

**PHA3523 – TECNOLOGIAS DE
REMEDIÇÃO DE ÁREAS
CONTAMINADAS**

Aula 6, 8 e 12

Processos físico-químicos

Prof. Mierzwa



Quais são as informações relevantes para a identificação de opções tecnológicas para remediação de áreas contaminadas?

- Características do solo:
 - Permeabilidade;
 - Transmissividade;
 - Tipo de material presente:
 - Matéria orgânica;
 - Areia;
 - Silte;
 - Argila.
 - Capacidade de troca iônica;
 - Atividade microbiológica.
- Características do aquífero:
 - Tipo de aquífero;
 - Características hidráulicas;
 - Potencial de óxido redução;
 - Características de qualidade;
- Características dos contaminantes:
 - Propriedades físico-químicas;
 - Biodegradabilidade.

Características do solo

- **Permeabilidade:** facilidade de penetração da água ou contaminante no solo e conseqüentemente no aquífero;
- **Transmissividade:** capacidade de transporte da água e contaminantes através do solo;
- **Tipo de material presente:**
 - **Matéria orgânica:** pode complexar metais e outros contaminantes, alterando a sua mobilidade;
 - **Areia, silte e argila:** afetam as características de transporte da água e dos contaminantes;
 - **Capacidade de troca iônica:** afeta a mobilidade dos contaminantes;
 - **Atividade microbológica:** pode influenciar a degradação/mobilidade dos contaminantes.

Tipos de Solo em Função dos seus Constituintes

Texturas do Solo

Propriedades controladas pela textura:

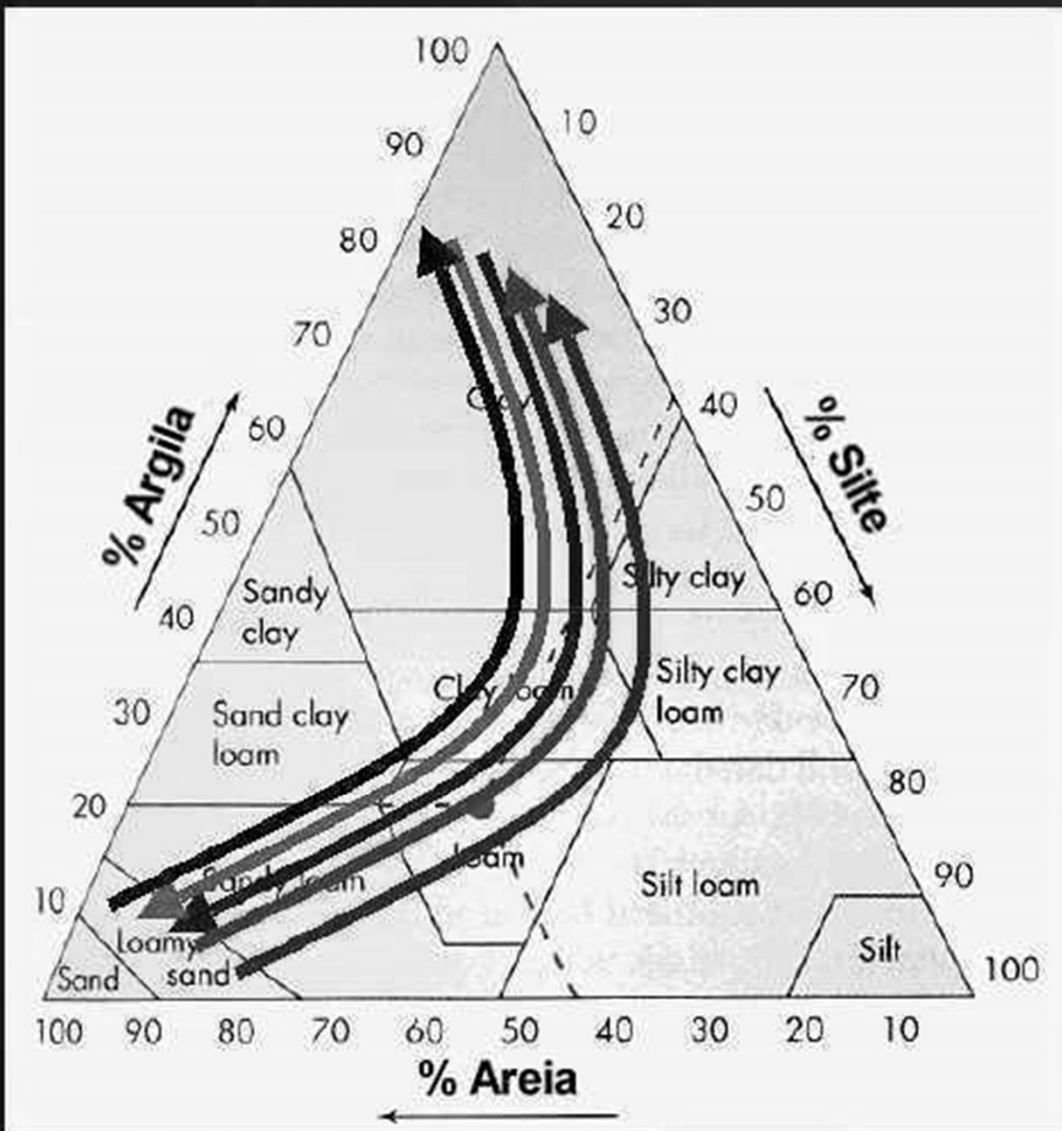
Taxa de Infiltração

Retenção de Água

Retenção de Nutrientes

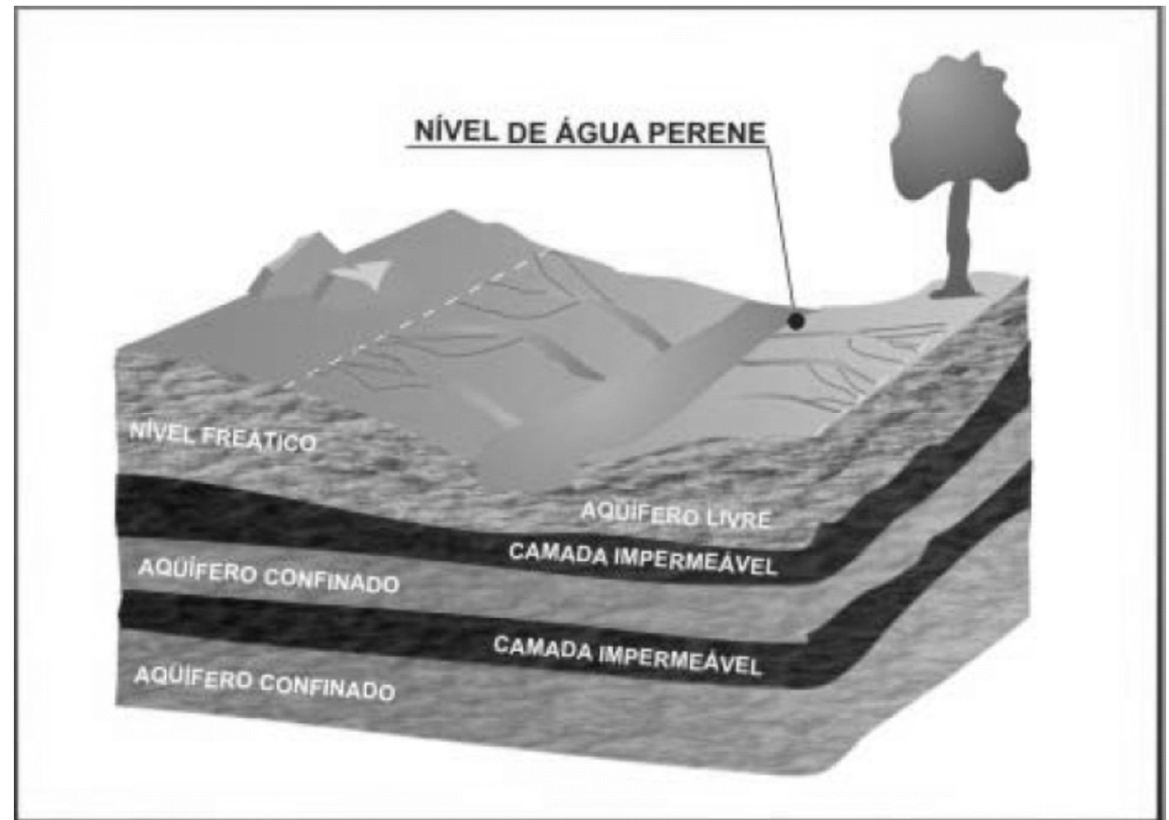
Trabalhabilidade

Estabilidade



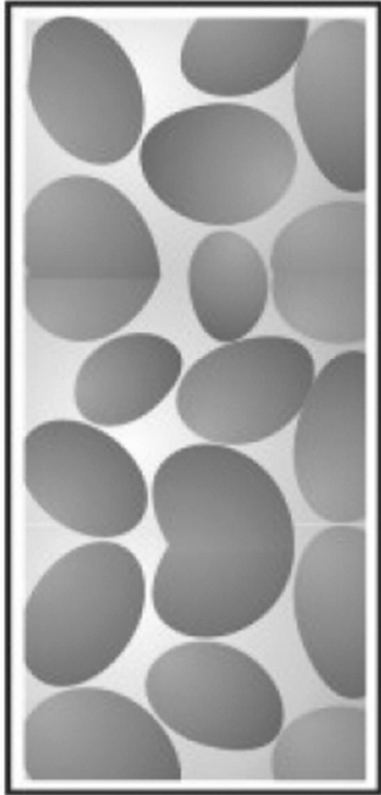
RELEVÂNCIA DAS INFORMAÇÕES PARA A SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS (AQUÍFERO)

- Tipo de aquífero: afeta a mobilidade da água e dos contaminantes:
 - Aquífero livre ou freático:
 - Maior vulnerabilidade aos processos de contaminação.
 - Aquífero confinado ou artesiano:
 - Menor vulnerabilidade, porém a sua contaminação é um sério problema.

