



PHA 3523 – TECNOLOGIAS DE REMEDIÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS

Biorremediação

Aulas 10 e 11

Fundamentos

- O que se entende por biorremediação?
- Quais processos estão envolvidos?
- A que tipo de contaminantes pode ser aplicada?
- Para que meios pode ser aplicada?
- Como controlar?

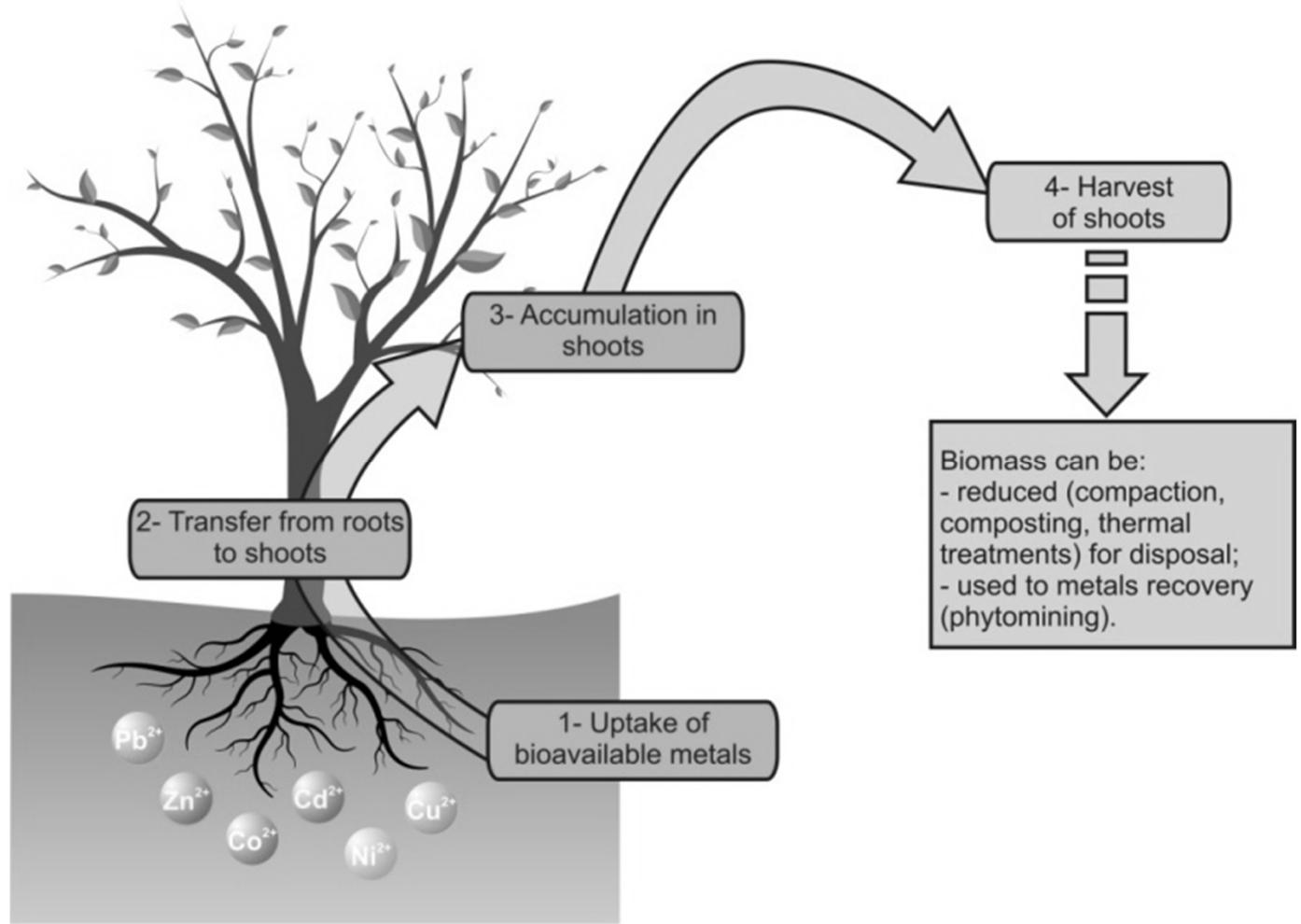
Biorremediação

- Procedimentos que utilizam processos ou mecanismos biológicos para a degradação de compostos orgânicos ou extração de compostos inorgânicos do solo ou da água subterrânea;
 - Ação de micro-organismos nativos do ambiente ou introduzidos na região onde os contaminantes estão presentes;
 - Ação de plantas que apresentam capacidade de extração/assimilação de contaminantes inorgânicos ou orgânicos recalcitrantes, presentes na zona de raiz;

Mecanismos do processo de fitorremediação



Fitorremediação de solos contaminados com metais biodisponíveis



Processos envolvidos

- **Oxidação aeróbia:** O processo de degradação do contaminante é mediado pelo oxigênio, que atua como acceptor de elétrons, através do mecanismo de respiração celular, gerando energia e gás carbônico (Ciclo de Krebs);
- **Oxidação anaeróbia:** O processo de degradação do contaminante é mediado por um acceptor de elétron como o nitrato, sulfato, íon férrico ou magênico, ou dióxido de carbono;
- **Cometabolismo:** O contaminante não é diretamente degradado pelo micro-organismos, mas por enzimas resultantes da degradação de outros compostos presentes.

