearranjar os elementos estruturais químicos dos xistos oleígenos nos usos que pede a sociedade.

O Projeto Xistoquímica definiu, para nortear as suas atividades, que as necessidades sociais para as quais deveria dirigir a xistoquímica fossem

[1] Cabe aqui reforçar a compreensão do que é a xistoquímica: é a química dos xistos oleígenos em todos os seus aspectos, isto é, a ciência e a técnica, o conhecimento e o fazer, de tudo o que diz respeito à estrutura e às transformações moleculares dos xistos oleígenos. A xistoquímica trata do xisto "cru" (a geoquímica orgânica dos xistos oleígenos, por exemplo, pertence ao domínio da xistoquímica), bem como de todos os produtos que se obtém de qualquer processamento. No processo de retortagem inclui a química da pirólise propriamente de seus produtos e de tudo o que com eles se fará: é a química dos gases da pirólise, do óleo de pirólise, da água de retortagem e do resíduo da pirólise (o xisto retortado). Reforçar essa compreensão é necessário porque, ouve-se, muitas vezes, o entendimento enganado de que a xistoquímica seria a "petroquímica" do xisto e, portanto, limitada às formas de utilização apenas do óleo e do gás de xisto à semelhança do que se faz com o petróleo. Nada mais falso.

as de atender a necessidades fundamentais e essenciais (materiais) da sociedade, estabelecidas como *saúde*, *materiais* e *energia* (COSTA NETO, 1978). E mais, que o desenvolvimento dessas atividades deveriam se alinhar com o paradigma de "fazer o que é (socialmente) preciso a partir do que se tem (a sociedade)" (COSTA NETO et al., 1984; COSTA NETO, 2002). Isto é, atender às necessidades fundamentais e essenciais de uma sociedade a partir de materiais que estejam disponíveis no âmbito social. No caso, a matéria-prima seriam os xistos oleígenos.

Quando se trata da utilização de xistos oleígenos, dois grupos de matérias-primas podem ser pensados:

1. O xisto "cru", isto é, a rocha como é encontrada na natureza. Podem-se incluir outras camadas a ele adjacentes na mina: é o caso do calcário dolomítico, por exemplo, presente entre a primeira e segunda camada do xisto da formação Irati.
2. Os produtos da retortagem do xisto. A retortagem dos xistos oleígenos (pirólise) é a operação industrial convencional para sua utilização. Leva aos seguintes produtos:
    a. O gás de xisto (gases resultantes da pirólise da rocha).
    b. O óleo de xisto (óleo de pirólise, alcatrão de xisto).
    c. A água de retortagem (água produzida no processo de pirólise da rocha).
    d. O xisto retortado (o resíduo da pirólise).

A grande equação da xistoquímica é, pois, adequar quimicamente esses materiais – o xisto cru e as frações a que se chega com a sua retortagem – às necessidades essenciais da sociedade, definidas acima como saúde, materiais e energia. Que possíveis "soluções" existem para essa equação?

O primeiro passo é abrir a caixa das necessidades sociais em saúde, materiais e energia e, ao mesmo tempo, listar a matéria-prima química

disponível no xisto (cru e retortado). Caberá à xistoquímica, então, apresentar soluções por meio de processos conhecidos ou de novos processos que transformem a matéria-prima disponível nos produtos socialmente relevantes e desejados.

As necessidades essenciais (materiais) de uma sociedade

Estabelecidas que as necessidades fundamentais (materiais) de uma sociedade são a saúde, materiais e energia, cabe agora dissecar o que cada uma dessas categorias comporta.

Assim, a categoria *saúde* envolve as necessidades:

- De *alimentação* (a mais fundamental dentre as fundamentais) que mantém o ciclo vital do ser sadio.
- De *remédios*, que existem para corrigir desvios de comportamento do ser sadio.

As necessidades de saúde constituem, portanto, a categoria mais fundamental dentre as necessidades sociais. Note-se que os seres menos evoluídos se valem de bens naturais apenas para satisfazer suas necessidades de saúde.

A segunda categoria de necessidades é constituída pelos *materiais,* usadas pelos seres humanos para construir peças que lhes facilitem realizar um dado trabalho. Entre esses materiais, estão aqueles obtidos com o uso de tecnologia simples (couro, ossos, etc.) e outros produzidos por tecnologia (mais) complexa (metais, cerâmica, "plásticos", etc.).

Energia é outra das necessidades primárias das sociedades, particularmente das sociedades modernas que desenvolveram dispositivos, as máquinas, que permite multiplicar, de muito, a capacidade de trabalho do indivíduo. E a palavra "petróleo" vem sendo usada no mundo de hoje praticamente como sinônimo de energia, nem tanto pela sua participação no

consumo total de energia (no Brasil, por exemplo, o petróleo entra com cerca de 30% a 40% da produção da energia primária), mas por ter sido o petróleo, farto e barato (já não é mais tanto assim...), que propiciou um desenvolvimento sem precedentes na história da civilização humana, proporcionando meios ao homem de multiplicar a sua capacidade de produzir *movimento* (por meio do motor à explosão) e *calor* (por meio de combustores).

Matérias-primas químicas e fornecidas pelos xistos oleígenos

Os produtos que podem ser obtidos dos xistos oleígenos estão relacionados na Tabela 1. Essa tabela mostra também a produção atual diária desses insumos na unidade industrial da Petrobras (SIX) em São Mateus do Sul, Estado do Paraná.

Muitos são os usos sociais que podem ser dados ao xisto (COSTA NETO, 1980). Há, porém, um que se sobressai sobremaneira, pela sua relevância e importância para a sociedade: é aquele que estabelece o

Tabela 1. Matéria-prima química dos xistos oleígenos.

Origem	Quantidade disponível com o processamento de aproximadamente 9.000 toneladas diárias do xisto Irati[1] (VIEIRA, 2005).	Matéria-prima química
Xisto in natura	Indefinida Finos do processamento do xisto: 1.300 t (14,3%) Aproximadamente 8.000 t	Complexo organomineral constituído de restos de algas, bactérias e de argilas, minerais e elementos-traço, intimamente misturados Calcário dolomítico
Gás de xisto (retortagem)	Gás combustível: 132 t (1,45% a 1,70%) Gás liquefeito de xisto:50 t (0,55% a 0,64%) Enxofre: 85 t (0,94%)	Alquenos < C5 Hidrocarbonetos saturados < C5 Hidrogênio Sulfeto de hidrogênio

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Origem	Quantidade disponível com o processamento de aproximadamente 9.000 toneladas diárias do xisto Irati[1] (VIEIRA, 2005).	Matéria-prima química
Óleo de xisto (retortagem)	Nafta:90 t (0,99% a 1,16%) Óleo: 480 t (5,29% a 6,17%) Aproximadamente 4.000 barris	Asfaltos Fenóis Hidrocarbonetos aromáticos Naftas (de destilação e de arraste por vapor d'água Olefinas-α Piridinas
Água de retortagem	337,5 t (300 m^3) (3,72% a 4,34%)	Amônia Fenóis Sulfeto e polissulfetos
Resíduos de retortagem	6.600 t (72,73% a 84,9%)	Alumínio Argilas Carbono Elementos-traço Potássio Sílica (amorfa) Sulfeto de ferro

[1] Porcentagem relativa ao xisto minerado, excluídos os finos.

uso combinado das frações com foco na agricultura, a fim de suprir a necessidade mais fundamental dentre as mais fundamentais de qualquer sociedade: a alimentação. Como podem os xistos oleígenos contribuir para a agricultura?

A contribuição da xistoquímica para a agricultura

A participação da xistoquímica na agricultura consistirá em levar a arte, a ciência e a técnica de reconstruir a natureza química dos xistos oleígenos para transformá-los nos produtos de que necessita a agricultura, visando, como foco último, produzir alimentos e medicamentos.

É fácil justificar o uso social nobre que poderá ser dado aos xistos oleígenos quando utilizados para fins agrícolas:

1. A *saúde* de uma sociedade está diretamente relacionada à boa alimentação – nutritiva, nas quantidades adequadas –, e a alimentação está muito relacionada a plantas. Plantas são, também, fonte de inúmeros remédios usados para combater doenças (plantas medicinais, fármacos de origem vegetal). Alimentação (geração de alimentos) é, portanto, o foco para onde convergem as atenções e atividades da xistoquímica para a agricultura: criar condições que propiciem uma maior e melhor produção de alimentos[2]. Em outras palavras, gerar insumos para se ter uma agricultura mais produtiva e extensiva a toda a população.
2. *Materiais* são indispensáveis para implementar as atividades no campo, que necessitam de uma ampla rede de insumos. Esses insumos podem ser reunidos em duas grandes famílias:
    a. A relacionada ao solo: são os solos propriamente ditos, os corretores e condicionantes de solos, adubos e nutrientes.
    b. A relacionada aos complementos e implementos: são os silos, cercas, estufas, embalagens, materiais para construção civil, etc. Esses materiais devem atender às características de ter custo baixo e de serem resistentes e duráveis. Para resistirem aos processos fermentativos que levam à sua (bio) degradação, esses materiais devem, de preferência, ser não biodegradáveis.

[2] Vale aqui uma observação sobre a expressão "que propiciem uma maior e melhor produção de alimentos". A um aumento da oferta de alimento corresponde, sempre, um aumento de população de seres vivos, quaisquer que sejam eles. O que importa, quando se diz "que propiciem uma maior e melhor produção de alimentos", é que não falte alimento a ninguém da sociedade, que não haja fome entre os seus habitantes. Contudo, é preciso ter bem presente que, ao mesmo tempo em que a oferta de alimento for aumentada, há que acompanhá-la de um aumento da oferta de educação para a mesma sociedade, mostrando que tem de haver um limite para o número de pessoas da população para que todos possam viver bem. Caso não seja obedecido esse limite, a superpopulação necessariamente levará a diferenças sociais e a miséria, de novo, se instalará em uma parte da sociedade.

3. Também de *energia* necessita a agricultura para operar como um multiplicador da força humana. Seu uso principal é para acionar motores: são os tratores, as bombas (para irrigação e outros usos) e outras tantas máquinas agrícolas. Há que se pensar, também, na energia requerida para iluminação e aquecimento. A energia usada para o acionamento de bombas ou para a iluminação é principalmente a elétrica, enquanto para os tratores e aquecimento o combustível químico é o normalmente utilizado. A energia elétrica pode ser obtida a partir da queima de combustível químico em caldeiras ou turbinas, querendo-se com isso dizer que toda a energia necessária para mover um processo agrícola pode provir de uma única fonte, de origem química.

Os dados da Tabela 2 mostram a contribuição que os xistos oleígenos podem dar na agricultura, classificados segundo os elementos sociais fundamentais: saúde, materiais e energia.

A cultura de plantas para atender às necessidades de uma população em alimentos é uma atividade intensa, extensa e, ao mesmo tempo, diversificada, que requer grandes quantidades de insumos: alimentos são consumidos permanente e continuamente. Qualquer fonte de matéria-prima usada para suprir necessidades da agricultura tem, portanto, de ser extensa, isto é, há que tê-la disponível em grandes quantidades, permanentemente.

A Tabela 1 mostra que a Petrobras (SIX), no atual sistema de funcionamento, processa aproximadamente 9.000 toneladas de xisto por dia, gerando 180 toneladas de gás de pirólise – gás de xisto, 570 toneladas de óleo de pirólise (óleo de xisto próximo a 4 mil barris), 300 metros cúbicos de água de retortagem (próximo a 340 toneladas) e 6.600 toneladas de resíduo (xisto retortado) –, produzindo, ainda, um rejeito de finos de xisto (de tamanho impróprio para a retortagem pelo Processo Petrosix) de 1.200 toneladas diárias. É importante ressaltar nesses dados a geração de 1.200 toneladas de finos de xisto que não são processados e a produção diária de uma quantidade enorme de resíduo: 6.600 t/dia de xisto retortado,

cujo destino, presentemente, é o de reencher as minas de onde foi retirado o xisto cru que lhe deu origem, seguido da recuperação ambiental da região. Há que se pensar, portanto, por se ter "uma fonte de matéria-prima disponível em grandes quantidades permanentemente", em seu uso para suprir necessidades da agricultura, vale dizer, contribuir para eliminar a fome da sociedade por alimento.

Tabela 2. Uso dos xistos oleígenos na agricultura segundo os critérios de saúde, materiais e energia.

Matéria-prima ou subproduto	Aplicação na agricultura
Saúde (produção de alimentos e remédios)	
Xisto in natura (pó fino, também denominado "finos de xisto")	Adubo Querogênio humificado Condicionador de solos
Calcário dolomítico (camada intermediária entre as duas camadas de xisto oleígeno na formação Irati)	Condicionador da acidez dos solos Fonte de cálcio e magnésio para as plantas
Óleo de xisto	Húmus
Água de retortagem	Fertilizante foliar Antisséptico
Xisto retortado	Adubo Base para solos
Materiais	
Gás de xisto	Matéria-prima petroquímica/polímeros Produção de enxofre
Óleo de xisto	Detergentes catiônicos antissépticos Matéria-prima para polímeros Compósitos (polímeros do xisto com xisto calcinado) Impermeabilizantes
Xisto retortado	Materiais cerâmicos (para construção): tijolos, pozolanas, espuma cerâmica, vidros Compósitos para cercas, mourões, vasos, etc.Micronutrientes Sódio, potássio e cálcio, silício, enxofre
Energia	
Gás de xisto	Geração de calor Geração de eletricidade
Xisto retortado	Geração de calor (por combustão dos resíduos de carbono e de enxofre)

Composição química das várias matérias-primas fornecidas pelos xistos oleígenos

A composição química do xisto-rocha e das várias frações produzidas na retortagem do xisto é bem conhecida (FONSECA et al., 1989a, 1989b, 1989c).

Processo de transformação de produtos oriundos do xisto em materiais agrícolas

Adotada a direção de utilizar os xistos oleígenos na produção de bens para a agricultura, resta descrever quais produtos poderiam ser estes, e quais seriam os processos empregados para obtê-los. As Tabelas 3 e 4 listam uma série de produtos de interesse à agricultura que poderiam ser obtidos a partir das várias matérias-primas que os xistos oleígenos oferecem, por meio da xistoquímica.

Tabela 3. Processos de transformação de produtos oriundos do xisto em materiais agrícolas (sólidos).

Matéria-prima/produto	Xistoquímica
Xisto in natura e camada intermediária	
Xisto in natura: fonte de oligo e macroelementos químicos, nitrogênio, enxofre	Não há nenhuma operação química envolvida. Apenas cominuição da rocha a um pó fino (liberação da matéria orgânica da inorgânica?) Exercer controle sobre os teores de mercúrio, arsênico, cádmio e chumbo (podem ser usadas plantas com afinidade por esses elementos)
Camada intermediária: condicionador do solo por meio do carbonato que contém. Fontes de cálcio e magnésio para as plantas	Não há nenhuma operação química envolvida. Apenas cominuição da rocha a um pó fino Exercer controle sobre os teores de mercúrio, arsênico, cádmio e chumbo (podem ser usadas plantas com afinidade por estes elementos para a sua determinação)

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Matéria-prima/produto	Xistoquímica
Xisto retortado	
Combustão do xisto retortado: CO_2, SO_2, xisto ”calcinado”	Tecnologia de combustão controlada. É possível discriminar a produção de SO_2 e de CO_2. A temperatura destrói a estrutura das argilas e os cátions de alumínio e potássio tornam-se mais facilmente lixiviáveis. Entretanto, a temperatura de combustão não deve exceder 800 °C, pois, a partir dessa temperatura formam-se ”vidros” que reduzem o rendimento de lixiviação Uso do calor produzido na reação para geração de energia elétrica
Lixiviação do xisto queimado: sulfato de alumínio, de potássio e de oligoelementos, xisto ”queimado/lixiviado”	Tecnologia de lixiviação: ciclos repetidos de lixiviação com ácido sulfúrico Cristalização do sulfato de alumínio Concentrados de oligoelementos
Redução do SO_2: H_2S, S	Tecnologia de produção de enxofre: o SO_2 produzido na combustão do xisto retortado pode ser levado a enxofre por várias vias (veja discussão no texto sobre as vias estudadas no Projeto Xistoquímica)
Xisto queimado/lixiviado + torta de mamona: solos rejuvenescidos	Um extenso trabalho de modificação e de ”integração" do xisto queimado/lixiviado com torta de mamona para produzir um solo com características próprias para o desenvolvimento de plantas (veja discussão ampla no texto sobre esse item, em seção própria) Exercer controle sobre os teores de mercúrio, arsênico, cádmio e chumbo no xisto queimado, quando usados como solo
Xisto retortado/calcinado: compósitos	Tecnologia de produção de compósitos de xisto retortado/queimado com polímeros orgânicos
Xisto calcinado: pozolanas	Tecnologia de produção de pozolanas a partir do xisto retortado/queimado
Xisto calcinado: espuma cerâmica	Tecnologia de produção de espuma cerâmica a partir do xisto retortado
Xisto calcinado:vidros e vitrocerâmicas	Tecnologia de produção de vidros e de vitrocerâmicas a partir do xisto retortado

Tabela 4. Processos de transformação de produtos oriundos do xisto em materiais agrícolas (fluídos).

Óleo de xisto (óleo de pirólise)	
Óleo de xisto (naftas): monômeros/polímeros; aglutinantes para compósitos	Tecnologia de produção de compósitos de xisto retortado/queimado com polímeros/aglutinantes obtidos do óleo de xisto
Óleo de xisto (fração pesada):húmus de xisto	Tecnologia de produção de materiais substitutos do húmus a partir de frações pesadas do óleo de xisto (óleo combustível)
Óleo de xisto: compostos nitrogenados; produtos de química fina para a agricultura	Tecnologia de produção de detergentes catiônicos antissépticos
Gás de xisto (gás de pirólise)	
Combustão: energia	Atender a necessidades de energia (mecânica e elétrica)
Eteno, propeno, etc.: polímeros; produtos de química fina para a agricultura	Tecnologia de produção de polímeros
Água de retortagem	
Água de retortagem (fenóis): antisséptico Água de retortagem (amônia): adubo foliar	Análise qualitativa e quantitativa detalhada e exaustiva das ”impurezas” da água de retortagem. Ensaios toxicológicos para a presença de agentes cancerígenos (hidrocarbonetos poliaromáticos e outros). Determinação dos teores de mercúrio e arsênico. Ensaios farmacológicos exaustivos com vistas a caracterizar os benefícios da água de retortagem para as plantas. Estudos da interferência das “impurezas” da água de retortagem na fisiologia vegetal. Eliminação de impurezas indesejadas

O rejuvenescimento de solos pelo uso combinado do xisto retortado e da torta de mamona

A utilização de rejeitos de produção industrial é hoje um objetivo maior da indústria, seja pelo lado econômico de valorização do produto, seja pelo lado social de preocupação com o meio ambiente. Indústrias de grande porte são grandes geradoras de rejeitos: é o caso da produção de óleo de xisto e do óleo de mamona (*Ricinus communis* L.).

A produção de óleo de mamona, hoje em fase de grande ampliação no Brasil pela possível aplicação como biodiesel, leva a um resíduo industrial que é gerado em larga escala: a "torta de mamona". A produção atual anual de óleo de mamona no País é da ordem de 150 mil toneladas, gerando uma quantidade um pouco maior de "torta": o rendimento de óleo varia de 40% a 50% em peso das sementes usadas na sua extração. A essa quantidade de torta deve ser adicionado os restos das bagas de onde são retiradas as sementes e os arbustos, quando as plantas são substituídas (a cada quatro anos, aproximadamente).

O aproveitamento maciço de biomassa plantada (no caso da mamona) traz desgastes para o solo, seja pela "mineração" dos micronutrientes necessários ao crescimento da planta, seja pela própria ruptura da estrutura de equilíbrio do solo, o que acontece no plantio, na manutenção ou no replantio. Já o resíduo de processamento do xisto, produz enormes quantidades de material silicoargiloso cujo destino tem sido simplesmente o de retornar ao local de origem. A associação desses dois tipos de resíduo pode ser pensada para criar solos "rejuvenescidos", isto é, solos que apresentem as qualidades de um solo fértil, próprio para a agricultura, com as características que lhes são próprias: estruturas na forma de um complexo argilo-orgânico, com porosidade adequada, capazes de reter água, oligoelementos e argilas, devidamente projetado e construído quimicamente para efetuar essas operações com eficiência.

Combinar os resíduos da produção do biodiesel a partir da mamona, que são inteiramente de natureza orgânica, com o rejeito de processamento do xisto – (de natureza inteiramente inorgânica) para a produção de solos rejuvenescidos, férteis, para a agricultura, é um fruto, por excelência, da xistoquímica. Essa técnica se configura como um trabalho que atende aos cânones de uma ciência profunda desses materiais complexos (muito complexos), que se expande para uma tecnologia própria e se alia a uma ética de respeito ao meio ambiente, tudo suportado por uma visão filosófica de servir a necessidades sociais primeiras.

Considerações finais

1. A industrialização do xisto, tornada efetiva com enorme sucesso pelo processo Petrosix da Petrobras, foi uma iniciativa das mais eloquentes no cenário científico e tecnológico do País, em todas as épocas.

2. Entretanto, utilizar o óleo de xisto para complementar a demanda de petróleo na matriz energética brasileira não tem sustentação, em razão da quantidade de óleo de xisto produzida e da demanda nacional presente de petróleo. Aumentar a produção de óleo de xisto não parece ser atitude viável para atender a essa demanda, pelos enormes investimentos necessários a serem feitos na construção de novas retortas e nos custos de mineração e, talvez principalmente, nas enormes quantidades de rejeito que produzirá (é sempre bom ter em mente que o xisto Irati fornece, grosso modo, em peso, 7% a 8% de óleo, 4% a 5% de água de retortagem, 3% a 4% de gás e 80% a 85% (!) de rejeito).

3. Embora a grande alta nos preços do petróleo venha tornar o preço do óleo de xisto comercialmente competitivo, é bem claro que a indústria dos xistos oleígenos só se viabilizará quando houver um aproveitamento integral de todos os seus produtos, e isso certamente inclui o resíduo de pirólise, o seu produto "mais abundante". Como a produção desse resíduo atinge grandes quantidades (mesmo na produção atual), é necessário que as aplicações que o utilizem também o façam em grandes quantidades.

4. Dirigir e concentrar, objetivamente, o processamento que hoje se faz dos xistos oleígenos para a agricultura, por meio da xistoquímica, é uma forma de trazer uma contribuição direta e expressiva para a sociedade, voltada para a saúde – por meio da alimentação e dos remédios –, e para a produção dos materiais e da energia necessários à agricultura, o que poderá dar a rentabilidade

desejada para a indústria dos xistos oleígenos, quando se integram vários possíveis produtos.

5. Melhor ainda se fará se for possível combinar a utilização dos resíduos da pirólise do xisto com resíduos orgânicos de origem agrícola, como ocorre com a torta de mamona na produção de óleo de mamona – (usado para a produção de biodiesel), gerando um complexo industrial integrado, embasado filosoficamente no princípio de atender a necessidades essenciais da sociedade, fazendo uso de suas próprias matérias-primas.

6. A iniciativa de voltar o uso dos xistos oleígenos para a agricultura e, ainda mais, associá-los com resíduos vegetais (como a torta de mamona) poderá viabilizar a utilização de outras reservas de xistos oleígenos do País, até agora desprezadas porque não suportariam a demanda de óleo desejada para suprir a matriz energética nacional. Entretanto, essas mesmas reservas poderiam suprir uma "matriz agronômica" regional. Para isso, certamente grandes mudanças de paradigma seriam necessárias para adaptar o uso dos xistos oleígenos à gama de usos indicados, e novos processos para a retortagem do xisto adaptados a cada região teriam de ser desenvolvidos (talvez até o próprio processo Petrosix modificado para escalas menores – *scale down*). Há que se pensar em unidades "semimóveis" para o processamento dos xistos oleígenos, isto é, unidades que operassem em instalações fixas, mas que pudessem ser transportadas para localidades diferentes à medida da necessidade de se encurtarem distâncias entre a mineração e o processamento. Há que se pensar, também, em unidades de processamento dos xistos oleígenos que acoplassem pirólise e combustão para poder tirar proveito de tudo que os xistos oleígenos podem suprir à sociedade.

7. Muitos estudos foram realizados até hoje sobre os xistos oleígenos brasileiros, particularmente com os da formação Irati.

A bibliografia sobre xistos oleígenos brasileiros, publicada no Brasil e no exterior até 1987, foi disponibilizada na UFRJ (PROJETO XISTOQUÍMICA, 1988). Faz-se necessário, nos dias presentes, atualizar essa bibliografia e criar uma grande base com todos os dados publicados sobre os xistos oleígenos brasileiros, com o objetivo de divulgar o conhecimento e estimular o avanço da ciência e da tecnologia no uso dessa importante matéria-prima que o Brasil tem.

8. A indústria dos xistos oleígenos só se tornará uma realidade social quando lhe for dado um aproveitamento completo e integrado, holístico, de todas as suas partes. Como diz o pensamento, "Tudo é infinito. A limitação das coisas é a limitação das pessoas que fazem as coisas", também se deve pensar assim com os xistos oleígenos. Caberá à imaginação das pessoas alargar os limites que hoje lhes damos para transformá-los em uma realidade social. E para isso é preciso conhecer e ousar caminhar na direção em que as ideias e os raciocínios apontem como bons. E é preciso muita "saúde à paciência" para se colherem resultados das ideias que um dia foram semeadas.

Referências

COSTA NETO, C. **Perspectivas para o aproveitamento dos xistos oleígenos no Brasil**. Trabalho apresentado na World conference on future sources of organic raw materials, I Chemrawn, Toronto, Canada, 10 a 13 de julho de 1978.

COSTA NETO, C. **Vila Rosário**. Rio de Janeiro: Cálamo, 2002. 480 p.

COSTA NETO, C. Xistos oleígenos: uma matéria-prima que o Brasil tem. **Química Nova**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 64-103, 1980.

COSTA NETO, C.; LOUREIRO, M. R. B.; NAKAYAMA, H. T. O Projeto Umbral: uma proposta para o ensino da química. **Química Nova**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 95, 1984.

FONSECA, M. V. A.; COSTA-NETO, C.; NASCIMENTO, R. S. V; SANTOS, O. S. Xisto retortado: estudos fundamentais com vistas a seu aproveitamento:parte 3. **Boletim Técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 4, p. 259-265, 1989c.

FONSECA, M. V. A.; COSTA-NETO, C.; SANTOS, O. S; NASCIMENTO, R. S. V. Xisto retortado: estudos fundamentais com vistas a seu aproveitamento: parte 1. **Boletim Técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 1/2, p. 35-39, 1989a.

FONSECA, M. V. A.; COSTA-NETO, C.; SANTOS O. S; NASCIMENTO, R. S. V. Xisto retortado: estudos fundamentais com vistas a seu aproveitamento: parte 2. **Boletim Técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 3, p. 163-173, 1989b.

PROJETO XISTOQUÍMICA. **Bibliografia de xistos oleígenos brasileiros**. Rio de Janeiro: Pólo de Xistoquímica-UFRJ, 1988. 214 p.

VIEIRA, V. N. Histórico do processo de industrialização do xisto. In: RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO DE XISTO, 1., 2005, São Mateus do Sul. **Apresentações e informações gerais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. 1 CD-ROM.

Parte 1

Potencialidade dos subprodutos da mineração na agricultura

Capítulo 2

Agricultura no contexto da recuperação de áreas mineradas

Clenio Nailto Pillon
Adalberto Koiti Miura
José Maria Filippini Alba

Introdução

As tensões econômicas e ambientais dos últimos anos provocaram uma reavaliação dos processos produtivos, por parte do setor industrial e da sociedade organizada, na tentativa de otimizar os balanços de massa e energia, minimizando-se os riscos à qualidade ambiental e a geração de resíduos, criando novas frentes para a reciclagem de materiais e agregando valor às cadeias produtivas. Dessa forma, a agricultura beneficiar-se-ia com novos insumos, derivados do setor mineral ou energético, que podem ser utilizados como corretivos agrícolas, fertilizantes ou pesticidas, reduzindo-se a dependência com produtos importados.

A recuperação de áreas degradadas por mineração é uma atividade multidisciplinar, em franca expansão no Brasil (SIMPÓSIO, 1994), regida pela Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988, Art. 225): "Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei".

O processo de mineração envolve a movimentação de grandes volumes de materiais, pois o minério de interesse encontra-se geralmente no subsolo, sendo necessário remover a camada superior, denominada estéril, por não ser de interesse sob ponto de vista da exploração mineral. Paralelamente, no processo extrativo são gerados resíduos, que podem ser dispostos in situ pelo processo de recuperação adotado, levando-se em consideração os cuidados necessários para o restabelecimento da harmonia paisagística e o recondicionamento do equilíbrio químico e ecológico com o ambiente. Várias empresas brasileiras do setor mineral conferem essa situação (WORKSHOP, 2005).

Assim, existe um elo de interação entre agricultura e mineração, pois a última poderá fornecer materiais, sejam rejeitos ou subprodutos derivados do processo, cuja abundância e composição química, como a presença de carbonatos, fosfatos, micronutrientes ou compostos orgânicos,

pressupõem uso potencial na formulação de fertilizantes, corretivos de acidez, condicionadores de solo ou ainda como "farinhas de rocha" (BARRETO, 1998).

A utilização agronômica desses subprodutos do processo de mineração pressupõe o cumprimento de pelo menos cinco etapas. A primeira enfatiza a **caracterização química**, quantitativa e qualitativa, a caracterização mineralógica e microbiológica. Essa fase é fundamental para o conhecimento e compreensão da dinâmica dos processos de interação de elementos químicos considerados nutrientes e substâncias potencialmente prejudiciais ao ambiente. A segunda etapa consiste em efetuar a **análise de risco à segurança ambiental e alimentar** relativa ao uso contínuo dos subprodutos em agroecossistemas, baseando-se na aplicação de metodologias de análise de risco, como o cálculo do Número de Anos para atingir o Nível de Alerta (NANA) de determinado elemento químico ao solo ou água superficial ou subterrânea. A definição da dose de segurança ambiental ao uso agrícola de determinado subproduto ao solo também poderá ser obtida, confrontando-se a carga anual máxima de um elemento a ser aplicada ao solo (USEPA, 1999) e a composição química do subproduto. Tanto a caracterização química como a análise de risco à segurança ambiental e alimentar dos subprodutos minerais de interesse agronômico constituem etapas intermediárias para a obtenção do **licenciamento ambiental para uso agrícola** junto ao órgão ambiental estadual sede do empreendimento de mineração, o que representa a terceira etapa. O licenciamento ambiental para uso agrícola, juntamente ao conjunto de estudos de avaliação de eficiência agronômica em diferentes culturas e ambientes, constitui-se em condições básicas para a obtenção do **registro de novos insumos/matérias-primas** no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, caracterizando-se na quarta etapa. Por fim, como última, das cinco etapas, temos **a comercialização de novos insumos**.

Nesse contexto a eficiência agronômica, os riscos ambientais e a segurança alimentar encontram-se entrelaçadas de maneira estreita, derivando em outros temas, como a geologia médica, que analisa

problemas ambientais relacionados à geologia, de maneira independente da participação do homem. Assim, a seguir, esses temas são discutidos, iniciando pelo estudo de caso do aproveitamento de subprodutos de mineração do xisto. Neste estudo, serão consideradas estratégias da estrutura temática e das fases do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Projeto Xisto Agrícola, cujo foco é o desenvolvimento de novos insumos agrícolas a partir dos subprodutos da mineração e processamento do xisto.

Processamento dos subprodutos do xisto e eficiência agronômica

A Petrobras, por meio da sua Unidade de Negócio e Industrialização do Xisto, possui uma planta de extração de óleo, enxofre, nafta e outros derivados a partir da mineração e pirólise de um folhelho betuminoso (xisto), uma rocha de origem sedimentar formada há 250 milhões de anos. A rocha foi formada pela consolidação e deposição de sedimentos de origem marinha, especialmente algas e animais marinhos, incluindo fósseis de mesossauros, comuns naquela época. Essa rocha ocorre desde o cerrado, com afloramentos nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e no Uruguai.

O alto teor de compostos orgânicos (8% a 12% de carbono orgânico) presentes no xisto possibilita a Petrobras sua exploração para produção de óleo e outros subprodutos industriais em São Mateus do Sul, PR. O processo Petrosix adotado pela Petrobras é o mais eficiente para a extração de óleo de xisto no mundo. A rocha é minerada a céu aberto, britada e pirólisada a 200 ºC a 500 °C em atmosfera inerte. Nesse processo, os compostos orgânicos são vaporizados, seguindo-se a separação de diversos hidrocarbonetos, água de xisto e enxofre. Após a passagem pela retorta, o xisto retortado retorna para a área de mineração, recompondo-se a paisagem original por meio de um processo de reabilitação das áreas de mineração.

Pela sua origem orgânica e composição química, a água de xisto, o calxisto, os finos de xisto e o xisto retortado apresentam potencialidades

para serem utilizados como matéria-prima para a formulação de insumos voltados à produção de base agroecológica. Dentre os elementos químicos presentes, destacam-se o **Ca**, **Mg**, **Si**, **S**, **Cu**, **Zn**, **Mn** e outros micronutrientes e elementos traço de interesse agronômico.

A Embrapa Clima Temperado, em parceria com a Petrobras, está desenvolvendo ações de pesquisa e desenvolvimento na obtenção de novos insumos para a agricultura, usando os subprodutos do processamento do xisto como matéria-prima, adotando como principal nicho de mercado sistemas de produção integrada de frutas e grãos e a agricultura de base agroecológica. Os principais eixos temáticos do programa são: (a) caracterização ambiental das áreas de mineração e das áreas experimentais, com ênfase na identificação de bioindicadores de qualidade ambiental; (b) caracterização química, mineralógica e microbiológica dos subprodutos do processamento do xisto; (c) formulação de novos produtos e processos à base de xisto; (d) avaliação da eficiência agronômica, da segurança ambiental e alimentar do uso desses novos insumos na agropecuária brasileira; (e) análise de viabilidade econômica e social; (f) difusão e transferência de tecnologias ao público-alvo. Para ambas instituições, o Projeto Xisto Agrícola representa o marco inicial para um novo negócio e a possibilidade de identificar novas rotas tecnológicas para a produção de insumos para a agricultura brasileira.

O programa de pesquisa foi concebido visualizando-se três fases. A fase I, novembro/2004 a dezembro/2005, tinha como principais objetivos efetuar a caracterização ambiental das áreas de mineração e das áreas experimentais e a caracterização química qualitativa e quantitativa dos subprodutos do processamento do xisto, assim como, efetuar a análise de risco à segurança ambiental e alimentar do uso dos subprodutos do xisto na agricultura; identificar e proceder a formulação de novos produtos; e avaliar a eficiência agronômica desses novos insumos para uso em diferentes culturas, solos e regiões do País.

A fase II iniciou-se em janeiro de 2006, com duração prevista de dois anos, sendo que as atividades estão concentradas na proposição

e desenvolvimento de novos produtos fertilizantes sólidos e líquidos e fitoprotetores, e na avaliação da eficiência agronômica, segurança ambiental e alimentar, tanto em experimentos em condição controlada quanto a campo. A fase III contempla o registro de produtos, a instalação de plantas para a produção de fertilizantes e a comercialização dos novos insumos.

Em áreas experimentais a campo, mais de duzentos tratamentos, incluindo formulações de fertilizantes e biofertilizantes sólidos e líquidos à base de xisto e fitoprotetores estão em avaliação de sua eficiência agronômica, segurança ambiental e alimentar em diversas culturas (arroz, soja, milho, feijão, mamona, batata, tomate, alface, sete espécies de frutas, dentre outras) e tipos de solos.

Nesses ensaios de avaliação da eficiência agronômica, formulações baseadas em um ou mais subprodutos da mineração ou processamento do xisto, isolados ou em combinação a outras matérias-primas com potencial fertilizante ou de fitoproteção, são avaliadas comparativamente a uma testemunha absoluta e a uma formulação comercial. Diversos indicadores de eficiência agronômica (rendimento de grãos, frutos ou órgãos de colheita, absorção de elementos nutrientes e elementos-traço pelas plantas-alvo, incidência de doenças, dentre outros), qualidade ambiental e segurança alimentar são monitorados ao longo dos ciclos de avaliação.

A dependência da agropecuária brasileira aos insumos químicos importados representa riscos à sustentabilidade do País. Novas rotas para os insumos precisam ser desenvolvidas e novos insumos criados. A demanda da sociedade por formatos tecnológicos de produção de base agroecológica, que garantam a segurança alimentar, ambiental, a quantidade e a qualidade dos alimentos produzidos, representa uma tendência dos consumidores de todo o planeta. A elevada disponibilidade de subprodutos do xisto em diversos países importantes, como a China, as novas exigências do mercado por produtos mais limpos com qualidade e quantidade e a composição química do xisto podem representar um novo marco para a competitividade e sustentabilidade da agropecuária brasileira.

Qualidade ambiental

A estratégia adotada por vários países em relação à qualidade ambiental é fixar teores de referência para o conteúdo de substâncias potencialmente prejudiciais para o ar, água, efluentes, solos e fertilizantes (ALLOWAY, 1995; CAIRNEY, 1993; KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 1984; SILVA; PRUSKI, 1997; SMITH, 1999), levando-se em consideração os riscos para a saúde pública e a biota. No contexto legal brasileiro, a Resolução 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), de 17 de março de 2005, estabelece valores de referência para as substâncias potencialmente prejudiciais, como cianetos, fenóis, organoclorados, metais pesados e outros, em águas continentais e efluentes. O Estado de São Paulo estabeleceu valores orientadores para solos e águas subterrâneas, classificando os limiares para solos segundo seus usos agrícola, residencial ou industrial (CASARINI, et al., 2001).

As leis brasileiras estão em estágio prematuro em relação a fertilizantes e biossólidos. Em junho de 2006, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) publicou a Instrução Normativa 27, que estabelece limites máximos de contaminantes orgânicos e inorgânicos para substratos e fertilizantes. Entretanto, diversos compostos orgânicos e inorgânicos presentes em muitos subprodutos industriais, agrícolas ou de mineração ainda carecem de estudos básicos para definição de seus limites máximos em insumos para uso agrícola.

Baudo et al. (1990) consideraram a utilização de teores de fundo, isto é, valores médios classificados segundo domínios homogêneos, do ponto de vista geológico ou ambiental, como método de determinação de limiares indicativos de contaminação em sedimentos continentais. Tarvainen (1996) usou as bases de dados geoquímicos da Finlândia para avaliar o grau de contaminação por elementos-traço e destacou a importância de indicar aqueles setores onde vários elementos ocorrem acima dos valores de referência de maneira simultânea, em função da possibilidade de efeitos sinérgicos.

Um elemento-traço pode ocorrer no solo sobre diferentes arranjos atômico-moleculares, variando seu estado de oxidação, formando comple-

xos orgânicos ou inorgânicos (THORNTON, 1983). Essa propriedade afeta a maneira como os elementos-traço se mobilizam no ambiente e como são absorvidos pelos seres vivos, origem da expressão "biodisponibilidade". Destaca-se que o mecanismo de absorção dos elementos-traço pelas plantas não é bem entendido ainda. Por exemplo, o **Cu** no solo pode ocorrer nas frações mineral ou orgânica, porém, somente a última está disponível para as plantas (THORNTON, 1983). Progressos nesse sentido foram obtidos por meio do uso de extrações seletivas com reagentes moderados e específicos, como **CH_3COOH**, EDTA (ácido etilenodiamino tetracético) e **HCl**.

Cunha (2003) avaliou a biodisponibilidade do **Pb** em 14 amostras de solos e rochas mineralizadas no Vale do Ribeira, SP, por meio de três ensaios (extração com água, extração com EDTA e um teste de toxicidade), indicando que: a) a concentração total de **Pb** nos solos variou entre 117 mg/Kg e 916 mg/Kg nas proximidades de uma planta de beneficiamento; b) a extração com água foi ínfima, mas o EDTA extraiu 21% a 83% do **Pb** do solo; c) sete das amostras de solo foram classificadas como de alta toxicidade; d) a biodisponibilidade do **Pb** e seu caráter tóxico dependeram do pH e do teor de matéria orgânica; e) as amostras de solos não tóxicas apresentaram teor total de **Pb** inferior a 343 ppm e, no caso das amostras tóxicas, o teor de **Pb** foi sempre superior a 293 ppm.

Segurança alimentar

A Organização Mundial da Saúde (OMS) realizou estudos sobre a essencialidade dos elementos-traço na dieta humana por meio de um Comitê de Especialistas, sendo recomendadas variações de ingestão para diferentes grupos populacionais em função da quantidade de elementos-traço que constituíam as dietas (OMS, 1998). No relatório de 1973, foi enfatizada a toxicidade de **Cd**, **Hg** e **Pb**, assim como a necessidade de obter informações confiáveis a respeito do conteúdo de elementos-traço em alimentos e de monitorar sua variabilidade, considerando futuras mudanças nas práticas agrícolas e industriais, envolvendo o desenvolvimento de centros internacionais de pesquisa e de laboratórios de referência analítica.

O referido relatório significou um avanço em relação à importância dos elementos-traço, tanto na nutrição quanto na saúde humana. Por exemplo: a) o aprimoramento das técnicas analíticas conduziu à revisão de dados pretéritos sobre os elementos-traço presentes nos alimentos, em tecidos e fluídos humanos; b) atualmente, muitos alimentos processados são enriquecidos com elementos-traço considerados essenciais, tais como **Cu**, **I**, **Fe** e **Zn**; c) a comunidade científica internacional reconhece hoje que os elementos-traço podem se tornar limitantes não apenas em decorrência das deficiências ambientais, mas também por desequilíbrio das dietas, que no passado foram aceitas como adequadas.

Ademais, nos anos que precederam o relatório, foi constatado que a deficiência de **I** e as suas consequências patológicas têm sido seriamente subestimadas, já que alguns milhões de pessoas em mais de 100 países perigam apresentar distúrbios pela deficiência do elemento. Durante o mesmo período, a descoberta do papel central do **Se** na etiologia da doença de Keshan na China (DARNLEY et al., 1995) estimulou imensamente as pesquisas sobre a necessidade e o metabolismo do **Se** na alimentação humana. Progressos imensos têm sido obtidos na compreensão dos fatores químicos e fisiológicos que interferem na biodisponibilidade dos elementos-traço, enfatizando, dessa forma, que as interações podem ter uma profunda influência sobre a interpretação de dados da ingestão de alguns elementos-traço.

Em 1988, a OMS, juntamente com a Organização de Alimentos e Agricultura das Nações Unidas (FAO), encomendou um novo relatório. Alguns novos conceitos foram incluídos, por exemplo, um elemento-traço, para ser considerado significativo do ponto de vista nutricional, deve ter uma interferência essencial nos processos fisiológicos ou ter potencial de toxicidade quando presente em concentrações baixas (o termo *traço* é aplicado quando o elemento não excede 250 mg/g de matriz) em tecidos, alimentos ou água potável. Dessa forma, um elemento é considerado *essencial* quando a sua concentração, a partir de um certo limite, resulta na redução de uma função fisiologicamente importante ou quando tal

elemento é parte integrante de uma estrutura orgânica que desempenha uma função vital no organismo.

Por isso, quando o Conselho de Especialistas considerou a resistência à cárie dentária uma função fisiologicamente importante, o **F** foi considerado como elemento essencial. Nesse sentido, desde que a enzima glutationa peroxidase foi considerada uma estrutura de função vital, o **Se**, um dos seus constituintes, também foi considerado como essencial, no entanto, sua deficiência em humanos não tem sido demonstrada. Os elementos-traço foram classificados em três grupos, segundo sua importância nutricional em humanos: a) elementos essenciais: **Cr**, **Cu**, **I**, **Mo**, **Se** e **Zn**; b) elementos provavelmente essenciais: **B**, **Mn**, **Ni**, **Si** e **V**; c) elementos potencialmente tóxicos, alguns dos quais podem, todavia, ter algumas funções essenciais em baixos níveis: **Al**, **As**, **Cd**, **F**, **Li**, **Hg**, **Pb** e **Sn**.

Diversas substâncias orgânicas também podem resultar como prejudiciais para os seres vivos. Clark (1986) indica, para o ambiente marinho, os compostos halogenados e os óleos. Os cianetos são compostos de transição entre o mundo orgânico e mineral que podem ser produzidos pelas plantas no processo conhecido como cianogênese (CONN, 1980), mas também são usados pela indústria metalúrgica para extração de metais, considerando seu poder complexante (RITCEY, 1989). Diversos alimentos de origem vegetal possuem cianetos, que são eliminados parcialmente durante o cozimento, sendo bem conhecido o caso da mandioca (ORTEGA FLORES, 1991).

Geologia médica

Låg (1983) introduziu a expressão "Geomedicina" para denominar a ciência que estuda a influência dos fatores ambientais na distribuição geográfica dos problemas patológicos e nutricionais em saúde animal e humana. Foi mencionado um antigo caso de patologia óssea em bovinos na Noruega, atribuída à ocorrência de rochas empobrecidas em fósforo, refletindo a deficiência em solos e pastagens. Também foram citados solos

contaminados com metais pesados (**Cu**, **Pb**...) e deficiência de **Se** em plantas e animais na Finlândia, um dos primeiros países do mundo que autorizou a adição de **Se** em forragens.

O termo Geologia Médica surgiu na década de 90 e é considerado hoje como um ramo da Geomedicina, direcionada para o estudo da influência de fatores geológicos sobre a biota e a saúde humana (WORKSHOP, 2003). Paoliello (2002) estudou a exposição ao **Pb** no Vale do Ribeira, SP, o maior produtor brasileiro do metal no século passado, considerando o conteúdo do metal em sangue humano como indicador. Na mesma região ocorre uma anomalia natural de **As** em solos, sendo estudada sua influência sobre populações autóctones, considerando-se o conteúdo do elemento em urina humana como indicador (SAKUMA, 2004). Em relação ao **As**, existe um problema de contaminação global relacionado ao consumo de água com teores acima de 50 mg/L ou à queima de carvões minerais ricos no elemento (NG et al., 2003).

Goldschmidt (1958), reconhecido como um dos precursores da geoquímica, visualizou as potencialidades da disciplina, não somente para prospecção, como foi constatado posteriormente (BEUS; GRIGORIAM, 1977; ROSE et al., 1979), mas também associada às formas de vida. Essa relação é estabelecida por meio dos processos que ligam a litosfera, a pedosfera, a hidrosfera, a biosfera e a atmosfera, e reflete-se em diversos fatos ligados aos elementos que constituem a crosta terrestre: a) as necessidades de **P**, **K**, **Ca** e **Mg** do solo para uso agrícola, que são bem entendidas e projetadas na atualidade; b) as propriedades curativas de alguns elementos, por exemplo, existem registros de que na Antiguidade já eram usados produtos marinhos, ricos em **I**, para a cura do bócio; c) a ocorrência de doenças ou lesões em seres tratados com elementos específicos durante períodos prolongados ou que foram contaminados com produtos industriais, d) a observação de efeitos específicos em populações de seres vivos relacionados a padrões geoquímicos característicos. A ocorrência de solos contaminados por **Ni**, **Mo** ou **Se**, em virtude da presença de rochas enriquecidas com esses elementos,

ou por **As**, **Cd**, **Cu**, **Pb** e **Zn** associados a mineralizações que derivaram em níveis tóxicos em produtos agrícolas ou doenças em bovinos, foi constatada na Grã-Bretanha (BOWIE; THORNTON, 1985; THORNTON, 1983).

Adriano (1986) indica o caráter essencial ou tóxico de 30 elementos-traço, em relação às plantas, animais experimentais ou de criação e ao homem, sendo possível estabelecer o seguinte: a) os elementos mais abundantes na crosta terrestre (**C**, **H**, **O**, **N**, **P**, **K**, **Na**, **Ca** e **Mg**) não foram incluídos, em função do seu caráter de macronutrientes; b) alguns elementos apresentam caráter dual (**As**, **Co**, **Cr**, **Cu**, **F**, **Hg**, **Mn**, **Ni**, **Pb**, **Sb**, **Sn**, **Ti** e **Tl**), dependendo da concentração ou das propriedades químicas. Por exemplo, o $\mathbf{Cr^{+6}}$ é altamente tóxico, mas o $\mathbf{Cr^{+3}}$ não. A fitotoxicidade do **Mn** confere-se para pH inferior a cinco; c) os elementos **As**, **Be**, **Cd**, **Co**, **Cr**, **Ni**, **Ti** e **V** são indicados como possíveis cancerígenos; d) os elementos **Au**, **Br** e **Li** têm sido usados em tratamentos terapêuticos.

Existem quatro casos bem registrados de relação causal da saúde humana com a abundância de traços no ambiente circundante (THORNTON, 1983): a) populações com solos deficientes em **I** mostram uma alta frequência de bócio, fato resolvido pela adição de **NaI** no sal de mesa; b) teores adequados de **F** na água de consumo reduzem a incidência de cárie dentária, porém, são provocadas doenças bucais (fluorose) para teores elevados do elemento; c) a doença de Keshan na China, previamente citada, relacionada ao **Se**; d) quase a totalidade das pessoas que beberam água de poços contaminados com **As** em Taiwan desenvolveram sinais de toxicidade ou formas de câncer. Casos semelhantes para **I** e **F** na Escandinávia foram confirmados por Låg (1983, 1991). Tarvainen (1996) menciona diversos casos na Finlândia, que foram diagnosticados por meio de geoquímica e relacionados à acidez dos solos, contaminação por metais (**Co**, **Cr**, **Cu**, **Ni**, **V** e **Zn**) ou qualidade das águas superficiais ou subterrâneas.

Shacklette et al. (1970) estudaram a influência da geoquímica na velocidade de mortalidade por doenças cardíacas no Estado de Geórgia, EUA. Foram coletadas amostras de solos, hortaliças e árvores em condados com

alta e baixa velocidade de mortalidade por doenças cardíacas. Os autores concluíram que as diferenças nos índices de mortalidade seriam devidas a deficiências de elementos essenciais e não à existência de elementos tóxicos.

Considerações finais

A recuperação de áreas degradadas é uma atividade que precisa do suporte da pesquisa pura e aplicada para validar as operações de campo, relativas à acomodação dos materiais; à evolução da vegetação; à recuperação do equilíbrio físico-químico e biológico; à proteção da natureza e à adequação de possíveis passivos ambientais; e também ao destino que será dado às áreas recuperadas. Caso se opte pelo uso agropecuário, a possibilidade de toxicidade crônica deverá ser criteriosamente analisada. Um enfoque semelhante, em menor escala, poderá ser considerado para derivados da indústria mineral a serem aplicados na agricultura.

As informações compiladas mostram situações inesperadas de contaminação, como no caso da contaminação global com **As** (NG et al., 2003)**,** onde os problemas surgiram em função da ruptura do equilíbrio natural pelo uso do recurso ou por uma mistura de fatores ambientais e culturais. Nessas situações, não existe um recurso mineral sendo explorado em escala industrial, mas rochas altamente enriquecidas com o elemento em condições geológicas específicas originaram o problema.

Observa-se que as relações causais geoquímico-biológicas e as preocupações com os elementos-traço na alimentação humana são de longa data. Um comentário significativo nesse sentido foi formulado por Schroeder (1965, citado por THORNTON, 1983):

> The trace elements are more important to life than vitamins, (because) they cannot be synthesized, as can the vitamins, but must be present in the environment within a relatively narrow range of concentration [...]. Their only sources are the earth's crust and sea water, and without them life would cease to exist. (SCHROEDER, 1965, citado por THORTON, 1983, p. 267).

A utilização de valores de referência para o conteúdo de substâncias potencialmente prejudiciais no ar, em águas, solos, efluentes e fertilizantes significa, sem dúvida, uma atenuação dos impactos ambientais, reduzindo os riscos à saúde humana e à biota. No entanto, será necessário avançar nas pesquisas sobre biodisponibilidade e especiação, de maneira que, por meio do entendimento desses processos, seja possível aprimorar as regulamentações vigentes. O sistema legal da Holanda é um dos poucos que considera o conteúdo de matéria orgânica e de argilominerais no solo para efetuar o cálculo dos correspondentes valores de referência para elementos-traço (CAIRNEY, 1993). Elementos-traço ligam-se à matéria orgânica, modificando suas propriedades químicas. Por exemplo, no caso da metilação, os metais são biodisponibilizados (SCHNOOR, 1996).

O estudo da especiação dos elementos-traço nos solos é complicado em função da variedade de compostos orgânicos e minerais existentes e do número de oxidação do cátion central, o que deriva em uma grande diversidade de arranjos em escala molecular. Com isso,torna-se necessária a utilização de procedimentos analíticos sofisticados, que combinam cromatografia em coluna, espectrometria de plasma induzido ou espectrometria de massas (SKOOG; LEARY, 1994). A aplicação desses procedimentos é restrita por causa do custo. Como alternativas economicamente viáveis, surgem os métodos de extração seletiva (CARTER, 1993), os testes ecotoxicológicos (KNIE; LOPES, 2004) e os biossensores (SUGIMOTO, 2003).

Referências

ALLOWAY, B. **Heavy metals in soils**. London, UK: Chapman & Hall, 1995. 368 p.

BARRETO, S. B. **A farinha de rochas MB-4 e o solo**. 1998. Disponível em: <http://www.mibasa.com.br/livro_farinha.htm>. Acesso em: 5 out. 2006.

BAUDO, R.; GIESY, J.; MUNTAU, H. **Sediments**: chemistry and toxicity of in-place pollutans. Ann Arbor: Lewis, 1990. 405 p.

BEUS, A.; GRIGORIAN, S. **Geochemical exploration methods for chemical deposits**. Wilmette: Applied, 1977. 287 p.

BOWIE, S.; THORNTON, I. **Environmental geochemistry and health**. Dordrecht: Reidel, 1985. 140 p.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF, 1988a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constitui%C3%A7ao.htm>. Acesso em: 20 nov. 2009.

CAIRNEY, T. **Contaminated Land**. London, UK: Blackie, 1993. 351 p.

CARTER, M. R. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. 920 p.

CASARINI, D.; DIAS, C.; LEMOS, M. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e água subterrânea no Estado de São Paulo**. São Paulo: Cetesb, 2001. 247 p.

CLARK, R. **Marine Pollution**. Oxford: University Press, 1986. 172 p.

CONN, E. E. Cyanogenic compounds. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 31, p. 433-451, 1980.

CUNHA, F. G. **Contaminação humana e ambiental por chumbo no Vale do Ribeira, nos Estados de São Paulo e Paraná, Brasil**. 2003. 109 f. Tese (Doutorado em Geociências)– Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

DARNLEY, A.; BJÖRKLUND, A. J.; BÖLVIKEN, B.; GUSTAVSSON, N.; KOVAL, P. V.; PLANT, J. A.; STEENFELT, A.; TAUCHID, M.; XUEJING, X. **A global database geoochemical for environmental and resource management**: recommendations for international geochemical mapping: final report of IGCP Project 259. Paris, FR: Unesco, 1995. 122 p. (Earth sciences, 19).

GOLDSCHMIDT, V. **Geochemistry**. Oxford: Clarendon Press, 1958. 730 p.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 1984. 365 p.

KNIE, J. L. W.; LOPES, E. W. B. **Testes ecotoxicológicos**: métodos, técnicas e aplicações. Florianópolis: Fatma-GTZ, 2004. 289 p.

LÃG, J. Geomedicine in scondinaria. In: THORNTON, I. **Applied environmental geochemistry**, London, UK: Academic Press. 1983. p. 335-353.

LÃG, J. Geomedical aspects of geochemical environments. In: PULKKINEN, E. (Ed.) **Environmental geochemistry in Notlen Europe**. Espoo: Geological Survey of Finland, 1991. p. 271-276. (Special Paper, 9)

NG, J.; WANG, J.; SHRAIM, A. A global helth problem caused by arsenic from natural sources. **Chemosphere**, Amsterdam, NL, v. 52, p. 1353-1359, 2003.

OMS. Organização Mundial de Saúde. **Elementos traço na nutrição e saúde humanas**. São Paulo: Roca, 1998. 297 p.

ORTEGA-FLORES, C. I. **Carotenóides com atividade pró-vitamínica A e teores de cianeto em diferentes cultivares de mandioca**. 1991. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

PAOLIELLO, M. B. **Exposição humana ao chumbo em áreas de mineração, Vale do Ribeira, Brasil**. 2002. 239 f. Tese (Doutorado em Ciências da Saúde) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RITCEY, G. **Tailings management**. Amsterdam, NL: Elsevier, 1989. 970 p.

ROSE, A.; HAWKES, H.; WEBB, J. **Geochemistry in mineral exploration**. New York: Academic Press, 1979. 657 p.

SAKUMA, A. M. **Avaliação da exposição humana ao arsênio no alto vale do Ribeira, Brasil**. 2004. 161 f. Tese (Doutorado em Ciências da Saúde) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SCHNOOR, J. L. **Environmental modeling**: fate and transport of pollutants in water, air and soil. New York: J. Wiley, 1996. 682 p.

SHACKLETTE, H.; SAUER, H.; MIESH, A**. Geochemical environments and cardiovascular mortality rates in Giorgia**. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 1970. 39 p. (U.S. Geological Survey. Profissional Paper, 574-C).

SILVA, D. D. da; PRUSKI, F. F. (Ed.). **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Viçosa: UFV-Departamento de Engenharia Florestal, 1997. 252 p.

SIMPÓSIO SUL-AMERICANO, 1.; SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 2., 1994, Foz de Iguaçu. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 1994. 679 p.

SKOOG, D. A.; LEARY, J. J. **Analisis instrumental**. Madrid: McGraw-Hill, 1994. 935 p.

SMITH, R. **Handbook of environmental analysis**. New York: Genium, 1999. 517 p.

SUGIMOTO, L. Biossensores: de tão simples e baratos, as pessoas desconfiam. **Jornal da Unicamp**, Campinas, p. 12, out. 2003.

TARVAINEN, T. **Environmental applications of geochemical databases in Finland**. Espoo: Geological Survey of Finland, 1996. 75 p.

THORNTON, I. **Applied environmental geochemistry**. London, UK: Academic Press, 1983. 501 p.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Background report for fertilizers use, contamination and regulagions**. Washington, DC: Battelle Usepa, 1999. (EPA 747-R-98-003).

WORKSHOP MEDICAL GEOLOGY, METALS, HEALTH AND THE ENVIRONMENT, 2003. Campinas. **Palestras...** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2003. 1 CD-ROM.

WORKSHOP DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO DE XISTO, 2005. São Mateus do Sul. **Palestras...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. 1 CD-ROM.

Parte 1

Potencialidade dos subprodutos da mineração na agricultura

Capítulo 3

Lições das rochas
A energia suprema

Sebastião Pinheiro

Introdução

Subitamente descobriu-se nas rochas, particularmente quando moídas ("farinhas de rocha"), a "energia até então desconhecida" (HENSEL, 1898, citado por PINHEIRO, 2003). Estranho, elas ficaram ignoradas por mais de 110 anos e agora são o ícone mais importante e revolucionário da agricultura *sustentável* em todo o planeta. Qual é o enigma?

Essa nova prática, agora conhecida a partir dos cientistas chineses, causa estupefação e impacto no Ocidente pelos seus resultados. Em respeito à memória e sabedoria dos antigos, não desejamos perder o referencial, ou que seu "consumismo" e mercantilização ofusquem valores importantes da humanidade, transformando-os em "moda" ou em fenômeno de diversão e alienação. Para se entender o que ficou 110 anos escondido e que agora os chineses nos trazem como farinhas de rocha, quando muda a matriz tecnológica, cosmeticamente disfarçada e se mantém ampliado o status quo, deparei-me observando, em estágio sublimado (invisível), uma sala de aula em uma escola.

A segunda lição

A pergunta tomou a todos os alunos de surpresa: *Qual a grande questão resolvida pelo homem primitivo que lhe permitiu transformar-se em agricultor?*

Os jovens se entreolharam, como se recebessem uma provocação, na lista dos nove livros de leitura obrigatória, os temas abordados: Eras Geológicas; Climas da Terra; Pré-História; Trilhas dos Grandes Animais; Astronomia e Astrologia; mas nenhum deles tratava de agricultura ou agricultores. Para quê a provocação?

O professor satisfeito com a reação continuou sua intervenção:*Vocês leram e discutiram os textos, mas não encontraram o contexto de nossa questão no interior do mesmo. Saibam que as questões mais complexas geralmente*

estão escondidas de seu contexto à percepção da grande parte, e esta é uma das formas de transformar a sabedoria em conhecimento. Sabedoria que se consolida no empírico, que, diferente das teorias, não é contraditada, apenas melhor aproximada, com mais precisão no tempo-espaço.

Ele possuía um suave acento castelhano. *Não podemos perder nosso referencial que é a sabedoria que está dentro, disseminada no povo e como tal tem poder difuso. O conhecimento se concentra e serve ao poder religioso, militar, mercantil e das oligarquias. É a sabedoria do povo que transforma as resoluções das questões em enigmas. Todos aqui sabem que um enigma necessita de interpretação para poder ser entendido ou decifrado.*

Voltemos então ao contexto da pergunta: Qual o enigma decifrado que permite que o homem deixe de ser nômade, ou seja, não precise seguir os animais em suas rotas migratórias? O professor, primaz pelo sarcasmo, provocou*: O homem nômade era totalmente dependente da física.* Novamente os jovens se entreolharam contrafeitos. Mas, o professor, satisfeito, retomou*: Pensem, pensem, não permitam que a ignorância aflore e não esqueçam que, em grego, física significa NATUREZA*.

É na física das rotas migratórias que estavam os alimentos dos animais e, por conseguinte, o alimento dos nômades, ambos dependentes dela desde as glaciações, até a última, dez mil anos atrás, quando nasce a agricultura: a primeira grande revolução da humanidade. Agora, vocês já sabem o que significa física e me devem a resposta. O que decodificou o homem para ser agricultor e lutar pela terra para produzir seus alimentos?

Os alunos despertaram com a última frase, mas não atinavam uma resposta. E o professor continuou: *Os animais migram conforme a mudança das estações do clima para conseguir sua energia, alimentos*. Aguardou e nada.

O código decifrado pela humanidade está nos céus, no ar, nos ventos, nas estrelas no comportamento dos animais: é o código das estações climáticas; depois das flores, frutos, depois dos frutos caem as folhas e voltam as flores e isso é um ciclo. Um ciclo se repete, isso é fácil perceber, mas, para

se ter a intervenção, é necessário um instrumento para registrar a memória das estações do ano, com precisão e segurança da sabedoria. A necessidade de energia (alimento) levou o homem a criar o maior de todos os instrumentos da civilização, o CALENDÁRIO. Ele permite que se possa calcular com exatidão e segurança as condições para produzir alimentos, domesticando as plantas e animais, pois teme os fenômenos que dificultam a produção de alimentos: secas, enchentes, frio, calor. O calendário permite garantir as safras. Sem exatidão há fome e morte que trazem a desorganização. A fome desestrutura... Todas as civilizações antigas construíram seus calendários, alguns tão precisos que causam elucubrações místicas ainda em nossos dias. O trabalho de casa será para todos, independente de grupos ou brigadas: perguntem aos bisavôs e bisavós ou anciãos com mais de oitenta anos qual a importância da influência da Lua para o corte das árvores, plantio de sementes e tratamento dos animais..... A campainha soou e ele se despediu, displicente "*hasta el viernes mi gente*".

A terceira lição

Os jovens estavam frenéticos, se mexiam e a professora estava sentada na primeira fila. No quadro-negro: *PRIMEIRA VIAGEM DE COLOMBO À AMÉRICA*

Data de saída do Puerto de Palos: 3 de agosto de 1492.

Tripulação: 90 marinheiros.

Logística diária por marinheiro: 3 litros de água, 50 gramas de lenha, 100 gramas de grão-de-bico, 100 gramas de lentilhas e favas, 500 gramas de farinha de trigo, 100 gramas de bacalhau, 250 gramas de carne-seca, 20 gramas de azeite de oliva, 500 gramas de vinho e licor, 200 gramas de legumes, verduras e condimento seco ou em conserva, 5 gramas de plantas medicinais, tinturas e similares, 5 gramas de azeite para iluminação, 30 quilos de ferramentas (manutenção e conserto das caravelas) e 10 quilos de roupas.

Do seu assento privilegiado, a mestra corrigia: *Em que dia eles chegaram à América, e não esqueçam que a viagem é de ida e volta e deve*

levar em consideração uma reserva estratégica, pois os cálculos de Colombo prognosticavam que esta seria a viagem de ida a Cipango.

Novamente alvoroço e frenesi entre os alunos: *Entre 3 de agosto e 12 de outubro são 71 dias e multiplicado por dois são 142, mais uma estadia de 21 dias para recuperação totalizam 163 dias*. Uma jovem, que parecia a líder do grupo, ditava energicamente: *Água 163 x 3 litros dá..... multiplicado por noventa marinheiros, totaliza: 44.010 litros de água, 723,5 quilos de lenha, 1.467 quilos de grão-de-bico; 1.467 quilos de lentilhas, 7.235 quilos de farinha de trigo, 1.467 quilos de bacalhau, 366,8 quilos carne seca; 146,7 quilos de azeite de oliva; 7.235 quilos de vinho e licor; 2.934 quilos legumes, verduras e condimentos secos, 72,35 quilos de plantas medicinais, tinturas e similares, 72,4 quilos de azeite para iluminação, 44.010 quilos de ferramentas e 14.670 quilos de roupas*.... Enquanto todos participavam.

A professora levantou-se e assumiu o comando: *Agora vamos visualizar os volumes e espaços ocupados nas três caravelas: A água é transportada em barris de 60 litros. Então, temos: 733 barris e 244 barris de água por caravela,* respondeu um aluno garboso. Outro se antecipou: *São 25 sacos de 60 quilos de grão-de-bico e 25 sacos de lentilhas; 120 sacos de farinha de trigo; 25 caixotes de 60 quilos de bacalhau; 121 barris de vinho e licor*.... A mestra interferiu novamente: *O volume dos equipamentos e ferramentas para conserto e manutenção das caravelas era tão grande quanto o depósito de água. O restante do ambiente era cozinha-refeitório, dormitório e banheiros, além do camarote de comando. Este planejamento é indispensável para a montagem das estratégias necessárias. Como trabalho de casa vamos separar a classe em três grupos: o primeiro perderá um navio na viagem de ida e toda a alimentação dois dias antes da chegada à América. Deverá reorganizar o retorno e o racionamento de água e alimento. O segundo grupo perderá o mastro central no décimo dia do retorno e deverá ser rebocado, fazendo a viagem em 210 dias*. Com um sorriso, agregou.... *O terceiro grupo irá calcular a viagem para as Índias, como se o continente americano não existisse, e calcular quantos dias demorariam para chegar e os racionamentos que deveriam fazer.*

Podem levar o globo terrestre para ajudar as medições e cálculos. A assembleia de alunos decidirá qual o melhor trabalho de grupo. O grupo vencedor coordenará o Seminário "A Descoberta Chinesa da América com 300 Navios pelo Almirante Zheng He em 1421: Fantasia e Propaganda", considerando como referência Menzies (2003). O segundo grupo fará o contra-ponto com: "O governo Nixon e a Oficialização da Descoberta da América pelos Vikings, Significados e Interpretações". A sineta elétrica parecia mancomunada com a mestra, soou peremptória, quando ela disse: "*Até sexta-feira*". Os jovens se entreolharam buscando o pacto do grupo e fulgurou o brilho da disputa.

Eu ali invisível estava estupefato, fascinado, ensandecido. Se todas as crianças estudassem assim... Foi quando me lembrei da consulta da Rainha Isabel à Universidade de Salamanca em 1491 (FERNÁNDEZ, 2000), sobre o projeto de Colombo e a resposta enviada à soberana em 1506..., quatorze anos depois, arguindo a impossibilidade de chegada à Índia (WASHINGTON, 1990).

A quarta lição

A sineta soou e os alunos fizeram um silêncio mais que respeitoso. Na mesma sala de aula adentrou um professor, meia idade, meigo, mas com forte energia nos olhos. A jovem líder levantou-se e disse: *Todos os membros das nove brigadas que compõem os três grupos estão presentes*. Ele assentiu e articulou uma questão. A pergunta dele assustou-me: *O que é EMERGIA?*

Inicialmente não entendi, pensei que ele tinha língua presa e não conseguia dizer "energia". Mas a aluna-líder retirou-me da abstração: *EMERGIA, professor, segundo a bibliografia oferecida, é um conceito moderno e complexo, elaborado por Odum (1996) e Scienceman (1995), sobre a "contabilidade", "inventário" ou resultado final das entradas e saídas energéticas em todas as etapas dos processos físicos, químicos, biológicos, socioeconômicos e outros que regulam os ecossistemas, mas não são levados em conta por parte dos economistas e políticos do "establishment mundia"*.

O professor sorriu. *Vamos retirar a complexidade do neologismo para que possamos avançar e um dia fazer com que políticos e economistas o insiram dentro de seus porta-fólios*. E começou de forma professoral: *Em física se define energia como tudo que é capaz de gerar trabalho e, como foi antecipado, esse trabalho gera valores, produtos, transformações e riquezas, que têm diferentes preços nos mercados, em razão de leis econômicas, economias, governos e abundância ou escassez. Mas não devemos esquecer que a energia não se perde, ela se transforma em infinitas formas: matéria se transforma em energia, energia se transforma em matéria e luz (uma forma de energia), e vice-versa. Somos seres vivos e não temos consciência de que nos alimentamos de energia. Por exemplo, sempre comemos sementes e somente sementes transformadas. Porque comemos sementes.*

Todos se calaram e se entreolharam. Ele continuou: *Sim, comemos sementes transformadas, pois as sementes são a menor quantidade de matéria que possui a maior quantidade de energia. E todos os seres vivos somente podem absorver energia original da natureza. Um frango, porco, peixe ou boi nada mais são que sementes transformadas em alimentos. Não há vida, não há seres vivos sem a energia contida nas sementes. Agora prestem atenção. O que são as sementes? São o Sol transformado em matéria. Matéria que nós chamamos de alimentos e que contém a energia vital para alimentar a humanidade. No passado, no presente e no futuro, sempre a energia dos alimentos será retirada da natureza. Visando equacionar em todo o planeta e até no sistema solar o valor dessa energia contida nos alimentos, é que os balanços de massa buscam uma unidade conversível universal da transformação de energia em matéria, e desta em outra. Isso não é fácil, pois não podemos transformar Kcal ou BTU em unidades de vitaminas ou ienes ou euros de forma invariável*.

Quando o professor fez a pausa, todos os alunos respiraram. *Em um ecossistema há milhares e milhões de reações de troca e transformação de energia, muito além das relações termodinâmicas de energia livre e entropia,*

pois, na medida que cresce a desorganização, há também uma evolução e melhor adaptação dos organismos vivos às trocas e transformações energéticas. Essa entropia dos seres vivos levou a que Schrödinger (1967) a denominara de negentropia ou entropia negativa, pois sua capacidade de produzir trabalho aumentava, contrariando o que ocorria nos processos termodinâmicos não vivos. À medida que aumenta a evolução individual e comunitária dos seres, que todos viram no Seminário sobre o livro "Microcosmos" de Margulis e Sagan (1997), os seres vivos não sofrem desgastes, como as máquinas, e se multiplicam com aperfeiçoamento, daí que sua entropia tenha sinal trocado. Prigogine e Stengers (1997) se preocuparam em elucidar o porquê desse crescimento e chegaram às estruturas dissipativas, salto de um patamar crítico a outro de maior envergadura, para novamente estabelecer uma nova estrutura em evolução. Já cientistas como Odum (1996) e Scienceman (1995) se preocupam em determinar uma unidade de valor, e criam o conceito de "emergia", onde a energia que está incorporada ao processo tem uma "transformity" do quanto que entrou e quanto saiu, distribuída ou concentrada nos produtos ou dispersa e transformada com baixa densidade.

A importância de determinar a "emergia" de cada coisa é total no momento em que temos um mundo no qual um fóton de luz se transforma no gás carbônico transformado em glicose ou amido e celulose do alimento que se transforma em frango, porco ou peixe. Ou ainda aprisiona o monóxido do escapamento do combustível, impedindo o efeito estufa e a mudança climática que ameaça a sobrevivência da humanidade.

