

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Departamento de Ciência do Solo

RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO

Prof. Dr. TIAGO OSÓRIO FERREIRA

Piracicaba
2016

Mineração: conceitos básicos

MINERAL: qualquer substância inorgânica, de ocorrência natural, com composição química definida e estrutura cristalina.

ROCHA: agregado natural, coerente, multigranular de uma ou mais espécies minerais.

FIGURE 4-3 A piece of sandstone, like that from Ayres Rock can be broken down into smaller and smaller parts, from sand grains to quartz crystals and then to individual atoms that form the crystals.

Mineração: conceitos básicos

Mineral	% em volume
Feldspatos	58
Piroxênio e Anfibólio	13
Quartzo	11
Micas e Argilominerais	10
Olivinas	3
Epidoto, Granada, Zeólita	2
Carbonatos, Óxidos, Sulfetos	3

Minerais formadores de rochas

Silicatos (Si, O) – 97% da crosta

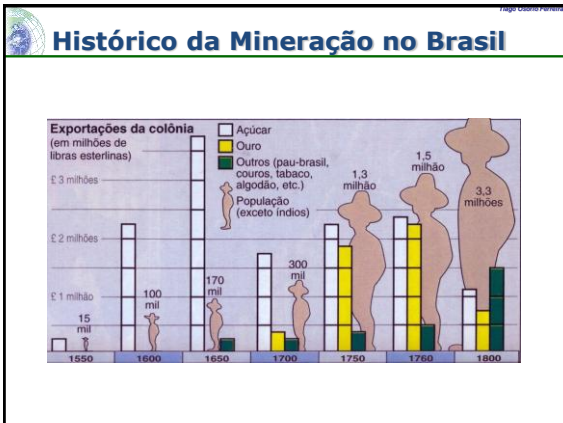
Constituição mineralógica (crosta)

FIGURE 1.7 The relative abundance of elements in the whole Earth compared to that of elements in Earth's crust, given as percentages by weight. Differentiation has created a light crust, depleted of iron and rich in oxygen, silicon, aluminum, calcium, potassium, and sodium. Note that oxygen, silicon, and aluminum alone account for over 80 percent of the crust.

Histórico da Mineração no Brasil

➤ **Ouro de "aluvião"**

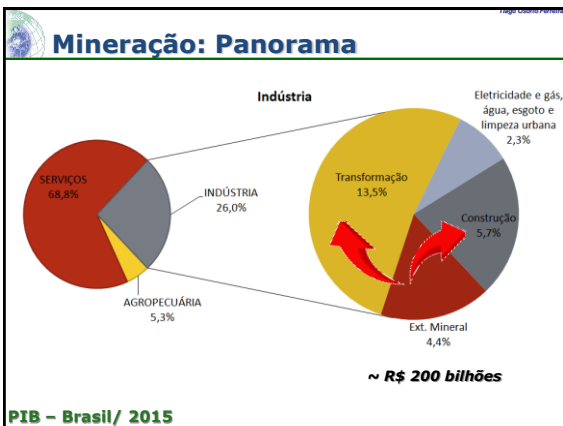
Lavagem de ouro em Itacolomi, Minas Gerais, em litogravura de Rugendas, 1827.

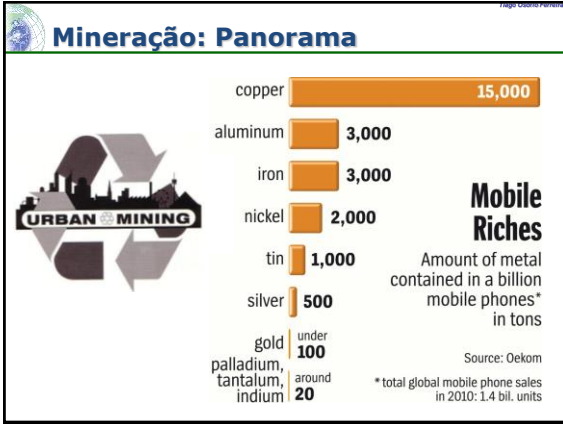




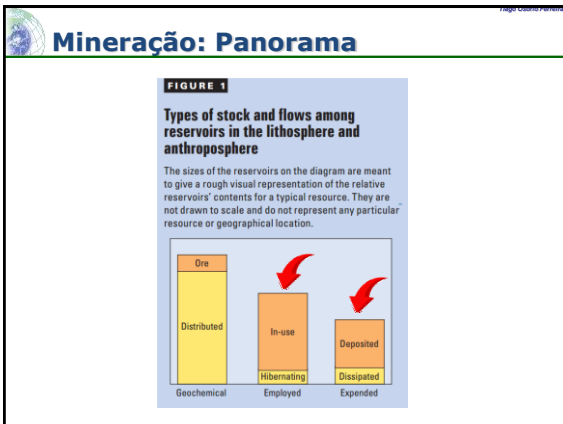












Mineração: Panorama

690 milhões de toneladas
United States Geological Survey (USGS, 2013)

FIGURE 4
Copper stock reservoir diagram for North America and Planet Earth
Details are discussed in the text.

Copper stock type	North America (Tg)	Global (Tg)
Ore	~100	~900
In-use	~50	~350
Hibernating	~10	~50
Deposited	~100	~300

landfill mining

Processo para a extração de materiais ou outros recursos naturais a partir de resíduos que tenham sido previamente eliminadas em um aterro.