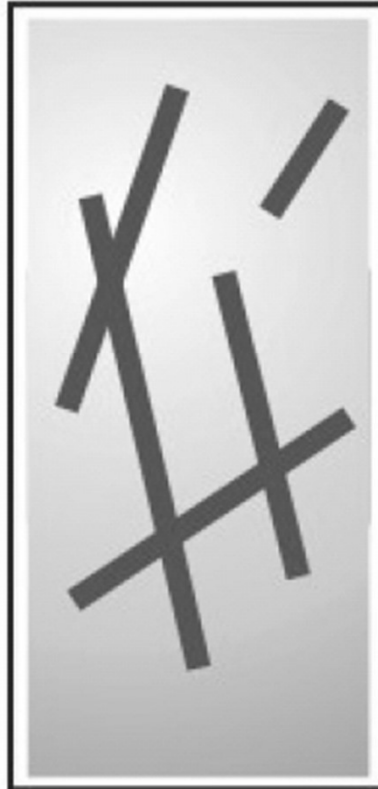


Tipos de aquíferos segundo a sua localização
(BORGHETTI et al, 2004 apud ABAS, 2006)

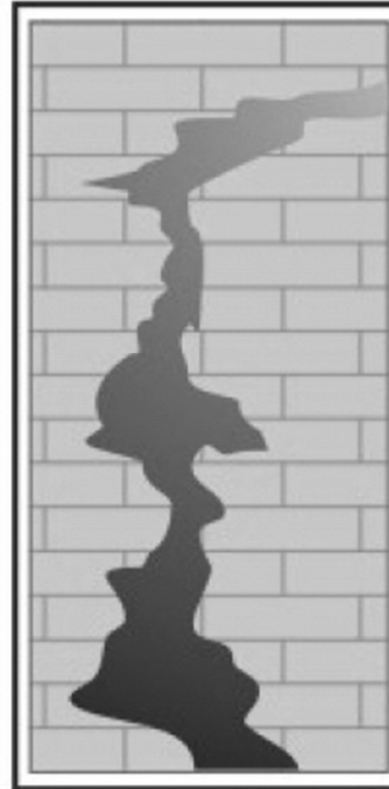
POROSO



FISSURAL



CÁRSTICO



Fonte: (BORGHETTI et al., 2004 apud ABAS, 2006)

Aquífero

- **Potencial de óxido redução:** capacidade de solubilizar ou precipitar metais, ou oxidar/reduzir compostos orgânicos;
- **Características de qualidade:** presença de constituintes que podem reagir com os contaminantes alterando as suas propriedades.

Contaminantes

- **Propriedades físico-químicas:** capacidade de interação com o solo, água e contaminantes e sua distribuição entre as fases sólida, líquida e gasosa;
- **Biodegradabilidade:** capacidade de sofrer degradação por processos biológicos naturais.

- Constante de dissociação ácida (k_A): está relacionada ao grau de dissociação dos compostos orgânicos;

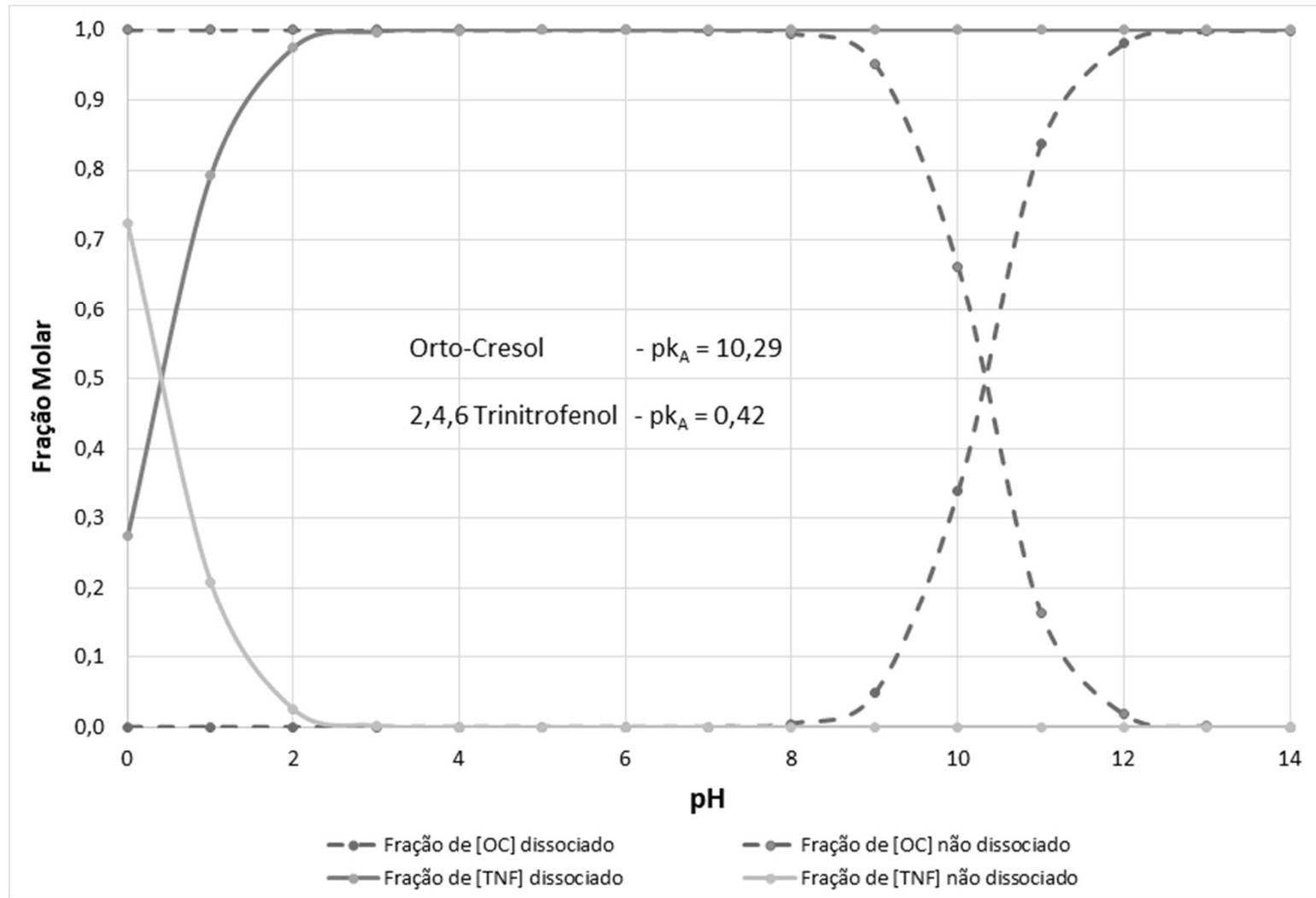


$$k_A = \frac{[H^+][R^-]}{[RH]}$$

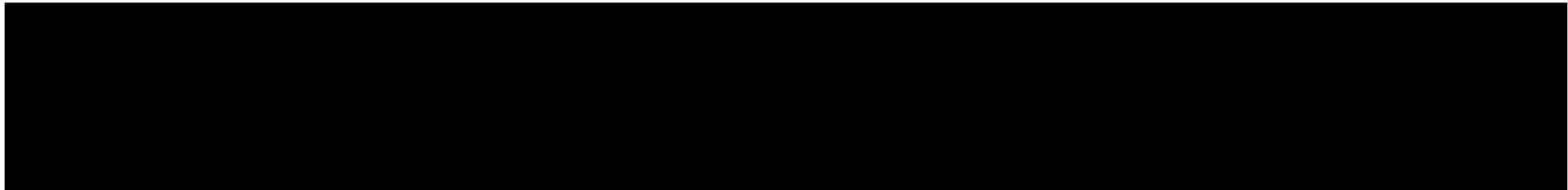
- Tomando-se o logaritmo da expressão de k_A e multiplicando-se ambos os lados da expressão por (-1):

$$\log k_A = \log[H^+] + \log \frac{[R^-]}{[RH]} \Rightarrow -\log[k_A] = -\log[H^+] - \log \frac{[R^-]}{[RH]}$$