Trabalho de casa: os três grupos de estudos vão receber um coelho desmamado e passarão a criá-lo (teoricamente) por 163 dias. Todo os alimentos e água que ele ingerir deverá entrar na tabela de conversão de alimentos em peso. Os produtos de seu catabolismo deverão ser convertidos em energia transformados. Tudo isso deve ser levado para uma tabela única e transformado em fótons, Kcal ou "emjoules" e "emdólares" (ODUM, 1996). Percebem que tomamos o período em dias, idêntico ao da Primeira Viagem de Colombo?. Novamente a sineta soou, parecia que estava sincronizada com o mestre. Quando ela parou de tocar, ele meigo e sério disse: "*Até sexta-feira*".

A quinta lição

A sineta soou e os alunos perfilaram-se ao lado da carteira. A senhora professora entrou jovial e dispensou o comunicado da Secretaria da Assembleia de Alunos com a lista de presença: *Jovens, no primeiro período vocês organizaram uma grande e longa viagem, após as leituras sugeridas. No segundo período, depois dos trabalhos de leitura em grupo e elaboração de estratégias para a aula, contabilizaram toda a energia que entra em um processo e nele se transforma em alimentos, excrementos como novos produtos, insumos, exumos, ativos e passivos energéticos e econômicos conversíveis que devem ser conhecidos no tempo e espaço. Tempo e Espaço é o nosso trabalho no dia de hoje. Na época dos grandes descobrimentos marítimos, as autoridades lusitanas e espanholas tiveram a preocupação humanitária de distribuir caprinos para servir de alimento aos náufragos, encontrados cada vez em maior número nas ilhas desertas, aonde aqueles chegavam. É possível vislumbrar em muitas ilhas a grande devastação provocada pela superpopulação de animais, que depois também morriam de fome. Mas, é bem possível que, em uma ilha determinada, o manejo dos caprinos organizado pelos náufragos, por causa da quantidade de alimento e seu desfrute, tenha levado a deduzir o artigo Tragédia dos Comuns (HARDIN, 1968), que trata sobre a relação entre os impactos ambientais e os aspectos políticos e sociais. Nele, o autor expõe uma área de uso comum com água, pastagens, madeira, solo e outros recursos, onde cada usuário tem o direito de participar sem alterar o equilíbrio ambiental (ecossistema). Ou seja, respeitando a sincronização dos ciclos naturais, consegue-se usufruir ao longo do tempo, desde que manejando os diferentes fluxos de entrada e saída de energia, conforme as benesses ou restrições devidas às alterações meteorológicas e climáticas. Esse tipo de manejo energético é muito comum nos rebanhos na América indígena, África e regiões da Ásia. No coração dos Estados Unidos da América é manejado pelo governo no "Range Managment", na grande planície onde antes habitavam os bisões (búfalos americanos). Nessas áreas,* ***o autor considera que a população e a natureza devem estar equilibradas no tempo e espaço***

com sabedoria, mantendo os fluxos de energia e avanços da sociedade humana sobre aquela área, ou seja, a "emergia".

A "tragédia das coisas comuns" inicia-se quando um dos usuários resolve aumentar seu aproveitamento energético e altera os fluxos e a emergia. Isso provoca desequilíbrio no ambiente e a lenta degradação do valor de cada um, embora aquele tenha uma vantagem inicial (por exemplo, em dinheiro). Ao final de um tempo, essa área estará degradada. A comunidade de usuários entra em colapso e isso pode ser quase imperceptível, como a erosão do solo nos Estados Unidos provocada pelas novas tecnologias de mecanização e uso de agrotécnicas, com as metas do New Deal (ALLSWANG, 1978). Sei que vocês terão uma aula sobre isso e já receberam a leitura obrigatória e discussão de estratégia sobre a mesma.

Voltemos ao tema e a nossa ilha-estudo. Ela é a área comum. A natureza é o alimento dos caprinos e a reprodução destes é a sobrevivência dos náufragos. Com esses elementos integrados temos o crescimento da natureza controlado pelo caprino e o controle dos animais pelos náufragos, em virtude da oferta da natureza e de suas necessidades e sustentabilidade insular. Em uma sociedade diferente desta onde estamos, com diversas populações tradicionais, com seus tempos peculiares, espaços próprios e usos comunitários, é fácil entender essa questão. Em uma sociedade como a nossa, onde existe a propriedade privada e a sociedade industrial, devemos exemplificar o conceito de Hardin (1968) com alguns elementos ambientais, além da erosão do solo, uso de agrotóxicos, depleção da água e devastação da natureza, para avaliar as alterações nos fluxos energéticos e o acúmulo ou depleção nos "emjoules" ou "emdólares", pois não é possível avaliar o colapso do sistema em um curto intervalo de tempo e espaço. Em uma sociedade industrial periférica, sem governo autônomo ou com governo heteronômico, além da depleção, há uma diferença entre o valor (utilização) e o preço (aquisição) que torna mais difícil de perceber a tragédia das "áreas" comuns, pois não é permitido calcular a "emergia" e passam a existir as deseconomias externas.

O exemplo do leite materno é claro. Ele tem altíssimo valor, mas não tem preço. Entretanto, para multinacionais do setor de laticínios sua utilização é

concorrência desleal, pois o leite em pó tem custos, impostos. É por isso que a propaganda do leite em pó procura diminuir a utilização do leite materno, desvalorizando-o e dando comodidade, satisfação e fantasia ao usuário de seu produto industrial, que tem preço e não há um cálculo "emergético" perfeito. Fora convencer o consumidor, a empresa precisa ter o apoio e cumplicidade das autoridades de saúde, economia, ciência e tecnologia. Para isso, usa argumentos políticos, econômicos contextualizados, denunciando toda contrariedade às suas metas. Isso polariza a discussão de forma maniqueísta entre aqueles que são a favor do progresso, tecnologia, desenvolvimento e os que são contrários. A questão, muitas vezes, é mal enfocada, pois, na polarização, se procura tirar o valor do leite em pó e não comparar o seu preço com o preço do leite materno. O outro aspecto é que o problema não é enfrentar a natureza do leite materno com o produto industrial e, sim, que o leite em pó necessita de água pura, de qualidade, onde na casa de muitos não há. Daí sua consequência na desidratação e provocação de diarreias, ocasionando epidemias de mortalidade infantil, muitas vezes desconhecidas pelas autoridades.

A figura do leite materno serve para demonstrar porque as depleções por erosão, agrotóxicos, transgênicos, entre outras, dificultam ou impedem a percepção sobre a tragédia das áreas comuns, no interesse do poder que desconsidera a "emergia". Nossa outra "tragédia das coisas comuns" se chama erosão genética das sementes ou perda de biodiversidade com o correspondente estreitamento e empobrecimento na dieta. Isso também é causa de erosão do solo e perda de sua fertilidade. De nada adianta termos o Sol se não temos a fertilidade do solo para transformar a energia do Sol em sementes, que são o alimento de todos os seres vivos. Continuaremos nesse tema, após o recreio. Boa merenda, até logo, jovens.... Mas antes que ela terminasse a saudação, a sineta soou trazendo sorrisos aos olhos dos alunos.

A sexta lição

A professora voltou com o mesmo frescor: *À brigada que preparou o doce de mamão verde, meus parabéns, estava uma delícia.* E continuou:

Um dos maiores enigmas da humanidade é a fertilidade do solo. Foi visto em aula que todos os seres vivos comem sementes, que são a transformação do Sol. Para que o Astro Rei possa cumprir sua missão é necessário que voltemos ao Arqueozoico, há quatro bilhões de anos, quando a vida surgiu (ou chegou) neste planeta. Ela começou na água e retirava a energia que necessitava dos sais minerais nela dissolvidos. Há 2,4 bilhões de anos, no Proterozoico, inicia-se a grande transformação provocada pelas algas cianofíceas, com absorção de gás carbônico e produção de oxigênio. Há aproximadamente 1,3 bilhões de anos as formas vivas do microcosmo avançaram dos oceanos sobre a terra e a começaram colonizar. Criaram na crosta terrestre uma camada de vida extremamente complexa, com sua "emergia". É esse complexo ecossistema que inicia sua formação há um bilhão de anos até os nossos dias, que chamamos de "fertilidade do solo" e compreende biogeofísico-química própria e intimamente ligada ao Sol.

A professora parou e respirou profundamente, perscrutando o olhar de cada um, então: *Sem a compreensão do conceito de "emergia" não é fácil compreender a relação espaço-tempo na evolução da vida. Isso é a fertilidade do solo. Por isso se plasmou a expressão: é uma camada de 30 centímetros que alimenta a humanidade. Podemos então dizer: é ali onde o Sol se transforma em semente (vida). A obra "O que é Vida?" (SCHRÖDINGER, 1967) estimulou a busca de uma unidade da vida, possibilitando a descoberta do ADN e o código genético, mas não permitiu uma resposta à pergunta.*

O geoquímico russo Vernadsky (citado por LANGMUIR,1998) emprestava grande importância aos minerais contidos nas rochas como a energia para o processo da vida. Ele afirmava: "Vida é a animação antigravitacional dos minerais que cresce vertical desde o centro da Terra e se expande horizontalmente na superfície do solo". Isso fica mais bem explicitado quando sabemos que em uma pequenina colher de chá de solo agrícola há 200 nematoides, 218 mil algas, 288 mil amebas, 400 mil fungos, 1 bilhão de actinomicetos e 1 trilhão de bactérias. Por isso, os cientistas japoneses afirmam que uma lava vulcânica pode ficar 3 mil anos inerte, sem vida e uma camada de um centímetro de solo agrícola necessita de 800 a 1.200 anos para se formar e alcançar o

equilíbrio dinâmico da fertilidade. O homem ainda não conseguiu decifrar o código de transformar rocha mineral em solo vivo.

É histórica a afirmação que a civilização egípcia era uma dádiva do Rio Nilo, que trazia com suas enchentes o húmus e a energia revigorava a fertilidade das terras que alimentava sua população e depois o império romano. Da mesma forma que os egípcios, também os maias e os incas recorriam a práticas para aproveitar o húmus e manter a fertilidade do solo, pois sabiam que fertilidade não são minerais dissolvidos ou solubilizados. Durante séculos a ciência interpretou que o húmus presente na camada superficial dos solos era o responsável pela fertilidade e lhe atribuiu vital importância de forma errônea, sem considerar o microcosmo.

Muitos cientistas desde a antiguidade afirmavam que os sais minerais (das rochas) contidos no solo eram os responsáveis pela fertilidade, também ignorando os fenômenos da vida, existindo discórdia entre as ideias de Liebig (1943) por um lado, e Hensel (1898, citado por PINHEIRO, 2003) e Vernadsky (1898, citado por LANGMUIR,1998) por outro. O último elaborou duas leis que estão indiretamente ligadas à fertilidade do solo, por conseguinte, à saúde humana, envolvendo o conceito de "emergia": (1) o tempo (evolutivo) aumenta a diversidade dos elementos minerais necessários nos seres vivos; (2) a taxa de migração dos elementos minerais para o meio ambiente aumenta com o tempo.

No livro "Química como suplemento à agricultura e fisiologia" (LIEBIG, 1943) se fez uma crítica arrasadora à teoria do húmus e se formulou a teoria da nutrição mineral das plantas. Liebig explicou a causa do esgotamento do solo e apresentou a teoria da fertilização com base na completa restituição de todas as substâncias minerais extraídas dele. Sendo formulada a "Lei do Mínimo": os rendimentos das colheitas são proporcionais à quantidade de elemento fertilizante assimilável que se encontra em menor proporção no solo. Isso podia ser comprovado na época com as análises laboratoriais existentes para os elementos conhecidos ou detectáveis (universo). Mas é uma afirmação atemporal, pois em cada novo tempo existirão novos elementos ou formas de energias detectáveis por novos aparelhos, comprovando a teoria formulada.

A indústria nascente de insumos para a agricultura encontrou um grande segmento para desenvolver e passou a vender aqueles sais encontrados em minas e rochas com razoável concentração. Contemporâneo e compatriota do Liebig, Julius Hensel questionou a aplicação da "Lei do Mínimo" de forma comercial, que representava a solubilização e concentração dos minerais de forma industrial, em consequência dos seus resultados, e passou a questioná-la. Pois percebia que esse fluxo de energia industrial alterava o microcosmo que perdia essa energia e riqueza, por uma comodidade, no qual o mercado transformou em "commodity". A primeira edição do livro "Pães de Pedra" (HENSEL citado por PINHEIRO, 2003) foi destruída e o autor perseguido e preso, pois havia interesses militares e comerciais por detrás da questão, perceptíveis já na Guerra Franco-Prussiana e outras da reunificação alemã, já que suas matérias-primas eram a base para a produção de explosivos.

Com o surgimento da matriz energética (petróleo), a questão comercial dos fertilizantes químicos solúveis sintéticos evoluiu para a química orgânica de explosivos e armas químicas (gases sintéticos), que passou a ser a pedra angular da defesa militar dos países, junto com a mecanização. Agora, quando os cientistas chineses propugnam o retorno ao uso das rochas moídas na agricultura e demonstraram suas vantagens, devemos compreender a questão dentro dos conceitos da "emergia" aí contida (ODUM, 1996; SCIENCEMAN, 1995). Façam a releitura dos livros: "O Testamento Agrícola" (HOWARD, 1943) e "Weeds: The guardians of the soils" (COCANNOUER, 1950), e tragam as respostas à minha ilação. Por favor, as brigadas do grupo III montem as estratégias para o Seminário Extração de Minerais pela meteorização, colheitas, erosão do solo e não reposição integral pelos adubos comerciais. Levantou-se sorrindo, colocando o casaco, esperou a campainha finalizar sua função e saindo, saudou: "*Até sexta-feira*".

A sétima lição

O jovem professor entrou em sala, absorto, como se estivesse muito distante, dispensou a apresentação de lista da Secretaria da Assembleia e começou: *Nosso tema hoje é "Revolução Verde" (BROWN, 1970) e será*

inovador. Os norte-americanos dizem que a expressão foi cunhada por Willian Gaud, ex-diretor da Agência de Ajuda Internacional dos Estados Unidos para o Desenvolvimento (Usaid), descrevendo os aumentos espetaculares nas colheitas alcançados nos países em desenvolvimentos durante os anos 60. As novas variedades de sementes e animais que necessitavam de grandes quantidades de crédito, energia, fertilizantes químicos, agrotóxicos e adoção de infraestrutura foram a chave da revolução, pois podiam ser financiadas pelos países capitalistas: insumos de comodidades para uma agricultura de "cash crop"' (commodities). As origens da Revolução Verde remontam aos anos 40 quando o vice-presidente dos EUA, Henry A. Wallace, foi enviado ao México como embaixador especial, em missão de extraordinária importância. O estado da agricultura mexicana o aterrorizou e, ao voltar a Washington, ele estimulou as Fundações Rockefeller e Ford a ajudarem os mexicanos. Foi decidido enviar uma equipe de quatro cientistas para ajudar a Secretaria da Agricultura y Ganaderia Mexicana. Foram instaladas a Comissão de Estudos Especiais e a Comissão Nacional do Milho, sendo a equipe estado-unidense composta por J. G. Harrar (coordenador), John Niederhauser (geneticista de batatinha), Edwin Wellhausen (geneticista de milho) e a cargo do Programa Melhoramento do Trigo, Ernest N. Borlaug (melhorista de trigo). Imediatamente todos os pesquisadores, professores universitários contrários ou críticos aos trabalhos e sua forma de condução foram afastados, sendo realizada uma campanha internacional em torno das palavras "agricultura moderna", "mecanização" e "variedades de alto rendimento", e outras para propaganda dos interesses submersos dos organismos multilaterais.

Borlaug criou o programa acelerado de hibridação de trigo, fazendo as plantas crescerem nos EUA e aproveitando o clima do México para fazer um segundo plantio na mesma estação, obtendo novas variedades na metade do tempo, com a inserção dos genes Norin. Esses eram anões, mais sensíveis a pragas e doenças e recebiam altíssimas doses de fertilizantes químicos solúveis, derivando no uso de grandes quantidades de fungicidas, herbicidas e inseticidas. Os genes Norin foram o principal botim de guerra que capturaram no Japão derrotado, e a política de agrotóxicos juntamente com a política de

fertilizantes eram cópia dos programas do governo nazista, também derrotado. Seus esforços foram acertados e inegáveis, o México, que era autossuficiente de sementes de trigo desde 1948, passou a ser exportador de trigo a partir de 1965, a pesar do aumento dramático da população. As novas variedades de trigo foram levadas para outros países notavelmente ao subcontinente indiano. Monkombu Swaminathan foi o chefe da Revolução Verde na Índia e recebeu o Prêmio Mundial dos Alimentos em 1987, e Borlaug recebeu o Prêmio Nobel em 1970. O sucesso do Programa Mexicano de Trigo projetou um programa similar para o arroz. Ele se baseou no propósito de construir um Centro de Pesquisas, o International Rice Research Institute (IRRI) nas Filipinas (Los Baños) em uma ação conjunta de Fundações Rockefeller e Ford. Primeiramente o Henry Beachell e subsequentemente Gurdev Khush começaram a produção de novas variedades de arroz de alta produtividade. Suas contribuições à Revolução Verde foram reconhecidas com o World Food Prize - 1996.

Apesar desses avanços notáveis, o aumento da população do mundo trouxe dois problemas maiores. Nos países desenvolvidos as colheitas trouxeram "montanhas de alimentos", mas a um custo alto e com consequências para o meio ambiente. Nos países em desenvolvimento os fundos escassos impediam o uso de fertilizantes, pesticidas e combustíveis necessários para aumentar a necessidade programada nos melhores cultivares, aumentando a fome e problemas relacionados a ela. Passados trinta anos, o pessoal do "Norman Borlaug Institute for Plant Science Research" confia desenvolver uma agricultura de baixos insumos, baixos impactos ambientais e alta qualidade. Essas colheitas virão satisfazer as necessidades de produção de uma agricultura sustentável em países tanto desenvolvidos como em desenvolvimento, de forma solidária e fraterna... Como diz o ditado: O lobo perde o pelo, mas não perde a manhã. Todos os jovens receberam os "sites" da web onde estão essas páginas e não há novidades. Na grande parte dos países pobres foi instalada por ditaduras militares respaldadas pelos EUA e provocou uma grande reestruturação socioeconômica, com liberação de mão de obra rural e transferência de indústrias obsoletas para a agricultura. Isso veio permitir a modernização

do parque industrial dos países desenvolvidos e dominar totalmente a economia de Sol (agricultura) por uma economia de dinheiro emprestado dos países capitalistas, acumulado com a transformação do Sol em produtos industrializados (alimentos industriais).

Pergunto: Quando começou a Revolução Verde? E respondo: segundo Toffler (2000), ela surgiu na Guerra Civil Norte-Americana (1860-1865), com o enfrentamento entre o norte capitalista-industrial e o sul escravista-patrimonial, o qual impedia o crescimento da economia nacional. Outros da Escola de Economia de Chicago dizem que ela nasceu nas metas de industrialização do New Deal (ALLSWANG, 1978). Há, ainda, uma corrente menos conhecida que diz que ela surgiu do Seminário sobre a América após o fim do colonialismo no Massachusetts Institute of Technology. Isso tampouco é genuíno.

Se aceitarmos situá-la nos Estados Unidos, devemos tomar a chegada dos 102 puritanos no MayFlower (JOHNSON, 2005) como o início da Revolução Verde. Quanto à compaixão de Samoset e Squanto, chefes da grande nação cherokee, ensinaram aos peregrinos a pescar com vara, cultivar abóboras e milho (com doação de sementes e utilização de peixes como fertilizantes daqueles cultivos) e também a caçar perus selvagens (abundante ave nativa norte-americana), para sua alimentação e nova dieta. Dos 102 migrantes aportados, a metade morreu no primeiro inverno de Massachusetts, pela não colheita de trigo e aveia, por causa das sementes estrangeiras que haviam trazido da Europa e ao desconhecimento da fertilidade do solo da nova terra. Na safra, em reconhecimento à fraternidade indígena, foi realizada uma festa similar à Festa da Colheita de tradição britânica, junto aos indígenas. Isso foi chamado de "Dia de Ação de Graças", quando se come peru com produtos de milho e abóboras. A tradição continua, hoje, a ser festejada em família, com a mesma contrição dos peregrinos em desespero. Vários pintores norte-americanos imortalizaram esse agradecimento, como vocês podem observar no setor de imagens da internet. Alguns países periféricos são induzidos a adotar o "Dia de Ação de Graças", assim como o "Dia das Bruxas" e a "Fadinha do Dente", de forma subserviente e caricata.

Kervran (1966) denuncia: "A agricultura clássica (significando esse termo o que se ensina nas escolas de agronomia) é uma enorme impostura de cinismo intimista". Recomenda-se o uso de "fertilizantes completos" com N, P e K, como se esses três elementos fossem os únicos encontrados nas plantas. Seu postulado básico é o de restaurar a qualidade e quantidade dos elementos extraídos do solo pela colheita anual.

Se quisermos fugir do estereótipo e propaganda alienantes da vontade imperial, podemos dizer que a Revolução Verde começou quando algumas mulheres resolveram mastigar umas "folhinhas verdes" para enganar a fome durante a espera dos companheiros caçadores no neolítico... Contudo, são duas situações diferentes, pois a última (neolítica) é uma evolução e a outra é uma revolução: como organização política social e transformação em uma sociedade pelo conhecimento, entretanto, isso não é discernido quando da discussão sobre a "Revolução Verde" por parte de políticos, acadêmicos e universitários nos países subdesenvolvidos. No momento em que o petróleo deixa de ser a matriz de investimentos financeiros e a matriz substituta passa a ser a biotecnologia, sabemos o porquê da ida do Dr. Borlaug à África... Bem, na matriz biotecnológica a unidade é o "gene" e com ele podemos fazer tudo. Margulis e Sagan (1986) dizem que podemos fazer o microcosmo para colonizar o planeta Marte, da mesma forma que podemos produzir todo o combustível que o planeta precisa por meio da transformação de sua energia em sementes industriais. Hoje, é ultrapassado e obsoleto solubilizar fertilizantes com ácidos ou "cracking" do petróleo, mais que isso, é caro e desnecessário, pois perdemos muitos elementos que, ao se tornarem solúveis ou concentrados, ficam à mercê do clima e erosão, provocando poluição e deseconomias. Com microrganismos que podem solubilizar as rochas e reter seus minerais em seu "bioplasma", teremos uma nova indústria de insumos para a agricultura, totalmente biotecnológica, com novos serviços altamente rentáveis, pelos valores de patentes, marcas, royalties dessas criações ampliadoras de comodidades. É por isso que todas as empresas oriundas do conhecimento de Liebig (1843) estão agora migrando para o conhecimento de Hensel (1898, citado por PINHEIRO, 2003) com suas rochas, que estão em alta.

Os genes de proteínas de defesa imunológica nas plantas e animais passam a ser estimulados para evitar as pragas e doenças de forma sustentável, que é o modelo atual, pois o lucrativo modelo (moderno, anterior) está ultrapassado e não é mais de interesse financeiro. Hoje os chineses utilizam 55 milhões de toneladas de farinhas de rocha somente em peletização de sementes, e a quase totalidade dos trabalhos científicos sobre isso são de chineses ou de parceria entre chineses, cientistas europeus e norte-americanos, que intercambiam com eles.

O trabalho em Grupo, vocês já sabem: seleção de microrganismos com potencial de crescimento em Farinha de Granito, Farinha de Basalto, Farinha de Xisto Betuminoso e estratégia para sua bioindustrialização. O material estará no laboratório de Microbiologia à disposição de cada grupo.

A campainha marcou o fim da jornada e ele se despediu, tão absorto quanto entrara. "*Até sexta-feira*". Todos estavam exaustos. Para dizer a verdade, pela ansiedade não sei quanto tempo passou, mas voltei na sexta-feira.

A primeira lição

Eu chegara antes do Sol nascer para poder visitar a escola e seu entorno. Ela foi um antigo colégio, mais que isso, um seminário da *Ordem Franciscana* e agora tem uma parte transformada em escola e recebia o nome de um eminente médico, internacionalmente conhecido por seus estudos e livros sobre a fome. Ele chegara a ser o primeiro presidente do *Organismo das Nações Unidas*, mas não só fora afastado, como também ficara marcado por suas ousadias no organismo e morrera exilado em Paris. Nas paredes da escola, grandes murais de cunho épico, como as do pintor mexicano *Diego de Rivera*.

A "primeira aula" começou como todas as outras, com uma alvorada frenética. O desjejum, como sempre, fora preparado e servido por uma das brigadas dos alunos para os próprios alunos. Sim, a escola não tinha funcionários, nem professores, apenas assessores convidados. Às sete

horas pontualmente começou a "mística", uma apresentação teatral rápida. O tema era: "A neutralidade da ciência a serviço do poder", elaborada pela "*Brigada Zumbi dos Palmares*". Era um trabalho sofisticado, tinha até um trecho em latim extraído do julgamento de Giordano Bruno. Culminou com a submissão do Estado, da Ética e Governo e sua consequente "*mercenarização*" aos interesses das grandes transnacionais, organismos multilaterais a serviço da comodidade e hedonismo no mercado da Organização Mundial do Comércio. Não houve aplausos, nem assobios; silêncio compenetrado. Terminada a mística a *aluna-secretária geral do Praesidium* solicitou aos oito chefes de grupos, compostos pelas setenta e duas brigadas, que o Hino fosse executado no final da solenidade. Ao que foi atendida. Ela deu o sinal para o início da primeira aula.

Ciência é religião, mas religião não é ciência. Bradou um jovem com uma túnica branca, e continuou: *Os cientistas especulam que a vida no planeta surgiu há quatro bilhões de anos e sobre a terra nas bordas do Kilimanjaro, que tem a idade de 750 mil anos. Considerando a ausência de fenômenos tectônicos na região, podemos dizer que a montanha-mãe diminuiu menos de trinta metros na sua altura original. Mil anos levou para a formação de um centímetro de solo em suas escarpas e uma concentração média inferior a um por mil de elementos minerais originais presentes nos mesmos, mas não é fácil calcular sua "sun emergy". Podemos dizer que os trinta metros da altura do Kilimanjaro se transformaram em natureza, nas civilizações egípcia e romana, ou distribuíram-se pelos oceanos, através do Nilo e ventos, até chegar a nós mesmos... Ela está disseminada nos trinta centímetros de fertilidade de solo que alimenta a humanidade*... O tom do jovem era cerimonial, solene. Transmutou-se e cortou como um bisturi*: O Kilimanjaro que hoje perde suas neves eternas, pela ameaça da mudança climática. Senhoras e senhores convidados, estudantes e estudiosos, povo!. Nosso título é ENERGIA SUPREMA: AS FARINHAS DE ROCHA. Os minerais da meteorização das encostas da montanha-mãe da humanidade formam o húmus que nas monções chega ao delta do Nilo, carreando a grande diversidade de minerais. Essa é a dádiva que criou a civilização no Egito e alimentou todo o Mediterrâneo, inclusive o império romano, durante séculos e a nós até a construção da represa de Assuan*.

Hoje, graças aos dedicados cientistas alemães, conhecemos a qualidade dos alimentos daquela região e a época pelas radiografias e estudos dos ossos das múmias. Estudos comparativos com múmias e ossos de outras regiões e culturas demonstram um paralelo semelhante na qualidade dos ossos. Isso levou a uma avaliação científica da perda de minerais nos ossos através dos tempos, e como isso nas últimas três décadas se torna uma epidemia. Mas não são somente os ossos que estão submetidos à osteoporose. Não devemos esquecer que os padrões de densidade de esperma humano foram rebaixados em cinquenta por cento na última década. Nossa dieta nos dá a memória genética, que nada mais é que uma memória mineral que pode ser observada em nosso sangue (Figura 1).

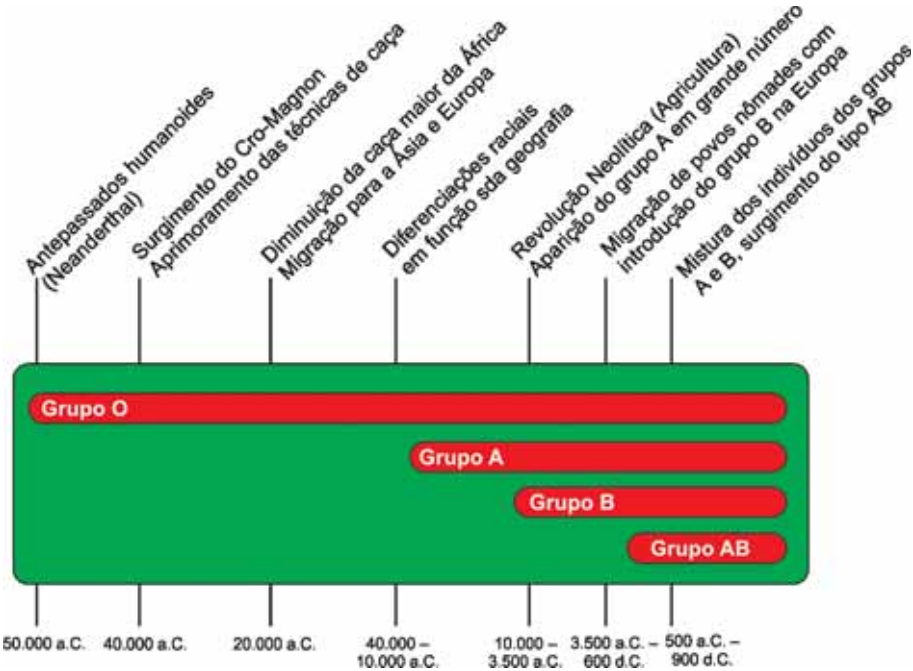


Figura 1. Quadro evolutivo da raça humana e dos correspondentes grupos sanguíneos.

Fonte: Adamo e Whitney (1998).

Os dados sobre a qualidade mineral dos alimentos são conhecidos desde a Idade Média Europeia, e foram denunciados veementemente por Hensel (1898, citado por PINHEIRO, 2003), mas foram mantidos escondidos pelo poder mercantil do conhecimento, em que na atualidade são utilizados para o comércio de fármacos. Assim, todos vivemos embretados entre a fome política e a desnutrição tecnológica da fome oculta, conforme denúncias da Organização Mundial do Comércio em Cancún (BENEVIDES, 2006). Da mesma forma que a montanha-mãe, estamos nos transformando em Sol, mas em uma escala de tempo tão acelerada que já nascemos energeticamente enfermos... Todos os seres vivos gastam a maior quantidade de energia para sua reprodução. É conhecida a grande produção de grãos de pólen nas gramíneas, coníferas e outros vegetais, fecundados pelo vento, mas o surgimento dos insetos há aproximadamente 350 milhões de anos adaptou-os a aproveitar a energia concentrada nos grãos de pólen para sua nutrição. Isso levou a que muitas plantas criassem mecanismos coadaptativos de formas, cores e perfumes nas suas folhas para maior atração dos mesmos, e assim surgiram as flores há aproximadamente 135 milhões de anos, também uma transformação do Sol. Esse mecanismo propiciou uma grande economia e racionalização de energia interna aos seres vivos, posteriormente utilizada por aves, morcegos e outros seres em coevolução.

Da mesma forma evoluímos, aproveitando a energia contida nos minerais. Contudo, já há muito é sabido que a absorção de um mineral não pode ser feita diretamente de uma rocha ou osso de um animal, pois sua eficácia é inferior a 5% da quantidade administrada. O exemplo mais clássico é a absorção de ***Ca****, que necessita da presença do Sol e de vitaminas do grupo D, ademais, é necessária a presença de* ***Si*** *orgânico, sem o qual não há a absorção. Mas essa reação é catalisada pela presença de* ***Cu*** *orgânico e vitamina C, além de ácido fólico e biotina. Usando a referência "energias até então desconhecidas", prognosticadas por Hensel em 1873, é que acreditamos que a teia de complexidade seja muito mais ampla. Já sabemos que quando essas condições não são ideais há a utilização de outras rotas metabólicas e assimilação de metais pesados como o* ***Cd****,* ***Hg*** *e* ***Pb,*** *e que isso não ocorre, mesmo na presença dos mesmos, quando as condições são as acima descritas.*

*Uma semente de amendoim que cresce em solo com pouco **Ca** desenvolve maior teor de microtoxinas.*

As drágeas, pílulas, cápsulas e pastilhas de mineralização preventiva são ineficientes, então, agora surgem as tabelas de qualidade de alimentos e as denúncias sobre os "desatinos" da Revolução Verde. O próprio Liebig reconhecera seus erros relacionados à fertilização química dos alimentos, mas isso foi mantido em segredo pelos interesses mercantis e militares. Agora, para corrigir os erros da agricultura industrial, a farmácia industrial deseja que, aquilo que as plantas não conseguiram absorver e equilibrar por uma questão emergética, seja assimilado por ingestão como refeição química, tornando-se propaganda de agricultura biológica, ecológica, orgânica, entre outras (Tabela 1)*, para venda de serviços e tecnologias para a elite com recursos financeiros. Surgem até os "novos" alimentos nutracêuticos enriquecidos por técnicas e propaganda de engenharia genética.*

Felizmente é possível com o uso de farinhas de rocha remediar a qualidade bromatológica total dos alimentos como no tempo dos faraós egípcios, não por meio de remineralização dos solos agrícolas depauperados por tecnologias

Tabela 1. Benefícios nutritivos de verduras biológicas.

Vegetal (método)	Ca	Mg	K	Na	Mn	Fe	Cu
Alface							
Biológico	40,5	60,0	99,7	8,6	60,0	227	69,0
Convencional	15,5	14,8	29,1	0,0	2,0	10	3,0
Tomate							
Biológico	71,0	49,3	176,5	12,2	169,0	516	60,0
Convencional	16,0	13,1	53,7	0,0	1,0	9	3,0
Espinafre							
Biológico	23,0	59,2	148,3	6,5	68,0	1.938	53,0
Convencional	4,50	4,5	58,6	0,0	1,0	1	0,0
Feijão							
Biológico	96,0	203,9	257,0	69,5	117,0	1.585	32,0
Convencional	47,5	46,9	84,0	0,8		19	5

Fonte: Bear et al. (1948).

inadequadas e impróprias, mas pela ativação dos microcosmos com o rejuvenescimento dos solos. Pensando na forma de sistemas de sistemas, como preconizado por Senge (1990), podemos utilizar os "rejeitos" das diferentes minas, reduzindo o alto custo de disposição final; permitindo organizar a gestão da remineralização do solo de forma econômica e sem riscos; compatibilizando interesses agrícolas, geológicos, ambientais e educacionais, regulados pelos princípios de precaução, honestidade e competência. O trabalho integrado entre as pesquisas, incubações e extensões tecnológicas, como farinhas de rocha, pelos movimentos sociais permitem manejar e transferir conhecimentos acumulados ao longo dos últimos vinte anos, de forma econômica e segura. As farinhas de rocha não são fertilizantes e muito menos remineralizadores de solo, são sim ativadores (reguladores) dos fluxos energéticos para as melhores rotas metabólicas dos seres vivos. Elas ativam a microvida no solo. O que é a matéria orgânica do Solo? A quase totalidade da matéria orgânica de um solo agrícola são cadáveres do microcosmo que necessitam da diversidade de minerais para manter suas reações em uma teia de equilíbrios.

Os lucrativos desígnios comerciais da Revolução Verde consideraram que o solo era o "suporte inerte das raízes", e todos fomos obrigados a ver a vida no solo como compostos de química orgânica, resultado de oxidação e redução, sem uma preocupação com que cada solo tem o seu DNA. As farinhas de rocha ativam a vida, logo aumentam a quantidade e diversidade de cadáveres, e isso propicia uma série de reações físicas, químicas e biológicas, que permitirá um alimento ter um maior conteúdo de: Cromo (útil contra a diabete), Vanádio (com utilidades múltiplas), Selênio (útil na desintoxicação por metais pesados: ***Cd***, ***Pb*** *e* ***Hg****). Em 1986, no Hortão Municipal de Cachoeiro de Itapemirim no Espírito Santo, laranjas foram colhidas e secretamente analisadas na República Federal Alemã. Nelas foram encontrados os minerais que apareceram somente nas análises dos ossos das múmias dos faraós egípcios. Aquelas plantações recebiam, periodicamente, já há mais de cinco anos, quantidades de farinhas de rocha com a composição descrita na Tabela 2. Mas, devemos esclarecer que as aplicações de farinhas de rocha ao solo não atingiam diretamente as laranjas e, sim, o microcosmo, que ativado e rejuvenescido enriquecia os frutos.*

Tabela 2. Composição da farinha de rocha MB-4, em mg/kg.

Farinha de rocha MB-4					
Elemento	**(mg/kg)**	**Elemento**	**(mg/kg)**	**Elemento**	**(mg/kg)**
Li	50	**Na**	122.000	**K**	13.600
Al	96.000	**Cs**	<50	**Mg**	77.000
Ca	39.000	**Sr**	200	**Ba**	420
Ti	3.900	**Zr**	800	**Cr**	1.100
Mn	780	**Fe**	60.000	**Co**	78
Ni	78	**Ag**	5	**Cu**	30
Re	5	**Pd**	30	**Sn**	5
Pb	200	**Hg**	< 0,001	**Zn**	120
Sb	5	**Se**	< 0,001	**P**	5.000
As	< 1	**Te**	< 1	**La**	220
Ce	270	**Pr**	9	**Nb**	11
Sm	4	**Eu**	0,5	**Gd**	0,5
Tb	0,5	**Y**	3	**Dy**	0,5
Ho	0,5	**Er**	0,5	**Ta**	12
Yb	0,5	**Lu**	0,5	**Sc**	7
Pt	< 1	**In**	< 1	**Br**	1.900
Ga	150	**Tm**	0,5		

Fonte: Pinheiro; Barreto (1996).

Muitos cientistas, na atualidade, estão fascinados com os efeitos dos Elementos Terras Raras nas plantas e animais (Tabela 3). Eles comprovam a Lei do Mínimo (LIEBIG, 1843), pois dispõem dos instrumentos analíticos para determiná-los com precisão. Os grandes laboratórios de patologia vegetal buscavam, em nível molecular, uma solução para bloquear as toxinas dos fungos e bactérias, causas iniciais da invasão e doenças nas plantas. Encontraram que as Terras Raras em quantidades de traços e subtraços são

Tabela 3. Propriedades dos elementos-traço incluindo terras raras.

Elemento-traço	Propriedade
Ag	Antibactérias, antifungos, antivírus, desinfetante sistêmico, aumenta a imunidade, reduz inflamação, promove cura
Bi	Uso eficiente do **Ca** e **Mg**, metabolismo dos ossos, função endócrina, reduz perda de **Ca** nos ossos
Cs	Protege contra o câncer, produz condição alcalina
Eu	Duplica a vida de cobaias
Ge	Indica o impulso elétrico. Sua utilização aumenta a função imune
La	Útil contra a fadiga crônica
Li	Controla depressão, infertilidade, raiva, redução de crescimento e falhas reprodutivas
Nd	Duplica a vida de cobaias, promove o crescimento de células
Pr	Duplica a vida de cobaias, promove o crescimento de células
Sb	Eficaz contra plaquetas no sangue
Sm	Duplica a vida de cobaias, promove o crescimento de células contra o câncer, perda de ouvido, calvície masculina
Sr	Aminoácidos, hemoglobina, insulina, glândulas adrenais, hormônios, enzimas, anticorpos, degeneração conectiva, lupus, doenças do colágeno, anemia falciforme
Tm	Duplica a vida de cobaias, promove o crescimento de células
Y	Duplica a vida de cobaias, promove o crescimento de células

Fonte: Bear et al. (1948).

capazes de inibir a ação de toxinas de fungos patogênicos, e começaram a purificar sais de Césio, Lantânio, Samário e outros para sua aplicação. Isso ficou complementado pelos avanços da Engenharia Genética e a possibilidade de inserção de genes fortalecedores do sistema imunológico das plantas (fitoalexinas e fitoantecipinas) com a mesma finalidade. Na agricultura, geralmente, as maiores perdas ocorrem nos ataques durante a germinação das sementes.

Os cientistas chineses, preocupados com essas perdas e conhecedores dos efeitos da inibição pelos Elementos Terras Raras, começaram a "peletizar" (revestir) as sementes com uma película de farinhas de rocha, em que estão presentes em quantidade traços <20 µg/g tais elementos. Uma semente ao germinar absorve água e aumenta de tamanho dezenas e até centenas de vezes, provocando a ruptura de tecidos e células cujo conteúdo atrai fungos que elaboram toxinas necrosantes facilitadoras da invasão. O revestimento (pellets) com farinha de rocha protege e inibe as toxinas e o ataque dos patógenos às sementes. Os resultados são incrementos na produção agrícola conforme os dados abaixo:

- *Há um incremento entre 6% e 15% na produtividade de grãos, incluindo arroz, trigo, amendoim e soja.*
- *Para o cultivo de frutas e hortaliças, o incremento da produtividade oscila entre 5% e 26%.*
- *Nos cultivos de frutas, beterraba açucareira e cana-de-açúcar, se verifica um incremento na quantidade de açúcar entre 1% e 5%.*
- *Nas frutas, se destaca um aumento na quantidade de vitamina C.*
- *Na soja, há um incremento na quantidade de proteína e óleo.*
- *Finalmente, as plantas são mais resistentes a altas temperaturas e às secas.*
- *Em animais, aumenta-se o índice de crias que sobrevivem, se incrementa o peso e há maior aproveitamento das forragens e concentrados, e nas ovelhas a produção de lã é mais abundante*.

Vernadsky (1929, citado por LANGMUIR,1998) tem toda razão, somos minerais ativados e assim alcançamos a (noosfera) consciência. Quando calculamos as necessidades da tripulação de Cristóvão Colombo para a descoberta da América, estamos exercitando a consciência sobre as transferências de minerais das frutas chilenas, bananas do Caribe, dos cereais da Austrália e América para Europa e Ásia, e estudando Odum (1996) e

Scienceman (1995) sabemos a importância de ir além da "contabilidade" dos fluxos "emergéticos" para evitar a "Tragédia das Coisas Comuns" (HARDIN, 1968). Dizemos isso no tempo-espaço em que a montanha do Kilimanjaro diminui apenas 30 metros e se transforma em Sol, e não temos a veleidade de questionar conceitos como "sun emergy" ou suspeitar de uma suposta valoração econômica na capacidade de transformar um fóton solar em patentes, regalias, royalties e serviços de patentes.

Quando referenciamos a comemoração norte-americana do "Dia de Ação de Graças", embora a quase totalidade deles não tenha mais noosfera (consciência) de sua origem, queremos situar a importância das sementes doadas pelos indígenas Samoset e Squanto, para evitar a fome e morte dos excluídos da Grã-Bretanha por suas crenças ou cobiças. Como um indígena remanescente dos diferentes genocídios provocados nos Estados Unidos deve sentir a ação fraterna de seus antepassados? A palavra utilizada para denominar a Terra, ao princípio das línguas indo-europeias, há milhares de anos (ninguém sabe precisar exatamente quantos) era dhghem. A partir dessa palavra, que não significa mais que terra, surgiu a palavra húmus, que é o resultado do trabalho das bactérias do solo. E para nos dar uma lição, da mesma raiz surgiram: humilde, humildade e humano. A poetisa Cora Coralina disse: "O saber se aprende com os mestres, mas a sabedoria só no convívio com o povo."

Semente é a casa onde mora o embrião, fruto de um casamento. Nessa casa o embrião tem a proteção, o "leite materno" e recebe a memória do ambiente onde irá no futuro desenvolver-se. Semente é o Sol transformado em matéria. Toda semente é muito rica em energia: podemos dizer que é a menor quantidade de matéria que armazena o máximo de energia. Nenhum ser vivo é capaz de existir sem o Sol ou sua energia transformada em semente, nem mesmo o solo agrícola. Todos os alimentos saíram, saem e sairão sempre da natureza, para o homem e para o microcosmo. Sementes são os alimentos da humanidade, mas são mais que isso: elas têm a memória e a cifra para decifrar os códigos da fertilidade do solo e ambiente onde vivem. A semente é história,

registro de tudo que passou ao longo dos 3,8 bilhões de anos de vida sobre esse planeta e tudo o que a mulher começou a fazer a aproximadamente 20 mil anos com a domesticação das plantas e animais.

Grandes geneticistas recomendavam que não se comprassem sementes de fora de seu habitat e solo, pois uma semente está composta de duas partes: um código genético, que é universal, e um decifrador específico da energia da fertilidade do solo que é peculiar a cada agricultor, ou seja, unívoco. As grandes empresas transnacionais de sementes somente podem comercializar "genes", mas não podem vender o decifrador específico da energia da fertilidade do solo, pois isso é parte do ambiente. No mercado o que vale é a crença religiosa. Por exemplo, apenas uma empresa comercial de sementes comercializa valores superiores a 650.000 toneladas de sementes com um valor superior a 1 bilhão de dólares/ano. Empresas do tipo são as principais destruidoras do patrimônio de sementes na África e sua substituição provocou as epidemias de fome nos anos secos da década de oitenta e noventa. Enquanto isso, nos nossos supermercados, 1/12 de todos os produtos industrializados são comida de animais domésticos, elaborados com as mesmas matérias-primas de nossos alimentos, e em alguns países muitos cupons de alimentos são trocados por comida para cães por seu preço mais barato.... As sementes comerciais, sim, são razões da "Fome Oculta", "Miséria na África" e "Impactos Negativos" da Revolução Verde nos países pobres. Mas não esqueçamos que isso ainda é muito lucrativo. Em 1947 foi instituído o "Ponto Quatro" (RIST, 1996), praticamente desconhecido pela totalidade de funcionários e jovens pesquisadores latino-americanos, levados à América para aprenderem submissão e servidão aos seus interesses.

Segundo Marx (1968) é na esfera da agricultura que a grande indústria opera de forma mais revolucionária, já que liquida o baluarte da velha sociedade, a camponesa, substituindo-a pelo assalariado (...). O modo de produção capitalista consome o desgarre do lado familiar originário entre a agricultura e manufatora, o qual envolvia a figura infantilmente rudimentar de ambas (...). Com a preponderância incessantemente crescente da população urbana, acumulada em grandes centros pela produção capitalista, de um

lado, acumula a força motriz histórica da sociedade e, de outro, perturba o metabolismo entre o ser humano e a terra. Isso é, bloqueia-se o retorno ao solo daqueles componentes que foram consumidos pelo ser humano sob a forma de alimento e vestimenta, retorno que é condição natural eterna da fertilidade permanente do solo. Com ele destrói, ao mesmo tempo, a saúde física dos operários urbanos e a vida intelectual dos trabalhadores rurais (...). Igual que na indústria urbana, a força produtiva acrescentada e maior mobilização do trabalho na agricultura moderna se obtêm devastando e extenuando a força de trabalho da mesma. E todo o progresso da agricultura capitalista não é só um progresso na arte de espoliar o operário, senão, também, a arte de espoliar o solo; todo avanço no aumento de fertilidade do solo durante um período é um avanço no esgotamento das fontes duradouras de fertilidade. Esse processo de destruição é tanto mais rápido, quanto mais tome um país – como é o caso dos Estados Unidos da América do Norte - a grande indústria como ponto de partida e fundamento de seu desenvolvimento. A produção capitalista, por conseguinte, não desenvolve a técnica e a combinação do processo social de produção senão socavando, ao mesmo tempo, os dois mananciais de toda a riqueza: a terra e o trabalhador.

Para compreender melhor a importância de uma semente, tomemos o exemplo de uma colmeia. Nela, todas as abelhas são filhas da rainha, formando verdadeiros clones. Porém, quando alimentamos algumas dessas filhas com geleia real, há uma grande diferença, pois essas deixam de ser estéreis, tornam-se férteis e são rainhas. O poder não está no gene, está na semente, o "decifrador da fertilidade do solo agrícola". Outro exemplo: há oito mil anos o homem começou a domesticar o lobo, único ancestral de todas as raças de cães, e como tal possuem os mesmos genes dele. Mas, há muita diferença entre um cãozinho Chihuahua, Xoloitzcuintle exótico ou gigantesco Fila brasileiro. Contudo, os genes nas sementes podem ser comercializados.

Entretanto, o poder está no ambiente. O agricultor tem a fertilidade do seu solo. O "código da fertilidade do solo" é parte do ambiente do agricultor.

Por isso os chineses afirmam que a agricultura é a arte de cultivar o Sol. O solo é um patrimônio da humanidade sob fideicomisso dos agricultores, assim como as sementes, nossos alimentos. Uma parte dos minerais migra com as colheitas, outra retorna nos restos das colheitas e estercos, sendo reincorporada, reativando os ciclos do microcosmo, em que as plantas nativas operam com importância vital para a ascensão das partes minerais lixiviadas, provocando a serule, sucessão vegetal e evolução. Essas reações eletrônicas de fótons, oxidações, reduções, fermentações, decomposições do microcosmo formam novos compostos biogeoquímicos que dão perenidade à fertilidade do solo. São vários os exemplos de pioneiros na revitalização do solo (Tabela 4). Com as extrações contínuas de minerais pelas colheitas, erosão e lixiviação há um envelhecimento no microcosmo que necessita ser revitalizado, mas a ruptura na relação das ervas nativas (mal chamadas de "daninhas") e a rocha-mãe, no espaço-tempo, impede tal fluxo energético.

Quando isso não é possível, como na grande parte das vezes, podemos remediar com farinhas de rocha, pois o papel mais importante delas não é o rejuvenescimento dos solos, mas evitar o efeito estufa e mudança climática pela corrosão química fixadora dos Óxidos de Nitrogênio, Metano e Gás Carbônico que a promovem as vantagens da remineralização: (1) restauração de elementos, traços e subtraços, perdidos ao solo; (2) incremento do valor nutricional dos alimentos e alimentação animal; (3) aumento das colheitas em quantidade e qualidade; (4) aumento da resistência das plantas às pragas e doenças. (5) aumento do complexo húmico do solo; (6) realce da atividade microbiana; (7) realce das populações de minhocas; (8) realce do sabor da fruta e de hortaliças e legumes; (9) ajuda na retenção da umidade do solo; (10) ajuda na melhoria do desenvolvimento do sistema radicular; (11) redução da susceptibilidade das plantas ao clima (resistência); (12) redução da erosão do solo; (13) redução da mortalidade no transplante das mudas; (14) redução da necessidade de fertilizantes químicos solúveis pelas plantas; (15) diminuição de problemas de saúde por redução do uso de herbicidas e agrotóxicos; (16) diminuição da contaminação do solo e água por redução dos agrotóxicos; (17) conformidade com as metas da agricultura sustentável. Assim poderemos ter o Sol se transformando

em rocha e novamente recompor nossa saúde e as neves eternas do Kilimanjaro, onde especulam os cientistas haver surgido à vida nesse planeta.

O silêncio foi profundo. Os assessores e professores presentes copiavam a transversalidade e interdisciplinaridade dos seus próprios

Tabela 4. Descrição sucinta dos pioneiros nos procedimentos de renovação dos solos.

Pioneiro	Aplicação
Julius Hensel	No século 19, antes do surgimento dos fertilizantes químicos, fundou um movimento na Alemanha para o uso de farinhas de rocha na agricultura familiar
George Earp-Thomas	No início do século 20, o pesquisador neozelandês encontrou solos em New Jersey com perda de minerais, em particular, os elementos-traço, conseguindo devolver a fertilidade natural
James Ruegg	No fim do século 20, usou rochas vulcânicas para restaurar a produtividade de uma fazenda
Maynard Murray	No período entre 1938-1950, Murray demonstrou a eficiência dos produtos marinhos para recuperar o teor de micronutrientes no horizonte superior do solo e aprimorar os cultivos e produção animal
Don Jansen	Deu continuidade aos estudos de Murray com hidroponia na Flórida (EUA) e Haiti
Barrie Oldfield	Recuperou solos antigos intemperizados na Austrália ocidental, por meio de pó de granito
Joseph Lionel	Descobriu um minério hidrotermal em Colorado (EUA) que podia ser usado como fertilizante e suplemento animal
John Hamaker	Na segunda metade do século 20, melhorou a qualidade do milho e grão em Missouri (EUA) pelo uso de uma grava glacial fina
Tom McDonald	Nos anos oitenta, descobriu os benefícios da grava glacial fina para produzir vegetais saudáveis com baixas taxas de fertilizantes
Robert Bruck	Nos anos oitenta, Bruck demonstrou que o pó de rocha contribuiu ao rejuvenescimento de florestas submetidas à chuva ácida e ar poluído, nos Apalaches (Carolina do Norte, EUA)
Tom Spereano	Em 1997, produziu avanços no entendimento da produtividade hidropônica em relação aos fertilizantes com micronutrientes
Jared Milarch	Demonstrou que fertilizantes com micronutrientes podem aprimorar produção de árvores e tomates

Fonte: Yarrow (2006).

subsídios. Não houve campainha, nem a saudação: "*Até sexta-feira*", mas a primeira aula estava suspensa. Imediatamente todos se perfilaram e começaram a entoar o hino. No estribilho eles levantavam o braço esquerdo e golpeavam o ar: *Vem, lutemos punho erguido. Nossa força nos leva a edificar. Nossa pátria livre e forte construída*. Eu estupefato comecei a ressublimar.

Referências

ADAMO, P. D.; WHITNEY, C. **Los grupos sanguíneos y la alimentación**. Buenos Aires: Ediciones B, 1998. 352 p.

ALLSWANG, J. M. **The new deal and american politics**: a study in political changes**.** New York: J. Wiley**,** 1978. 155 p.

BEAR, F. E.; TOTH, S. J.; PRINCE, A. L. Variation in mineral composition of vegetables. **Soil Science Society Americal Proceedings**, Madison, v. 13, p. 380-384, 1948.

BENEVIDES, C. **Falta de acordo em Cancún é melhor que acordo ruim**. Disponível em: <http://www.bbc.co.uk/portuguese/economia/story/2003/09/030915_rrcassucaon.shtml>. Acesso em: 17 out. 2006.

BROWN L. R. **Seeds of change**: the green revolution and development in the 1970s. New York: Praeger, 1970. 205 p.

COCANNOUER, J. A. **Weeds guardians of the soil**. New York: DeVin-Adair, 1950. 179 p.

FERNÁNDEZ, L. S. **Isabel I, reina**. Barcelona: Ariel, 2000. 493 p.

HARDIN, G. The tragedy of the commons. **Science**, New York, v. 162, p.1243-1248, 1968.

HOWARD A. **An agricultural testament**. New York: Oxford University Press, 1943. Disponível em: <http://journeytoforever.org/farm_library/howardAT/ATtoc.html#contents >. Acesso em: 16 out. 2006.

JOHNSON, C. **The Mayflower and her passengers**. Philadelphia: Xibris, 2005. 292 p.

KERVRAN, C. L. **A la découverte des transmutations biologiques, avec dédicace**. Paris, FR: Librairie Maloine, 1966. 189 p.

LANGMUIR D. B. **The biosphere**. New York: Copernicus, 1998. 192 p.

LIEBIG, J. **Chemistryin its application to agriculture and physiology**. London, UK: Taylor and Walton, 1843. 400 p.

MARGULIS, L.; SAGAN, D. **Microcosmos**: four billion years of evolution from our microbial ancestors. Berkeley: University of California, 1997. 304 p.

MARX, K. **O capital**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1968. v. 1. 850 p.

MENZIES, G. **1421**: the year China discovered America. London, UK: Morrow Avon, 2003. 576 p.

ODUM, H. T. **Environmental accounting: emergy and environmental decision making. New York: J. Wiley, 1996. 370 p.**

PINHEIRO, S.; BARRETO, S. B. **MB-4**: agricultura sustentável, trofobiose e biofertilizantes. Porto Alegre: Fundação Juquira Candiru, 1996. 273 p**.**

PINHEIRO, S. **Pães de pedra**. Porto Alegre: Fundação Juquira Candiru, 2003. 79 p.

PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **A nova aliança**: metamorfose da ciência. Brasília, DF: Editora da UnB, 1997. 226 p.

RIST, G. **Le développement, histoire d'une croyance occidentale**. Paris, FR: Sciences, 1996. 426 p.

SCHRÖDINGER, E. **What is life?**: mind and matter. Cambridge: University Press, 1967. 186 p.

SCIENCEMAN, D. M. **The emergy synthesis of religion and science**. Florida: University of Florida, 1995. 13 p.

SENGE, P. M. **A quinta disciplina**. São Paulo: Best Seller, 1990. 444 p.

THOMAS L. **The lives of a cell**. New York: Viking, 1974. 153 p.

TOFFLER, A. **A terceira onda**. Rio de Janeiro: Record, 2000. 492 p.

WASHINGTON, I. **Vida del almirante Don Cristóbal Colón**. Madrid: Istmo, 1990. 851 p.

YARROW, D. **The earth renewel and restoration alliance**. Disponível em: <http://www.championtrees.org/>. Acesso em: 5 out. 2006.

Parte 2

Estratégias de gestão em recuperação de áreas degradadas por mineração

Capítulo 1

Cinco subsistemas de recuperação ambiental
Uma proposta de gestão holônica

James Jackson Griffith

Introdução

Em essência, este trabalho representa um convite para participar da construção de uma nova entidade de análise e síntese – uma "holarquia" – para modelar a recuperação de áreas degradadas. É uma chamada para novas ideias, sendo bem-vindas as sugestões de especialistas e de generalistas. Acredita-se que as contribuições de pessoas de diversas áreas poderiam acrescentar muito ao desenvolvimento de excelentes modelos para a recuperação ambiental.

Já existe uma primeira tentativa para fazer essa modelagem, que pode servir como ponto de partida. Griffith e Toy (2005) propuseram um modelo de pensamento sistêmico para explicar os desdobramentos da degradação ambiental (Figura 1). Por meio de círculos de causalidade, mostraram como os sistemas físico e social, ao serem perturbados, chegam, mais cedo ou mais tarde, a um estado de estabilidade dinâmica por meio de processo de retroalimentação.

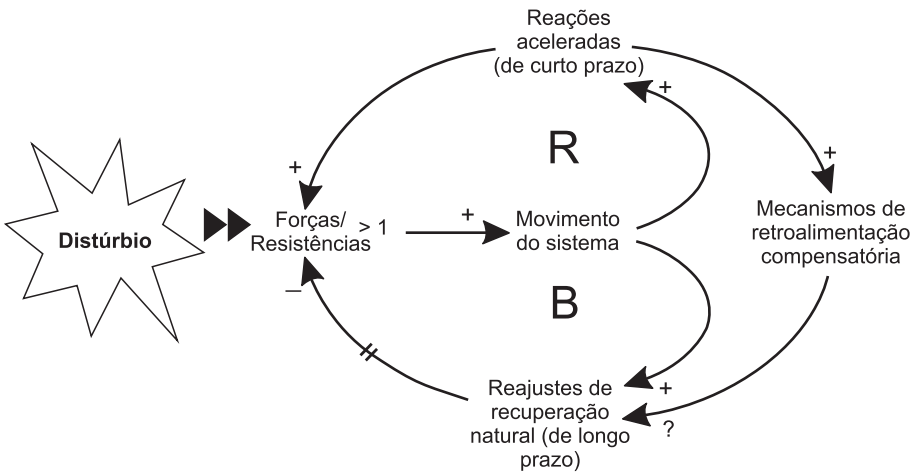


Figura 1. Síntese para diagnosticar a dinâmica pós-distúrbio de sistemas em geral.
Fonte Griffith e Toy (2005).

Mesmo que esse ensaio inicial tenha sido útil, há que melhorá-lo, para avançar no desenvolvimento de uma coleção maior de modelos. Falta incorporar na modelagem muito conhecimento para cobrir mais adequadamente os múltiplos aspectos da recuperação ambiental. Com esse propósito, são apresentadas neste capítulo duas sugestões, que serão descritas a seguir.

Primeiramente, sugere-se desenvolver tanto a visão "micro" quanto a visão "macro" de uma paisagem degradada. Segundo a visão "macro" da Figura 1, o movimento sistêmico é desencadeado em geral por distúrbios em ciclos de retroalimentação de curto, médio e longo prazo. É possível reformular o diagrama, renomeando as variáveis para cada tema (solo, água, vegetação, etc.), visando modelar situações mais específicas de degradação. Essa é a primeira sugestão. Em segundo lugar, sugere-se que se aplique a noção de "holarquia" – um tipo ou variação de hierarquia – para compreender melhor a dinâmica das paisagens em recuperação. Muitos sistemas possuem uma estrutura "holônica", uma relação *todo/parte* constituída por "hólons" e "sub-hólons". Segundo Koestler (1969), o primeiro a aplicar o termo "hólon", o conceito de união de uma holarquia permite uma visão mais adequada para enxergar sistemas complexos do que a forma tradicional de análise. O reducionismo tradicional procura subdividir sucessivamente o fenômeno analisado em partes menores até encontrar suas substâncias mais básicas (CAPRA, 2001).

Hólons e holarquia têm muito a ver com recuperação ambiental. O comportamento holônico explica como os ciclos de reforço de um sistema são capazes de suportar perturbações menores do ambiente ou reagir em conjunto para reparar danos causados por distúrbios mais severos. Incorporando essas duas sugestões, o objetivo do presente trabalho é modelar cinco subsistemas de degradação e recuperação ambiental, enfocando a semelhança de seus componentes: cursos d'água, solo, vegetação, fauna silvestre e cidades. Será demonstrado por meio de diagramas de influência que a sobreposição e redundância dos ciclos internos de cada subsistema

os tornam não somente parecidos, mas também sinérgicos quanto à dinâmica pós-distúrbio. Após uma descrição para cada subsistema ou "sub-hólon", a utilidade de enxergar todos como constituintes de uma holarquia será discutida. Conclui-se que a modelagem holônica amplia a capacidade gerencial, porque permite optar por estratégias fundamentadas em análise, em síntese ou em ambos. Lançando essas propostas, espera-se incentivar a contribuição de outras pessoas ou grupos para detalhar e aperfeiçoar os conceitos aqui apresentados.

Hólons e holarquia

À primeira vista, dividir a paisagem em subsistemas parece correr o risco de usar uma abordagem de cunho reducionista. Mas, se adotarmos a ideia de "holarquia", podemos advogar o conceito de união nos diagnósticos ambientais e, ainda, conservar a utilidade das análises tradicionais de subsistemas.

Uma "holarquia" é um conjunto de "hólons" (nesse caso, a entidade básica de análise e síntese) que costumam cooperar para alcançar um objetivo, sendo essa cooperação organizada na forma de um "sistema arborescente". Ou seja, a configuração geométrica desse conceito alternativo de sistema não se assemelha a uma pirâmide, o símbolo tradicional das hierarquias. Um organograma institucional, por exemplo, normalmente é ser enxergado como uma pirâmide por causa do fluxo descendente de poder. As decisões concentradas inicialmente em cima são distribuídas na forma de leque para as partes inferiores. Em contraste, a holarquia parece uma árvore cujos fluxos sempre correm em dois sentidos pelo tronco: das raízes para os ramos e desde os ramos até as raízes. Sendo assim, os hólons são considerados como entidades "bidirecionais" de movimentação sistêmica.

Um dos exemplos mais claros de uma holarquia é dado por Henagulph (2000), citando a seguinte relação na sintática entre as partes e o todo: as letras são as partes de palavras inteiras, enquanto as palavras são

as partes de sentenças inteiras e, por sua vez, as sentenças são as partes de parágrafos inteiros, etc.

Qual a importância disso para recuperação ambiental? Gestores podem potencializar o uso de matéria, energia e informação para o reordenamento de terras degradadas se lançarem mão de duas propriedades importantes de hólons: a cooperação sistêmica e a autoassertividade (GONZÁLEZ et al., 2006). A fim de se aproveitar dessas propriedades, vale examinar ainda mais alguns atributos relevantes dos hólons:

- Os hólons se encontram presentes em todos os níveis de análise ou síntese (as visões "micro" e "macro" já mencionadas).
- O comportamento de um hólon em determinado nível holônico pode ser próprio, não se assemelhando a hólons em outros níveis.
- Os hólons e holarquias possuem estruturas recursivas. Tanto o hólon quanto a holarquia se mantêm por meio de uma estabilidade dinâmica e cíclica. Entretanto, seus ciclos internos não são necessariamente fechados; ao contrário, são, muitas vezes, interligados a influências e efeitos externos. Constituem sistemas abertos, afastados do equilíbrio. Esses atributos qualificam a holonomia como parte da Teoria da Complexidade (WALDROP, 1992).
- Os hólons possuem uma capacidade fundamental de autopreservação ou auto-organização, sendo reforçados, muitas vezes, pela sinergia da sobreposição e presença de redundâncias entre seus componentes.

Essa última característica mostra que os sistemas holônicos se fortalecem mutuamente. Há uma retroalimentação positiva que ocorre em ciclos de reforço entre os vários subsistemas que compõem a holarquia. É por intermédio dessa dinâmica de reforço, chamada "bootstrapping", que muitos ecossistemas conseguem superar situações de degradação (PERRY et al., 1989).

Os cinco subsistemas de recuperação ambiental

Os cinco subsistemas de recuperação ambiental (quatro de natureza física e um social) agora serão chamados "sub-hólons", cada um ilustrado, a seguir, como diagrama de influências[1].

Os quatro "sub-hólons" físicos

1. Recuperação pós-distúrbio dos cursos d'água

Por meio das peculiaridades de cada um dos cinco "sub-hólons", a terra degradada comporta-se, normalmente, como uma fênix queimada que renasce das próprias cinzas. O que orienta esse renascimento é sua obediência à ordem natural embutida em cada subsistema e no seu conjunto. Não se sabe se essa ordem é real ou uma imposição de coordenadas oriundas do imaginário humano. Somente sabemos que o reordenamento espontâneo é facilmente observado em diversos exemplos da natureza. Em alguns casos, pode demorar muito, a menos que haja uma intervenção humana.

No caso do "sub-hólon" *cursos d'água* (Figura 2), a ordem natural aparece quando forças hídricas e eólicas incidem sobre a "tabla rasa" do substrato deixado pela escavação do local ou pela deposição de material por cima da topografia original. Essas intempéries deixam "gravuras" cada vez mais ordenadas na paisagem degradada, de acordo com o desencadeamento mostrado na Figura 2.

Como reação acelerada de curto prazo, há muita erosão e deslocamento de massa, processos que atingem quaisquer remanescentes de solo ou

[1] Um diagrama de influências consiste em um conjunto de círculos de causalidade, a ferramenta principal do pensamento sistêmico. É uma forma gráfica de mostrar como os sistemas operam em volteios de retroalimentação de reforço ("R") e balanceamento ("B"). As setas indicam relações entre variáveis. Os sinais de + ou – indicam se a variação se dá no mesmo sentido ou em sentidos opostos, respectivamente (ANDERSON; JOHNSON, 1997).

de curso d'água original. De suma importância é a relação *vazão/carga de sedimento* gerada pela nova situação. A interação entre o volume do fluxo da água e a quantidade de material transportado na calha é o que mais definirá os futuros parâmetros da morfologia da rede de drenagem (SCHUMM, 1977).

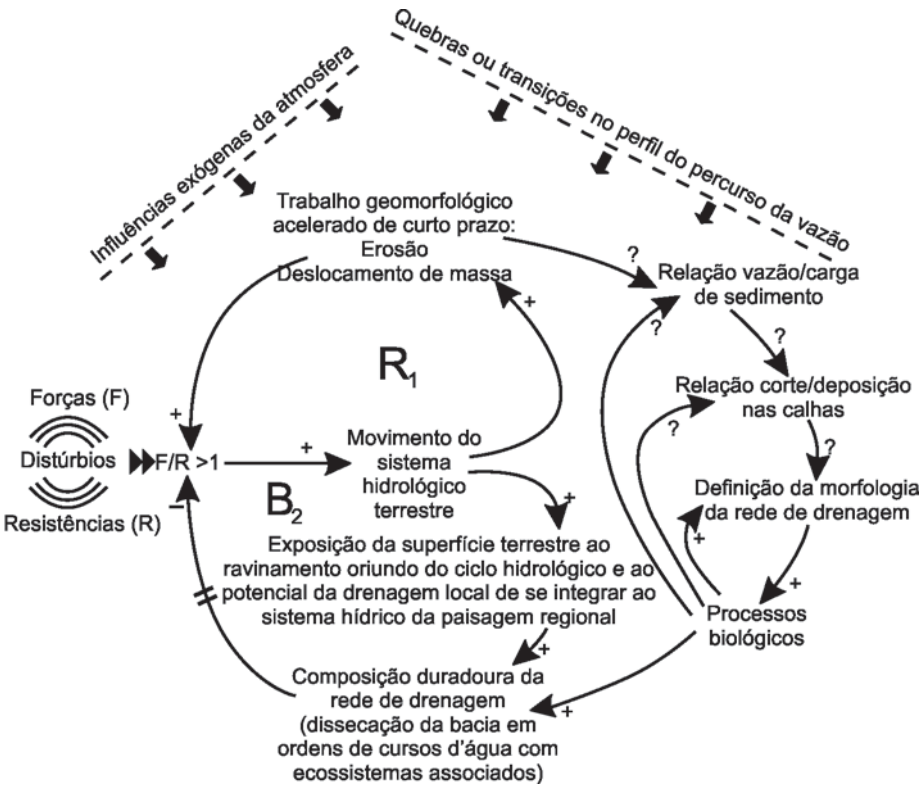


Figura 2. Dinâmica da recuperção pós-distúrbio dos cursos d'água.
Fonte: Griffith (2005).

Os percursos criados pela energia hidráulica e material carreado vão se estendendo pela definição da morfologia da rede de drenagem e pela complementação dos processos biológicos, até completarem o ciclo inteiro,

mostrado na Figura 2. A drenagem do terreno atingido fica reintegrada como parte da composição duradoura da rede maior de drenagem. Ou seja, contribui, novamente, com a dissecação da bacia regional em ordens de cursos d'água (RITTER et al., 1995) com ecossistemas associados (VANNOTE et al., 1980).

Pode demorar muito, mas eventualmente as forças de gravidade, fricção e coesão fluída conseguirão moldar um novo sistema circulatório. Uma nova configuração para distribuir as águas acaba sendo criada pela própria natureza. Esse sistema abastece, cada vez com mais eficiência, uma miríade de processos inorgânicos e orgânicos que constituem, eventualmente, a paisagem recriada (WATER AND RIVERS COMMISSION, 2000). Desse modo, o sistema hidrológico recuperado faz a sua parte para retornar o local anteriormente degradado a um estado de estabilidade dinâmica.

2. Recuperação pós-distúrbio do solo

O que mais chama atenção no "sub-hólon" *solo* (Figura 3) são os dois percursos que a evolução do substrato exposto começa a seguir, logo após o distúrbio: a) o caminho do trabalho geomorfológico (erosão e deslocamento de massa, movimentação semelhante aos processos ocorridos nos cursos d'água) (OSTERKAMP; TOY, 1994); b) o caminho da intemperização. Neste último, as partículas do substrato são sujeitas à ação de agentes atmosféricos e biológicos, resultando em alterações físicas (desintegração) e químicas (decomposição) dos minerais das rochas (NIKIFOROFF, 1942).

Logo acontece um comportamento típico de hólons: os percursos que, à primeira vista, pareciam divergentes no início do ciclo convergem num encontro sinérgico em meio prazo. No caso do "sub-hólon" *solos*, tal convergência ocorre sobre a variável "processos biológicos", porque tanto a estabilidade topográfica quanto a química interagem com o desenvolvimento dos micro e macrorganismos no solo (NIKIFOROFF, 1942; SCHAFER et al., 1979).

O aparecimento de novos horizontes de solo é um bom indicador de que o sistema pedológico finalmente chegou à nova estabilidade de F/R<1 (Figura 3). Entretanto, sem intervenção humana, esse processo de formação é muito lento. Schaefer et al (1979) constataram tal demora no desenvolvimento de novos horizontes em solos minerados de carvão mineral e abandonados no Estado de Montana, EUA. Esses estudos mostraram que, no caso da camada superior de 5 cm de profundidade, aproximadamente 50 anos serão necessários para readquirir matéria orgânica e estrutura nos mesmos níveis de solos não minerados. Não obstante, até 500 anos podem ser necessários para alcançar um novo estado de equilíbrio entre matéria orgânica e estrutura de solo em camadas de até 50 cm de profundidade.