Krook et al. (2012)

landfill mining

ETAPAS (*in situ* e *ex situ*)

- ✓ **Escavação;**
- ✓ **Transformação;**
- ✓ **Tratamento;**
- ✓ **Recuperação dos materiais.**

Krook et al (2012)





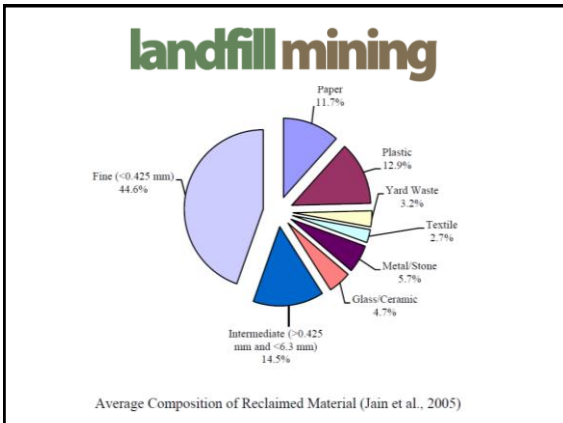












landfill mining

UE-27: 150.000 – 500.000 aterros

- ✓ **Redução de emissões de GEE:** de 15 - 75 milhões de ton CO₂(eq)/ano (~15% da emissão anual no Brasil).
- ✓ **Matéria-prima secundária:** 11.000 milhões de toneladas métricas → 5% do Consumo anual de recursos não energéticos e não-alimentares da UE-27 para os próximos 25 anos.
- ✓ **Recuperação de áreas:** 6.000 km² na UE (5 x Piracicaba).

Mineração: Panorama

LAVRA: conjunto de operações que objetivam o aproveitamento industrial de jazidas (extração → beneficiamento).

1. A céu aberto (em cavas)
2. Subterrânea
3. Dragagem
4. Abatimento
5. Garimpagem Manual
6. Garimpagem com ação de águas pluviais
7. Garimpagem com ação de águas fluviais
8. Garimpagem desmonte hidráulico



Mineração: Impactos

Alteração de lençol de água subterrâneo

Vibrações

Poluição sonora

Poluição da água

Poluição visual

Poluição do ar

Degradação e perda do solo

Erosão

Assoreamento

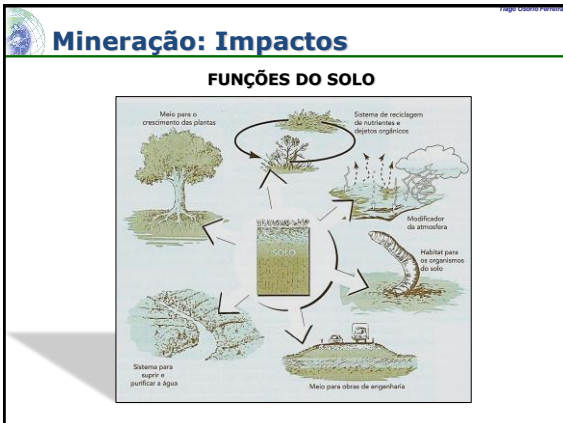
Lançamento de fragmentos

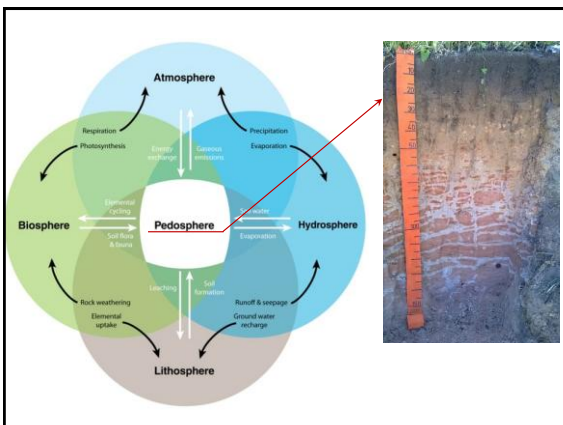
Impactos sobre fauna e a flora

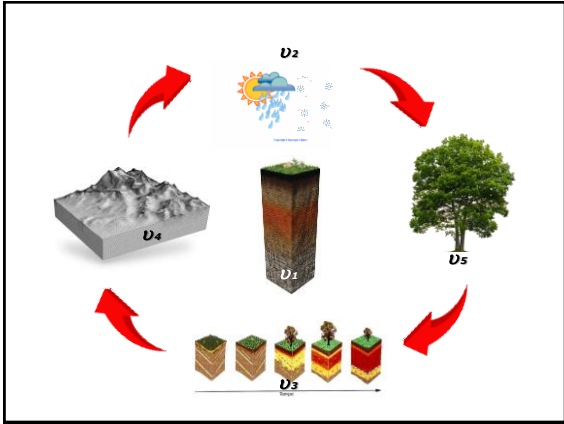
Alteração da paisagem



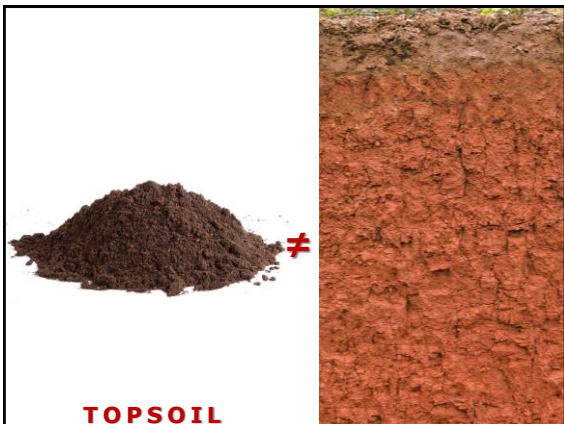
POLUIÇÃO E PERDA DE SOLO























Mineração: Impactos

Sulfetos Metálicos → Pirita (FeS₂)

