

A PRODUÇÃO DOS MATERIAIS E O MEIO AMBIENTE

Roberto C. Villas-Bôas
Chairman IMAAC/UNIDO
Coordenador Internacional CYTED-XIII
Vocal CYTED – Área Industria
Vice-Presidente OLAMI
Pesquisador Titular CETEM/MCT
<http://cetem.gov.br/imaac>
<http://cetem.gov.br/cyted-xiii>

RESUMO

Os materiais desempenham papel fundamental no desenvolvimento de uma nação e manutenção de sua participação na economia mundial. Não há nação desenvolvida que não tenha uma forte indústria minero-metalúrgica e/ou disponibilidade de acesso à mesma !

Contudo, qualquer material, sendo resultado de um processo de produção, possui no seu ciclo de transformação (extração, processamento, fabricação e manufatura) pelo menos um estágio no qual efluentes, quer sejam, sólidos, líquidos ou gasosos, são expelidos ao meio ambiente.

Esta introdução ao livro analisa alguns dos problemas ambientais associados à extração e processamento de alguns metais ou compostos químicos de origem mineral, de interesse ao engenheiro de minas, químico ou metalúrgico, que lide com o beneficiamento de minérios ou hidrometalurgia, visando o projeto e a produção de produtos e processos ambientalmente amigáveis, conhecidos como "green designs" !

Na sua versão original, o texto em Inglês foi apresentado como Conferencia Plenária junto ao Churchill College, sob a égide da Hydromet, bem como, numa outra versão, como capítulo do livro *Technological Challenges Posed by Sustainable Development: The Mineral Extraction Industries*, publicado pelo CYTED e IMAAC/UNIDO.

Este texto foi preparado especialmente para as JORNADAS IBEROAMERICANAS SOBRE TECNOLOGIAS LIMPIAS, Santa Cruz de la Sierra, Bolívia, 12-16 Junio, 2006, embora mantendo, essencialmente, a versão original !

1. INTRODUÇÃO

A produção e utilização de materiais em geral e, em consequência, aquela de minérios e metais, obedecem, dentro de um determinado quadro de desenvolvimento industrial, os ciclos econômicos atuantes num, igualmente, determinado referencial de tempo. Tais ciclos já foram exhaustivamente descritos na literatura (1)(2)(3)(4) e podem refletir tendências mundiais, locais ou, mesmo, geopolíticas.

Tendo em vista que a seleção de um determinado grupo de materiais depende do ciclo predominante nos países industrializados, estes determinarão, em maiores ou menores graus, os padrões de consumo de uma dada "commodity", induzindo ao mercado adaptar-se a esta nova realidade.

Naquelas indústrias intensivas em materiais, duas estratégias surgem: há uma busca de materiais que venham a se adequar a uma dada tecnologia (caso da indução descrita no parágrafo anterior), ou, alternativamente, o desenvolvimento de tecnologia para o material disponível (caso em que o material em causa seja difícil de se comprar, ou a situação geopolítica esteja conflituosa).

Os materiais reciclados, cuja magnitude de uso nas indústrias varia de acordo com o estágio econômico de uma particular economia, necessita, como regra geral, de menos capital e gasto energético e mais mão-de-obra do que os empregados na extração primária, a partir do minério. Também, em geral, exigem menores custos de controle da poluição ! Entretanto, a reciclagem se torna mais intensa com o aumento da sofisticação da economia, pois que, então, quantidades apreciáveis de material a ser reciclado se tornam disponíveis !

Os materiais, durante os seus processos produtivos, produzem importantes alterações no meio-ambiente: requerem energia para serem processados, terras nas quais se instalem suas fábricas, áreas de recebimento de dejetos resultantes dos processos produtivos, além de expelirem gases e poeiras e requererem água e movimentação de terra !

Na verdade, já de há muito estes fatos são conhecidos, e algumas ações foram tomadas, aqui e ali, no sentido de minimizar as consequências de tais efeitos, deixando-os dentro de "limites aceitáveis de tolerância", que variam de tempos em tempos.

Tal variabilidade é devida às pressões sociais, as quais forçam legislações, as quais promovem alternativas tecnológicas de processo, as quais, por fim, refletem-se na economia !

Naquilo que diz respeito à temática ambiental e extração mineral, duas questões surgem; a primeira, qual é o efeito relativo à produção, rejeito e uso dos materiais ? A segunda, quais são suas disponibilidades num futuro previsível ?