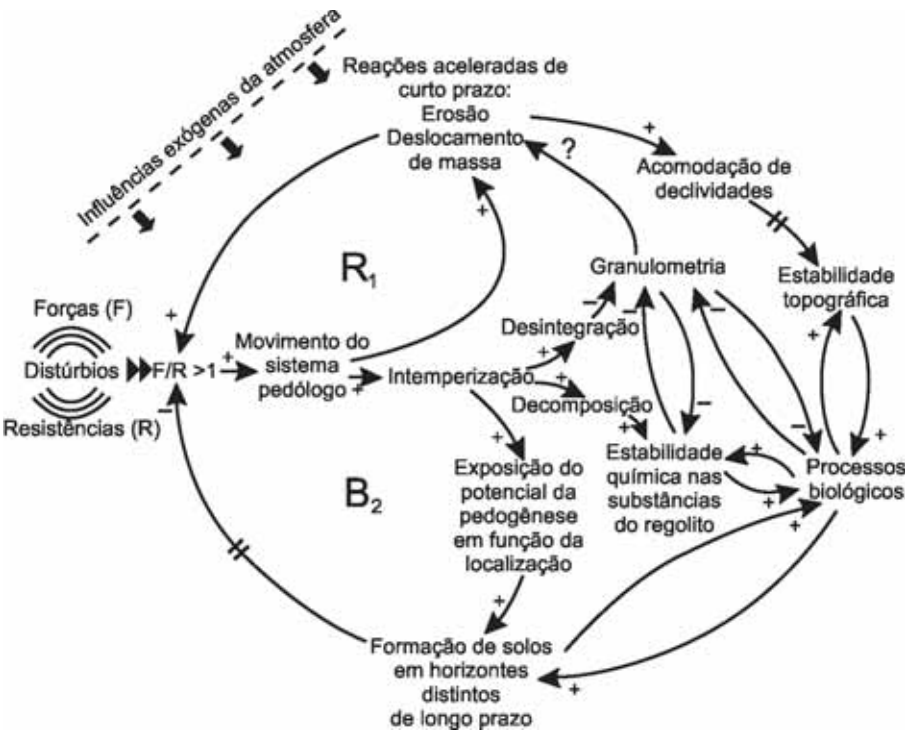


Figura 3. Dinâmica da recuperação pós-distúrbio do solo.
Fonte: Griffth (2005)

3. Recuperação pós-distúrbio da cobertura vegetal

A dinâmica da sucessão ecológica vegetal, após a denudação do solo (Figura 4), segue uma sequência bem conhecida: a dispersão de propágulos, o estabelecimento dos vegetais, as reações entre as plantas e seu habitat, a competição entre elas e, finalmente, a nova estabilidade de um padrão mais duradouro de associação entre espécies (REDENTE et al.,1993).

A parte mais óbvia da sequência é o estabelecimento das espécies pioneiras – aquelas capazes de suportar as condições árduas do local degradado. O verdor da folhagem e a textura dessas primeiras plantas começam a recobrir o austero substrato até então exposto. Entretanto, a longevidade das pioneiras é curta e seu regime tende a ser caótico. De acordo com a sucessão ecológica, é de se esperar que logo aparecerão outras espécies

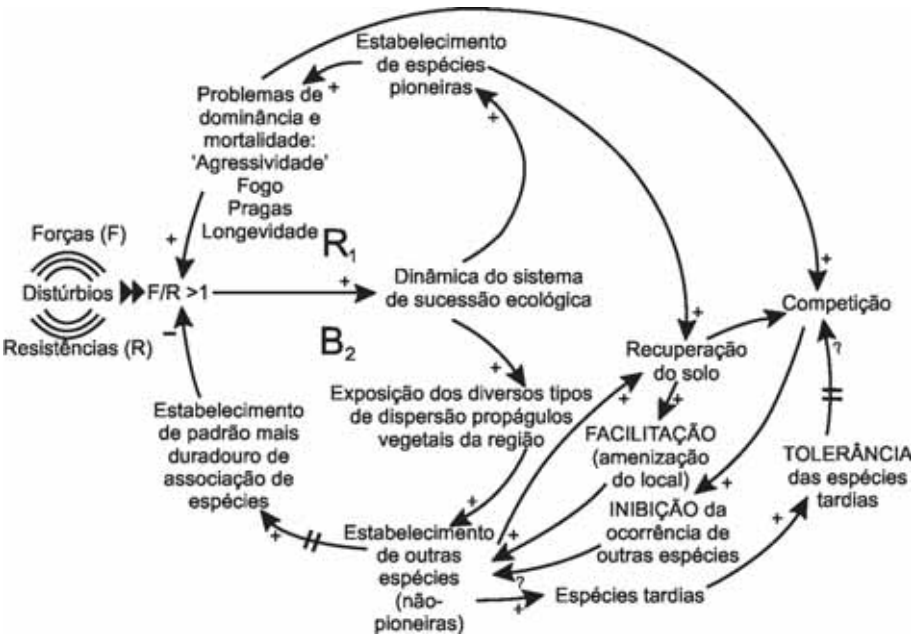


Figura 4. Dinâmica da recuperação pós-distúrbio da cobertura vegetal.
Fonte: Griffth (2005).

e comunidades. As interações mais sofisticadas entre essas plantas com o meio constituirão, por meio de retroalimentação positiva, nova estabilidade e resiliência (PERRY et al., 1989).

Connell e Slatyer (1977) afirmaram que as taxas de mudança que regulam toda a sequência da sucessão são controladas, principalmente, por três variáveis:

Facilitação: afeta principalmente a melhoria dos solos, mas inclui efeitos positivos de sombreamento e umidade em razão da presença física das espécies pioneiras.

Inibição: as espécies precoces na sucessão retardam o estabelecimento e crescimento de outras espécies, especialmente pela competição.

Tolerância: as espécies tardias de ciclo longo conseguem sobreviver (porém, sem muita expressão nessa fase de espera) na presença das outras plantas mais precoces. Estas, por um tempo, gozam do pleno vigor em comparação com a espera das espécies tardias, porque são de ciclos mais curtos.

Redente et al. (1993) apresentam sugestões para manipular a dinâmica das comunidades vegetais, visando melhorar o estabelecimento das plantas, acelerar o ritmo da sucessão ecológica e aumentar a biodiversidade do local anteriormente degradado. Alcançar estabilidade na relação *solo-planta* é fundamental para que as comunidades ecológicas não continuem sofrendo, demoradamente, perturbações adicionais após o distúrbio inicial. Dessa forma, a associação das espécies entra, finalmente, em novo padrão de equilíbrio (PERRY et al, 1989).

4. Recuperação pós-distúrbio das populações faunísticas silvestres

O "sub-hólon" *fauna silvestre* (Figura 5) exibe grande grau de paralelismo com o "sub-hólon" *vegetação*. Da mesma forma que as plantas pioneiras são substituídas pelas tardias no subsistema vegetal, encontra-se

uma sequência semelhante no subsistema da fauna silvestre. No caso dos animais, a colonização de espécies "r" prolifera a curto prazo, sendo então substituídas pela colonização de espécies "K", estas[2] sendo mais eficientes, a longo prazo, em termos de alimentação e uso do espaço físico. Em médio prazo, podem ocorrer, na sequência, outras espécies com uma mistura das características "r" e "K" (MAJER, 1989; SOUTHWOOD, 1977).

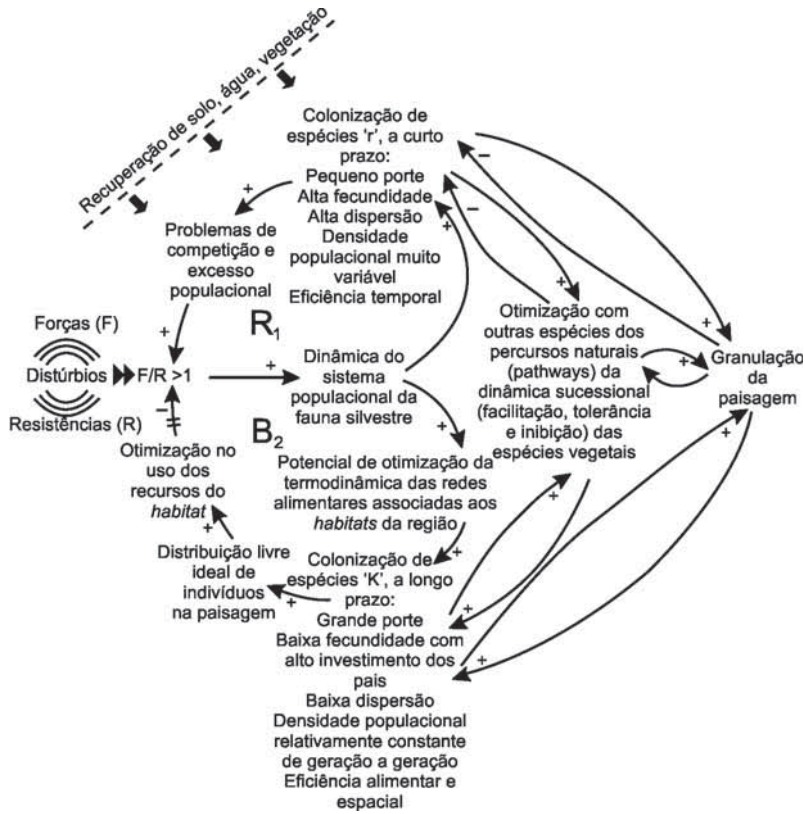


Figura 5. Dinâmica da recuperação pós-distúrbio das populações faunísticas silvestres.

Fonte: Griffth (2005).

[2] Os termos "r" e "K" são derivados da equação de Verhulst para as dinâmicas populacionais, em que "r" é a taxa de crescimento da população e "K" é sua capacidade de carga.

Outro ponto interessante nesse paralelismo é a adaptação que a população animal faz para ocupar os habitats criados pelos percursos naturais das comunidades de plantas (MAJER, 1989). Ou seja, a dinâmica (facilitação, inibição ou tolerância), sendo obedecida num determinado momento pelas plantas (Figura 4), é acompanhada, também, pela presença de animais adaptados para viver no meio dessa dinâmica (Figura 5).

Ricklefs (1996) sugere que a otimização energética desses percursos – uma relação habitat/animal guiada pela termodinâmica das redes alimentares – traz, como consequência, uma "granulação" da paisagem. Segundo esse autor "[...] o conceito de granulação relaciona o tamanho de uma parte ao espaço de atividade do organismo (o conjunto de condições ambientais que são adequadas para a atividade do indivíduo)" (RICKLEFS, 1996, p. 159). Tal granulação pode ser grossa (perceptível pelo indivíduo e sujeito a sua escolha) ou fina (o ambiente consiste de partes tão pequenas que parece essencialmente uniforme, mesmo aos indivíduos que o exploram).

Como resultado, ainda segundo Ricklefs (1996), "[...] cada indivíduo na população explora uma parte de igual qualidade *percebida*", resultando num efeito chamado de "distribuição livre ideal" (RICKLEFS, 1996, p. 161)., ou seja, um padrão de seleção de habitat. Mais uma vez, o sistema, no seu retorno à nova estabilidade, leva à otimização no uso dos recursos, que, dessa vez, são os habitats explorados pelas populações de fauna silvestre.

O "sub-hólon" social

Revitalização pós-distúrbio da autopoiese urbana

Griffith e Berdague (2006) postularam que o cerne de toda degradação e recuperação ambiental é a cidade. Sugerem que a organização urbana funciona de uma maneira semelhante à autopoiese orgânica, descrita por Maturana e Varela (2001).

Da mesma forma que um organismo multicelular, a cidade possui uma organização interna, cuja dinâmica é ligada estruturalmente à sua fronteira. Essa "membrana semipermeável" (para estender a metáfora orgânica) pode ser um limite físico, psíquico ou ambos. A "cidade autopoiética" é capaz de controlar diretamente os fluxos de entrada e saída por meio dessa fronteira.

Sendo assim, a cidade estabelece dois tipos de inter-relacionamento com seu entorno: a) com o meio "inerte" (pode ser com o mundo físico de solos, água, etc.) ou b) com outros componentes "vivos" numa relação "dialógica" (muitas vezes entre próximos). Normalmente, essas relações, sejam físicas ou dialógicas, são bastante conflituosas. Um conflito de uso da terra que ocorre na cidade e no campo da atualidade brasileira é o confronto entre as populações rurais e urbanas.

Esses eventos são, normalmente, assimilados positivamente pelo sistema urbano por meio da aplicação de conhecimentos e comportamentos adequados (Figura 6). A ontogenia de uma cidade é desencadeada positivamente por eventos de perturbação. Em alguns casos, porém, ocorrem conflitos que a autopoiese urbana não é capaz, pelo menos em curto prazo, de processar adequadamente. De acordo com esse conceito, a degradação física ou social é causada por interações que se mostram destrutivas à autopoiese urbana, podendo levá-la à desintegração como unidade (GRIFFITH; BERDAGUE, 2006).

É impressionante a capacidade da cidade para despontar respostas para resolver conflitos físicos ou sociais, desenvolvidas por seu complexo científico-tecnológico (WHYTE, 1970). Por meio do efeito sinérgico da concentração de talentos, recursos e conhecimentos adequados, surgem novas soluções capazes de converter ameaças ambientais em riscos gerenciáveis.

Historicamente, os círculos de causalidade têm sido usados para estudar cidades. Forrester (1969), por exemplo, usou tal diagramação para modelar a dinâmica urbana e acrescentou a simulação matemática para esse fim. No caso da autopoiese urbana, os círculos de causalidade mostrados na

Figura 6 traçam o movimento pós-distúrbio da semiose urbana. A semiose é o universo dos símbolos, um conceito relevante nesse caso, porque é por meio da manipulação benéfica dos símbolos (o desenvolvimento de novas tecnologias e atitudes sobre o uso da terra, por exemplo) que a sociedade consegue revitalizar suas cidades (GRIFFITH; BERDAGUE, 2006).

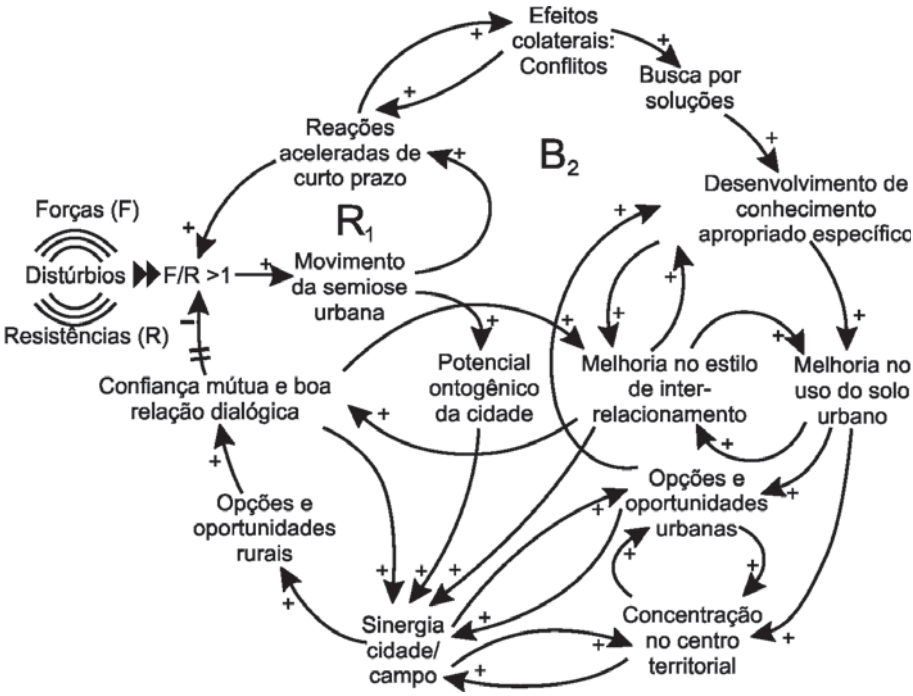


Figura 6. Dinâmica da revitalização pós-distúrbio da autopoiese urbana.
Fonte: Griffth e Berdague (2006).

Uso dos diagramas

Como aplicar essa coletânea de "sub-hólons" no dia a dia da recuperação ambiental? Considerados como constituintes de uma holarquia, os cinco sub-hólons podem ser interpretados e aplicados tanto em análise como em síntese.

Intervenções por análise

Muitos gestores de recuperação ambiental preferem fundamentar suas ações em análise (Figura 7). O gerente que pratica esse estilo deve, de fato, começar seu trabalho enxergando a paisagem como um todo (pode ser uma holarquia inteira em colapso) e não fragmentada (NAVEH; CARMEL, 2002). Mas, logo, esse gestor perceberá a vantagem de destrinchar o fenômeno da terra que foi degradada nas suas partes constituintes. Ao analisar cada "sub-hólon" individualmente, descobrirá, provavelmente, que um subsistema em especial – normalmente o mais fraco – falhou antes dos demais.

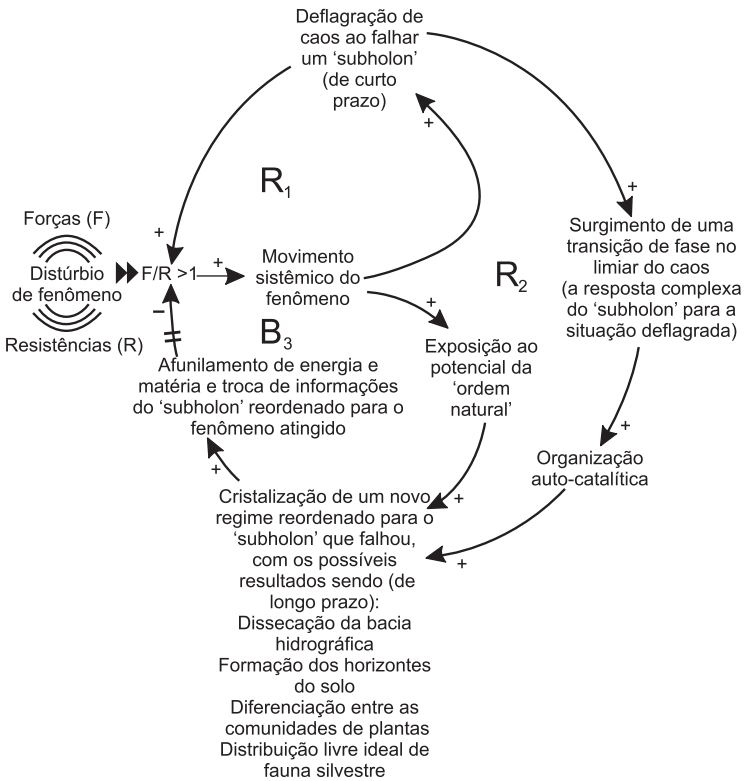


Figura 7. Reordenamento pós-distúrbio de um "subholon" sob a ótica da análise (a subdivisão do todo em partes).

Fonte: Griffth e Toy (2005).

A identificação desse "sub-hólon" deflagrador é uma pista importante por causa da sua movimentação caótica. Esse "elo fraco" se comporta assim, porque um limiar interno foi ultrapassado; algo aconteceu dentro da entidade que violou um limite da sua composição. Depois, as mudanças abruptas do "sub-hólon" deflagrador começam a atingir os outros "sub-hólons" da holarquia, mesmo que eles continuem estáveis por algum tempo. Finalmente, acabam demonstrando, também, comportamentos irregulares, porque toda a holarquia é interligada entre si; os limiares dos outros constituintes acabam sendo atingidos com maior ou menor efeito dentro do sistema inteiro.

Providências adequadas de reparo precisam ser tomadas pelo gestor analítico, "sub-hólon" por "sub-hólon". O melhor ponto de partida poderia ser o conserto do "sub-hólon" deflagrador, aquele que falhou em primeiro lugar. Da mesma forma que foi esse mais fraco que detonou o resto, seu reordenamento poderia, também, ser o "estopim" para revitalizar os demais.

Existem várias possibilidades de reordenamento em termos de "sub-hólon" individual. Para o "sub-hólon" *cursos d'água*, pode ser a reintegração da drenagem local no padrão da dissecação natural da bacia. No caso do "sub-hólon" *solo*, pode ser a aceleração dos processos biológicos a favor da formação de novos horizontes A e B. Para o "sub-hólon" *vegetação*, pode ser a introdução de espécies que garantam uma futura associação estável entre comunidades de plantas. No "sub-hólon" *fauna silvestre*, a introdução de animais que sejam compatíveis aos estágios de facilitação, inibição e tolerância da vegetação pode ser a medida certa.

Intervenções por síntese

O gestor também pode fundamentar suas ações em síntese (Figura 8). Nesse caso, seu objetivo é restabelecer sinergia entre os "sub-hólons" constituintes da holarquia. Isso exige um respeito rigoroso à estrutura única de cada "sub-hólon", sem tentar embaçar as diferenças essenciais entre um

e outro. É interessante observar que o verdadeiro sentido de *confusão*, quanto às holarquias, é a existência de uma integração forçada entre "sub-hólons" que não tem cabimento.

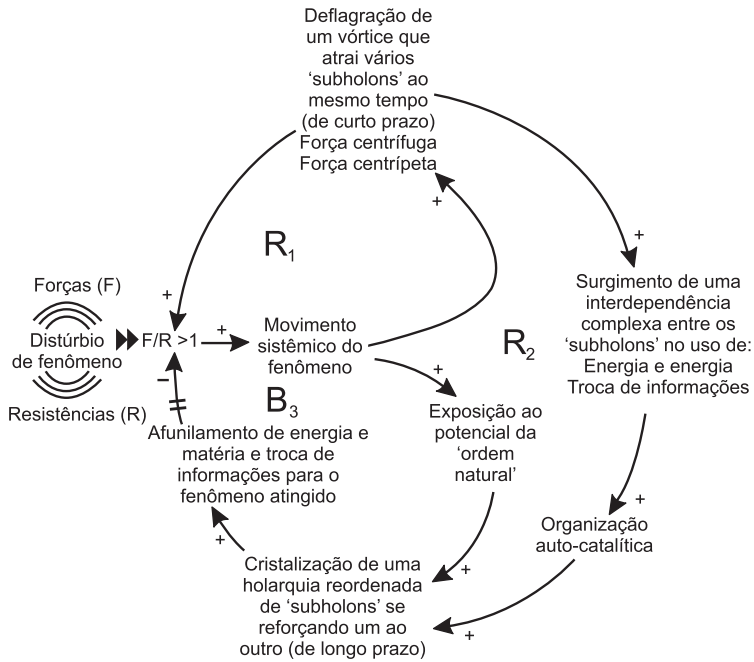


Figura 8. Reordenamento pós-distúrbio de uma holarquia, sob a ótica da síntese (a unificação das partes no todo).
Fonte: Griffth e Toy (2005).

Uma das evidências mais claras da ação unificadora de síntese em holarquias é a frequente ocorrência de vórtices no seu meio. Pode-se dizer que os hólons possuem a capacidade inata de formar vórtices. A bidirecionalidade da arborescência, nesse caso, é constituída por forças centrífugas (para fora) e centrípetas (para dentro), e os dois são movimentos complementares.

Vórtices são encontrados em vários fenômenos físicos e podem ser constatados, também, em ambientes sociais. Pode haver, por exemplo,

um vórtice emocional que canaliza as energias sentimentais de um grupo. Muitas vezes, temos uma imagem ruim de vórtices, como no caso dos furacões, sem perceber seu lado positivo. Na verdade, a criação de um vórtice é uma das maneiras mais eficientes para a natureza distribuir energia. Exemplos específicos da capacidade organizadora de vórtices são claramente vistos em cursos d'água (o padrão de rio *canal entrelaçado* é um eficiente dissipador de energia), em plantas (o crescimento espiral de folhagem), e na aerodinâmica de aves (os gansos ou grous voando em "V" criam vórtices coletivos e benéficos nas pontas de suas asas).

A "cristalização da holarquia", variável colocada na parte inferior da Figura 8, significa a mudança de um estado amorfo de "sub-hólons" separados e conflitantes para a harmonia do conjunto. É raro encontrar um gestor que consiga regenerar uma holarquia sinérgica completa; é quase impossível rejuntar 100% das peças do "quebra-cabeça" de uma paisagem degradada. Mas, pelo menos, um gestor competente pode iniciá-la. A partir disso, começa a surgir dentro da holarquia um afunilamento de energia, matéria e troca de informações, tudo em favor do fenômeno que tinha perdido a sua resiliência (Figura 8).

Considerações finais

Um distúrbio ou evento ecológico atinge ao mesmo tempo vários aspectos da paisagem, incluindo a água, o solo, a vegetação, a fauna silvestre e a ocupação humana. A dinâmica que resulta do distúrbio é semelhante para cada subsistema envolvido. Em razão dessa semelhança, foi aplicado um diagrama de influência padrão para explicar a dinâmica de cada "sub-hólon", o que permite construir, também, uma holarquia da paisagem reordenada.

Este trabalho deixa alguns aspectos filosóficos para serem discutidos em outra oportunidade. Eles incluem observações sobre a recursividade dos sistemas envolvidos, as inconsistências do padrão de movimento entre algumas variáveis (indicados pelo sinal "?" ao lado da seta do conector em

alguns diagramas) e o conceito de "ordem natural", atrás da potencialização dos processos de reordenamento.

A proposta holônica de recuperação ambiental foi apresentada aqui para ser criticada e melhorada. Mesmo que a proposta não tenha chegado neste ensaio a um nível muito sofisticado (da simulação matemática, por exemplo), acredita-se que houve um avanço considerável no pensamento sistêmico sobre o assunto. Temos, agora, uma ideia inicial de como pelo menos cinco subsistemas ou "sub-holóns" funcionam individualmente. Ao mesmo tempo, começamos a entender como eles se inter-relacionam como sistema arborescente, formando uma holarquia que compõe o todo da recuperação ambiental.

Referências

ANDERSON, V.; JOHNSON, L. **Systems thinking basics**: from concepts to causal loops. Cambridge: Pegasus, 1997. 132 p.

CAPRA, F. **A teia da vida**: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos. São Paulo: Cultrix, 2001. 256 p.

CONNEL, J. H.; SLATYER, R. O. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. **American Naturalist**, Chicago, v. 111, p. 1119-1144, 1977.

FORRESTER, J. W. **Urban dynamics**. Waltham: Pegasus Communications, 1969. 285 p.

GONZÁLEZ, F. A.; RUIZ, J. R. L.; BARCENA, M. M.; CARRILERO, M. S.; SÁNCHEZ, V. S. La holónica como marco paradigmático para el diseño de interfaces. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA DE PROYECTOS, 10., 2006, Valencia. **Libro de ponencias**... Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2006. 12 p.

GRIFFITH, J. J.; BERDAGUE, C. Autopoiese urbana e recuperação ambiental. **Saneamento Ambiental**, São Paulo, v. 16, n. 120, p. 65-70, 2006.

GRIFFITH, J. J.; TOY, T. J. O modelo físico-social da recuperação ambiental. **Brasil Mineral**, São Paulo, v. 22, n. 242, p. 166-174, 2005.

HENAGULPH, S. **Three pillars of transdisciplinarity**. 2000. Disponível em: <http://www.goodshare.org/pillars.htm>. Acesso em: 24 fev. 2006.

KOESTLER, A. Beyond atomism and holism: the concept of the holon. In: KOESTLER, A; SMITHIES, J. R. (Ed.). **Beyond reductionism**: new perspectives in the life sciences. London, UK: Hutchinson, 1969. p. 192-216.

MAJER, J. D. **Animals in primary succession**: the role of fauna in reclaimed lands. Cambridge: University Press, 1989. 547 p.

MATURANA, H. R.; VARELA, F. J. **A árvore do conhecimento**: as bases biológicas da compreensão humana. São Paulo: Palas Athena, 2001. 288 p.

NAVEH, Z.; CARMEL, Y. Landscape complexity versus ecosystem complexity: implication for landscape planning and management. In: CONGRESSO NAZIONALE DELLA SOCIETA ITALIANA DI ECOLOGIA, 12., 2002, Urbino. **Atti...** Urbino: Societa Italiana di Ecologia, 2002. p. 35-54.

NIKIFOROFF, C. C. Fundamental formula of soil formation. **American Journal of Science**, New Haven**,** v. 240, n. 12, p. 847-866, 1942.

OSTERKAMP, W. R.; TOY, T. J. The healing of disturbed hillslopes by gully gravure. **Geological Society of America Bulletin**, New York, v. 106. p. 1233-1241, 1994.

PERRY, D. A.; AMARANTHUS, M. P.; BORCHERS, J. G.; BORCHERS, S. L.; BRAINERD, R. E. Bootstrapping in ecosystems. **Bioscience**, Washington, DC, v. 39, n. 4, p. 230-238, 1989.

REDENTE, E. F.; MCLENDON, T.; DEPUIT, E. J. Manipulation of vegetation community dynamics for degraded land rehabilitation. In: SÍMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA FLORESTAL, 1., 1993, Belo Horizonte. **Anais...** Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1993. p. 265-278.

RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1996. 470 p.

RITTER, D. F.; KOCHEL, R. C., MILLER, J. R. **Process geomorphology**. Boston: W. C. Brown, 1995. 539 p.

SCHAFER, W. M.; NIELSEN, G. A.; DOLLHOPF, D. J.; TEMPLE, K. **Soil genesis, hydrological properties, root characteristics and microbial activity of 1-to 50-year-old stripmine spoils**. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency, 1979. 233 p. (SEA-CR IAG, D6-E762).

SCHUMM, S. A. **The fluvial system**. New York: J. Wiley, 1977. 338 p.

SOUTHWOOD, T. R. E. Habitat: the templet for ecological strategies? **Journal of Animal Ecology**, Oxford, v. 46, p. 337-65, 1977.

VANNOTE, R. L.; MINSHALL, G. W.; CUMMINS, K. W.; SEDELL, J. R.; CUSHING, C. E. The stream continuum concept. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,** Ottawa, CA, n. 37. p. 130-137, 1980.

WALDROP, M. M. **Complexity**: the emerging science at the edge of order and chaos. New York: Touchstone, 1992. 380 p.

WATER AND RIVERS COMMISSION. **Stream channel processes**: fluvial geomorphology. East Perth: Water and Rivers Commission, 2000. 12 p. (Restoration Report, RR6).

WHYTE, W. H. **The last landscape**. Garden City: Anchor Books, 1970. 376 p.

Parte 2

Estratégias de gestão em recuperação de áreas degradadas por mineração

Capítulo 2

Planejamento e gestão do processo de recuperação de áreas degradadas

Luis Enrique Sánchez

Introdução

Como todo projeto, um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) deve ser cuidadosamente preparado e ter sua viabilidade analisada antes de sua execução. Uma vez aprovado, sua implementação deve ser igualmente cuidadosa e os resultados periodicamente avaliados. O uso de indicadores e a comparação entre o esperado e o alcançado são alguns dos instrumentos de avaliação dos resultados da Recuperação de Áreas Degradadas (RAD). Conhecimento, organização, recursos humanos e financeiros são quatro requisitos básicos para o sucesso de um programa de RAD. Este trabalho explora as relações entre esses componentes básicos, em busca da qualidade e do sucesso de um programa de RAD.

O processo de RAD e a aferição de seus resultados

A Recuperação de Áreas Degradadas é um campo em franco desenvolvimento no Brasil. Incentivados por exigências impostas pela legislação ambiental, órgãos governamentais, empresas, técnicos e pesquisadores têm se esforçado em desenvolver técnicas e procedimentos eficazes e de baixo custo para promover a recuperação de ambientes terrestres e aquáticos. Em particular, a reabilitação de áreas degradadas pela mineração e, em menor escala, por obras de construção civil tem avançado consideravelmente no País (GRIFFITH; TOY, 2001; PARROTTA; KNOWLES, 2001; TOY; GRIFFITH, 2001), considerando-se mais de duas décadas de experiência (AB'SÁBER et al., 1975; BARTH, 1989; DIAS, 1981; MORAES, 1989).

Entretanto, são surpreendentemente poucos os estudos compreensivos – ou mesmo estudos pontuais – acerca dos resultados dos programas de recuperação ambiental. Os PRADs são realmente implementados? Os PRADs apresentam uma relação de medidas eficazes para recuperação ambiental? As empresas alocam suficientes recursos humanos e financeiros para a correta implementação das medidas preconizadas nos PRADs? As empresas são capazes de apresentar evidências concretas que demons-

trem os resultados obtidos com seus programas de recuperação de áreas degradadas?

Quatro componentes básicos

Neste trabalho, argumenta-se que (a) conhecimento, (b) organização, (c) recursos humanos e (d) recursos financeiros são quatro componentes, ou requisitos, essenciais para o sucesso de um programa de RAD. Apresenta-se cada um deles para, em seguida, relacioná-los ao processo de planejamento e gestão de RAD.

Na dimensão do *conhecimento* enquadram-se todos os saberes (formais ou informais, empíricos ou científicos), técnicas, procedimentos, informações e pesquisas que fundamentam a RAD e permitem estabelecer expectativas razoáveis de que os objetivos de cada programa de recuperação serão atingidos. A conceituação teórica e a experiência prática em RAD têm crescido rapidamente e são atestadas por publicações científicas, pela realização frequente de simpósios especializados, e por inúmeros casos concretos de recuperação no País, especialmente de reabilitação de áreas mineradas.

O aperfeiçoamento de técnicas de plantio de espécies nativas, de obtenção de sementes e de produção de mudas, a inoculação de sementes, as estratégias de restabelecimento de vegetação baseadas em modelos sucessionais, o estudo das interações planta-animais, da biologia e da química do solo são alguns setores em que o avanço do conhecimento fornece bases científicas sólidas para a RAD, que, nesse processo, transformou-se em um campo específico de pesquisa (KÄMPF et al., 2000; REIS et al.,1999; RODRIGUES; GANDOLFI, 1998, 2001).

Entretanto, o conhecimento somente é aplicado de modo satisfatório se for adequadamente disseminado e dominado pelos agentes executores dos programas de RAD. Assim, a dimensão *recursos humanos* é outro aspecto

essencial para o sucesso de um programa de RAD. Os conhecimentos devem ser testados e validados em diferentes situações práticas, nas quais possam ser demonstrados que os resultados esperados podem ser atingidos a custos razoáveis. As universidades e as escolas técnicas, indubitavelmente, formam profissionais capacitados para desempenhar as tarefas inerentes à implementação de programas de RAD, mas boa formação básica não exclui a necessidade de aperfeiçoamento contínuo. Em cada mina, RAD é um processo que envolve aprendizado; o planejamento e a gestão desse processo deveriam ser desenhados e pensados para promover esse aprendizado.

Por outro lado, deter conhecimento e dispor de pessoal qualificado pode ser insuficiente para um programa bem-sucedido de RAD se a empresa ou instituição encarregada de implementá-lo não dispuser de *organização* ou competência gerencial para tanto. Inserir as ações de RAD em consonância com o processo produtivo de uma mineração ou de uma grande obra civil requer conscientização e comprometimento da direção e dos demais funcionários, como, aliás, é condição para o sucesso de qualquer medida, programa ou sistema de gestão ambiental.

Por fim, a dimensão econômica, por meio da disponibilidade de *recursos financeiros* em montante suficiente e nos momentos apropriados, é outro dos componentes essenciais para o sucesso da RAD. Isso requer um conhecimento antecipado e razoavelmente preciso dos custos de recuperação, inclusive aqueles necessários para o monitoramento de longo prazo da área recuperada e provisões para contingências. O planejamento financeiro é particularmente necessário no caso de empreendimentos mineiros, nos quais a maior parte dos trabalhos de recuperação é realizada após o encerramento das atividades. Conhecendo-se antecipadamente os custos, a empresa pode fazer a necessária provisão para que os recursos estejam disponíveis no momento necessário (OLIVEIRA JÚNIOR; SÁNCHEZ, 2002; TAVEIRA; SÁNCHEZ, 2005).

O que é uma área recuperada?

Essa pergunta básica parece não ter ainda uma resposta satisfatória no Brasil. O sucesso de um programa de RAD somente pode ser avaliado em comparação com seus objetivos. No entanto, formular claramente os objetivos a serem atingidos não é suficiente para aferir os resultados. Pode-se postular que também são necessários critérios e parâmetros previamente definidos e negociados com as partes interessadas para poder avaliar o sucesso do programa.

Em outras palavras, é necessário o estabelecimento prévio de indicadores ambientais – ou seja, parâmetros representativos de *processos* ambientais ou de *condições* do meio ambiente – e de indicadores de desempenho. A norma ISO 14031:1999 - Avaliação do Desempenho Ambiental, recomenda a utilização de três tipos de indicadores: a) indicadores de desempenho gerencial; b) indicadores de desempenho organizacional; e c) indicadores do estado do meio ambiente. No primeiro grupo podem-se incluir, por exemplo, parâmetros que informem sobre o treinamento do pessoal envolvido nos programas de RAD; no segundo grupo, indicadores de crescimento de vegetação; e no terceiro grupo, índices de diversidade de áreas revegetadas com espécies nativas.

A pergunta proposta poderia ser analisada sob três perspectivas complementares: a) administrativa; b) formal; c) funcional.

Sob o ponto de vista administrativo, uma área recuperada seria aquela onde o PRAD foi implementado em sua totalidade. Entretanto, qualquer tentativa de aplicação prática desse critério esbarra em severas dificuldades. A primeira delas é que se o PRAD não tiver sido bem elaborado, sua total implementação terá sido insatisfatória para recuperar a área em questão; no Estado de São Paulo, por exemplo, 25,1% dos 648 PRADs submetidos à Secretaria do Meio Ambiente entre 1989 e 2004 foram considerados insuficientes para análise técnica, tendo sido devolvidos ao interessado para reelaboração (IMBIMBO, 2004). A segunda dificuldade

se refere ao fato de que todo PRAD deve ser periodicamente atualizado para refletir o avanço do conhecimento e, principalmente, para se ajustar a mudanças no plano de lavra, comuns em toda mina: configurações de cavas finais que mudam com o avanço da pesquisa geológica ou rejeitos que passam a ser aproveitados são exemplos de mudanças que podem ocorrer ao longo da vida de uma mina. Em terceiro lugar, com demasiada frequência, as medidas propostas nos PRADs são vagas ou genéricas (e dessa mesma forma são retomadas ou transcritas nas licenças ambientais) e dificilmente são passíveis de uma verificação objetiva por intermédio de auditorias, inspeções ou fiscalização (DIAS; SÁNCHEZ, 2001). Nessas condições, como verificar a implementação satisfatória do PRAD?[1]

Sob o ponto de vista formal, a adequação dos resultados de um programa de RAD pode ser avaliada mediante o monitoramento e o acompanhamento de um conjunto de indicadores representativos. Por exemplo, a Resolução nº 21/2001 da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo estabelece, para a revegetação com espécies nativas, especialmente em áreas de preservação permanente, o número mínimo de espécies a serem empregadas, que cresce proporcionalmente à área a ser recuperada. A confirmação da presença desse número de espécies, a intervalos de tempo regulares após a conclusão dos trabalhos, é um procedimento que pode atestar se esse objetivo de recuperação foi atingido.

Nos EUA, uma lei federal sobre mineração a céu aberto de carvão – *Surface Mining Control and Reclamation Act* – de 1977, estabelece condições a serem observadas para a reabilitação dessas minas, a exemplo de reposição de estéreis em áreas previamente mineradas, reafeiçoamento do terreno, reposição de solo superficial e implantação de sistema de drenagem. O atendimento a esses requisitos é condição para que uma caução

[1] A prática de renovação da licença de operação, já empregada em vários estados, é uma oportunidade de contraposição a segunda e terceira dificuldades citadas. Por ocasião das solicitações de renovação, o órgão licenciador pode, caso necessário, exigir a atualização do PRAD, assim como exigir que sejam apresentadas evidências concretas ou provas formais de que os compromissos anteriormente estabelecidos foram satisfatoriamente atendidos. Evidentemente, para superar a terceira dificuldade é necessário mais que exigências administrativas.

exigida em decorrência dessa mesma lei possa ser devolvida à empresa. A devolução é feita por etapas, segundo certos objetivos de recuperação sejam atingidos (ZALUSKI et al., 1991):

Fase I: devolução de até 60% do valor total, após recolocação dos estéreis e reafeiçoamento topográfico, implantação de sistema de drenagem e reposição da camada superior do solo.

Fase II: devolução de segunda parcela condicionada à constatação de que a área não está sujeita à erosão excessiva e ao restabelecimento da vegetação (no caso de uso agrícola, a produtividade da área recuperada deve ser equivalente à que antecedeu a mineração ou àquela do mesmo tipo de solo na região, usando as mesmas práticas agrícolas).

Fase III: garantia remanescente devolvida desde que todas as exigências legais e da licença tenham sido cumpridas.

A avaliação aqui chamada de formal tem diversas virtudes: permite chegar a conclusões objetivas e, se os critérios forem formulados de maneira clara, é reprodutível. No entanto, a forma de novo ambiente resultante do processo de RAD pode não atender a todas as funções que se tencionava desempenhar.

Por exemplo, uma antiga cava de areia de construção situada no Município de Embu das Artes, região metropolitana de São Paulo, foi recuperada com verbas públicas oriundas de um grande programa de recuperação da Bacia do Guarapiranga, um dos mais importantes mananciais da região. O projeto de recuperação envolvia a estabilização física de um talude de rocha granítica alterada, o plantio de espécies arbóreas nativas, a execução de serviços de paisagismo e a construção de um centro de educação ambiental, configurando um parque urbano. A proposta era, portanto, multifuncional: o parque teria funções ecológicas, paisagísticas, recreativas e educativas. Um estudo sobre as condições de uso e de conservação do parque feito por uma equipe multidisciplinar de estudantes da Universidade de São Paulo, como parte de um projeto de

extensão, constatou, porém, ravinas no talude recuperado em consequência da obstrução de canaletas de drenagem, a subutilização do parque graças a deficiências no transporte público, e vários outros problemas. Assim, essa área, formalmente reconhecida como recuperada, não cumpria as *funções* previstas no projeto de recuperação, e os objetivos de recuperação não haviam sido plenamente atingidos.

Entretanto, a avaliação dos resultados de RAD por meio do enfoque funcional é mais difícil, na medida em que é também mais difícil estabelecer e mensurar indicadores de funcionalidade, em contraposição a indicadores de condições ambientais (tais como a diversidade de espécies, a altura das árvores ou a inexistência de feições erosivas).

Muitas vezes os objetivos de recuperação são formulados como a busca da estabilidade física e química da área recuperada, no sentido da inexistência de processos erosivos intensos ou de movimentos de massa, como escorregamentos de solo ou rocha, e de se assegurar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas – por exemplo, sem que haja formação de drenagem ácida. Traduzir esses objetivos em critérios passíveis de monitoramento e de verificação, por meio de inspeções e auditorias, é uma necessidade ainda não plenamente atendida para a gestão da recuperação de áreas degradadas no Brasil.

Dadas as limitações de cada um dos enfoques (reconhecidamente menores no enfoque formal), parece que uma avaliação do sucesso de um programa de RAD não poderia prescindir das três dimensões: administrativa, formal e funcional.

Planejamento e gestão de um Programa de Recuperação de Áreas Degradadas

Um programa de RAD pode ser entendido como um projeto a ser implementado de modo eficaz (isto é, que atinja seus objetivos) e eficiente

(isto é, com os menores recursos possíveis). No caso de uma mina em funcionamento, trata-se de um projeto de longo prazo, que começa a ser planejado antes da abertura da mina e prossegue até depois de seu fechamento (SÁNCHEZ, 2004).

Entendida dessa forma, a RAD pode ser conduzida de acordo com o ciclo clássico de gestão PDCA (*plan – do – check – act*). Assim, os objetivos e os trabalhos de recuperação devem, obviamente, ser planejados antes de qualquer intervenção (WILLIAMS, 1990; WILLIAMS et al., 1990; TOY et al., 2001), e o plano pode requerer aprovação governamental e consulta pública.[2] Definir os trabalhos a serem realizados (implantação de sistema de drenagem, plantio de mudas, etc.) para atingir os objetivos de recuperação é o passo seguinte da etapa de planejamento (*plan*). Em seguida, passa-se à implementação do plano (*do*) e periodicamente deve-se proceder ao controle (*check*), por meio de monitoramento, auditorias ou outras formas de verificação. O controle apontará pontos fortes e fraquezas nos procedimentos adotados ou em outros elementos do plano, e caberá à gerência agir para corrigir as deficiências (*act*).

O planejamento da RAD pressupõe que toda mina constitui uma forma temporária de uso do solo e que ao término da mineração as áreas afetadas devem estar aptas para alguma forma de uso sustentável. Podem-se admitir restrições de uso no futuro, e não é usual que a reabilitação de áreas mineradas requeira multifuncionalidade do solo e nem mesmo que sejam restabelecidas condições similares àquelas que precederam a perturbação. Na verdade, terrenos que nunca foram minerados também têm aptidões e restrições naturais para diversas formas de uso, havendo,

[2] A consulta pública não é obrigatória para o PRAD no Brasil, mas em outros países as decisões acerca de recuperação e de remediação ambiental são submetidas à consulta pública. No Brasil, quando um novo projeto de mineração é apresentado, o PRAD deve ser incorporado ao Estudo de Impacto Ambiental (EIA), que é objeto de consulta pública. Para a renovação de licenças ambientais de operação, o órgão público ambiental pode promover uma consulta pública. Independentemente de obrigações legais, a consulta pública voluntária é considerada uma das boas práticas de gestão na mineração (AUSTRALIA, 1995).

para cada classe de terreno, usos mais adequados às suas características naturais. A mesma situação é geralmente aceita para áreas mineradas.

O planejamento inclui:

1. A preparação de um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (requisito legal no Brasil), a preparação de um Plano de Fechamento de Mina (exigência que vem se configurando como um novo requisito legal no Brasil, situação já consolidada em vários países).
2. A estimativa de custos de recuperação e de fechamento e a eventual apresentação de garantias financeiras (ainda não é um requisito legal no Brasil, mas o é em vários países e é uma recomendação explícita de organismos de fomento como o Banco Mundial).

O plano de fechamento e o PRAD devem considerar diferentes alternativas de uso futuro e deve, obviamente, haver compatibilidade mútua entre o plano de lavra e o plano de fechamento.

Para a implementação satisfatória de programas de RAD, a experiência prática internacional sugere que há alguns requisitos a serem atendidos, dentre os quais:

- Atendimento aos requisitos legais.
- Conhecimento e consideração dos pontos de vista da comunidade.
- Orientação técnica especializada para os trabalhos a serem executados.
- Capacitação técnica da equipe envolvida (do gerente ao pessoal operacional).
- Desenvolvimento e implementação sistemática de procedimentos operacionais.
- Provisão de recursos (humanos, físicos, financeiros).
- Acompanhamento, monitoramento, registro e documentação.

A implantação de programas de RAD classicamente envolve trabalhos que podem ser classificados em quatro grupos: a) práticas de caráter topográfico, b) práticas de caráter edáfico, c) práticas de caráter hídrico; d) práticas de caráter vegetativo.

As práticas de caráter topográfico envolvem o reafeiçoamento do relevo. Trata-se de decisões sob controle do engenheiro de minas que podem e devem ser compatibilizadas com o plano de lavra. Tanto as medidas de reabilitação da área minerada podem ser adaptadas à geometria final da cava (e pilhas de estéril e depósitos de rejeitos) quanto (dentro de certos limites e em função do tipo de mineralização) o plano de lavra adaptado às necessidades e aos objetivos de reabilitação. Essas práticas incluem também a consideração da posição futura do lençol freático, haja vista que muitas vezes as escavações são preenchidas com água, formando lagos artificiais, ou seja, criando um ambiente inteiramente novo no local minerado.

As práticas de caráter hídrico se referem à coleta, transporte e lançamento de águas pluviais, um aspecto fundamental para a estabilidade física da área recuperada e também para sua estabilidade química (como no caso de potencial de geração de drenagem ácida), assim como para a proteção dos recursos hídricos superficiais. Ocasionalmente são necessárias ações de caráter hídrico associadas à presença de cavas inundadas.

As práticas de caráter edáfico envolvem o manejo de solo, com especial atenção para um recurso natural raro, o solo orgânico ou superficial, a ser removido separadamente das camadas inferiores do solo, reutilizado imediatamente ou armazenado em condições que permitam sua conservação. Incluem-se também nas práticas edáficas o aproveitamento de diferentes fontes de matéria orgânica para incorporação ao solo (como galhos, raízes, composto orgânico, certos resíduos e, eventualmente, serapilheira), as técnicas de preparação do solo como a subsolagem (para sua descompactação), a adubação e a calagem, conforme necessidades específicas.

As práticas de caráter vegetativo se referem às ações para o estabelecimento de uma comunidade vegetal em áreas designadas. A escolha das

espécies a serem plantadas depende do uso futuro pretendido para a área recuperada, tais como: a) áreas com fins conservacionistas, o que requer o plantio de vegetação nativa (de acordo com as condições fitogeográficas locais); b) florestas plantadas para uso comercial (frequentemente com espécies exóticas); c) culturas agrícolas; ou ainda d) associações florísticas de cunho paisagístico, sempre de acordo com os objetivos de recuperação e o futuro uso do solo pretendido. A intenção de uso futuro também pode fazer com que partes da área recuperada não recebam vegetação. Dentre as práticas mais usuais de caráter vegetativo, incluem-se:

- Escolha de procedimentos para seleção, produção ou aquisição de mudas e sementes.
- Plantio para proteção contra erosão e para melhoria da qualidade do solo (gramíneas e leguminosas).
- Plantio de sementes ou de mudas arbóreas (nativas, exóticas, para produção silvicultural).
- Manutenção e monitoramento.

Sob uma perspectiva gerencial, esse conjunto de práticas constituintes desses quatro grupos corresponde a *tarefas* que devem ser executadas de modo *eficaz* e *eficiente* por uma equipe qualificada, que deve atingir resultados e demonstrá-los. Para tal fim se requer, conforme exposto anteriormente, a) conhecimento, b) organização, c) recursos humanos e d) recursos financeiros.

A aplicação dessas práticas e a execução dessas tarefas requerem a adoção de um conjunto de *procedimentos operacionais* – preferencialmente apresentados como regras ou normas escritas que descrevem com detalhe como serão realizadas e quem são os responsáveis por sua execução. Podem ser preparados procedimentos para:

- Formação de pilhas de estéreis.
- Drenagem de águas pluviais e retenção de sedimentos.

- Construção de barragens e diques.
- Manejo de solo orgânico.
- Implantação e manutenção de viveiro de mudas.
- Plantio de mudas ou sementes.
- Manutenção do sistema de drenagem.
- Manutenção de áreas revegetadas.

Note-se que esses procedimentos não estão restritos àquelas tarefas diretamente voltadas para a recuperação ambiental, mas podem incluir procedimentos preventivos, implementados antes do início dos trabalhos de recuperação propriamente ditos. Tais técnicas têm a função de assegurar a estabilidade da área, a exemplo da preparação adequada de pilhas de estéril[3] e do controle de qualidade do projeto e da execução de barragens de rejeitos.[4]

Muitas empresas padronizam esses procedimentos de modo: a) a garantir sua reprodutibilidade, mesmo em caso de mudança de pessoal; b) a manter um registro das práticas usadas em determinado período (os procedimentos podem ser modificados com o fim de melhorá-los); c) a possibilitar a avaliação dos resultados à luz dos procedimentos utilizados, haja vista o tempo necessário, às vezes da ordem de anos, para que se atinja os objetivos.

Uma necessidade frequentemente negligenciada pelas empresas é a demonstração dos resultados. O aspecto visual da área recuperada pode ser uma síntese desses resultados, mas sua avaliação cientificamente fundamentada requer monitoramento (ALMEIDA; SÁNCHEZ, 2005; PARROTA;

[3] De modo resumido, as boas práticas de disposição de estéril envolvem a preparação de um projeto de pilha, levando-se em conta as características geotécnicas do material a ser depositado, a realização de investigações geológico-geotécnicas nos terrenos que servirão de fundações, a remoção de vegetação e de solo superficial, a colocação de uma camada drenante na base da pilha, a disposição controlada, em camadas ascendentes, com compactação.

[4] Sob o ponto de vista ambiental, barragens e pilhas de rejeitos são componentes críticos de uma mina. Procedimentos de controle de qualidade incluem, entre outros, a revisão do projeto técnico por uma terceira parte e atividades de inspeção e auditoria durante a fase de operação.

KNOWLES, 2001). Podem-se arrolar os seguintes objetivos para o monitoramento da RAD, na verdade em tudo similares aos objetivos do monitoramento ambiental:

- Verificar conformidade com requisitos legais (incluindo condicionantes da licença ambiental).
- Alertar para necessidade de ação corretiva, caso sejam observadas não conformidades ou os resultados não estejam de acordo com o esperado.
- Documentar e demonstrar os resultados dos programas de gestão ambiental (incluindo os programas de RAD).
- Verificar o atendimento a objetivos específicos de recuperação ambiental.

A necessidade de monitorar é inquestionável, mas dificuldades práticas podem advir se os recursos necessários não forem previstos com antecedência, principalmente quando o monitoramento se prolonga para após o fechamento da mina.

Recuperação de áreas degradadas e fechamento de minas

Muitas ações de recuperação são executadas durante o funcionamento da mina, com a intenção de reduzir os custos a serem incorridos no futuro e reduzir a necessidade de provisionamento voluntário ou compulsório, de recursos financeiros para garantir a recuperação e o adequado fechamento da mina.[5] A Figura 1 mostra as principais etapas do ciclo de vida de uma mina

[5] Sánchez (2001, 2005) discute as necessidades e os mecanismos de contabilização do passivo ambiental e de garantia de recursos financeiros para a desativação de empreendimentos industriais. Oliveira Júnior e Sánchez (2002) discorrem sobre um caso em que os custos de fechamento de uma mina de ouro foram subestimados por um fator de quase 10, por causa da desconsideração de diversos serviços necessários para o adequado fechamento da mina. Hoje

e a participação da recuperação de áreas degradadas em cada uma delas. A Figura 2 mostra a evolução típica do passivo ambiental em uma mina e a contribuição da recuperação de áreas degradadas para sua redução.

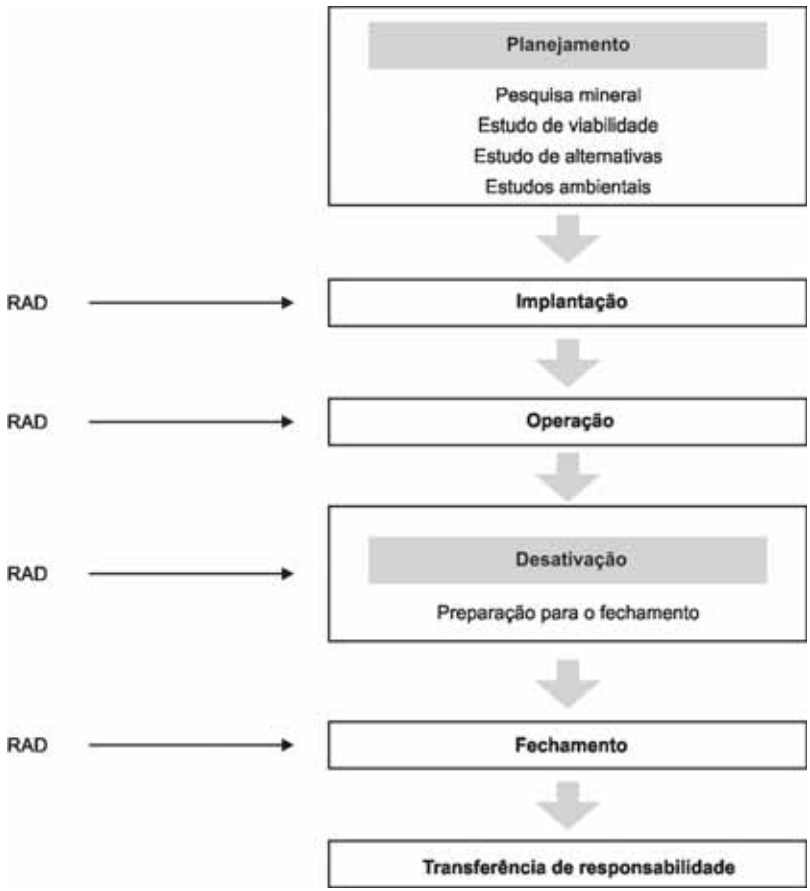


Figura 1. Ciclo de vida de uma mina e o papel da recuperação de áreas degradadas.

em dia, as empresas mais avançadas já dispõem de procedimentos internos que preconizam a aplicação de ferramentas de estimativa de custos que permitem cálculos suficientemente precisos para a tomada de decisões. Sánchez (2005) comenta as demandas do mercado de capitais para que as empresas de capital aberto apresentem estimativas confiáveis de custos de fechamento.

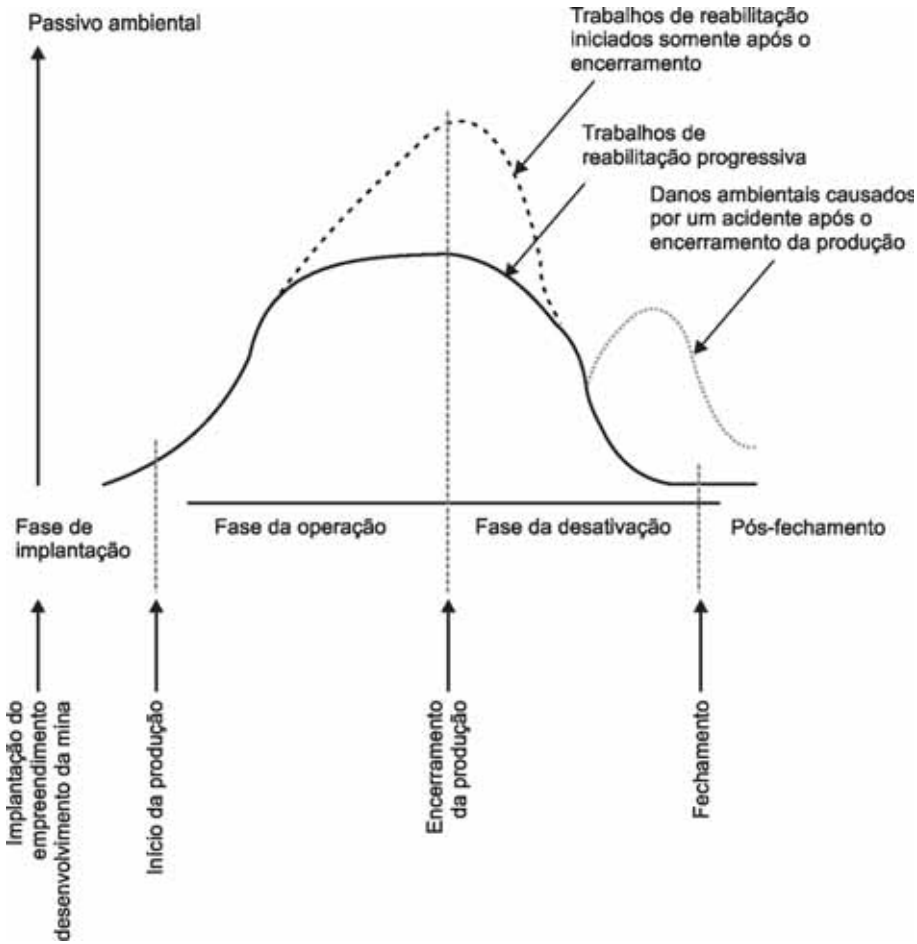


Figura 2. Evolução do passivo ambiental de acordo com as fases do ciclo de vida de uma mina.
Fonte: Sánchez (2004).

São objetivos do planejamento do fechamento de minas garantir que (IIED/WBCSD, 2002):

- A saúde e a segurança públicas não serão comprometidas.
- Os recursos ambientais não estarão sujeitos à deterioração física e química.

- O uso futuro da área será benéfico e sustentável a longo prazo.
- Os impacto socioeconômicos serão minimizados.
- Todos os benefícios socioeconômicos sejam maximizados.

Conclusões

A prática atual de RAD no Brasil, em especial no campo da mineração, evoluiu significativamente nos últimos anos. Houve significativos avanços em termos de técnicas de recuperação, particularmente visando o restabelecimento de vegetação nativa; do mesmo modo, desenvolveu-se um mercado de serviços e de produtos voltados à RAD, e formou-se um grupo de pesquisadores no tema, o que tem propiciado o avanço contínuo; constitui-se também um grupo de profissionais especializados. No entanto, os avanços foram pouco notáveis na esfera da gestão do processo de RAD, tanto no âmbito interno às empresas quanto, e principalmente, no âmbito dos organismos governamentais. Há poucos dados e revisões críticas sobre o sucesso de programas individuais de recuperação e ainda menos sobre os resultados das políticas públicas relacionadas. Assim, sugere-se que os seguintes tópicos mereçam atenção para um aprofundamento conceitual e prático:

- Noção de área recuperada.
- Critérios de recuperação ambiental na mineração.
- Métodos e critérios para estimativa de custos e provisão de recursos financeiros.
- Capacitação multidisciplinar em RAD.

Referências

AB'SÁBER, A. N.; CHACEL F. M.; TSUKUMO, N. M. J. Tratamento paisagístico: usina de Paraibuna e barragem de Paraitinga. **Geografia e Planejamento**, São Paulo, v. 17, p. 1-30, 1975.

ALMEIDA, R. O. P. O.; SÁNCHEZ, L. E. Revegetação de áreas de mineração: critérios de monitoramento e avaliação do desempenho. **Revista Árvore,** Viçosa, v. 29, n. 1, p. 47-54, 2005.

AUSTRALIA. **Best Practice Environmental Management**. 1995. (Série de livretos). Disponível em : <http://www.industry.gov.au>. Acesso em: 10 ago. 2006.

BARTH, R. C. Avaliação da recuperação de áreas mineradas no Brasil. **Boletim Técnico da Sociedade de Investigações Florestais,** Viçosa, v. 1, p. 1-41, 1989.

DIAS A. C. Reabilitação de áreas mineradas de bauxita. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRONOMIA, 12., 1981, Guarapari. **Anais...** Guarapari: Federação das Associações de Engenheiros Agrônomos do Brasil, 1981. 11 p.

DIAS, E. C. S.; SÁNCHEZ, L. E. Deficiências na implementação de projetos submetidos à avaliação de impacto ambiental no estado de São Paulo. **Revista de Direito Ambiental,** São Paulo, v. 6, n. 23, p. 163-204, 2001.

GRIFFITH, J. J.; TOY, T. J. Evolution in revegetation of iron-ore mines in Minas Gerais State, Brazil. **Unasylva**, Roma, IT, v. 52, p. 9-15, 2001.

IIED/WBCSD. International Institute for Environment and Development/World Business Council for Sustainable Development. **Breaking new ground**. London, UK: Earthscan, 2002. 441 p.

IMBIMBO, H. R. V. **Plano de recuperação de áreas degradadas**: panorama no Estado de São Paulo. São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. 25 p. (Não publicado).

KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P.; BOHNEN, H.; GIASSON, E. Solos construídos em áreas de mineração da bacia carbonífera. In: CENTRO DE E ECOLOGIA DA UFRGS. **Carvão e meio ambiente**. Porto Alegre: UFRGS, 2000. p. 596-640.

MORAES, C. A. F. Viabilidade econômica de projetos de controle ambiental na mineração de alumínio. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE CONTROLE AMBIENTAL E SEGURANÇA NA MINERAÇÃO, 1989., São Paulo. **Anais…** São Paulo: Epusp, 1989. p. 95-100.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. B.; SÁNCHEZ, L. E. Deactivation of mining entreprises: analysis of the closure plan of mine at Fazenda Maria Preta, Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 7., 2002, Cagliari. **Proceedings…** Cagliari: University of Cagliari, 2002. p. 595-601.

PARROTTA, J. A.; KNOWLES, O. Restoring tropical forests onlands mined for bauxite: examples from the Brazilian Amazon. **Ecological Engineering**, USA, v. 17, p. 219-239, 2001.

REIS, A.; ZAMBONIN, R. M.; NAKAZONO, E. M. Recuperação de áreas florestais degradadas utilizando a sucessão e as interações planta-animal. **Cadernos da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica**, São Paulo, v. 14, p. 1-42, 1999.

RODRIGUES, R.; GANDOLFI, S. Restauração de florestas tropicais: subsídios para uma definição metodológica e indicadores de avaliação e monitoramento. In: DIAS, L.; MELLO, J. (Org). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: Editora da UFV, 1998. p. 203-215.

RODRIGUES, R.; GANDOLFI, S. Conceitos tendências e ações para a recuperação de florestas ciliares. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. R. (Org.). **Matas ciliares**: conservação e recuperação. São Paulo: Edusp, 2001. p. 235-247.

SÁNCHEZ, L. E. **Desengenharia**: o passivo ambiental na desativação de empreendimentos industriais. São Paulo: Edusp, 2001. 254 p.

SÁNCHEZ, L. E. Planejamento do ciclo de vida de uma mina e redução dos riscos ambientais. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE MINAS, 1., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Edusp, 2004. p. 347-352.

SÁNCHEZ, L. E. Danos e passivo ambiental. In: PHILIPPI JÚNIOR. A.; ALVES, A. C. (Org.). **Curso Interdisciplinar de direito ambiental**. Barueri: Manole, 2005. p. 261-293.

TAVEIRA, A. L.; SÁNCHEZ, L. E. Aspectos econômicos do fechamento de minas. **Brasil Mineral**, São Paulo, v. 22, n. 245, p. 66-76, 2005.

TOY, T. J.; GRIFFITH, J. J. Changing surface-mining reclamation practices in Minas Gerais, Brazil. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, Netherlands, v. 15, n. 1, p. 1-19, 2001.

TOY, T.; GRIFFITH, J. J. RIBEIRO, C. A. A. S. Planejamento a longo prazo da revegetação para o fechamento de minas a céu aberto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 487-499, 2001.

ZALUSKI, J. L.; CARMEN, M. D.; GREEN, G. B. Bond release procedures under SMCRA. In: LOOTENS, D. J.; GREENSLADE, W. M.; BARKER, J. M. (Org.). **Environmental management for the 1990**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1991. p. 27-34.

WILLIAMS, D. D. A revegetação de áreas degradadas pela mineração. **Minérios & Minerales**, São Paulo, n. 43, p. 43-47, 1990.

WILLIAMS, D. D.; BUGIN, A.; REIS, J. L. B. C. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração**: técnicas de revegetação. Brasília, DF: Ibama, 1990. 96 p.

Parte 2

Estratégias de gestão em recuperação de áreas degradadas por mineração

Capítulo 3

Recuperação socioambiental de áreas mineradas

Hildebrando Herrmann

Introdução

Para se compreender a importância do tema proposto, faz-se necessário ter presente que as atividades humanas, a partir do surgimento dos movimentos ecológicos da década de 1970 como resposta às terríveis agressões sofridas pelo planeta Terra, começaram a ser questionadas pela sociedade. A desconfiança contra o caráter redentor da ciência e da tecnologia impõe maior fiscalização das atividades humanas – econômicas ou não – e uma preocupação crescente com os fenômenos naturais e com os resultados nefastos da sua ocorrência. Surgiram, a partir dessa constatação, as primeiras exigências formais, as primeiras restrições administrativas, as progressivas sanções pecuniárias para as ações poluidoras e, finalmente, a proibição total ou parcial para o exercício daquelas atividades consideradas irreversivelmente danosas ao meio ambiente.

Essas medidas preventivas e acauteladoras são exteriorizadas por normas cogentes, sobressaindo como instrumento eficaz de controle social, o Direito. Ademais, o homem desenvolve estudos visando minimizar os efeitos deletérios dos grandes acidentes ecológicos resultantes da sua ação ou omissão, ou daqueles produzidos pela própria natureza. Núcleos interdisciplinares são constituídos em inúmeros países, até no Brasil, para diagnosticar as causas dos acidentes e das crises que eles geram. Tais núcleos trabalham com o objetivo de eliminar ou reduzir os efeitos decorrentes, aplicando aos responsáveis, autoridades ou particulares, os preceitos legais em vigor, ou criando normas específicas para suprir a sua falta.

As políticas públicas setoriais, dentro de uma concepção sociológica, podem ser entendidas como fruto de uma vontade majoritariamente definida e voltada para fins previamente escolhidos. O processo de sua elaboração prevê momentos distintos que resumidamente podem ser aqui apontados: diagnóstico sobre a realidade social/setorial sobre a qual é necessária a presença do Estado; planos de ação para otimizar o diagnóstico efetuado; decisão acerca da viabilidade da ação governamental; exteriorização ou implementação das medidas preconizadas pelo estudo técnico e econômico

aprovado pelos poderes executivo e legislativo. Consiste na edição de normas coercitivas e que são normas de direito, portanto; fiscalização das ações propostas por meio de monitoramento e auditorias sistemáticas, visando corrigir desvios de rumo sempre que isso ocorrer.

Direito: instrumento de políticas públicas

Para alguns autores a Política se legitima graças ao Direito. Para eles o Direito é o fixador das inovações e objeto de criações políticas. O Direito é, juntamente com a Religião, a Moral e a Etiqueta (regras de trato social), um instrumento de controle social. Ele regula as relações sociais por intermédio do Estado, que é o órgão competente para a elaboração das leis.

No mundo das coisas ou dos bens há objetos que pertencem ao mundo da natureza e outros que se integram no mundo intelectual dos homens, e que são, por isso mesmo, causa da atuação deles sobre a realidade natural ou cultural. Nos dois mundos há leis regulando a sua existência. As leis da natureza são imutáveis, universais, invioláveis e isonômicas. As leis culturais ou jurídicas, ao contrário, não são universais nem, tampouco, imutáveis, embora reprimam não conseguem evitar a sua inviolabilidade. Outra diferença que há entre elas: as leis da natureza são regidas pelo princípio da causalidade, e as leis humanas atendem ao princípio da finalidade.

Direito como implementador da política mineral

Antes de se discutir a exteriorização da política mineral, urge resgatar a importância da mineração para o mundo moderno. Trata-se de insumo fundamental para o atendimento das demandas sociais e industriais reprimidas. Aquelas, representadas pela carência de habitação, vias públicas, iluminação, segurança, educação, lazer, etc. Todas dependentes dos insumos minerais de uso social, como: areia, argila, brita, saibros, calcário para cimento e para corretivo do solo agrícola, etc., sendo estes por sua vez,

representados pelos insumos de uso industrial, a saber: ferro, manganês, chumbo, estanho, caulim, talco, zinco, ouro, níquel, fosfato, cobre, etc. O mundo moderno, portanto, em que pesem demandas diferenciadas, continua sendo um mundo mineral. Nossa dependência, segundo alguns autores, é de 350 diferentes espécies de substâncias minerais. Utilizamos quantidades significativas de insumos provenientes do reino mineral comparativamente com aqueles oriundos dos dois outros reinos da natureza. Estatísticas mostram que, enquanto o consumo humano varia de 2.000 a 20.000 quilos de insumos minerais por ano, ele varia de 400 a 500 quilos do reino vegetal, e do animal, de 300 a 350 quilos.

Inegável reconhecer, todavia, que a atividade, quando malconduzida, compromete o meio ambiente, aqui entendido na sua expressão mais abrangente, incluindo o natural, o artificial, o cultural e o do trabalho. Em trabalho realizado para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas foram listadas algumas consequências deletérias para o ambiente quando a atividade não for bem conduzida (HERMANN et al., 1987). Destacam-se daquela publicação as seguintes: alteração do lençol freático; erosão, assoreamento, impactos sobre a fauna e flora; instabilidades de taludes e encostas; mobilização de terra: poluição da água, ar, solo, sonora e visual; mobilização de terra: poluição do mar e do litoral; ultralançamentos de fragmentos e vibrações; comprometimentos aos sítios arqueológicos, espeleológicos, históricos e antropológicos; comprometimento aos bens culturais, científicos e artísticos; comprometimento às unidades de conservação e a outras atividades de uso e ocupação do solo.

É certo, todavia, que, quando bem conduzida, a atividade mineral não compromete, de forma irreversível, o ambiente onde ela é desenvolvida. Há técnicas que possibilitam a harmonização desses dois interesses, o mineral e a proteção ambiental. O aparente conflito de interesses ocorre por causa de equivocadas interpretações jurídicas sobre as diversas atribuições e competências político-administrativas definidas na Constituição Federal e impropriamente regulamentadas na legislação infraconstitucional.

No que tange especificamente à política mineral, não se pode olvidar que políticas setoriais só terão êxito se identificarem, com exatidão, as principais características do seu objeto, no caso, a produção de insumos necessários à indústria de transformação ou da construção civil. A implementação das políticas públicas minerárias deve, portanto, levar em consideração as particularidades do setor, a natureza do ambiente onde se encontra a jazida, a complexidade do meio socioeconômico em que ela se insere, enfim, as diferentes individualidades norteadoras da política setorial. O Direito, como de resto todas as ciências humanas, deve funcionar como um sismógrafo, que detecta a todo instante as variações comportamentais dos grupos sociais que compõem o universo considerado, bem como as suas respectivas demandas reprimidas. E, a partir dessa constatação, a ciência jurídica deve moldar os comportamentos das pessoas que vivem na comunidade.