Mineração: Impactos

ACIDIFICAÇÃO INTENSA QUANDO DRENADOS:

$$\text{FeS}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+$$

↓
H₂SO₄

QUEDA DE pH

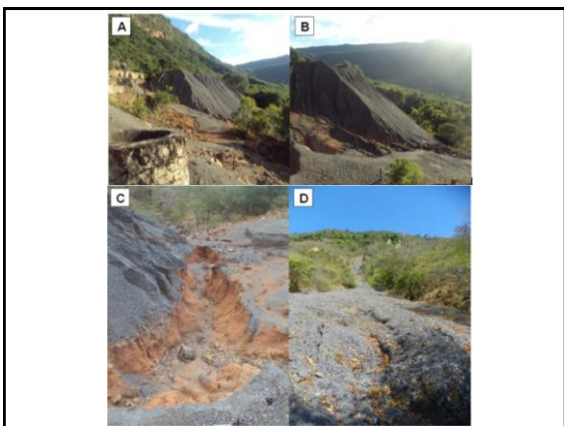
LIBERAÇÃO DE METAIS PESADOS

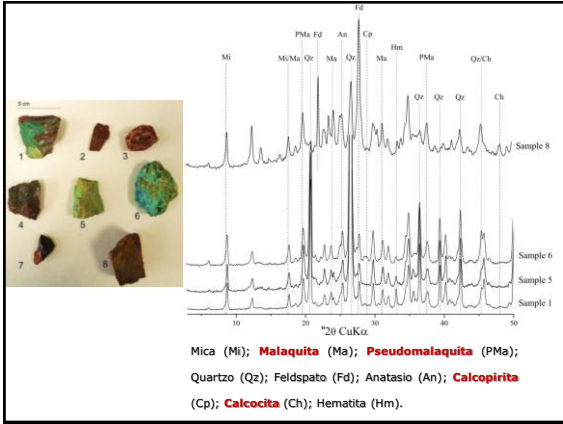
Mineração: Impactos

Rio Tinto (Andalusia, Espanha)









$2FeS_2 + 7.5 O_2 + 7H_2O \leftrightarrow 2Fe(OH)_3 + 4SO_4^{2-} + 8H^+$ reaction 1
 $CuFeS_2 + 15/4O_2 + 7/2H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_3 + 2SO_4^{2-} + Cu^{2+} + 4H^+$ reaction 2
 $Cu_3FeS_4 + 31/4O_2 + 7/2H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_3 + 4SO_4^{2-} + 3Cu^{2+} + 4H^+$ reaction 3

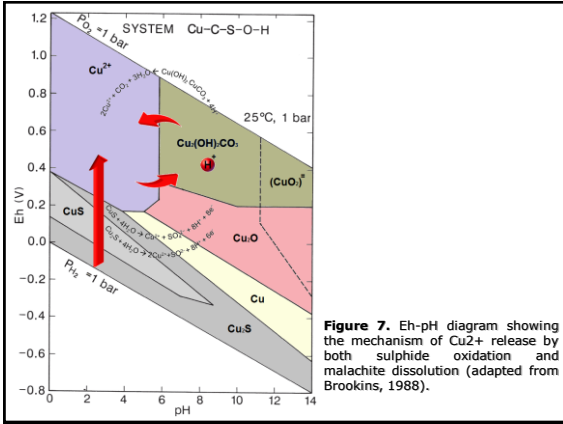
⇕

$Cu_2(OH)_2CO_3 (s) + H_2O \rightarrow 2Cu^{2+}(aq) + 3OH^-(aq) + HCO_3^-(aq)$ reaction 4
 $Cu_5(PO_4)_2(OH)_4 (s) + H_2O \rightarrow 5Cu^{2+}(aq) + 5OH^-(aq) + HPO_4^{2-}(aq)$ reaction 5

$2FeS_2 + 7.5 O_2 + 7H_2O \leftrightarrow 2Fe(OH)_3 + 4SO_4^{2-} + 8H^+$ reaction 1
 $CuFeS_2 + 15/4O_2 + 7/2H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_3 + 2SO_4^{2-} + Cu^{2+} + 4H^+$ reaction 2
 $Cu_3FeS_4 + 31/4O_2 + 7/2H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_3 + 4SO_4^{2-} + 3Cu^{2+} + 4H^+$ reaction 3

⇕

$Cu_2(OH)_2CO_3 (s) + H_2O \rightarrow 2Cu^{2+}(aq) + 3OH^-(aq) + HCO_3^-(aq)$ reaction 4
 $Cu_5(PO_4)_2(OH)_4 (s) + H_2O \rightarrow 5Cu^{2+}(aq) + 5OH^-(aq) + HPO_4^{2-}(aq)$ reaction 5