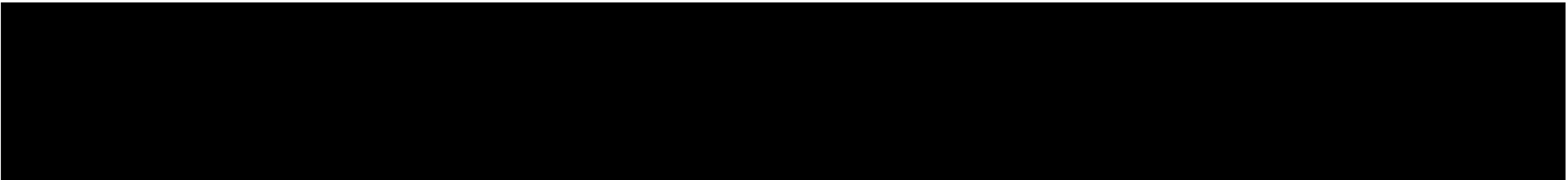
$$-\log[x] = px \quad \therefore pk_A - pH = -\log \frac{[R^-]}{[RH]} \Rightarrow pk_A - pH = \log \frac{[RH]}{[R^-]}$$

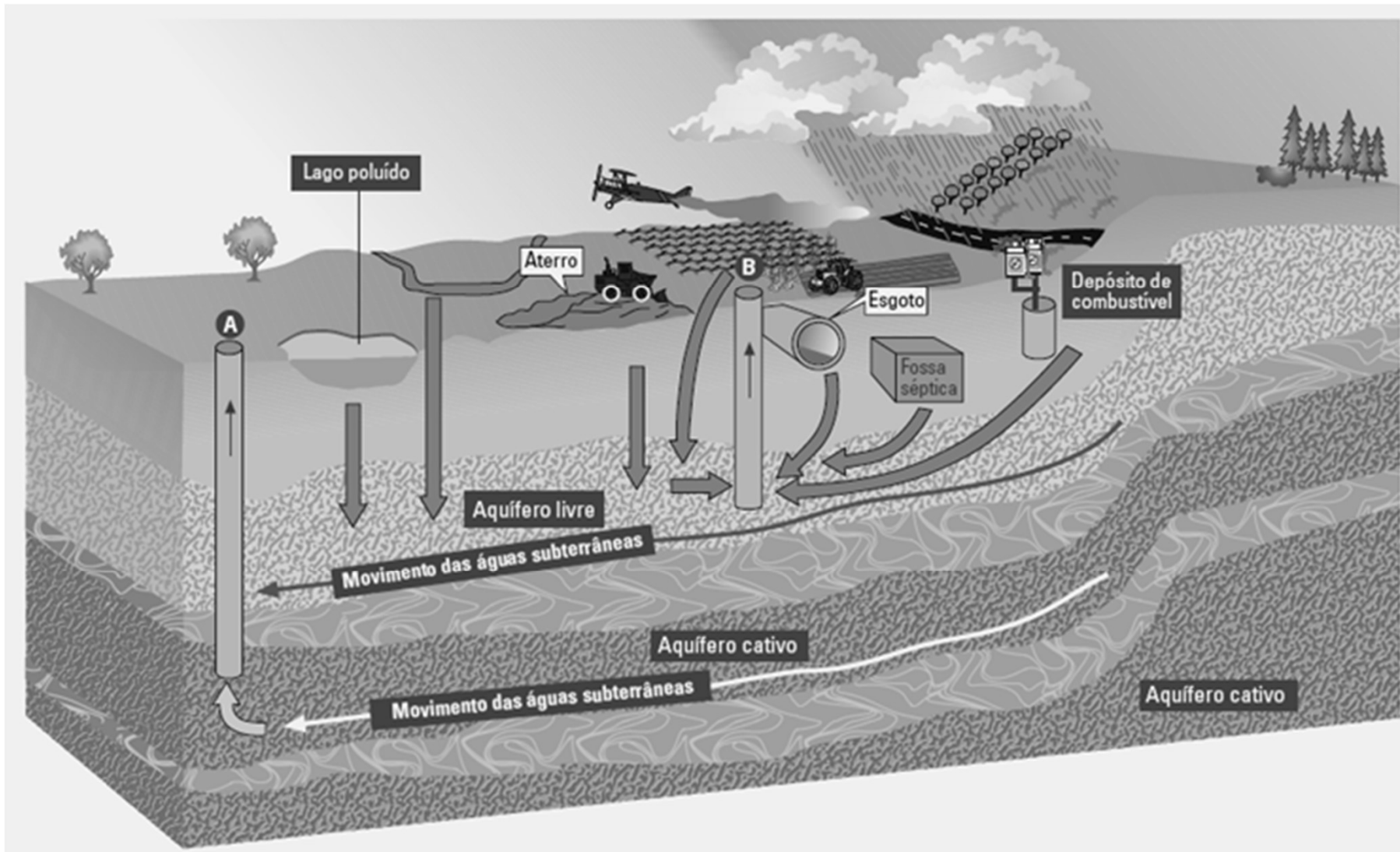


Dissociação do Orto-cresol e 2,4,6 Trinitrofenol em função do pH



Orto-cresol		
Propriedade	Valor	Unidade
Massa molar	108	g/mol
Massa específica	1,046	g/cm ³
Solubilidade em água	20	g/L (20°C)
Log do Coeficiente de partição (o/w)	1,95	--
Pressão de vapor	24	Pa (20 °C)
pK _A	10,29	--

- 
- Meio contaminado:
 - Solo;
 - Água subterrânea;
 - Solo e água subterrânea.
 - Tipo de contaminação:
 - Concentrada;
 - Dispersa.
 - Extensão da contaminação;
 - Características dos contaminantes;
 - Características do meio no qual os contaminantes estão presentes;
 - Possibilidade de remoção física do material responsável pela contaminação;
 - Necessidade de intervenção no local.



Possíveis rotas e tipos de contaminação do solo e águas subterrâneas

(fonte: <http://ebio.ind.br/2017/05/11/vale-a-pena-mudar-minha-fossa-para-uma-estacao-de-tratamento-se-ela-nunca-deu-problema/>)

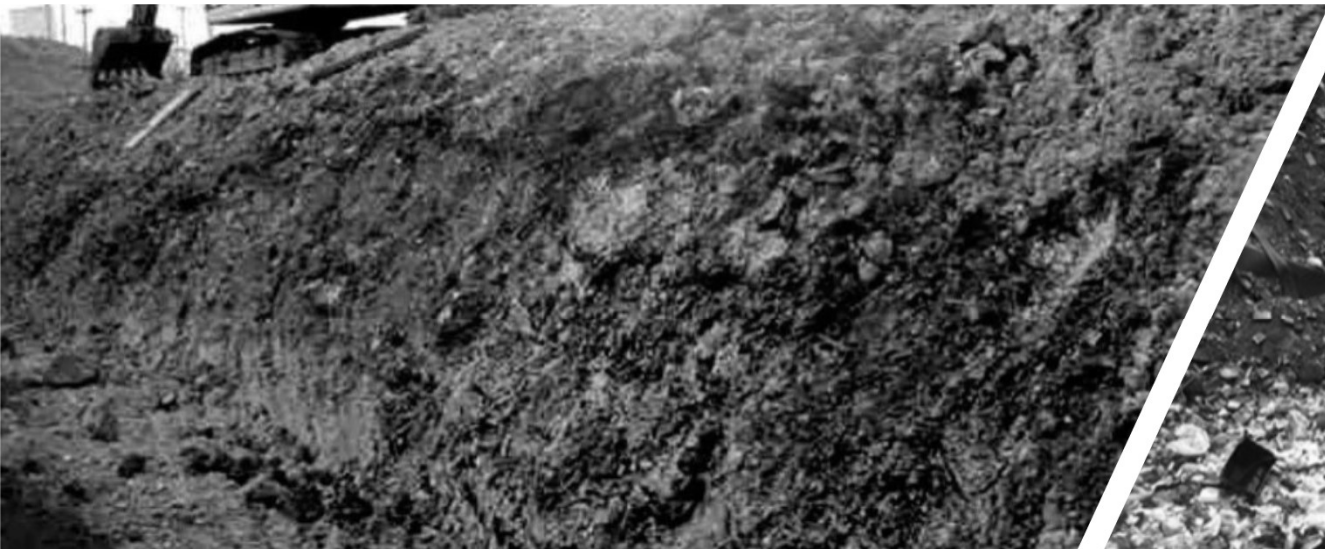
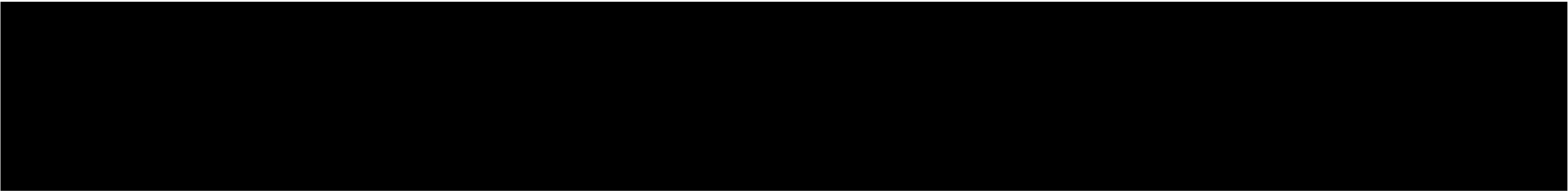