Este capítulo abordará a primeira questão, através da análise e comentário de algumas "commodities" !

2. A RECUPERAÇÃO MÉDIA DOS METAIS E SUAS ETAPAS DE PRODUÇÃO

Para que qualquer material seja produzido há etapas de produção nas quais rejeitos também são gerados. Estes rejeitos podem ser genericamente classificados em duas grandes categorias: perdas e efluentes.

Perdas são definidas como aqueles rejeitos facilmente identificáveis a partir do material produzido, ou sejam, partes do material que vão se deixando para trás ao longo do processo produtivo.

Efluentes são rejeições originadas destas mesmas etapas de produção inerentes à tecnologia utilizada dentro de cada etapa, mas não necessariamente identificada ao material principal !

2.1. A Recuperação Média dos Metais

Numa tentativa de sistematizar a análise dos impactos ambientais dos rejeitos oriundos da indústria minero-metalúrgica, tomem-se, por exemplo, os metais e conceituem-se, quantificando-as, as denominadas **perdas médias metálicas**.

É bem conhecido o fato de que as recuperações associadas aos minérios, desde a mina até o produto final, variam de economia para economia, de país para país, sendo as mesmas funções das tecnologias empregadas, das leis vigentes ou acatamentos voluntários de regulamentações ambientais e sociais, hoje em dia muito em voga, capacidade financeira das empresas, habilidade no trato industrial e ambiental e etc..; da mesma forma, são os impactos ambientais causados pela produção primária e secundária, através da reciclagem, dos metais !

Assim, dados sobre recuperações e perdas médias, de metal para metal, e, mesmo, de um mesmo metal de país para país, ainda quando utilizem tecnologias similares, podem apresentar variações apreciáveis ! Isto se deve às denominadas "particularidades" do mundo mineral; a saber: a combinação ótima entre o teor de corte da jazida, ou seja o limite lavrável, e o compromisso entre recuperação e teor do concentrado, tornando cada jazida única nas suas características físicas e econômicas !

Outras variáveis mantidas iguais, tanto menor será o teor, ou pobre a qualidade do minério, tanto maior será o custo de recuperação do produto de interesse. À medida em que há uma escolha do teor do minério a ser minerado, há também uma escolha da massa total a ser extraída, bem como do total recuperado do produto; quanto menor o teor permitido, maior a massa extraída.

Dessa forma, a fixação do teor de corte em jazidas com graus irregulares de distribuição de teores poderá requerer várias sequências de

computações alternativas entre teores e massas, obviamente em função das hipóteses sobre os limites de lavra.

Igualmente importante é a trabalhabilidade do minério, medida pelo custo da remoção física da rocha. Outros fatores, como acesso à mina, espessura e regularidade da zona mineralizada, dureza, presença de estruturas interferentes e etc.. são parâmetros de cômputo e decisão a considerar !

Variações quanto ao teor e trabalhabilidade de um corpo mineral, podem acompanhar-se mutuamente, e, mesmo, compensarem-se uma à outra ! Minérios de diferentes teores e custos, mas suficientemente similares em outras características que os tornem insumos do mesmo processo de beneficiamento poderão ser extraídos ou homogeneizados visando uma recuperação proveitosa ou, caso contrário, permanecerão como minérios paramarginais !

Uma remoção completa de todo o minério disponível na mina, ou lavra total, nunca é conseguida, mesmo porque não almejada, tendo em vista que o custo de extração por unidade recuperada cresce continuamente e, em geral, aceleradamente, quando tentativas são executadas para incrementar o percentual extraído !

No curto prazo, para uma dada usina de beneficiamento, o percentual lavrável dependerá, em boa proporção, do teor do minério; o método de lavra normalmente limita a recuperação do minério na boca da mina (6)(7).

Igualmente, a tecnologia de processo. Como exemplo interessante tem-se, para a lixiviação de ouro, as recuperações mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Recuperações de Ouro por Processos de Lixiviação (8)

OPERAÇÃO	PART ICULA	RECUPERAÇÃO	TEMPO	CUSTO
Agitação	≤ 0,1 mm	90 a 95 %	>20h	IN+OP
Vat	≤ 10 mm	70 a 80 %	3 a 4 h	IN
Pilha	> 10 mm	40 a 60 %	3 a 4 s	IN + OP

Onde,

IN = custos de investimento

OP = custos operacionais

h= hora

s= semana

Vejam-se, agora, algumas "commodities" minerais selecionadas, quanto às suas recuperações e teores, tal como mostrado na Tabela 2, onde MC equivale à massa do concentrado produzido referente àquela do minério total, em percentagem, e MR é a recuperação em massa, ou seja,

aquilo recuperado da "commodity", em questão, relativa à quantidade de minério na boca mina ("run of mine"). Estes índices percentuais, por sí sós, fornecem a dimensão do problema ambiental enfrentado !