Segundo essa ótica, torna-se desaconselhável, sob todos os pontos de vista, a transposição, pura e simples, de diretrizes jurídico-institucionais de um país para outro. O conhecimento das características intrínsecas de determinado país, das suas regiões e dos diversos setores que o compõe é determinante para o estabelecimento das normas legais disciplinadoras de atividades e obras a serem desenvolvidas. No caso específico da mineração, ainda que isso seja repetitivo, não se pode esquecer que o Direito Mineral deve levar em consideração as principais características técnico-econômicas do setor. Tais características são, em resumo, as seguintes, entre outras: rigidez locacional; exauribilidade da jazida; transitoriedade do empreendimento; alto risco da atividade; singularidade das jazidas e minas; dinâmica particular de um projeto mineiro; monitoramento ambiental específico; reversibilidade e reparabilidade da área minerada.

Princípios do Direito Mineral

O Direito Mineral, assim como os demais ramos da árvore jurídica, não surge no vácuo. Obedece a diretrizes políticas estabelecidas por

documentos mandatários da maior relevância, destacando-se, entre eles a constituição do país considerado e os acordos, tratados e convenções internacionais dos quais ele é signatário. Analisando-se os documentos mandatários de alguns países pode-se resgatar, ainda que de forma vestibular, alguns princípios de Direito Mineral contemplados nesses documentos que são: a) Supremacia do Interesse Público sobre o Privado; b) Princípio da Destinação do Bem Mineral ao Uso Geral; c) Princípio da Função Social e Ecológica da Propriedade Mineira; d) Princípio do Resultado Global**;** e) Princípio da Recuperação da Área Degradada; f) Princípio do Conteúdo Ético (SERRA, 2002).

a) Supremacia do Interesse Público sobre o Privado

Esse princípio consagrado no direito público moderno decorre da necessidade de se sacrificar interesses individuais, ainda que legítimos, em favor dos metaindividuais ou coletivos. Isso vem explícito nos textos das legislações de inúmeros países, que conceituaram o bem mineral como sendo de utilidade pública ou condicionando o seu aproveitamento ao interesse nacional. Dessa forma, o aproveitamento econômico de um bem mineral somente será autorizado se atender ao interesse público. Na Constituição Federal brasileira esse princípio está presente explicitamente no artigo 176, caput, que reza que a atividade mineral será desenvolvida sempre no interesse nacional.

b) Princípio da Destinação do Bem Mineral ao Uso Geral

É resultante do princípio anterior. Segundo Serra (2000), o bem mineral, de domínio coletivo e com valor econômico, só pode ser aproveitado no interesse da coletividade. A destinação imediata dos recursos minerais é suprir a demanda geral da coletividade. Seu destino mediato é que está voltado para o atendimento dos interesses patrimoniais do concessionário. Disso resulta que o Estado detém um poder discricionário de recusar a outorga de títulos minerários; de declarar a caducidade dos títulos cujo titular não atendeu à sua função social; de não colocar em disponibilidade as áreas desoneradas por aquele ato governamental, quando comprometer

interesses que superem os objetivos da mineração; e, principalmente, de determinar a recuperação da área minerada.

c) Princípio da Função Social e Ecológica da Propriedade Mineira

Toda propriedade, particular ou não, tem que atender aos interesses sociais. Vincula-se, portanto, desde seu nascimento, à vontade da coletividade. Isso decorre do princípio da preponderância do interesse público sobre o particular e do princípio da destinação do bem mineral ao uso geral. Seus requisitos resultam da aplicação dos artigos 42, 47 e 48 do Código de Mineração.

d) Princípio do Resultado Global

Um projeto mineiro, ainda segundo Serra (2002), deve ser avaliado dentro da ótica dos interesses difusos, que, pela legislação brasileira, incluem tanto os aspectos ambientais como os econômicos e sociais. O administrador, na avaliação final, ponderará sobre os diversos impactos resultantes da atividade, contrapondo os positivos aos negativos, e decidirá sobre a outorga ou não do título solicitado. O título a ser outorgado deverá, portanto, contemplar globalmente os interesses difusos anteriormente enunciados.

e) Princípio da Recuperação da Área Degradada

Se, por um lado, o minerador deve estar atento aos princípios do Direito Ambiental (dentre eles, o da precaução e do desenvolvimento sustentável), deve obrigatoriamente recuperar, ao final do empreendimento, a área lavrada, disponibilizando-a para futuras atividades econômicas ou não. Esse princípio se justifica como consequência das várias características intrínsecas da mineração (rigidez locacional e singularidade das minas e jazidas, função social da propriedade mineral, dentre outras). Ademais, além de ser princípio expresso em inúmeros dispositivos legais, reveste-se de capital importância para reduzir as contaminações decorrentes de rejeitos tóxicos dispostos inadequadamente na superfície da mina exaurida ou não.

f) Princípio do Conteúdo Ético

Pertencendo os recursos minerais a toda humanidade e não sendo eles renováveis, não podem ser desperdiçados, tendo de ser preservados para as presentes e futuras gerações. Disso resulta para o minerador, ainda segundo as lições de Serra (2002), a obrigação e o dever de fazer o melhor aproveitamento da jazida, com vistas ao prolongamento da sua vida útil. O Plano de Aproveitamento Econômico da jazida deve, por conta disso, ser o mais consentâneo com a realidade fática da jazida e com as demandas presentes e futuras da sociedade.

Características do Direito Mineral

O Direito Mineral, à semelhança do que ocorre com outros diplomas legais, possui algumas características que, ao lado de algumas comuns a várias outras legislações, lhe são particulares, com destaque para: a) Legalidade; b) Formalidade; c) Gratuidade; d) Utilidade Pública; e) Divisibilidade; f) Perpetuidade; g) Transmissibilidade; h) Operações; i) Reparabilidade/Reversibilidade dos Impactos Ambientais.

a) Legalidade: tratando-se de ramo de Direito Público autônomo, todas as obrigações e responsabilidades dos atores envolvidos decorrem inexoravelmente de normas legais previamente editadas e oriundas daquele ramo do Direito.

b) Formalidade: os direitos e deveres dos mineradores e as obrigações da Administração Pública dependem do cumprimento de determinados ritos formais: preenchimento de formulários, pagamentos de emolumentos, publicações de editais e de sanções administrativas, elaboração e análise de relatórios periódicos, vistorias, aplicação de sanções, etc.

c) Gratuidade: ainda que modernamente se procure vincular a ação governamental a determinados tipos de compensação financeira, não se

pode afirmar que o exercício da atividade esteja vinculado a pagamento prévio de royalties ou prestações pecuniárias como ocorre, por exemplo, com a indústria petrolífera.

d) Utilidade Pública: considerando que a finalidade primeira da mineração é atender a demandas sociais da comunidade em geral, ela é considerada, em quase todos os países, como de utilidade pública. Alguns países fizeram constar expressamente das suas Cartas Políticas essa característica.

e) Divisibilidade: muitas legislações preveem a divisibilidade, horizontal ou vertical, da jazida mineral.

f) Perpetuidade: boa parte dos países mantém, ainda, infelizmente, a perpetuidade do direito da lavra mineral, estabelecendo prazo apenas para a fase de exploração mineral (investigação).

g) Transmissibilidade: quase todos os países permitem a cessão total ou parcial, temporária (arrendamento) ou definitiva de direitos sobre os bens minerais, tanto na fase da exploração, quanto na de explotação. Alguns, todavia, condicionam sua transferência efetiva à autorização prévia do Poder Público.

h) Onerações: algumas legislações latino-americanas admitem a oneração dos direitos minerais. Algumas admitem a hipoteca dos títulos minerários como garantia de financiamentos. Outras, ainda que considerem a jazida como bem imóvel, só admitem a figura da caução como garantia de empréstimos realizados em favor de entidades financiadoras.

i) Reparabilidade/Reversibilidade dos Impactos Ambientais: técnica, econômica e legalmente as atividades de mineração buscam devolver o local explorado em condições de seu uso futuro. Como essa temática é o objeto principal do texto produzido, ela será mais explicitada em capítulo específico.

Legislação Infraconstitucional Mineral

O Direito Mineral é ciência autônoma de Direito Público, que tem por objeto um conjunto de normas e princípios destinados a dirigir toda a atividade minerária no País, abrangendo relações entre o Estado, mineradores e outros sujeitos por meio de um regime jurídico próprio, capaz de estabelecer direitos e obrigações inerentes a essas relações.

Como se viu, a Constituição Federal (BRASIL, 1990) estabeleceu as diretrizes políticas e jurídicas que norteiam as atividades de mineração. Como Lei Maior ela não pormenoriza os atos necessários à administração da indústria mineral. Transfere às legislações infraconstitucionais essa tarefa. Conhecê-las é, portanto, fundamental para quem se proponha a atuar no setor. As principais normas legais que disciplinam a atividade mineral são as seguintes: o Código de Mineração; Decreto-Lei 227/67, alterado e complementado pelas leis 6.567/78, 7.805/89, 7.990/89, 8.001/90, 8.176/91, 9.314/96 e 9.827/99. Tais leis estabelecem os seguintes regimes para exploração e aproveitamento mineral: Autorização de Pesquisa, Concessão de Lavra, Licenciamento Mineral, Permissão de Lavra Garimpeira, Regime de Monopólio, Regime de Extração Mineral, e os chamados Regimes Especiais. Além desses dispositivos legais, outros há que disciplinam o aproveitamento das águas minerais (Decreto-Lei 7.841/45) e dos fósseis (Decreto-Lei 4.146/42).

Da análise desses textos legais, podem ser resgatadas as seguintes inovações presentes nos diplomas minerais:

- Instituição do direito de prioridade, que consiste em garantir a preferência ao requerimento pioneiro, desde que esteja instruído com todos os elementos previstos no Código de Mineração e desde que, formulado por brasileiro ou empresa constituída sob as leis brasileiras com sua sede e administração no País.
- Responsabilização da autoridade municipal que não exercer vigilância para evitar que a atividade seja exercida sem o competente

registro de licenciamento para as substâncias sujeitas a esse regime, e garantia aos municípios de destacada participação na fiscalização das atividades mineradoras.

- Liberação do uso de jazidas de empréstimo.
- Criação das figuras do Reconhecimento Geológico, do Consórcio de Mineração e do Grupamento Mineiro.
- Estabelecimento de procedimentos judiciais para ingresso em áreas de terceiros.
- Exigência de registro no Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) do estatuto ou contrato social e acordos de acionistas, bem como das futuras alterações contratuais, para as sociedades mercantis atuarem no setor mineral, e o assentimento prévio do órgão, para as transferências de títulos minerários (averbações competentes).
- Complacência com as agressões ambientais por não prever sanções efetivas contra os danos causados ao meio ambiente. O texto do Código está mais para carta de intenções que para diretriz obrigatória.
- Aumento da extensão das áreas outorgadas, principalmente quando localizadas na Amazônia Legal.
- Permissão do desmembramento da concessão de lavra, horizontal e verticalmente.
- Instituição do Regime de Extração, flagrantemente inconstitucional, porque, dentre outros fatores, confere privilégio de lavra aos seguintes beneficiados: órgãos da administração direta e autárquica da União, estados, Distrito Federal e municípios.
- Previsão de sobrestamento de decisão administrativa quando a apresentação do relatório final de pesquisa revelar a impossibilidade temporária do aproveitamento mineral.

- Previsão da descentralização orgânica e política de parte da competência burocrática em favor das unidades periféricas do Ministério de Minas e Energia e de órgãos regionalizados.
- Criação da compensação financeira pela exploração mineral, a ser distribuída entre os estados, Distrito Federal, municípios e órgãos da administração direta da União.
- Exigência de Plano de Recuperação de Área Degradada pela mineração em complementação ao Plano de Aproveitamento Econômico da jazida mineral.

Legislação Infraconstitucional Ambiental

As principais legislações ambientais incidentes sobre a mineração são as seguintes:

- Código Florestal – Lei 4.771/65, alterado pelas leis 7.803/89, 7.754/89, 9.985/00, 9.605/98 e Medida Provisória 2.166-67/2001, que estabeleceram restrições a atividades econômicas ou não em áreas definidas (arts. 2° e 3°, 16 e 26).
- Lei 4.504/64, que dispõe sobre o Estatuto da Terra.
- Lei 6.225/75, que dispõe sobre a discriminação de regiões para execução obrigatória de planos de proteção ao solo e de combate à erosão.
- Lei 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.
- Estatuto do Índio – Lei 6.001/73, que regula a situação jurídica dos índios, com o propósito de preservar a sua cultura e integrá-los, progressiva e harmoniosamente, à comunhão nacional.

- Lei 7.347/85, que disciplina a ação civil pública de responsabilidade por danos ao meio ambiente, ao consumidor, a bens e direitos de valor artístico , estético, histórico, turístico e paisagístico.
- Decreto 97.632/89, que dispõe sobre a regulamentação do art. 2º, inciso VIII, da Lei 6.938/81 (apresentação de PRAD).
- Lei 9.433/97, que institui o Plano Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
- Lei 9.605/98, que dispõe sobre sanções penais, administrativas e civis derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.
- Lei 9.985/00, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), e estabelece critérios e normas para sua criação, implantação e gestão.
- Decreto 4.340/02, que regulamenta a Lei 9.985/00.

Essas legislações, minerais e ambientais, definem a melhor maneira de gerir um empreendimento mineral, harmonizando dois interesses fundamentais para o mundo moderno. Sob essa ótica pode-se definir gestão mineroambiental como sendo, de forma sintética, a forma como se pretende equacionar e resolver as questões ligadas a problemas conjunturais e sistêmicos específicos. Para tanto, o conhecimento do espaço físico, vale dizer, da paisagem definida e da realidade ali existente, é fundamental para a busca das soluções possíveis. Conhecer esse sistema e usá-lo com sabedoria, mediante regulamentação apropriada, é a forma de se evitar conflitos e garantir uma coexistência pacífica e duradoura entre os seus diversos partícipes.

Garantir o uso sustentável de determinado ecossistema é condição necessária e suficiente para sua gestão integrada, ou seja, é a forma de assegurar que as variáveis que o compõem – recursos naturais e culturais (elementos bióticos e abióticos), mantenham, de forma inexorável, os vínculos que os ligam e que permitem a sua desejada interação socioambiental.

A procura do desenvolvimento sustentável – utopia sociopsicológica – implica necessariamente na gestão integrada do território. Ele, como processo técnico-jurídico, busca conciliar o aproveitamento dos recursos naturais (no caso, minerais), visando o crescimento econômico da região e do seu titular, com a necessária e possível proteção ambiental. Os processos decisórios devem, portanto, levar em conta a participação dos diversos atores envolvidos com a gestão.

De modo inegável, ao se conceituar gestão integrada, não se pode olvidar de que se trata de um processo dinâmico, constituído por variáveis que interagem, entre si, e que necessitam, por isso mesmo, de bases conceituais sólidas. Bases que dependem, para sua eficácia, de um planejamento criterioso, da definição precisa das obrigações das partes, de efetiva fiscalização do uso do ecossistema, de uma coordenação gerencial democrática dos diversos atores protagonistas no sistema e de um monitoramento consistente atento às particularidades de cada um dos elementos do sistema.

Segundo diversos autores, podem-se estabelecer as seguintes bases para um eficaz gerenciamento socioambiental:

1) Base técnica: Constituída por equipes variadas, permite o conhecimento abrangente da região considerada, dos atores envolvidos, das variáveis que interferem com o meio físico e os aspectos culturais ligados ao processo de uso e ocupação do espaço geográfico. De posse dessas informações, torna-se fácil elaborar os instrumentos de gestão, especialmente o Plano Diretor, os Planos Nacionais, Regionais e Locais, bem como as redes de coleta de informações pertinentes.

2) Base legal: Para uma eficaz gestão é preciso constituir um banco de dados com sólidos e atuais fundamentos legais pertinentes. As leis, em sentido lato, como exteriorizadoras ou implementadoras das políticas públicas, são importantes instrumentos de gestão.

3) Ordenamento institucional: Tendo por base a diversidade de atores interessados na gestão do sistema, deve-se estabelecer uma forma

de gestão, adotando-se a figura de um colegiado, órgão plural, com estrutura hierárquica definida e com direitos e deveres preestabelecidos.

Plano de Recuperação de Área Degradada

Para o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama)

> **Recuperação**: significa que o sítio degradado será retornado a uma forma de utilização de acordo com o plano preestabelecido para o uso do solo. Implica que uma condição estável será obtida em conformidade com **valores ambientais estéticos e sociais da circunvizinhança**. Significa também, que o sítio degradado terá condições mínimas de estabelecer um novo equilíbrio dinâmico, desenvolvendo um novo solo e uma nova paisagem. (PINTO, 2008, 48).

Se a área é reabilitada ou restaurada, significa dizer que está pronta para seu uso imediato ou futuro. Donde se conclui que não há dano a ser sanado, nem, tampouco, punido.

As garantias técnicas e jurídicas para um desenvolvimento equilibrado da mineração no Brasil estão postas por meio das normas técnicas e das legislações aplicáveis ao caso. Algumas são prévias ao desenvolvimento da mineração, outras, concomitantes, e outras, finalmente, posteriores à explotação realizada.

Com relação às primeiras, merece destaque o artigo 225, inciso IV, da Constituição Federal, que exige, "[...] na forma da lei, para instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente, **estudo prévio de impacto ambiental, a que se dará publicidade**" (BRASIL, 1990). Ora, a finalidade explícita da exigência constitucional é uma só: permitir o conhecimento prévio dos impactos ambientais que poderão ser provocados por atividades econômicas ou não. A avaliação dos riscos inerentes à atividade mineral permitirá ou não a sua liberação em determinado local. Por sua vez, o artigo 39, do Código de Mineração, condiciona a outorga da Portaria de Lavra à apresentação de Plano de Aproveitamento Econômico da jazida, que deve contemplar*:*

> I. memorial explicativo; II. Projetos ou ante projetos referentes a: a) ao método de mineração a ser adotado, fazendo referência à escala de produção prevista inicialmente e à sua projeção; b) à iluminação, ventilação, transporte, sinalização e segurança do trabalho, quando se tratar de lavra subterrânea; c) ao transporte na superfície e ao beneficiamento e aglomeração do minério; d) às instalações de energia, de abastecimento de água e condicionamento de ar; e) à higiene da mina e dos respectivos trabalhos; f) às moradias e suas condições de habitabilidade para todos que residem no local da mineração; g) às instalações de captação e proteção das fontes, adução, distribuição e utilização de água, para as jazidas da classe VIII. (PINTO, 2008, p. 48).

Ainda, com relação às medidas preventivas, vale a pena incluir, além do inciso IV, do parágrafo 1º, do artigo 225, da Constituição Federal, também a Lei 6.938/81, que, em seu artigo 9º, incisos I a IV, também condicionam o exercício de atividades econômicas, a mineração, até mesmo, à obtenção pelo interessado das licenças ambientais específicas, com destaque para:

> Art. 9º."São instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente: I – o estabelecimento de padrões de qualidade ambiental; II – o zoneamento ambiental; III – **a avaliação de impactos ambientais; IV – o licenciamento e a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras**. (PINTO, 2008, p. 464).

O artigo 10, complementando o anterior prescreve que:

> A construção, instalação, ampliação e funcionamento de estabelecimento e atividades utilizadoras de recursos ambientais, considerados efetiva e potencialmente poluidores, bem como os capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, dependerão de **prévio licenciamento de órgão estadual competente**, integrante do Sisnama e do Ibama, em caráter supletivo, sem prejuízo de outras licenças exigíveis.(PINTO, 2008, p. 464).

Essas legislações, minerárias e ambientais, asseguram que uma atividade de mineração só pode ser desenvolvida se seus impactos forem reparáveis e reversíveis; caso contrário, nem o DNPM concede os títulos minerários, nem os órgãos ambientais outorgam as respectivas licenças ambientais. O órgão responsável pela mineração utiliza o artigo 42 do Código de Mineração para evitar o comprometimento ambiental pela mineração quando estatui que:

> Art. 42. **A autorização será recusada,** se a lavra for considerada prejudicial ao bem público ou comprometer interesses que superem a utilidade da exploração industrial, a juízo do Governo. Neste último caso, o pesquisador terá direito de receber do Governo a indenização das despesas feitas com os trabalhos de pesquisa, uma vez que haja sido aprovado o Relatório Final de Pesquisa. (PINTO, 2008, p. 464).

Disso resulta que a Portaria de Lavra só será outorgada se ficar demonstrada a necessária e possível compatibilização entre esses dois interesses.

Relativamente às segundas, vale dizer aquelas de aplicação concomitante à atividade mineral, merecem destaques aquelas previstas nos artigos 47, 48 e 52 do Código de Mineração (BRASIL, 1967), e aquelas previstas na legislação ambiental, especialmente os artigos 9º, IV, 10, parágrafos 1º, 2º e 3º e 11, parágrafos 1º e 2º, da Lei 6.938/81, e a Resolução Conama 237/97, que, embora considerada irregular por muitos, está em vigor e, pelo princípio da legalidade, deve ser obedecida. Esses dispositivos estabelecem o seguinte:

> Art. 47 – Ficará obrigado o titular da concessão, além das condições gerais que constam deste Código, ainda às seguintes, sob pena de sanções previstas no Capítulo V:
>
> [...]
>
> II. Lavrar a jazida de acordo com plano de lavra aprovado pelo DNPM, [...];
>
> [...]
>
> V. Executar os trabalhos de mineração com observância das normas regulamentares;
>
> VII. Não dificultar ou impossibilitar, por lavra ambiciosa, o aproveitamento ulterior da jazida;
>
> VIII. Responder pelos danos e prejuízos a terceiros, que resultarem, direta ou indiretamente, da lavra;
>
> IX. Promover a segurança e a salubridade das habitações existentes no local;
>
> X. Evitar o extravio das águas e drenar as que possam ocasionar danos e prejuízos aos vizinhos;
>
> XI. Evitar a poluição do ar ou da água, que possa resultar dos trabalhos de mineração;
>
> XII. Proteger e conservar as fontes, bem como utilizar as águas segundo os preceitos técnicos quando se tratar de lavra de jazida da classe VIII;

> XIII. Tomar as providências indicadas pela fiscalização dos órgãos federais;
>
> XIV. Não suspender os trabalhos de lavra, sem prévia comunicação ao DNM;
>
> XV. Manter a mina em bom estado, no caso de suspensão temporária dos trabalhos de lavra, de modo a permitir a retomada das operações. (BRASIL, 1967).

O artigo 48, do Código de Mineração, por sua vez, ao tratar da lavra ambiciosa estabelece que: "Considera-se ambiciosa, a lavra conduzida sem observância do plano preestabelecido, ou efetuada de modo a impossibilitar o ulterior aproveitamento econômico da jazida" (BRASIL, 1967).

As sanções previstas pelo descumprimento desse mandamento legal estão escritas no artigo 52, do Diploma Mineral, que estabelece que: "A lavra, praticada em desacordo com o plano aprovado pelo DNPM, sujeita o concessionário a sanções que podem ir gradativamente da advertência à caducidade" (BRASIL, 1967).

As legislações ambientais, anteriormente citadas, também condicionam o desenvolvimento da atividade mineral ao cumprimento de diretrizes ambientais específicas, dentre as quais destacam-se: a Lei 6.938/81 (BRASIL, 1981), denominada de Lei da Política Nacional do Meio Ambiente. Ela estabelece que: "Art. 9º - São instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente: [...] IV. O licenciamento e **a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras**". O artigo 10, por intermédio de seus parágrafos, vincula o exercício da lavra à necessária e possível proteção ambiental. Assim, para o "§ 1º - Os pedidos de licenciamento, **sua renovação** e a respectiva concessão serão publicados no jornal oficial do Estado, bem como em um periódico regional ou local de grande circulação". O parágrafo 2º, por sua vez, leciona que: "Nos casos e prazos previstos em resolução do Conama, o licenciamento de que trata este artigo dependerá de homologação do Ibama". E, finalmente, o parágrafo 3º desse artigo preceitua que:

> O órgão estadual do meio ambiente e o Ibama, este em caráter supletivo, poderão, se necessário e sem prejuízo das penalidades pecuniárias cabíveis, **determinar a redução das atividades geradoras de poluição**, para manter as emissões gasosas,

> os efluentes líquidos e os resíduos sólidos dentro das condições e limites estipulados no licenciamento concedido. (SIVINSKAS, 2004, p. 254).

Por fim, dentro dessa perspectiva protetora, ainda na segunda fase da atuação institucional, cujas normas legais estão previstas para aplicação concomitantemente ao desenvolvimento da lavra mineral, a Lei 6.938/81, por meio do seu artigo 11 prevê que:

> Compete ao Ibama propor ao Conama normas e padrões para implantação, **acompanhamento e fiscalização** do licenciamento previsto [...]. § 1º **- A fiscalização e o controle da aplicação de critérios, normas e padrões de qualidade ambiental** serão exercidos pelo Ibama, em caráter supletivo da atuação do órgão estadual e municipal competente. § 2º - Inclui-se na **competência da fiscalização e controle a análise de projetos de entidades, públicas e privadas, objetivando a preservação** ou a recuperação de recursos ambientais, afetados por processos de exploração predatórios ou poluidores. (SIVINSKAS, 2009, p. 254).

As diretrizes legais apontadas asseguram a continuidade da atividade mineradora dentro dos compromissos assumidos por ocasião da apresentação dos respectivos requerimentos iniciais, minerais e ambientais. Esses requerimentos, por sua vez, condicionaram os atos de outorga à apresentação de estudos técnicos compatíveis e ao seu cumprimento integral durante a fase do desenvolvimento da lavra.

Quanto à terceira fase cuja ação de proteção ambiental é feita posteriormente à explotação mineral, há, da mesma forma como explicitado para as fases anteriores, inúmeros dispositivos legais e técnicos que são suficientes para assegurar a incolumidade do ambiente. Essa fase cuida da recuperação da área degradada. Para o dicionarista Houaiss (2001), recuperar é reaver, reentrar na posse, restaurar, reintegrar, etc., ações impossíveis de se alcançar nas atividades de mineração que, como se viu, desenvolvem-se na crosta terrestre mediante desagregação das rochas, seu objeto principal. Ora, a atividade mineral, que é também ambiental, se perfaz subtraindo parcela do solo da crosta terrestre. Uma jazida mineral será explotada, técnica e legalmente, até a sua exaustão.

O termo recuperar, nesse sentido, é, portanto, impróprio. Deve ser substituído por reabilitação da área minerada, que significa, havendo

alteração da área minerada, o restabelecimento do ambiente em condições para seu uso futuro. Ademais, não se pode esquecer duas coisas: uma, a rigidez locacional do depósito mineral – uma jazida encontra-se onde os condicionantes geológicos a criaram –, e duas, não se pode extrair minérios sem modificar o ambiente. Para contrapor o eventual comprometimento ambiental, o legislador constituinte sabiamente criou para o minerador a obrigação de reabilitar a área utilizada pela atividade, que, como se disse, consiste em permitir seu uso futuro, econômico ou não. Em resumo, pode-se afirmar que, se para a mineração a recuperação da área é uma exigência, a modificação do ambiente pela atividade é uma necessidade.

Se o minerador estiver atento aos princípios ambientais (precaução, sustentabilidade, função social da propriedade, etc.), a sociedade tem de respeitar a atividade pela possibilidade de recuperação do ambiente. A sustentabilidade não significa que não se possa alterar o ambiente, significa que, havendo alteração, o ambiente deve ser restabelecido em condições de seu uso futuro. Esse aparente privilégio se justifica pelas características intrínsecas da mineração (rigidez locacional e possibilidade de recuperação da área degradada).

Os dispositivos legais responsáveis pela obrigação de recuperação da área minerada são os seguintes: art. 225, parágrafo 2,º que estabelece que: "Aquele que explorar recursos minerais **fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado**, de acordo com a solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei". (BRASIL, 1981).

O Decreto 97.632/89, por meio dos seus três primeiros artigos, conceituou recuperação de área minerada e definiu os procedimentos institucionais para proteger o meio ambiente. São eles:

> Art. 1º. Os empreendimentos que se destinam à exploração de recursos minerais deverão, quando da apresentação do EIA/RIMA, **submeter à aprovação do órgão ambiental competente plano de recuperação de área degradada.**
>
> Parágrafo único – Para os empreendimentos já existentes deverá ser apresentado ao órgão ambiental competente, no prazo máximo de 180 dias, a partir da data de publicação deste decreto, **um plano de recuperação da área degradada.**

> Art. 3º - A recuperação deverá ter **por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo, visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente.** (PINTO, 2008, p. 264).

Com fundamento nesses preceitos legais, tanto o DNPM quanto os órgãos ambientais exigem a inclusão de planos de recuperação de áreas degradadas na apresentação dos respectivos estudos técnicos, minerários e ambientais, necessários à obtenção dos títulos minerais e licenças ambientais específicos. Esses estudos integrados asseguram a necessária e possível proteção ambiental nas atividades de mineração.

Por fim, cabe analisar dois parágrafos do artigo 225, da Constituição de 1988, os quais, se não forem excludentes, são, ao menos, inaplicáveis à mineração, como se verá:

Parágrafo 2º – "Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei" (BRASIL, 1990). Esse dispositivo obriga o minerador a recuperar a área degradada, vale dizer, exige a devolução do terreno em condições de uso pós-mineração. É o reconhecimento expresso de que, uma vez obtidas as autorizações governamentais, eventuais impactos negativos serão solucionados, seja porque há soluções técnicas e legais colocadas à disposição do minerador e necessárias à outorga dos títulos autorizativos, seja porque os monitoramentos ambientais obrigatórios asseguram a manutenção da qualidade do ambiente. Ademais, não se pode ignorar que as licenças ambientais são títulos precários e resolutivos, seja porque podem ser revogados, seja porque são outorgadas por prazo exíguo. O parágrafo 3°, por sua vez, impõe sanções a quem lesionar o meio ambiente ao estabelecer que:

Parágrafo 3º – "As condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas e jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados" (BRASIL, 1990). No nosso modesto entendimento essa re-

gra, por ser geral, não se aplica à mineração bem conduzida, ainda que a mineração desconfigure a paisagem, porque ela dispõe de um dispositivo específico, qual seja o parágrafo 2º anteriormente descrito, e que condiciona a liberação dos títulos de autorização à apresentação e ao cumprimento de procedimentos técnicos e legais voltados à proteção ambiental. Como sabemos, as regras específicas sobrepõem-se às gerais. Ademais, para a legitimidade da atividade mineral é necessário que o interessado cumpra, durante todo o desenvolvimento da atividade, as obrigações legais pretéritas, presentes e futuras.

Considerações finais

Do que foi exposto, pode-se concluir que:

1. A mineração é atividade econômica fundamental para o mundo moderno.
2. O aproveitamento mineral depende de duas coisas: a) só pode ocorrer onde os condicionantes geológicos criaram as jazidas; b) modificam o ambiente, ainda que o local possa e deva ser reabilitado.
3. Para tanto, há procedimentos técnicos e legais colocados à disposição dos mineradores que buscam harmonizar esses dois interesses.
4. A diversidade de informações necessárias à manutenção do equilíbrio ecológico exige que o assunto seja estudado por equipe inter e transdisciplinar e não simplesmente multidisciplinar, como ocorre.
5. É fato que, embora haja inúmeros dispositivos legais para regulamentar a reabilitação da área minerada, não é menos verdade que as interpretações dos agentes públicos sobre a questão mineroambiental não são uniformes e pecam, porque, na aplicação da hermenêutica, dão mais ênfase aos aspectos linguístico-gramaticais que aos lógicos e sistemáticos.

Referências

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. São Paulo: Saraiva, 1990. 168 p.

BRASIL. Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967. Dá nova redação ao Decreto-lei nº 1.985, de 29 de janeiro de 1940 (Código de Minas). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 28 fev. 1967.

BRASIL. Lei n° 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 set. 1981.

HERMANN, H.; FORNASARI FILHO, N. ; BITAR, O. Y. ; LOSCHL FILHO, C. ; SILVA, W. S. Estudos para a elaboração de diretrizes para o aperfeiçoamento e reformulação da legislação ambiental em relação à mineração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2., 1987, São Paulo. **Anais...** Belo Horizonte: Ibram, 1987. p. 185-190.

HOUAISS, A. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Instituto Antônio Houaiss de Lexicografia, 2001. 3008 p.

PINTO, U. R. **Consolidação da legislação mineral e ambiental**. 4. ed. Brasília, DF: LGE, 2008.

SERRA, S. H. **Direitos minerários**: formação, condicionamentos e extinção. São Paulo: Signus, 2002. 153 p.

SIVINSKAS, L. P. **Legislação de direito ambiental**. 4. ed. São Paulo: Dideel, 2009. 124 p.

Parte 3

Indicadores de qualidade ambiental em áreas degradadas

Capítulo 1

Avaliação ambiental por meio de ácidos húmicos na área de mineração do xisto em São Mateus do Sul, PR

Antonio Sálvio Mangrich
Henrique K. Porto Alegre
Lenise da Silva
Cristiane Regina Budziak
Claudia M. B. F. Maia

Introdução

Não é possível descrever quimicamente a matéria orgânica do ambiente (solos, sedimentos e águas) com um modelo molecular. A heterogeneidade química das moléculas das substâncias húmicas (SH) pode ser vista como uma "estratégia" evolutiva de persistência no ambiente, povoado por microrganismos que se alimentam de estruturas de carbono. Assim, em química de SH, pureza significa representatividade da amostra com relação ao ambiente de onde foi coletada, e na caracterização química e espectroscópica buscam-se teores de grupos funcionais, componentes do conjunto de moléculas e não estruturas moleculares puras. Falar de modelo estrutural de SH não faz sentido a não ser do ponto de vista intelectual e educacional (SCHULTEN; SCHNITZER, 1997). Os ácidos húmicos (AH) são componentes das SH e compreendem a maior parte da matéria orgânica do solo. São extraídos dos solos por solubilização em álcalis fortes e posterior precipitação com ácido, contendo diversos tipos de grupos ácidos com forças variáveis. A força de um grupo ácido pode ser medida pelo seu pKa, que varia entre 4 e 5 para os ácidos carboxílicos, aproximadamente 9 para os fenóis, e perto de 20 para os álcoois.

As SH são constituídas de moléculas orgânicas, com funções de estruturação de solos e sedimentos (interações com argilas e oxi-hidróxidos metálicos), capazes de armazenar umidade e outros nutrientes de plantas, de absorver luz solar e de reter poluentes orgânicos e metálicos. São produtos de reações químicas e biológicas de metabólitos e restos não digeridos, da ação de bactérias, fungos, actinomicetes e outros componentes da fauna do solo, como os anelídeos sobre substâncias de origem biológica, principalmente de origem vegetal.

As características químicas e espectroscópicas das substâncias húmicas exibem informações relacionadas com as condições do meio ambiente em que estão depositadas (GOMES et al., 1996; MANGRICH et al., 1998; PAIM et al., 1990).

Formação de petróleos e xistos betuminosos

Petróleos e xistos betuminosos têm origens similares. O xisto betuminoso pode ser considerado como um material que produziria óleo e gás, caso fosse submetido à temperatura e pressão adequadas em paleoambientes do interior da Terra, por períodos de tempo prolongados.

Na origem de petróleos podemos considerar fases que são também comuns aos xistos betuminosos. Na formação do petróleo do Mar do Norte, por exemplo, há 300 milhões de anos, à medida que a água do mar evaporou, deixou uma camada de sal. Há 200 milhões de anos, uma camada de xisto, rica em matéria orgânica, foi formada sobre o sal, e um depósito de arenito, que se transformaria no reservatório de petróleo, foi formado também. Há 100 milhões de anos, conforme o sal começou a subir, a paleotemperatura provocou a extração do óleo do xisto, produzindo o petróleo que migrou para o interior da formação de arenito. O que não ocorreu, por exemplo, com o xisto betuminoso da Formação Irati, onde faltou pressão e temperatura (paleotemperatura suficiente) para a remoção do óleo. O Processo Petrosix imita a natureza nesse ponto. A natureza apresenta problemas desafiadores para serem estudados e é, ao mesmo tempo, modelo para a proposição de modernos processos tecnológicos que imitam os processos naturais estabelecidos de forma evolutiva. Nesses processos industriais, imitadores da natureza, a nossa capacidade de considerar as mudanças de escalas é crucial, uma vez que os processos naturais ocorrem em escalas de tempo e de massa muito maiores que as que são factíveis num processo industrial (FRIMMEL et al., 2004). Desse modo o processo geológico, no tempo de cerca de 100 milhões de anos, empregados no processo natural de extração de petróleo e gás (de quantidade imensa de xisto para o arenito), é substituído, na retorta industrial do processo Petrosix, pelo aquecimento próximo de 500 °C, durante 45 minutos, utilizando-se algumas toneladas de xisto. Como o processo de formação do petróleo foi fruto de seleção natural, pode ser considerado também evoluído. Imitar um processo natural evoluído numa atividade industrial é preocupação para torná-la eficiente

técnica, econômica e ambientalmente correta. A caracterização detalhada do material é importante para a proposição e aperfeiçoamento do processo industrial. Sabe-se, por exemplo, que o xisto betuminoso da Formação Irati foi submetido, há cerca de 150 milhões de anos, a aquecimento diferenciado, no que concerne a sua estratigrafia, pela lava vulcânica proveniente do derrame basáltico ocorrido naquela época. Esse comportamento anômalo da função estratigráfica, paleotemperatura, foi observado por Costa Neto et al. (1978) e contradito por Correa da Silva e Conford (1985). Sousa et al. (2001) mediram parâmetros de espectroscopia de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) para uma coluna estratigráfica da Formação Irati. A boa correlação observada entre as funções estratigráficas de EPR e o Índice de Alteração Térmica (IAT) confirmou o resultado reportado por Costa Neto et al. (1978).

No processo Petrosix busca-se preservar o ambiente de danos da mineração e da extração dos produtos e subprodutos do xisto betuminoso. Os principais produtos obtidos no processo SIX são: gás combustível industrial para autoconsumo; gás liquefeito para uso doméstico e industrial; nafta usada como combustível industrial e como diluente; óleo combustível industrial; e enxofre usado na indústria farmacêutica, alimentícia, petroquímica e de fertilizantes. Como subprodutos o processo fornece: cinzas de xisto, que é insumo para a indústria de cimento; água de retortagem, utilizada como fertilizante e defensivo agrícola; torta oleosa, usada como combustível sólido alternativo para lenha e carvão. Também fornece finos de xisto, que pode ser empregado como insumo energético; xisto retortado, possível insumo industrial para a produção de cerâmica, vidros, cimento e substrato para a agricultura; e calxisto, usado na absorção de gases ácidos industriais e como corretivo de acidez de solos. Com a finalidade de estudar a utilização de subprodutos do processo SIX, preparou-se um material para uso como fertilizante de liberação lenta de potássio (FLLK), utilizando-se finos de xisto e o calxisto. A solubilidade do produto, expressada como porcentagem de K_2O, foi de 30,3% em HCl 0,5 mol/L, de 23,2% em ácido cítrico 0,1 mol/L, e de 6,9% em H_2O. Esses resultados são similares, ou melhores que alguns outros FLLK citados na literatura. O uso de finos de xisto betuminoso e calxisto

como materiais de partida para a síntese do fertilizante poderá auxiliar na resolução dos problemas de disposição dos rejeitos do processo, e baixar os custos de produção da Indústria Brasileira de Xisto Betuminoso (MANGRICH et al., 1999, 2001). Por sua vez, a Petrobras vem desenvolvendo a reabilitação das áreas mineradas, dispondo o xisto retortado nas cavas de mineração e reconstituindo a topografia por cobertura com camada superficial de argila e solo originais da frente de mineração. Na sequência os terrenos são preparados para implantação de reflorestamentos com espécies nativas ou sistemas agropastoris, de forma a permitir a sua utilização futura pelo homem e/ou pela fauna silvestre.

O presente trabalho foi desenvolvido a partir de amostras de matéria orgânica acumuladas no piso de uma dessas áreas, reflorestadas com espécies leguminosas pioneiras, destacando-se a acácia negra (*Acacia mearnsii*). Foram efetuadas a extração e caracterização dos ácidos húmicos (AH) dos horizontes orgânicos de área reabilitada (AHAR) e de solo da mesma região, mas não afetado pela extração do xisto (AHAN), visando avaliar o papel dos mesmos como indicadores de recuperação ambiental da área de mineração.

Materiais e métodos

O local de estudo está situado próximo às coordenadas 25º52'S e 50º23'W, na altitude de 760 m. O clima é do tipo pluvial temperado, superúmido, mesotérmico, com verões suaves e invernos com geadas severas e frequentes. A temperatura média anual mínima é de 13 C, a temperatura média anual máxima é de 21 C, e a pluviosidade de 1.400 mm é bem distribuída durante todo o ano (IAPAR, 1978).

As folhas e outros materiais de plantas, assim como restos de animais depositados no piso das florestas, são gradualmente humificados, resultando, em proporções menores, de remanescentes morfologicamente identificáveis (KOEGEL-KNABNER, 1991).

A quantidade de material depositado depende das espécies existentes e do estágio de maturação da floresta. Em uma floresta de araucária da região foi verificada a deposição de serrapilheira (folhas, galhos, frutos, flores e outros) de 6.526,7 kg/ha/ano (BRITEZ et al., 1992), levando-se a reciclagem anual de 89,2 kg/ha de N, 62,6 kg/ha de Ca, 31,9 kg/ha de K, 15,8 kg/ha de Mg e 5,7 kg/ha de P. Trabalhos em terrenos reabilitados com bracatinga (*Mimosa scabrella*) indicam valor médio anual de 3,6 t/ha, correspondendo a 65,5 kg/ha de N, 25,5 kg/ha de Ca, 11,2 kg/ha de K, 5,7 kg/ha de Mg e 2,9 kg/ha de P reciclados anualmente (POGGIANI; MONTEIRO, 1990).

O presente trabalho foi desenvolvido com espécies florestais leguminosas, predominando acácia negra (*Acacia mearnsii*), que na época contava com 6 anos de idade. As amostras foram coletadas em profundidade de 10 cm. Essa profundidade corresponde ao horizonte Oh, onde o material está totalmente humificado (KOEGEL-KNABNER, 1991).

Para estudo comparativo de ácido húmico "jovem", foi utilizado um composto preparado com 50%, em massa, de lodo de fábrica de papel e celulose e 50%, em massa, de serragem. A compostagem ocorreu durante 29 dias. O ácido húmico de compostagem (AHC) foi extraído segundo descrição a seguir e comparado com o ácido húmico do lodo original (AHL), Budziak et al. (2004).

Extração dos ácidos húmicos

Após secagem ao ar, as amostras dos solos foram reduzidas a pó e acidificadas com solução de HCl 0,05 mol/L, permanecendo, então, em repouso por 24 horas, com a finalidade de hidrolisar complexos metálicos lábeis e carbonatos metálicos. Na sequência foi retirado o líquido sobrenadante com o auxílio de vácuo de trompa d'água. Após secagem ao ar as amostras tratadas foram reduzidas novamente a pó e fracionadas em peneiras de nylon de 2 mm, com a finalidade de retirar resíduos vegetais. Posteriormente, 100 g de cada amostra foram colocados em frascos de

polietileno e, a cada uma delas, adicionados 800 ml de solução aquosa de NaOH 0,1 mol/L. Ao mesmo tempo passou-se gás argônio pela mistura com agitação durante cerca de 10 minutos. Depois dessas operações os frascos com as misturas reacionais foram vedados e colocados em agitador mecânico por 24 horas. Após esse período as suspensões foram centrifugadas por cerca de 15 minutos, a 3.500 rpm, descartando-se o precipitado e adicionando-se HCl concentrado ao sobrenadante alcalino, até pH em torno de 2. Após 48 horas a suspensão formada no meio ácido foi novamente centrifugada. Esse processo foi repetido três vezes para se diminuir o teor de cinzas dos AH extraídos. O sólido isolado, que corresponde ao AH, foi analisado quanto ao teor de cinzas. Como os testes de cinzas apresentaram-se altos (AHAR = 57,9% e AHAN = 55,0%), os AH foram tratados, por três vezes, com solução de HF/HCl 0,5% por 0,5% na proporção de 1 g de AH para 100 ml da solução ácida. A seguir os AH foram analisados quanto aos teores de acidez carboxílica, acidez fenólica, por espectrofotometria de infravermelho e análise elementar de metais por ICP. A Figura 1 descreve todo o processo.

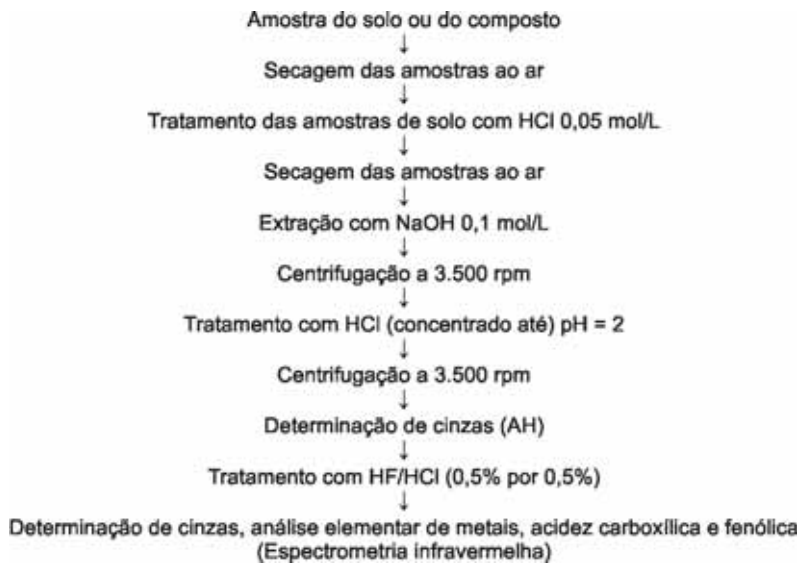


Figura 1. Esquema de extração de ácidos húmicos.

Caracterização

Determinação de cinzas

Os teores de cinzas foram determinados segundo Paim et al. (1990) levando-se as amostras à combustão, dentro de cadinhos de porcelana, em forno a 700 °C, pesando-se os cadinhos com as amostras antes e depois da combustão.

Determinação de acidez parcial (SCHNITZER; GUPTA, 1965)

As reações químicas envolvidas na determinação de acidez parcial (acidez carboxílica) são descritas a seguir, das quais as fórmulas grifadas representam sólidos em suspensão:

$AH\text{-}(COOH)_2 + Ca(OAc)_2 \rightarrow AH\text{-}(COO)Ca + 2\ HOAc$ (durante 24 horas)

$HOAc + NaOH \rightarrow NaOAc + H_2O$ (titulação potenciométrica)

50 mg a 100 mg de amostra de AH foram adicionados a um frasco de 300 ml, juntamente com 10 ml de solução 0,1 mol/L de $Ca(OAc)_2$ e 40 ml de água destilada livre de CO_2. Agitou-se, por 24 horas, à temperatura ambiente, e então a solução foi filtrada e o resíduo lavado com água destilada livre de CO_2. O filtrado, juntamente com as águas de lavagem, foram titulados potenciometricamente com solução padrão de NaOH, em torno de 0,100 mol/L, até atingir pH 9,8. Um teste de controle foi feito simultaneamente, sem a adição do AH.

Determinação de acidez total (SCHNITZER; GUPTA, 1965)

As reações químicas envolvidas na determinação de acidez total (acidez carboxílica mais acidez fenólica) são:

$HOOC\text{-}AH\text{--}OH + Ba(OH)_2$ (em excesso) $\rightarrow$ $(OOC\text{-}AH\text{- -}O)Ba + 2H_2O$ (durante 24 horas)

$Ba(OH)_2$ (excesso) $+ 2HCl \rightarrow BaCl_2 + 2H_2O$ (titulação potenciométrica)

Foram adicionados a um frasco de 300 ml, 50 mg a 100 mg de AH, juntamente com 20 ml de $Ba(OH)_2$ 0,25 mol/L. Agitou-se por 24 horas em temperatura ambiente. A solução foi filtrada, lavada e titulada potenciometricamente, utilizando-se solução padrão de HCl, em torno de 0,500 mol/L, até atingir pH 8,4. Um teste de controle foi feito simultaneamente, sem a adição do AH. Para avaliar a exatidão do método foram feitas titulações-padrão com ácido salicílico, que é usado como modelo de estrutura, com grupos carboxílicos e fenólicos, das substâncias húmicas.

Espectrofotometria de infravermelho

Os espectros de infravermelho foram registrados em espectrofotômetros Perkin Elmer, modelo 467, e Bomen FTIR, série MB, segundo Paim et al. (1990), utilizando-se pastilhas de KBr. Estas foram obtidas por prensagem, sob vácuo, de misturas uniformemente preparadas de 1 mg de AH e 99 mg de KBr de grau espectroscópico.

Análise elementar por ICP

As análises químicas de metais foram efetuadas utilizando-se espectrômetro de emissão por **plasma induzido de argônio**, modelo ARL FISONS 3410, ICP com minitocha (Cenpes/Petrobras). As amostras AHAR e AHAN foram tratadas utilizando-se misturas de $HClO_4/HNO_3$ 1:3. Esse procedimento não foi suficiente para a "abertura" total das amostras. Efetuaram-se, então, fusões com mistura de $LiBO_2/Li_2B_4O_7$ 1:2 e posterior dissolução em HNO_3 quente. Foram determinados os elementos: Ca, Cd, K, Cr, P, Sr, Pb, Mn, V, Al, Zn, Fe, Mg, Cu, e Mo.

Resultados e discussão

Acidez carboxílica e acidez fenólica

Os teores de acidez carboxílica, fenólica e total dos AH estudados e do AHC e AHL (BUDZIAK et al., 2004) utilizados para efeito de comparação são mostrados na Tabela 1. Considerando os dados de Rashid (1985), os teores de acidez carboxílica (-COOH) e de acidez fenólica (-OH) para o AHAR e o AHAN poderiam sugerir poluição no solo. Para as amostras de AHC e AHL os teores de grupos -COOH encontram-se entre os valores para AHAR e AHAN, e os valores de -OH encontram-se abaixo dos valores para os AHAR e AHAN, sugerindo-se que essas características são consequências da pouca maturação da matéria orgânica estudada dos dois solos em causa, e não por níveis de poluição mais elevados.

Tabela 1. Algumas características químicas como teor de cinzas, acidez carboxílica e acidez fenólica dos AH estudados e de ácido húmico de composto (AHC) e ácido húmico de lodo (AHL).

Amostra	Grupo Funcional (mmol/100 g)			Cinza (%)
	ϕ-COOH	ϕ-OH	(ϕ-COOH + ϕ-OH)	
AHAR	210	570	780	10,0
AHAN	240	510	750	23,0
AHC	226	420	646	15,1
AHL	219	313	532	8,7

Fonte: Budziak et al. (2004).

Análise elementar

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de análise elementar para as amostras AHAR, AHAN e AHL. Os teores de Al e Fe são os mais altos entre os elementos químicos analisados, para as amostras AHAR e AHAN. O Al, um elemento fitotóxico, encontra-se em menor concentração no AHAR. Chama a atenção os teores de P que estão bastante altos para ácidos

húmicos (RASHID, 1985). No caso do AHL o teor alto de P deve-se à adição de nutrientes às lagoas de decantação, por meio dos rejeitos de fábricas de papel e celulose, para favorecer a atividade microbiana e consequente degradação dos rejeitos. Verifica-se ainda que metais poluidores, como Cd e Pb, apresentam resultados semelhantes, e baixos, para os dois AH.

Tabela 2. Concentrações (ppm) de elementos químicos nos AHAR, AHAN e AHL.

Amostra	Mg	Al	P	K	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Sr	Mo	Cd	Pb
AHAR	77	5.000	2.200	390	<7	160	49	190	110.000	60	<20	19	<15	<1	<40
AHAN	98	9.500	1.300	250	<10	130	33	62	60.000	110	<30	25	<10	<1	<32
AHL	150	nd	1.300	420	250	nd		26	200	1,6	62	nd	nd	nd	nd

nd = não determinado.
Fonte: Budziak et al. (2004).

Espectroscopia de infravermelho

Os espectros de infravermelho dos AHAR e AHAN e dos AHC e AHL são similares.

Todos os espectros mostram uma banda larga e intensa na região de 3.500 cm^{-1} – 3.200 cm^{-1}, que é atribuída a deformações axiais de grupos OH e NH com pontes de hidrogênio. Apresentam também bandas de intensidades médias na região de 2.910 cm^{-1} – 2.840 cm^{-1}, atribuídas a deformações axiais de grupos CH alifáticos (MIIKK et al., 1997). Em todos os espectros há bandas largas centradas em 2.500 cm^{-1}, atribuídas ao primeiro sobretom da banda em 1.250 cm^{-1}, típica de vibração C-O de ácidos carboxílicos. Logo abaixo, em termos de energia, verifica-se também banda larga centrada em 2.000 cm^{-1}, atribuída ao primeiro sobretom de vibração C-O de carboidratos. Observa-se que a banda em torno de 1.750 cm^{-1}, atribuída à vibração de estiramento de grupo C=O de ácidos carboxílicos, é mais intensa na amostra AHAN, o que correlaciona com o maior teor destes para a mesma amostra, determinado por titulação (Tabela 1). A banda em

1.650 cm^{-1}, presente em todas as amostras, corresponde à vibração axial de grupos C=O de amidas, ligados por pontes de H (banda de amida I), às ligações C=C de estruturas aromáticas e, também, a grupos COO^{-}. As bandas em torno de 1.250 cm^{-1} são atribuídas a vibrações C-O de ácidos carboxílicos. As bandas em torno de 1.030 cm^{-1} são atribuídas a vibrações C-O de carboidratos e ligninas. Nas amostras AHAR e AHAN essas bandas estão alargadas pela presença próxima (~1.090 cm^{-1}) de vibrações Si-O de silicatos. As amostras de AHC e AHL apresentam a banda em 1.030 cm^{-1} bem intensa, em razão do alto teor de celulose e lignina que os rejeitos de fábricas de papel e celulose possuem.

Considerações finais

Pelos resultados obtidos conclui-se que o processo de recuperação das áreas de mineração do processo Petrobras-SIX leva a formação de ácidos húmicos, no horizonte orgânico do solo recuperado, com estruturas químicas típicas de ácidos húmicos "jovens", adequados para exercer as funções ambientais de retenção de água, absorção de luz, retenção de nutrientes, estruturação do solo. Usando-se como referência os dados de Rashid (1985), os teores de acidez carboxílica (ϕ-COOH) e de acidez fenólica (-OH), para os ácidos húmicos da área natural e da área recuperada, poderiam sugerir poluição no solo. As amostras de ácido húmico de composto e ácido húmico de lodo, de formação recente, usados como referências neste trabalho, apresentaram teores de grupos ϕ-COOH entre os valores para os ácidos húmicos aqui estudados, sugerindo-se que essas características são consequências da pouca maturação da matéria orgânica dos dois solos em causa, e não por níveis de poluição mais elevados.

Referências

BRITEZ, R. M.; REISSMAN, C. B.; SILVA, S. M.; SANTOS FILHO, A. Deposição estacional de serrapilheira e macronutrientes em uma floresta de araucária, São Mateus do Sul, Paraná. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 3, p. 766-772, 1992.

BUDZIAK, C. B.; MAIA, C. B. F.; MANGRICH, A. S. Transformações químicas da matéria orgânica durante a compostagem de resíduos da indústria madeireira. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 399-403, 2004.

CORREA DA SILVA, Z. C.; CORNFORD, C. The kerogen type, depositional environment and maturity of the Irati shale, Upper Permian of Paraná Basin, Southern Brazil. **Organic Geochemistry**, Amsterdam, NL, v. 8, n. 6, p. 399-411, 1985.

COSTA NETO, C.; FURTADO, E. G.; CONCHA, F. J. M.; CARDOSO, J. N.; QUADROS, L. P. Anomalies in the stratigrphic distribution of hydrocarbons in the Irati oil shale. **Chemical Geology**, Amsterdam, NL, v. 23, p. 181-192, 1978.

FRIMMEL, F. H.; ABBT-BRAUN, G.; MUELLER, M.; BRINKMANN, T.; LANKES, U.; SARAVIA, F. Humic matter in water treatment: learning from nature. In: MARTIN-NETO, L.; MILORI, D. M. B. P.; SILVA, W. T. L. da. (Ed.). Humic substances and soil and water environment. INTERNATIONAL MEETING OF INTERNATIONAL HUMIC SUBSTANCES SOCIETY. 12., 2000, **Proceedings...** São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2004. p. 45-47.

GOMES, R. C.; MANGRICH, A. S.; COELHO, R. R. R.; LINHARES, L. F. Elemental, functional group and infrared spectroscopic analysis of actinomycete melanins from brazilian soils. **Biology and Fertility Soils**, Berlin, DE, v. 21, p. 84-88, 1996.

IAPAR. Fundação Instituto Agronômico do Paraná. **Cartas climáticas básicas do Estado do Paraná**. Londrina: Iapar. 1978. 41 p.

KOEGEL-KNABNER, I. Fate at plant components during biodegradation on humification in forest soils: evidence from structural characterization of individual biomacromolecules. In: WILSON, W. S. (Ed.). **Advances in soil organic matter research**: the impact on agriculture and the environment. Cambridge: Royal Society of Chemistry**,** 1991. 410 p.

MANGRICH, A. S.; LERMEN, A. W.; SANTOS, E. J.; GOMES, R. C.; COELHO, R. R. R.; LINHARES, L. F.; SENESI, N. Electron paramagnetic resonance and ultraviolet-visible spectroscopic evidence for copper porphyrin in actinomicetes melanins from Brazilian soils. **Biology and Fertility Soils**, Berlin, DE, v. 26, p. 341-345, 1998.

MANGRICH, A. S.; TESSARO, L. C.; ANJOS, A. dos. **Fertilizante de potássio de liberação lenta**. São Mateus do Sul: Petrobras, 1999. 25 p. (Patente INPI n°. 9902803-4).

MANGRICH, A. S.; TESSARO, L. C.; ANJOS A. dos; WYPYCH, F.; SOARES, J. F. A slow-release K+ fertilizer from residues of the Brazilian oil-shale industry: synthesis of kalsilite-type structures. **Environmental Geology**, New York, v. 40, p. 1030-1036, 2001.

MIIKKI, V.; SENESI, N.; HÄNNINEN, K. Characterization of humic material formed by composting of domestic and industrial biowastes. **Chemosphere**, Amsterdam, NL, v. 34, n. 8, p. 1639-1651, 1997.

PAIM, S.; LINHARES, L. F.; MANGRICH, A. S.; MARTIN, J. P. Characterization of fungal melanines and soil humic acids by chemical analysis and infrared spectroscopy. **Biology and Fertility Soil**, Berlin, DE, v. 10, p. 72-76, 1990.

POGGIANE, F.; MONTEIRO, C. C. Efeito da implantação de maciços florestais puros na reabilitação de solo degradado pela mineração do xisto betuminoso. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1990. p. 275-281.

RASHID, M. A. **Geochemistry of marine humic compounds**. New York: Springer Verlag, 1985. 300 p.

SCHNITZER, M.; GUPTA, U. C. Determination of acidity in soil organic matter. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 27, p. 274-277, 1965.

SCHULTEN, H. R.; SCHNITZER, M. Chemical model structures for soil organic matter and soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 162, p. 115-130, 1997.

SOUSA, J. J. F.; VUGMAN, N. V.; MANGRICH, A. S. An ESR study on the Irati oil shale kerogen. **Environmental Geology**, New York, v. 40, n. 8, p. 1030-1036, 2001.

Parte 3

Indicadores de qualidade ambiental em áreas degradadas

Capítulo 2

Impacto da drenagem ácida na água subterrânea

Sueli Yoshinaga Pereira

Introdução

A mineração de carvão e de jazidas de minérios metálicos apresenta problemas graves de contaminação ambiental, associada à remoção do material estéril e, principalmente, à exposição dos rejeitos de mineração e das rochas encaixantes. Esse processo atua como catalisador das reações de oxidação, produzindo ácido sulfúrico, por meio de reações de minerais sulfetados como pirita, pirrotita, calcopirita e arsenopirita, comuns nessas rochas, com o oxigênio da atmosfera, liberando cátions metálicos, sulfato e acidez nas águas superficiais e subterrâneas. Assim, a Drenagem Ácida de Mina (DAM) representa um dos principais impactos desse tipo de empreendimentos.

Na região carbonífera dos Apalaches (EUA), 6.000 toneladas de ácido sulfúrico são produzidas diariamente, oriundas da drenagem de águas ácidas de pilhas de rejeitos de mineração, refletindo-se nas águas superficiais e subterrâneas da região (FETTER, 2001). Estima-se que cerca de 1,1 milhão de acres são áreas de minas de carvão abandonadas, sobre 9.709 milhas de drenagens poluídas pela DAM, 16.326 acres de pilhas de rejeitos perigosos e 874 áreas perigosas (USEPA, 2005).

No Brasil, a região carbonífera de Santa Catarina registra problemas ambientais, que atingem as bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga, afetando 39 municípios com cerca de 650.000 habitantes (COMITÊ GESTOR, 2002). O Decreto Federal n° 85.206, de 25/09/1980, define a região sul do estado como "Área Crítica Nacional", para efeitos de controle da poluição e conservação do meio ambiente. Os impactos na região são: a) alteração da morfologia do terreno por meio de grande movimentação de terra; b) remoção do recobrimento vegetal; c) disposição aleatória de resíduos sólidos; d) aumento da erosão; e) instabilidade de taludes e abertura de cavas subterrâneas; f) lixiviação de depósitos de rejeitos situados em regiões baixas, que são inundados nos períodos de chuvas. As pilhas de rejeitos piritosos malconformadas ocasionaram processos de combustão espontânea, geração de drenagem ácida e de assoreamento dos cursos d'água próximos das pilhas.

A ocorrência de drenagens ácidas não somente é relacionada às atividades de mineração, mas a toda atividade humana que provoque exposição de grandes volumes de materiais rochosos com minerais sulfetados, que poderão ser oxidados, sendo iniciado o processo de DAM. Áreas com presença de solos ácidos sulfatados também têm causado preocupação em relação à urbanização, irrigação e/ou outros usos, pois transformações na dinâmica desses solos podem implicar na geração de águas ácidas e liberação de elementos potencialmente prejudiciais, como arsênio, nas águas subterrâneas.

Em geral, o fenômeno da DAM foi bastante estudado nas décadas de 80 a 90, a fim de avaliar a extensão real dos impactos ambientais, bem como de melhorar o manejo de rejeitos e a gestão de minas, sendo desenvolvidas tecnologias de pesquisa e remediação, que foram fundamentais para o desenvolvimento e discussão de programas e políticas ambientais nas áreas impactadas.

O presente trabalho visa apresentar alguns aspectos sobre a Drenagem Ácida de Mina (DAM), no que tange às águas subterrâneas, caracterizando-se a origem e dois processos, sendo citados estudos de casos focados ao tema.

Origem e processos

De acordo com Skousen et al. (1998), a Drenagem Ácida de Mina (DAM) é formada quando certos minerais sulfetados são expostos a condições de oxidação. A água em contato com a pirita provoca reações químicas, que derivam na produção de ácido sulfúrico, sendo disperso no ambiente. Ocorrem outros sulfetos metálicos na natureza que apresentam essa característica (Tabela 1).

A DAM está associada, em geral, às minerações de carvão, porém pode ser encontrada sob condições naturais, onde existam sulfetos em materiais geológicos, sendo induzida por atividades antrópicas como a

Tabela 1. Síntese dos principais minerais de sulfetos metálicos.

Composição química	Nome	Composição química	Nome
FeS_2	Pirita	MoS_2	Molibdenita
FeS_2	Marcassita	NiS	Milerita
Fe_xS_x	Pirrotita	PbS	Galena
Cu_2S	Calcocita	ZnS	Esfalerita
CuS	Covelita	FeAsS	Arsenopirita
$CuFeS_2$	Calcopirita		

Fonte: Skousen et al. (1998).

construção de rodovias ou escavações subterrâneas. Os níveis de acidez e a concentração e composição do metal dependem do tipo e quantidade de mineral sulfetado e da presença ou ausência de materiais alcalinos. A oxidação dos sulfetos de ferro e subsequente conversão para ácido ocorrem por meio de diversas reações, segundo Stumm e Morgan (1996 citados por SKOUSEN et al., 1998):

1) $\mathbf{FeS_2} + 7/2\ \mathbf{O_2} + \mathbf{H_2O} = \mathbf{Fe^{2+}} + 2\ \mathbf{SO_4^{2-}} + 2\ \mathbf{H^+}$ (o sulfeto é oxidado, liberando ferro ferroso, sulfato e ácido).

2) $\mathbf{Fe^{2+}} + 1/4\ \mathbf{O_2} + \mathbf{H^+} = \mathbf{Fe^{3+}} + 1/2\ \mathbf{H_2O}$ (o íon ferroso pode ser oxidado para ferro férrico).

3) $\mathbf{Fe^{3+}} + 3\ \mathbf{H_2O} = \mathbf{Fe(OH)_3} + 3\ \mathbf{H^+}$ (o ferro férrico pode ser hidrolizado e formar hidróxido férrico e acidez)

4) $\mathbf{FeS_2} + 14\ \mathbf{Fe^{3+}} + 8\ \mathbf{H_2O} = 15\ \mathbf{Fe^{2+}} + 2\ \mathbf{SO_4^{2-}} + 16\ \mathbf{H^+}$ (o ferro férrico pode atacar a pirita e agir como catalisador, aumentando ainda mais a geração de ferro ferroso, sulfato e acidez).

Se uma dessas reações é detida ou torna-se lenta, ocorrerá uma resposta imediata na geração de DAM, que será respectivamente eliminada ou reduzida, por exemplo, pela remoção do ar (oxigênio) e da água do sistema. Na natureza, sob condições do aquífero freático, a oxidação da pirita quase não ocorre graças à ausência de oxigênio. Quando a pirita

está na rocha sob condições naturais de intemperismo, somente pequenas quantidades de pirita são oxidadas, gerando pequenas quantidades de ácido, que podem ser naturalmente diluídas ou neutralizadas por rochas próximas com carbonatos na sua composição.

Portanto, somente haverá DAM quando grandes volumes de material com piritas apresentarem fraturas e exposição à oxidação. Isso pode ocorrer nas atividades de mineração ou em outras atividades de grande movimentação de terra em que a pirita pode reagir, a água dissolver e mover os produtos de reação (ferro e outros metais, sulfato e ácido) em superfície e em subsuperfície. Nesse caso o desequilíbrio é grande e a natureza não consegue absorver o impacto.

A equação (2) é o limite para a oxidação da pirita, pois a conversão do ferro ferroso a férrico é lenta para pH abaixo de 5, sob condições abióticas. No entanto, as bactérias de oxidação de ferro, principalmente *Thiobacillus ferroxidans*, aceleram essa reação, o tornando o principal agente formador de DAM.

O enxofre das jazidas de carvão e rochas associadas pode ocorrer como enxofre orgânico, sulfato e pirítico. Alguns enxofres em carvão são introduzidos depois que a turfa foi convertida em carvão, como está evidenciado pelas coberturas de pirita em superfícies de fraturas verticais, nos veios. Muitas das piritas presentes na rocha e embasamentos de minas de carvão ocorrem como grãos cristalinos muito pequenos, intimamente misturados em arenitos e folhelhos. A ocorrência de minerais de enxofre, em grandes concreções, nódulos, lentes, bandas e preenchimentos em camadas porosas de carvão, é ainda pouco conhecida.

A fração de enxofre inserida em moléculas orgânicas que ocorrem no carvão é denominada "enxofre orgânico". São moléculas constituídas principalmente por átomos de **C**, **H** e **S**, que formam ligações covalentes, como tiofenos, tioéteres e mercaptanos. Essa forma de enxofre é encontrada em quantidades apreciáveis somente em camadas de carvão ou em rochas carbonosas. Geralmente, o enxofre orgânico não é quimicamente reativo e possui pequeno ou nenhum efeito na produção potencial de ácido.

O sulfato é encontrado em menores quantidades em carvão fresco e em outras rochas não perturbadas contendo piritas, sendo comumente o resultado do intemperismo e oxidação recente de enxofre ou sulfito. Alguns minerais de sulfato como a jarosita ($\mathbf{KFe_3(SO_4)_2(OH)_6}$) podem dissolver e formar soluções ácidas em ambientes superficiais.

Os sulfetos metálicos são a forma dominante de enxofre no carvão e rochas associadas. De todos os minerais sulfetados que podem estar presentes, os sulfetos de ferro predominam e são os maiores produtores de ácido. O potencial máximo de acidez (MPA) de uma amostra de embasamento se correlaciona com seu conteúdo de pirita. Estudos têm mostrado que variações no conteúdo total de enxofre de amostras de rocha estão associadas a variações similares no conteúdo de enxofre na pirita. A taxa de oxidação da pirita depende de inúmeras variáveis, as mencionadas a seguir foram compiladas por Skousen *et al.* (1998), considerando-se diversos autores:

- Área superficial reativa da pirita.
- Forma do enxofre pirítico.
- Presença de oxigênio.
- pH da solução.
- Agentes catalíticos.
- Frequências de fluxo.
- Presença da bactéria *Thiobacillus*.

Ainda, a natureza dos elementos dos materiais das rochas do embasamento (cátions alcalinos e alcalino-terrosos, comumente presentes como carbonatos e ou cátions trocáveis em argilas) é importante na avaliação do potencial de neutralização futura. A quantidade de material alcalino em embasamento inalterado pode ser suficiente para igualar ou reduzir drasticamente o potencial de produção de ácido do material. Dos muitos tipos de componentes alcalinos presentes em rochas, somente os

carbonatos, como calcita e dolomita, ocorrem em quantidade suficiente a ser considerada como agente dissuasivo para a geração do DAM. Altas alcalinidades também ajudam a controlar bactérias e restringem a solubilidade do íon férrico, que acelera a geração de ácido. Embora vários fatores devam ser considerados, um balanço simples, do potencial de produção de ácido e da capacidade de neutralizar de uma amostra do embasamento, indica se a acidez ou a alcalinidade é esperada após a alteração completa do material.

A DAM é uma solução aquosa ácida de coloração vermelha ou abóbora típica (óxidos de ferro), com conteúdo elevado de ferro e de sulfato, que se forma sob condições naturais quando a rocha contendo pirita é exposta à atmosfera ou à ambientes oxidantes. Sua ação pode derivar da mineração de carvão, em minas de superfície ou subterrâneas, bem como de depósitos de rejeitos, onde as rochas são expostas às condições oxidantes e podem agir durante décadas, ou séculos, após a cessão das atividades da mineração (ENVIRONMENTAL LITERACY COUNCIL, 2002).

A drenagem alcalina de mina caracteriza-se por possuir pH igual ou maior que 6 e apresentar alcalinidade, podendo ainda possuir metais dissolvidos que podem gerar ácidos pelas reações de (1) a (4). De acordo com Skousen e Ziemkiewicz (1996 citados por SKOUSEN et al., 1998), a drenagem de mina pode ser categorizada em alguns tipos básicos:

Tipo 1 – pouca ou ausência de alcalinidade (pH < 4,5), com altas concentrações de **Fe**, **Al**, **Mn** e outros metais pesados, acidez e oxigênio. Trata-se da água típica de DAM, com pH inferior a 6,0 e potencial de acidez maior que o de alcalinidade.

Tipo 2 – possui alta taxa de sólidos totais dissolvidos (STD), alta concentração de íon ferroso e de **Mn**, baixo teor de oxigênio e pH maior que 6,0. Sob oxidação, o pH dessa água aumenta dramaticamente e torna-se na água tipo 1.

Tipo 3 – a quantidade de STD é moderada a alta, o teor de íon ferroso e **Mn** baixo a moderado, baixo teor de oxigênio, pH maior que 6,0 e maior

potencial de alcalinidade que acidez. Sob oxidação, o ácido gerado da hidrólise do metal e reações de precipitação é neutralizado pela alcalinidade ainda presente na água.

Tipo 4 – DAM neutralizado com pH maior que 6,0 e alta taxa de particulados em suspensão. A estabilização dos hidróxidos de metais na água ainda não ocorreu. Com o tempo de residência em reservatório, os particulados assentarão e formarão água tipo 5.

Tipo 5 – DAM neutralizado com pH maior que 6,0 e STD alto. Depois de muitos hidróxidos de metais terem precipitados, os cátions principais na água são $\mathbf{Ca^{+2}}$ e $\mathbf{Mg^{+2}}$. Ânions solúveis como bicarbonato e sulfato também permanecem na solução. Não acontecerá caso haja escassez de alcalinidade e teor de oxigênio.