Fonte: Johann Earle



Fonte: Johann Earle

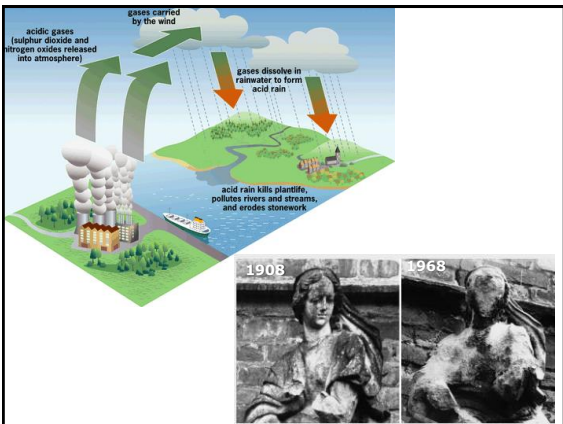


POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA





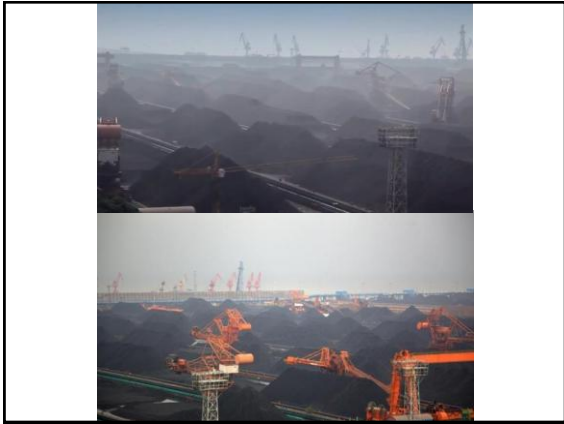
Alberta, Canada





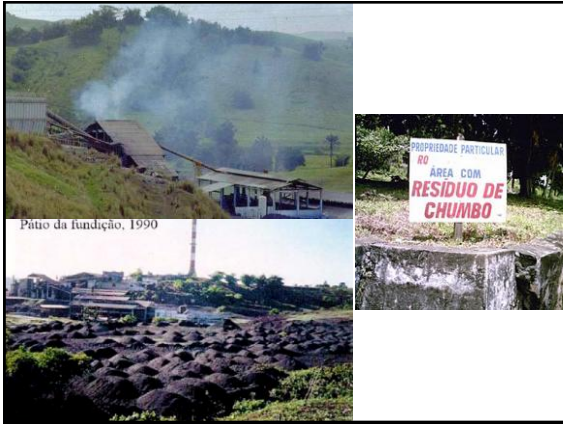


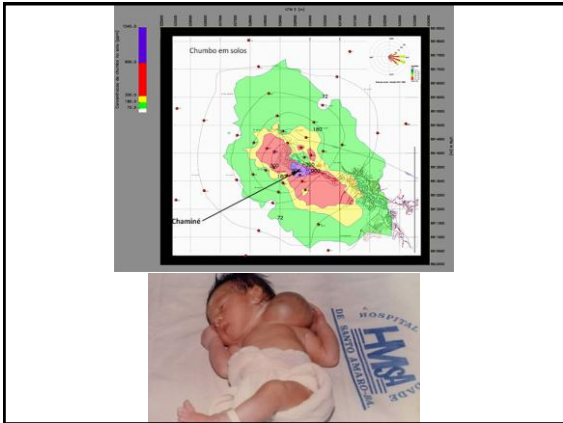


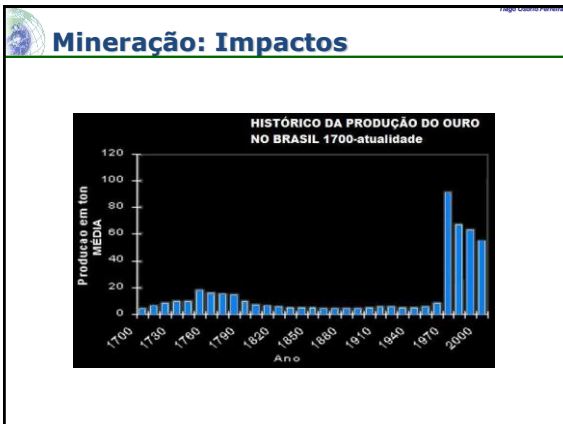












Mineração: Impactos

Serra Pelada garimpo: The largest South American gold rush, Bernadelli (1983)

Mineração: Impactos

AMALGAMAÇÃO

Fator de Emissão
2 a 4 kg Hg/ kg Au

↓

~180 ton Hg/ ano

Mineração: Impactos

Tabela 2. Comparação entre as emissões antropogênicas de mercúrio para a atmosfera no Brasil, baseado em Lacerda (1996)¹ levando em consideração a situação em 1990.

Sector	Parâmetros de produção/consumo	Parâmetros de emissão para a atmosfera	Emissão (t.ano ⁻¹)	% do total
Produção de cloro	25.7 tHg.yr ⁻¹	45%	11.65	10.1
Produção de soda	125 gHg.t ⁻¹ KOH	45%	0.37	0.3
Tintas & pigmentos	34.3 tHg.yr ⁻¹	1%	0.34	0.3
Eletrô-eletrônico	9.1 tHg.yr ⁻¹	0.2%	0.02	-0.1
Combustão de carvão	27.2 x 10 ⁶ MJ.yr ⁻¹	0.13 µgHg.MJ ⁻¹	0.01	-0.1
Combustão de óleo	28.3 x 10 ⁶ MJ.yr ⁻¹	0.33 µgHg.MJ ⁻¹	0.01	-0.1
Combustão de biomassa	4.8 x 10 ⁶ MJ.yr ⁻¹	0.03 g.t ⁻¹	0.12	0.1
Pirometalurgia Pb	62.023 t.yr ⁻¹	2-4 gHg.tPb ⁻¹	0.19	
Zn	163.000 t.yr ⁻¹	8-45 gHg.tZn ⁻¹	4.30	3.9
Cd	197 t.yr ⁻¹	8-45 gHg.tCd ⁻¹	0.05	
Produção de aço e ferro	15 x 10 ⁷ t.yr ⁻¹	0.08gHg.t ⁻¹	12	10.4
Queimadas	11.100 km ² .yr ⁻¹	7.8 gHg.ha ⁻¹	8.7	7.5
Garimpos de ouro	87 tAu.yr ⁻¹	0.92 tHg.tAu ⁻¹	77.9	67.3
Total	-	-	115.7	100