Para quais contaminantes podem ser aplicados e em que condições

- **Processos aeróbios:** Utilizado para processos de remediação de áreas contaminadas por:
 - Hidrocarbonetos aromáticos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, nitrobenzeno, compostos fenólicos não clorados, aminas aromáticas, e alguns solventes clorados;
- **Condições:** Requer o fornecimento de oxigênio e caso necessário nutrientes.

Para quais contaminantes podem ser aplicados e em que condições

- **Processos anaeróbios:** Utilizado para processos de remediação de áreas contaminadas por:
 - Compostos clorados alifáticos, tolueno, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, nitrobenzeno, clorobenzeno, compostos fenólicos não clorados, aminas aromáticas e defensivos agrícolas;
- **Condições:** Necessidade de adição de nutrientes e alguma fonte de carbono facilmente biodegradável.

Para que meios podem ser aplicados

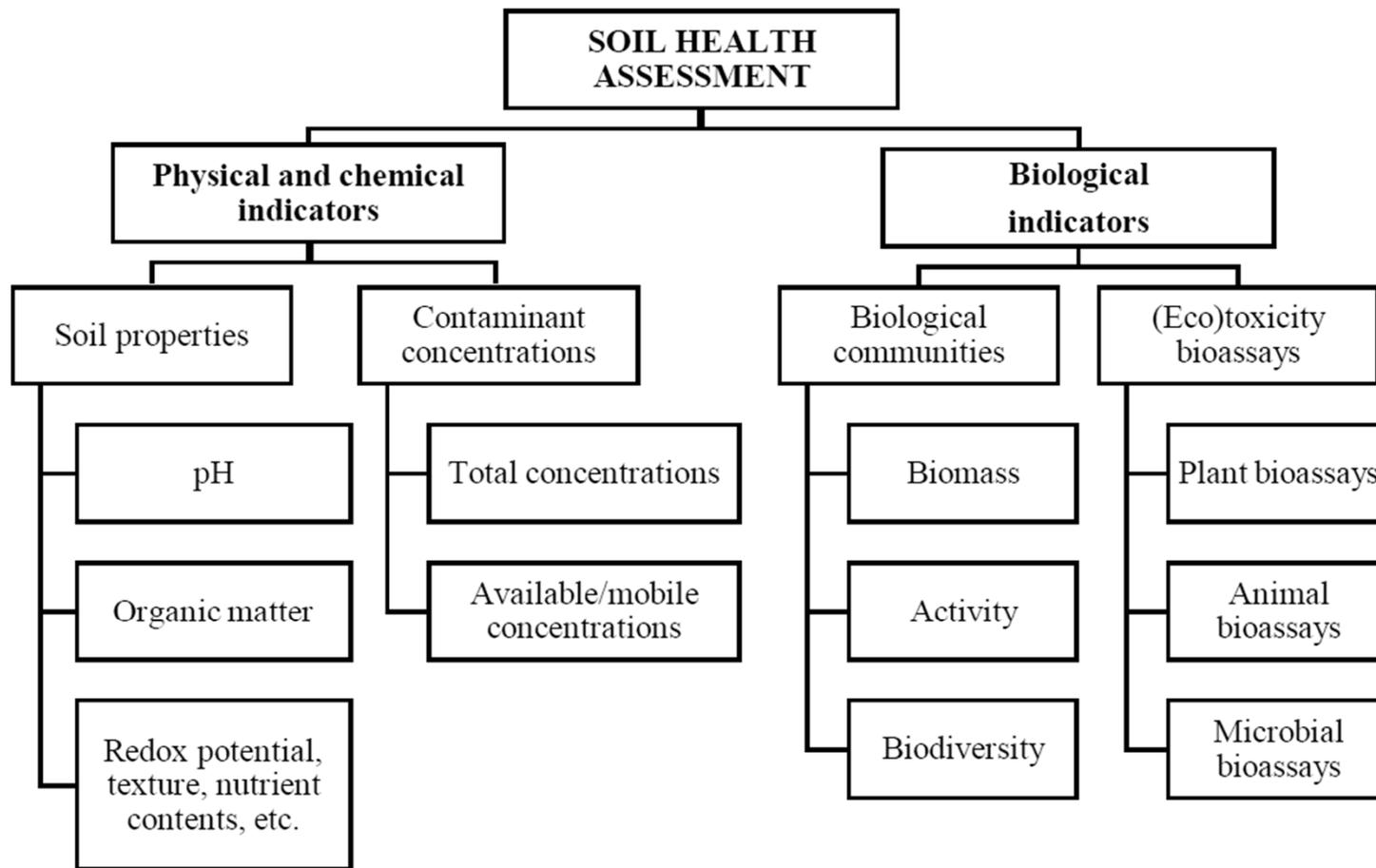
- Características dos contaminantes:
 - Compostos susceptíveis ao processo de degradação biológica.
- Características do subsolo:
 - Solo com características uniformes, argilo-arenosos, com presença de humus, caracterizado por uma condutividade hidráulica entre média e alta ($K > 10^{-5}$ cm/s);
 - pH variando entre 6 e 8;
 - Umidade superior à 10% em volume;
 - A temperatura também é um parâmetro relevante.