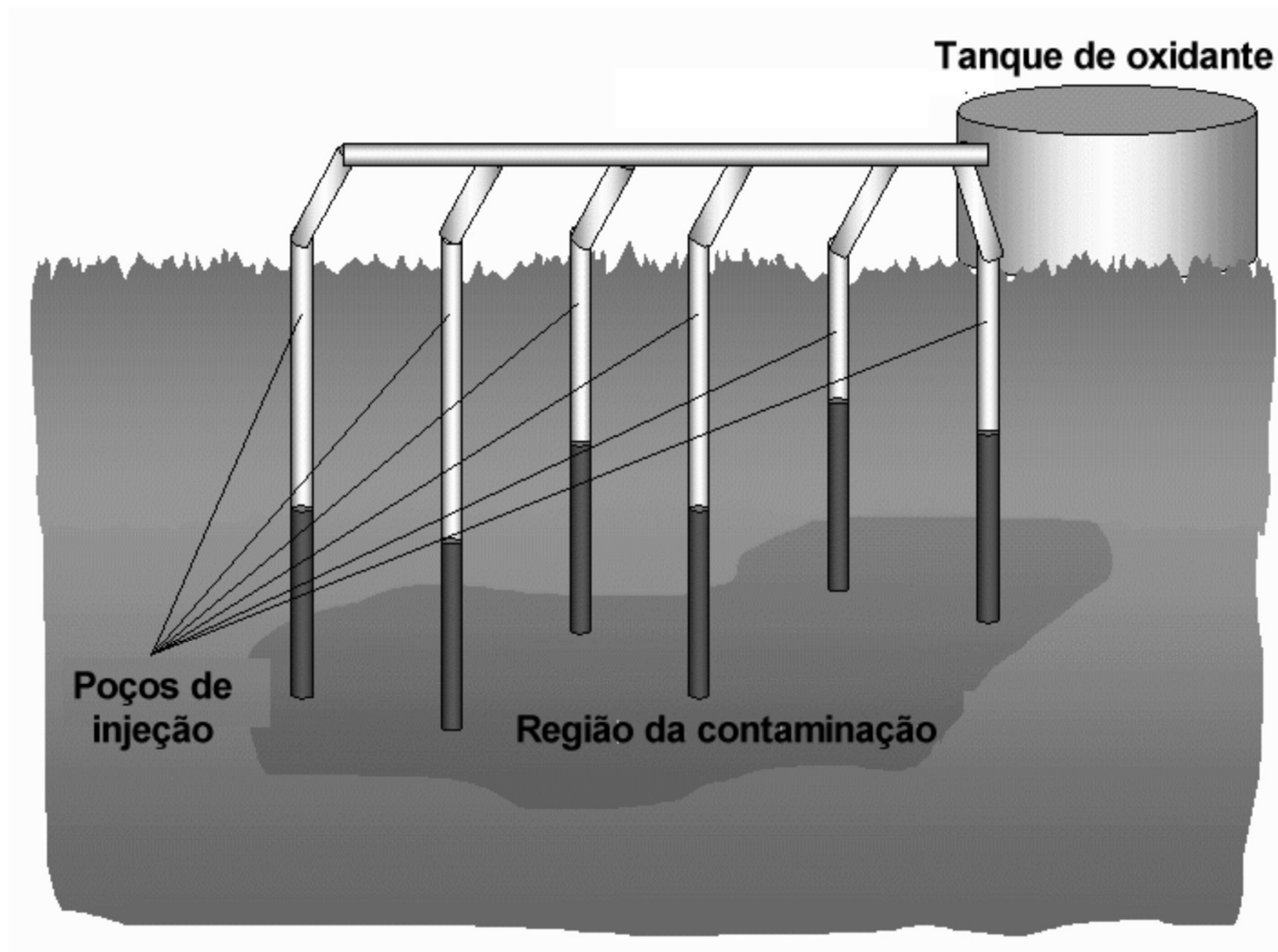


TABLE 3-2: TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX


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																
3.2 In Situ Physical/Chemical Treatment																
4.4 Chemical Oxidation	●	●	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	◇	○	○
4.5 Electrokinetic Separation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○
4.6 Fracturing	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.7 Soil Flushing	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.8 Soil Vapor Extraction	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.9 Solidification/Stabilization	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

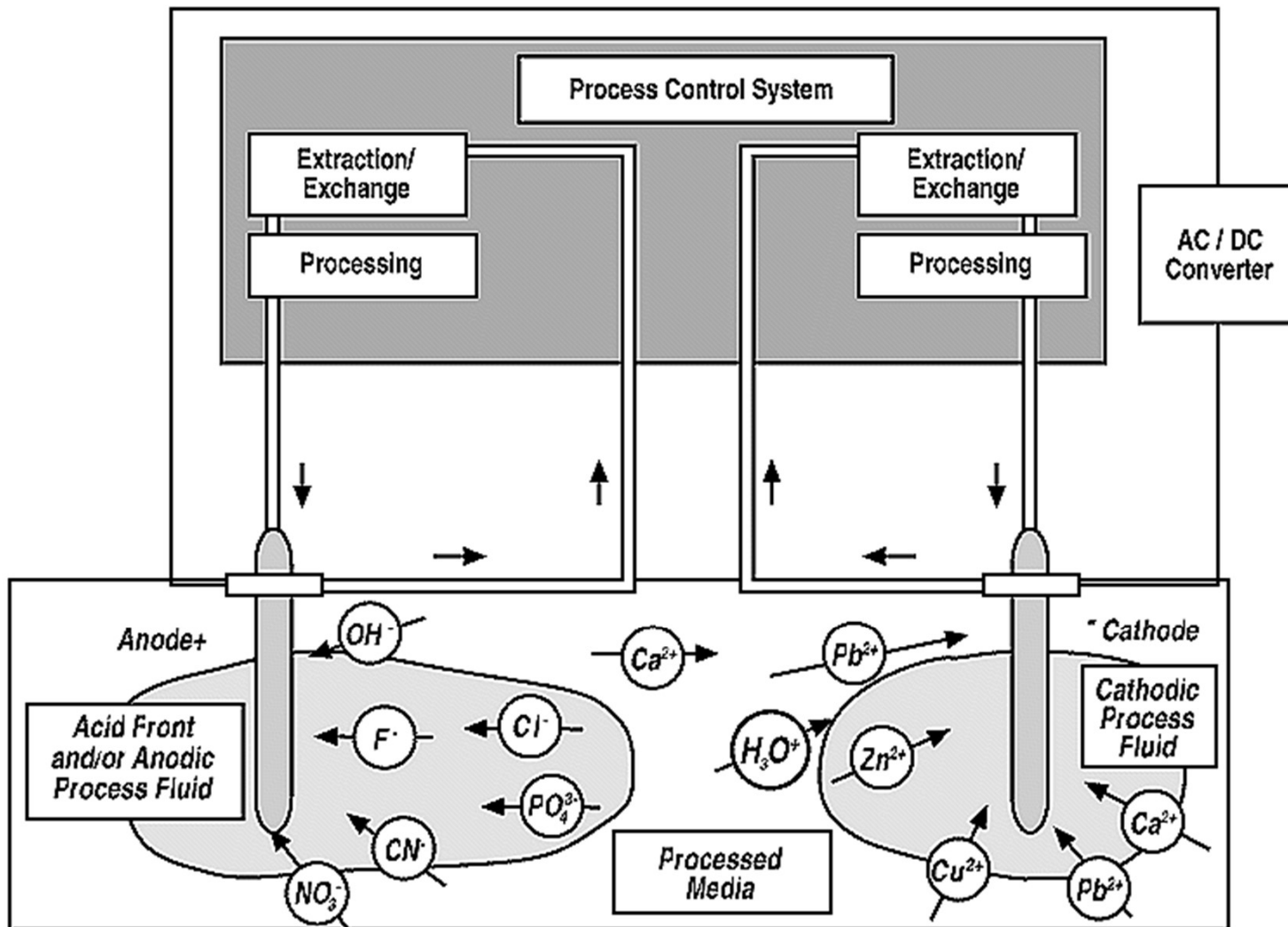
Fonte: https://frtr.gov/matrix2/section3/table3_2.pdf

- 
- Consiste no uso de oxidantes químicos específicos:
 - Peróxido de hidrogênio;
 - Permanganato de potássio;
 - Ozônio.
 - Efetivo para a oxidação de contaminantes orgânicos;
 - Considerações sobre o processo:
 - Requer a utilização e manipulação de grandes quantidades de produtos químicos;
 - A demanda do oxidante pode ser elevada em função da falta de seletividade e complexidade da matriz na qual é aplicado.