QUÍMICA NOVA, 20(2) (1997)

IMPACTOS SOCIAIS





Mineração: Impactos

13/10/2015 20:28 - Atualizado em 13/10/2015 20:28

MPF pede fechamento de garimpo ilegal em cidade no oeste de MT

Jazidas de ouro próximas a Pontes e Lacerda têm atraído 'aventureiros'. MPF alega que exploração ocorre sem autorização de órgão nacional.

14/10/2015 19:54 - Atualizado em 14/10/2015 17:27

Prefeito teme problemas sociais em cidade de MT após corrida por ouro

Jazida perto de Pontes e Lacerda tem atraído pessoas de outros estados. MPF pediu fechamento de garimpo e estado ainda avalia forma de intervir.

16/10/2015 19:02 - Atualizado em 16/10/2015 23:03

Juiz manda fechar 'nova Serra Pelada' que atraiu 5 mil em busca de ouro

Foi determinada a apreensão de ouro e multa diária de até R\$ 100 mil. Extração irregular de minério em MT atraiu pessoas de todo o país.















 **Mineração: Impactos** Imagem: Conselho Nacional



 **Mineração: Impactos** Imagem: Conselho Nacional

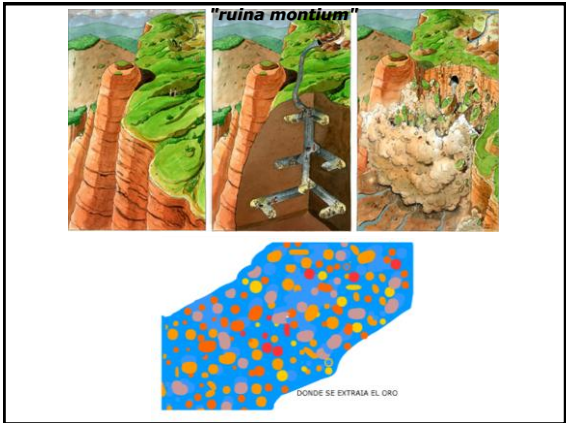


Mariana - MG - Samarco



Mariana - MG - Samarco







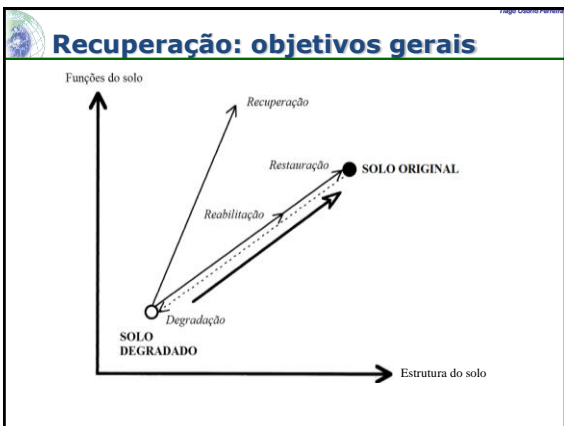


Recuperação: objetivos gerais

Recuperar...

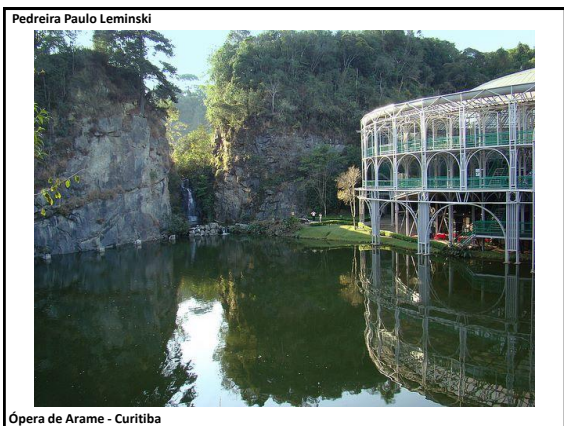
- ✓ A fertilidade do ecossistema,
- ✓ Seus valores ecológicos,
- ✓ Econômicos e
- ✓ Estéticos

de "Restaurar"









Recuperação: objetivos gerais



Pedreira Paulo Leminski

Recuperação: objetivos gerais



Raia Olímpica - USP

Recuperação: objetivos específicos

- ✓ Remoção de instalações e estruturas que ameacem a **saúde humana**;
- ✓ Re-vegetação e **estabilização de resíduos**;
- ✓ Reduzir o potencial de **drenagem ácida** ou **contaminação**;
- ✓ Desenvolvimento de **espaços públicos** para fins de recreação, construção, históricos ou de conservação