Efetividade do processo de remediação em função das condições ambientais indicadas

PARAMETER	VERY EFFECTIVE	MODERATELY EFFECTIVE	INEFFECTIVE
CONTAMINATION CHARACTERISTICS			
TYPE OF CONTAMINANT	<p>Aerobic Process: aromatic hydrocarbons, nitrobenzene, non-chlorinated phenols, IPAs, aromatic amines and some chlorinated solvents</p> <p>Anaerobic Process: chlorinated aliphatic compounds (PTC, TCE, dichloroethylen), toluene, IPA, nitrobenzene, chlorobenzene, non-chlorinated phenols, aromatic amines, PCB and other organic chlorinated pollutants (pesticides, etc.)</p>	<p>Aerobic Process: lightly chlorinated PCB, chlorinated phenols, cresols and some pesticides and plant protection products</p> <p>Anaerobic Process: o-xylene and m-xylene, chlorinated phenols, plant protection products, some metals and inorganic compounds</p>	<p>High concentration of organic contaminants;</p> <p>Inorganic contaminants, heavy metals, chlorinated compounds</p>
CONTAMINATION PHASE	Dissolved contaminant	Adsorbed contaminant	Product in separated phase

Efetividade do processo de remediação em função das condições ambientais indicadas (cont.)

CONTAMINATION DISTRIBUTION			
PLUME EXTENSION	Any extension	-	-
POLLUTANT LOCATION	Near groundwater table	In shallow aquifers	In confined deep aquifers
SUBSOIL CHARACTERISTICS			
LITHOSTRATIGRAPHY	Even soil with loamy-sandy to gravelly particle size	Poorly layered, loamy-sandy and gravelly soil	Silt and clay, and soil with very fine particle size
HYDRAULIC CONDUCTIVITY (K)	$>10^{-4}$ m/s	$10^{-5} \div 10^{-4}$ m/s	$<10^{-5}$ cm/s
OVERALL LEVEL OF HETEROGENEITY	Limited or isotropic	Moderate	High



Avaliação das características do solo em relação ao potencial de aplicação de tecnologias de biorremediação