Tabela 2 – Recuperação x teor para algumas "commodities"

MINÉRIO	RECUPERAÇÃO	TEOR	EMPRESA
Nb ₂ O ₅ (3%) Pirocloro	MC = 3,3% MR = 66%	60% Nb ₂ O ₅ concentrado	CBMM (9)
TiO ₂ (1,5%) Ilmenita	MC = 2,2% MR = 81%	55%TiO ₂ concentrado	RIB (9)
Cr ₂ O ₃ (17%) Cromita	MC = 28% MR = 65%	37-46%Cr ₂ O ₃ concentrado	FERBASA (9)
WO ₃ (0,5%) Schelita	MC = 0,49% MR = 79%	75% WO ₃ concentrado	TUNGST (9)
SnO ₂ (1,3%) Cassiterita	MC = 1,9% MR = 69,1%	48% Sn concentrado	RENISON (10)
Ta ₂ O ₅ (0,16%) Tantalita	MC = 0,22 MR = 70%	49%Ta ₂ O ₅ concentrado	BERNIC (10)

Outro exemplo bastante ilustrativo do sinergismo recuperação, teor, massa recuperada, movimento de terra para acesso ao corpo mineral, subprodutos gerados etc.. é o da produção de fertilizante fosfatado, a partir de rocha vulcânica, o qual, além dos problemas de manuseio de terra e solo e disposição de rejeitos, gera, no seu processamento, cinco vezes mais massa, em gesso, daquela do concentrado de P₂O₅ produzido, ao reagir com ácido sulfúrico.

2.2. As Etapas de Produção

Num processo produtivo podem-se identificar quatro etapas, a saber extração, processamento, fabricação e manufatura, assim definidas:

- **a etapa de extração** envolve a lavra e o beneficiamento do minério, resultando como produto o concentrado comercial; nesta etapa, as perdas dependem do método de mineração empregado, seja ele a céu aberto, câmara e pilares, corte e enchimento, etc.. e das técnicas de beneficiamento, sejam elas gravíticas, flotação, e outras. Os efluentes gerados são CO_x e NO_x, a partir das máquinas e equipamentos, as águas de processo, lençol freático contaminado, material particulado e movimentação de solo e terra.
- **a etapa de processamento** envolve as operações metalúrgicas e/ou químicas na conversão do concentrado em metal ou composto; as perdas dependem da tecnologia seguida e habilidades e tecnologias disponíveis (piro, hidro e/ou eletro); os efluentes são gases, CO_x, NO_x, SO_x, bem como líquidos, na forma de metais pesados contidos

nas águas de processamento, e sólidos, tais como sedimentos e poeiras de metais pesados.

- **a etapa de fabricação** envolve aquelas operações destinadas ao fabrico de barras, chapas, etc...; as perdas neste caso são recirculadas "ad infinitum", sem perdas do material (11); os efluentes são as águas servidas e gases industriais.
- **a etapa de manufatura** envolvendo a aplicação de operações mecânicas para a conformação dos metais, tais como estamparia e forja; as perdas são identificadas com as partes do metal resultantes de tais conformações que não produzam o produto desejado (11)(12)(13)(14), sendo a reciclagem bem organizada e eficiente, mas não total(12)(13); os efluentes são vapores de água e gases industriais.

Os dados sobre a "**recuperação média dos metais**" referentes às etapas de **extração** e **processamento** foram obtidos a partir de Hasialis (15) e para a etapa de **manufatura** a partir de Mar (14). Chame-se a atenção para o fato de que os dados desta última referencia são bastante antigos para os Estados Unidos, tendo sofrido alterações substanciais ao longo destes anos; entretanto, para aquelas partes do mundo que não estão utilizando "Best Available Technologies" os mesmos ainda podem ser representativos ! De qualquer maneira, o importante aqui é o argumento, qualquer que seja o número que o represente, o qual deverá ser pesquisado e levantado para cada caso específico.