Outro tipo de drenagem de mina ocorre com teores baixos de sulfetos em condições de baixa a moderada concentração de carbonatos. A água tipicamente é próxima a neutra, baixa condutividade elétrica (menor que 100 microS/mm), acidez e alcalinidade próxima ao equilíbrio. Essas águas são classificadas como inertes ou neutras. A mistura dos diversos tipos de DAM cria composições de transição.

Estudos hidrogeológicos em áreas geradoras de DAM

Em geral, os estudos hidrogeológicos realizados nesses locais visam identificar os impactos da drenagem ácida (no caso) nas águas subterrâneas, por meio da caracterização dos contaminantes, sua origem, dinâmica e evolução ao longo do tempo e extensão, assim como os fatores externos, como variáveis climáticas (precipitação e evapotranspiração, por exemplo) e aspectos inerentes à própria mineração. Os procedimentos de investigação consistem, além do conhecimento da evolução do local, em avaliar os dados coletados por programas de monitoramento das

águas subterrâneas, visando avaliar sua dinâmica, hidrogeoquímica e áreas de recarga e descarga. Poços de monitoramento, análises químicas e traçadores são as ferramentas mais comuns nesses tipos de estudos, que, junto à modelagem matemática, permitem simular a eficiência das várias opções de remediação para contenção da pluma ácida ou redução da DAM.

Na área de mineração identificam-se várias situações onde existe maior risco de contaminação das águas subterrâneas, como as áreas de disposição de rejeitos de minérios, lagoas formadas pelos efluentes das minas e barragens de contenção. Alguns trabalhos sobre hidrogeologia avaliam as condições de manejo de certas áreas contaminadas ou com potencial para isso, no intuito de verificar a redução da DAM e a necessidade de reformulação/adaptação das técnicas para melhorar a eficiência dessa redução.

King e Hynes (1994) apresentaram técnicas geofísicas para mapear as plumas de contaminação por DAM na água subterrânea do Complexo Ígneo de Sudbury (Canadá). As técnicas eletromagnéticas (EM), que medem a condutividade da subsuperfície, foram úteis para localização e mapeamento detalhado em três dimensões. Levantamentos aéreos proporcionaram uma rápida avaliação em escalas de reconhecimento, enquanto levantamentos em terra e sondagens foram usados para detalhamento. A polarização induzida (IP) e a resistividade elétrica foram testadas, em forma combinada, em grandes áreas de rejeitos revegetados. Como a IP detecta sulfetos disseminados, a combinação com resistividade foi usada para mapeamento simultâneo em três dimensões de sulfetos e qualidade da água subterrânea em rejeitos. Todos os métodos requereram medidas de propriedades elétricas de subsuperfície e foram adversamente afetados pelo ruído elétrico de linhas elétricas e metais de superfície, e enterrados. A resposta de DAM pode ser mascarada pela condutividade natural da água subterrânea, litologias do corpo rochoso ou solos argilosos.

Lee e Dal Bianco (1994) mapearam as áreas de descarga de DAM subterrânea no leito do Rio Onaping (Canadá), por meio de uma sonda de sedimentos rebocada a um bote com baixa velocidade. A descarga vertical

das águas subterrâneas com alto teor de STD foi confirmada, pelas medidas de condutividade elétrica da água de 20 cm a 120 cm abaixo da interface água-sedimento, pela medida direta do fluxo, usando infiltrômetros ou pela medida do gradiente hidráulico, da condutividade hidráulica ou da composição química, por piezômetros locados nas áreas mais rasas da calha dos rios. As descargas variaram no intervalo de 12,8 μS/cm a 43 μS/cm e o pH de 6,9 a 4,8. Em áreas de mineração, a água que infiltra na superfície do terreno pode entrar em contato com um corpo de água subterrânea relacionado a um reservatório de sedimentos e rochas não carbonáticas, com minerais de sulfetos, tornando-se ácido e adquirindo concentrações elevadas de ferro e sulfato. Essas águas subterrâneas podem também mobilizar metais pesados, incluindo-se radionuclídeos, que serão transportados até pontos de descarga. Há também atenuação ou diluição significativa entre áreas fontes e a entrada da drenagem ácida de mina e metais nas águas superficiais. Por causa do movimento das águas subterrâneas na direção das áreas mais baixas, em direção aos corpos de água, há um transporte potencial de lixiviados contendo altas concentrações de metais e pH baixo para os ambientes aquáticos. Em alguns locais, não houve essas evidências, pois há a possibilidade da água de infiltração se movimentar abaixo da linha dos rios, lagos ou áreas úmidas contribuintes. Uma abordagem convencional, por meio de construção e monitoramento das cargas hidráulicas em piezômetros, poderia definir também as zonas de descarga de água subterrâneas, mas, em razão da heterogeneidade geológica dos locais, a amostragem seria muito abrangente, resultando em interpretações entre pontos por demais afastados. As Figuras 1 e 2 reproduzem os resultados obtidos pela sonda nos sedimentos de fundo do canal de rio. Os trechos mais escuros representam águas com maiores valores de condutividade elétrica, que seriam provenientes das descargas das águas do aquífero com DAM.

Morin et al. (1994) apresentaram os resultados do programa de monitoramento de uma área de disposição de rejeitos de minério em Westmin (Canadá). A área monitorada foi a Dump 1, depósito de rejeito primário de

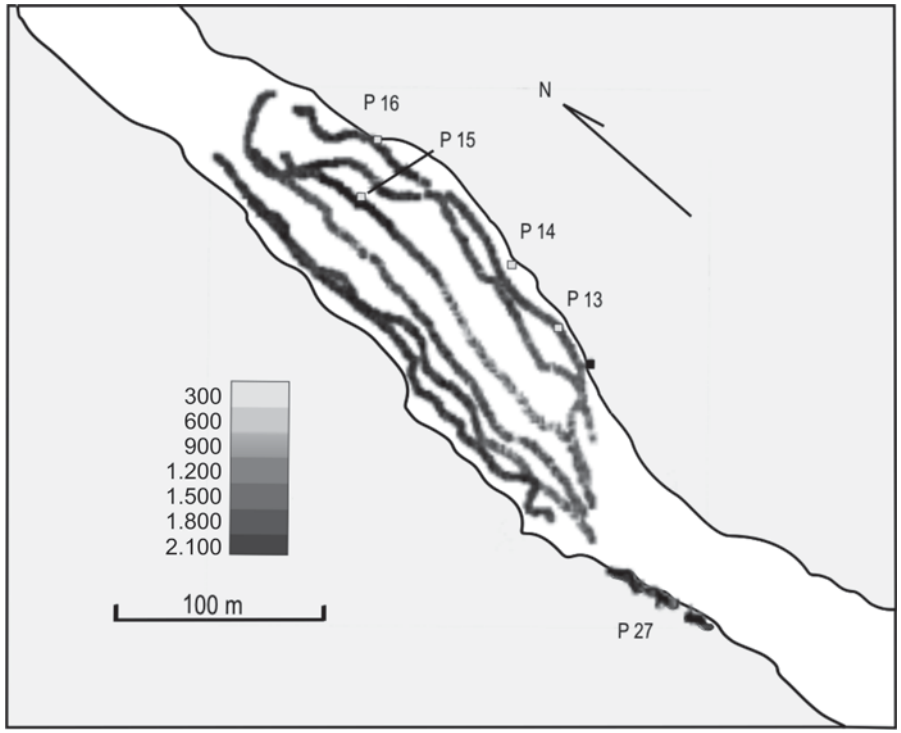


Figura 1. Valores de condutividade elétrica obtidos pela sonda de sedimentos do leito do Rio Onaping, Canadá, na área de poços de recarga municipais. Cada ponto representa uma medida local e valor. As variações de condutividade elétrica de baixo a alto são indicadas por graduações de tonalidades de branco para preto. P13, P14 ...P27 = pontos de amostragem.
Fonte: Lee e Dal Bianco (1994).

rocha, durante o Plano de Fechamento. O monitoramento incluiu várias fases: sólida, gás, água, temperaturas internas e hidrogeoquímica das águas do freático. Um segundo objetivo foi mapear a infiltração da água durante dois eventos de tempestades do topo do depósito ao nível freático, a uma distância maior que 45 m, durante alguns dias.

Gab et al. (1994) apresentaram os resultados do programa de monitoramento de campo e modelação matemática em mina de superfície, que continua a produzir DAM. O modelo MODFLOW (USGS) foi utilizado

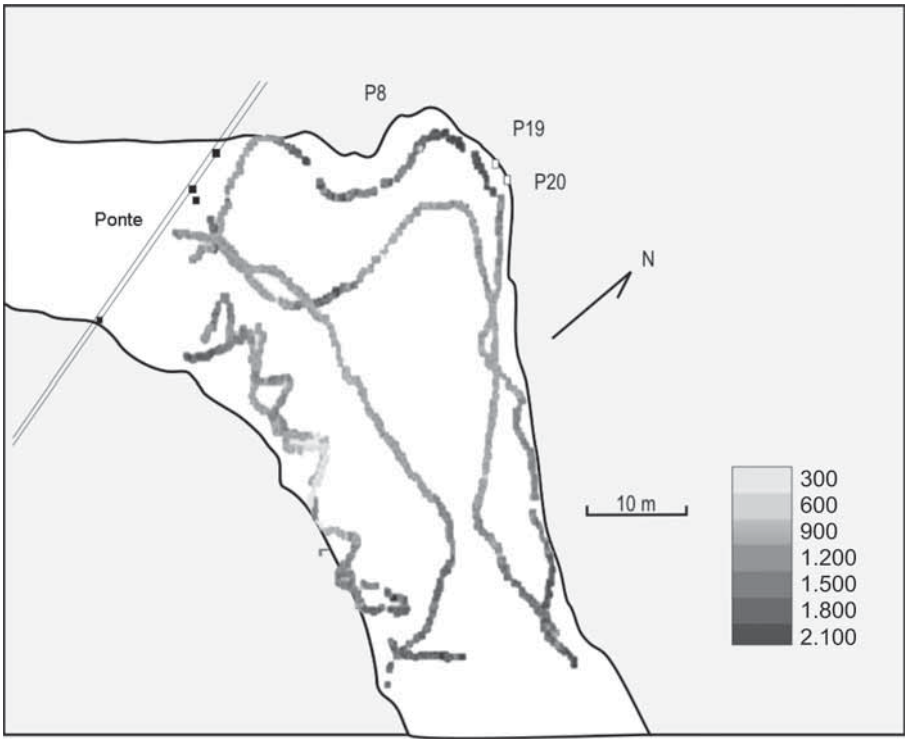


Figura 2. Resultados da sonda de sedimentos no Rio Onaping, Canadá. P8, P19, P20 = pontos de amostragem.
Fonte: Lee; Dal Bianco (1994).

para avaliar e prever a eficiência das medidas de remediação implementadas para reduzir a produção de DAM. Os levantamentos definiram condutividades hidráulicas de cerca $1{,}15 \times 10^{-3}$ ft/s ($3{,}5 \times 10^{-4}$ m/s) para áreas não perturbadas e $1{,}15 \times 10^{-2}$ ft/s ($3{,}5 \times 10^{-3}$ m/s) para as áreas mineradas. Medidas de remediação para desviar a água subterrânea de áreas problemáticas incluem o uso de uma barreira de subsuperfície (seepage cutoff wall) e técnicas de selamento preventivo. A modelação indicou que a barreira é a mais efetiva técnica de remediação desse site, que foi instalado na interface entre a zona perturbada e não perturbada, causando o efeito de rebaixamento na área impactada e, portanto, a redução do volume de DAM gerado

por esse site. As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados das simulações feitas pelo modelo matemático da dinâmica do fluxo das águas subterrâneas.

De acordo com Aljoe (1994), o entendimento da hidrologia em escala de detalhe é um dos aspectos mais desconhecidos na questão da DAM Esses desconhecimentos dificultam o controle in situ da DAM e aumentam as incertezas associadas com a disposição de resíduos, tais como a lama de tratamento e as cinzas em vazios de minas subterrâneas abandonadas. O trabalho apresentado envolve estudos que fundamentaram o desenvolvimento de técnicas de redução da descarga ácida, com base na análise

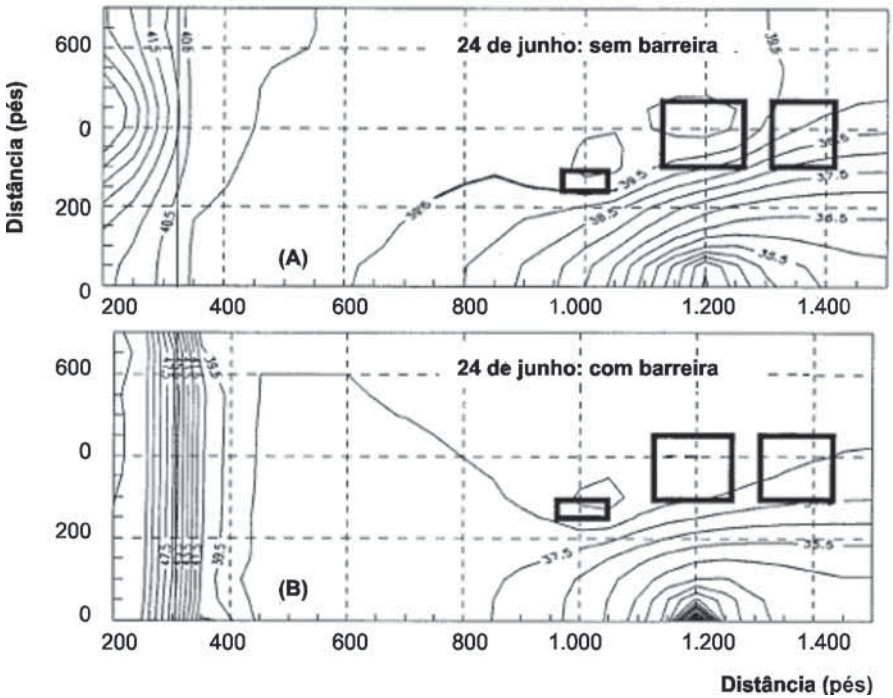


Figura 3. Modelo de simulação do fluxo de água subterrânea. A figura superior indica o fluxo das águas sem a barreira de subsuperfície e a inferior, os fluxos modificados com a instalação da barreira.

Fonte: Gabr et al., (1994).

estatística de dados hidrológicos (por exemplo, vazão de descarga de mina) e hidrogeológicos (cargas hidráulicas) locais. Esses dados mostram que a taxa de fluxo da principal descarga possui função linear à altura da lagoa acima da saída da sondagem. A infiltração através ou ao redor do portal que sela o sistema é coletada por drenos, cuja taxa de descarga é independente da elevação da lagoa da mina. A taxa de recarga da lagoa da mina durante o inverno é cerca de 2,5 vezes maior que qualquer estação; as taxas de recarga durante a primavera e outono são aproximadamente iguais.

O estudo hidrogeológico de Wunsch e Dinger (1994) visou avaliar o potencial de recurso hídrico para abastecimento público em área impactada pela mina de carvão Star Fire (Kentucky, EUA). O aquífero formado pelo rejeito de mina poderia proporcionar escoamento básico em drenagens que alimentariam reservatórios de água para abastecimento. Trata-se de uma camada de aproximadamente 91 metros de espessura composta por fragmentos de rochas sedimentares clásticas, com uma zona contínua de cascalhos no topo do pavimento da rocha. Traçadores, medidas de níveis de poços de monitoramento e análises químicas de amostras de água indicaram que a água subterrânea se move lentamente no interior do rejeito, onde flui por entre os vazios antes de descarregar para fora do

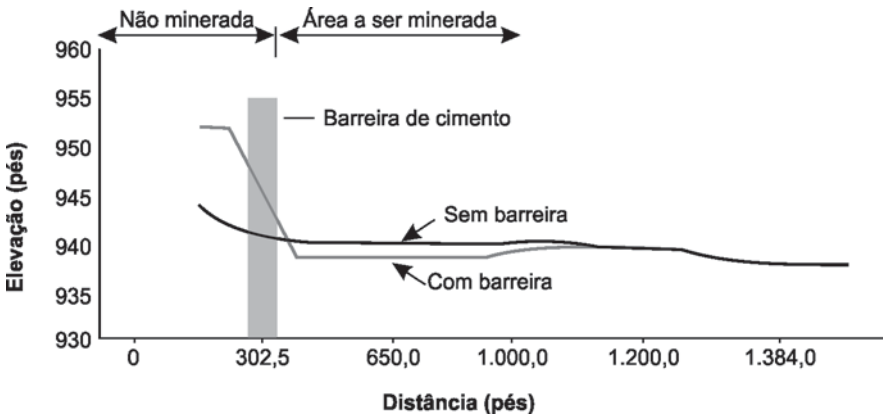


Figura 4. Perfil de cargas piezométricas previstas baseado na data de 24 de junho.
Fonte: Gabr et al. (1994).

rejeito. Dois níveis de águas foram estabelecidos: um no interior do rejeito e outro em cavidades preenchidas, abaixo do corpo principal de rejeito. Esse rejeito armazena cerca de 5,2 x $l0^6$ m^3 de água e sua condutividade hidráulica varia de 7,0 x 10^{-5} cm/s a aproximadamente 9,0 x 10^{-4} cm/s Todas as águas são sulfatadas cálcio-magnesianas, diferindo principalmente na concentração total desses constituintes. Os índices de saturação calculados pelo programa computacional de modelação geoquímica PHREEQE (USGS, 2005) indicam que a maior parte da água subterrânea está próxima a do equilíbrio com gipso e quase todas as amostras possuem medidas de pH entre 6,0 e 7,0, indicando que o rejeito não produz DAM (Figura 5).

Woyshner e Arnaud (1994) desenvolveram estudos hidrogeológicos em uma área de lama de rejeitos, dispostos em forma de cone de pequena espessura. Esses rejeitos permanecem sempre saturados, diminuindo as condições de oxidação, e a liberação de metais deve ser lenta em decorrência das baixas velocidades das águas dos poros.

O "Projeto para a Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense", oportunamente citado, abrange as bacias hidrográficas dos

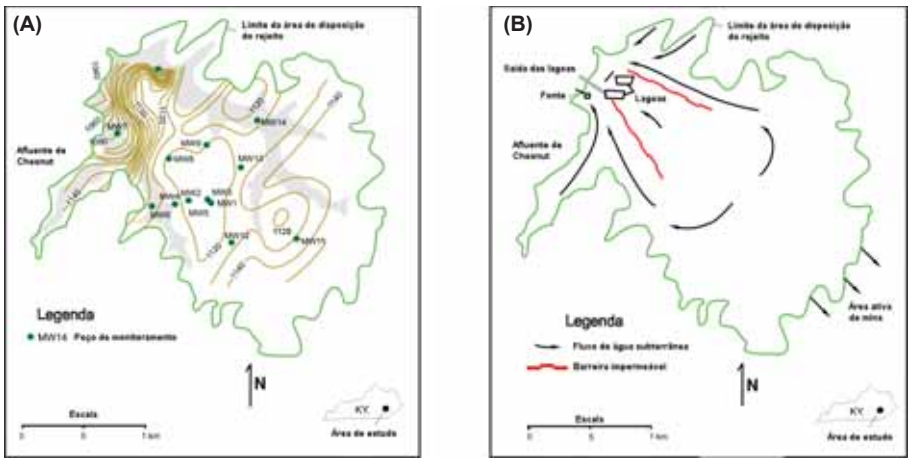


Figura 5. (A) Mapa de contorno da superfície freática; (B) Modelo conceitual do fluxo da água subterrânea na mina Star Fire.
Fonte: Wunsch e Dinger (1994).

rios Araranguá, Tubarão e Urussanga. Entre muitas ações e projetos desenvolvidos na região em relação à DAM, destacam-se o mapeamento de vulnerabilidade dos aquíferos (profundo e leques aluviais) e o cadastramento e monitoramento das captações das águas subterrâneas e das fontes potenciais de contaminação, cujas informações estão armazenadas em um Sistema de Informação Geográfica. O programa para o prognóstico de controle da DAM na Mina Morro do Ouro, na região de Paracatu, MG, envolve estudos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos. Iniciou-se em 2002, com monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas na lavra do minério sulfetado (PEREIRA, 2005).

As ações para diagnosticar e mitigar os impactos gerados pela DAM na mina do Morro do Galo, MG, envolvem (PEREIRA, 2005): (1) o conhecimento do histórico das minas; (2) identificação e avaliação preliminar com a definição de seis áreas com contaminação potencial e risco à saúde humana, solo e água; (3) estudos para definição de melhores alternativas de mitigação; (4) diagnóstico preliminar (avaliação geológica), investigações complementares (água e solo); (5) diagnóstico final e estudos hidrogeológicos; Em paralelo às últimas atividades seguem-se outras de análise preliminar de risco e análise de risco final. A junção deste último com o item (5) resultam na ação (6): elaboração da solução conceitual.

Considerações finais

Há muitos procedimentos e técnicas de remediação desenvolvidas e aplicadas para a contenção de impactos da DAM no ambiente, que, segundo Costello (2003), podem ser divididos em tradicionais e inovativos.

Os métodos convencionais são tecnologias bem conhecidas para reduzir a acidez ou criar condições de oxidação/redução, os quais podem minimizar a geração da DAM. Por exemplo: estações de tratamento de

água, relocação de resíduos, cobertura de pilhas de rejeitos, estratégias de desvios de cursos d'água e revegetação. Os "tratamentos ativos" consistem na retirada das águas dos seus cursos, para serem tratadas, e em seguida descarregadas novamente. Younger et al. (2002) definem que o tratamento ativo objetiva o melhoramento da qualidade da água por métodos que requerem entradas de energia artificial e/ou reagentes químicos ou agentes bioquímicos. Isso é exemplificado por meio dos processos de oxidação, dosagem com álcali e sedimentação, além de tratamentos com sulfatos, biossedimentação, absorção e troca iônica, filtração e osmose reversa, comuns em estações de tratamento de efluentes. Para resíduos sólidos, além da opção de encaminhá-los aos aterros, há a opção mais econômica de disposição in situ, e cobri-los de acordo com as normas técnicas, de modo que não sejam expostos às condições de formação de DAM, como no caso dos efluentes das minas.

Existe um grande número de técnicas alternativas, incluindo a revegetação, muita delas instaladas em minas abandonadas (COSTELLO, 2003). Os tratamentos passivos, por exemplo, tratam as águas por processos naturais in situ e requerem mínima manutenção. O uso de áreas úmidas para remover metais da água contaminada permite a remoção de sulfatos metálicos por meio da redução por bactérias. Em minerações de carvão, os processos aeróbicos com ou sem agentes alcalinos são os usos mais comuns. Além das áreas úmidas citam-se ainda as barreiras reativas permeáveis, drenos de calcários, sistemas com processos sucessivos à base de produção de alcalinidade, biossólidos, biorreatores e fitorremediação.

Por fim, a escolha das tecnologias de remediação depende das características da região minerada, como geologia, relevo, histórico das atividades, composição do minério, processo de beneficiamento e instalações. Outras variáveis importantes são: a) a investigação dos impactos que cada processo de mineração provocou ou provoca; b) o mapeamento dos riscos à saúde pública, à fauna, à flora e aos recursos naturais; c) as questões operacionais e financeiras.

Referências

AL, T. A.; BLOWES, D. W.; JAMBOR, J. L. The pore-water geochemistry of the Cu-Zn mine tailings at Kidd Creek, Near Timmins, Ontario, Canada**.** In: INTERNATIONAL LAND RECLAMATION AND MINE DRAINAGE CONFERENCE, 3rd; INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ABATEMENT OF ACIDIC DRAINAGE, 3rd., 1994, Pittsburgh. **Proceedings…** Pittsburgh: American Society for Surface Mining and Reclamation, 1994. v. 2, p. 208-217. Disponível em: <http://www.ott.wrcc.osme.gov/library/proceed/intl1994.htm>. Acesso em: 1 set. 2005.

ALJOE, W. W. Hydrologic and water quality characteristics of a partially-flooded, abandoned underground coal mine. In: INTERNATIONAL LAND RECLAMATION AND MINE DRAINAGE CONFERENCE; INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ABATEMENT OF ACIDIC DRAINAGE, 3rd., 1994 Pittsburgh. **Proceedings...** Pittsburgh: American Society for Surface Mining and Reclamation, 1994. v. 2. p. 178-187. Disponível em: <http://www.ott.wrcc.osme.gov/library/proceed/intl1994.htm>. Acesso em: 1 set. 2005.

COMITÊ GESTOR. **Relatório de atividades do comitê gestor para a recuperação ambiental da bacia carbonífera sul catarinense**. Santa Catarina: Sindicato da Indústria da Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina-SIECESC, 2002. 25 p.

COSTELLO, C. **Acid mine drainage**: innovative treatment technologies. 2003. Disponível em: <http://www.clu-in.org>. Acesso em: 15 out. 2005.

ENVIRONMENTAL LITERACY COUNCIL. **Acid mine drainage**. Disponível em: <http://www.enviroliteracy.org/>. Acesso em: 15 out. 2005.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. New Jersey: Prentice-Hall, 2001. 598 p.

GABR, M. A.; BOWDERS, J. J.; RUNNER, M. S. Assessment of acid mine drainage remediation schemes on ground water flow regimes - At a reclaimed mine site. In: INTERNATIONAL LAND RECLAMATION AND MINE DRAINAGE CONFERENCE, 3rd; INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ABATEMENT OF ACIDIC DRAINAGE, 3rd., 1994, Pittsburgh. **Proceedings...** Pittsburgh: American Society for Surface Mining and Reclamation, 1994. v. 2, p. 168-177. Disponível em: <http://www.ott.wrcc.osme.gov/library/proceed/intl1994.htm>. Acesso em: 1 set. 2005.

KING, A. R.; HYNES, T. Applications of geophysical, methods for monitoring acid mine drainage. In: INTERNATIONAL LAND RECLAMATION AND MINE DRAINAGE CONFERENCE, 3rd; INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ABATEMENT OF ACIDIC DRAINAGE, 3rd., 1994, Pittsburgh. **Proceedings…** Pittsburgh: American Society for Surface Mining and Reclamation, 1994. v. 1, p. 317-326. Disponível em: <http://www.ott.wrcc.osme.gov/library/proceed/intl1994.htm>. Acesso em: 1 set. 2005.

LEE, D. R.; DAL BIANCO, R. Methodology for locating and quantifying acid mine drainage in ground waters entering surface waters. In: INTERNATIONAL LAND RECLAMATION AND MINE DRAINAGE CONFERENCE, 3rd; INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ABATEMENT OF ACIDIC DRAINAGE, 3rd., 1994, Pittsburgh. **Proceedings…** Pittsburgh: American Society for

Surface Mining and Reclamation, 1994. v. 1, p. 327-335. Disponível em: <http://www.ott.wrcc.osme.gov/library/proceed/intl1994.htm>. Acesso em: 1 set. 2005.

MORIN, K.; JONES, C. E.; VAN DYK, R. P. Internal hydrogeologic monitoring of an acidic wasterock dump at westmin resources' Myra falls operations, British Columbia. In: INTERNATIONAL LAND RECLAMATION AND MINE DRAINAGE CONFERENCE, 3rd; INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ABATEMENT OF ACIDIC DRAINAGE, 3rd.,1994, Pittsburgh. **Proceedings...** Pittsburgh: American Society for Surface Mining and Reclamation, 1994, v. 1, p. 355-364. Disponível em: <http://www.ott.wrcc.osme.gov/library/proceed/intl1994.htm>. Acesso em: 1 set. 2005.

PEREIRA, S. Y. Impacto na água subterrânea por drenagem ácida. In: RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO DE XISTO, 1., 2005, São Mateus do Sul. **Apresentações....** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. 1 CD-ROM.

SKOUSEN, J.; ROSE, A.; GEIDEL, G.; FOREMAN, J.; EVANS, R.; HELLIER, W. **Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage**. Morgantown: The National Mine Land Reclamation Center, 1998. 131 p.

USGS. United States Geological Survey. **Hydrological analysis software support program**. Disponível em: <http://water.usgs.gov/software/phreeqe>. Acesso em: 1 out. 2005.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Coal remining best management practices guidance manual**. Disponível em: <http://www.epa.gov/ost/guide/coal/manual/index.html>. Acesso em: 1 out. 2005.

WOYSHNE, M. R.; ARNAUD, L. S. Hydrogeological evaluation and water balance of a thickened tailings deposit near Timmins, On, Canada. In: INTERNATIONAL LAND RECLAMATION AND MINE DRAINAGE CONFERENCE, 3rd; INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ABATEMENT OF ACIDIC DRAINAGE, 3rd., 1994, Pittsburgh. **Proceedings…** Pittsburgh: American Society for Surface Mining and Reclamation, 1994. v. 2, p. 198-207. Disponível em: <http://www.ott.wrcc.osme.gov/library/proceed/intl1994.htm>. Acesso em: 1 set. 2005.

WUNSCH, D. R.; DINGER, J. S. The hydrogeology and hydrogeochemistry of the star fire site, Eastern Kentucky. In: INTERNATIONAL LAND RECLAMATION AND MINE DRAINAGE CONFERENCE, 3.; INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ABATEMENT OF ACIDIC DRAINAGE, 3., 1994, Pittsburgh. **Proceedings…** Pittsburgh: American Society for Surface Mining and Reclamation, 1994. v. 2, p. 188-197. Disponível em: <http://www.ott.wrcc.osme.gov/library/proceed/intl1994.htm>. Acesso em: 1 set. 2005.

YOUNGER, P.; BANWART, S. A; HEDIN, R. S. **Mine water**: hydrology, pollution, remediation. Netherlands: Kluwer Academic, 2002. 464 p.

Parte 3

Indicadores de qualidade ambiental em áreas degradadas

Capítulo 3

Monitoramento de áreas em recuperação

Padrões de colonização da comunidade de vertebrados terrestres

Roger Borges da Silva
Rafael Gustavo Becker
Iberê Farina Machado
Tomás Fleck
José Eduardo Figueiredo Dornelles

Introdução

A constante perda da diversidade biológica frente às pressões antrópicas tem concentrado as atenções sobre a necessidade de se inventariar os recursos biológicos como um primeiro passo para o desenvolvimento de estratégias de manejo. Para avaliar a biodiversidade se utiliza, primeiramente, a estimativa da diversidade em um determinado local e tempo, no qual em um segundo estágio realiza-se o monitoramento, na tentativa de avaliar a diversidade de uma área de maneira sequencial, com o propósito de extrair inferências sobre mudanças temporais (WILSON et al., 1996).

As atividades de mineração causam alterações nas paisagens no mundo todo. As operações de minas abertas modificam o equilíbrio dinâmico da paisagem, resultando no desenvolvimento de novos ecossistemas. Como consequência, o estabelecimento sustentável de novos sistemas ecológicos sobre áreas mineradas é um importante desafio interdisciplinar para a ciência e a sociedade (HÜTTL; GERVIN, 2005). Normalmente todos os organismos (plantas e animais) tendem a retornar e recolonizar as áreas após o fim da atividade de mineração (RATHKE; BRÖRING, 2005).

O argumento para a importância da biodiversidade nas políticas ambientais pressupõe que animais, plantas, microrganismos e suas complexas interações respondem ao manejo humano da paisagem e aos impactos de diferentes maneiras, com alguns organismos respondendo de forma mais rápida e definitiva do que outros. Supõe-se, então, que mudanças no manejo da paisagem influenciam a biota, e que certos sinais temporários ou constantes permanecem dentro das comunidades biológicas (PAOLETTI, 1999).

Inventariar a fauna e a flora de uma determinada porção de um ecossistema é o primeiro passo para sua conservação e uso racional. Sem um conhecimento mínimo sobre quais organismos ocorrem nesse local, e sobre quantas espécies podem ser encontradas nele, é virtualmente impossível desenvolver qualquer projeto de preservação (SANTOS, 2003). O uso da biodiversidade como ferramenta para avaliar a estrutura, a transformação e a destruição da paisagem é um componente importante das estratégias

aplicadas às áreas rurais, manejadas, industriais e urbanizadas, para reduzir o impacto humano e diminuir a poluição (WILSON, 1997).

A perda de espécies animais representa a perda de polinizadores, dos quais depende boa parte da nossa produção de alimento; a perda de dispersores de sementes, responsáveis pela recuperação dos ecossistemas florestais; a perda de controladores biológicos de pragas, ameaçando a saúde humana e a produção vegetal e animal; a perda de genes, importantes para o melhoramento genético; e a perda de um potencial biológico ainda pouquíssimo explorado. Igualmente, a eliminação de algumas espécies da fauna pode levar a um processo de extinções em cascata, envolvendo animais e vegetais a elas relacionadas (MIKICH et al., 2005).

A fauna paranaense apresenta uma riqueza que reflete a diversidade de biomas e ecossistemas presentes no Estado, incluindo aproximadamente 10.000 espécies de borboletas e mariposas, 450 de abelhas, 950 de peixes, 120 de anfíbios, 160 de répteis, 770 de aves e 180 de mamíferos. No entanto, uma parcela significativa dessa riqueza se encontra sob algum grau de ameaça, em virtude da destruição e redução dos ecossistemas, da caça e pesca predatórias, do comércio ilegal de espécimes, da poluição dos ecossistemas terrestres e aquáticos, da introdução de espécies exóticas, da perda de fontes alimentares e do uso indiscriminado de agroquímicos, entre outros fatores.Tais fatores colocam em risco não apenas a fauna, mas a qualidade de vida do homem, que também depende de um ambiente saudável e equilibrado (MIKICH et al., 2005).

Objetivos

Objetivo geral

Monitorar a fauna potencialmente afetada pela mineração da Petrobras-SIX, visando investigar os possíveis efeitos ecológicos e biológicos

sobre a comunidade de vertebrados, causados pela exposição destas ao empreendimento.

Objetivos específicos

Comparar a composição das comunidades de mamíferos, aves, répteis e anfíbios em dois estágios de sucessão vegetacional na área de mineração com uma área controle sem influência desse processo.

Verificar a influência de variáveis bióticas e abióticas sobre a colonização e ocupação das áreas pela fauna terrestre.

Comparar as respostas das diferentes classes animais frente ao processo de sucessão da vegetação e aos possíveis impactos causados pela mineração.

Materiais e métodos

O estudo foi conduzido em quatro campanhas sazonais, uma em cada estação, tendo iniciado no inverno de 2005 e concluído no outono de 2006. Cada expedição teve a duração de 14 dias de campo, divididos em uma semana de amostragem na área controle e a outra nas áreas em avaliação. Neste trabalho se apresentam os resultados das primeiras duas campanhas de campo realizadas no inverno e na primavera de 2005.

Área de estudo

O Município de São Mateus do Sul, PR, se encontra no segundo planalto paranaense, altitude aproximada de 800 m, 25º52' de latitude Sul e 50º23' de longitude Oeste. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, subtropical úmido sem estação seca. A precipitação média anual está entre 1.400 mm e 1.500 mm, com temperatura média do

mês mais quente inferior a 22 ºC, e a média do mês mais frio superior a 10 ºC, com mais de cinco geadas por ano.

Neste trabalho escolhemos três áreas onde foram realizadas as amostragens. Duas áreas encontram-se dentro da Petrobras - Unidade de Superintendência de Industrialização de Xisto, São Mateus do Sul, PR (Petrobras-SIX). São fragmentos que já foram minerados e com processos de recuperação em andamento. Essas áreas representam dois estágios distintos de sucessão, tendo uma delas sido minerada em 1995 e iniciada a sua recuperação em 1998, e a outra minerada em 1985 e iniciada a sua recuperação em 1992. Tais áreas, no presente estudo, serão denominadas A10 e A20, respectivamente. A recuperação a que essas áreas foram submetidas consta de recobertura com terra vegetal do solo exposto pela mineração e posterior plantio de espécies arbóreas pioneiras, com predomínio de bracatinga (*Mimosa scabrella*).

A terceira área de estudo é um fragmento florestal na Fazenda R. Toppel, situada a sul no Município de São Mateus do Sul, e será usada como controle e assim denominada. A composição vegetacional deste caracteriza-se por uma floresta ombrófila mista, também conhecida como Mata de Araucária (BORGES et al., 1988; VELOSO et al., 1991), onde a *Araucaria angustifolia* ocorre em associação com outras espécies.

Variáveis bióticas e abióticas

Temperatura, umidade relativa e luminosidade

Esses dados foram coletados por meio de um *data logger* (Hobbo® Rh, Temp, Light H8), o qual realiza as medidas a cada 10 minutos e registros de valores em seu banco de dados. Posteriormente obtivemos as médias e variações diárias em cada uma das áreas.

Cobertura de dossel

A densidade da copa foi obtida por meio de um densiômetro esférico (Forestry Suppliers®), no qual a porcentagem de quadrantes preenchidos refletidos no espelho é registrada como uma medida indireta de cobertura da vegetação.

Florística

A coleta de informações para a listagem das espécies da flora fanerogâmica, nas áreas de amostragem da fauna, foi realizada no período entre os dias 16 e 22 de outubro de 2005, nas áreas de vegetação secundária (A10 e A20), e entre 23 e 26 de novembro de 2005, na área controle (Fazenda R. Toppel), constituída por vegetação primária.

Foi realizada a documentação fotográfica de espécimes estéreis e/ou férteis. Exemplares em estádio vegetativo, passíveis de reconhecimento em níveis de família, gênero ou espécie, foram incluídos na listagem, entretanto, a coleta de material fértil desses táxons é necessária para a determinação taxonômica segura em termos de espécie. Para os espécimes férteis (com botões florais, flores ou frutos), além da documentação fotográfica, foi realizada a coleta para a preparação de exsicatas e determinação taxonômica. O material coletado foi herborizado e será incorporado à coleção do Herbário da Embrapa Clima Temperado. A determinação das espécies foi realizada com auxílio de bibliografia e comparação com exsicatas de outros herbários.

Os táxons coletados e/ou observados nas áreas de estudo foram listados em ordem alfabética por família, sendo a ordem de apresentação de subfamílias, gêneros ou espécies, a mesma. A circunscrição das famílias foi considerada conforme proposto pelo Angiosperm Philogeny Group (STEVENS, 2001) e Souza e Lorenzi (2005). A listagem produzida possui caráter preliminar, pois não contempla um período mínimo de um ano de coletas periódicas, necessário para a documentação de todas as espécies ocorrentes conforme a fenologia.

Estrutura e composição da vegetação

Nas áreas de amostragem da fauna (Fazenda R. Toppel, A10 e A20) foi implantado um estudo fitossociológico, onde foram aleatoriamente marcadas três parcelas de 10 m x 30 m em cada área. Foram considerados todos os indivíduos com PAP (perímetro à altura do peito = 1,3 m) maior que 15 cm, sendo registradas as medidas do PAP, a altura aproximada e a espécie.

Para cada parcela foram contados os indivíduos arbóreos presentes; a altura média do estrato arbóreo na parcela; a densidade de cobertura em dez pontos aleatórios; o número de indivíduos, a altura média, obtida pela medição de dez indivíduos aleatórios, e a diversidade de espécies do sub-bosque (PAP maior que 15 cm e altura inferior a 1 m); a porcentagem de cobertura herbácea do solo, estimada por intermédio da contagem do número de espaços preenchidos em um quadrado de 1 m^2, subdividido em quadrados de 0,01 m^2, em dez pontos aleatórios; além da presença e número de plântulas de *Araucaria angustifolia*.

Répteis e anfíbios

Anuros

As áreas estudadas foram investigadas no horário de maior atividade de anfíbios (HEYER et al., 1994), ou seja, a partir do ocaso até aproximadamente às 23 horas. Em cada área foram distribuídos três transectos, a fim de se amostrar todos os ambientes ocorrentes na parcela. Cada transecto foi percorrido por 15 minutos, sendo vasculhados todos os micro-habitats acessíveis (tocas, bromélias, troncos caídos), com o auxílio de lanternas. A quantificação da anurofauna foi censada por meio de procura ativa por animal-focal, e a riqueza de espécies foi acrescida por censo auditivo. Realizaram-se, também, procuras diurnas a fim de se encontrar anfíbios em atividades ocasionais (por exemplo, vocalização ou deslocamento) ou abrigados.

Armadilhas do tipo *pitfall* (de queda) é um sistema de captura constituído de recipientes (copos plásticos 500 mL) enterrados com a abertura ao nível do solo, funcionando com a interceptação e queda dos animais de solo (AURICCHIO; SALOMÃO, 2002). Esse método foi utilizado pela possibilidade de capturar animais que raramente são registrados pelos métodos de procura visual (CAMPBELL; CHRISTMAN, 1982), testando-se a eficiência do volume de 500 mL na coleta de anfíbios (CECHIN; MARTINS, 2000). Na investigação, utilizou-se 45 armadilhas de queda (*pitfall*), dispostas em três transectos de 15 armadilhas ao longo das áreas estudadas, que permanecerem quatro dias em cada área, sendo vistoriadas diariamente. Dos indivíduos capturados obtiveram-se medidas morfométricas a fim de classificar quanto ao seu estágio de desenvolvimento (juvenil ou adulto) e sexo, retornando-os ao mesmo local de encontro.

Répteis

Para a amostragem dos répteis optou-se por utilizar as metodologias ativas, descritas a seguir. Realizaram-se procuras visuais limitadas por tempo, em períodos matutinos, vespertinos e noturnos. O esforço amostral foi de uma hora em cada área por período, onde o observador se deslocou a pé, revirando todos os micro-habitats acessíveis e observando sobre vegetações e árvores à procura de serpentes e lagartos. Percorreram-se todos os ambientes da floresta (trilhas internas, estradas e mata fechada), onde se vasculharam tocas abandonadas, árvores ocas e folhiço.

Utilizou-se a procura por rodagem, onde estradas de acesso foram percorridas com veículo em marcha lenta, a procura por animais atropelados ou que eventualmente estivessem atravessando a estrada (LEMA; BRAUN, 1993). Essa procura por répteis e anfíbios foi feita diariamente nos períodos matutino, vespertino e noturno.

Aves

A amostragem de aves se realizou por meio de registro focal e auditivo, com binóculos e minigravador digital, sendo a identificação das aves realizada segundo De la Peña e Rumboll (1998); Dunning (1987) e Sick (1997). Os nomes populares seguiram Scherer-Neto e Straube (1995).

Para determinar a riqueza, abundância e diversidade das áreas amostradas, se utilizou o método de pontos fixos (BLONDEL et al., 1981), em que a abundância é expressa na forma de um índice, denominado índice pontual de abundância (IPA). Foram aleatorizados pontos equidistantes 100 m e distantes 200 m da borda dos fragmentos, permanecendo por 10 minutos em cada ponto. Considerou-se a abundância relativa de cada espécie, sendo avaliada pela divisão do total do número de espécies encontradas pelo total do número de pontos amostrados (BLONDEL et al., 1981; VIELLIARD; SILVA, 1990). Não se registraram aves sobrevoando a área de estudo, esses registros foram incorporados na lista geral das espécies. Registros esporádicos das espécies foram anotados em toda a área de estudo e em áreas de abrangência.

A diversidade e abundância da avifauna foram avaliadas e comparadas para cada área, sendo verificada a similaridade entre as espécies envolvidas, por intermédio do método de Cluster (Bray-Curtis Single Link), baseado na riqueza e abundância de espécies. Possíveis diferenças entre o IPA nas áreas de estudo analisaram-se por meio do teste não paramétrico Kruskal-Wallis. Verificou-se, também, a variância e frequência da riqueza entre os fragmentos por meio do teste de Chi-quadrado (SYSTAT... 1990).

Analisou-se a biomassa existente nas áreas de estudo (BELTON, 1994) por intermédio do teste nãoparamétrico Kruskal-Wallis, para detectar possíveis diferenças entre variâncias, e do teste Chi-quadrado, para verificar possíveis diferenças na frequência entre as classes de biomassa entre as áreas. Para verificar a dissimilaridade entre a riqueza e áreas, realizou-se uma análise multivariada (HILL, 1973), conhecida por análise de correspondência. As espécies de cada área foram classificadas conforme a sensibilidade às perturbações antrópicas (STOTZ et al., 1996).

Mamíferos

Inventário qualitativo de espécies de médio e grande porte

Para verificar a ocorrência dessas espécies, se percorreu a área de influência do empreendimento, contemplando cada uma das formações existentes (matas, campos, bordas) durante o período de estudo, realizando-se buscas diurnas e noturnas. Foram utilizadas técnicas indiretas como presença de tocas, rastros, pegadas, fezes e carcaças, relatos de moradores da região, registros de atropelamentos nas estradas do entorno, além de observações diretas e com o auxílio de binóculos.

Utilizaram-se também armadilhas fotográficas (Trapacâmera® e Wildlife Pro Camera System™) dispostas aleatoriamente em trilhas e rastros (TOMAS; MIRANDA, 2003), uma em cada tratamento, sem atrativo de iscas. O esforço amostral com as armadilhas fotográficas foi de 8 armadilhas-noite por tratamento.

Monitoramento da comunidade de pequenos mamíferos e delineamento amostral

Foram realizadas amostragens diárias em cada estação de captura ao longo de sete dias, em cada campanha, totalizando 240 armadilhas-noite por tratamento (Controle, A10 e A20).

Os pequenos mamíferos foram amostrados nos três tratamentos já descritos no desenho experimental. Os animais foram capturados com armadilhas do tipo *live-trap* Sherman® de dois tamanhos: 7 cm x 9 cm x 23 cm e 10 cm x 12 cm x 37 cm. O método utilizado foi o de captura-marcação-e--recaptura (FERNANDEZ, 1995; GENTILE; FERNANDEZ, 1999). Em cada um dos tratamentos, as armadilhas foram dispostas em dois transectos de 200 m com 20 armadilhas em cada um, separadas entre si a cada 10 m.

As armadilhas eram revisadas diariamente pela manhã. Os animais capturados foram marcados com anilhas de metal numeradas na orelha direita. Todos os indivíduos capturados foram identificados, pesados (usando-se dinamômetro Pesola®); medidos quanto ao comprimento do corpo, da cauda, da pata posterior direita e orelha direita; identificados quanto à idade (jovem, subadulto ou adulto) e condição reprodutiva (os machos, quanto ao tamanho do escroto, medido por meio de um paquímetro, e as fêmeas, quanto à presença de vagina perfurada e/ou mamilos lactantes ou à presença de neonatais em marsúpios – no caso dos marsupiais), sendo liberados em seguida no local de captura. A isca utilizada foi uma mistura de pasta de amendoim, fubá, banana e emulsão Scott®.

Abundância e atividades de tocas

Também se contabilizou a presença de tocas (ativas ou inativas) nas três áreas de estudo, nas mesmas parcelas utilizadas para a caracterização da flora.

Resultados e discussão

Temperatura

As temperaturas médias não diferiram significativamente entre as áreas mineradas, mas sim da área controle (Figura 1), sendo ligeiramente maior nesta última.

Umidade relativa e luminosidade

Quanto às variáveis descritas acima, não obtivemos diferenças significativas entre as áreas estudadas (Figuras 2 e 3).

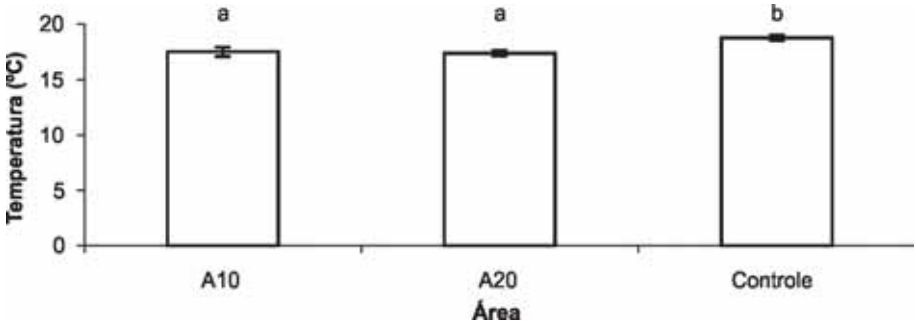


Figura 1. Representação gráfica das médias de temperaturas das áreas de estudo. Letras diferentes representam diferenças significativas, segundo teste pós-hoc de Dunn; Kruskal-Wallis, H = 19,54; gl = 2; P = 0,00. Siglas: Controle (Fazenda R. Toppel – área bem preservada sem histórico de mineração), A10 (área interna da Petrobras em estado de regeneração primário) e A20 (área interna da Petrobras em estágio mais avançado de regeneração).

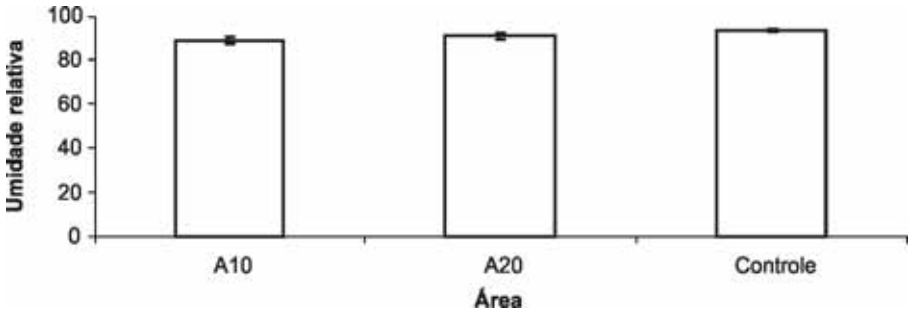


Figura 2. Representação gráfica das médias de umidade relativa do ar nas áreas de estudo. Valores não significativos, segundo Kruskal-Wallis, H = 3,08; gl = 2; P = 0,21.

Perímetro à altura do peito (PAP)

O perímetro da vegetação arbórea foi maior na área controle e respectivamente menor em A20 e A10. As áreas mineradas diferiram significativamente, não havendo diferença entre a área controle e as áreas mineradas (Figura 4).

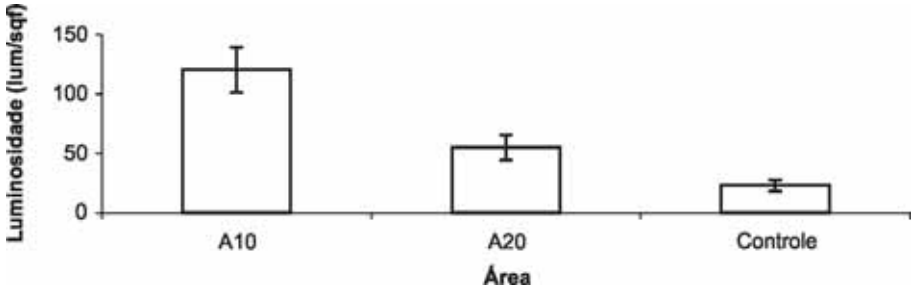


Figura 3. Representação gráfica das médias de luminosidade obtidas nas áreas de estudo. Valores não significativos, segundo Kruskal-Wallis, H = 0,98; gl = 2; P = 0,61.

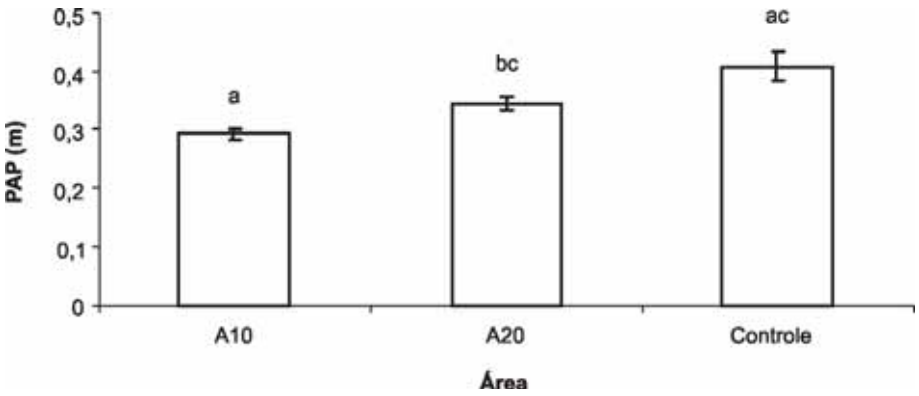


Figura 4. Representação gráfica das médias do perímetro à altura do peito da vegetação arbórea nas áreas de estudo. Letras diferentes representam diferenças significativas, segundo teste pós-hoc de Dunn; Kruskal-Wallis, H= 8,06; gl = 2; P = 0,017.

Altura de dossel e sub-bosque

Essas variáveis diferiram significativamente, sendo maior na área controle e menor nas áreas A10 e A20, respectivamente (Figura 5 e 6).

A relação dos dados apresentados anteriormente foi sumarizada por meio da Análise dos Componentes Principais (PCA), reduzindo-se as variáveis em dois eixos. O eixo 1 da PCA da caracterização da vegetação

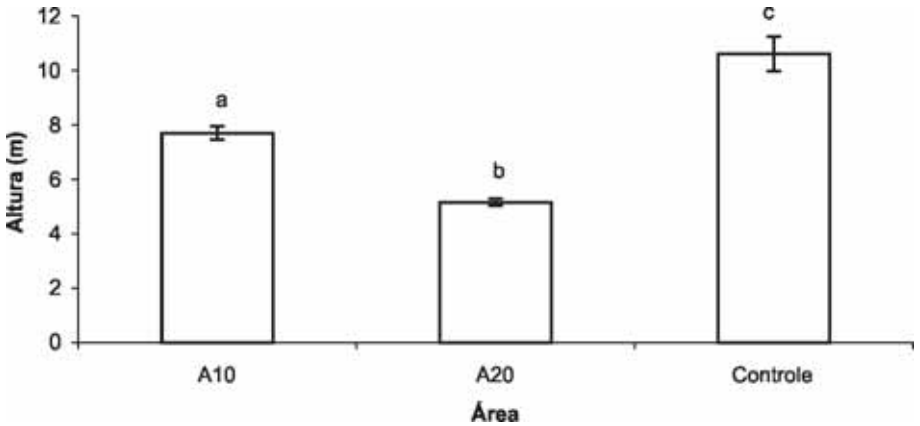


Figura 5. Representação gráfica das médias de alturas de dossel das áreas de estudo. Letras diferentes representam diferenças significativas, segundo teste pós-hoc de Dunn; Kruskal-Wallis, H = 101,78; gl = 2; P = 0.

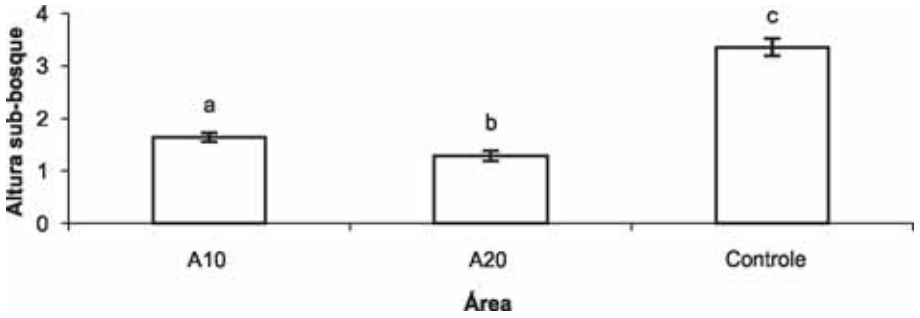


Figura 6. Representação gráfica das médias de alturas do sub-bosque das áreas de estudo. Letras diferentes representam diferenças significativas, segundo teste pós-hoc de Dunn; Kruskal-Wallis, H = 61,29; gl = 2; P = 0,00

e variáveis abióticas (autovalor = 2,8) explicou 87,43% da variância, estando a umidade relativa e luminosidade mais relacionadas a este eixo (Tabela 1). O eixo 2 (autovalor = 1,8) explicou 12,6% da variância, relacionando às demais variáveis. Essa análise separou a área controle, graças às alturas da copa e do sub-bosque, e pelos estratos superiores mais densos com relação inversa de luminosidade (Figura 7).

Tabela 1. Resultados da análise de componentes principais (PCA), demonstrando-se os valores das variáveis abióticas em relação aos eixos 1 e 2.

Eixo	1	2
Autovalor (Eigenvalue)	2,848879	1,800671
% de explicação	87,435	12,565
	Variáveis	
PAP	-0,2194	0,3940
Altura da copa	0,0270	-0,0953
Altura herbácea	-0,0878	-0,1074
Altura Sub-bosque	0,0151	-0,0270
Vegetação rasteira	-0,5650	0,6865
Temperatura média (ºC)	0,0110	-0,0168
Umidade relativa	0,0409	0,0054
Luminosidade	-0,7888	-0,5931

A temperatura média, embora com diferenças significativas entre as áreas, não sugere nenhuma influência nos níveis biológicos estudados. As diferenças encontradas durante o período de amostragem foram pequenas e não são suficientes para determinar quaisquer padrões referentes à fauna.

A luminosidade indicou um padrão geralmente esperado para diferentes estágios de sucessão, onde áreas com vegetação em estágio avançado tendem a apresentar uma maior densidade de copa, e assim uma menor incidência de luz.

Padrão inverso foi encontrado no perímetro da vegetação arbórea. Essa variável também respondeu como o esperado para a idade das áreas, onde a área controle apresentou em sua composição florística indivíduos velhos e mais espessos em relação às áreas mineradas.

O tratamento estatístico dos dados de luminosidade e PAP mostrou que, embora existam essas diferenças, a área A20 encontra-se de fato em uma posição intermediária, indicando que ainda não se recuperou o bastante para se distinguir das A10, e, por sua vez, também ainda não atingiu a maturidade encontrada na área controle.

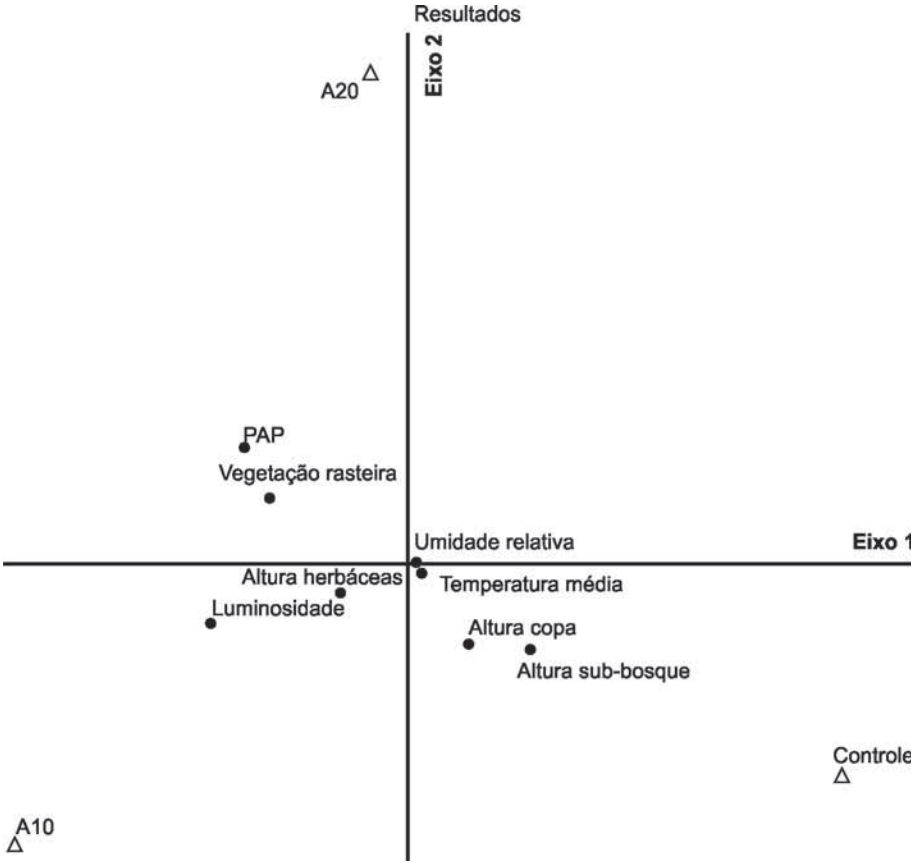


Figura 7. Resumo das variáveis abióticas amostradas e suas relações com as áreas estudadas por meio de análise canônica de componentes principais (PCA). Variações explicadas pelo eixo 1 (87,43%) e eixo 2 (12,57%). PAP (perímetro à altura do peito).

Em termos de altura de dossel e altura de sub-bosque, a área controle manteve o padrão esperado e foi a que demonstrou a maior média de altura das árvores e arbustos. O fato de que a área A20 se apresentou menor que a área A10, quanto à altura de dossel, isso é por causa da presença dominante da espécie bracatinga (*Mimosa scabrella*) introduzida nessa área mais jovem em grande densidade. Essa espécie pioneira tem um ciclo de vida curto, atingindo sua maturidade rapidamente em aproximadamente

15 anos, por isso, embora as duas áreas em recuperação tenham recebido em tese o mesmo manejo inicial, a maior parte dos indivíduos de bracatingas plantados na A20 já encerrara seus ciclos. Assim, o esperado é que, ao longo da sucessão dessas áreas, a A10 também perca essa pioneira inicial e seja naturalmente substituída por espécies secundárias de menor porte e crescimento lento, como é o caso da situação atual da A20.

Herpetofauna

Durante as amostragens, encontrou-se um total de sete espécies de anfíbios anuros (Tabela 2), distribuídas nas famílias Bufonidae (01), Hylidae (03) e Leptodactylidae (03). Apesar da riqueza não ter variado significativamente (Teste-t, $p>0,05$), a área controle foi mais rica (4) que A10 (0) e A20 (3). A abundância variou entre as áreas amostradas (Teste-t, $p<0,000$), onde a área controle também foi a mais abundante (30 indivíduos) seguida pela A20 (3) e A10 (0).

Um total de três espécies de répteis foi observado no estudo, sendo duas serpentes da família Colubridae (*Thamnodynastes strigatus*, *Chironius bicarinatus*) e uma espécie de lagarto (*Tupinambis meriane*). Tanto a riqueza quanto a abundância não variaram significativamente (Teste-t, $p>0,05$), porém a ocorrência da espécie de serpente arborícola (*Chironius bicarinatus*) na área controle pode ser indicativa da estrutura florestal, como será discutida adiante.

De acordo com os dados obtidos, verificou-se a relação entre alguns fatores biológicos e climáticos que se destacam na influência sobre a herpetofauna (KRISHNAMURTHY, 2003), entre eles: a complexidade estrutural da floresta, a temperatura e a proximidade-quantidade de corpos de água.

A complexidade estrutural da floresta

A estrutura florestal das áreas estudadas se distinguiu principalmente em relação à altura do dossel, do sub-bosque e na cobertura de vege-

Tabela 2. Listagem de anfíbios e répteis capturados nas áreas: A10 (1), A20 (2) e Controle (3); por meio de: coleta por transecto (1), rodagem em veículo (2), censo auditivo (3), pitfall (4) e coletas ocasionais (5).

Nome científico	Nome popular	Família	Área	Metodologia
Anfíbio				
Bufo ictericus	Sapo-cururu	Bufonidae	3	1,3
Dendropsophus minutus	Perereca	Hylidae	2,3	3
Hyla sp.	Perereca	Hylidae	3	1
Scinax fuscovarius	Perereca-de-banheiro	Hylidae	3	2,3
Odontophrynus americanus	Sapo-da-areia	Leptodactylidae	2,3	1,4
Physalaemus cuvieri	Rã-cahorro	Leptodactylidae	3	1,4,5
Physalaemus gracilis	Rã-chorona	Leptodactylidae	2,3	1,2
Réptil				
Chironius bicarinatus	Ccobra-cipó	Colubridae	3	1
Thamnodynastes strigatus	Cobra-espada	Colubridae	3	1
Tupinambis meriane	Teiú	Teiidae	1,2,3	1,2

tação rasteira. Além de possuir um sub-bosque mais alto, a área controle possui uma maior quantidade de micro-habitats, entre eles: serrapilheira, poças intermitentes, bromélias de solo e epifíticas (em diferentes alturas). As áreas A10 e A20 possuíram um dossel mais aberto, um sub-bosque pouco desenvolvido, onde não foram encontradas bromélias.

Essas diferenças estruturais da flora, na área controle, proporcionam uma grande quantidade de micro-habitats, permitindo a ocupação por uma maior diversidade de répteis e anfíbios. Como o caso de *Scinax fuscovarius*, encontrado vocalizando em bromélias a mais de três metros de altura; *Hyla* sp., sobre vegetação arbustiva próximo à bromélias de solo; e, por fim, *Chironius bicarinatus*, encontrado a cerca de três metros de altura. Essa serpente apresenta o hábito de forragear tanto no solo quanto sobre árvores, em busca principalmente de anfíbios (CARVALHO-SILVA; FERNANDES, 1994). De acordo com os dados obtidos até o momento, a riqueza de

répteis e anfíbios se mostrou diferente na área controle (c^2 = 8,40; gl = 2; p = 0,01) (Figura 8).

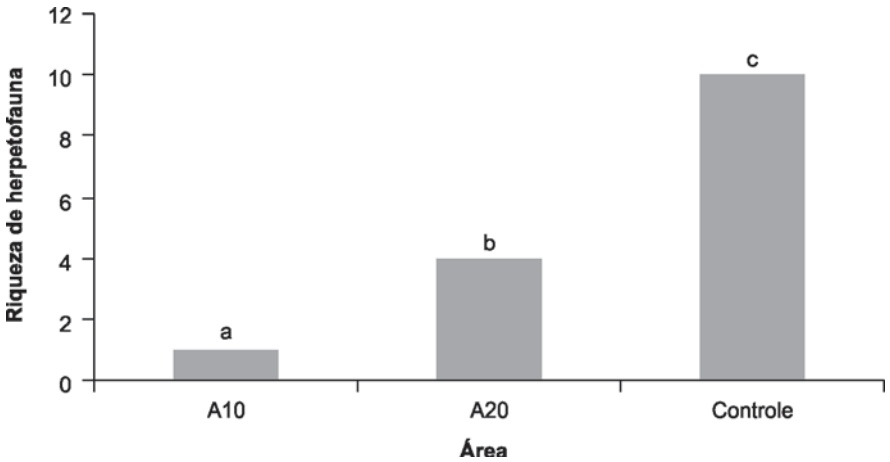


Figura 8. Representação gráfica da riqueza da herpetofauna, répteis e anfíbios, acumulada nas áreas de estudo. Letras diferentes representam diferenças significativas, segundo teste Chi-quadrado c^2 = 8,40; gl = 2; p = 0,01.

Temperatura

Por serem animais exotérmicos, os indivíduos da herpetofauna não apresentam controle metabólico de sua temperatura corporal, em compensação apresentam respostas comportamentais ou fisiológicas a fim de minimizar os efeitos de temperaturas extremas (STEBBINS; COHEN, 1995). O clima da região de estudo é do tipo Cfb (segundo o sistema de Köppen), podendo apresentar algumas geadas ao ano. Esse padrão vem se repetindo anualmente ao longo de décadas, dessa forma, pode-se afirmar que os animais ocorrentes na região estão adaptados aos eventos cíclicos climáticos.

Em razão das coletas terem sido realizadas em um dos períodos mais frios do ano (temperatura mínima de 4,8 ºC e máxima de 18,8 ºC), era esperado uma baixa taxa de captura, já que, como estratégias de conservação energéticas, tanto répteis quanto anfíbios tendem a diminuir seu metabolismo, pro-

curando permanecer abrigados até que as temperaturas retornem a um patamar mais ameno. Logo, o baixo número de indivíduos e espécies encontradas parece estar relacionado negativamente à temperatura, onde dias mais frios apresentaram uma menor quantidade de indivíduos. A realização dessas expedições, em período climático mais ameno (temperatura mínima de 12,5 ºC e máxima de 27,5 ºC), apresentou uma maior taxa de encontro da herpetofauna (Figura 9), demonstrando a influência climática sobre as populações locais.

Proximidade-quantidade de corpos de água

A presença de corpos de água é um fator que deve ser considerado na ocorrência de anfíbios e répteis em uma área. Principalmente na manutenção da umidade relativa do ar e no fornecimento de sítios de reprodução para anfíbios (mesmo que sejam temporários).

As áreas estudadas se mostraram bastante diferentes. As áreas A10 e A20 apresentaram poucas áreas úmidas, em sua maioria foram vertentes

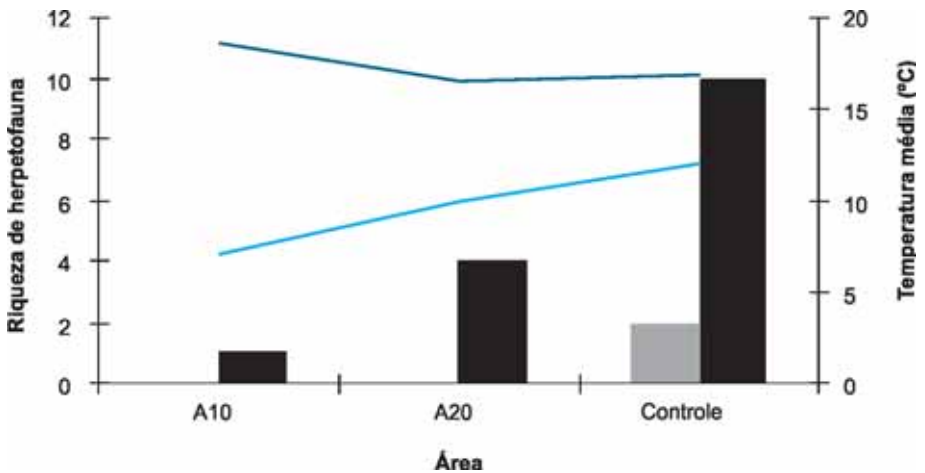


Figura 9. Gráfico relacionando a riqueza (número de espécies) da herpetofauna com a temperatura média, amostrados nas áreas de estudo. As coletas estão representadas por: – primavera, – inverno; e as temperaturas médias estão representadas por primavera, inverno.

esparsas conectadas à floresta por um vassoural denso (A10) ou um pequeno canal de escoamento (A20). Já a área controle se encontra próxima (< 100 metros) a uma grande planície de inundação. A parcela e a planície são interligadas por um pequeno fragmento de floresta com as mesmas características da área controle. Essa homogeneidade permite o deslocamento da herpetofauna (principalmente os anuros) sem receber o estresse hídrico de diferentes fisionomias florestais (KRISHNAMURTHY, 2003).

Esse evento pôde ser percebido pela ocorrência de quatro das espécies de anuros encontradas na área controle (*B. ictericus, P. cuvieri, P. gracilis e Scinax fuscovarius)*. Além da facilidade de movimentação, a planície de inundação permanece com trechos inundados por períodos do ano, garantindo-se sítios de reprodução e desenvolvimento de girinos de crescimento lento.

A ausência de corpos de água no interior da mata pode ser considerada um dos principais fatores pela ausência de anuros nas áreas estudadas. A fim de analisar esse fator, as áreas foram acompanhadas cuidadosamente ao longo das demais expedições (épocas chuvosas), para se verificar a ocorrência e disponibilidade de um dos principais micro-habitats de ocorrência de anfíbios.

Aves

Durante o estudo se registraram 107 espécies de aves nas áreas de estudo, distribuídas em 32 famílias e 13 ordens. A área controle obteve a maior riqueza, com 82 espécies de aves, seguida pelas áreas da Petrobras-SIX (A20) com 57 e (A10) 53, com diferença significativa na riqueza da área controle ($c^2 = 7{,}72$; gl = 2; p = 0,02). O Estado do Paraná destaca-se pelo estudo da avifauna do Sul do Brasil (STRAUBE; URBEN-FILHO, 2005), com cerca de 640 espécies de aves com registros confirmados em campo (SCHERER-NETO; STRAUBE, 1995). Estudo realizado em São Mateus do Sul por Borges et al. (1988), especificamente na Fazenda R. Toppel, registrou 91 espécies em ambientes florestados com araucária (*Araucaria angustifolia*).

Nas áreas de regeneração recente (A10 e A20), principalmente na A10, obtivemos registros de espécies granívoras, que, segundo Belton (1994), são encontradas em quase todo o tipo de habitat, porém raramente em ambientes florestados (por exemplo, *Zonotrichia capensis, Sicalis flaveola*), revelando o estado de regeneração primária dessas áreas. Cabe citar o registro de *Campephilus robustus* na área controle, considerada rara na região, com registros esporádicos desde o final dos anos 80, segundo Borges et al. (1988). Registrou-se a presença de *Pulsatrix koeniswaldiana,* que não constava em registros anteriores de levantamentos (BORGES et al., 1988). Segundo esse mesmo trabalho, a presença de *Cyanocorax caeruleus* foi registrada apenas uma vez na primavera. Em nosso estudo também obtivemos apenas um registro dessa espécie em uma araucária (*Araucaria angustifolia*), porém no inverno.