TABLE 3-2: TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX

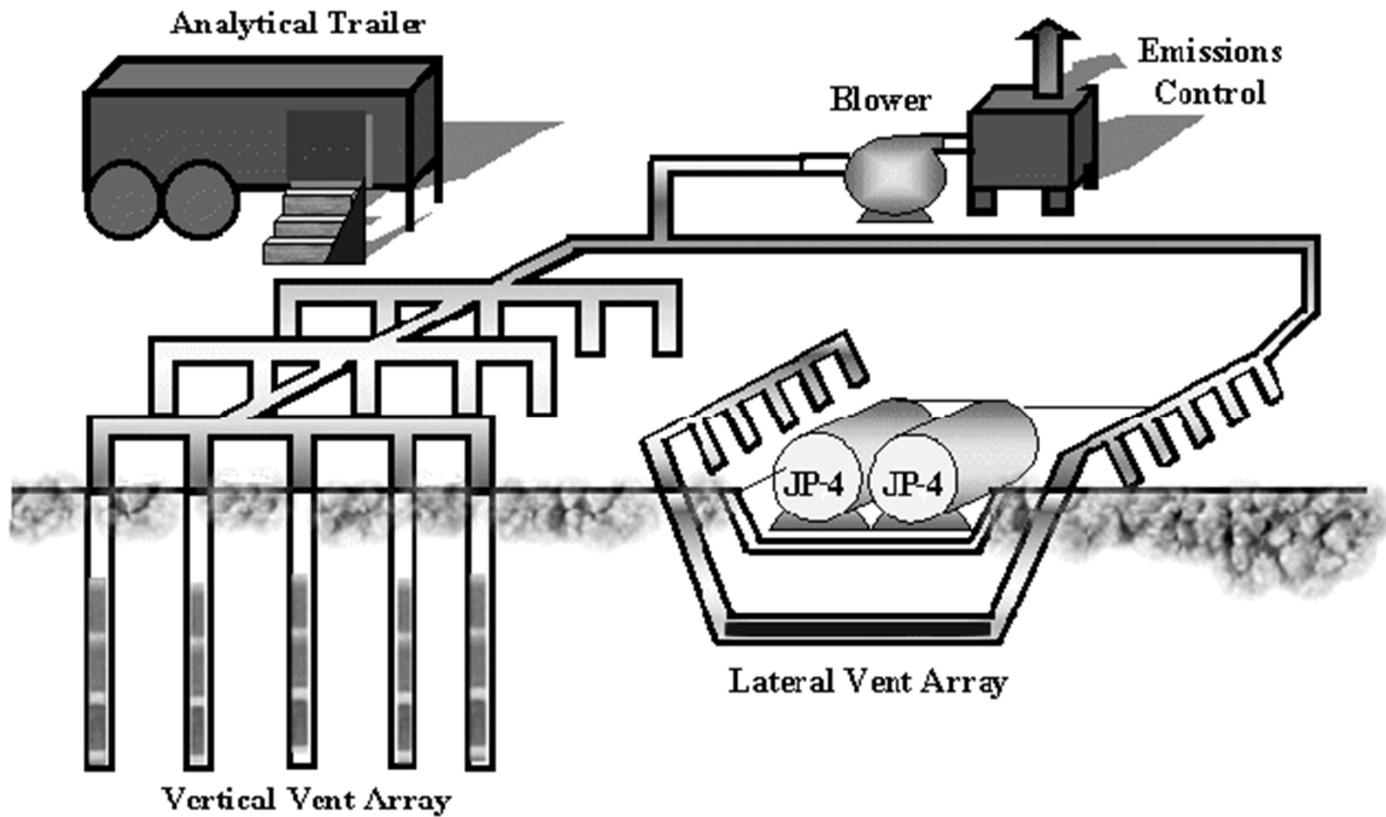
Rating Codes ● Above Average ○ Average ○ Below Average N/A - "Not Applicable" I/D - "Insufficient Data" ◇ - Level of Effectiveness highly dependent upon specific contaminant and its application	Development Status	Treatment Train	Relative Overall Cost & Performance					Availability	Nonhalogenated VOC's	Halogenated VOC's	Nonhalogenated SVOC's	Halogenated SVOC's	Fuels	Inorganics	Radionuclides	Explosives
			O&M	Capital	System Reliability & Maintainability	Relative Costs	Time									
Soil, Sediment, Bedrock, and Sludge																
3.1 In Situ Biological Treatment																
4.1 Bioventing	●	●	●	●	●	●	○	●	●	◇	●	○	●	○	◇	○
4.2 Enhanced Bioremediation	●	●	○	○	○	●	○	●	●	●	●	◇	●	◇	◇	●
4.3 Phytoremediation	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○	○	◇	○	○	○	○
3.4 Ex Situ Biological Treatment (assuming excavation)																
4.11 Biopiles	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	○	◇	●	◇	○	○
4.12 Composting	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○	○	◇	●	○	○	●
4.13 Landfarming	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○	●	○	○	◇
4.14 Slurry Phase Biological Treatment	●	○	○	○	○	○	○	●	○	●	●	◇	●	◇	○	●

Bioventilação

- Refere-se ao processo que utiliza a injeção de ar na área contaminada para favorecer o processo de biodegradação dos contaminantes presentes;
- Utiliza baixas taxas de aplicação de ar, visando reduzir o processo de arraste e volatilização de contaminantes.

Bioventilação (cont.)

- Possibilita a degradação de compostos orgânicos voláteis, desde que esses sejam transportados lentamente através da camada biologicamente ativa do solo;
- É uma tecnologia de médio a longo prazo, com prazos de remediação que podem variar de alguns meses à vários anos.



Arranjo esquemático de uma estrutura de bioventilação

Processo de bioventilação

- Aplicação:

- Solos contaminados com hidrocarbonetos de petróleo, solventes não clorados, alguns pesticidas, preservantes de madeira e outros compostos químicos;
- Embora contaminantes inorgânicos não possam ser degradados, a bioventilação pode promover a sua oxidação, possibilitando a redução da sua mobilidade através de mecanismos de adsorção no solo, assimilação e acumulação em micro ou macro-organismos.

Processo de bioventilação (cont.)