Quanto aos dados fornecidos por Hasialis, representam valores médios e, como é natural, grandes variâncias existem para cada caso particular de interesse. Entretanto, mais uma vez, vale o argumento, deixando ao leitor a tarefa de indagar quais seriam os dados representativos para o seu próprio caso de interesse.

As etapas de produção estão representadas na FIGURA 1, que é um diagrama de Sankey, ou de tiras, envolvendo as quatro etapas descritas.

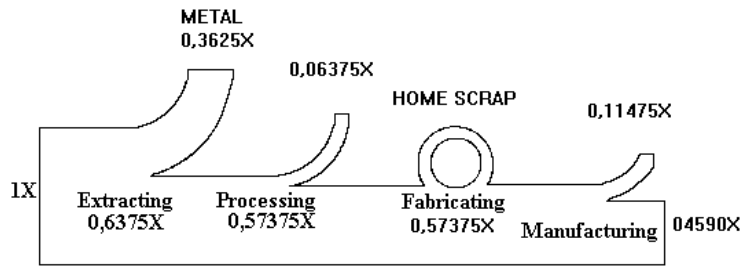


Figura 1 – Diagrama de Sankey das Etapas de Produção

Onde (da figura original de minha conferencia junto ao Churchill College):
Extracting = Extração; Processing = Processamento; Fabricating = Fabricação; Manufacturing = Manufatura; Home Scrap = Sucata Interna; Metal = Metal !

Onde:

X = teor do metal no minério "in situ": 1 X !

Le = as perdas do metal resultantes da etapa de extração: 0,3625 X !

Pe =é o produto, em metal, resultante da etapa de extração: 0,6375 X !

Lp =as perdas do metal resultantes da etapa de processamento: 0,06375 X!

Pp =é o produto, em metal, resultante da etapa de processamento: 0,57375 X!

Lf =as perdas do metal resultantes da etapa de fabricação: 0 X !

Pf = é o produto, em metal, resultante da etapa de fabricação: Pp !

Lm=as perdas do metal resultantes da etapa de manufatura: 0,11475 X !

Pm =é o produto,em metal contido,resultante da etapa de manufatura: 0,459X

Ei= é o efluente gerado em cada uma das etapas de produção,mostrado nas figuras a seguir !

2.3. Identificando os impactos ambientais da etapa de extração

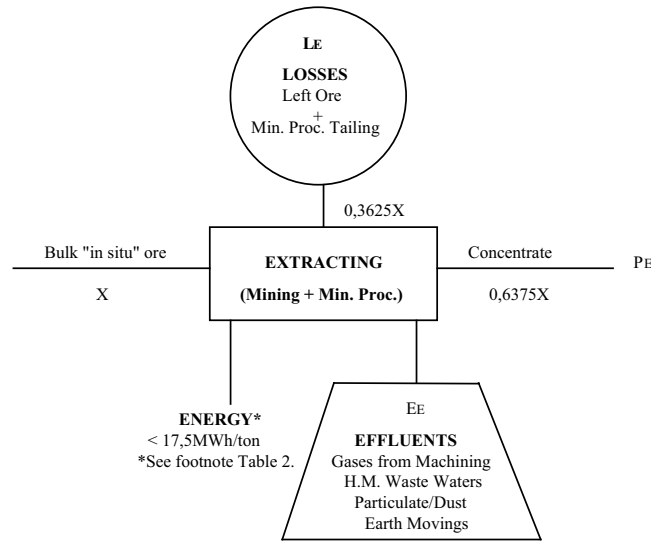


Figura 2 – Entradas e saídas da etapa de extração

Onde: Losses = Perdas; Left Ore +Min.Proc.Tailings = minério deixado+ rejeitos de beneficiamento; Bulk "in situ"ore = minério massivo "in situ"; Concentrate = concentrado;Extracting (Mining + Min.Proc) = Extração (Lavra + Beneficiamento); Energy = Energia; see footnote Table 2 = veja rodapé Tabela 2; Effluents = Efluentes; gases from Machining + gases das máquinas; H.M. Waste Waters = M.P. águas perdidas; particulate = particulado; dust=poeira; earth moving = movimentação de terra;

A – Energia: Podem-se visualizar as possibilidades de melhoras técnicas quanto à energia utilizada nesta etapa. Os dados estão em kWh (térmico), por tonelada de metal primário (veja a referencia 16), onde:

Al= 10.175 kWh (térmico)/tonelada.