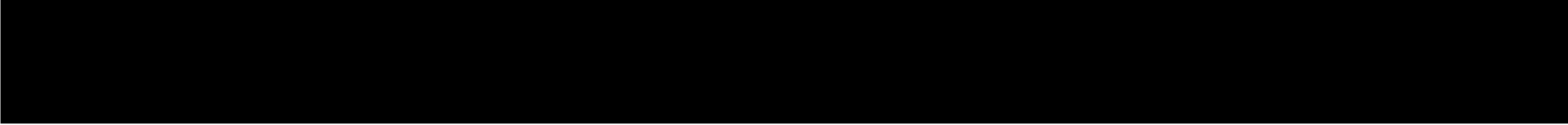


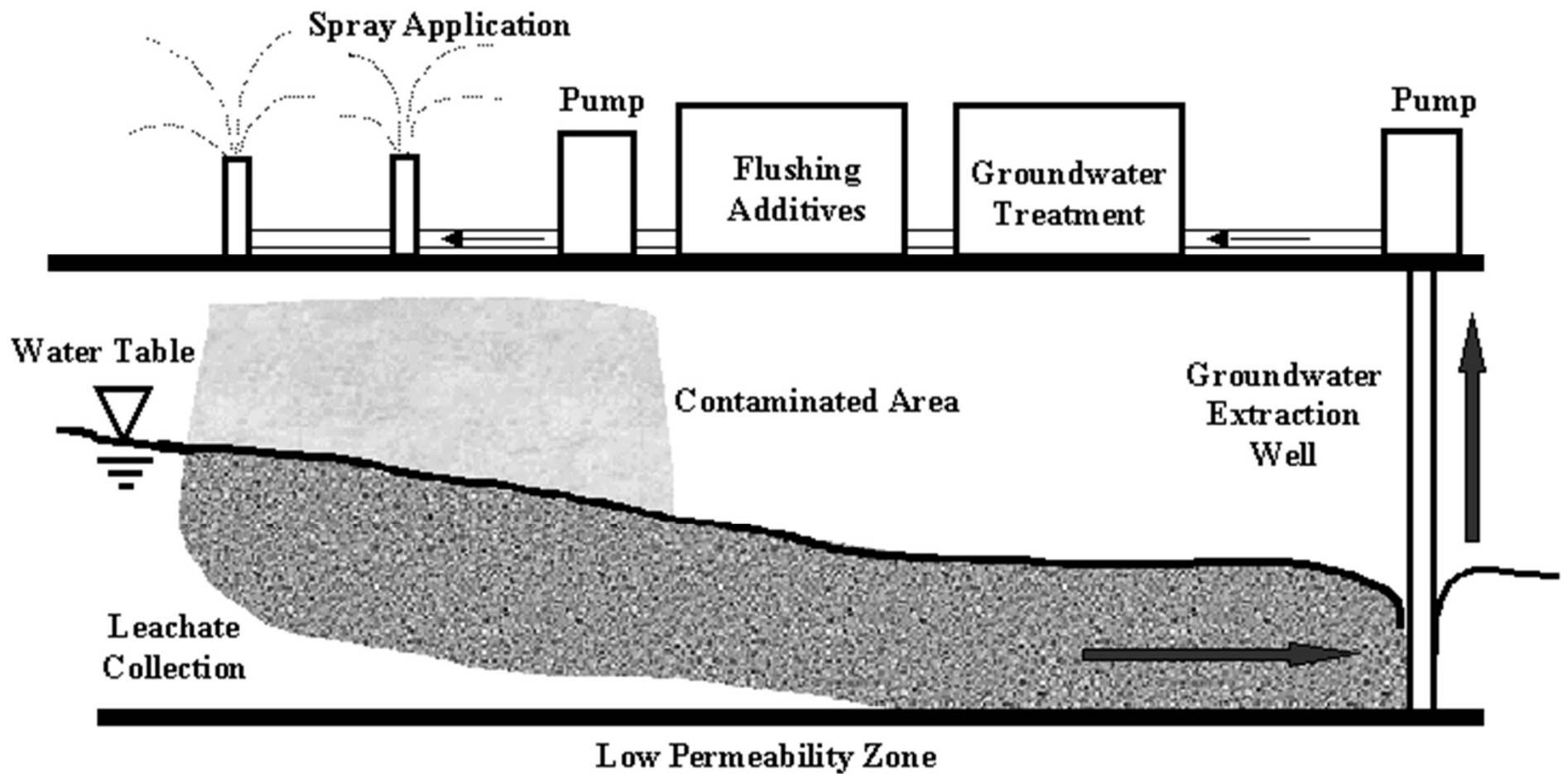
Representação do processo de oxidação química

- 
- Utilização de corrente elétrica e um fluido iônico para transporte e remoção de compostos iônicos presentes no solo saturado;
 - Específico para remoção de metais pesados, ânions e compostos orgânicos polares;
 - Considerações sobre o processo:
 - Eficiência reduzida para solos com umidade inferior a 10%, as melhores eficiências são obtidas para solos com umidade entre 14% e 18%;
 - Problemas de variabilidade da condutividade elétrica do solo;
 - Maior efetividade para solos com predominância de argila, em função da carga superficial;
 - Por se tratar de um processo eletroquímico, podem ocorrer reações de óxido redução indesejadas;
 - Os custos são influenciados pela extensão da contaminação, condutividade elétrica do solo e espaçamento entre os eletrodos.

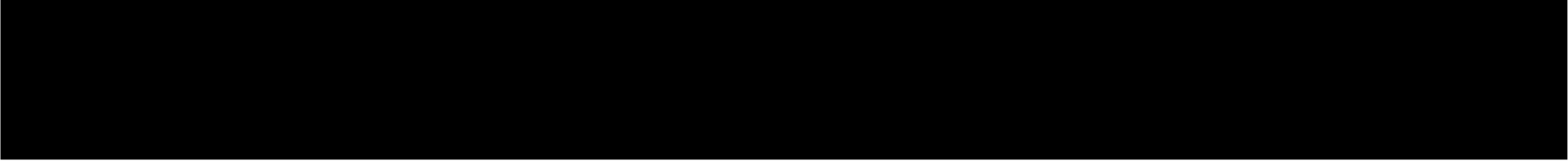


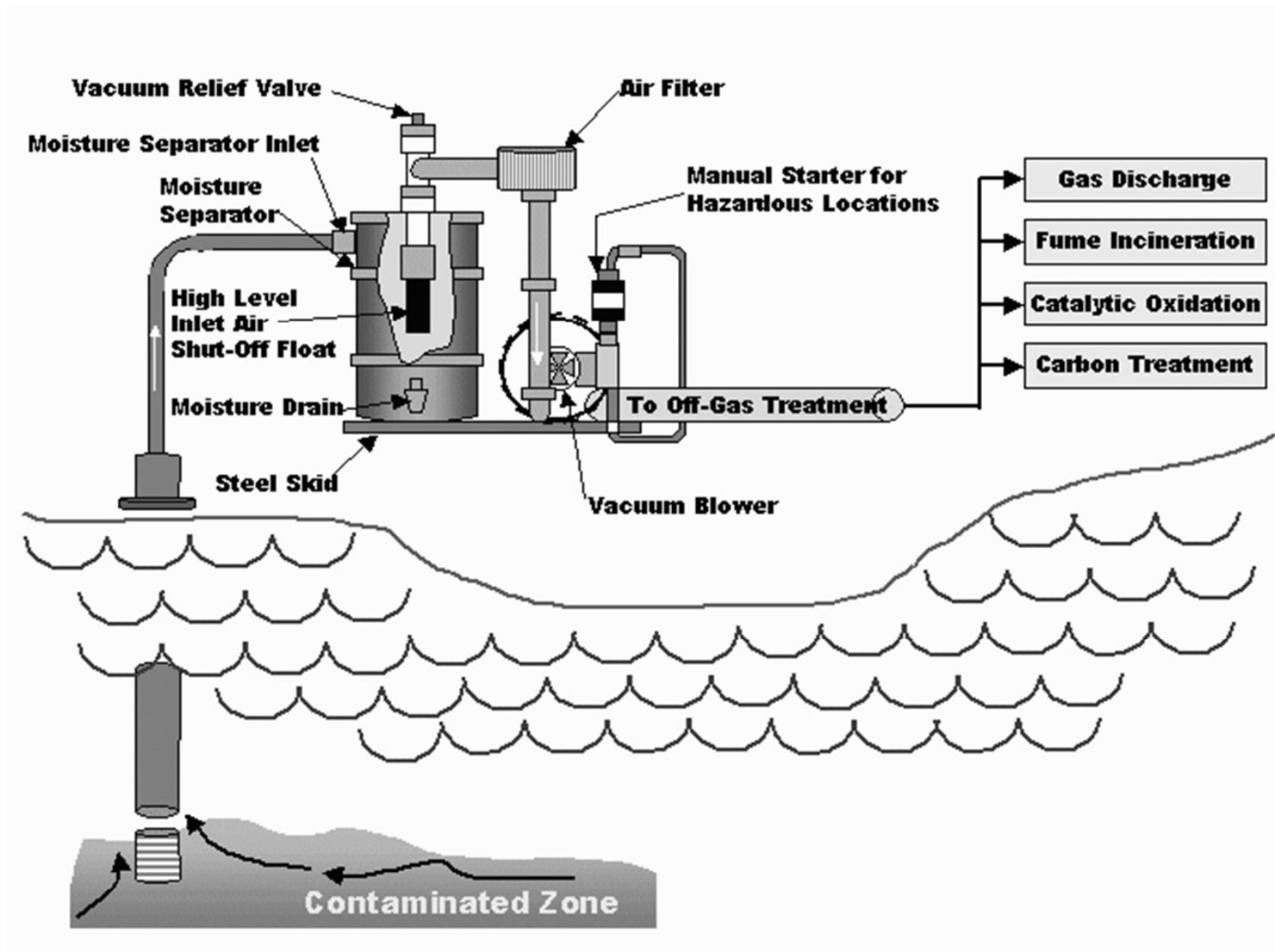
Representação esquemática do processo de separação eletrocinética