Recuperação: escolha da técnica

Alteração de lençol de água subterrâneo

Vibrações

Erosão

Poluição sonora

Assoreamento

Poluição da água

Lançamento de fragmentos

Poluição visual

Impactos sobre fauna e a flora

Poluição do ar

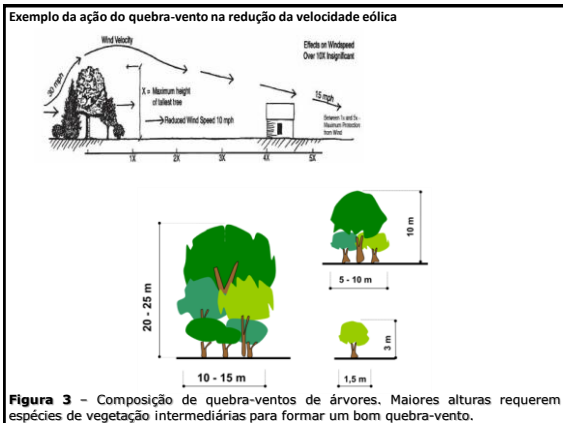
Alteração da paisagem

Degradação e perda do solo

POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Técnicas de recuperação





Técnicas de recuperação

Table 5. Useful plant species useful for controlling air pollution

Special properties	Name of species
Pubescence on leaves to entrap and hold dust particles	<i>Guazama, Putranjiva, Nyctanthes, Trema, Holoptelea, Terminalia</i>
Leaves and branches to slow wind	<i>Albizia, Samania, Peltophorum, Tamarindus, Dalbergia</i>
Blossoms and foliage that provide pleasant smell to mask odour	<i>Morinda, Cestrum, Annona, Michelia, Jasminum, Citrus, Plumeria, Magnolia</i>
Leaves and branches to slow the action of rain	<i>Azadirachta, Melia, Acacia auriculiformis, Delonix, Cassia</i>
Plants that absorb SO ₂	<i>Lichens, Fagus, Acer</i>







Técnicas de recuperação



Figure 2: 'Mega-dump' of reprocessed gold tailings, south-east of Springs, Gauteng Province. Heavy rains in February 2008 led to landslides that denuded large parts of the previously vegetated slope.

Técnicas de recuperação



Crescimento das gramíneas após 1 mês de plantio.

Técnicas de recuperação

Resultado após 30 dias de plantio



Figure 8: Photo comparison of vegetation cover developing

Técnicas de recuperação



Lan – Geotecnia e Fundação

Técnicas de recuperação



Lan – Geotecnia e Fundação

Técnicas de recuperação



Lan – Geotecnia e Fundação

Técnicas de recuperação

Nome Comum	Nome Científico	Quantidade (Kg / ha) / Declividade	
		< 45°	≥ 45°
Aveia-preta	<i>Avena strigosa</i>	20	30
Braquiária	<i>Brachiaria decumbens</i>	40	60
Braquiário	<i>Brachiaria brizantha</i>	20	30
Fajão guandu	<i>Cajanus cajan</i>	20	30
Calopogônio	<i>Calopogonium mucunoides</i>	10	20
Capim-gordura	<i>Melinis minutiflora</i>	40	80
Crotalaria	<i>Crotalaria spectabilis</i>	20	30
Nabo forrageiro	<i>Raphanus sativus</i>	20	10

Lan – Geotecnia e Fundação

Técnicas de recuperação

Lan – Geotecnia e Fundação

Mineração de ferro do Complexo Carajás – PA

Figura 5. Disposição dos micro-terraços sobre os taludes de aterro e início do processo de germinação das espécies comerciais e nativas (Fonte: Gonçalves, F.S.).

Gonçalves, 2012

Técnicas de recuperação

Possíveis componentes para o **substrato**:

1. Selantes
2. Quebra de capilaridade
3. Topsoil

Técnicas de recuperação



The image shows a laboratory experiment with several glass tubes containing different materials. A diagram on the right illustrates a cross-section of a substrate with a 'SELANTE' (sealant) layer, a 'QUEBRA CAPILARIDADE' (capillary break) layer, and 'RESÍDUOS' (residues) at the bottom.

Fonte: Luiz E. Dias UFV/DPS

Técnicas de recuperação

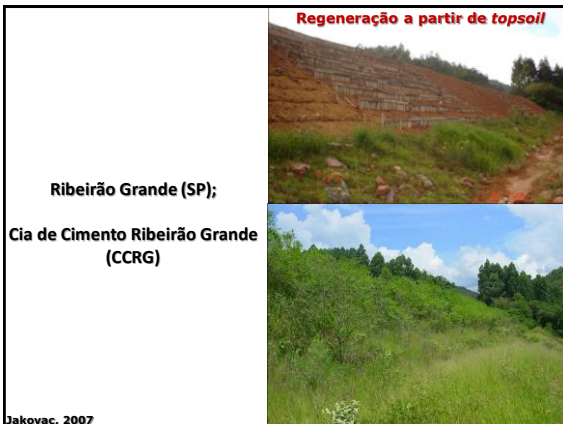
TOPSOIL

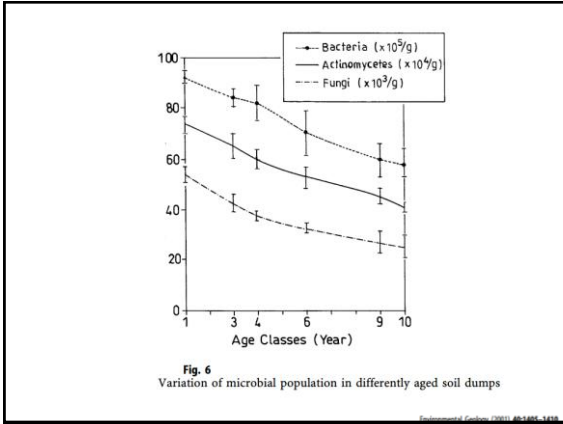


The flowchart illustrates the topsoil management process in coal mining. It is divided into three main stages: 1. Land Clearing and Topsoil Removal, 2. Topsoil Placement, and 3. Rehabilitation. The process involves Overburden Dumping, Overburden Drilling and Blasting, Overburden Removal, Coal Drilling and Blasting, Coal Mining, Coal Preparation, Coal Washing (optional), Overland Conveyor, Port Stockpile, and Coal Shipment.