■ Limitações:

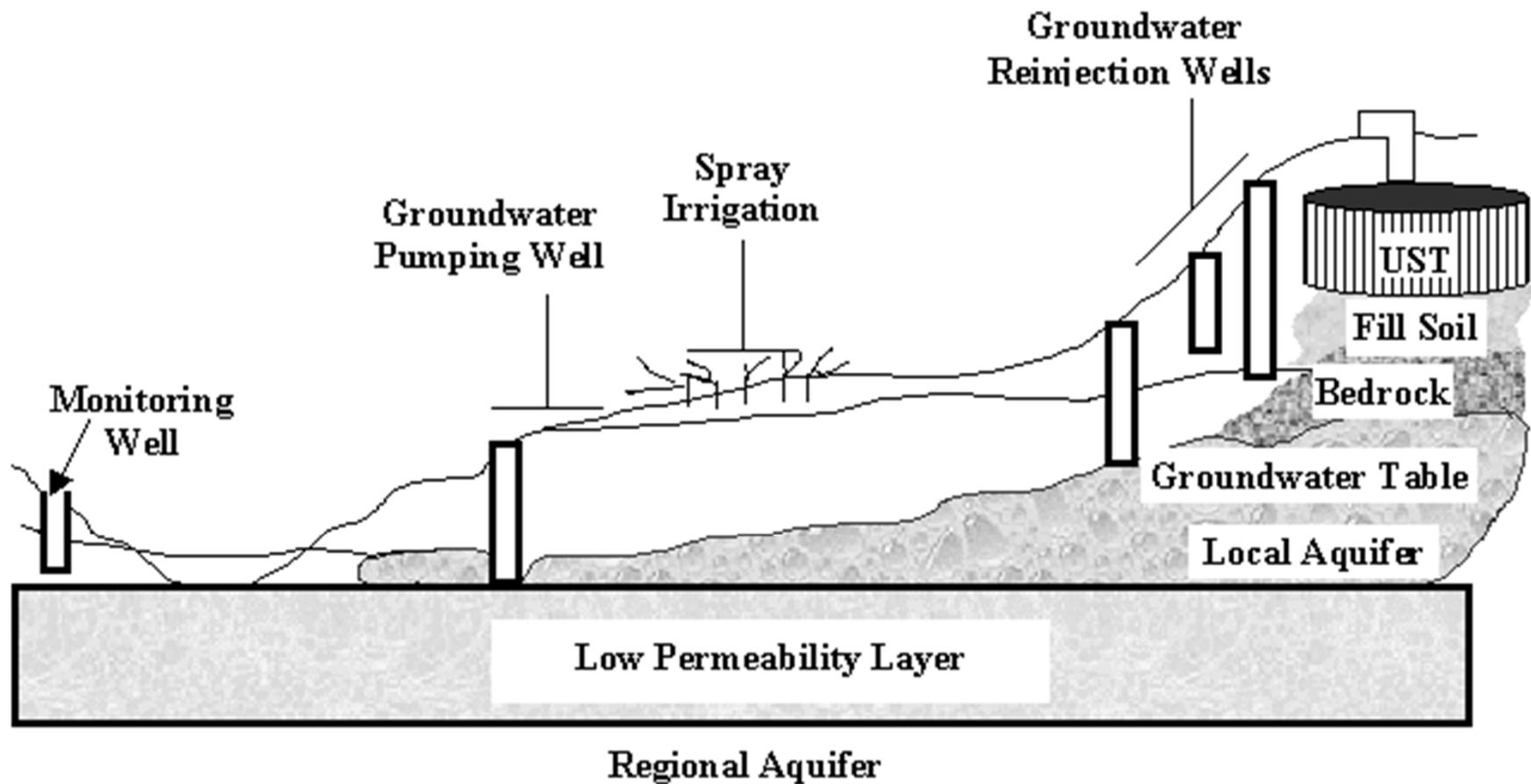
- Não é indicado para solos com lençol freático muito superficial, solos saturados ou pouco permeáveis, em função da redução do desempenho do processo;
- Solos com baixa umidade podem limitar a ação dos micro-organismos;
- Necessidade de monitoramento dos gases de exaustão;
- A oxidação de compostos clorados pode requer a adição de um co-metabólito.