Quanto à diversidade baseada no IPA, as áreas mantiveram-se semelhantes, como se observa na Tabela 3 (Shannon-Wiener Controle H' = 1,58; A10 H' = 1,39 e A20 H' = 1,38).

Por intermédio do IPA se registraram as médias com diferenças significativas entre as áreas (Kruskal-Wallis: H = 9,5; P=0,01). A área A20 difere significativamente da área controle, possivelmente por estar em um estágio intermediário de sucessão, não atingindo uma estabilidade de áreas de sucessão definidas como uma primária, no caso da A10, e em estágios tardios de sucessão, no caso da área controle (Figura 10).

Segundo esse índice, as espécies mais abundantes são *Chamaeza campanisona*, com 1,43 na área controle, *Zonotrichia capensis*, com 1,94 em A10, e *Basileuterus leucoblepharus*, com 1,61 em A20. Esses dados corroboram com os diferentes estágios sucessionais das áreas estudadas, onde se encontraram espécies com distintos graus de utilização de habitats florestados.

Quanto à similaridade da composição das espécies entre as diferentes áreas de estudo, as áreas A10 e A20 obtiveram cerca de 60% de similaridade (Figura 11). Esse fator deve-se principalmente aos registros de espécies granívoras que ocorrem em densidades relativamente altas

Tabela 3. Relação das espécies de aves registradas no estudo. As aves estão situadas em duas devidas famílias e subfamílias, bem como seus nomes populares. Legenda: Família (-idae); Subfamília (-inae); Nome científico/nome popular.

Nome do Táxon / nome em português	C	A10	A20
Tinamidae			
Crypturellus obsoletus / nambu-guaçu	x		x
Accipitridae			
Rupornis magnirostris / gavião-carijó	x		
Cracidae			
Penelope obscura / jacu-velho, jacu-açu	x	x	x
Rallidae			
Aramides saracura / saracura-do-mato	x		
Columbidae			
Columbina talpacoti / rolhinha-roxa		x	x
Columbina picui / rolhinha-picui		x	
Zenaida auriculata / pomba-amargosinha	x	x	x
Leptotila verreauxi / juriti	x		x
Patagioenas picazuro / asa-branca	x		x
Leptotila rufaxilla / juriti	x		x
Psittacidae			
Pyrrhura frontalis / tiriva	x		
Pionus maximiliani / baitaca	x		
Cuculidae cuculinae			
Piaya cayana / alma-de-gato		x	x
Tapera naevia / saci	x	x	x
Crotophaginae			
Crotophaga ani / anu-preto		x	x
Guira guira / anu-branco		x	x
Strigidae			
Megascops sp. / corujinha-do-mato	x		
Pulsatrix koeniswaldiana / murucututu-de-barriga-amarela	x		
Rhinoptynx clamator / coruja-orelhuda	x		

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Nome do Táxon / nome em português	C	A10	A20
Nyctibiidae			
Nyctibius griseus / mãe-da-lua, urutau	x		
Trochilidae			
Chlorostilbon aureoventris / beija-flor-de-bico-vermelho	x	x	
Leucochloris albicollis / beija-flor-de-papo-branco	x	x	x
Stephanoxis lalandi / beija-flor-de-penacho			x
Bucconidae			
Nystalus chacuru / joão-bobo	x		
Trogonidae			
Trogon surrucura / surucuá-de-barriga-vermelha	x	x	
Ramphastidae			
Ramphastos dicolorus / tucano-de-bico-verde	x		
Picidae			
Picumnus temminckii / pica-pau-anão		x	x
Colaptes melanochloros / pica-pau-verde-barrado	x	x	
Colaptes campestris / pica-pau-do-campo		x	
Veniliornis spilogaster / picapauzinho-verde-carijó	x	x	x
Piculus aurulentus / pica-pau-dourado	x		
Campephilus robustus / pica-pau-rei	x		
Dendrocolaptidae	x		
Sittasomus griseicapillus / arapaçu-verde	x	x	
Lepidocolaptes angustirostris / arapaçu-do-cerrado	x		
Xiphocolaptes albicollis / arapaçu-grande, luzia	x		
Dendrocolaptes platyrostris / arapaçu-de-garganta-branca	x		
Campylorhamphus falcularius / arapaçu-de-bico-torto	x		
Lepidocolaptes falcinellus / arapaçu-escamoso			
Furnariidae	x		
Leptasthenura setaria / grimpeiro	x	x	x
Synallaxis ruficapilla / pichororé	x	x	x
Synallaxis cinerascens / pi-puí	x	x	x
Synallaxis spixi / joão-teneném	x	x	x
Cranioleuca obsoleta / arredio-oliváceo	x		

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Nome do Táxon / nome em português	C	A10	A20
Philydor rufum / limpa-folha-de-testa-baia	x	x	
Syndactyla rufosuperciliata / trepador-quiete	x		
Heliobletus contaminatus / trepadorzinho	x		
Sclerurus scansor / vira-folhas			
Formicariidae	x		x
Thamnophilus caerulescens / choca-da-mata	x	x	
Thamnophilus ruficapillus / choca-de-coroa-castanha	x		
Dysithamnus mentalis / choca	x		
Chamaeza campanisona / tovaca, codorninha, sovaca			
Conopophagidae	x		
Conopophaga lineata / chupa-dente			
Tyrannidae			
Mionectes rufiventris / abre-asa-de-cabeça-cinza	x		
Phyllomyias fasciatus / piolhinho	x	x	x
Elaenia sp.	x		
Elaenia mesoleuca / tuque	x		
Camptostoma obsoletum / risadinha	x	x	x
Serpophaga subcristata / alegrinho	x	x	x
Euscarthmus meloryphus / barulhento		x	x
Phylloscartes ventralis / borboletinha	x	x	x
Poecilotriccus plumbeiceps / tororó		x	
Tolmomyias sulphurescens / patinho-gritador	x		x
Platyrinchus mystaceus / patinho	x		
Knipolegus cyanirostris / maria-preta-de-bico-azul		x	
Machetornis rixosa / suiriri-cavaleiro	x	x	x
Pitangus sulphuratus / bem-te-vi	x	x	x
Legatus leucophaius / peitica-de-bico-curto	x		
Myiodynastes maculatus / bem-te-vi-rajado	x	x	x
Empidonomus varius / peitica	x		x
Megarynchus pitangua / bem-te-vi-de-bico-chato		x	x
Tyrannus melancholicus / suiriri	x		
Myiarchus swainsoni / irré	x		

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Nome do Táxon / nome em português	C	A10	A20
Attila phoenicurus / capitão-castanho	x		x
Attila rufus / capitão-de-saíra			x
Cardinalidae			
Saltator similis / trinca-ferro	x		x
Cyanocompsa brissonii / azulão		x	x
Pipridae			
Chiroxiphia caudata / tangará ou dançador	x		x
Troglodytidae			
Troglodytes musculus / corruíra	x	x	x
Turdidae			
Turdus rufiventris / sabiá-laranjeira	x	x	x
Turdus leucomelas / sabiá-pardo	x		x
Turdus amaurochalinus / sabiá-poca	x		x
Turdus albicollis / sabiá-coleira	x		
Coerebidae			
Coereba flaveola / cambacica		x	x
Thraupidae			
Trichothraupis melanops / tiê-de-topete			x
Tachyphonus coronatus / tiê-preto	x	x	
Thraupis sayaca / sanhaçu-cinzento	x	x	
Pyrrhocoma ruficeps / cabecinha-castanha		x	x
Pipraeidea melanonota / saíra-viúva	x		x
Euphonia chlorotica / fim-fim, gaturamo	x	x	x
Conirostrum speciosum / figuinha-de-rabo-castanho		x	x
Emberizidae			
Zonotrichia capensis / tico-tico		x	x
Poospiza lateralis / quete		x	x
Sicalis flaveola / canário-da-terra-verdadeiro		x	x
Coryphospingus cucullatus / tico-tico-rei		x	
Parulidae			
Parula pitiayumi / mariquita	x	x	x
Geothlypis aequinoctialis / pia-cobra	x		x

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Nome do Táxon / nome em português	C	A10	A20
Basileuterus culicivorus / pula-pula	x	x	x
Basileuterus leucoblepharus / pula-pula-assobiador	x	x	x
Vireonidae			
Cyclarhis gujanensis / pitiguari	x	x	x
Vireo olivaceus / juruviara	x		
Icteridae			
Cacicus chrysopterus / tecelão	x		
Cacicus haemorrhous / guaxe	x		
Gnorimopsar chopi / graúna			x
Fringillidae			
Carduelis magellanica /pintassilgo		x	
Passeridae			
Passer domesticus /pardal		x	x
Corvidae			
Cyanocorax caeruleus / gralha-azul	x		
Cyanocorax chrysops / gralha-picaça	x	x	x
Riqueza total (com diferença significativa em relação à riqueza da área controle: χ^2= 7,72; gl=2; p=0,02).	82	53	57
Diversidade de Shannon-Wiener - H' (IPA)	1,58	1,39	1,38

Fonte: Scherer-Neto e Straube (1995), salvo modificações e atualizações do Comitê Brasileiro de Registros Ornintológicos (2005).

em habitats abertos, encontrados nessas áreas, e aos registros de algumas espécies da família Dendrocolaptidae e Formicariidae que ocorreram em altas densidades apenas na área controle.

A área controle obteve uma maior biomassa (Kruskal-Wallis) H = 8,89; gl = 2; P = 0, 01; teste pós-hoc de Dunn (Figura 12), mas se encontrou diferença significativa apenas na classe 20 g - 39 g na área controle c^2 = 9,94; gl = 2; p < 0,00. Esses fatores corroboram com a maior complexidade da área controle, podendo abrigar um maior número de espécies. Nessa classe de biomassa se encontram as espécies de famílias de aves que não suportam grandes perturbações antrópicas, como dendrocolaptídeos, formicarídeos e outras.

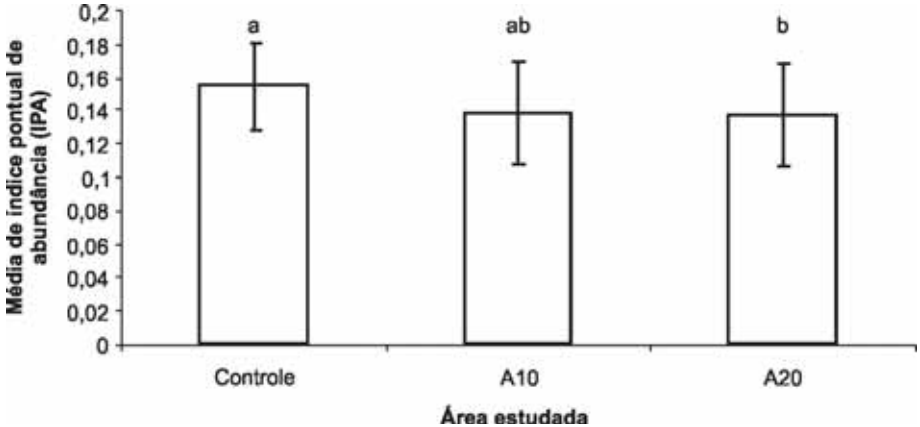


Figura 10. Médias do Índice Pontual de Abundância nas áreas de estudo e barras de erro padrão. Com diferença significativa entre as áreas estudadas (Kruskal-Wallis) H= 9,49; P=0,00. Letras iguais correspondem a uma variação não significativa.

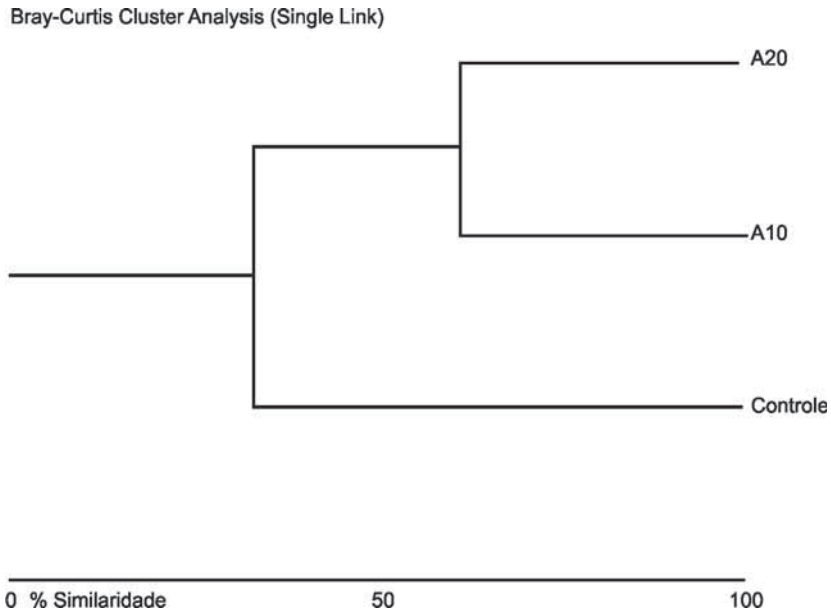


Figura 11. Análise de similaridade entre as áreas estudadas (cluster Bray-Curtis Single Link), baseado na riqueza e abundância de espécies.

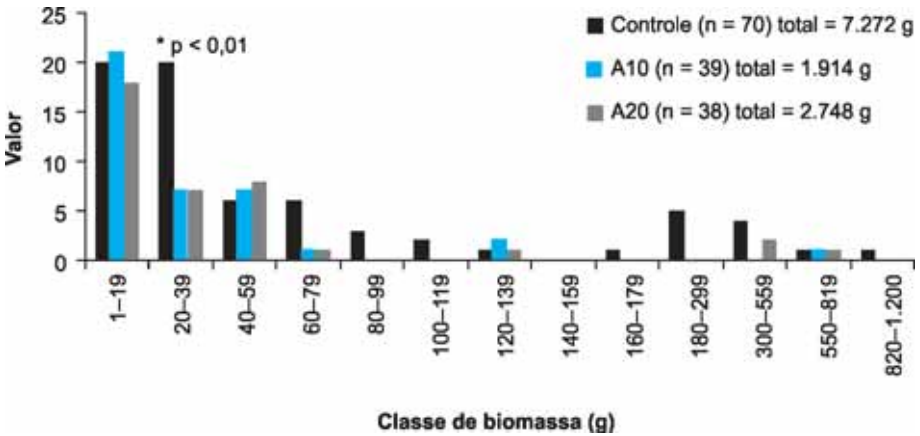


Figura 12. Distribuição da biomassa total das áreas estudadas em diferentes classes, em gramas. Diferença significativa na frequência da biomassa apenas na classe 20 g–39 g na área controle; $\chi^2 = 9,94$; gl = 2; $p < 0,00$.

Segundo a análise de correspondências, a área controle foi agrupada com três espécies de alta sensibilidade às perturbações antrópicas (STOTZ et al., 1996), que foram *P. koeniswaldiana*, *Campylorhamphus falcularius* e *C. campanisona* (Figura 13).

Mamíferos

O sucesso de capturas de pequenos mamíferos foi de 18,4% na área controle, 2,5% na A10, e 3,7% na A20 (Figura 14). Nenhuma espécie foi registrada nas armadilhas fotográficas. 13 espécies foram registradas na área controle, enquanto nas áreas mineradas A10 com 5 e A20 com 3 espécies (Tabela 4 e Figura 15). Todas as espécies ocorrentes em A10 e A20 também foram encontradas na área controle.

Os dados levantados coincidem com outros estudos sobre a dinâmica esperada em eventos de sucessão. Em um trabalho realizado com moluscos terrestres em uma área previamente minerada (WATTERS et al.,

Figura 13. Representação gráfica da Análise Multivariada Reciprocal Averaging (RA). As espécies de cada área foram classificadas conforme a sensibilidade às perturbações antrópicas. Níveis de sensibilidade à perturbação humana: Alta, Média e Baixa.
Fonte: Stotz et al. (1996)

2005), muitas espécies ocorreram somente em fragmentos em estágios mais avançados de sucessão, e espécies encontradas na área minerada foram frequentemente aquelas adaptadas a habitats perturbados. Os estudos de Halle 1988, 1989, 1991 (citado por RATHKE; BRÖRING, 2005), sobre recolonização de ambientes reflorestados em uma área recuperada jovem, mostraram que 20 espécies de mamíferos estabeleceram populações entre os primeiros sete anos após o reflorestamento.

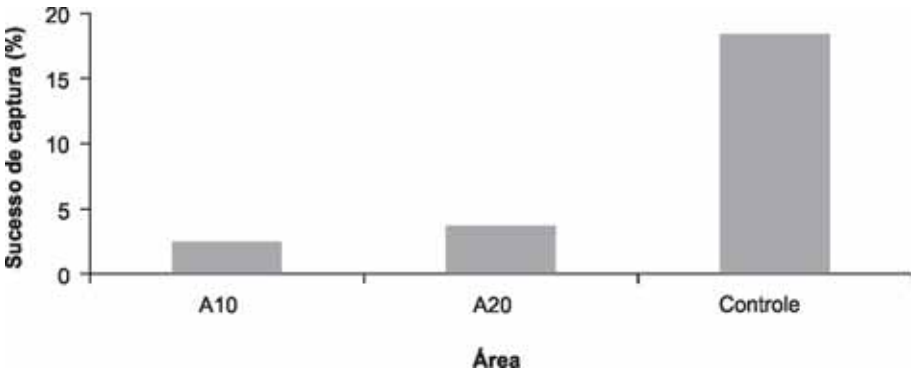


Figura 14. Representação gráfica do sucesso de captura das armadilhas Shermann, nas áreas de estudo. Com diferença significativa entre as áreas estudadas (Chi-quadrado $\chi^2 = 19{,}02$; gl=2; $p < 0{,}00$).

A baixa riqueza das áreas mineradas pode estar ligada ao processo de recuperação a que essas áreas são submetidas (consistindo basicamente de plantio de algumas espécies arbóreas – muitas vezes apenas uma ou duas) e ao tamanho pequeno e isolamento dos fragmentos, não permitindo uma permeabilidade das espécies frente a uma matriz hostil de áreas impactadas. A qualidade do habitat pode ser o fator determinante mais importante para a presença de uma espécie em um local específico (DAUBER et al., 2003).

Pardini et al. (2005) sugerem que um gradiente de estrutura de habitat, associado com a perturbação ou regeneração das florestas tropicais, é mais importante para a abundância que para a diversidade das comunidades de pequenos mamíferos. Esse mesmo estudo concorda com a ideia que a perda de habitat e a fragmentação conduzem a perdas na abundância, perdas na riqueza e comunidades mais variáveis espacialmente, sugerindo que corredores podem atenuar essas perdas de habitat e efeitos da fragmentação pelo aumento da abundância. Dessa forma, são fatores considerados a riqueza e a heterogeneidade espacial das comunidades animais em pequenas manchas das florestas tropicais.

Tabela 4. Relação das espécies de mamíferos registrados nas áreas de amostragem e de abrangência. Os mamíferos estão situados em suas devidas famílias e nomes científicos.

Nome do Táxon	Controle	A10	A20	Petrobras geral
Didelphidae				
Didelphis aurita	x			
Dasypodidae				
Dasypus novencintus	x	x	x	x
Leporidae				
Lepus europaeuss				x
Cricetidae				
Akodon montensis	x	x	x	x
Akodon sp.	x			
Oligoryzomys nigripes	x	x	x	x
Oryzomys sp.	x			
Erethizontidae				
Sphiggurus spinosus				x
Sciuridae				
Sciurus aestuans	x			x
Dasyproctidae				
Dasyprocta sp.	x			x
Hydrochaeridae				
Hydrochaeris hydrochaeris				x
Atelidae				
Alouatta guariba	x			x
Canidae				
Cerdocyon thous	x	x		x
Felidae	x			
Procyonidae				
Nasua nasua	x			
Procyon cancrivorus	x			
Cervidae				
Mazama americana		x	x	

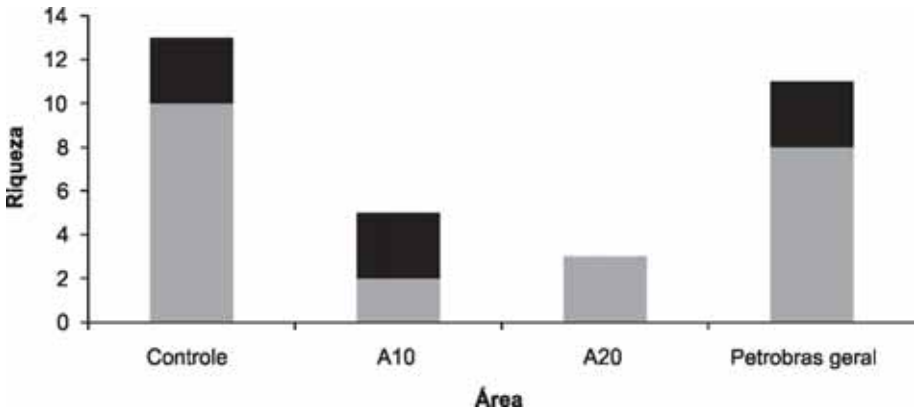


Figura 15. Representação gráfica da riqueza de mamíferos acumulada nos períodos de inverno e primavera nas três áreas de estudo. Diferença significativa entre as áreas de acordo com o teste Chi-quadrado ($c^2 = 8,00$; gl = 2; p = 0,02). Barras brancas correspondem ao inverno e barras cinzas correspondem à primavera.

O rato-do-mato (*Akodon montensis)* foi a espécie mais abundante (49 indivíduos) e, juntamente com os tatus (*Dasypus* sp.), ocorreu em todas as áreas. Em decorrência dessa abundância, realizou-se uma estimativa do tamanho populacional de *A. montensis*, utilizando-se o índice de Schnabel. O objetivo é estimar o número de indivíduos na população que não foram observados e, a partir disso, obter uma estimativa do tamanho da população. Esse método é usado em estudos de curta duração, onde não ocorrem entrada e saída de indivíduos da população por meio de nascimentos, mortes, imigração e emigração. (DORAZIO; ROYLE, 2003). A área controle apresentou a maior população dessa espécie ($\chi^2 = 85,61$; gl=2; $p < 0,001$) (Figura 16).

Akodon montensis é uma espécie amplamente distribuída, ocorrendo em vegetação alterada e conservada, sendo considerada comum (fácil de capturar) e abundante (alto número de espécimes capturados); espécies com essas características não possuem valor como indicadores do estado de alteração do habitat (BONVICINO et al., 2002).

Mamíferos de médio e grande porte das florestas neotropicais, particularmente os de hábitos terrestres e predominantemente noturnos, so-

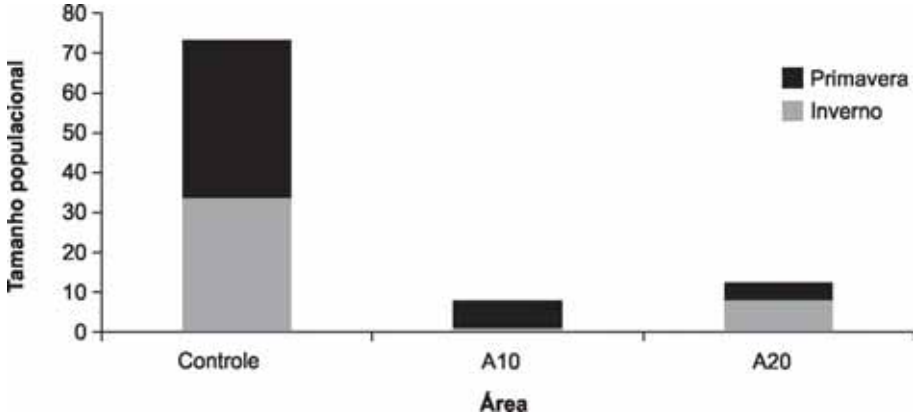


Figura 16. Representação gráfica do tamanho populacional de Akodon montensis nas áreas de estudo. Houve diferença significativa entre as áreas, segundo o teste Chi-quadrado ($\chi^2 = 85{,}61$; gl=2; $p < 0{,}00$).

mado as suas áreas de vida relativamente grandes e suas baixas densidades populacionais, dificultam o estudo, por exemplo, de tatus, tamanduás, cutias, pacas, antas, porcos-do-mato, veados e carnívoros de nossas florestas (PARDINI et al., 2003).

Destaca-se o registro de duas espécies ameaçadas no Estado do Paraná e incluídas na categoria vulnerável (MIKICH; BÉRNILIS, 2004). O bugio-ruivo (*Alouatta guariba*), registrado na área controle e anotado pelos trabalhadores na área de mineração da SIX, aparentemente vem sofrendo declínio de suas populações por causa da redução de habitats e encontra-se ameaçado em sua área de distribuição. Embora não tenha sido identificada a espécie, o gato-do-mato (Felidae), registrado na área controle por meio de pegadas, pertence a um grupo também considerado ameaçado em toda a sua área de distribuição, pela diminuição da extensão e da qualidade de seu habitat. Também pode estar ocorrendo declínio de suas populações (MIKICH et al., 2005). Em termos absolutos A20 apresentou um maior número de tocas, mas não houve diferença significativa entre as áreas de estudo (Figura 17).

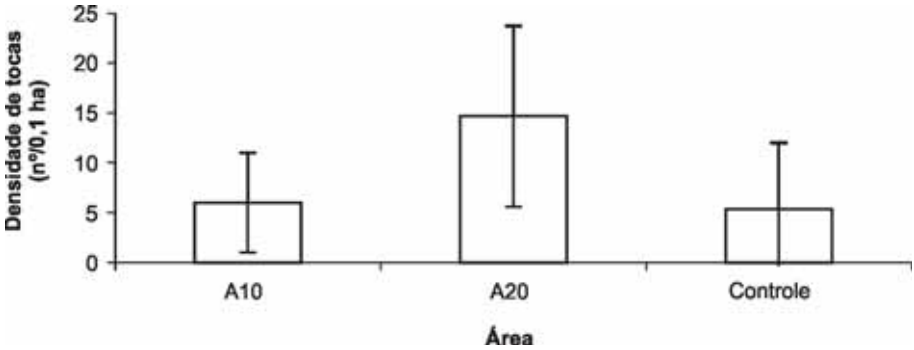


Figura 17. Representação gráfica da densidade de tocas nas áreas de estudo. Não há diferença significativa entre as áreas H (Kruskal-Wallis) = 2,44; gl = 2; P = 0,29.

Considerações finais

Herpetofauna

As diferenças herpetofaunísticas das áreas podem estar atribuídas à alteração e fragmentação da área. A alteração impacta diretamente a fauna, suprimindo os habitats e os indivíduos da área minerada. A fragmentação inibe a movimentação de indivíduos entre as diferentes machas, principalmente em razão das estradas, que são uma das mais efetivas barreiras ao movimento animal, influenciando constantemente a mortalidade das populações, especialmente para pequenos vertebrados, como répteis e anfíbios (SEMLITSCH, 2003). A maior parte das espécies ocorrentes da herpetofauna é considerada como dispersores pobres (DUELLMAN; TRUEB, 1994). Logo, os efeitos de isolamentos das áreas podem apresentar muitas implicações nas populações, quebrando rotas de dispersão entre habitats.

Por exibirem um complexo ciclo de vida, os anuros requerem habitats específicos para completar seus diferentes estágios de desenvolvimento. Nessa análise, observou-se que a disponibilidade de corpos de água nas áreas A10 e A20 e a complexidade florestal da área controle podem estar

influenciando a ocorrência de espécies de anuros e répteis. A realização das futuras expedições permitirá avaliar a diferença na diversidade, sendo influenciada pela sazonalidade ou por características físicas das áreas, principalmente avaliando o processo de regeneração das áreas da SIX.

Espera-se que, com o decorrer do trabalho, se identifiquem os principais fatores físicos e florísticos determinantes na ocorrência da herpetofauna, verificando se as recuperações das áreas mineradas possuem os parâmetros necessários às espécies, e propondo medidas que maximizem a possibilidade de ocorrência e sobrevivência das populações.

Avifauna

Algumas características das áreas apresentaram-se distintas quanto à composição da avifauna. As comunidades das áreas previamente mineradas apresentam semelhanças, diferindo-se da área externa (Controle), que possui maior riqueza e composição de comunidades diferenciadas.

Deve-se enfatizar que é necessário um maior esforço para a coleta de dados, para maior precisão dos resultados obtidos. Com isso, a utilização de estatísticas nãoparamétricas possivelmente tornará desnecessária, tornando os resultados mais robustos e precisos.

Algumas variáveis devem ser observadas nessa análise, como o tamanho das áreas que influenciam diretamente na riqueza das espécies. Habitats menores abrigam menos espécies e a qualidade do habitat diminui com o isolamento destas, sendo uma das principais causas do declínio de algumas espécies (NEWMARK, 1991; STOUFFER; BIERREGAARD, 1995). Sobre esse aspecto, o tamanho das áreas torna-se necessário para análise de dados.

As variáveis de condições climáticas devem ser consideradas. A análise dos dados em diferentes estações do ano é essencial, principalmente em regiões de climas subtropicais úmidos (quatro estações durante o ano). Com um maior esforço e análise em outras estações do ano, certamente a riqueza das áreas aumentará.

Alguns aspectos do levantamento florístico das áreas serão importantes para confrontar com os dados (por exemplo, espécies frutíferas e sua fenologia versus espécies de aves que se alimentam essencialmente de frutos e sua abundância).

Mastofauna

A importância do tamanho dos fragmentos e corredores é alta em paisagens com uma pequena quantidade de habitat disponível ou com uma permeabilidade da matriz reduzida (PARDINI et al., 2005). Em um estudo com pequenos mamíferos em fragmentos de Mata Atlântica no Sudeste do Brasil, mostra-se que fragmentos extremamente pequenos (<15 ha) reduzem a importância relativa de outros potenciais preditores de vulnerabilidade a extinções, como tamanho corporal e densidades populacionais em florestas contínuas (VIVEIROS DE CASTRO; FERNANDEZ, 2004).

Da mesma forma, a composição da paisagem é um dos fatores-chave para explicar a riqueza em escala regional. Estudos têm mostrado que o melhoramento na qualidade da matriz pode reduzir significativamente os estágios iniciais de extinção quando a quantidade de habitat diminui (DAUBER et al., 2003). Viveiros de Castro e Fernandez (2004) mostraram que a tolerância à matriz, fornecendo oportunidades para recolonização de fragmentos vazios ou imigração para as populações pequenas, foi determinante para a persistência em longo prazo das populações de mamíferos em fragmentos de Mata Atlântica, cercados de vegetação aberta.

Referências

AURICCHIO, P.; SALOMÃO, M. G. **Técnicas de coleta e preparação de vertebrados para fins científicos e didáticos**. São Paulo: Instituto Pau Brasil de História Natural, 2002. 350 p.

BELTON, W. **Aves do Rio Grande do Sul**: distribuição e biologia. São Leopoldo: Unisinos, 1994. 584 p.

BLONDEL, J.; FERRY, C.; FROCHOT, B. Point counts with unlimited distance. **Studies in Avian Biology**, Lawrence, v. 6, p. 414-420, 1981.

BONVICINO, C. R.; LINDBERGH, S. M.; MAROJA, L. S. Small non-flying mammals from conserved and altered areas of Atlantic Forest and Cerrado: comments on their potential use for monitoring environment. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 62, n. 4B, p. 765-774, 2002.

BORGES, C. R. S. **Aspectos macrofaunísticos em São Mateus do Sul, Paraná**. Curitiba: Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental, 1988, v. 1. 112 p.

CAMPBELL, H. W.; CHRISTMAN, S. P. Field techniques for herpetofaunal community analysis. In: SCOTT JÚNIOR, N. J. (Ed.). **Herpetological communities**. Washington, DC: U.S. Fish and Wildlife Service, 1982. p. 193-200. (Wildlife Research Report 13).

CARVALHO-SILVA, S. P.; FERNANDES, R. *Chironius bicarinatus:* foraging behavior. **Herpetological Review**, Lawrence, v. 25, n. 1, p. 28, 1994.

COMITÊ BRASILEIRO DE REGISTROS ORNITOLÓGICOS. **Lista de aves do Brasil**. 2005. Disponível em: <http://www.ib.usp.br/cbro>. Acesso em: 1 fev. 2005.

CECHIN, S. Z.; MARTINS, M. Eficiência de armadilhas de queda (*pitfall traps*) em amostragens de anfibios e répteis no Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, Curitiba, v. 17, n. 3, p. 729-740, 2000.

DAUBER, J.; HIRSCH, M.; SIMMERING, D.; WALDHARDT, R.; OTTE, A.; WOLTERS, V. Landscape structure as an indicator of biodiversity: matrix effects on species richness. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Ottawa, CA, v. 98, p. 321-329, 2003.

DE LA PEÑA, M. R.; RUMBOLL, M. **Birds of southern South America and Antartica**. Princeton: Princeton University Press,1998. 304 p.

DORAZIO, R. M.; ROYLE, J. A. Mixture model for estimating the size of a closed population when capture rates vary among individuals. **Biometrics**, Washington, DC, v. 59, p. 351-364, 2003.

DUELLMAN, W. E.; TRUEB, L. **Biology of amphibians**. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1994. 670 p.

DUNNING, J. S. **South America birds**: a photographic Aid to Identification. New Square: Harrowood Books, 1987. 351 p.

FERNANDEZ, F. A. S. Métodos para estimativas de parâmetros populacionais por captura, marcação e recaptura. **Oecologia brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 2, p. 1-26, 1995.

GENTILE, R.; FERNANDEZ, F. A. S. A field comparison of two capture-mark-recapture estimators of small mammal populations. **Revista Brasileira de Zoologia**, Curitiba, v. 16, n. 4, p. 1109-1114, 1999.

HEYER, W. R.; DONNELLY, M. A.; MCDIARMID, R. W.; HAYEK, L. A. C.; FOSTER, M. S. (Ed.). **Measuring and monitoring biological diversity standard methods for amphibians**. Washington, DC: Smithsonian Institution Press, 1994. 364 p. (Biological Diversity Handbook Series).

HILL, M. O. Reciprocal averaging: an eigenvector method of ordination. **Journal of Ecology**, Oxford**,** v. 61, p. 237-249, 1973.

HÜTTL, R. F.; GERVIN, W. Landscape and ecosystem development after disturbance by mining. **Ecological Engineering**, Orlando, v. 24, p. 1-3, 2005.

KRISHNAMURTHY, S.V. Amphibian assemblages in undisturbed and disturbed areas of Kudremukh National Park, central Western Ghats, India. **Environmental Conservation**, Lausanne, v. 30, n. 3, p. 274–282, 2003.

LEMA, T.; P.C. BRAUN. Contribuição à herpetologia da Argentina e do Rio Grande do Sul, Brasil por William Wright Milstead (Amphibia, Reptilia). **Revista Brasileira de Zoologia**, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 261-287, 1993.

MIKICH, S. B; BÉRNILS, R. S; PIZZI, P. A. Fauna ameaçada no Paraná: uma introdução. In: MIKICH, S. B; BÉRNILS, R. S. (Ed.). **Livro vermelho da fauna ameaçada no estado do Paraná**. Curitiba: Instituto Ambiental do Paraná, 2004. Disponível em: <http://www.pr.gov.br/iap>. Acesso em: 14 jul. 2005.

MIKICH, S. B.; BÉRNILS, R. S. (Ed.). **Livro vermelho da fauna ameaçada no estado do Paraná**. Curitiba: Instituto Ambiental do Paraná, 2004. 764 p.

NEWMARK, W. D. Tropical forest fragmentation and the local extinction of understory birds in the eastern Usambara Mountains, Tanzania. **Conservation Biology**, Cambridge, v. 5, p. 67-78, 1991.

PAOLETTI, M. G. Using bioindicator based on biodiversity to assess landscape sustainability. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Ottawa, CA, v. 74, p. 1-18, 1999.

PARDINI, R.; DITT, E. H.; CULLEN JÚNIOR, L.; BASSI, C.; RUDRAN, R. Levantamento rápido de mamíferos terrestres de médio e grande porte. In: CULLEN JÚNIOR, L.; VALLADARES-PADUA, C. E RUDRAN, R. (Org.). **Métodos de estudos em biologia da conservação e manejo da vida silvestre**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; Fundação o Boticário de Proteção à Natureza, 2003. p. 181-201

PARDINI, R.; SOUZA, S. M.: BRAGA-NETO, R.; METZGER, J. P. The role of forest structure, fragment size and corridors in maintaining small mammals abundance and diversity in an Atlantic forest landscape. **Biological Conservation**, Amsterdam, NL, v. 124, p. 253-266, 2005.

RATHKE, D.; BRÖRING, U. Colonization of post-mining landscapes by shrews and rodents (Mammalia: Rodentia, Soricomorpha). **Ecological Engineering**, Orlando, v. 24, p. 149-156, 2005.

SANTOS, A. J. Estimativas de riquezas em espécies. In: CULLEN J. L.; VALLADARES-PADUA, C. E; RUDRAN, R. (Org.). **Métodos de estudos em biologia da conservação e manejo da**

vida silvestre. Curitiba: Universidade Federal do Paraná: Fundação o Boticário de Proteção à Natureza, 2003. p. 19-41

SCHERER-NETO, P.; STRAUBE, F. C. **Aves do Paraná**: história, lista anotada e bibliografia. Campo Largo: Logos press, 1995. 79 p.

SEMLITSCH, R. D. **Amphibian conservation**. Washington, DC: Smithsonian Institution, 2003. 324 p.

SICK, H. (Ed.). **Ornitologia brasileira**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997, 862 p.

SOUZA, V. C.; LORENZI, H. **Botânica sistemática**: guia ilustrado para identificação das famílias de Angiospermas da flora brasileira, baseado em APGII. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2005. 640 p.

SYSTAT software inc. 1990. In: Disponível em: <http://www.systat.com>. Acesso em: 1 jul. 2005.STEBBINS, R. C.; COHEN, N. W. **A natural history of amphibians**. Princeton: Princeton University Press, 1995. 332 p.

STEVENS, P. F. **Angiosperm phylogeny website**. 2001. Disponível em: <http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb/>. Acesso em: 1 jul. 2005.

STOTZ, D. F.; FITZPATRCK , J. W.; PARKER, T. A.; MOSKOVITS, D. K. **Neotropical birds**: ecology and conservation. Chicago: University of Chicago Press, 1996. 469 p.

STOUFFER, P. C.; BIERREGAARD, R. O. Use of Amazonian forest fragmentation by understory insectivorous birds. **Ecology**, New York, v. 76, p. 2429-2445, 1995.

STRAUBE, F. C.; URBEN-FILHO, A. Observações sobre a avifauna de pequenos remanescentes florestais na região noroeste do Paraná (Brasil). **Atualidades Ornitológicas**, Ivaiporã, v. 123, p. 10, 2005

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE-Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. 124 p.

VIELLIARD, J. E.; SILVA, W. R. Nova metodologia de levantamento quantitativo da avifauna e primeiro resultado no interior do Estado de São Paulo**,** Brasil. In: ENCONTRO DE ANILHADORES DE AVES, 4., 1990, Recife. **Anais...** Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1990. p. 117-151.

VIVEIROS DE CASTRO, E. B.; FERNANDEZ, F. A. S. Determinants of differential extinction vulnerabilities of small mammals in Atlantic forest fragments in Brazil. **Biological Conservation**, Amsterdam, NL, v. 119, p. 73-80, 2004.

WATTERS, G. T.; MENKER, T.; O´DEE, S. A. Comparison of terrestrial snail faunas between strip-mined land and relatively undisturbed area in Ohio, USA: an evaluation of recovery potential and changing faunal assemblages. **Biological Conservation**, Amsterdam, NL, v. 126, p. 166-174, 2005.

WILSON, D. E.; COLE, F. R.; NICHOLS, J. D.; RUDRAN, R.; FOSTER, M. S. (Ed.). **Measuring and monitoring biological diversity**: standard methods for mammals. Washington, DC: Smithsonian Institution, 1996. 480 p.

WILSON, E.O. Introduction. In: REAKA-KUDLA, M. **Biodiversity II**. Washington, DC: J. Henry, 1997. p. 1–2.

Parte 3

Indicadores de qualidade ambiental em áreas degradadas

Capítulo 4

Paleodiversidade comentada dos folhelhos e siltitos da formação Irati da área de extração do "xisto" e região

Um resgate fossilífero

José Eduardo Figueiredo Dornelles
Roger Borges da Silva
Rosa Lia Barbieri

Introdução

As atividades de mineração a céu aberto causam profundas modificações na geomorfologia local. Na maioria das situações, em áreas compostas por rochas sedimentares com conteúdo fossilífero, é gerada uma preocupação especial com a perda ou o mau aproveitamento do resgate de sua paleodiversidade. Especificamente objetiva-se aqui localizar, coletar e identificar, exemplares constituintes da paleodiversidade local, inseridas nas rochas sedimentares (folhelhos pirobetuminosos e siltitos) da Formação Irati, além de propor essa metodologia como uma das possíveis formas de se tratar (como procedimento padrão) a mineração de rochas fossilíferas, voltadas à comercialização.

Área de estudo

As atividades de coletas foram realizadas no Município de São Mateus do Sul, Paraná, localizado no planalto com altitude aproximada de 800 m, 25º52' de latitude Sul e 50º23' de longitude Oeste. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, subtropical úmido sem estação seca. A precipitação média anual está entre 1.400 mm e 1.500 mm, com temperatura média do mês mais quente inferior a 22 ºC e a média do mês mais frio superior a 10 ºC. Geologicamente a região pertence à Bacia do Paraná, com sedimentos de idade permiana datados de 230 milhões de anos e pertencentes à Formação Irati.

Neste trabalho escolhemos três áreas com características de histórico de exploração e fisionomia distintas. Duas áreas foram localizadas dentro da Petrobras-SIX e uma fora do empreendimento, localizada na região de Antônio Olinto, PR. As áreas no interior da Petrobras-SIX caracterizam-se por apresentarem um histórico de mineração e com processos de recuperação em andamento. Essas áreas representam dois estágios distintos de sucessão, tendo uma delas sido minerada em 1995 e iniciada a sua recuperação em 1998, e a outra minerada em 1985 e iniciada a sua recuperação em 1992.

A recuperação nas quais essas áreas foram submetidas foi por meio da recobertura de terra vegetal do solo exposto, consequente da mineração e posterior plantio de espécies arbóreas pioneiras, com predomínio de *Mimosa scabrella* (bracatinga).

Materiais e métodos

Localização, identificação e acondicionamento dos fósseis coletados

O material fossilífero coletado passou sistematicamente por três etapas: localização, identificação e acondicionamento.

A etapa da localização constou fundamentalmente da interceptação do exemplar fóssil no sedimento, dando atenção especial aos rigores metodológicos da ciência tafonômica, conforme sugerido por Holz e Simões (2002). Após sua descoberta, fez-se uma breve descrição em que se buscou uma interpretação paleoambiental e geosedimentar com o intuito de interpretar o contexto do fóssil com seu sedimento, evitando, por exemplo, misturar exemplares in situ dos materiais comumente rolados ou transportados pela própria atividade mineradora.

A localização dos exemplares fez-se por meios georeferenciados, por intermédio de aparelhos portáteis Garmin® modelo 76 e 76 map, por meio da obtenção das coordenadas em UTM (Coordenadas métricas, fuso 22, datum SAD 69).

A identificação foi realizada com base em literatura específica da assembleia fossilífera da Formação Irati.

Depois de coletados e identificados, os materiais foram envolvidos em papel absorvente e protegidos mecanicamente com fita adesiva. Etiquetas com os dados específicos de coleta, dia, local, coletor e coordenadas por

ponto absoluto foram fixadas com fita em cada amostra de rocha. Logo após, o material foi transportado para o laboratório, onde foi aberto, desidratado em estufa a 25 ºC durante 24 horas, e seus dados registrados na superfície da própria rocha por meio do uso de tinta nitrocelulose e nanquim.

Todos os exemplares foram tombados em acervo científico da coleção paleontológica do Museu de Ciências Carlos Ritter com a designação "PG-0000" (Paleontologia Geral – 0000), onde foram registradas as procedências, o nome do coletor e/ou determinador, data de coleta, denominação binominal (epíteto específico e genérico), número de origem, caso tivesse, dados estratigráficos, período e observações gerais sobre cada exemplar (DORNELLES, 2005).

Todo o material fossilífero foi acondicionado em arquivos metálicos tipo mapoteca, armários metálicos e em estantes metálicas duplas, no caso dos blocos de rocha de porte maior. Foram separados em uma sala especial no Instituto de Biologia, Departamento de Zoologia e Genética da UFPel, sob cuidados de curadoria específica do Professor Dr. José Eduardo Figueiredo Dornelles.

Resultados

Os materiais coletados neste trabalho foram organizados segundo metodologia acima apresentada. Trata-se, de forma geral, de materiais bem preservados e fossilizados, no entanto, de difícil preparação. A coleta desses exemplares deve gerar a expectativa de que as empresas assumam por questões de passivo ambiental procedimentos adequados, que busquem minimizar impactos ao ambiente, até mesmo sobre a paleodiversidade, tanto pela natureza única desse patrimônio como por uma questão de responsabilidade social. Em seguida, apresenta-se uma lista (Figuras 1 a 20) com a base de dados disponível até o momento.

Filo Arthropoda

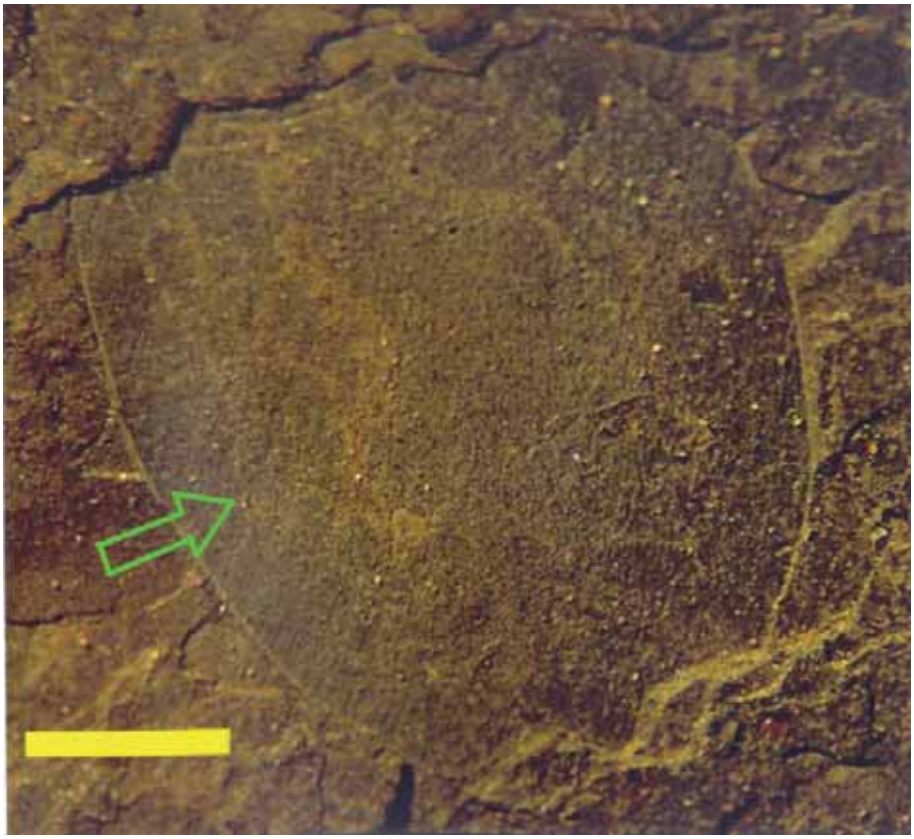


Foto: J. E. F. Dornelles

Figura 1. Exemplar de um possível crustáceo Pygocephalomorpha. (n. PG-091), indicado pela seta. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR. Escala: 3 cm.
Fonte: identificação com base em Rodrigues e Pinto (2000).

Filo Chordata

Foto: J. E. F. Dornelles

Figura 2. Detalhe de escama de um peixe (Paleoniscidae?). Formação Irati, São Mateus do Sul, PR. Escala: 1 cm.

Fonte: identificação com base em Richter (2000).

Foto: J. E. F. Dornelles

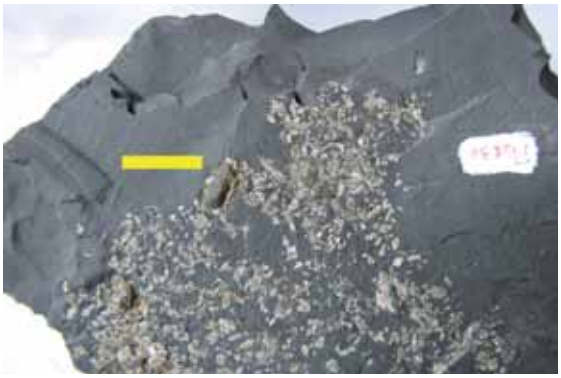


Figura 3. Conjunto de escamas desarticuladas de peixes não determinados. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR. Escala: 2 cm.

Foto: J. E. F. Dornelles

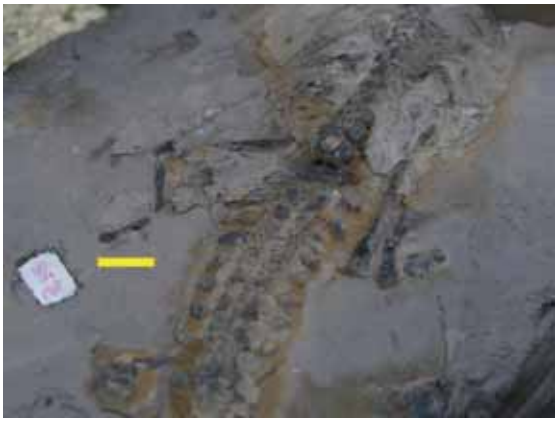


Figura 4. Esqueleto pós-craniano incompleto (PG-148) de Mesosaurus tenuidens. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR. Escala: 2 cm.

Foto: J. E. F. Dornelles

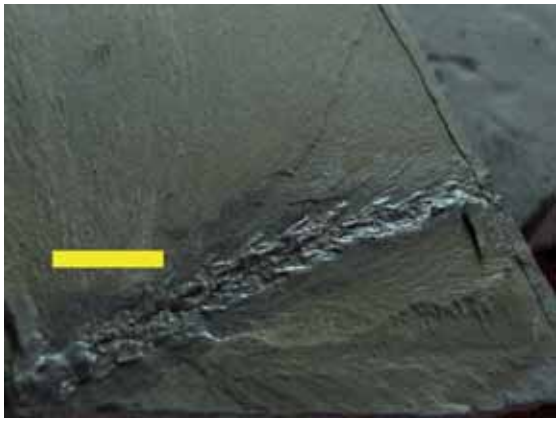


Figura 5. Segmento de vértebras caudais articuladas de *Mesosaurus tenuidens* (PG-143). Formação Irati, São Mateus do Sul, PR. Escala: 3 cm.

Foto: J. E. F. Dornelles

Figura 6. Costelas desarticuladas de *Mesosaurus tenuidens* (PG-073). Escala: 1 cm. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR.

Foto: J. E. F. Dornelles

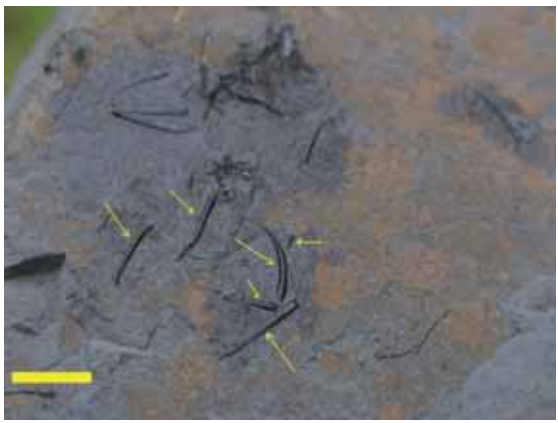


Figura 7. Conjunto de dentes desarticulados de *Mesosaurus tenuidens* (PG-113). Unidades dentárias indicadas pelas setas. Escala: 1 cm. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR.

Foto: J. E. F. Dornelles

Figura 8. Conjunto de vértebras e costelas de *Mesosaurus tenuidens* (PG-075). Unidades ósseas indicadas pelas setas. Escala: 1 cm. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR.

Foto: J. E. F. Dornelles

Figura 9. Vértebras (indicadas pelas setas grossas) e osso longo não identificado (indicado pela seta fina) de *Mesosaurus tenuidens* (PG-0142). Escala: 1 cm. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR.

Foto: J. E. F. Dornelles

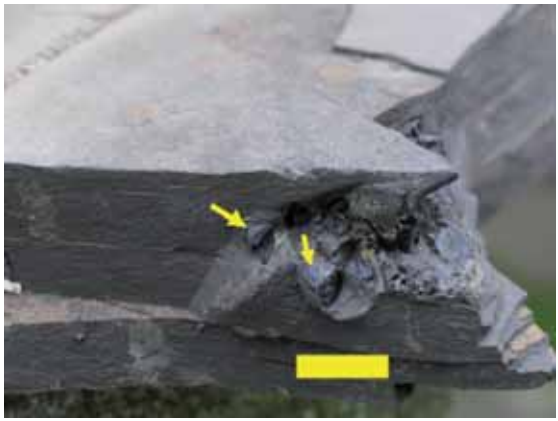


Figura 10. Fragmentos de costelas desarticuladas de *Mesosaurus tenuidens* (PG-154). Unidades ósseas mencionadas foram indicadas pelas setas. Escala: 1 cm. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR.

Foto: J. E. F. Dornelles

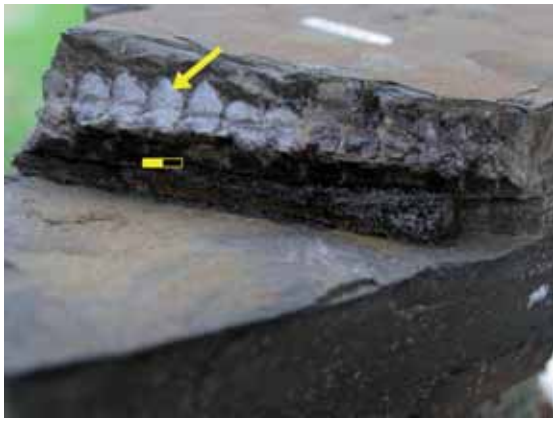


Figura 11. Conjunto de vértebras articuladas de um mesosaurídeo. As unidades vertebrais encontram-se indicadas pelas setas. Escala: 1 cm. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR.

Foto: J. E. F. Dornelles

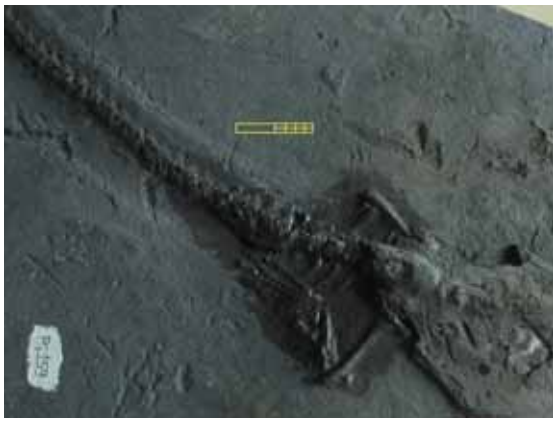


Figura 12. Porção caudal e membros posteriores de um mesosaurídeo. (PG-159). Escala: 3 cm. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR.

Foto: J. E. F. Dornelles

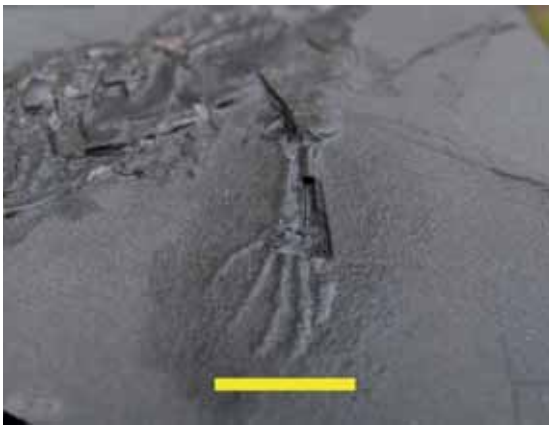


Figura 13. Membro anterior incompleto de um mesosaurídeo. Escala: 4 cm. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR.

Foto: J. E. F. Dornelles

Figura 14. Sincrânio incompleto (indicado pelo círculo) de um mesosaurídeo. Escala: 3 cm. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR.

Foto: J. E. F. Dornelles

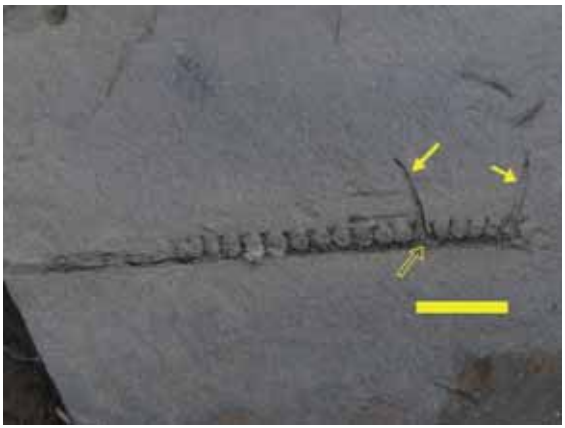


Figura 15. Ramo mandibular fraturado de *Mesosaurus tenuidens* (PG-113). A setas cheias indicam a posição dos dentes aciculados e a seta vazada o ramo mandibular. Escala: 1 cm. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR.

Amostra Sedimentar

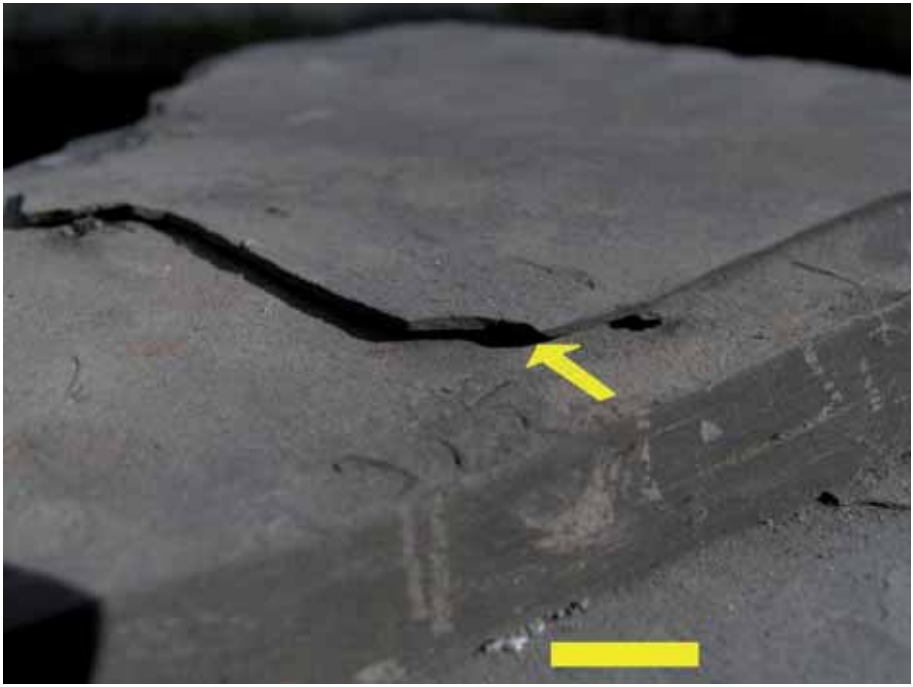


Foto: J. E. F. Dornelles

Figura 16. Detalhe da desconexão laminar (indicada pela seta) dos planos de acamamento do folhelho piro-betuminoso. Formação Irati, São Mateus do Sul, PR. Escala: 2 cm.

Reino Plantae

Foto: J. E. F. Dornelles

Figura 17. Exemplar de *Glossopteris* sp. (PG-095) (variedade indeterminada). Localidade de Antônio Olinto, PR. Formação Irati / Rio do Rasto. Escala: 1 cm.

Fonte: identificação com base em Guerra-Sommer e Cazzulo-Klepzig (2000).

Foto: J. E. F. Dornelles

Figura 18. Exemplar de *Glossopteris* sp. (PG-094) (variedade indeterminada). Localidade de Antônio Olinto, PR. Formação Irati / Rio do Rasto. Escala: 1 cm.

Fonte: identificação com base em Guerra-Sommer e Cazzulo-Klepzig (2000).

Foto: J. E. F. Dornelles

Figura 19. Exemplar de *Glossopteris* sp. (PG-101) (variedade indeterminada). Localidade de Antônio Olinto, PR. Formação Irati / Rio do Rasto. Escala: 1 cm.

Fonte: identificação com base em Guerra-Sommer e Cazzulo-Klepzig (2000).

Foto: J. E. F. Dornelles

Figura 20. Exemplar de *Pecopteris* sp. (PG-096) (variedade indeterminada). Localidade de Antônio Olinto, PR. Formação Irati / Rio do Rasto. Escala 1 cm.

Fonte: identificação com base em Guerra-Sommer e Cazzulo-Klepzig (2000).

Referências

DORNELLES, J. E. F.**Guia da biodiversidade do museu de ciências Carlos Ritter.** Pelotas: Editora da Universidade Federal de Pelotas, 2005. 140 p.

HOLZ, M.; SIMÕES, M. G. **Elementos fundamentais de tafonomia.** Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 231 p.

GUERRA-SOMMER, M; CAZZULO-KLEPZIG, M. As floras gonduânicas do paleozóico superior do Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M.; ROS, L. F. **Paleontologia do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. p. 67-84.

RICTHER, M. Peixes fósseis do Rio Grande do Sul. In: HOLZ, *M.* **Paleontologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. p. 162-175.

RODRIGUES, K. A.; PINTO, I. D. Os crustáceos, ordem pygocephalomorpha. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. **Paleontologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. p. 141-147.

Parte 3

Indicadores de qualidade ambiental em áreas degradadas

Capítulo 5

Recuperação de solos degradados pela mineração

Da teoria termodinâmica à prática nas áreas regeneradas da mina de carvão de Candiota, RS

Luiz Fernando Spinelli Pinto
Flavia Fontana Fernandes
Eloy Antonio Pauletto

Introdução

Sob o ponto de vista termodinâmico, os sistemas podem ser classificados em: (a) isolados, que não trocam matéria nem energia com o exterior; (b) fechados, que trocam energia, mas não matéria; (c) abertos, que trocam tanto matéria como energia com o exterior (PILLA, 1979).

O primeiro princípio da termodinâmica que trata da conservação da energia e sua expressão algébrica (eq. 1) diz: se o sistema ganha calor (q), a sua energia cresce, e se executa trabalho (w), a sua energia diminui.

$$\Delta E = q - w \quad (1)$$

Esse princípio nos explica por que um objeto que está sobre uma mesa poderá cair no chão, mas o contrário é impossível, pois seria necessário realizar um trabalho para levar o objeto desde o chão até a mesa. Assim, parece natural que transformações espontâneas sejam acompanhadas de decréscimo de energia (o objeto que caiu da mesa converteu energia potencial em calor e som ao chocar contra o chão). Entretanto, algumas mudanças espontâneas absorvem calor, como a dissolução do cloreto de cálcio em água (o balão ou béquer torna-se mais frio à medida que o sal se dissolve) e a fusão do gelo acima de 0 °C (onde calor é absorvido no processo).

O segundo princípio da termodinâmica explica o que têm em comum os processos espontâneos: tanto os que perdem como os que ganham energia, uma redução da ordem. Para isso, são definidas três novas funções: a entalpia (ΔH); a entropia (ΔS); e a energia livre de Gibbs (ΔG). A relação entre elas a seguir é a expressão matemática do segundo princípio (eq. 2).

$$\Delta G = \Delta H - T \times \Delta S \quad (2)$$

A entalpia representa a transferência de calor à pressão constante; a entropia está relacionada ao grau de desordem do sistema e pode ser definida como a transferência de calor do processo reversível dividida pela temperatura. Como o calor transferido por um processo espontâneo irreversível sempre é inferior ao calor transferido pelo processo reversível, a energia livre de Gibbs será negativa para processos irreversíveis, e, é fácil deduzir, será nula para processos reversíveis (CASTELAN, 1984).

Dessa forma, qualquer processo que resulte em um aumento de entropia irá ser de ocorrência espontânea e concorrer para o aumento da desordem do sistema. Assim, a entropia do Universo aumentaria continuamente, tendendo para um máximo ("seta do tempo").

O solo como um sistema termodinâmico

O solo é um sistema de múltiplas fases, consistindo de numerosas fases sólidas (minerais e húmus), uma fase líquida (água ou solução do solo) e uma fase gasosa (ar do solo). Sobreposta a essa matriz existe uma fase "viva" (bactérias, fungos, protozoários, nematoides, etc.); organismos que estão continuamente degradando resíduos orgânicos e sintetizando muitos dos produtos nos seus próprios tecidos e liberando outros. Enfim, trata-se de um sistema termodinâmico aberto, porque nele ocorrem perdas e ganhos tanto de energia como de matéria (Figura 1).

Os sistemas vivos, que também são sistemas abertos, são altamente ordenados e ricos em energia, ou seja, de baixo conteúdo entrópico, o que somente é possível pela entrada de energia e de matéria no sistema. Smeck et al. (1983) sugerem no solo algo análogo, havendo um ordenamento dos materiais de origem (rochas, sedimentos), formando horizontes de solo por causa de fluxos de matéria e energia, o que conceitualmente levaria a uma diminuição da entropia.

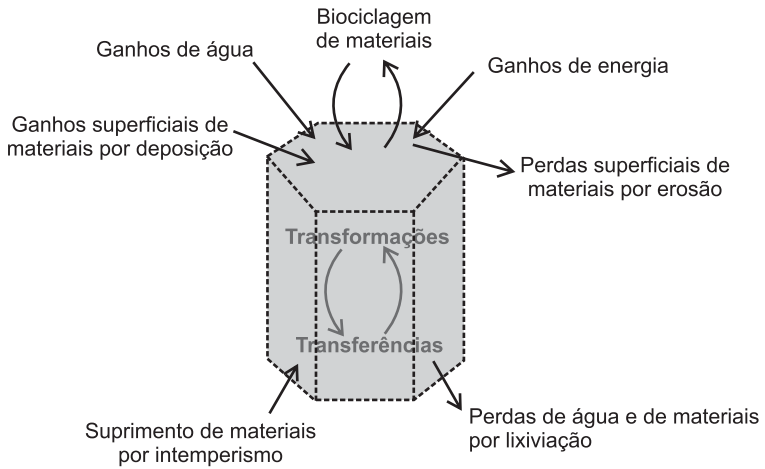


Figura 1. Representação esquemática do solo como um sistema aberto (SMECK et al., 1983).

Fluxos no sistema e processos formadores de solos

Para a entropia diminuir por meio do desenvolvimento do perfil de solo, de acordo com a segunda Lei da Termodinâmica, a entropia dos arredores do sistema deve aumentar. Em consequência disso, haveria um fluxo de entropia do sistema aberto para o exterior. Por conseguinte, os processos que levam a um ordenamento e/ou a altos níveis de energia livre nesses sistemas seriam dirigidos por fluxo de energia para dentro do sistema ou pela degradação de matéria que entra no sistema. Essa relação nos solos pode ser observada na Tabela 1.

Os fluxos de energia externos seriam derivados em última análise da radiação solar ou da gravidade. Quando a vegetação morre, a energia capturada na fotossíntese se torna disponível para os microrganismos do solo, que são responsáveis diretamente por muitas reações no solo, particularmente de oxidação-redução. A energia radiante é também responsável pela biociclagem (translocação de elementos via raízes das plantas). De modo geral, a radiação solar tende a concentrar constituintes do solo na

Tabela 1. Mudança de entropia devida a vários processos de formação de solo.

Variação de entropia (∆S)	Processos de formação de solo
Positiva	Mistura física
	Intemperismo de minerais primários
	Eluviação-Iluviação
Negativa	Acumulação de matéria orgânica
	Formação de minerais secundários
	Lixiviação

Fonte: Smeck et al. (1983).

superfície, ao passo que a gravidade tende a mover componentes suspensos ou solúveis para as partes inferiores do perfil de solo.

É importante notar que no sistema solo ocorre tanto saída como entrada de fluxos de matéria e energia (Figura 1). O balanço líquido favoreceria a entrada de fluxos, de modo a promover os processos de formação de solo para que o desenvolvimento do perfil se proceda.

Equilíbrio termodinâmico e estados de estabilidade no sistema solo

O estado de equilíbrio termodinâmico é o resultado da simultaneidade do equilíbrio térmico, mecânico e químico, isto é, não há gradientes de temperatura, pressão e de potencial químico (PILLA, 1979). O equilíbrio termodinâmico é expresso da seguinte forma: $\Delta G = 0$ e $\Delta S = 0$, no qual nenhum processo irreversível ocorre e todas variáveis macroscópicas permanecem imutáveis. Nele, a entalpia (H) e a energia livre (G) atingem um mínimo e a entropia (S), um máximo; esse critério, obviamente, é somente aplicável para sistemas isolados. Desse modo, se a formação do solo é um processo que consome energia e a entropia decresce em consequência do ordenamento do sistema, o desenvolvimento do solo resultaria em um sistema que se move para longe do equilíbrio (Figura 2).

É clássico na literatura pedológica a referência a "equilíbrio" entre os solos e o seu ambiente climático (solos zonais) e hídrico (solos bem e mal drenados); ou ainda, entre os processos formadores de solo e o rebaixamento e abaulamento da paisagem (solos profundos no topo e vale e rasos na encosta), nesse caso indicando equilíbrio entre erosão e sedimentação. Ambos sugerem uma interação entre o sistema solo e os fluxos exteriores, resultando em uma condição aparentemente invariante com o tempo, ou seja, uma condição de estado estacionário ("steady state").

Smeck et al. (1983) acreditam que os solos (à semelhança dos organismos vivos) são importadores líquidos de energia e matéria durante seus estágios construcionais e somente exibam uma perda líquida de energia após a degradação do perfil de solo (Figura 2), à semelhança da morte do sistema vivo. Durante o estágio construcional a produção de entropia dentro do sistema em razão de processos irreversíveis seria compensada pelo fluxo de entropia para o exterior, de modo que seja atingido um mínimo de produção de entropia que iguale o fluxo de saída. Desse modo, seria

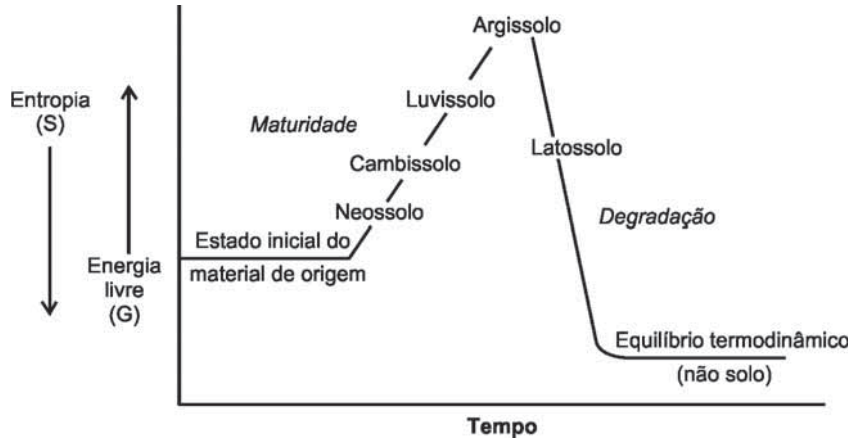


Figura 2. Representação esquemática do conteúdo de energia livre e de entropia dos tipos de solos em virtude do tempo, representando a evolução dos solos para o equilíbrio.

Fonte: adaptado de Smeck et al., (1983).

atingido um estado estável de entropia e de outras variáveis de estado do sistema (isto é, constantes). A manutenção desse estado seria por causa do recebimento líquido positivo de energia e ao fluxo de entrada de matéria com menos entropia do que a liberada para o exterior. No último caso, o sistema degradaria a matéria recebida para manter o estado estável. Nesse estado, então, o fluxo de entrada de energia e/ou matéria seria suficiente para manter as propriedades do solo; ou, em outras palavras, os processos construcionais apenas compensariam os processos degradacionais.