- 
- Utilização de uma mistura de solventes (água e um solvente miscível como etanol), para a extração de solventes orgânicos;
 - Também pode ser utilizado para a remoção de contaminantes inorgânicos, quando se utiliza um agente complexante e água;
 - Considerações sobre o processo:
 - A permeabilidade do solo pode limitar a utilização do processo;
 - Se forem utilizados surfactantes, estes podem ser adsorvidos pelo solo com consequente perda de eficiência do processo;
 - A reação do fluido de extração com o solo pode reduzir a mobilidade dos contaminantes;
 - Existe o potencial de aumentar a mobilidade dos contaminantes, caso a recuperação do fluido de lavagem não seja efetiva;
 - Necessidade de tratamento da corrente de lavagem após a sua remoção do solo.

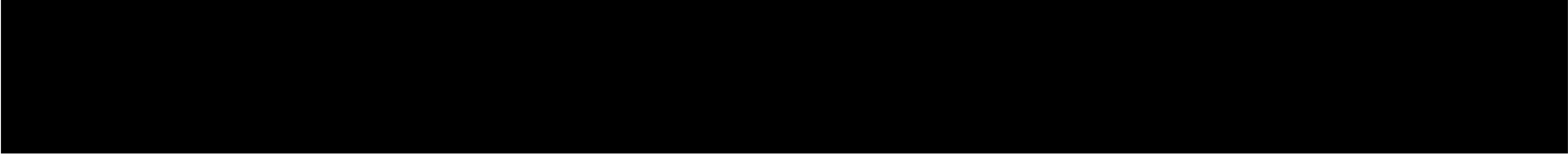


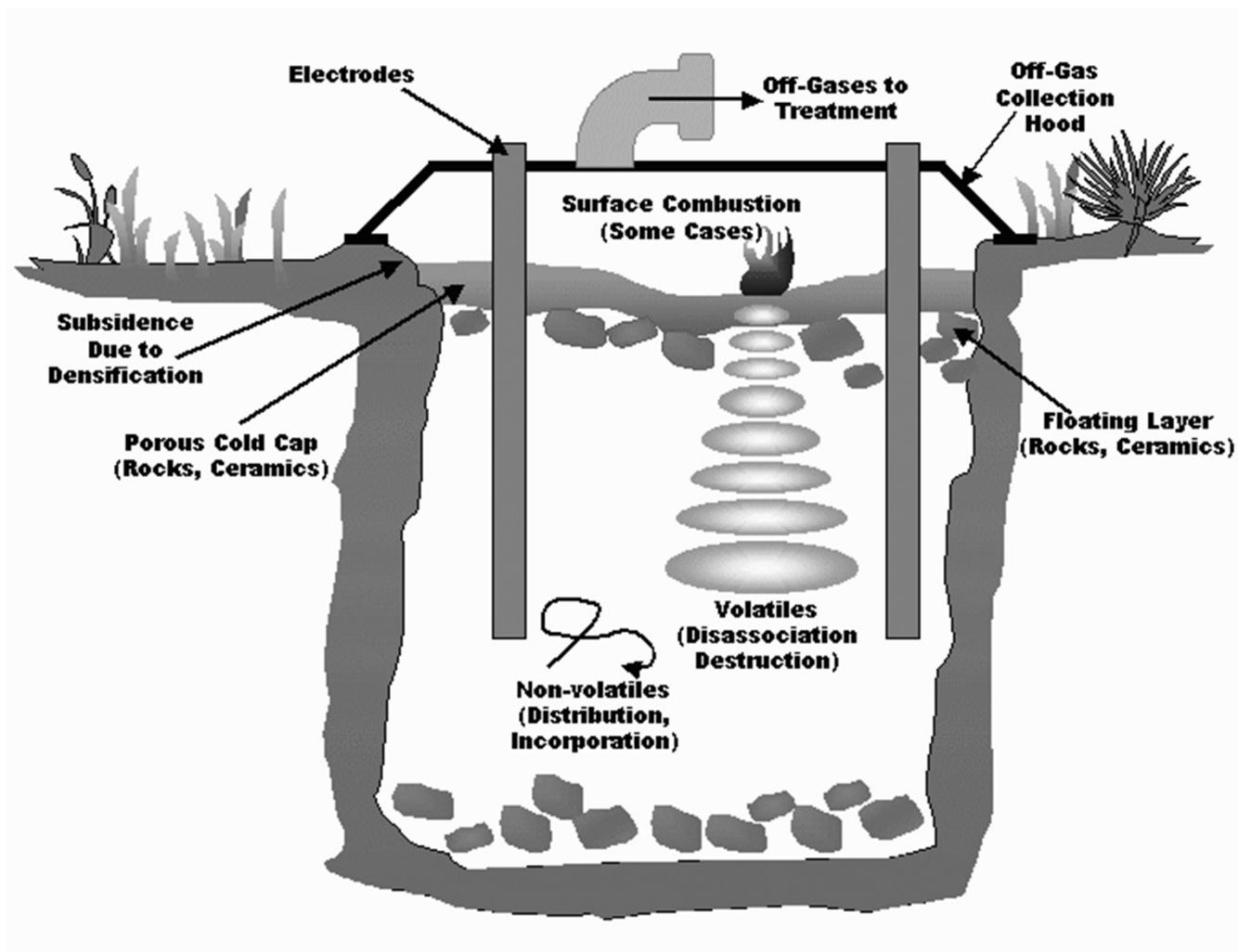
Representação do processo de lavagem do solo/lixiviação

- 
- Aplicado para solos contaminados com compostos orgânicos voláteis e semivoláteis;
 - Quanto maior a pressão de vapor do contaminante maior é o potencial de aplicação deste processo;
 - A utilização de ar por melhorar as características de biodegradabilidade do solo;
 - Considerações sobre o processo:
 - Solos com baixa porosidade elevado grau de saturação irão requerer maior consumo de energia para a extração;
 - Pode ser necessária uma malha com um elevado número de poços de extração em função da variação das características morfológicas do solo;
 - Necessidade de tratamento do fluido de extração;
 - Não é eficiente para extração de contaminantes da zona saturada do solo, o que pode ser resolvido com o rebaixamento do nível do lençol freático.