Estimativa de custo do processo de
remediação por bioventilação

SOIL TECHNOLOGY: Bioventing				
RACER PARAMETERS	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D
	Small Site		Large Site	
	Easy	Difficult	Easy	Difficult
Type of Installation	Vertical Well	Vertical Well	Vertical Well	Vertical Well
Soil Type	Sand-Silt/Sand-Clay Mixture	Silt/Silty-Clay mixture	Sand-Silt/Sand-Clay Mixture	Silt/Silty-Clay mixture
Safety Level	D	D	D	D
Surface Area of Contamination (SF)	450	450	9,000	9,000
Depth to Base of Contamination (ft)	5	5	5	5
Contaminated Volume (Cubic Feet)	2,250	2,250	45,000	45,000
Contaminated Volume (Cubic Yards)	83	83	1,667	1,667
Drilling				
Avg. Well Depth (ft)	5	5	5	5
Formation type	Unconsolidated	Unconsolidated	Unconsolidated	Unconsolidated
Safety Level	D	D	D	D
Well Diameter (in)	2	2	2	2
Drilling Method	Hollow Stem	Hollow Stem	Hollow Stem	Hollow Stem
Well Construction Material	PVC Schedule 40	PVC Schedule 40	PVC Schedule 40	PVC Schedule 40
Avg. # of soil samples per well	1	1	1	1
Contaminant of interest	SVOCs	SVOCs	SVOCs	SVOCs
Extraction Well Spacing (ft)	35	22	35	22
# of Vapor Extraction Wells	1	2	10	24
Avg. Vapor Flow Rate per well (CFM)	3.0	1.5	3.0	1.5
Total Vapor Flow Rate (CFM)	3.0	3.0	30.0	36.0
Bioventing Marked-up Costs	\$16,547	\$18,919	\$41,044	\$76,171
Additional Costs:				
O&M	\$40,237	\$40,237	\$53,954	\$53,954
Years of O&M	2.0	2.0	5.0	5.0
Remedial Design	\$2,317	\$2,649	\$5,336	\$9,141
TOTAL MARKED-UP COSTS	\$59,101	\$61,805	\$100,334	\$139,266
COST PER CUBIC FOOT	\$26	\$27	\$2	\$3
COST PER CUBIC METER	\$928	\$970	\$79	\$109
COST PER CUBIC YARD	\$709	\$742	\$60	\$84

Biorremediação estimulada

- Processo no qual micro-organismos nativos ou inoculados (bactérias, fungos), são utilizados para degradar os contaminantes presentes no solo ou água subterrânea, com a injeção de oxigênio, nutrientes e outros aditivos para estimular o processo de degradação;
- Em alguns casos podem ser utilizados tensoativos para promover a dessorção do contaminante da partículas do solo;
- O processo de remediação pode ser aeróbio, anaeróbio ou com fungos específicos.



Representação do processo de biorremediação estimulada

Variantes do processo

- **Aeróbio:**

- Envolve a percolação ou injeção de água subterrânea ou água não contaminada com a dosagem adequada de nutrientes e saturada com oxigênio;
- Em alguns casos micro-organismos aclimatados e/ou uma outra fonte de liberação de oxigênio, como o peróxido de hidrogênio também podem ser adicionados;
- A injeção pode ser feita por aspersão sobre o solo, canaletas de infiltração ou poços de injeção, dependendo da profundidade em que a contaminação ocorre.

Variantes do processo (cont.)

▪ **Anaeróbio:**

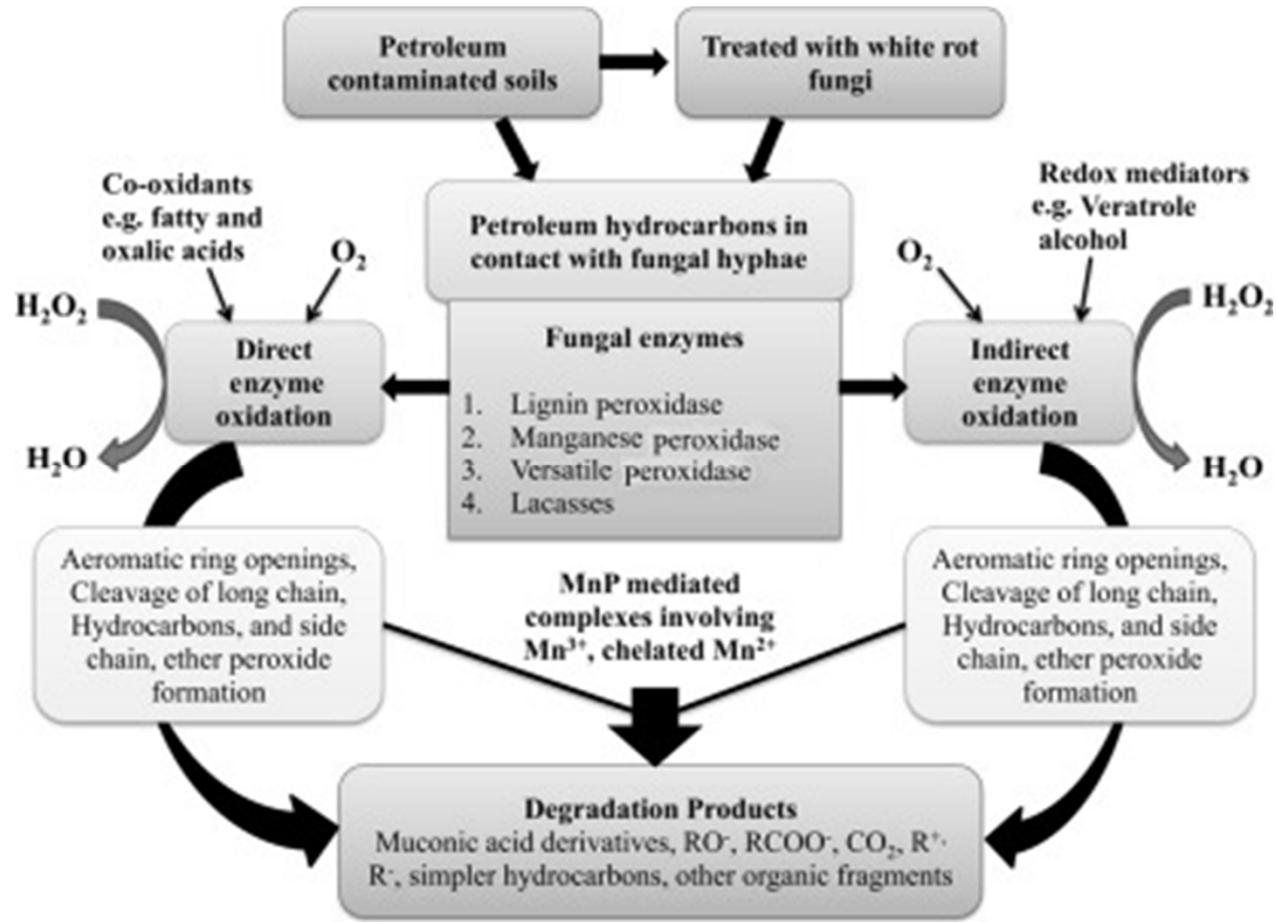
- Na ausência de oxigênio, os contaminantes serão metabolizados para metano, quantidades limitadas de dióxido de carbono e hidrogênio;
- A presença de sulfato pode conduzir a formação de sulfeto e enxofre elementar, caso as condições existentes sejam propícias;
- Enquanto a presença de nitrato pode conduzir a formação de óxido nitroso;
- O processo de degradação pode ser incompleto, resultando na formação de produtos intermediários que podem apresentar toxicidade variada, inclusive maior do que o composto original.