A Figura 2 ilustra o estabelecimento de diferentes níveis de entropia (ou energia) no estado estável para diferentes classes de solos. Fluxos de entrada mais energéticos levariam a estados estáveis com maior energia livre ou de menor entropia. Isso sugere que solos em regiões de clima úmido e mais quente possuiriam maiores níveis de organização e de energia livre que solos em áreas mais frias e áridas. Considerando as posições em paisagens estáveis, solos sujeitos à lixiviação mais intensa seriam mais organizados que os submetidos a menor lixiviação.

Termodinâmica de sistemas abertos e equilíbrio dinâmico

Prigogine (1961) e outros, de acordo com Smeck et al. (1983), adaptaram a termodinâmica para sistemas abertos, que é referida também como termodinâmica do não equilíbrio ou dos processos irreversíveis.

Prigogine e Stengers (1984) mostram que, para a descrição desse tipo de sistema termodinâmico, torna-se importante a função potencial de produção de entropia: $P = d_iS/dt$. A variação da entropia dS se deve à soma de dois termos: d_eS, ligado às trocas (fluxos entre o sistema e o exterior), e d_iS, ligado à produção de entropia, em razão dos fenômenos irreversíveis. Logo:

$$dS = d_eS + d_iS \quad (3)$$

O termo d_iS é sempre positivo, salvo em equilíbrio termodinâmico, quando se anula. Para os sistemas isolados d_eS º0, correspondendo a um valor máximo de entropia.

Os sistemas abertos no estágio construcional evoluem não em direção a um estado de entropia máxima, como nos sistemas isolados, mas em direção a uma produção de entropia mínima. Com a manutenção de fluxos de matéria e energia constantes, essa produção permite ao sistema permanecer a uma distância do equilíbrio termodinâmico. O aumento da entropia interna $d_iS(+)$ é compensado por um fluxo negativo de entropia $d_eS(-)$, dado pela entrada de energia ou de material menos entrópico no sistema.

Esses fluxos de entrada e saída resultam em um balanço nulo na entropia do sistema em um determinado nível, chamado de estado de **equilíbrio dinâmico**, sustentado, por conseguinte, por fluxos vindos do exterior e pela produção de entropia.

Na termodinâmica linear as forças são nulas no equilíbrio ou termodinamicamente fracas próximas do equilíbrio, condição essa em que o fluxo se torna uma função linear da força. Longe do equilíbrio termodinâmico, no domínio da **termodinâmica não linear**, em que o fluxo é uma função mais complicada da força, a produção de entropia não permite mais definir um estado atrativo, ou seja, de equilíbrio termodinâmico (PRIGOGINE; STENGERS, 1984).

No estado de estabilidade (equilíbrio dinâmico) as perturbações menores (flutuações) nos fluxos de matéria e energia são amortecidas por subsistemas. Isto é, mudanças internas espontâneas ocorrem retornando o sistema para o estado de produção entrópica mínima. Esses conceitos explicam a estabilidade do sistema solo ante às mudanças da radiação solar ao longo do dia e ao longo do ano, bem como às variações na composição da água (solução) do solo e nas forças atrativas e de agregação das partículas com a variação na precipitação pluviométrica. Assim, com **flutuações** normais nas condições ambientais, o solo é mantido em um estado estável.

No caso de uma flutuação ultrapassar um determinado **limiar**, essa, ao invés de regredir, se amplifica invadindo outros níveis do sistema, tornando-se uma **perturbação.** O sistema (instabilizado) evolui então para um novo estado de produção mínima de entropia, podendo, em casos mais extremos, o solo se degradar completamente (não solo), como se expõem na Figura 2.

O solo no ecossistema

As relações entre os subsistemas minerais (ou solo) – plantas – organismos se constituem na base do ecossistema terrestre, no qual milhares de espécies interagem e contribuem para os ciclos globais que tornam a vida na Terra possível. Em relação aos grandes sistemas o solo ocupa uma posição muito peculiar, se localizando na interface (Figura 3), sendo até mesmo considerado como um sistema à parte por alguns autores (pedosfera).

No estudo da dinâmica desse tipo de ecossistema, pode-se notar que existem diversas espécies que desencadeiam e potencializam os milhares de processos físico-químicos e bioquímicos que ocorrem no mesmo. Den-

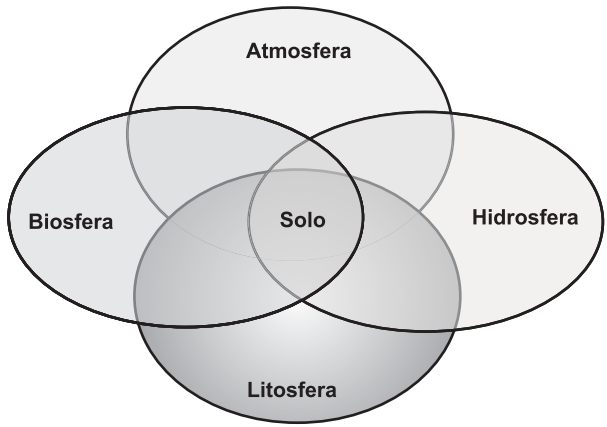


Figura 3. Posição do solo no ecossistema.

tre estes processos encontram-se a ciclagem de nutrientes e a manutenção da estrutura, que, por sua vez, propicia aeração e drenagem, por exemplo. É a presença desses organismos-chave que garante o perfeito funcionamento do ecossistema, levando-o a apresentar as propriedades de resiliência e estabilidade (BRADY; WEIL, 1999). Ademais, como se trata de uma rede de relações, a ocorrência desses organismos indica que atributos-chave estão em estado adequado, de forma a garantir que suas populações estejam presentes no sistema.

Estabilidade de ecossistemas: resistência e resiliência

A manutenção de processos funcionais importantes ou **Estabilidade de um Ecossistema** é desejável quando afetado por qualquer distúrbio externo, sejam decorrentes de intempéries ou atividade humana, que são potencialmente relacionadas ao fluxo interno de matéria e energia. Ela está na base conceitual para avaliar sustentabilidade à degradação do solo ou de ecossistemas, apesar de algumas divergências.

A maioria dos autores, entre eles Orwin e Wardle (2004), considera ainda que a estabilidade ecológica a perturbações externas é o produto de dois componentes: Resistência e Resiliência.

Um sistema apresenta a propriedade da resistência quando é capaz de manter sua estrutura e padrão de comportamento próximos ao original após a interferência de um evento externo. Então, **Resistência** *é a medida da mudança causada pelo evento e será tanto maior quanto menos alteração o sistema sofrer.*

Resiliência consiste na habilidade que o sistema tem de retornar ao estado de organização anterior (ou saúde funcional) após ter sofrido um distúrbio ou perturbação capaz de descontinuar os processos normais dentro do mesmo. Ou *é a medida da velocidade com que o sistema retorna ao estado prévio à perturbação externa.*

A Figura 4 ilustra uma situação hipotética, na qual se pode observar uma variável de solo qualquer, biótica ou abiótica, contanto que responsiva à perturbação. A linha superior representa seu comportamento no solo não alterado pelo distúrbio ou situação controle (C) e a linha inferior representa o solo perturbado (P). No tempo em que cessou a perturbação, tempo 0 ou t_0, o valor da variável no solo C é dado por C_0, enquanto no solo P, tem-se P_0. A diferença $C_0 - P_0 = D_0$ é a medida da resistência do sistema solo em ser alterado pelo evento externo.

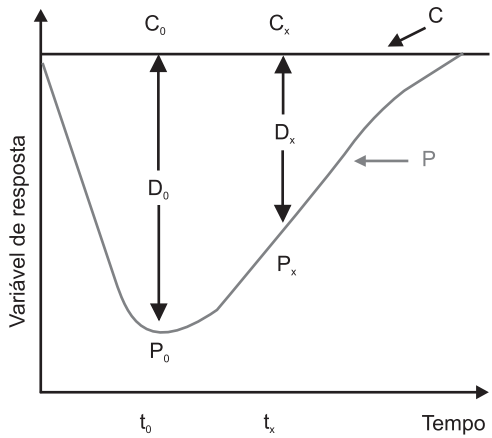


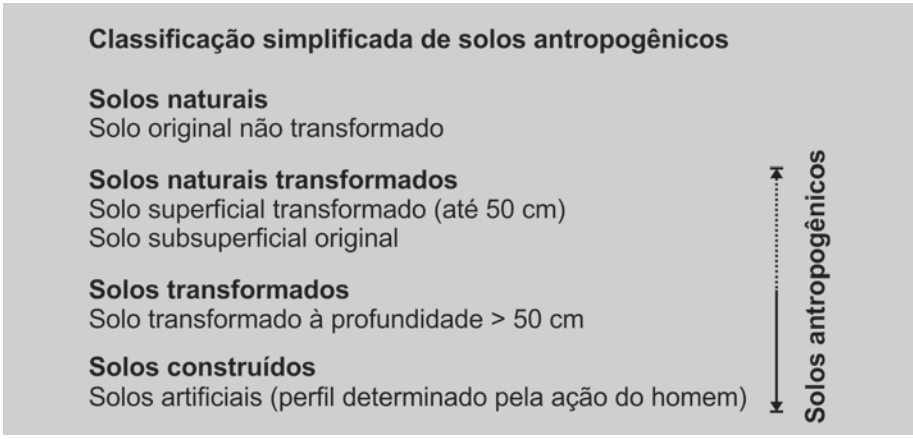
Figura 4. Exemplo hipotético de resistência e resiliência de uma variável a um distúrbio qualquer.
Fonte: adaptado de Orwin e Wardle (2004).

Um exemplo para avaliar resiliência é dado em t_x, com o valor do solo controle sendo C_x e do solo perturbado, P_x. A diferença entre ambos será D_x, com o tempo x podendo ser qualquer ponto no tempo após cessar o distúrbio (após t_0). O conjunto das resiliências pontuais é dado por dD_x/dt, ou seja, a velocidade da redução das diferenças entre o solo controle e o perturbado. Assim, a magnitude de D_0 corresponde ao inverso da resistência do sistema, enquanto D_x indica a resiliência num tempo x qualquer. É possível afirmar então que a

resiliência pode ser dada pela velocidade com que a variável retorna ao padrão de comportamento anterior ao evento que a modificou. Um exemplo pode ser verificado no caso do revolvimento do solo pela aração e gradagem: ocorre a mistura do horizonte superficial com a vegetação e resíduos presentes sobre a superfície do solo. Como resultado, ocorre o aumento da atividade microbiana, que apresentará um clímax e depois poderá resultar em um balanço líquido negativo na matéria orgânica do solo.

Solos antropogênicos, funções do solo e solos construídos

O grau de degradação do solo ou de modificação exercida pela atividade humana é variável conforme a situação e pode ser enquadrado tentativamente em uma classificação simplicada de solos antropogênicos, apresentada a seguir.



A forma como a transformação exercida sobre o perfil do solo, a qual afeta o desempenho de suas funções básicas no ambiente, pode ser avaliada com base na Figura 5. A fase sólida pode passar a não exercer a função de barreira (substrato com pouca capacidade de troca de cátions,

por exemplo, arenoso, ou o complexo sortivo pode estar saturado), a percolação pode passar a ser irregular (por exemplo, fendas) ou o substrato pode estar contaminado por resíduos (isto é, metais). A fase líquida (água do solo), além da composição alterada pela contaminação, pode ter sua quantidade e disponibilidade afetadas pela compactação, aumentando o escorrimento superficial e a erosão. A fase gasosa pode ter a troca gasosa deteriorada pela compactação, prejudicando a respiração radicular e o desenvolvimento microbiano. Como resultado final a biota do solo tende a diminuir a bioprodutividade e ter alterada sua diversidade. Todas essas consequências devem ser levadas em conta, principalmente no caso de solos de mineração, que representam os casos mais extremos de modificação no perfil do solo (solos construídos) e, por conseguinte, nas funções que cada horizonte exerce.

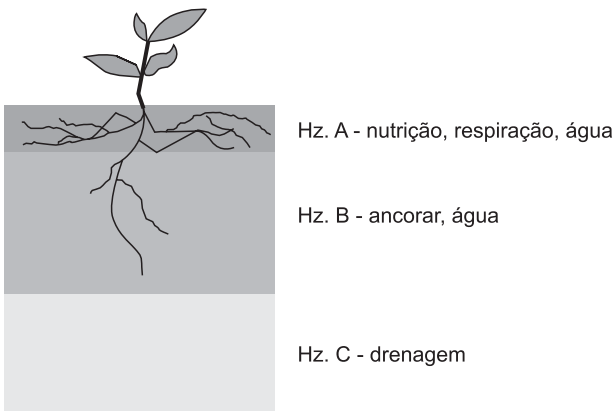


Figura 5. Funções do perfil do solo.

Papel da vegetação na existência e na manutenção da função do solo

A água e o CO_2 são transformadas pelas plantas, com a ajuda da energia luminosa (fotossíntese), em energia química, que é armazenada na

forma de carboidratos (amido, glicose, sacarose...). Com esse processo, as plantas acumulam biomassa, que será adicionada ao solo pelos exudatos produzidos ou por células desprendidas pelas raízes, no caso da planta viva, ou ainda via decomposição após a morte.

O fluxo de matéria orgânica jovem adicionada via resíduos no solo é o motor da agregação (GOLCHIN et al., 1994), processo que influencia outro mecanismo de proteção à decomposição: a proteção física. Por esse mecanismo, a matéria orgânica recém-adicionada fica protegida da decomposição ao ser encapsulada em macroagregados, reduzindo a velocidade da decomposição (Figura 6). Quanto maior o fluxo de MO no solo, tanto maior poderá ser seu grau de agregação e melhor o desempenho de funções que dela dependem, como aeração, drenagem, resistência à penetração de raízes, entre outros (MIELNICZUK et al., 2003).

Em um ecossistema ainda pode-se observar a interação de outros organismos sobre a superfície do solo, tais como lebres, roedores, ruminantes, artrópodes diversos, pássaros, répteis, com a biomassa vegetal e o solo. Uma gramínea cortada, por exemplo, produz mais exudatos que outra não pastejada, assim, adiciona mais C ao sistema, que virá também sob a forma de esterco, que alimentará a cadeia trófica iniciada pelos organismos decompositores, entre eles, anelídeos, coleópteros, colêmbolos, ácaros e microrganismos. Estes últimos transformam matéria orgânica jovem adicionada ao solo em matéria orgânica do solo. Nesse processo de transformação aproximadamente 80% do carbono adicionado ao solo é liberado para a atmosfera como CO_2.

À medida que há fluxo de energia e matéria no sistema, os componentes do solo interagem e se auto-organizam em estados de ordem, de acordo com uma hierarquia de complexidade (Figura 6). Resulta disso que o processo de organização do sistema solo pode ser considerado função da magnitude do fluxo de energia e matéria que passa por ele. O motor da organização do sistema é esse fluxo, ou seja, essa é a forma de manter o sistema afastado do equilíbrio termodinâmico.

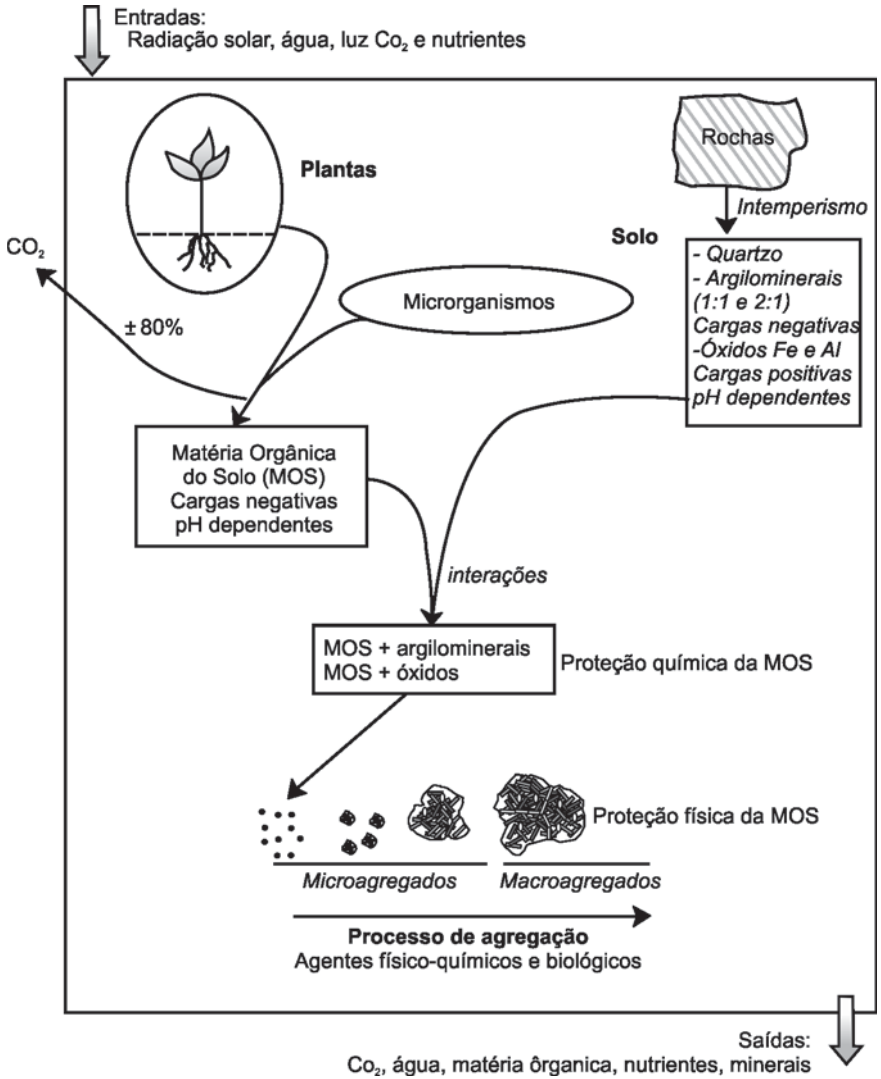


Figura 6. Representação esquemática do sistema solo, seus subsistemas (minerais, plantas, e microrganismos) e a interação entre eles.

Fonte: Mielniczuck et al. (2003).

Regeneração dos solos na área de mineração de carvão de Candiota, RS

Os solos das áreas regeneradas da mina de carvão de Candiota, RS, são solos construídos com perfil composto basicamente por duas camadas, uma superficial, de "terra vegetal", constituída pelo horizonte A, frequentemente misturado com B e C, e uma subsuperficial composta por uma mistura de estéreis (saprolitos e rochas, incluindo carvão, da camada de cobertura acima das camadas exploradas de carvão). De acordo com a teoria termodinâmica já exposta anteriormente os fluxos principais que mantinham o nível de organização do solo natural teriam sido cortados, com alterações previsíveis no que se refere à estrutura física do solo construído em relação ao solo natural, prejudicando a retomada dos referidos fluxos.

A formação e a estabilização de macroagregados no solo são, como já referido anteriormente, dependentes de um alto fluxo de matéria e energia no sistema. Uma comparação do tamanho de agregados estáveis em água entre 9,52 mm–4,76 mm (Figura 7) nos fornece uma ideia de o quanto que o corte no fluxo de matéria e energia está afetando essa propriedade do solo.

Para testar a hipótese de que o solo construído resulta em um solo energeticamente situado muito abaixo do solo natural e que ele, através de fluxos de matéria e energia, pode retornar a uma condição ecologicamente sustentável, foi instalado um experimento a campo em blocos em uma área recém-construída na mina de carvão de Candiota, RS. Estão sendo testados três tipos de gramíneas perenes de verão de crescimento relativamente lento, porém contínuo (pensacola, grama tifton e hemartria) com aportes diferenciados de matéria orgânica: a) sem aporte; b) em consórcio com leguminosa perene de verão (amendoim forrageiro); c) perene de verão com perene de inverno (gramínea - festuca ou leguminosa - lótus); d) perene de verão com leguminosa perene (amendoim forrageiro) com perene de inverno (gramínea - festuca ou leguminosa - lótus). Na instalação do experimento, em razão do crescimento lento das espécies perenes, para garantir

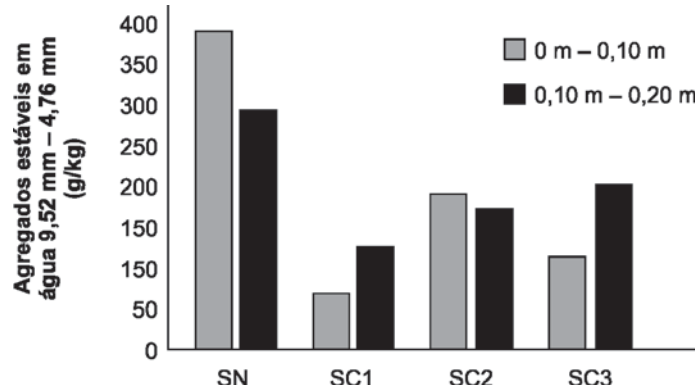


Figura 7. Quantidade de agregados estáveis em água na classe 9,52 mm – 4,76 mm. SN: solo natural; SC1: solo construído com 1 ano de idade; SC2: solo construído com 6 anos de idade; SC3: solo construído utilizado como área experimental (1º ano). SN, SC1 e SC2: média de 40 amostras; SC3: média de 144 amostras.

aporte inicial de matéria orgânica e cobertura visando o controle da erosão, foram colocadas no primeiro ano, no verão e no inverno, gramíneas anuais em todos os tratamentos (capim-sudão e aveia, respectivamente). Estão sendo monitoradas várias propriedades químicas (pH, cátions trocáveis, acidez potencial, matéria orgânica, metais), físicas (densidade, porosidade, estabilidade de agregados, resistência mecânica à penetração) e biológicas (adição de biomassa, carbono e nitrogênio microbianos, evolução de CO_2).

Considerando a entrada de fluxos de matéria e energia no sistema de solos construídos (são sistemas abertos), pode-se esperar três fases ao longo das quais será possível chegar a três resultados (Figura 8). Entre t_o e t_1 os solos estarão em um estágio inicial (primeiro ou primeiros anos), onde as fontes principais de matéria e energia (matéria orgânica e microbiota) se encontram em um estado latente. Entre t_1 e t_2 os fluxos de matéria e energia estarão ativados, de forma diferenciada conforme o tratamento, porém de forma não distinguível do ponto de vista estatístico. De t_2 a t_3 serão percebidas diferenças estatísticas entre os tratamentos, e se poderá chegar a três resultados: a) a degradação irreversível do solo (T3); b) evolução muito

lenta e insuficiente para reativar o ecossistema local (recuperação com o "tempo"); c) reativação dos fluxos de matéria e energia capazes de trazer a "vida" de volta ao local (ecossistema recomposto até um nível aceitável).

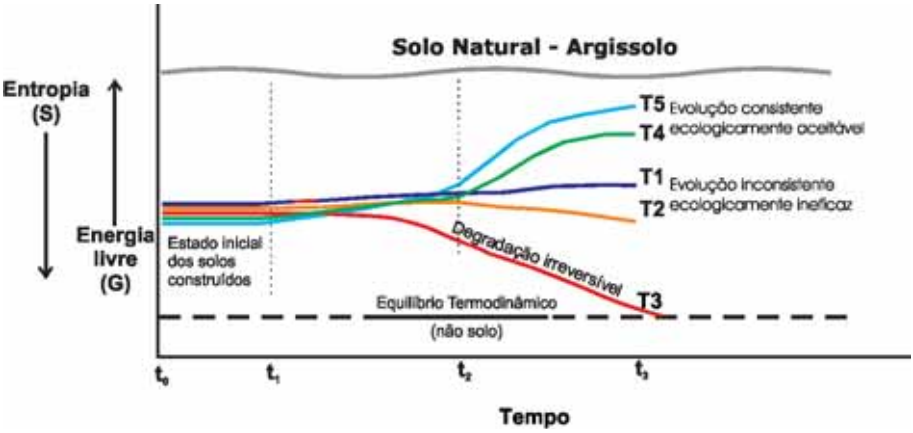


Figura 8. Evolução hipotética de solos construídos, sob diferentes tratamentos (T1 a T5), nas áreas de mineração em relação aos níveis de organização de energia termodinâmica.

Referências

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. New Jersey: P. Hall, 1999. 881 p.

CASTELAN, G. W. **Físico-Química**.10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1984. v. 1, 508 p.

GOLCHIN, A.; OADES, J. M.; SKJEMSTAD, J. O.; CLARK, P. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 32, p. 285-309, 1994.

MIELNICZUCK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F. F.; DEBARBA, L. Manejo dos solos e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio no solo. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ V. V. H. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p. 209-248.

ORWIN, K. H.; WARDLE, D. A. New indices for quantifying the resistence and resilience of soil biota to exogenous disturbances. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 36, p. 1907-1912, 2004.

PILLA, L. **Físico-Química.** Rio de Janeiro: LTC, 1979. 451 p.

PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **A nova aliança**: a metamorfose da ciência. Brasília, DF: Editora da UnB, 1984. 247 p.

SMECK, N. E.; RUNGE, E. C. A.; MACKINTOSH, E. E. Dynamics and Genetic Modelling of Soil Systems. In: SMECK, N. E.; HALL, G. F. **Pedogenis and soil taxonomy**: concepts and interactions. Amsterdam, NL: Elsevier, 1983. p. 51-81.

STROGANOVA, M.; PROKOFIEVA, T. Urban soils classification for Russion cities of the toiga zona. In: MICHELI, E.; NACHTERGAELE, F. O.; JONES, R. J. A.; MONTANARELLA, L. (Ed.). **Soil classification 2001**. Luxembourg: Office for Publications of the European, 2002. p. 153-156. (European Soil Bureau Research Report, 7).

Parte 4

Experiências em projetos de recuperação de áreas degradadas por mineração

Capítulo 1

O processo da Petrobras na recuperação das áreas mineradas para exploração do xisto em São Mateus do Sul, PR

Júlio Skalski Junior

Introdução

A Unidade de Negócio da Industrialização do Xisto, SIX, está localizada em São Mateus do Sul, PR, a 150 quilômetros a sudoeste de Curitiba, em cima de uma das maiores reservas de xisto do mundo: a Formação Irati, com potencial para produção de 700 milhões de barris de óleo, 9 milhões de toneladas de gás liquefeito (GLP), 25 bilhões de metros cúbicos de gás de xisto e 18 milhões de toneladas de enxofre. O xisto betuminoso, tecnicamente denominado folhelho pirobetuminoso, é uma rocha sedimentar que contém querogênio, um complexo orgânico que se decompõe termicamente e produz óleo e gás. A Unidade é considerada uma das mais importantes do mundo na exploração do mineral. Depois de minerado a céu aberto, o xisto é transportado para um britador e em seguida , de forma contínua, conduzido para uma correia até um reator cilíndrico vertical, conhecido como retorta, para ser aquecido a uma temperatura de aproximadamente 500 ºC, sendo extraída matéria orgânica em forma de óleo e gás (Figura 1). Posteriormente, o xisto passa por outra etapa, o resfriamento, que resulta na condensação dos vapores de óleo na forma de gotículas, que são transportadas para fora da retorta pelos gases. Essas gotículas, coletadas, constituem o óleo pesado. (PETROBRAS-SIX, 2005). Depois de retirado o óleo, o xisto retortado é devolvido às cavas onde foi extraído, reconstituindo o relevo original de maneira aproximada e dando início ao processo de recuperação das áreas mineradas.

A capacidade tecnológica adquirida pela SIX, a transforma em uma planta industrial avançada e em um centro de pesquisa na área de refino, que participa em projetos prioritários dos Programas de Tecnologia e Meio Ambiente da Petrobras, em colaboração com o principal centro de pesquisas da empresa (Petrobras – Cenpes). A partir de 2000 a unidade de São Mateus do Sul, PR, promoveu adaptações no processo Petrosix para reciclagem de pneus inservíveis. A técnica foi licenciada pelo órgão ambiental estadual e possibilitou reciclar até 140 mil toneladas de pneus por ano (27 milhões de pneus de automóveis), aumentando a produção de óleo e gás e contribuindo para melhorias no meio ambiente.

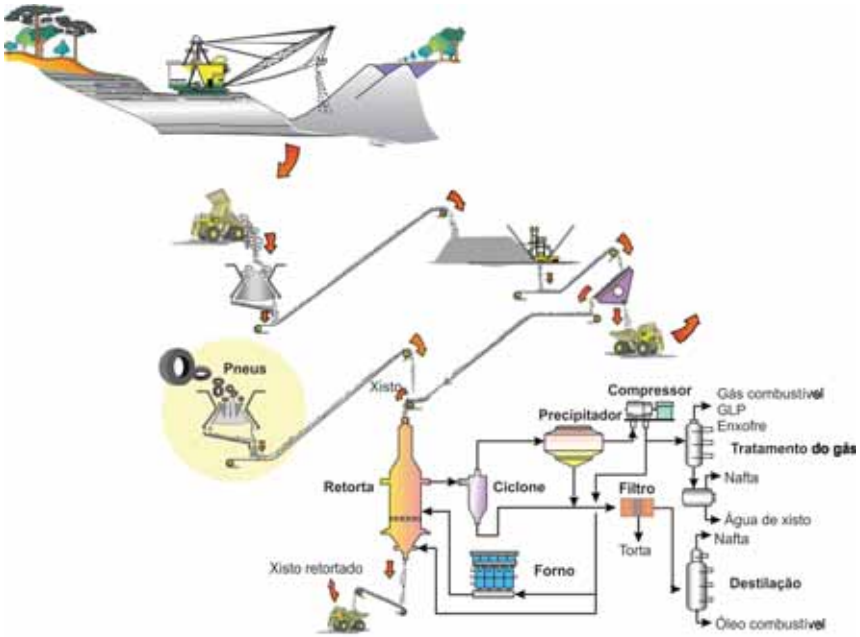


Figura 1. Fluxograma do processo Petrosix.
Fonte: Petrobras-SIX, (2005).

O desenvolvimento da tecnologia de recuperação de áreas mineradas, além do empenho da equipe da Petrobras-SIX, se deve às excelentes parcerias estabelecidas com universidades e instituições de pesquisa do Brasil, destacando-se o Instituto de Pesquisas Florestais da Universidade de São Paulo (USP), o Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, a Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, a Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem, além de pesquisadores que desenvolveram pesquisas acadêmicas sobre o tema.

O xisto e suas potencialidades no Brasil

A primeira extração de óleo de xisto no Brasil aconteceu na Bahia em 1884. Uma usina instalada em São Mateus do Sul, PR, em 1932, por Roberto

Angewitz, chegou a produzir 318 litros de óleo de xisto por dia. O Governo Federal criou a Comissão de Industrialização do Xisto Betuminoso (CIXB) em 1948, visando investigar as potencialidades do xisto cientificamente, assim como também sua viabilidade econômica (PETROBRAS-SIX, 2005).

A exploração do xisto pela Petrobras começou em 1954, no Município de Tremembé, Vale do Paraíba, SP. Três anos depois, em 1957, foram realizados os primeiros testes com o xisto da Formação Irati, extraído da jazida de São Mateus do Sul, PR. Por essa época a Petrobras iniciou a concepção e desenvolvimento do processo de transformação do xisto, que recebeu o nome Petrosix. Hoje, esse processo é reconhecido mundialmente como o mais avançado no aproveitamento industrial do minério, despertando interesse de outros países na aquisição da tecnologia. Em 1959, foi aprovada a construção de uma usina no município paranaense, que começou a operar em 1972. Com a entrada em operação do Módulo Industrial, em dezembro de 1991, concluiu-se a última etapa de consolidação da tecnologia Petrobras de extração do xisto (PETROBRAS-SIX, 2005).

O xisto gera diversos subprodutos e rejeitos que podem ser aproveitados na produção de vidros, cimento, fertilizantes e cerâmicas vermelhas, além de ser ótima matéria-prima na produção de argila expandida, empregada em concretos estruturais e isolantes termoacústicos. A partir de 2004 a Petrobras, em parceria com a Embrapa e outras instituições públicas, criou o projeto "Xisto Agrícola", com o objetivo de desenvolver aplicações dos resíduos da indústria do xisto na fabricação de insumos agrícolas. Isso tem a vantagem adicional de ser um gerador de créditos de carbono, uma vez que o processo pode ser considerado como um mecanismo de desenvolvimento limpo.

A exploração do xisto e o meio ambiente

"Derivados e absoluta ausência de petróleo. Mineração e extensas áreas verdes. Colheita de legumes e fornecimento de energia para indústria. Há

algum tempo, tudo isso poderia parecer inconciliável", mencionava a Petrobras (UMA PEDRA... 1994) anunciando os cuidados sobre o meio ambiente que a unidade de São Mateus do Sul, PR, destinava ao seu processo.

O impacto ambiental causado para a extração do xisto do subsolo, assim como qualquer outra atividade minerária a céu aberto, deve ser rigorosamente mitigado e corrigido. Nesse sentido, desde o início de suas atividades, mesmo sem exigências legais na época, a SIX se preocupou em desenvolver técnicas para a recuperação das áreas mineradas. Até outubro de 2005, somavam-se 488 hectares de áreas em processo de recuperação, isto é, 73% de um total de 667 hectares minerados.

O programa de recuperação de áreas da SIX é permanente e integra a linha operacional da mineração. Os resultados alcançados demonstram que, mesmo tratando-se de recursos naturais não renováveis, é possível harmonizar mineração e meio ambiente. As escavações chegam a atingir 40 metros de profundidade, mas, para cada metro quadrado explorado, o solo é reconstituído, podendo, então, ser utilizado para o plantio de florestas nativas com incorporação da fauna , desenvolvimento de agricultura ou de pecuária ou de outro uso.

Em 1988 foi promulgada a nova Constituição Brasileira (BRASIL, 1988), destacando-se o artigo 225 sobre o Meio Ambiente e especialmente o seu parágrafo 2º: "Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei". De certo modo, foram coroados os esforços que a SIX vinha desenvolvendo, há mais de uma década, na gestão ambiental das suas atividades de mineração.

Histórico do processo de recuperação das áreas mineradas

Em 1972, as leis ambientais brasileiras não previam obrigações para quem explorasse recursos minerais a fim de recuperar o ambiente alterado.

Por sua vez, também não estavam disponíveis, em termos nacionais, tecnologias para a recuperação de ambientes degradados. As experiências internacionais serviam apenas como referências, pois as medidas necessárias para o tratamento de cada sítio afetado, sejam de localização em latitude ao norte ou ao sul do Equador, devem se adequar ao ambiente natural onde ocorre o impacto, sendo necessário aprimorar uma metodologia por meio do conhecimento do ecossistema local. Essa carência reiterava-se para os recursos humanos especializados, seja pela ausência de cursos específicos ou pelo conteúdo ineficaz dos currículos no relativo às ciências ambientais.

Exceto por ecos distantes, originados por ocasião da 1ª Conferência Mundial de Meio Ambiente da ONU, realizada em 1972 na Suécia, eram raras as manifestações e pressões organizadas da sociedade relativas à conservação ambiental, mesmo porque, naquele momento, o País vivia o auge do período de exceção ditatorial conduzido pelo governo militar.

Ao mesmo tempo, o governo do Paraná, um estado então eminentemente agrícola, via com os melhores olhos a possibilidade de implantação de uma unidade da Petrobras em seu território; era a oportunidade para impulsionar o progresso em uma região economicamente estagnada, sustentada por uma agricultura incipiente e atividades extrativistas advindas da floresta de araucária, como a industrialização da erva-mate e a já decadente exploração madeireira.

Nesse ambiente institucional (cultura, tradições, educação, normas e aparato legal) e organizacional (governo, instituições de pesquisas, universidades), a Petrobras tomou a iniciativa de buscar soluções para os impactos ambientais que a mineração do xisto poderia causar. As primeiras ponderações sobre o assunto podem ser verificadas em correspondências da época, por exemplo, o chefe do antigo Setor de Engenharia Geral da Petrobras manifestou sua preocupação "com os inconvenientes causados pela exploração do xisto, no que tange à poluição ambiental que ocasiona" (RIGHESSO, 1974); ao que, o então chefe da Divisão Técnica da SIX complementou dizendo que:

> [...] tratava-se de assunto muito discutido atualmente e considerado nos Estados Unidos como o maior obstáculo à industrialização do xisto em escala industrial e que nas atividades de mineração constantes do Plano Trienal do Xisto estava prevista a execução do programa de estudos sobre recuperação dos solos minerados. (RIBEIRO, 1974, p. 1).

Assim, depreende-se que já em 1971, antes da inauguração da SIX, se considerava na estrutura da empresa a componente ambiental da mineração do xisto. Coube ao Grupo Executivo para o Aproveitamento de Terras (GEAT), com sede em Salvador, BA, a busca de soluções para o problema da recuperação ambiental. Como esse grupo não tinha tradição em questões ambientais, procurou formalizar os contatos que a SIX vinha mantendo com a Universidade Federal do Paraná por intermédio do Banco de Desenvolvimento do Paraná (Badep), representante do governo paranaense na implantação da usina.

O GEAT foi o responsável pela gestão de contratos e deu início aos estudos de recuperação por meio do Instituto de Estudos Florestais (Ipef), da Escola Superior de Agronomia Luiz Queiroz (Esalq), da Universidade de São Paulo, localizado em Piracicaba, SP. A partir do início dos anos de 1980 o GEAT deixou de intermediar os trabalhos de recuperação, e as atividades passaram a ser conduzidas diretamente pela Petrobras-SIX, mantendo a parceria com o Ipef-Esalq.

O processo de recuperação de áreas mineradas

O processo de recuperação de áreas da SIX começou em 1976, por meio de estudos laboratoriais desenvolvidos pelo Ipef-Esalq, a partir de amostras de solo e substratos gerados no processo da mineração do xisto. As atividades em São Mateus do Sul, PR, iniciaram em 1977, com a instalação do primeiro experimento de plantios de espécies florestais exóticas (*Pinus taeda* e *Eucalyptus viminalis)* e da nativa bracatinga (*Mimosa scabrella)*. Em 1979 foram implantados dois canteiros experimentais de maneira sequencial. Até a metade da década de 1980 os trabalhos consistiram no

acompanhamento e aprimoramento dos experimentos iniciais. O convênio com o Ipef perdurou até 1990, quando foi entregue o último relatório anual de atividades.

Esses experimentos, no decorrer de 14 anos, possibilitaram estabelecer parâmetros básicos, relativos à espessura das camadas de substrato a serem dispostas sobre o xisto retortado, que permanecem válidos até hoje na recuperação das áreas mineradas (PORTO ALEGRE, 1994). Outros aspectos desenvolvidos na época referem-se à deposição de folhelho e a ciclagem de minerais, que vieram a ocorrer no solo sob os plantios experimentais. A preocupação em estabelecer uma metodologia criteriosa na condução e coleta de informações dos experimentos permitiu que outros estudos tivessem uma continuidade ao longo do tempo, fornecendo outras informações nos mesmos canteiros experimentais.

Em 1987 a SIX contratou a Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem (SPVS), para a realização de levantamentos fitossociológicos, fenológicos, ciclagem de minerais e faunísticos em uma área remanescente de floresta ombrófila mista (floresta de araucárias), a cerca de 10 km da mineração. Assim, foi desenvolvido um estudo multidisciplinar envolvendo a macrofauna e a flora de São Mateus do Sul, PR, incluindo considerações sobre a criação de animais silvestres, levantamentos fitossociológicos, reflorestamento com espécies nativas, metodologias de implantação de viveiros e educação ambiental (BORGES, 1988).

Ainda naquele ano, foi inaugurado o "criadouro científico de animais silvestres", licenciado pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (Ibama). Suas instalações ocupavam uma área de aproximadamente 10 hectares e abrigavam diversos recintos para recepção, reprodução, observação e avaliação comportamental de espécies nativas, com potencial para serem reintroduzidas nas áreas recuperadas, onde a vegetação já possibilitava condições de abrigo e alimentação natural. Além das instalações dos recintos, o criadouro possuía também um depósito para preparo de alimentos, sala de educação ambiental e uma clínica veterinária, com capacidade para pequenas cirurgias.

Do elenco das espécies selecionadas podem ser destacadas: a capivara (*Hydrochaeris hydrochaeris)*, a paca (*Agouti paca*), a cutia (*Dasyprocta agouti),* o ratão-do-banhado (*Myocastor coypus*), o pato selvagem (*Cairina moschata*), jacutinga (*Penelope obscura*), marrecas ananaí e irerê. (*Amazonetta brasiliensis* e *Dendrocygna viduata*). Todas as espécies selecionadas que geraram descendentes foram soltas nas áreas recuperadas, até alcançar a capacidade de sustentação. A partir de então, o manejo de fauna passou a ser efetuado diretamente no campo com a presença permanente de tratador e supervisão de médico veterinário, como acontece nos dias atuais.

O "Relatório Anual de Fauna" é encaminhado ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (Ibama), como condição legal, sendo relatada a situação dos espécimes de macrofauna. A partir de 1991, a entrada em operação do Módulo Industrial triplicou o avanço da área de lavra em relação à Usina Protótipo. Essa situação obrigou a adoção de práticas operacionais que tornassem as atividades de recuperação compatíveis com o novo ritmo de lavra, evitando-se a formação de passivos para recuperação posterior.

Em 1993 foi elaborada a primeira versão do Manual de Revegetação de Áreas Mineradas da SIX, que integra as práticas mais eficientes dos experimentos pretéritos e incorpora novos procedimentos, encontrando-se atualmente na segunda versão revisada (PORTO ALEGRE; SKALSKI, 1999). A metodologia de revegetação passou a ser orientada pelos princípios da sucessão ecológica, em que a primeira fase constitui-se na proteção imediata do solo, com o plantio direto por sementes da pioneira florestal bracatinga (*Mimosa scabrella*), em malha regular métrica (1 m x 1 m). Entre outras diretrizes, se estabeleceram a produção e plantio de mudas florestais nativas com base nas quantidades de espécies e de indivíduos por hectare, considerando os resultados dos levantamentos fitossociológicos da SPVS. A metodologia da sucessão ecológica adotada aproveita a versatilidade da bracatinga *Mimosa scabrella*, da família das leguminosas, verdadeiro "guarda-chuva ecológico", que viabiliza os plantios das mudas produzidas no viveiro florestal, fornecendo sequência ecológica às secundárias iniciais, tardias e clímax.

O Manual de Revegetação preconiza, ainda, que as coletas de sementes para a produção das mudas devem respeitar os princípios do *tamanho efetivo da população*, que é fundamentado na genética das populações para a conservação de germoplasma. O respeito ao tamanho efetivo da população possibilita que as mudas produzidas e gestadas no viveiro transmitam para as gerações futuras o patrimônio genético das populações originais onde foram coletadas, por meio de controle estatístico.

O cuidado generalizado na reposição da camada superficial do solo também é um aprimoramento da época. Quando o solo é removido das frentes de lavra e transportado imediatamente para as áreas em recuperação topográfica, há significativos ganhos em função da disponibilidade de um banco de sementes e da intensa atividade biológica, condições que se perdem quando o solo vegetal é estocado antes do uso. O estoque de solo, além de não ser recomendado, representa custos adicionais, uma vez que vai requerer nova operação de carregamento e transporte até a aplicação final.

O procedimento operacional para remoção e reconstituição de solo da SIX (SIX PE-4X-0006) estabelece o procedimento a saber:

- O solo deverá apresentar dois horizontes distintos: solo superficial e subsolo, composto por argila de capeamento ou materiais estéreis como siltito e calcário.
- A espessura de argila proveniente do capeamento será de no mínimo 1,20 m em áreas onde tenha sido disposto xisto retortado.
- A camada de argila deverá ser regularizada com trator de esteira para então receber a cobertura de solo.
- A espessura de solo sobre a camada de argila será de 0,50 m.
- A disposição de solo e argila deverá ser realizada com o mínimo de tráfego de equipamentos sobre os mesmos, utilizando preferencialmente caminhões basculantes pequenos (até 12 m^3), depositando-se uma carga ao lado da outra.

- Após o espalhamento do solo, devem ser distribuídas aleatoriamente cargas de tocos e raízes, com o objetivo de formação de abrigos para animais.
- Após a disposição e espalhamento da camada subsuperficial (argila), deve ser verificada a compactação, por meio de penetrômetro, que deve apresentar uma densidade aparente menor de 1,4 g/cm^3 a 1,6 g/cm^3. Valores acima indicam a necessidade de subsolagem com *ripper*, em curvas de nível, em sulcos com 0,50 m de profundidade.

Na Figura 2 são comparados os perfis do solo antes da mineração e após a reconstituição topográfica, conforme os padrões estabelecidos pela SIX.

A partir de 1993, a SIX contratou uma equipe exclusiva para conduzir, em regime permanente, os trabalhos de coleta de sementes, produção de mudas, plantios e manejo de fauna, com a orientação e supervisão de um engenheiro e um técnico florestal. Nessa data, também foi inaugurado o novo viveiro florestal, com capacidade de produção de 180.000 mudas por ano, incluindo no mínimo 100 espécies nativas.

Fotos: J. Skalski Jr.

Figura 2. À esquerda, o perfil de solo natural, antes da mineração. À direita, o perfil de solo após a reconstituição topográfica, observando-se, a partir do alto, o início do restabelecimento da cobertura vegetal, o horizonte de solo vegetal, a camada de argila e o xisto retortado como o material escuro.

Na época foi iniciada a distribuição de colmeias de abelhas (*Apis melífera*) nas áreas revegetadas (Figura 3). O objetivo não foi a produção de mel, mas, sim, os ganhos obtidos pelo auxílio na polinização, acelerando a regeneração natural da vegetação. O Instituto de Tecnologia do Paraná (Tecpar) e a UFPR comprovaram que o mel produzido nas áreas em recuperação não apresentou qualquer alteração, sendo de boa qualidade (UMA... 1994). A própria permanência e produção das abelhas representam um ótimo indicador que realça a maneira como o processo de recuperação foi conduzido.

A mineração modifica o ambiente, perturbando seu equilíbrio natural, onde a condição inicial não é prontamente restabelecida pelo processo de

Foto: J. Skalski Jr.

Figura 3. Colmeia de abelhas (*Apis melífera*) nas áreas em processo de recuperação da Petrobras-SIX.

recuperação. A condição de desequilíbrio é extremamente favorável para a instalação de pragas florestais, como formigas cortadeiras e outros insetos que degradam madeira. Na tentativa de minimizar esses efeitos, a partir de 1996 a SIX desenvolveu um trabalho de monitoramento e controle de insetos causadores de danos, como as formigas cortadeiras (*Acromyrmex*) e os besouros (*Scolytidae)* por intermédio do Laboratório de Proteção Florestal da UFPR *(*MARQUES et al., 1998). Oficialmente o trabalho foi realizado por meio de convênio com a Fundação da Universidade Federal do Paraná, posteriormente ampliado, passou a ser chamado de "Projeto cooperativo para monitoramento e controle de insetos causadores de danos em áreas de recuperação da SIX". O estudo procurou buscar alternativas de controle biológico, por meio do uso de extratos vegetais.

Atividades agrossilvopastoris

Em 1987 foi implantado o projeto-piloto "Módulo de Produção Agropecuária", em convênio com a UFPR, o qual foi desenvolvido durante dez anos e no seu auge chegou a ocupar uma área de 15 hectares. Seus principais objetivos foram (PORTO ALEGRE et. al., 1994):

- Demonstrar a reabilitação física, química e biológica das áreas degradadas pela mineração do xisto.
- Demonstrar a viabilidade da utilização econômica das áreas de solo alterado para fins agropastoris.
- Conscientizar os pecuaristas da região sobre a necessidade de produção de pastagens e aprimoramento dos rebanhos para aumento da produtividade e, consequentemente, dos lucros.

Nesse contexto foram desenvolvidas dissertações na UFPR, como no caso de Luchesi (1988), que analisou a implantação de culturas forrageiras em solos degradados pela mineração de xisto e recomendou a realização de experimentos em maior escala, e no caso de, que deu continuidade aos estudos (Figura 4).

Os estudos comprovaram a possibilidade de recuperação dos terrenos minerados para o desenvolvimento de áreas de pastagens para produção de leite, sendo levantados dados direcionados à implantação de propriedades rurais autossustentáveis, em futuros reassentamentos das famílias de agricultores com suas propriedades atingidas pelo avanço da frente de mineração (PORTO ALEGRE et al.,1994).

Segundo PORTO ALEGRE, 1997, seriam necessários quatro anos para que as produções médias efetivas da região fossem capazes de suportar economicamente uma família. Assim, a área mínima necessária para uma propriedade sustentar uma família típica, ficaria em torno de 30 hectares, respeitando uma distribuição do uso do solo conforme apresentada na Tabela 1. Atualmente, as atividades experimentais da opção agrossilvopastoril na área recuperada encontram-se encerradas.

Construção de lagos

A última cava deixada pelo processo de mineração constitui um desafio adicional para o processo de recuperação, pois normalmente não há a disponibilidade de material para a reconstituição topográfica, uma vez que o material original foi retirado no início do processo de mineração,

Fotos: J. Skalski Jr.

Figura 4. Experimento agrossilvopastoril implantado nas áreas em processo de recuperação após a mineração do xisto.

Tabela 1. Distribuição do uso do solo para uma propriedade a ser implantada em áreas recuperadas após a mineração do xisto e suportar economicamente uma família média local.

Uso	Área (ha)
Reserva florestal legal	6,00
Culturas anuais consorciadas com erva-mate	9,00
Reflorestamento para fins energéticos com erva-mate	3,00
Pastagens perenes	10,00
Construções, pomar, horta	2,00
Área Total da propriedade	30,00

Fonte: Porto Alegre et al. (1994).

anos antes. Portanto, é necessário encontrar uma solução que atenda às exigências legais de fechamento e abandono de mina e mantenha uma coerência topográfica e vegetal com as áreas adjacentes.

Dentre os exemplos de situações enfrentadas pela SIX, pode-se destacar o tratamento dado a última cava da antiga mina do Cachoeira, exaurida no final da década de 1980. O local conhecido como Lago Sul foi preparado para ser um lago com lâmina d'água de oito hectares. Correções topográficas em suas margens permitiram respeitar os princípios básicos da cadeia alimentar: margens rasas possibilitam o estabelecimento de vegetação aquática que é alimento de peixes herbívoros, que por sua vez são alimentos de peixes carnívoros estabelecidos em águas mais profundas. O nome Lago Sul deve-se ao fato de que a área está localizada no setor sul da antiga mina do Cachoeira.

No caso do Lago Sul, a colonização inicial da ictiofauna ocorreu pela ação de aves aquáticas, atraídas pela disponibilidade de água e proteção do local. Essas aves migraram de regiões próximas, como as margens do Rio Iguaçu, a cerca de 4 km, e involuntariamente transportaram ovas de peixes acidentalmente fixadas às penas. Ao pousar nas águas do Lago Sul, essas ovas se desprendiam. Uma vez que as águas do lago em formação apresentavam condições mínimas para o estabelecimento de vida, as ovas acabavam eclodindo e gerando alevinos que vieram a colonizar o lago.

O sucesso da implantação do Lago Sul e de suas áreas marginais despertou o interesse em tornar a área num Parque Ecológico, demonstrando, mais uma vez, que é possível harmonizar a atividade de mineração com o meio ambiente. Assim as áreas, que um dia foram úteis fornecendo recursos minerais, óleo e gás, podem retornar à comunidade, por exemplo, mediante uma área de lazer ou prestando serviços ambientais de conservação dos recursos vegetais, faunísticos, de amenização climática, etc. Para essa área há um planejamento de longo prazo, prevendo-se a implantação de um Museu da Vida e da Terra, destinado a atender visitas técnicas e de educação ambiental, atuar como campus de pesquisas ambientais ou, simplesmente, tornar-se uma opção de lazer para a comunidade.

Baseado no aprendizado do Lago Sul, atualmente encontra-se em formação o Lago Cachoeira, na última cava da mina do Paiol Grande, encerrada em 2000. O nome deve-se a o antigo córrego Cachoeira que passava pelo local, onde hoje corre justamente por dentro da cava. Esse novo lago possui uma lâmina d'água de nove hectares e já se encontra formado, restando ainda a correção das suas margens, boa parte já tomada pela vegetação.

Monitoramento da recuperação de áreas mineradas

As atividades de recuperação não podem ser consideradas como um resultado acabado. A SIX monitora as entradas e as saídas das águas superficiais que escoam pelos terrenos de sua propriedade, bem como das águas subterrâneas. Para isso está implantada uma rede de poços e pontos permanentes de coleta, distribuídos por toda a extensão das áreas mineradas e recuperadas. Os resultados desses monitoramentos são encaminhados mensalmente ao órgão ambiental estadual. Também é monitorado e medido o desempenho do processo de recuperação das áreas, por meio do "Índice de Recuperação de Áreas Mineradas" (IRAM) (SIX PE-4X-00038-D):

$$IRAM = \frac{\text{Área recuperada}}{\text{Área impactada - Área operacional}}$$

em que:

Área recuperada = acumulado em metros quadrados da área topograficamente regularizada que recebeu e teve espalhada a última camada de solo.

Área impactada = acumulado em metros quadrados da área impactada pelo processo de lavra.

Área operacional = área minerada e não passível de recuperação naquele momento, pois está sendo ocupada por instalações de infraestrutura (oficinas, acessos, redes elétricas e depósitos e a cava onde ocorrem as atividades de extração de minério).

As metas desse indicador são negociadas no processo de avaliação anual da Unidade em conjunto com a Direção do Abastecimento e Refino (Tabela 2). Em novembro de 2009, a SIX apresentava os seguintes números: Área impactada = 801 hectares; Área recuperada = 591 hectares; Área operacional = 169 hectares. Isso representou um IRAM de 94,4%.

Tabela 2. Evolução temporal do IRAM 1994–2009.

Ano	Realizado (%)
1994	89
1995	91
1996	99
1997	99
1998	93
1999	95
2000	96
2001	95

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Ano	Realizado (%)
2002	95
2003	95
2004	87
2005	90
2006	92
2007	93
2008	94
2009	95

Linha do tempo do processo de recuperação de áreas da SIX

De forma resumida, a evolução do processo de recuperação das áreas mineradas pelo xisto apresenta quatro estágios distintos (PORTO ALEGRE et al., 1994) (Figura 5):

1º Estágio: Enfoque para a implantação rápida de cobertura vegetal. Período das atividades desenvolvidas com o Instituto de Pesquisas Florestais (Ipef), entre 1976 e 1989.

2º Estágio: Enfoque na preservação da fauna e flora nativas. Período caracterizado pela preocupação com o restabelecimento do ecossistema original, buscando-se informações nas matas nativas da região. Nesse período o destaque fica por conta dos trabalhos desenvolvidos pela Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem (SPVS).

3º Estágio: Enfoque na reutilização dos terrenos, com o retorno do homem às áreas mineradas. O período caracterizou-se por estudos que buscavam informações para possibilitar o reassentamento de pequenos proprietários a serem atingidos pelo avanço da lavra. Naquela época, efetuou-se amplo mapeamento de uso e aptidão dos solos da região de São Mateus do Sul, PR. Nesse período, também tiveram início a implantação

Figura 5. Estágios da evolução do processo de recuperação das áreas mineradas pelo xisto.

de canteiros experimentais e o desenvolvimento de estudos em convênio com a UFPR.

4º Estágio: Enfoque no aperfeiçoamento das técnicas e consolidação do conhecimento. Corresponde ao refinamento dos trabalhos desenvolvidos ao longo dos anos, destacando-se:

- O enriquecimento das áreas reflorestadas com espécies nativas de fases avançadas da sucessão ecológica.
- Coleta de sementes para produção de mudas florestais com base no Tamanho Efetivo da População.

- Introdução de colmeias de *Apis melifera*, dispersas pelas áreas recuperadas.
- Início da reintrodução da fauna nativa, obtida por reproduções em cativeiro das instalações do criadouro científico Arca-de-Noé.
- Estudos e levantamentos do desenvolvimento da cobertura vegetal reintroduzida ao longo dos últimos anos, como o trabalho voluntário da Embrapa (MASCHIO et al., 1992).

Desafios

A continuidade operacional da unidade de São Mateus do Sul, PR, depende da reserva de xisto. Conforme os padrões aceitos internacionalmente, as reservas médias permitirão manter a exploração do xisto nos níveis atuais por mais 300 anos. A aceitação pela sociedade da mineração do xisto e suas derivações, bem como a de qualquer outro empreendimento do setor mineral, requer crescentes cuidados com relação ao meio ambiente, com destaque para a recuperação das áreas degradadas. Nessa linha, o destino social das áreas terá relevância. Deve-se destacar que se trata de um processo complexo, no qual interagem múltiplos fatores e participam diversos componentes sociais, o que exige inovações que na prática demandam anos para provar sua viabilidade como opção sustentável.

Outro desafio da Petrobras-SIX será o direcionamento das famílias de agricultores a serem removidas pelo avança da lavra. Restrições ao acesso de áreas com florestas nativas, perda de qualidade dos solos agrícolas, valorização de áreas agrícolas em virtude de boas perspectivas do agronegócio, em especial soja, entre outros, tendem a forçar alternativas cada vez mais viáveis para recuperação de áreas degradadas.

O refinamento das técnicas já testadas no passado e a definição de área mínima para a fixação e manutenção sustentada de famílias de agricultores da região constituem metas a serem alcançadas.

A implantação de lagos, em áreas mineradas, quando bem planejados e construídos, respeitando-se os princípios da cadeia alimentar, acaba tornando-se enclaves adequados para o desenvolvimento de fauna silvestre, além de trazer benefícios adicionais para a sociedade (áreas de pesquisa, parques). A pesquisa de técnicas para que esses lagos sejam "bem planejados e construídos" é um desafio contínuo, em função do caráter singular do ambiente local em cada situação.

Conclusão

Ao longo de mais de três décadas de atividades de recuperação de áreas, a SIX demonstrou que é possível harmonizar mineração com respeito ao meio ambiente, bastando "querer fazer e apenas começar".

Para as empresas será cada vez mais difícil manter no mercado um produto obtido ao custo de elevados impactos ao meio ambiente. Ademais, aqueles que efetivamente incorporarem o componente ambiental, além de agregarem valor aos seus produtos, estarão sempre à frente de seus concorrentes, garantindo ou atraindo novos consumidores, além de participar de maneira efetiva na construção de um mundo ambientalmente sustentável.

A implantação de áreas florestais, sobre terrenos minerados, será sempre uma alternativa de benefício para a sociedade, seja por uso direto ou indireto: manutenção de espécies vegetais ameaçadas de extinção; manutenção de fauna silvestre; conservação do solo; sequestro de carbono ou áreas de lazer. Esta última atividade representa notório ganho ambiental quando comparada com o tratamento padrão das práticas convencionais, o qual se restringe à cobertura com pequena camada de solo vegetal, suficiente apenas para sustentar a introdução de gramíneas e, eventualmente, outras espécies rasteiras.

A Petrobras entende que em um cenário cada vez mais competitivo, a imagem da empresa está relacionada à conscientização de seus empregados de que o aprimoramento da qualidade, a minimização de impactos ao meio ambiente e a segurança do homem e do patrimônio são fatores decisivos para o aumento da produtividade. Por isso, a Companhia dedica igual atenção ao seu desenvolvimento tecnológico e aos aspectos de proteção ao meio ambiente. (PETROBRÁS-SIX, 2005).

Referências

BORGES, C. R. S. **Recuperação de áreas alteradas pela exploração do xisto, com flora e fauna nativas, em São Mateus do Sul – PR.** Curitiba: Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental, 1988. 5 v.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado, 1988.

LUCHESI, L. A. C. **Influência de sucessões de culturas forrageiras e adubações sobre a recuperação de algumas características de um solo degradado pela mineração do xisto e sobre a sua mesofauna edáfica (*Acari e Collembola*).** 1988. 252 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.

MARQUES, E. N.; SOUSA, N. J.; CORREA, R. M.; OTTO, G. M.; BITTENCOURT, S. A. **Monitoramento e controle de insetos causadores de danos, em áreas de recuperação da Petrobras-SIX, no município de São Mateus do Sul, PR**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1998. 39 p.

MASCHIO, L.; GAIAD, S.; MONTOYA, L.; CURCIO, G. R.; RACHWALL, M. F. G.; CAMARGO, C. M. S.; BATTI, A. M. B. Microrganismos e auto-sustentação de ecossistemas em solos alterados. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1992, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 1992. p. 440-445.

PETROBRAS-SIX. **A Petrobras.** Disponível em: <http://www2.PETROBRAS.com.br/portal/PETROBRAS.htm>. Acesso em: 11 ago. 2005.

PORTO ALEGRE, H. K. Evolução das pesquisas em reabilitação de área degradadas na mineração do xisto no Brasil. In: SIMPÓSIO SUL AMERICANO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1., 1994, Foz do Iguaçu. **Anais...** Curitiba: FUPEF-PR, 1994. p.135-139.

PORTO ALEGRE, H. K.; RONCONI, E. G, MORAES A.; MOTTA NETO J. A. **Relatório de atividades do módulo de produção agropecuária**: período julho 1992 a junho de 1993. São Mateus do Sul: Petrobras-SIX. 1994. 32 p.

PORTO ALEGRE, H. K. P. **Alternativas para destinação futura dos terrenos da SIX**. São Mateus do Sul: Petrobras-SIX, 1997. 10 p.

PORTO ALEGRE, H. K. P; SKALSKI J. JÚNIOR. **Manual de revegetação de áreas mineradas e manejo de fauna silvestre**. São Mateus do Sul: Petrobras-SIX/Gemin, 1999. 26 p.

RIBEIRO, C. A. S. **Poluição ambiental**. São Mateus do Sul: Petrobras-SIX, 1974. 2 p. (Comunicação interna 52/74, 26 abr. 1974).

RIGHESSO, J. E. **Teste de reflorestamento sobre o xisto da represa**. Rio de Janeiro: Petrobras, 1974. 2 p. (Comunicação Interna 26/74, 22 abr. 1974.).

UMA PEDRA também preciosa. **Revista Petrobras**, Rio de Janeiro, n. 7, p. 1-6, 1994.

Parte 4

Experiências em projetos de recuperação de áreas degradadas por mineração

Capítulo 2

Reabilitação de áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto no sul de Santa Catarina

Vanilde Citadini-Zanette
Marcos Back
Robson dos Santos

Introdução

O modelo de exploração dos recursos naturais vegetais, minerais e hídricos estabelecidos a partir de 1950, no período do pós-guerra, que permitiu todo tipo de agressão ambiental, hoje é abertamente questionado e se mostra danoso e superado para a realidade do Brasil do século 21 (LEITÃO FILHO; AZEVEDO, 1989). O estágio atual foi consequência do sacrifício de grande parte das reservas vegetais e de fauna associada.

As últimas décadas têm marcado etapas decisivas para a preservação do meio ambiente no Brasil. Tal preocupação derivou na exigência dos órgãos governamentais, nas esferas federal, estadual e municipal, de projetos de recuperação das áreas degradadas por mineração, sendo assim intensificados os estudos no âmbito acadêmico e tecnológico.

A recuperação de áreas degradadas é uma atividade relativamente recente no Brasil e que envolve, em geral, processos de altos custos e longa duração. A pesquisa e sua divulgação são elementos estratégicos no processo de recuperação ambiental, considerando os altos custos da reabilitação de áreas degradadas (ABNT, 1999; RODRIGUES; GANDOLFI, 2000) e a difícil função de recuperar o solo e sua fertilidade.

A região sul do Estado de Santa Catarina é caracterizada como região carbonífera e sua economia, durante muito tempo, foi baseada na extração do carvão (CITADINI-ZANETTE, 1999; DE LUCA; GASTALDON, 1999). Na região, essa atividade iniciou em fins do século 19, tendo sido impulsionada pelas duas guerras mundiais e a crise do petróleo na década de setenta, quando o carvão foi considerado uma alternativa energética de grande potencialidade (MÜLLER et al., 1987; ALEXANDRE, 1999).

A extração do carvão mineral resulta na produção de dois tipos de resíduos: a) estéreis da mineração a céu aberto, constituído pela mistura de arenitos, siltitos e folhelhos carbonosos e piritosos; b) rejeito do beneficiamento do carvão, constituído principalmente pela pirita (FeS_2).

A atividade carbonífera utiliza o solo para deposição de seus resíduos e os recursos hídricos, para o lançamento de efluentes. A mineração do carvão no sul de Santa Catarina, tanto no sistema a céu aberto como no de galerias subterrâneas, ignorou, desde sua trajetória inicial, a capacidade de suporte do ambiente e teve como maior preocupação o retorno econômico imediato.

Os resíduos da extração do carvão foram sendo acumulados em vales e/ou próximos à mina ou do local de beneficiamento do carvão. Os depósitos de rejeitos expostos no ambiente ocupam hoje aproximadamente 40% das áreas degradadas pela mineração de carvão (ZANCAN; GOMES, 2004), que, somados às áreas não recuperadas e ocupadas pelos estéreis da mineração e pelas lagoas ácidas oriundas da drenagem superficial, contabilizam uma perda aproximada de 6.000 hectares de áreas necessárias à expansão econômica da região, além de produzirem poluentes, comprometendo a qualidade de vida da população e o equilíbrio dos ecossistemas existentes.

Pelo processo de degradação gerado à região sul de Santa Catarina, foi reconhecida publicamente pelo Governo Federal como a 14ª Área Crítica Nacional, para efeitos de poluição (Decreto Federal nº 85.206, de 25 de setembro de 1980). Desde então muitos esforços têm sido empreendidos para amenizar a situação na região carbonífera.

Ações para recuperar áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto

O marco inicial para recuperação em áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto no sul do Estado de Santa Catarina foi a implementação do projeto "Recuperação Piloto de Áreas Mineradas a Céu Aberto", conhecido regionalmente como Projeto M (SANTA CATARINA, 1982). Essa foi a primeira tentativa planejada e sistematizada em recuperar áreas de mineração a céu aberto na região carbonífera catarinense (CITADINI-ZANETTE, 1999).

O Projeto M foi conduzido pela Fundação do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (Fatma), que contratou a empresa Engenheiros, Consultores e Projetistas (ECP) do Rio de Janeiro, para a elaboração e execução de projetos, visando à recuperação ambiental da região carbonífera. Esse projeto foi implementado no início de 1982, na localidade de Alto Rio Fiorita, Município de Siderópolis, Santa Catarina (28º34' S e 49º24'W, altitude de 160 m), em uma área experimental de 11,384 hectares, selecionada por ser o primeiro contato do Rio Fiorita com a mineração de carvão (SANTA CATARINA, 1982).

De acordo com Santa Catarina (1982) os procedimentos para a recuperação constaram de:

1. Remodelagem da superfície por meio de terraplenagem.
2. Aplicação de cobertura com argila, de aproximadamente 20 cm de espessura.
3. Plantio de 12 espécies arbóreas em três blocos experimentais de 7,2 hectares cada um, sendo cada bloco dividido em 12 macroparcelas de 600 m^2 e, em cada uma destas, testada uma espécie arbórea (cada macroparcela foi dividida em seis parcelas de 100 m^2, com diferentes tratamentos de adubação) (Tabela 1).
4. Plantio de cinco espécies herbáceas em toda a área pela técnica de hidrossemeadura (Tabela 1).
5. Plantio de gramíneas (sete espécies), leguminosas (14 espécies) e plantas ornamentais (23 espécies) em canteiros experimentais (Tabela 2).

Boff et al., (2000) avaliaram qualitativa e quantitativamente a vegetação arbórea introduzida nos três blocos experimentais do Projeto M, medindo todos os indivíduos remanescentes dos blocos após 17 anos de plantio e avaliando o desenvolvimento das espécies com maior número de sobreviventes.

Das 12 espécies arbóreas introduzidas nos três blocos experimentais, quatro espécies desapareceram: *Hovenia dulcis* Thunb. (uva-do-Japão), *Bastardiopsis densiflora* (Hook.et Arn.) Hassl. (louro-branco), *Schizolobium parahyba* (Vell) Blake. (guapuruvu), *Melia azedarach* L. (cinamomo), sendo consequentemente não recomendadas para recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão.

Grevillea hilliana Fr. Muell. (grevílea) e *Syzigium cumini* (L.) Skeels (jambolão), por não apresentarem bom desenvolvimento na área, não foram indicadas pelos autores para recuperar áreas degradadas pela mineração de carvão.

Tabela 1. Relação das espécies vegetais introduzidas na área do Projeto M, na localidade de Alto Rio Fiorita, Município de Siderópolis, SC.

Família	Espécie	Nome popular
Bloco Experimental		
Fabaceae	*Mimosa scabrella* Benth.	Bracatinga
	Schizolobium parahyba (Vell.) Blake	Guapuruvu
Malvaceae	*Bastardiopsis densiflora* (Hook. et Arn.) Hass	Louro-branco
Meliaceae	*Melia azedarach* L.	Cinamomo
Myrtaceae	*Syzygium cumini* (L.) Skeels	Jambolão
	Eucalyptus saligna Smith	Eucalipto-saligna
	Eucalyptus viminalis Labill	Eucalipto-viminalis
	Eucalyptus citriodora Hook	Eucalipto-citriodora
Pinaceae	*Pinus elliottii* Engelm.	Pinus-elioti
	Pinus taeda L.	Pinus-teda
Proteaceae	*Grevillea hilliana* F.Muell.	Grevílea
Rhamnaceae	*Hovenia dulcis* Thunb.	Uva-do-japão
Hidrossemeadura		
Fabaceae	*Trifolium repens* L.	Trevo-branco
Poaceae	*Lolium multiflorum* Lam.	Azevém-anual
	Melinis minutiflora Beauv.	Capim-gordura
	Paspalum notatum Fluegge	Pensacola
	Festuca arundinacea Schreber	Festuca

Fonte: Santa Catarina (1982). Para as famílias seguiu-se o sistema de classificação baseado na APG II (2003).

Tabela 2. Relação das espécies vegetais utilizadas nos canteiros experimentais na área do Projeto M, Siderópolis, SC.

Família	Espécie	Nome popular
Canteiro Experimental de Gramíneas		
Poaceae	*Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickerdt	Capim-agulha
	Hemarthria altissima (Poir.) Stapf & Hubbard	Hemartria
	Hyparrhenia rufa (Nees) Stapf	Capim-jaraguá
	Pennisetum purpureum Schumacher	Capim-elefante
	Setaria anceps Stapf ex Massey	Kazangula
	Setaria splendida Stapf	Setaria
Canteiro Experimental de Leguminosas		
Fabaceae	*Cajanus cajan* (L.) Huth.	Guandu
	Calopogonio mucunoides Desv.	Calopogônio
	Canavalia ensiformis (L.) DC.	Feijão-de-porco
	Centrosema macranthum Hoehne	Centrosema
	Centrosema pubescens Benth.	Jetirana
	Crotalaria paulina Schrank	Manduvira-grande
	Desmanthus depressus Humb. & Bonpl. ex Willd	Desmanto
	Desmodium adscendens (Sw.) DC.	Pega-pega
	Galactia striata Urb.	Galaxia
	Leucena leucocephala (Lam.) de Wit	Leucena
	Mimosa pudica L.	Sensitiva
	Neotonia wightii (Grahan ex Arnold) Lackey	Neotonia
	Stizolobium aterrimum Piper & Tracy	Mucuna-preta
	Stylosanthes guyanensis (Aubl.) Sw.	Estilosante
	Espécie Ornamental	
Bignoniaceae	*Jacaranda mimosifolia* D. Don	Jacarandá-mimoso
	Tabebuia chrysotricha (Mart. ex DC.) Standley	Ipê-amarelo
Euphorbiaceae	*Euphorbia cotinifolia* L.	Euforbia
Fabaceae	*Acacia longifolia* Willd.	Acácia-trinervis
	Caesalpinia ferrea Mart. ex Tul.	Pau-ferro
	Caesalpinia peltophoroides Benth.	Sibipiruna
	Delonix regia Boger	Flamboiant
	Enterolobium contortisiliquum (Vell.) Morong.	Timbaúva
	Piptadenia rigida Benth.	Angico

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Família	Espécie	Nome popular
Fabaceae	*Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake	Guapuruvu
	Senna multijuga (Rich.) H.S.Irwin & Barneby	Pau-cigarra
	Tipuana tipu (Benth.) 0.K.	Tipuana
Malvaceae	*Chorisia speciosa* St.Hil.	Paineira
Meliaceae	*Melia azedarach* L.	Cinamomo
Moraceae	*Ficus elastica* Roxb.	Falsa-seringueira
Myrtaceae	*Eugenia involucrata* DC.	Cerejeira
	Eugenia uniflora L.	Pitangueira
Oleaceae	*Ligustrum vulgare* L.	Ligustro
Proteaceae	*Grevillea robusta* A.Cun.	Grevílea
Rhamnaceae	*Colubrina glandulosa* Perkins	Sobraji
Rosaceae	*Eriobotrya japonica* Ldl.	Nespereira
Salicaceae	*Salix babylonica* L.	Chorão
Verbenaceae	*Cytharexyllum myrianthum* Cham.	Tarumã-branco

Fonte: Santa Catarina (1982). Para as famílias seguiu-se o sistema de classificação baseado na APG II (2003).