Cu= 17.420 kWh (térmico)/tonelada.

Zn= 1.420 kWh (térmico)/tonelada.

B – Perdas: Minério deixado "in situ", o qual é função direta do método de lavra e do teor de corte selecionado; há possibilidade de melhoras !

Rejeitos do Beneficiamento, o qual é função da tecnologia empregada na etapa de processamento, pois os teores comerciais são insumos para tecnologias conhecidas; há possibilidades de melhoras !

C – Efluentes: Na lavra, impactos originados das operações de acesso e movimentação de rochas e terra em geral; há possibilidades de melhoras em função do estabelecimento de medidas legais ou voluntárias que tenham em conta os custos de recuperação e as pressões sociais.

Na lavra, gases das maquinas e equipamentos, barulhos e vibrações; há possibilidades de melhoras.

Ainda na lavra, ruptura do lençol freático e outros regimes hidráulicos existentes; há poucas possibilidades de melhoras com os métodos de mineração empregados hoje em dia.

No beneficiamento de minérios, as águas de processo e poeiras, bem como disposição de rejeitos e controle de geração de ácidos e outros efluentes.

2.4. Identificação dos Impactos Ambientais originados da Etapa de Processamento

Com referencia à Figura 3, a seguir.

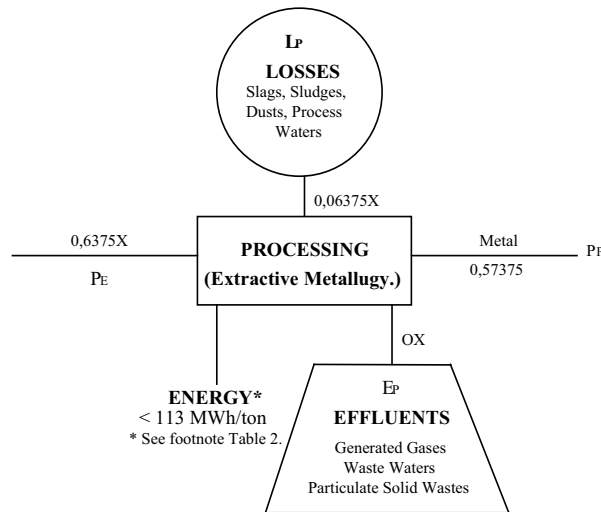


Figura 3 – Entradas/Saídas da Etapa de Processamento

Onde: Losses = Perdas; Slags = escorias; Sludges = lamas; dust=poeira; process water = agua de processo; Processing = Processamento; Extractive Metallurgy = metalurgia Extrativa; Energy = Energia; see footnote Table 2 + veja rodapé Tabela 2; Effluents = Efluentes; generated gases = gases gerados; waste waters = aguas usadas; particulate solid wastes = rejeitos solidos particulados.

A - Energia: no uso de energia, há possibilidades de melhora de desempenho; os dados são em kWh(térmico)/tonelada, originados da referencia 16.

Al: 35.384 kWh(térmico)/tonelada;

Cu: 26.520 kWh(térmico)/tonelada;

Zn: 17.560 kWh(térmico)/tonelada;

Mg: 103.000 kWh(térmico)/tonelada;

B. - Perdas: As massas perdidas nesta etapa são função da tecnologia de processo utilizada, habilidades disponíveis e legislação. Há possibilidades de melhoras, especialmente nas áreas de recuperação de metais de escórias, poeiras e outras massas descartadas ou desenvolvimento de novos processos tecnológicos baseados nos decréscimos das operações envolvidas e/ou equipamentos mais eficientes.

C. - Efluentes: gases de processamento, tais como COx, NOx, SOx, além das águas de serventia após eventual remoção de metais pesados destas águas de processamento. Emissão de particulados, ao longo do processo, além de rejeitos sólidos, outros que escórias, lamas etc... Há possibilidades de melhoras.

2.5. Identificação dos Impactos Ambientais originados na Etapa de Fabricação

Analisando-se a Figura 4, que mostra as entradas/saídas da etapa de fabricação, a seguir mostrada.