Topsoil: estocagem

Altura

- ✓ 5 metros (max) arenosos
- ✓ 2-3 metros text. média
- ✓ 1 metro argilosos

Técnicas de recuperação

Topsoil: manejo

Qualidade

1. Acidez
2. Salinidade
3. Sodicidade
4. Inoculação
5. Adubação (macro e micro)
6. Características físicas (água, raízes)





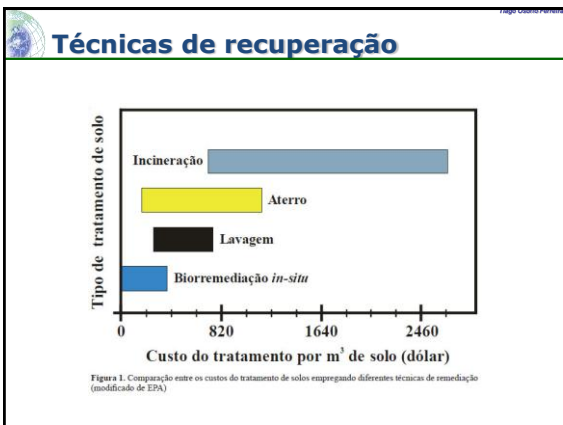


Figura 1. Comparação entre os custos do tratamento de solos empregando diferentes técnicas de remediação (modificado de EPA)

Técnicas de recuperação

K. A. NARAYANAN, Nanoscale Mat. Sci. China 18(2010)

Fig. 1 Morphological features of micro-organisms: (a) *Acidithiobacillus ferrooxidans*; (b) *Leptospirillum ferrooxidans*; (c) Black sulfide precipitate due to growth of SRB; (d) *Desulfotributyrus* spp.; (e) *Desulfotomaculum agglomerans*; (f) *Thiobacillus* spp.

Técnicas de recuperação

Fig. 2. Scanning electron micrographs of precipitates containing sulphate-reducing bacteria SRB-GJ.

$$\text{Organic matter (C, H, O)} + \text{SO}_4^{2-} \xrightarrow{\text{SRB}} \text{HS}^- + \text{HCO}_3^-$$

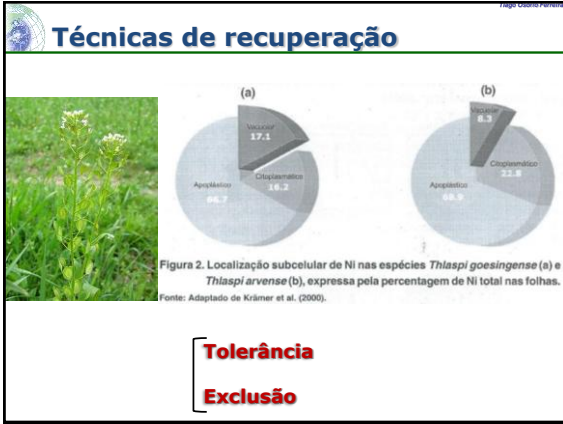
$$\text{Me}^{2+} + \text{HS}^- \rightarrow \text{MeS(s)} + \text{H}^+ (\text{Me}^{2+} \text{—the metal cation})$$

Técnicas de recuperação

Fitorremediação

Phytovolatilização
Phytotransformação
Phytodegradação
Phytostabilização
Phytoremediação