Representação esquemática do processo de extração com ar

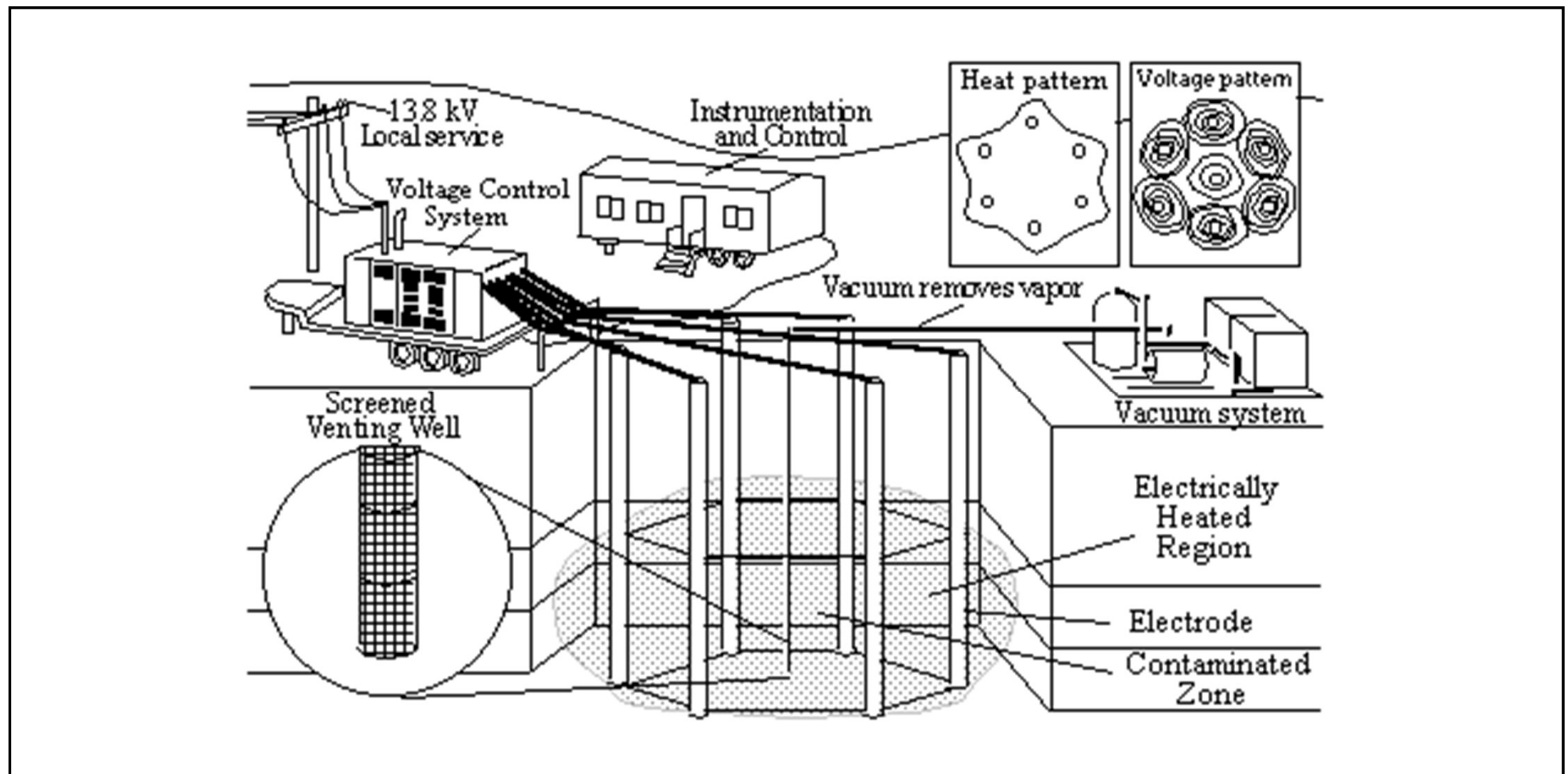
- 
- Processo utilizado para reduzir a mobilidade dos contaminantes por meio de processo físico-químicos;
 - Necessidade da realização de testes de lixiviação após a aplicação do processo de solidificação/estabilização;
 - Utilização de barreiras ativas para adsorver/fixar os contaminantes;
 - Também é possível utilizar uma corrente elétrica para a vitrificação do solo;
 - Considerações sobre o processo:
 - Aplicação limitada em função da profundidade em que os contaminantes se encontram;
 - O uso futuro do solo pode afetar o processo de imobilização, o que limita a utilização da área após o processo de remediação.



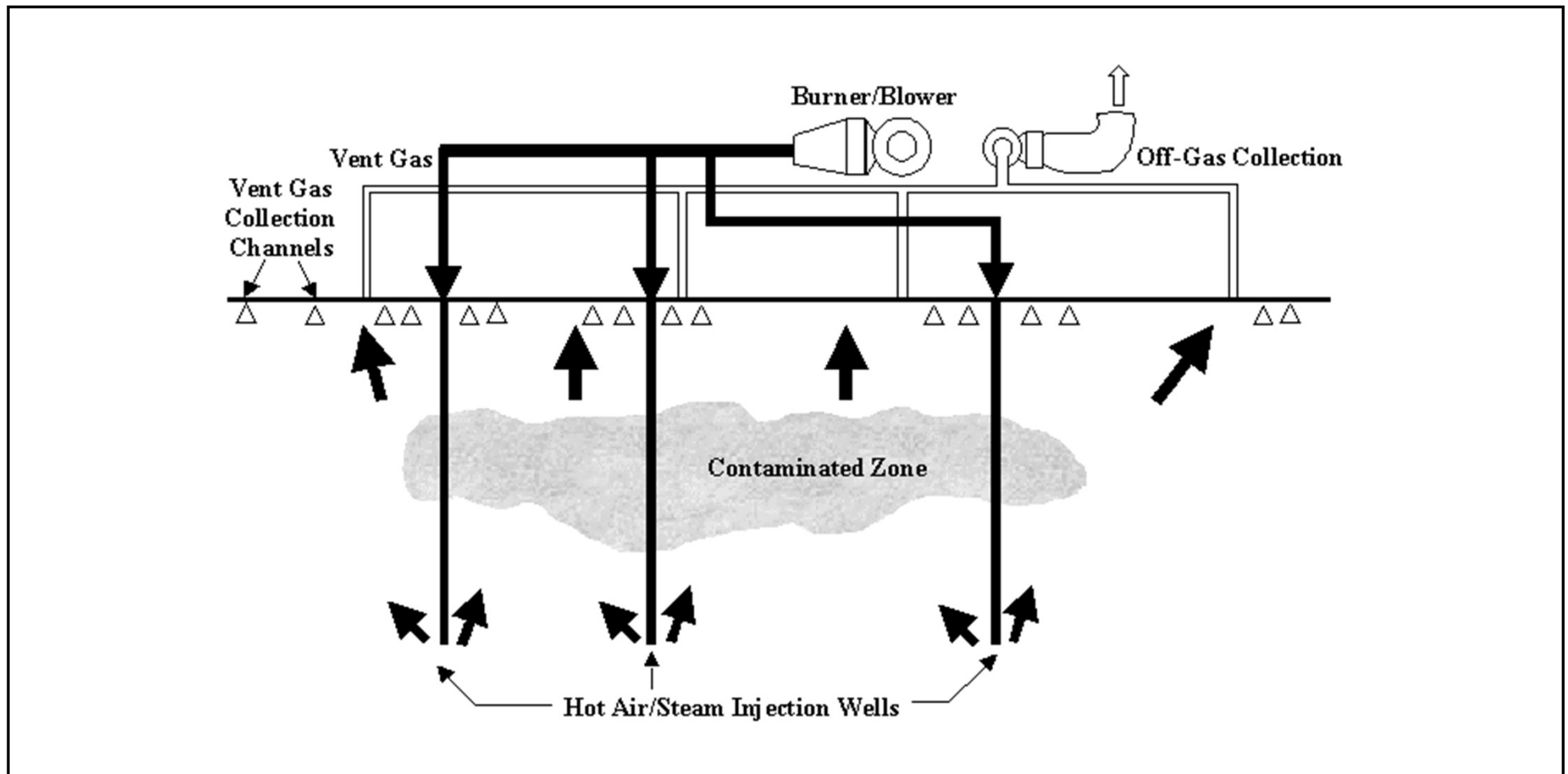
Exemplo do processo de vitrificação no local

- 
- Consiste no aquecimento do solo na região de ocorrência da contaminação para vaporização e extração do contaminante;
 - O aquecimento pode ser feito por resistência elétrica, rádio frequência ou injeção de ar quente ou vapor;
 - É necessária a extração dos vapores gerados por meio de aplicação de vácuo;
 - Processo aplicação para solos menos permeáveis;
 - A remoção da umidade faz com que o solo seja fraturado.

- 
- Aplicação:
 - Solos com elevado teor de umidade;
 - Remoção de compostos orgânicos semivoláteis e voláteis;
 - Alguns defensivos agrícolas e combustíveis, dependendo da temperatura que se consegue obter.
 - Considerações sobre o processo:
 - Necessidade de estrutura para a extração e tratamento dos contaminantes;
 - Não é efetivo para a remoção de contaminantes da zona saturada do solo;
 - Solos com teor elevado de matéria orgânica apresentam grande capacidade de adsorção o que reduz a taxa de extração.