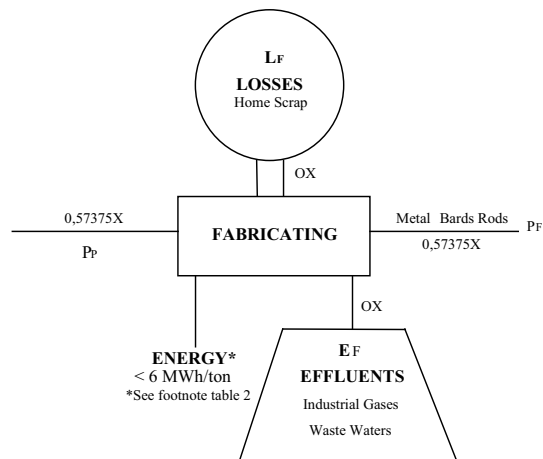


Figura 4 – Entradas/Saídas da Etapa de Fabricação

Onde: Losses = já sabe; Home Scrap= Sucata Interna; Fabricating = fabricação; metal bars rods = barras e vergalhões metálicos; Energy = ;

See footnote...;Effluents =...; industrial gases = gases industriais; waste waters = águas de processo;

A. – Energia: utilização de energia, tal como mostrada pelos números a seguir, obtidos da referencia 16:

Al: 4.937 kWh(térmico)/tonelada;

Cu: 5.970 kWh(térmico)/tonelada;

Zn: 1.492 kWh(térmico)tonelada;

B. – Perdas: geração da denominada "home scrap", onde não há perdas, pois o reciclo é contínuo e constante. Entretanto, há possibilidades de melhoras, ou sejam, decrescimos, das massas geradas como perdas, com a utilização de operações e/ou equipamentos mais eficazes.

2.6. Impactos Ambientais Identificados oriundos da Etapa de Manufatura

Observando a Figura 5, a seguir mostrada.

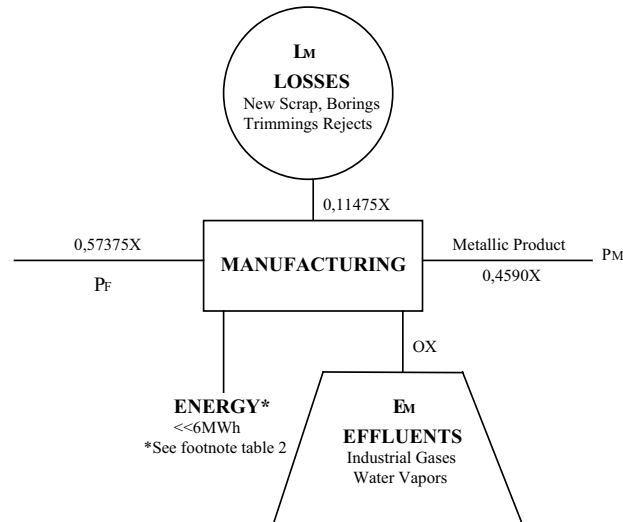


Figura 5 – Entradas/Saídas da Etapa de Manufatura

Onde: New Scrap = Sucata Nova; manufacturing = manufatura; metallic product = produto metalico; borings trimming rejects = aparas metálicas

A – Energia: bastante variável dependendo do particular produto metálico obtido através de forja, estamparia, usinagem, etc.. Entretanto, bem menos do que qualquer das etapas de produção anteriores.

B - Perdas: são as denominadas "sucatas novas", as quais são recicladas na produção secundária do metal em questão.

C. Efluentes: gases industriais e vapor d'água.

3. O PAPEL DO ENGENHEIRO MINERAL

Para que se tenha um apanhado geral do papel do profissional de operação e pesquisa imbuído do escopo do desenvolvimento sustentável no seu dia a dia operacional, favor lêr Conard(17), onde a drenagem ácida, a remoção dos metais dos efluentes industriais, gerenciamento do arsênico, redução de poluentes gasosos e conservação da energia, destruição de cianetos, processamento dos rejeitos e reciclagem são matérias analisadas e discutidas, através de exemplos selecionados de técnicas hidrometalúrgicas, para um meio ambiente saudável.

Para os interessados em novas técnicas e assuntos de pesquisa em hidrometalurgia e processamento aquoso de materiais e minerais industriais, as revisões de Doyle e Duyvesteyn são indicadas, bem como aquela periodicamente publicadas pelo JOM, como revisões de extração e processamento.

Santa Cruz de la Sierra, Bolívia,
JORNADAS IBEROAMERICANAS SOBRE TECNOLOGIAS LIMPIAS,
12 – 16 JUNIO,2006.

AECI/CYTED/ALFA/OLAMI