Do total de 5.400 indivíduos introduzidos, 3.600 sobreviveram, incluindo os com rebrotes. *Eucalyptus saligna* Smith, *E. viminalis* Labill, *E. citriodora* Hook, *Pinus elliottii* Engel e *P. taeda* L. obtiveram as maiores taxas de sobrevivência. Dessas espécies *Eucalypus citriodora* obteve a maior taxa de sobrevivência (57,8%), seguido por *E. saligna* (47,6%); a menor taxa foi obtida por *Pinus elliottii* (13,3%). As avaliações de altura, diâmetro dos caules e volume dessas cinco plantas são apresentadas nas Tabelas 3 a 7.

Tabela 3. Avaliação de altura (H), diâmetro à altura do peito (DAP) e volume (V) de *Eucalyptus saligna* introduzidos nos Blocos Experimentais do Projeto M, Siderópolis, SC, nov./1998.

Parâmetro	Número de indivíduos	Soma	Média	Desvio médio	Variância	Desvio padrão
H (m)	100	2.207,0	22,07	8,5	71,61	8,5
DAP (cm)	100	2.300,0	23,0	11,0	120,6	11,0
V (m^3)	100	60,50	0,605	0,5125	0,4357	0,6634

Fonte: Boff et al. (2000).

Tabela 4. Avaliação de altura (H), diâmetro à altura do peito (DAP) e volume (V) de *Eucalyptus viminalis* introduzidos nos Blocos Experimentais do Projeto M, Siderópolis, SC, nov./1998.

Parâmetro	Número de indivíduos	Soma	Média	Desvio médio	Variância	Desvio padrão
H (m)	69	887,34	12,86	5,27	40,20	6,39
DAP (cm)	69	1.331,7	19,2	10,6	168,7	13,1
V (m³)	69	23,2337	0,3373	0,3543	0,2298	0,4829

Fonte: Boff et al. (2000).

Tabela 5. Avaliação de altura (H), diâmetro à altura do peito (DAP) e volume (V) de *Eucalyptus citriodora* introduzidos nos Blocos Experimentais do Projeto M, Siderópolis, SC, nov./1998.

Parâmetro	Número de indivíduos	Soma	Média	Desvio médio	Variância	Desvio padrão
H (m)	149	2623,89	17,61	6,37	55,66	6,37
DAP (cm)	149	2.369,1	15,9	7,3	77,6	7,3
V (m³)	149	41,1538	0,2762	0,2736	0,1371	0,2736

Fonte: Boff et al. (2000).

Tabela 6. Avaliação de altura (H), diâmetro à altura do peito (DAP) e volume (V) de *Pinus elliottii* introduzidos nos Blocos Experimentais do Projeto M, Siderópolis, SC, nov./1998.

Parâmetro	Número de indivíduos	Soma	Média	Desvio médio	Variância	Desvio padrão
H (m)	56	994,0	17,75	2,46	8,97	3,02
DAP (cm)	56	1.132,8	23,8	6,2	61,9	7,9
V (m³)	56	24,5392	0,4382	0,2453	0,1014	0,3213

Fonte: Boff et al. (2000).

Tabela 7. Avaliação de altura (H), diâmetro à altura do peito (DAP) e volume (V) de *Pinus taeda* introduzidos nos Blocos Experimentais do Projeto M, Siderópolis, SC, nov./1998.

Parâmetro	Número de indivíduos	Soma	Média	Desvio médio	Variância	Desvio padrão
H (m)	102	1.860,48	18,24	3,67	19,40	4,43
DAP (cm)	102	2.386,8	23,4	5,8	50,8	7,2
V (m³)	102	45,9306	0,4503	0,2547	0,0982	0,3150

Fonte: Boff et al. (2000).

Segundo Boff et al. (2000), das três espécies de eucaliptos, *Eucalyptus saligna* e *E. citriodora* apresentaram melhor desenvolvimento, o que as recomendam para utilização em reflorestamentos de áreas degradadas pela mineração a céu aberto, visando transformá-las em áreas produtivas. *E. viminalis* apresentou baixo desenvolvimento e muitos indivíduos adultos apresentavam-se com partes secas na copa, indicando que a espécie não é tolerante às deficiências e contaminação do solo.

Pinus elliottii e *P. taeda*, pelas condições precárias do solo, não apresentaram todo seu potencial de desenvolvimento naquela área, porém, pelo seu desenvolvimento e aspecto geral dos indivíduos remanescentes, podem ser indicadas para cultivo em áreas de lavra de carvão a céu aberto.

Boff et al. (2000) relatam ainda que das espécies nativas a única sobrevivente foi *Mimosa scabrella* Benth. (bracatinga), muito embora com somente doze indivíduos (2,7%). Por encontrar-se em fase senil, essa espécie proveu o substrato com serapilheira e sementes, necessárias para a sua manutenção na área, além de ter favorecido o início da sucessão ecológica secundária sob suas copas. Concluem que sob critérios ecológicos *M. scabrella* foi a espécie que melhor alcançou o objetivo inicialmente proposto, ou seja, recuperação/reabilitação ambiental.

O estabelecimento de um sub-bosque expressivo depende das espécies do estrato dominante, ou do seu manejo. Espécies de leguminosas fixadoras de nitrogênio e pioneiras, como a bracatinga, são facilitadoras

típicas, criando condições de microclima favoráveis para espécies arbóreas tolerantes ao sombreamento (BAGGIO et al., 1995; CARPANEZZI, 1997).

Uma listagem preliminar das espécies presentes no sub-bosque da bracatinga, com indicação de suas categorias de sucessão, síndromes de polinização e de dispersão, é apresentada por Citadini-Zanette (2000), em que se observa a influência dos remanescentes florestais de entorno (Floresta Ombrófila Densa Submontana) em sua composição florística, após 17 anos de implementação do projeto M (Tabela 8).

Das 18 espécies arbustivo-arbóreas visualmente predominantes, 9 são pioneiras (50,0%), 4 são secundárias iniciais (22,2%) e 5 são secundárias tardias ou climácicas (27,8%). Quanto às síndromes de polinização e de dispersão, 2 (11,1%) são anemófilas e anemocóricas e 16 (88,9%) são zoófilas e zoocóricas quanto à polinização e dispersão respectivamente, mostrando a importância dos animais no processo de sucessão ecológica secundária e de reprodução em ambientes alterados.

A importância da fauna para a manutenção e preservação de florestas secundárias, como fonte de propágulos que auxiliarão no processo de resiliência de áreas degradadas, é demonstrada por Citadini-Zanette (1995). Das 118 espécies arbóreas levantadas em um hectare de Floresta Ombrófila Densa em Orleans, no sul do Estado de Santa Catarina, 106 (89,8%) possuem síndrome de dispersão zoocórica, indicando a relevância da interação fauna e flora. Reis et al. (1996) e Reis e Kageyama (2003) corroboram a importância às interações planta-animal na recuperação/restauração de áreas degradadas.

A partir de 2002, com fomento da Diretoria de Pesquisas da Unesc para Bolsas de Iniciação Científica e o início do Mestrado em Ciências Ambientais na Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), vários trabalhos e dissertações têm direcionado para esse tema. Assim, estudos mais aprofundados nos blocos experimentais com bracatinga do Projeto M foram realizados por Remor (2004), onde se apresenta uma listagem mais completa das espécies regenerantes, aspectos do solo construído

Tabela 8. Relação das espécies arbustivo-arbóreas presentes no sub-bosque de bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.), introduzida no Projeto M em Siderópolis, Santa Catarina, com indicação de suas Categorias Sucessionais (P = Pioneira; Si = Secundária inicial; St = Secundária tardia), Síndromes de Polinização (A = anemófila; Z = Zoófila) e de Dispersão (An = Anemocórica; Zo = Zoocórica).

Família / espécie	Nome popular	Cat. Suc.	Po-lin.	Disper.
ARECACEAE				
Euterpe edulis Mart.	Palmiteiro	St	Z	Zo
BURSERACEAE				
Protium kleinii Cuatr.	Almésca, almécega	St	Z	Zo
CANNABACEAE				
Trema micrantha (L.) Blume	Grandiúva	P	Z	Zo
EUPHORBIACEAE				
Alchornea triplinervia (Spreng.) Müll.Arg.	Tanheiro	P	Z	Zo
FABACEAE				
Piptadenia gonoacantha (Mart.) Macbr.	Pau-jacaré	P	Z	An
LAURACEAE				
Nectandra oppositifolia Nees	Canela ferrugem	St	Z	Zo
Ocotea puberula (Rich.) Nees	Canela	St	Z	Zo
MELASTOMATACEAE				
Leandra dasytricha (A.Gnay) Cogn.	Pixirica	Si	Z	An
Miconia cabucu Hoehne	Cabuçu	P	Z	Zo
MELIACEAE				
Cabralea canjerana (Vell.) Mart.	Canjerana	St	Z	Zo
MYRSINACEAE				
Myrsine coriacea (Sw.) R.B.	Capororoca	P	A	Zo
Myrsine umbellata (Mart. ex A.DC.) Mel.	Capororoca-vermelha	P	A	Zo
MYRTACEAE				
Myrcia splendens (Sw.) DC.	Cambuí	P	Z	Zo
PHYLLANTHACEAE				
Hieronyma alchorneoides Fr.Allem.	Licurana	Si	Z	Zo
SALICACEAE				
Casearia sylvestris Swartz	Chá-de-bugre	Si	Z	Zo

Continua...

Tabela 8. Continuação.

Família / espécie	Nome popular	Cat. Suc.	Po-lin.	Disper.
SOLANACEAE				
Solanum mauritianum Scop.	Fumo-bravo	P	Z	Zo
URTICACEAE				
Cecropia glaziovii Sneth.	Embauba	P	Z	Zo
VERBENACEAE				
Aegiphila sellowiana Cham.	Gaioleiro	Si	Z	Zo

Fonte: Citadini-Zanette (2000). Para as famílias seguiu-se o sistema de classificação baseado na APG II (2003).

(KAMPF et al., 1997) e de um remanescente florestal preservado próximo à área, assim como potencialidades de uso das espécies encontradas para arborização urbana no Município de Siderópolis.

Estudos florísticos, fitossociológicos e aspectos da dinâmica em remanescentes florestais no entorno de áreas degradadas pela mineração, bem como sobre pilhas de estéreis de mineração de carvão a céu aberto, foram realizados por Pfadenhauer e Winkler (1978), Citadini-Zanette (1982), Citadini-Zanette e Boff (1992), Citadini-Zanette et al. (2002), Santos (2003), Martins et al. (2004), Santos et al. (2004) e Martins (2005). Zoucas (2002), baseado na Flora Ilustrada Catarinense[1], relaciona 981 espécies encontradas na região sul de Santa Catarina que poderão subsidiar projetos de recuperação de áreas degradadas na região carbonífera.

Como aplicação desses resultados, o Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas (Ipat) da Unesc vem prestando consultorias na área ambiental que inclui recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão.

Ações nesse sentido se concretizam por meio da elaboração de projetos de reabilitação integrados do solo, água, vegetação e fauna, incluindo planos de reabilitação de áreas degradadas (PRAD) e de

[1] Publicação seriada do Herbário Barbosa Rodrigues (Itajaí, SC) iniciada em 1964.

monitoramento da área reabilitada, em atendimento às exigências formuladas pela Fatma, visando obter a Licença Ambiental.

Fazem parte dos objetivos do Ipat para reabilitação de áreas degradadas: apresentar plano de reconfiguração topográfica; definir áreas de corte aterro, mantendo as áreas naturalmente revegetadas; mapear áreas de ocorrência de fontes de poluição; definir locais e obras civis de fixação das margens dos corpos d'água; quantificar e definir épocas de aplicação de insumos para reabilitação do solo; apresentar metodologias e lista de espécies vegetais específicas para reintrodução nas áreas reabilitadas; propor medidas corretivas que venham a acelerar o retorno da fauna à área; apresentar plano de monitoramento ambiental no período total de 60 meses; criar banco de dados que possam auxiliar as tomadas de decisão para futuros projetos de reabilitação ambiental.

Os diagnósticos ambientais prévios à execução dos projetos realizados em áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto na região sul de Santa Catarina revelam características próprias para as condições abióticas e bióticas do ecossistema a ser reabilitado, como descrito abaixo:

Solos: baixa fertilidade; altos teores de alumínio trocável e acidez; baixa capacidade de retenção de água.

Geologia: mergulho das camadas em direção SW; ocorrência de arenitos piritosos na fração de estéreis; presença de pilhas de rejeito na beira das estradas, nas margens de rios e de lagoas.

Fauna: os grupos faunísticos mais impactados são os peixes e os crustáceos; presença de mamíferos na área; avifauna bem representada (observadas em poleiros artificiais).

Vegetação: cobertura vegetal alterada com predominância de eucaliptos; pequenas áreas com regeneração natural; identificação de espécies de diferentes grupos ecológicos: pioneiras e secundárias. Os levantamentos fitossociológicos na região devem ser realizados em remanescentes em diferentes estádios sucessionais.

Águas superficiais: deterioração da qualidade de montante para jusante; lagos com luz, oxigênio e nutrientes suficientes para estabelecimento de espécies.

Lençol freático: águas impróprias para o consumo humano, entretanto, com características melhores que outras áreas de carvão (UNESC, 2002); presença frequente de rejeitos de quadração.

De posse dessas informações, pode-se decidir quais procedimentos são mais adequados para reabilitar a área degradada. Sendo sugerido como Plano de Reabilitação lato sensu:

- Divisão do campo para fins de reabilitação: áreas planas ou com pilhas de estéreis para serem remodeladas; áreas naturalmente regeneradas; áreas de encosta; etc.
- Retirada dos rejeitos piritosos.
- Remodelagem do terreno, incluindo retaludamento das margens do Rio Fiorita, construção de nova estrada e instalação de canaletas de drenagens.
- Incorporação de calcário em pó aos estéreis.
- Recobrimento dos estéreis com uma camada de 20 cm de argila.
- Recobrimento dos estéreis piritosos com uma camada de 50 cm de argila.
- Incorporação do calcário, adubos orgânicos e químicos ao solo argiloso e recobrimento com turfa.
- Reintrodução de vegetação herbácea e lenhosa, por meio de semeadura e mudas (Ilhas de Diversidade, segundo KAGEYAMA et al., 2003).
- Tratamento das lagoas ácidas com adição de calcário em pedra.
- Implantação de Plano de Monitoramento.

Poder-se-ia questionar o uso de uma camada de 20 cm ou de 50 cm de solo argiloso, sem compactação, sobre os estéreis da mineração. No entanto, não existe um trabalho conclusivo a respeito da espessura da camada de argila. Algumas recomendações sugerem a presença de camadas compactadas de argila e camadas de areia ou brita para facilitar a drenagem subsuperficial. O Ipat tem entendido que camadas compactadas de argila apenas dificultam o desenvolvimento vegetativo. A presença de camadas de areia ou brita em subsuperfície promove ao longo do tempo erosão subsuperficial. Nas áreas com presença de estéreis piritosos tem-se utilizado 50 cm de camada de argila para redução dos teores de oxigênio, impedindo reações oxidativas das concreções piritosas. Nas áreas sem presença de arenitos piritosos tem-se executado camadas de 20 centímetros de argila.

O recobrimento dos estéreis com calcário, além de reduzir a acidez, torna indisponíveis metais pesados e permite reproduzir as condições naturais de troca de umidade com a atmosfera, além do que a argila tem função de suporte para a vegetação, permitindo o seu desenvolvimento. Um desenho esquemático da introdução de espécies vegetais em áreas remodeladas é apresentado na Figura 1. A distribuição das espécies em "ilhas de diversidade" é apresentada na Figura 2.

Após a execução do projeto, põe-se em prática o Plano de Monitoramento, que objetiva gerar dados técnico-científicos a curto, médio e longo prazo, permitindo avaliar a evolução da qualidade ambiental e geração de um banco de dados, conforme especificado abaixo:

- Avaliar parâmetros físicos, químicos e biológicos nos ambientes aquáticos.
- Acompanhar o desenvolvimento das comunidades vegetais.
- Monitorar a qualidade física e química do solo.
- Verificar a possível ocorrência de processos erosivos.
- Acompanhar o retorno da fauna nas áreas reabilitadas.
- Monitorar a qualidade das águas subterrâneas.

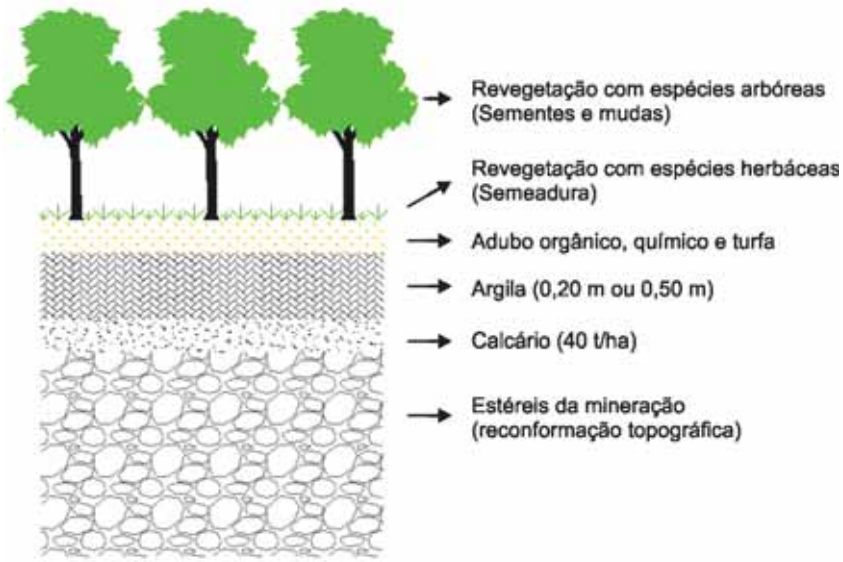


Figura 1. Disposição das camadas remodeladas para introdução da vegetação arbórea.
Fonte: adaptado de Unesc (2002).

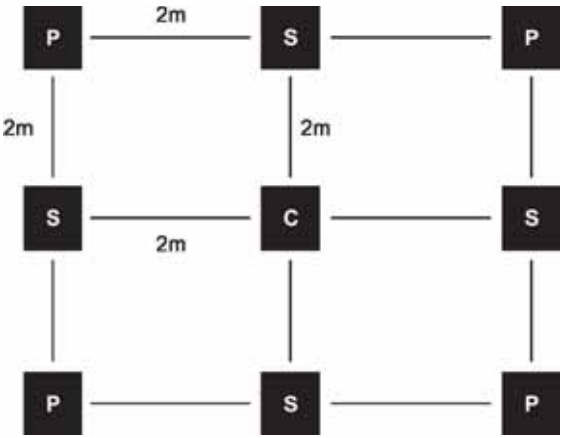


Figura 2. Distribuição das espécies arbóreas em Ilhas de Diversidade para reabilitação de áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto no sul de Santa Catarina, onde P= pioneira; SI= Secundária Inicial; ST= Secundária Tardia e C= Clímax.
Fonte: adaptado de UNESC (2002).

- Avaliar a efetividade dos projetos de reabilitação propostos.
- Constituir banco de dados.

Três etapas principais devem integrar todo plano de reabilitação ambiental bem-sucedido:

a) qualidade e execução do projeto

b) monitoramento das medidas introduzidas

c) definição do uso futuro da área.

Após a recuperação, as áreas têm diferentes destinações, de acordo com o método de recuperação utilizado. O Ipat recomenda o uso das áreas para preservação, tentando aproximar o novo ambiente do que era originalmente, introduzindo grupos de espécies nativas dos ecossistemas do entorno da área degradada, como etapa inicial do processo.

No entanto, a falta de interação mais efetiva entre os órgãos promotores de projetos de recuperação ambiental e as comunidades diretamente influenciadas tem resultado, em muitos casos, no uso inadequado das áreas após a recuperação. Assim, locais que foram destinados ao lazer ou a preservação ambiental por motivos técnicos terminam sendo invadidos por comunidades de baixa renda nas proximidades dos centros urbanos ou são utilizados para a agricultura ou pecuária no meio rural, derivando em possíveis riscos de contaminação por metais pesados dos vegetais ou animais envolvidos e, em consequência, dos produtos associados (carne, grãos, leite). Estudos sobre migração de metais pesados nas plantas, para a região carbonífera sul-catarinense, estão sendo viabilizados (COSTA et al., 2007).

Considerações finais

Por exigência legal e social, as áreas degradadas precisam ser recuperadas. A maior parte das áreas degradadas pela mineração de carvão em Santa Catarina é de particulares e, do ponto de vista legal, a responsabilidade de recuperação é da empresa mineradora. Diante da necessidade

de equacionar a problemática apresentada, foram iniciados na década de 80 diversos projetos de recuperação ambiental envolvendo instituições governamentais nas esferas federal, estadual e municipal, assim como também as universidades locais.

No entanto, a maioria desses projetos não teve qualquer tipo de monitoramento após o encerramento das atividades de recuperação. Um dos poucos que contou com acompanhamento, em virtude de interesses acadêmicos, foi o Projeto M, que trouxe informações relevantes para a comunidade científica. Esse projeto mostrou que é possível recuperar uma área degradada pela mineração de carvão a céu aberto com finalidades ecológicas, desde que o homem auxilie inicialmente o processo. Como se desconhece a composição florística exata das florestas primitivas, procura-se reestabelecer um ecossistema em equilíbrio, sem utilização de espécies alóctones, de maneira que, em determinado momento, a própria natureza tome conta do processo, sendo recuperada a paisagem regional.

Mimosa scabrella (bracatinga) mostrou-se promissora para uso em áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto, pois, além de ser fixadora de nitrogênio, melhorando a fertilidade do solo, atrai visitantes florais pela oferta de néctar e pólen (HARTER-MARQUES; ENGELS, 2003). A bracatinga também é utilizada para lenha (CARVALHO, 1994), podendo ser introduzida e manejada como fonte de renda.

Estudos experimentais sobre crescimento e desenvolvimento das espécies ainda são necessários na região carbonífera. A geração de conhecimentos que implementem ações para reabilitar as áreas degradadas no sul do Estado de Santa Catarina contribuirá para a execução de projetos que atendam às reivindicações da comunidade na solução dos problemas ambientais decorrentes da extração do carvão mineral.

Referências

ABNT. **NBR 13030**: elaboração e apresentação de projeto de reabilitação de ecossistemas degradados pela mineração. Rio de Janeiro, 1999. 5 p.

ALEXANDRE, N. Z. Diagnóstico ambiental da região carbonífera de Santa Catarina: degradação dos recursos naturais. **Revista Tecnologia Ambiente**, Criciúma, v. 5, n. 2, p. 35-50, 1999.

APG II. The Angiosperm Phylogeny Group. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the ordens and families of flowering plants: APG II. **Botanical Journal of the Linnean Society**, London, UK, n. 141, p. 399-436, 2003.

BAGGIO, A. J.; CARPANEZZI, A. A.; CARVALHO, P. E. R.; SOARES, A. O. Levantamento de espécies lenhosas em sub-bosques de bracatingas. **Boletim de Pesquisa Florestal,** Colombo, n. 30/31, p. 69-74, 1995.

BOFF, V. P.; CITADINI-ZANETTE, V.; SANTOS, R. dos. Avaliação das espécies arbóreas do projeto M: recuperação piloto de áreas mineradas a céu aberto, Siderópolis, Santa Catarina, Brasil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 4., 2000, Blumenau. **Anais…** Blumenau: FURB, 2000. 1 CD-ROM.

CARPANEZZI, A. A. **Banco de sementes e deposição de folhedo e seus nutrientes em povoamentos de bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) na região metropolitana de Curitiba.** 1997. 177 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Departamento de Biologia Vegetal, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras**: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira. Colombo: Embrapa CNPF, 1994. 640 p.

CITADINI-ZANETTE, V. Diagnóstico ambiental da região carbonífera no sul de Santa Catarina: recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão. **Revista Tecnologia e Ambiente**, Criciúma, v. 5, n. 2, p. 51-61, 1999.

CITADINI-ZANETTE, V. **Florística, fitossociologia e aspectos da dinâmica de um remanescente de Mata Atlântica na microbacia do rio Novo, Orleans, SC**. 1995. 236 f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos,1995.

CITADINI-ZANETTE, V. **Levantamento florístico da área de recuperação da mineração a céu aberto em Siderópolis, Santa Catarina, Brasil**. Florianópolis : FATMA, 1982. 22 p.

CITADINI-ZANETTE, V. Recuperação de Áreas Degradadas na Região Carbonífera de Santa Catarina: aspectos sucessionais e interações interespecíficas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 4., 2000, Blumenau. **Anais...** Blumenau: FURB, 2000. 1 CD-ROM.

CITADINI-ZANETTE, V.; BOFF, V. P. **Levantamento florístico em áreas mineradas a céu aberto na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil**. Florianópolis: Secretaria de Estado da Tecnologia. Energia e Meio Ambiente, 1992. 160 p.

CITADINI-ZANETTE, V.; SANTOS, R.; KLEIN, A.S.; MARTINS, R.; REMOR, R. Composição florística e estrutura fitossociológica do componente arbustivo-arbóreo de um remanescente de Floresta Ombrófila Densa. In: SIMPOSIO NACIONAL SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 5., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Sobrade, 2002. p. 117-118.

COSTA, S.; ZOCCHE, J. J.; ZOCCHE DE SOUZA, P. Absorção de metais pesados (Zn e Pb) por Axonopus obtusífolius (Raddi) Chase em áreas degradadas pela mineração de carvão, SC, Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, p. 765-797, 2007.

DE LUCA, F. J.; GASTALDON, M. C. Desenvolvimento sustentável e a recuperação das áreas degradadas abandonadas pela mineração do carvão na região Sul do estado de Santa Catarina. **Revista Tecnologia Ambiente**, Criciúma, v. 5, n. 2, p. 19-33, 1999.

HARTER-MARQUES, M. B.; ENGELS, W. A produção de sementes de *Mimosa scabrella* (MIMOSACEAE) planalto das araucárias, RS, Brasil, depende da polinização por abelhas sem ferrão. **Boletim do Instituto de Biociências**, Porto Alegre, v. 11, n. 1, p. 9-16, 2003.

KAGEYAMA, P. Y.; GANDARA, F. B.; OLIVEIRA, R. E. Biodiversidade e restauração da floresta tropical. In: KAGEYAMA, P. Y.; OLIVEIRA, R. E.; MORAES, L. F. D. M.; ENGEL, V. L.; GANDARA, F. B. (Org.) **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: Fepaf 2003. p. 28- 48.

KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E. Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na bacia carbonífera do Baixo Jacuí (RS). **Revista Brasileira de Solo**, Campinas, v. 21, p. 79-88, 1997.

LEITÃO FILHO, H. F.; AZEVEDO, D. B. **Critérios gerais para implantação de um parque ecológico**. Campinas: Unicamp, 1989. 55 p.

MARTINS, R. **Florística, estrutura fitossociológica e interações interespecíficas de um remanescente de floresta ombrófila densa como subsídio para recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão, Siderópolis, SC.** 2005. 94 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MARTINS, R.; CITADINI-ZANETTE, V.; SANTOS, R.; KLEIN, A. S.; REMOR, R. Subsídios para recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão: composição florística, aspectos sucessionais e interação fauna-flora. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 10., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ENTMME, 2004. p. 673-680.

MÜLLER, A. A.; SANTOS, H. M.; SCHMITT, J. C. C.; MACIEL, L. A. C.; BERTOL, M.; CÉSAR, S. B. **Perfil analítico do carvão**. Porto Alegre: DNPM, 1987, 140 p. (DNPM. Boletim, 6).

PFADENHAUER, J. S.; WINKLER, S. **Estudos sobre a problemática ecopaisagística das áreas de deposição de rejeitos de mineração:** relatório final. Porto Alegre: FATMA-UFRGS, 1978. p. 241-269.

REIS, A.; KAGEYAMA, P.Y Restauração de áreas degradadas utilizando interações interespecíficas. In: KAGEYAMA, P.Y.; OLIVEIRA, R. E.; MORAES, L. F. D. M.; ENGEL, V. L..; GANDARA, F. B. (Org.) **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: Fepaf, 2003. p. 91-110.

REIS, A.; NAKAZONO, E. M.; MATOS, J. Z. Utilização da sucessão e das interações planta-animal na recuperação de áreas florestais degradadas.. In: CURSO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 3., 1996, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Unesc, 1996. p. 29-44.

REMOR, R. **Regeneração natural em blocos experimentais de Mimosa scabrella Benth. (Bracatinga)**: subsídios para recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto no sul do estado de Santa Catarina, Brasil. 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2004.

RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. Conceitos, tendências e ações para a recuperação de florestas ciliares. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO-FILHO, H. F. (Ed.). **Matas ciliares**: conservação e recuperação. São Paulo: Edusp: Fapesp. 2000. p. 235-247.

SANTA CATARINA. **Programa de conservação e recuperação ambiental da região sul de Santa Catarina:** recuperação piloto de áreas mineradas a céu aberto. Relatório final. Siderópolis: Governo do Estado de Santa Catarina, 1982. 242 p.

SANTOS, R. **Reabilitação de ecossistemas degradados pela mineração de carvão a céu aberto em Santa Catarina, Brasil**. 2003. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SANTOS, R.; CITADINI-ZANETTE, V.; KLEIN, A. S.; MARTINS, R.; REMOR, R.; LEAL FILHO, L. S. Composição florística e estrutura fitossociológica de um fragmento de Floresta Ombrófila Densa, como subsídio para reabilitação de ecossistemas degradados, região carbonífera catarinense. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 10., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Unesc, 2004. v. 1, p. 663-671.

UNESC. **Diagnóstico ambiental campo malha II leste, Siderópolis**. Criciúma: Unesc-Ipat, 2002. 118 p.

ZANCAN, F. L.; GOMES, C. B. **Recuperação ambiental da bacia carbonífera de Santa Catarina**. 2004. Disponível em: <http: www.siesesc.com.br/meioambiente> Acesso em: 23 abr. 2005.

ZOUCAS, B. C. **Subsídios para restauração de áreas degradadas:** banco de dados e análise das espécies vegetais de ocorrência no sul de Santa Catarina. 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

Parte 4

Experiências em projetos de recuperação de áreas degradadas por mineração

Capítulo 3

Revegetação de áreas degradadas pela mineração e processamento de bauxita

Avílio Antônio Franco
Eduardo Francia Carneiro Campello
Sérgio Miana de Faria
Luiz Eduardo Dias
Alexandre Franco de Castilho
Jorge Luís de Oliveira Fortes
Domingos Campos Neto
Luís Sérgio Cerqueira †
Joventino Fernandes Moreira
Alexander Silva de Resende

Introdução

Importância econômica do setor de alumínio

A bauxita é a matéria-prima de onde é extraída a alumina (Al_2O_3), que, por sua vez, é a precursora do alumínio metálico, muito utilizado no mundo inteiro na confecção de embalagens (31,2%), no setor de transportes (22,3%) e na construção civil (13,2%), principalmente (ABAL, 2005).

O consumo do alumínio no Brasil é de 3,9 kg/hab., contra 37 kg/hab. dos EUA, 31 kg/hab. do Japão e 19 kg/hab. da Europa Ocidental. Isso indica que a demanda pelo metal tende a crescer muito no País, principalmente considerando que o Brasil detém 12,7% das reservas mundiais de bauxita (SUMÁRIO MINERAL, 2004).

No ano de 2004, o Brasil se consolidou como o segundo maior produtor mundial de bauxita, respondendo por 13,4% do total, atrás da Austrália com 35,9% (SUMÁRIO MINERAL, 2004). Em relação aos produtos já beneficiados, a produção brasileira de alumina representou 10,6% da produção mundial, enquanto a do alumínio ficou em 5,1% do total. Esses números significaram o equivalente a 1,3% do PIB brasileiro em 2003, com um saldo da balança comercial perto de 1,7 bilhões de dólares (ABAL, 2005), e reforçam a importância do setor que apresenta grande potencial de expansão no País nos próximos anos. Em contrapartida, resultam áreas de disposição de rejeitos industriais que necessitam ser dispostas de forma ecologicamente adequada, pois, do contrário, podem causar grandes impactos ambientais. Bozelli et al. (2000) relatam o impacto ambiental sofrido pelo Lago Batata na Amazônia, graças à disposição de rejeito de bauxita na década de 80. Em virtude dessa problemática a Embrapa Agrobiologia iniciou os trabalhos junto à mineradora.

Objetivos do trabalho

Neste trabalho serão relatados os mais de 10 anos de experiências da Embrapa Agrobiologia juntamente com a Universidade Federal de Viçosa e

a Universidade Estadual do Maranhão na recuperação de áreas de estéril e de tanques de rejeito da lavagem da bauxita, produzida pela Mineração Rio do Norte (MRN), em Porto Trombetas, PA, em tanques de depósito de rejeito alcalino do refino de bauxita, no Consórcio de Alumínio do Maranhão (Alumar), São Luís, MA, e na Alunorte em Barcarena, PA. O uso de leguminosas arbóreas inoculadas com bactérias específicas e fungos micorrízicos possibilitou, em todos os casos, a cobertura vegetal dessas áreas em um curto espaço de tempo e a custos bem menores que os anteriormente praticados. Para apresentação dos resultados este trabalho foi dividido em dois estudos de caso. No estudo de caso I é englobado o estéril, que seria o subsolo retirado até se chegar à camada de bauxita existente no solo, o qual é novamente depositado nas cavas para seu preenchimento e no rejeito gerado com a lavagem da bauxita para retirada de impurezas e partículas mais finas. Já no estudo de caso II, são apresentados resultados da revegetação dos tanques de rejeito da extração da alumina da bauxita, que apresenta pH elevado, em razão da extração ser feita com hidróxido de sódio.

Estudo de Caso I: revegetação de áreas associada ao processo de mineração de bauxita (Mineração Rio do Norte – MRN)

Produção e revegetação do estéril e do rejeito da lavagem de bauxita

Esse trabalho vem sendo realizado junto à MRN, sediada no distrito de Porto Trombetas, no Município de Oriximiná, oeste do Pará. A lavra da bauxita é feita a partir de operações sequenciais de desmatamento, decapeamento, escavação, carregamento, transporte e recuperação de áreas mineradas (LAPA, 2000). As cavas para exploração da bauxita variam de 9 m a 14 m. Nessas cavas a bauxita é retirada e, no entanto, camadas

de horizontes subsuperficiais do solo também são retiradas e devolvidas às cavas no nível do terreno. Esse solo de horizontes subsuperficiais é chamado de estéril, justamente por não ter matéria orgânica e não permitir a ativação dos processos de sucessão ecológica sem a intervenção antrópica. O solo superficial decapado (*top soil*) é recolocado em cima do estéril numa camada de cerca de 20 cm de espessura, onde são plantadas diferentes espécies produzidas em viveiro. Essa estratégia vem sendo utilizada com custos altos, mas permitindo um retorno rápido da biodiversidade, uma vez que o *top soil* normalmente ainda apresenta um bom banco de sementes de espécies nativas e organismos do solo.

Após a lavra, a bauxita é beneficiada, visando aumentar sua pureza, retirando-se o excesso de "finos", derivados do processo de extração que atuam como contaminantes. Um baixo teor de "finos" reflete na qualidade da bauxita, aumentando proporcionalmente os teores de alumina (LAPA, 2000). O material de diâmetro inferior a 37 micrometros é descartado, constituindo o rejeito do processo de beneficiamento, que representa cerca de 28% do material inicial. Sua composição é basicamente água e argila, com cerca de 7% de sólidos, compostos principalmente por 47% de silicatos, 21% de óxidos de ferro e 21% de óxidos de alumínio . Esse rejeito é depositado em tanques intermediários, de onde se retira o excesso de água para ser reutilizada no processo de lavagem. Ao atingir 30% de sólidos, esse material é transferido para um tanque definitivo, onde o processo de retirada de água continua até atingir cerca de 60% de sólidos, quando já é possível implantar a vegetação por hidrossemeadura a partir de barcaças especialmente construídas para este fim.

Nessa fase, o tanque de rejeito encontra-se compactado e praticamente sem nutrientes e matéria orgânica (Tabela 1). A revegetação desse substrato é um desafio graças às suas características peculiares de baixíssima fertilidade, alta capacidade de adsorção de fosfato e dificuldade de acesso.

Para o sucesso da revegetação das áreas de lavra e de disposição do rejeito foram necessários:

Tabela 1. Disponibilidade de nutrientes em rejeito de bauxita em Porto Trombetas, PA.

pH	Al3+	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	P	K^{+}	C	N
	($cmol_c/dm^3$)		(mg/dm^3)		(%)	
4,6	0,2	0,4	ND	3	ND	ND

ND = não detectado.
Fonte: Bozelli et al. (2000).

1. Levantamento da ocorrência de espécies nativas da família Leguminosae capazes de se associar com bactérias fixadoras de nitrogênio e formar nódulos.
2. Seleção de estirpes de bactérias mais eficientes para fixação biológica de nitrogênio para cada espécie.
3. Produção das mudas inoculadas e micorrizadas.
4. Testes de revegetação do rejeito com diferentes espécies de plantas e níveis de adubação, seguidas de atividades de monitoramento contínuo.

Levantamento de leguminosas nativas da região que formam nódulos

Nessa atividade foram coletadas, para identificação botânica e observação da capacidade de nodulação, 192 espécies de leguminosas arbóreas e arbustivas com potencial para uso no programa de reflorestamento da MRN (Tabela 2). O objetivo foi selecionar espécies de ocorrência local associadas a bactérias fixadoras de nitrogênio que pudessem ser utilizadas na revegetação do estéril e do rejeito. Quando não era possível diagnosticar a capacidade de nodulação das plantas, foram colhidas sementes, que foram inoculadas com várias estirpes de rizóbio, isoladas de espécies taxonomicamente próximas, na Embrapa Agrobiologia, visando identificar essa capacidade nas plantas (FRANCO ; FARIA, 1997).

Foram coletadas 64 espécies da subfamília Papilionoideae, 75 da Mimosoideae e 53 da Caesalpinioideae, das quais nodularam 81%, 92% e 24 % respectivamente, constituindo a base para as etapas seguintes.

Tabela 2. Espécies de leguminosas avaliadas quanto à nodulação em Porto Trombetas, Oriximiná, PA.

Subfamílias	Caesalpinioideae	Mimosoideae	Papilionoideae	Total
Nº indivíduos avaliados	229	303	257	789
Nº espécies avaliadas	53	75	64	192
Nº espécies em que se constatou a nodulação	13	69	52	134
Nº espécies descritas pela 1ª vez como nodulantes	2	22	13	37
Nº espécies descritas pela 1ª vez como não nodulantes	13	0	2	15

Seleção de estirpes de rizóbio

Para facilitar o entendimento, o termo rizóbio é usado para designar as bactérias fixadoras de nitrogênio que formam simbiose com as leguminosas, sem distinção de gêneros. Essa associação pode apresentar grande especificidade planta-rizóbio, em que a capacidade de fixação biológica de nitrogênio pode ser fortemente afetada. Associações mais eficientes permitem que o nitrogênio fornecido à planta por meio da bactéria seja suficiente para um crescimento satisfatório da leguminosa, sem aplicação de fertilizante mineral.

O processo de seleção consiste em testar cada espécie leguminosa com vários isolados de estirpes de rizóbio da mesma espécie e de espécies genealogicamente afins, buscando-se as que apresentam maior contribuição para a planta. Após mais de 20 anos de trabalho nessa linha de pesquisa, a Embrapa Agrobiologia selecionou mais de 160 estirpes de bactérias para mais de 80 espécies de leguminosas, para as quais são

produzidos inoculantes que têm garantido o sucesso da aplicação dessa tecnologia em diferentes regiões do País.

Produção de mudas

Para execução das atividades de recuperação das áreas afetadas pela atividade de mineração de bauxita, a MRN montou um viveiro com capacidade para 350 mil mudas por ano. As mudas foram produzidas em substrato argiloterroso com 35% de composto bovino estabilizado e 5% de termofosfato, para serem plantadas no rejeito. As sementes das leguminosas que nodulam foram inoculadas com as estirpes de rizóbio selecionadas, e todas as espécies foram inoculadas com uma mistura do fungo micorrízico (*Gigaspora margarita)* e solo de rizosfera (*Brachiaria decumbens)* coletado na região. Os fungos micorrízicos proporcionam maior capacidade de absorção de nutrientes e água, ao passo que, ao se associar com bactérias capazes de fixar nitrogênio, criam mudas mais resistentes aos estresses ambientais e mais preparadas para situações de substrato destituído de matéria orgânica, como é o caso do rejeito de bauxita (FRANCO; FARIA 1997).

Revegetação do estéril

Após a lavra de bauxita, a área é regularizada e o solo retirado das cavas é novamente depositado no local. Essa camada subsuperficial, pobre em nutrientes e matéria orgânica, é chamada de estéril, que, por causa da grande movimentação de máquinas na área, tende a apresentar-se compactada, dificultando o desenvolvimento vegetal. A adição de solo superficial (*top soil*), proveniente do decapeamento, é seguida de escarificação, o que torna onerosa essa prática. Campello (1998) constatou que não houve benefício da escarificação no desenvolvimento das leguminosas arbóreas inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos, o que indica a capacidade dessas espécies em se

adaptar a situações adversas (Figura 1). Isso permitiria redução de custos, já que a escarificação poderia ser eliminada ou minimizada.

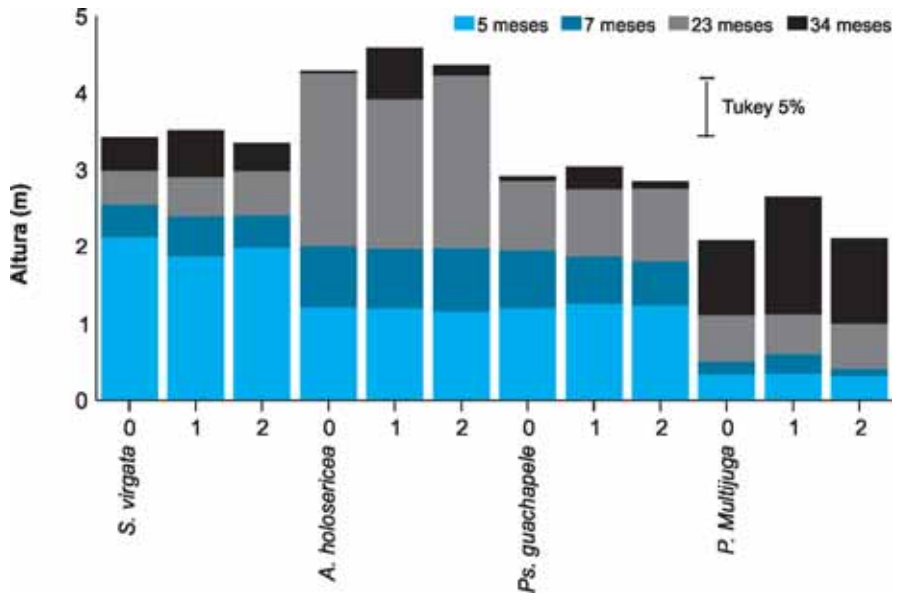


Figura 1. Efeito da escarificação do estéril (0, 1 e 2 passagens) no desenvolvimento de quatro espécies de leguminosas arbóreas (Sesbania virgata, Acacia holosericea, Pseudosamanea guachapele, Parkia multijuga) inoculadas e micorrizadas.
Fonte: Campello (1998).

Revegetação do rejeito da lavagem da bauxita

Nesse rejeito foram testadas diferentes espécies: *Acacia mangium*, *A. angustissima*, *A. holosericea*, *Albizia saman*, *A. guachapele*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Clitoria fairchildiana*, *Sclerolobium paniculatum*, *Stryphnodendrum guianensis*, *Senna siamea*, *Parkia pendula*, *Cassia leiandra*, *Adenanthera pavonina*, *Cecropia* sp. e *Eucalyptus terenticornis*, sendo algumas leguminosas (nodulantes e não nodulantes) e outras não. Na ocasião do plantio no campo, todas as espécies foram testadas com e sem adição de composto bovino estabilizado, com adubação otimizada para termofosfato, NPK e

micronutrientes. No segundo ano, adicionou-se KCl em cobertura. Após 22 meses, as espécies de leguminosas fixadoras de nitrogênio apresentaram maior crescimento e produção de biomassa aérea em relação às outras espécies, mostrando seu potencial para se desenvolver em substratos pobres (FRANCO; FARIA, 1997) Figura 2. A *Acacia mangium* foi a espécie que mais se destacou, com quase 10 kg de matéria seca por árvore e atingindo mais de 7 m de altura nesse período (CAMPELLO, 1998). Dentre as não fixadoras, *Eucalyptus terenticornis* também apresentou bom desenvolvimento, no entanto, com biomassa cerca de 10 vezes menor que *A. mangium*.

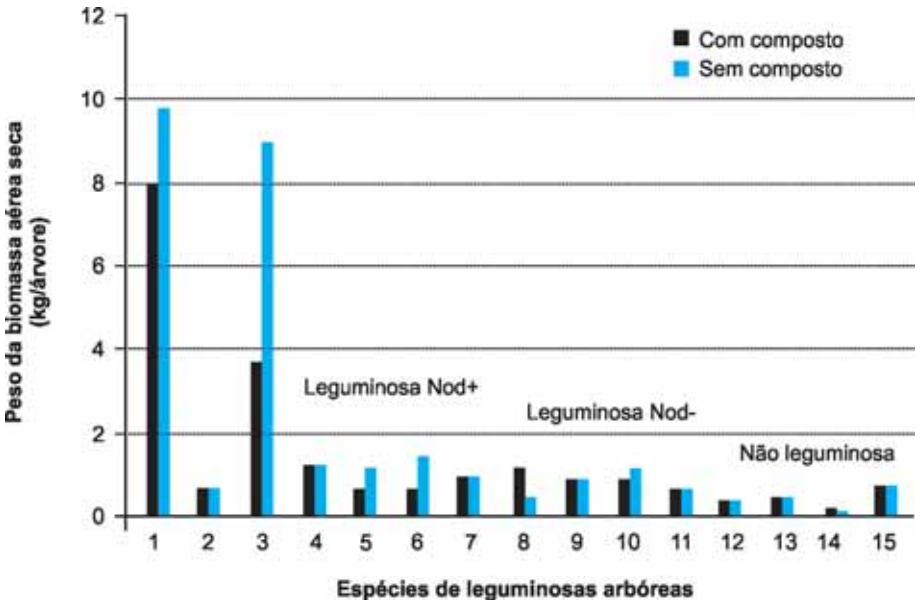


Figura 2. Biomassa seca de nove espécies fixadoras de nitrogênio (1. *A. mangium*; 2. *A. angustissima*; 3. *A. holosericea*; 4. *A. saman*; 5. *P. guachapelle*; 6. *E. contortisiliquum*; 7. *C. fairchildiana*; 8. *E. paniculatum* e 9. *S. purpureum*), quatro espécies de leguminosas não fixadoras (10. *S. samanea*; 11. *P. pendula*; 12. *D. excelsa* e 13. *C. leiandra*) e duas espécies não pertencentes à família Leguminosae (14. *Cecropia* sp. e 15. *E. terenticornis*), com e sem a adição de composto, 22 meses depois do transplantio das mudas para os tanques de rejeito.

Fonte: Campello (1998).

Reativação dos processos ecológicos com o uso de leguminosas arbóreas

A estratégia de trabalhar exclusivamente com espécies da família *Leguminosae* foi alvo de muitas críticas ao longo do desenvolvimento da tecnologia, mesmo considerando que essa família possui mais de 20 mil espécies em todo o mundo. Outra crítica foi direcionada ao fato de serem espécies exóticas não relacionadas ao bioma de origem. Hoje, após mais de 20 anos de estudos nessa linha, sabe-se que a ativação dos processos de sucessão vegetal por meio do condicionamento do solo com o uso de leguminosas é uma realidade. No entanto, o que se nota é que seus efeitos benéficos são mais sentidos em áreas onde há proximidade com fragmentos florestais que disponibilizem fontes de propágulos e que haja agentes dispersores capazes de trazê-los para a área recuperada (CAMPELLO, 1998; PARROTA, 1993; RESENDE et al., 2006).

Quanto ao uso de espécies exóticas ao ambiente natural, nota-se que as espécies de *Acacia spp* que foram usadas possuem, em geral, um ciclo de vida curto, da ordem de 8 a 15 anos. Uma vez iniciado o processo de sucessão vegetal, o sombreamento das sementes inibe a germinação das espécies exóticas, dando lugar às espécies nativas da região. As espécies de *Acacia* são de baixa competitividade em ambientes florestais (CAMPELLO, 1998).

Em relação ao risco dessas plantas de se propagarem por agentes dispersores como pássaros, vento, etc., o autor acima observa que as espécies de *Acacia spp*, *Albizia spp* e *Samanea spp*, utilizadas em projetos de recuperação de áreas degradadas no Brasil, não possuem registros de terem se tornado invasoras, prejudicando as espécies nativas.

Nesse sentido, se avaliou a influência da revegetação com cinco diferentes espécies arbóreas no processo de sucessão vegetal, em uma área recuperada por mineração de bauxita (CAMPELLO, 1998). As espécies utilizadas foram: *Acacia mangium*, *Sclerolobium paniculatum* (taxi), *Eucalyptus pellita*, *E. citriodora* e *Goupia glabra* (cupiúba). Trata-se de duas leguminosas

fixadoras de nitrogênio (acácia e taxi), sendo a primeira exótica e a segunda nativa; duas não leguminosas exóticas (pelita e citriodora); e uma não leguminosa nativa (cupiúba). Considerando-se as diferentes coberturas vegetais, após 10 anos de plantio, foram inventariadas 119 espécies diferentes sob acácia, 87 sob taxi, 65 sob pelita, 46 sob citriodora e 36 sob cupiúba (Figura 3). Diante desses resultados, é possível constatar que a regeneração natural de espécies nativas foi beneficiada pelos plantios de leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio, de maneira independente da origem das espécies plantadas, sendo a regeneração natural sob leguminosas mais abundante e com maior diversidade de espécies.

Esses resultados refletem o sucesso da técnica de recuperação de áreas degradadas pela mineração de bauxita, que usa leguminosas arbóreas, inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio específicas e fungos micorrízicos, transcendendo a simples cobertura da área, mas principalmente reativando o processo de sucessão ecológica.

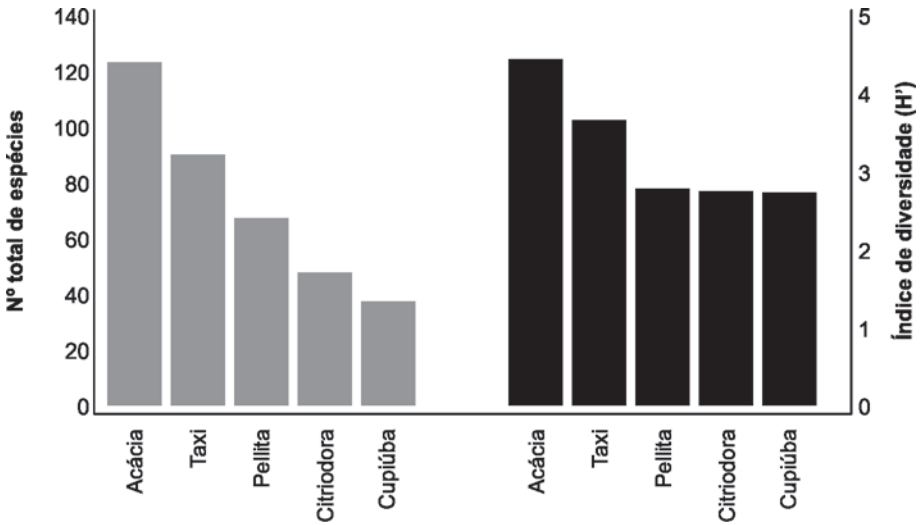


Figura 3. Total de espécies encontradas na regeneração natural sob plantios de leguminosas arbóreas e não leguminosas e índice de diversidade de Shannon-Weaver (H').
Fonte: Campello (1998).

Estudo de Caso II: reabilitação de lagos de rejeito (Alumar e Alunorte)

Reabilitação de lagos de rejeito alcalino de bauxita da Alumar

O Consórcio de Alumínio do Maranhão (Alumar) é formado pelas empresas: Alcoa Alumínio S.A., Billiton Metais S.A., Alacan S.A. e Abalco S.A., visando à fabricação de alumina e alumínio a partir da bauxita das reservas da MRN. Esse processo gera uma grande quantidade de rejeito, superior a 900 mil toneladas anualmente, formando um material com aparência de lama vermelha ("red mud"). O tratamento da bauxita é feito a partir do uso de hidróxido de sódio, o que gera um resíduo com alto pH, alta condutividade elétrica e elevada concentração de sódio, além de baixos níveis de nutrientes (Tabela 3).

A grande preocupação ambiental na produção de alumina é o armazenamento desse resíduo em função da quantidade gerada, e de sua natureza cáustica, que pode causar sérios danos ambientais caso seja mal manejado. Esses fatores químicos, aliados a fatores físicos como a falta de estrutura e compactação elevada, limitam o estabelecimento de vegetação diretamente sobre o rejeito.

Esse substrato, de pH e efeito salino elevados, exigiu medidas adicionais em relação ao rejeito de lavagem de bauxita da MRN, pois foram procuradas espécies da família Leguminosae que formaram associação com bactérias fixadoras de nitrogênio e com fungos micorrízicos, mas tolerantes aos níveis de salinidade e alcalinidade do rejeito (FORTES, 2000). Nesse sentido, deve se ressaltar uma vantagem em trabalhar com a família Leguminosae: o grande número de espécies. Isso permite selecionar aquelas adaptadas às mais diversas condições. Além disso, o processo de fixação biológica de nitrogênio gera um desbalanço na absorção de cátions

Tabela 3. Propriedades químicas do rejeito de bauxita antes da revegetação.

pH da água	C (g/kg)	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	K+	P	Na+	PST (%)	CE (dS/m)
		($cmol_c$/kg)					
10,2	0,70	0,11	0,07	1	49,14	99,25	5,70

CE = Condutividade elétrica; PST = Percentual de sólidos totais.
Fonte: Fortes, (2000).

em relação a ânions, o que acarreta num excesso de prótons (H+) liberados na região da rizosfera da planta, contribuindo para a diminuição do pH do substrato (CAMPELLO, 1998).

A Alumar tem como componente de sua base energética o uso de carvão mineral, o que, após a combustão, acaba gerando cinzas como resíduo. Assim, aproveitando as propriedades químicas das cinzas e a necessidade de dar destino a elas em condições de segurança ambiental, colocou-se uma camada de 40 cm de cinzas sobre o rejeito (lama vermelha) e, na cova de plantio, foi aplicado outro resíduo de uma indústria próxima, um lodo de cervejaria composto de efluentes orgânicos e cama de aviário, além da adição de gesso (FORTES, 2000).

A cobertura de cinzas ajuda a atender às necessidades de alguns nutrientes (Ca, Mg, K, Fe, Mo) para o estabelecimento das espécies estudadas e também favoreceu o processo de lixiviação de sódio para camadas mais profundas, reduzindo sua ascensão capilar. A revegetação com espécies de rápido crescimento e alta capacidade de produção de serapilheira favoreceu a manutenção de um microclima capaz de evitar a elevação da temperatura na cinza e manter e a perda de umidade. Isso faz com que o fluxo de água no rejeito seja descendente, evitando o movimento capilar de sódio. Esse processo é fundamental para acelerar o processo de dessalinização, permitindo a reabilitação da área em menor período de tempo.

Nessa área, Fortes (2000) testou diferentes espécies de leguminosas arbóreas noduladas e micorrizadas: *Acacia mangium*, *Mimosa caesalpinaefolia*, *M.acutistipula*, *Prosopis juliflora*, *Leucaena leucocephala* e uma não fi-

xadora de nitrogênio, *Caesalpinea ferrea*. Após seis anos do plantio com as espécies de leguminosas fixadoras de nitrogênio, conseguiu-se uma cobertura total do solo, indicando que a cinza e a adição de matéria orgânica contribuíram para a rápida revegetação do rejeito alcalino de bauxita (Figura 4).

Fotos: E. F. C. Campello

Figura 4. Vista geral de um tanque de rejeito alcalino de bauxita não revegetado (à esquerda) e revegetado após seis anos (à direita).

Em 2006, oito anos após o início da intervenção, com o substrato já enriquecido em nutrientes e com a retomada da atividade biológica do solo, já começaram a surgir espécies nativas na área. Esse repovoamento é beneficiado pela fauna adjacente que ajuda a acelerar os processos de sucessão ecológica. A utilização desse sistema com leguminosas arbóreas permite a autossuficiência de N, que contribui para o incremento do carbono orgânico e o consequente aumento da fertilidade do substrato (FRANCO et al., 1991; RESENDE et al., 2006).

Essa melhoria da qualidade do substrato vem proporcionando uma nova experiência. A alta demanda energética da Alumar faz com que seja uma das prioridades para a empresa, nos próximos anos, a implantação de uma matriz alternativa de energia. O biodiesel surge como uma possibilidade interessante, e o dendezeiro (*Elaeais guineensis* Jaquim), palmeira originária da costa oriental da África (Golfo da Guiné), vem despontando como uma das oleaginosas mais promissoras para esse fim. Essa palmeira tem alta produtividade, alcançando até 10 Mg/ha/ano de óleo, e sua condição de planta perene, com produção distribuída

de maneira uniforme no decorre do ano, lhe confere peculiaridades de grande importância econômica e social, com vida útil de até 30 anos. Esse óleo, de boa qualidade e baixo custo, poderá ser absorvido em grandes quantidades pelo mercado interno, além de possibilitar a recomposição do espaço florestal, proporcionando aumento da renda regional e criação de novos empregos (SOUZA, 2000). Assim, no interior do tanque de rejeito, revegetado há oito anos, foi implementado um experimento usando-se oito cultivares de dendê recomendados pela Embrapa Amazônia Ocidental: C2501, C2301, C2328, C3701, C2801, C7201, RUC13 e RUC87 (Moreira, 2006). O espaçamento utilizado foi de nove metros entre plantas e nove metros entre linhas de plantio, dispostas em clareiras de dois metros abertas em linha, sob a vegetação com leguminosas arbóreas, visando conhecer o genótipo mais adaptado para essa condição. O Experimento foi implantado em 2003 e as plantas estão em fase de estabelecimento, apresentando na primeira avaliação, após nove meses de plantio, incrementos superiores a 100% para todas as cultivares em relação à fase de viveiro, quando avaliado o parâmetro diâmetro à altura do colo (Tabela 4).

Aos 23 meses, as plantas já apresentavam caules com até 15 cm de diâmetro e mais de três metros de altura, com desenvolvimento similar ao dendezeiro crescendo em áreas de solo não degradado (FURLAN JÚNIOR et al., 2000). Esses resultados são promissores e a leguminosa arbórea associada à cultura parece estar influenciando positivamente, não somente na recuperação da área degradada, mais também no desenvolvimento do dendezeiro (Figura 5).

Reabilitação de lagos de rejeito alcalino de bauxita da Alunorte

A Alumina do Norte do Brasil S/A (Alunorte) localiza-se no Município de Barcarena, PA, sendo hoje uma das cinco maiores refinarias de alumina do mundo, com produção de 2,4 milhões de toneladas anualmente

Tabela 4. Diâmetro do colo e número de folhas em plantas de dendê no viveiro aos 9 e 23 meses após o plantio no campo, em área de rejeito de bauxita revegetada com leguminosas arbóreas há oito anos.

Cultivar	Diâmetro (cm)			No de folhas[1]	
	Viveiro	Avaliação de campo (meses)			
		9	23	9	23
C2328	3,23 a	7,22 a	11,47 b	14,02 a	20,80 b
C2801	3,09 a	6,43 b	9,71 c	12,82 b	20,80 b
C2301	2,84 b	6,00 b	11,69 b	12,86 b	22,34 b
C3701	2,79 b	5,99 b	12,32 b	13,12 b	23,30 b
C7201	2,95 b	6,37 b	14,56 a	13,00 b	22,72 b
RUC 13	2,96 b	6,21 b	11,27 b	13,52 b	22,04 b
C2501	2,91 b	6,46 b	12,32 b	13,22 b	22,76 b
RUC 87	3,14 a	7,36 a	15,19 a	14,88 a	26,98 a

[1] Médias seguidas de mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si segundo Scott Knott (P = 0,05). Adaptado de Moreira, dissertação de mestrado em andamento (dados preliminares).

Foto: Joventino F. Moreira

Figura 5. Comportamento das plantas de dendê após 23 meses de plantio, crescendo em área de rejeito de bauxita revegetada com leguminosas arbóreas há oito anos.

(ALUNORTE, 2005). O material resultante da obtenção da alumina a partir da bauxita tem destino semelhante ao rejeito gerado na Alumar. No entanto, há diferenças entre ambos os materiais, pois, no caso da Alunorte, ocorrem duas granulometrias distintas, além de menor conteúdo de água no resíduo final.

Em março de 2000, iniciou-se o trabalho de revegetação desses tanques, buscando, ao contrário do trabalho realizado na Alumar, revegetá-lo sem adição de cinzas e de compostos orgânicos. Os resultados após 11 meses podem ser vistos na Figura 6, onde, à direita, se encontra a área revegetada sem a adição de fonte orgânica e nem adição de camada superficial de solo, e à esquerda, a área revegetada com adição de 40 cm de solo. Embora o desenvolvimento das plantas sobre camada de solo tenha sido melhor, o fato de se estabelecer mudas sem nenhuma adição de material orgânico sobre o rejeito mostrou o potencial da tecnologia. Para a empresa foi possível reduzir custos, pois passaram a utilizar apenas 20 cm de solo sobre o rejeito. Os melhores resultados de estabelecimento das plantas no rejeito, sem adição de solo, foram observados em substrato arenoso.

Foto: Avílio A. Franco

Figura 6. Rejeito do beneficiamento de bauxita revegetado com (esquerda) e sem adição de camada superficial (direita) de solo, nem fonte orgânica, 16 meses após o plantio.

Considerações finais

Após 20 anos de experiência em recuperação de áreas degradadas, e cerca de 10 anos com mineração de bauxita, considerando leguminosas associadas a bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos, pode-se concluir que a atividade de revegetação de solos degradados é uma estratégia extremamente eficiente para restabelecer os processos ecológicos de áreas impactadas. No caso da mineração de bauxita, alguns ajustes serão necessários ainda, uma vez que a biomassa original, a diversidade e características físicas e biológicas do substrato encontram-se em estágio prematuro de evolução, se comparadas com as respectivas feições relativas à vegetação nativa do entorno. Esses resultados sugerem a necessidade do monitoramento constante das áreas, sendo iniciado em algum momento um processo de enriquecimento com espécies nativas.

No entanto, deve-se mencionar que o sucesso em revegetar as áreas mineradas abre uma nova perspectiva, que significa um grande desafio a ser enfrentado pela pesquisa, isto é, reincorporar essas áreas ao processo produtivo. Para tanto, a experiência pioneira com o uso do dendê em áreas recuperadas para produção de energia elétrica resulta animadora, tornando factível avaliar o potencial produtivo do dendezeiro nos próximos anos. Se as previsões iniciais se confirmarem, não somente o setor de alumínio, mas todo o programa de recuperação de áreas degradadas por mineração na Amazônia legal, a maior parte apta à cultura do dendê pode tomar novo rumo, alterando a matriz energética das empresas e aliando ao desenvolvimento um enfoque social e ecológico mais adequado. Um projeto pioneiro para assentamento de 100 famílias em área total de 500 ha, visando à produção de biodiesel para geração de energia elétrica, já está sendo implantado em Tabatinga, AM, e pode ser o ponto de partida para a expansão do biodiesel no País.

Referências

ABAL. Associação Brasileira do alumínio. **A indústria**. 2005. Disponível em: <http://www.abal.org.br>. Acesso em: 10 out. 2005.

ALUNORTE. Alumina do Norte do Brasil. **A empresa**. Disponível em: <http://www.alunorte.net>. Acesso em: 10 out. 2005.

BOZELLI R. L.; ESTEVES F. A.; ROLAND F. **Lago batata**: impacto e recuperação de um ecossistema amazônico. Rio de Janeiro: IB-UFRJ/SBL, 2000. 342 p.

CAMPELLO, E. F. C. Sucessão vegetal na recuperação de áreas degradadas. In: DIAS, L. E; MELLO, J. W. V. de. (Ed.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: UFV, 1998. p. 183-194.

FORTES, J. L. de O. **Reabilitação de depósito de rejeito do refino de bauxita com o uso de resíduos industriais e leguminosas arbóreas**. 2000. 185 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2000.

FRANCO, A. A.; CAMPOS NETO, D.; CUNHA, C. O.; CAMPELLO, E. F. C.; MONTEIRO, E. M. R. da S.; SANTOS, C. J. F.; FONTES, A. M.; FARIA, S. M. de. Revegetação de solos degradados. In: WORKSHOP SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1., 1991, Itaguaí. **Anais...** Itaguaí: UFRRJ, 1991. p. 133-145.

FRANCO, A. A.; FARIA, S. M. de. The contribuition of N_2-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 29, p. 897-903, 1997.

FURLAN JÚNIOR, J.; TEIXEIRA, L. B.; OLIVEIRA, R. F. **Uso de engaços como fonte de nutrientes na cultura do dendezeiro**. Belém: Embrapa Amazônia Ocidental, 2000. 13 p. (Embrapa Amazônia Ocidental. Circular Técnica, 8).

LAPA, R. P. A bauxita e o rejeito da bauxita. In**:** BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; ROLAND, F. (Ed.). **Lago Batata**: impacto e recuperação de um ecossistema amazônico. Rio de Janeiro: SBL-Instituto de Biologia, 2000. p 25-36.

PARROTA, J. A. Secondary forest regeneration on degraded tropical lands: the role of plantations as "forest ecosystems". In: LEITH, H.; LOTHMANN, M. (Ed). **Restoration of tropical forest ecosystems**. Netherlands: Kluwer Academic, 1993. p. 63-73.

SOUZA, J. de. **Ceplac**: artigos técnicos. 2000. Disponível em: <http://www.ceplac.gov.br/radar/Artigos/artigo9.htm>. Acesso em: 10 out. 2005.

SUMÁRIO Mineral 2004. Brasília, DF: **DNPM**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm_legis/sm2004.html>. Acesso em: 12 out. 2005.

Anexo

Lista de abreviaturas

Elementos químicos

Ag: Prata (47); **Al**: Alumínio (13); **As**: Arsênio (33); **Au**: Ouro (79); **Ba**: Bário (56); **Be**: Berílio (4); **Bi**: Bismuto (83); **Br**: Bromo (35); **C**: Carbono (6); **Ca**: Cálcio (20); **Cd**: Cádmio (48); **Ce**: Cério (58); **Co**: Cobalto (27); **Cr**: Cromo (24); **Cs**: Césio (55); **Cu**: Cobre (29); **Eu**: Európio (63); **F**: Flúor (9); **Fe**: Ferro (26); **Ga**: Gálio (31); **Ge**: Germânio (32); **H**: Hidrogênio (1); **Hg**: Mercúrio (80); **I**: Iodo (53); **In**: Índio (49); **K**: Potássio (19); **La**: Lantânio (57); **Li**: Lítio (3); **Mg**: Magnésio (12); **Mn**: Manganês (25); **Mo**: Molibdênio (42); **N**: Nitrogênio (7); **Na**: Sódio (11); **Nd**: Neodímio (60); **Ni**: Níquel (28); **O**: Oxigênio (8); **P**: Fósforo (15); **Pb**: Chumbo (82); **Pr**: Praseodímio (59); **Pt**: Platino (78); **Re**: Rênio (75); **S**: Enxofre (16); **Sb**: Antimônio (51); **Se**: Selênio (34); **Sm**: Samário (62); **Sn**: Estanho (50); **Sr**: Estrôncio (38); **Ti**: Titânio (22); **Tl**: Tálio (81); **Tm**: Túlio (69); **V**: Vanádio (23); **Y**: Ytrio (39); **Yb**: Yterbio (70); **Zn**: Zinco (30).

Nota: o número entre parênteses é o número atômico do elemento.

Entidades

Alumar: Consórcio de Alumínio do Maranhão
Iapar: Instituto Agronômico do Paraná
Ipat: Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas
Ipef: Instituto de Estudos Florestais
IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
Esalq: Escola Superior de Agronomia Luiz Queiroz
Fatma: Fundação do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina
Geat: Grupo Executivo para o Aproveitamento de Terras
MRN: Mineração Rio do Norte

SIX: Superintendência de Industrialização do Xisto
SPVS: Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem
Uema: Universidade Estadual do Maranhão
Ufpel: Universidade Federal de Pelotas
UFPR: Universidade Federal do Paraná
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro
Unesc: Universidade do Extremo Sul Catarinense
Unicamp: Universidade Estadual de Campinas
Unisinos: Universidade do Vale dos Sinos
USP: Universidade de São Paulo

Termos gerais

ΔG/ΔH/ΔS: Variação da Energia Livre de Gibbs / Entalpia / Entropia
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
AH: Ácidos Húmicos
AHAN: Ácido Húmico de Solo não Afetado por Mineração
AHAR: Ácido Húmico de Solo Recuperado
AHC: Ácido Húmico de Material Compostado
AHL: Ácido Húmico de Lodo
CIXB: Comissão de Industrialização do Xisto Betuminoso
DAM: Drenagem Ácida de Mina
dS, d_eS, d_iS: Variações Infinitesimais da Entropia
EM:Técnicas Eletromagnéticas
EPR: Ressonância Paramagnética Eletrônica
FLLK: Fertilizante de Liberação Lenta de Potássio
GLP: Gás Liquefeito
IAT: Índice de Alteração Térmica
IP: Polarização Induzida
IPA: Índice Pontual de Abundância

IRAM: Índice de Recuperação de Áreas Mineradas
MO: Matéria Orgânica
MPA: Potencial Máximo de Acidez
NANA: Número de Anos para atingir o Nível de Alerta
nd: Não Determinado
ND: Não Detectado
PAP: Parâmetro à Altura do Peito
pH: Potencial de Hidrogênio
PRAD: Planos de Reabilitação de Áreas Degradadas
SH: Substâncias Húmicas
STD: Sólidos Totais Dissolvidos

Livraria Embrapa

Na Livraria Embrapa, você encontra
livros, fitas de vídeo, DVDs e
CD-ROMs sobre agricultura,
pecuária, negócio agrícola, etc.

Para fazer seu pedido, acesse
www.embrapa.br/liv

ou entre em contato conosco
Fone: (61) 3448-4236
Fax: (61) 3448-2494
vendas@sct.embrapa.br

Impressão e acabamento
Embrapa Informação Tecnológica

O papel utilizado nesta publicação foi produzido conforme a certificação da Bureau Veritas Quality International (BVQI) de Manejo Florestal.

Embrapa

Clima Temperado

Este livro representa o esforço de parte dos palestrantes e participantes do *Workshop de Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração de Xisto*. O evento foi realizado em São Mateus do Sul, PR, nos dias 22 e 23 de novembro de 2005, no marco do projeto Xisto Agrícola (Petrobras – Unidade de Negócios de Industrialização do Xisto, Embrapa Clima Temperado e Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento Agropecuário Edmundo Gastal – Fapeg).

A recuperação de áreas degradadas é um tema interdisciplinar e transdisciplinar, em estreita vinculação com a mineração, com fundamentos em agronomia, biologia, direito, geologia, geomorfologia, florestação e veterinária, entre outras. Essa visão está expressa no livro, que é dividido em quatro partes:

1. Potencialidade dos subprodutos da mineração na agricultura.
2. Estratégias de gestão em recuperação de áreas degradadas por mineração.
3. Indicadores de qualidade ambiental em áreas degradadas.
4. Experiências em projetos de recuperação de áreas degradadas por mineração.

Vários dos temas abordados, como direito, gestão, planejamento e qualidade ambiental, segurança alimentar ou novos insumos para a agricultura, possuem caráter inovador. Foram considerados também diversos indicadores: substâncias húmicas, drenagem ácida, fauna, termodinâmica dos solos e a paleodiversidade. Além disso, o livro traz relatos de estudos de caso conduzidos por grupos de pesquisa reconhecidos no âmbito nacional.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

BRASIL UM PAÍS DE TODOS GOVERNO FEDERAL

ISBN 978-85-7383-496-3

CGPE 8664