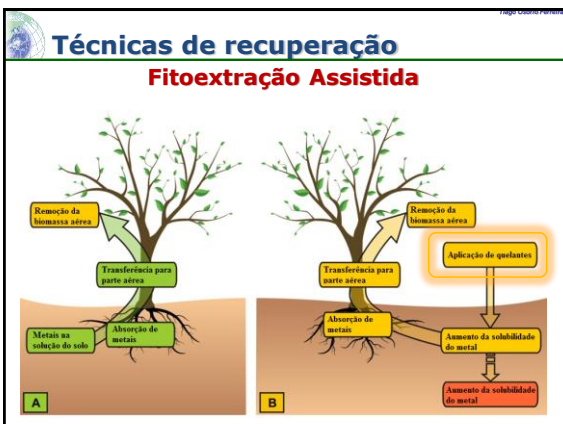
FONTE: Favas et al., 2014

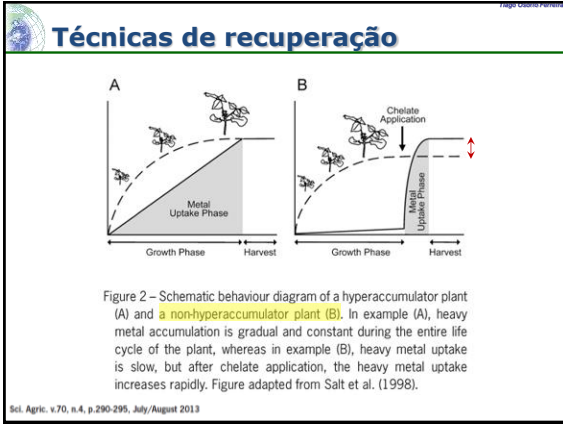


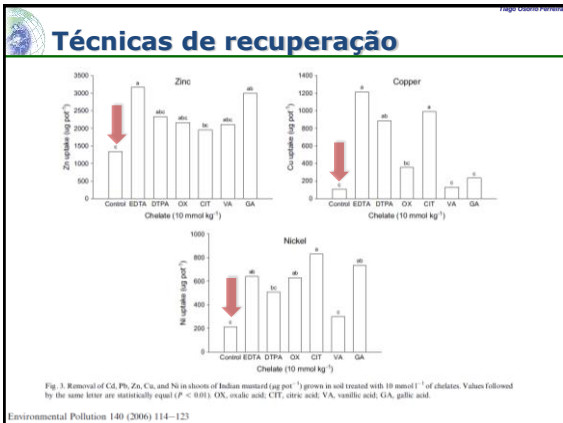
Técnicas de recuperação

Limitações

- Limited to shallow soils or where contamination is localized to the surface (< 5 m)
- Still under development and therefore not accepted by many regulatory agencies
- There is little knowledge of farming, genetics, reproduction and diseases of phytoremediating plants
- Metal concentrations in the soil can be toxic and lethal to plants
- Generally, plants are selective in metal remediation
- Treatment slower than the traditional physico-chemical techniques
- Contamination may spread through the food chain if accumulator plants are ingested by animals
- Efficient phytoremediating plants may not adapt to climatic and environmental conditions at contaminated sites
- If the plants release compounds to increase the mobility of the metals, these can be leached into groundwater
- The area to be decontaminated must be large enough to allow application of cultivation techniques
- Toxicity and bioavailability of degradation products remain largely unknown







Técnicas de recuperação

Quadro 3. Espécies de plantas com elevada produção de biomassa e potencial de uso na fitoextração

Espécie	Contaminante/substrato	Referência
<i>Salix</i>	Metais pesados/solo	Greger & Landberg (1999)
<i>Populus</i>	Ni/solo, água, água subterrânea	Barceló & Poschenrieder (2003)
<i>Brassica napus</i> , <i>B. juncea</i> , <i>B. nigra</i>	Metais pesados, Se/solo	Brown (1996); Bañuelos et al. (1997)
<i>Cannabis sativa</i>	Cd/solo	Ostwald (2000)
<i>Helianthus</i>	Pb, Cd/solo	EPA (2000); Eikatib et al. (2001)
<i>Phragmites australis</i>	Metais pesados/rejeitos	Massacci et al. (2001)
<i>Glyceria fluitans</i>	Metais pesados/rejeitos	McCabe & Otte (2000)

Técnicas de recuperação

1. Domesticação

2. Plantas com potencial + quelantes

3. Transgênicas

Perspectivas

Técnicas de recuperação

FITOMINERAÇÃO
"colheita" / recuperação de metais

Metabolism, Phytoextraction, Translocation

Metal uptake through bio-exchange of the growth

\$\$\$

Técnicas de recuperação

THE PHYTOMINING OPERATION

1 Crop grown on soil containing metal concentration too low for conventional exploitation. Complexing agents may be added to enhance metal uptake of crop. Nickel / Thallium / Gold

2 Possible production of electricity. Plant material burnt

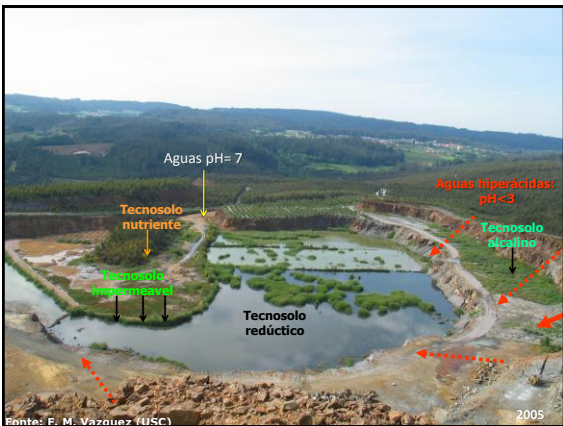
3 Small volume of plant ash (bio-ore) containing high concentration of target metal. Small bio-ore to yield metal

Journal of Environmental Engineering 4(1) (1996) 40(1-15)

Fig. 4. Model of a proposed system for phytomining for metals.









 **Técnicas de recuperação** Trabalho de conclusão de curso



The top photograph shows a large-scale excavation or construction site with a deep, wide trench and rocky walls. The bottom photograph shows a restored area with a winding river, green vegetation, and a paved path, illustrating the final stage of the restoration process.

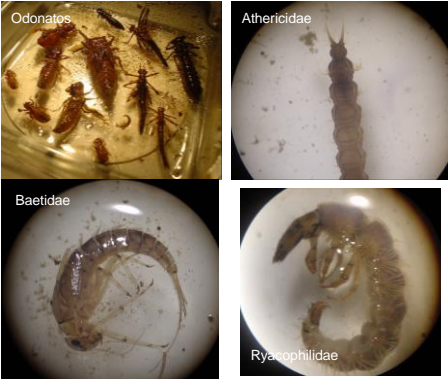
 **Técnicas de recuperação** Trabalho de conclusão de curso



The collage consists of six small photographs arranged in two rows. The top row shows the initial stages of restoration in 1988, 2005, and 2006. The bottom row shows the progress in 2007 and 2008, culminating in a large aerial view of the fully restored landscape at the bottom of the collage.

Fonte: F. M. M. (2007)

MACROINVERTEBRADOS



Fonte: F. M. Vazquez (USC)

VERTEBRADOS



Fonte: F. M. Vazquez (USC)

Técnicas de recuperação