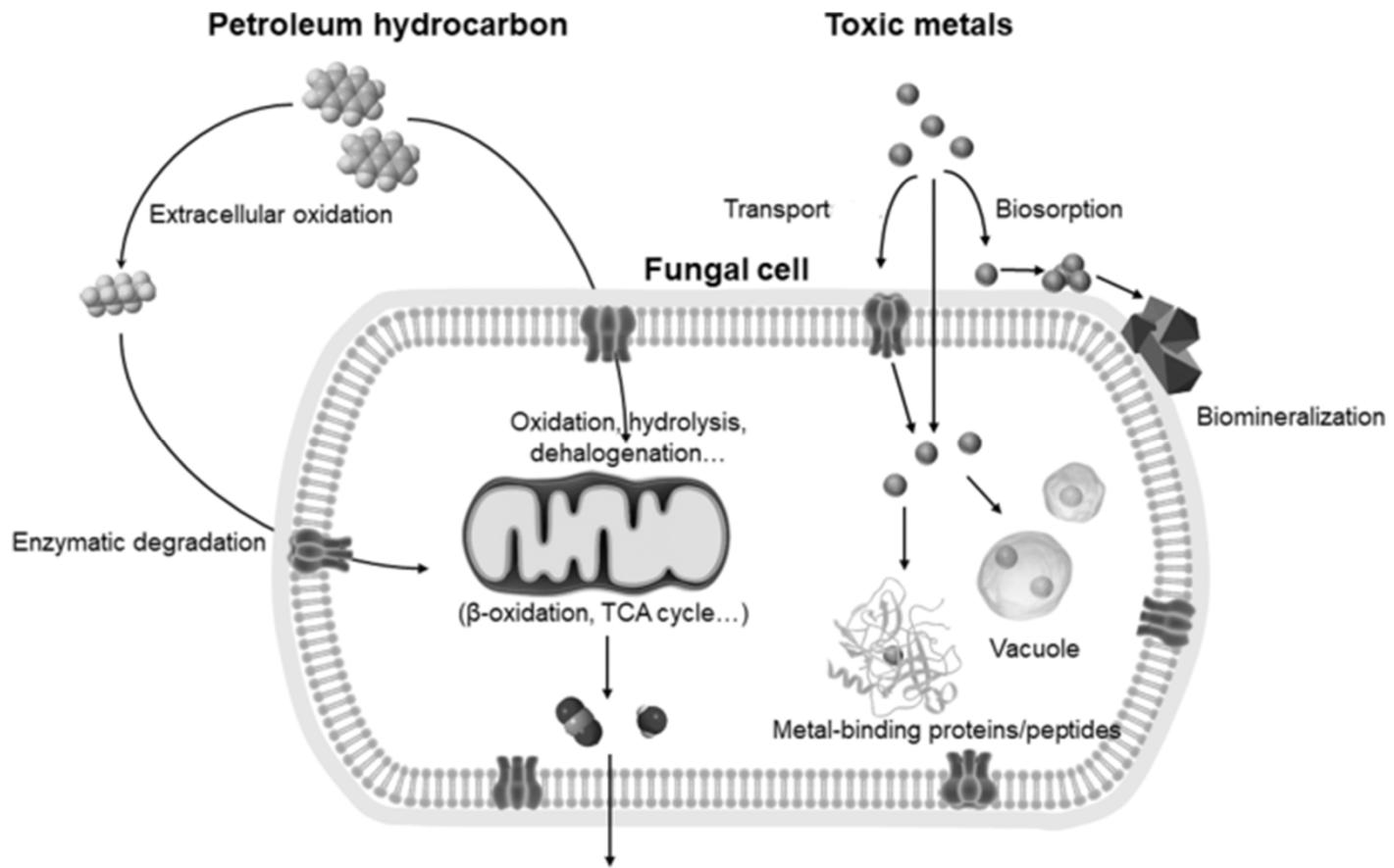
Variantes do processo (cont.)

- Remediação com fungo branco – Fungo da podridão (*Rot Fungus*):
 - Não é um processo que pode ser realizado diretamente no solo, sendo necessário utilizar um reator no qual são adicionadas lascas de madeira inoculadas com o fungo, em condições de umidade adequada para posterior mistura com o solo a ser descontaminado;
 - É um processo similar ao que ocorre na compostagem, resultando na elevação da temperatura do material, sendo que a temperatura ótima de degradação varia entre 30°C e 38°C.

Remediação de solos contaminados com petróleo por fungos

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128219256000071>





Fitorremediação intensificada

- Processo que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar ou destruir os contaminantes presentes no solo ou sedimentos;
- Utiliza como mecanismos:
 - Biodegradação melhorada na zona de raiz;
 - Fito-extração, ou fito-acumulação;
 - Fitodegradação;
 - Fito-estabilização.

Fitorremediação intensificada (cont.)

- Para isso podem ser utilizadas plantas ou árvores que tenham rápido crescimento;
- No caso de utilização de árvores deve ser das preferências às espécies que consigam extrair grandes quantidades de água do solo;
 - Esta característica faz com que seja possível remover uma grande quantidade de poluentes dissolvidos do meio, assim como reduzir a propagação no aquífero.

Fitorremediação intensificada (cont.)

Biodegradação na zona de raiz:

- Ocorre no solo existente no entorno das raízes, pela liberação de substâncias naturais que são utilizadas como nutrientes pelos micro-organismos, o que melhora a atividade biológica;
- Além disso, as raízes das plantas deixam o solo desagregado e que quando morrem ocorre a formação de canais para a passagem de água e também para a aeração.

Fito-acumulação:

- Processo através do qual os contaminantes são absorvidos pelas raízes das plantas e transferidos ou acumulados nos galhos ou folhas;

Fitorremediação intensificada (cont.)

Fitodegradação:

- É resultado da degradação dos contaminantes pela sua metabolização nos tecidos das plantas, através de enzimas específicas, como do a dehalogenase e a oxigenase, as quais ajudam a catalisar a degradação;

Fito-estabilização:

- Fenômeno resultante da produção de compostos químicos pelas plantas, que podem imobilizar os contaminantes na interface solo/raiz.

Fitorremediação intensificada (cont.)

Aplicação:

- A fitorremediação pode ser aplicada para problemas de contaminação com metais, defensivos agrícolas, solventes, explosivos, petróleo, compostos policíclicos aromáticos e até lixiviado de aterro;
- Plantas hiperacumuladoras tem capacidade de remover e armazenar grandes quantidades de metais;

Fitorremediação intensificada (cont.)

Limitações:

- A profundidade da região de tratamento é determinada pelas características das plantas, geralmente ela é limitada para baixas profundidades;
- Potencial de toxicidade dos contaminantes para as plantas;
- Limitações relacionadas à transferência de massa;
- Sazonalidade da atuação da plantas, em função da região;
- Problemas relacionados à demonstração da viabilidade do uso da técnica.

Custos da fitorremediação

SOIL TECHNOLOGY:		Phytoremediation			
RACER PARAMETERS	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D	
	Small Site		Large Site		
	Easy	Difficult	Easy	Difficult	
COST PER SQUARE FOOT	\$2	\$7	\$0.42	\$1	
COST PER CUBIC FOOT	\$18	\$66	\$4	\$14	
COST PER CUBIC METER	\$626	\$2,322	\$147	\$483	
COST PER CUBIC YARD	\$479	\$1,775	\$112	\$369	