Exemplo do processo de aquecimento por resistência elétrica e extração à vácuo

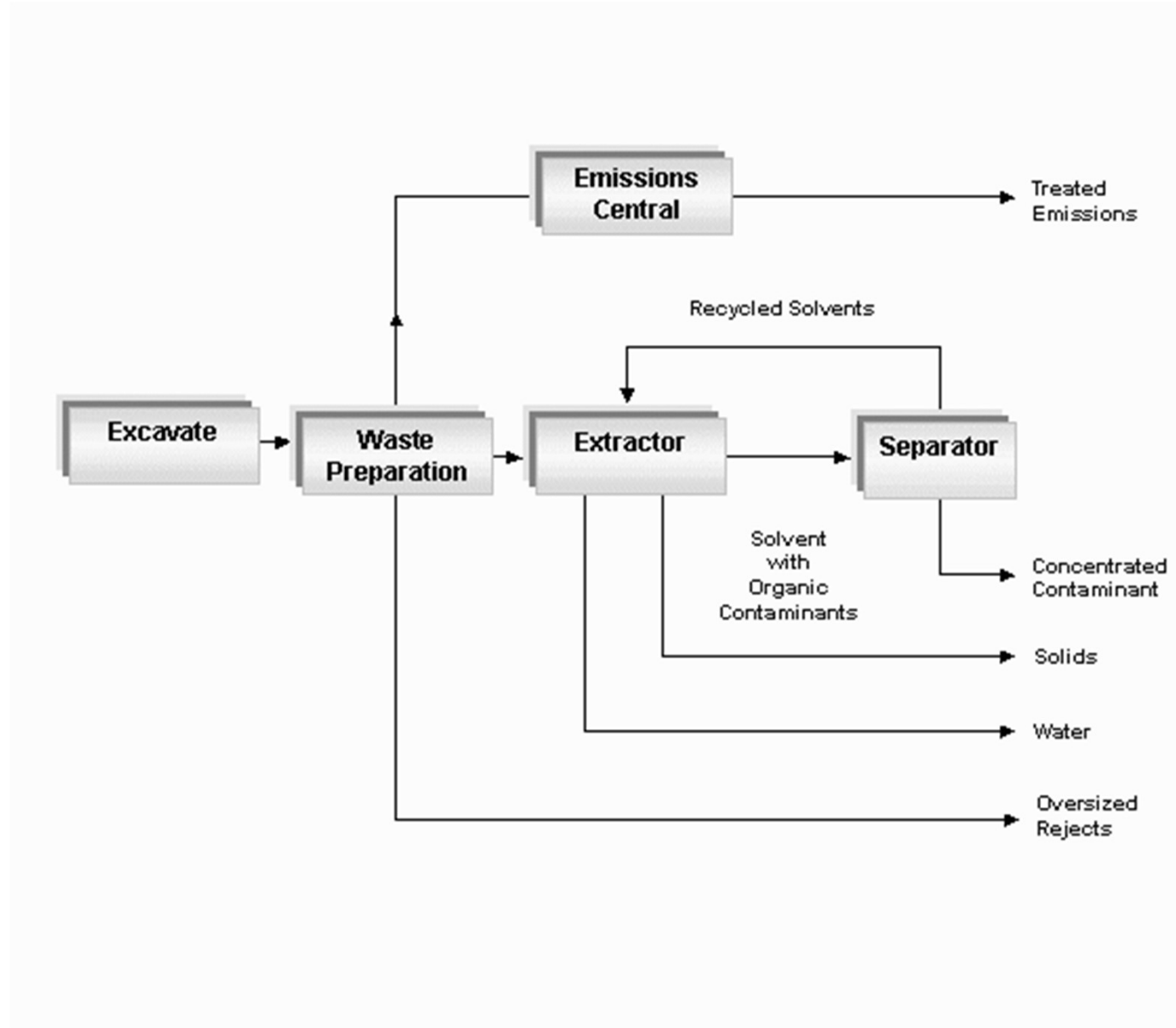


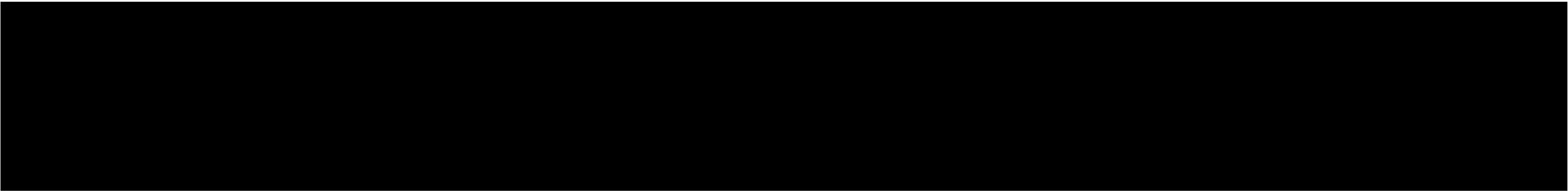
Exemplo do processo de extração com ar quente/vapor

TABLE 3-2: TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX

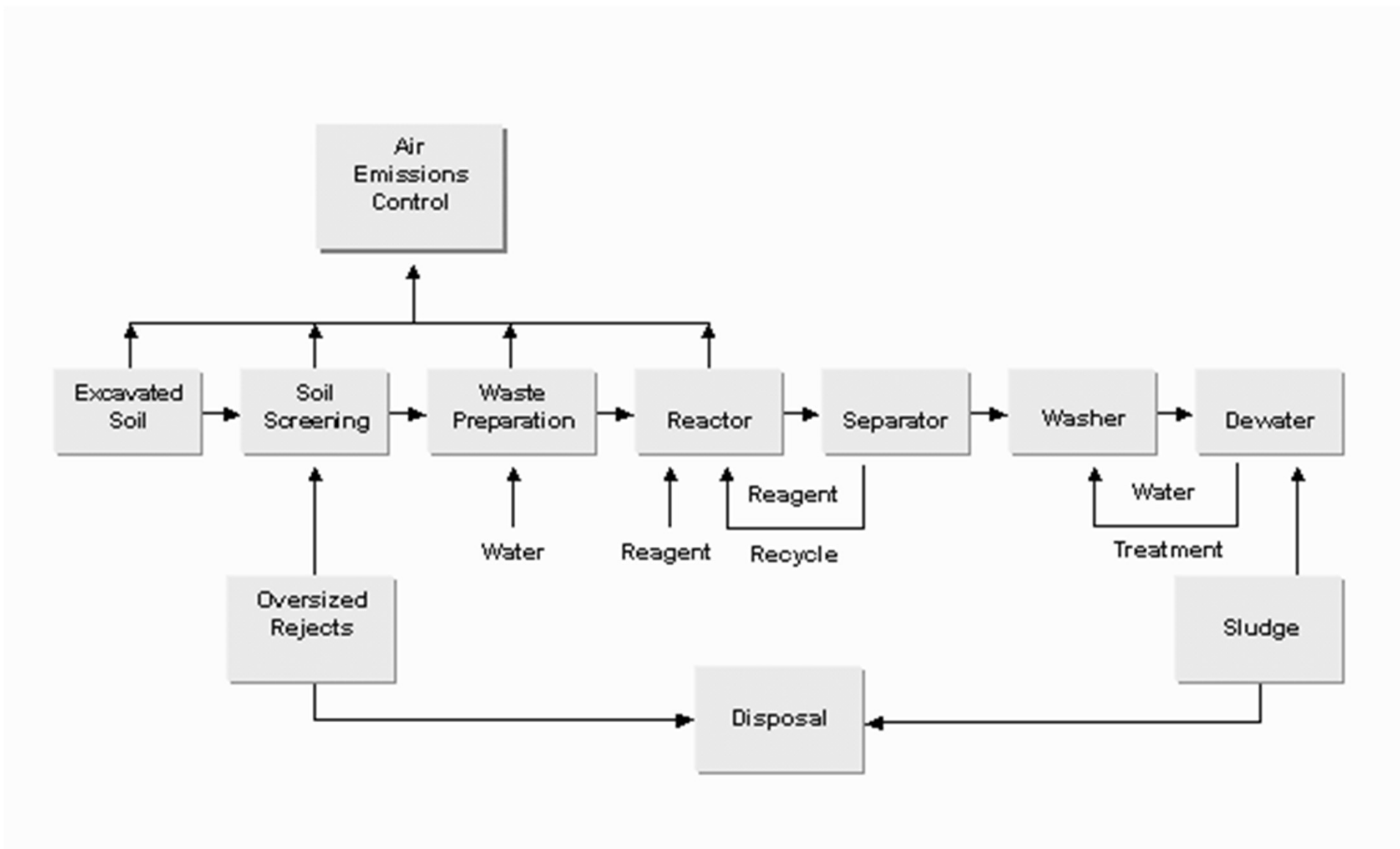
Rating Codes ● Above Average ○ Average ○ Below Average N/A - "Not Applicable" I/D - "Insufficient Data" ◇ - Level of Effectiveness highly dependent upon specific contaminant and its application	Development Status	Treatment Train	Relative Overall Cost & Performance					Availability	Non halogenated VOC's	Halogenated VOC's	Non halogenated SVOC's	Halogenated SVOC's	Fuels	Inorganics	Radio nuclides	Explosives
			O&M	Capital	System Reliability & Maintainability	Relative Costs	Time									
Soil, Sediment, Bedrock, and Sludge																
3.5 Ex Situ Physical/Chemical Treatment (assuming excavation)																
4.15 Chemical Extraction	●	○	○	○	○	○	○	●	○	○	●	●	○	●	○	○
4.16 Chemical Reduction /Oxidation	●	○	○	○	●	○	●	●	○	○	○	○	○	●	○	○
4.17 Dehalogenation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	●	○	○	○	○
4.18 Separation	●	○	○	○	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
4.19 Soil Washing	●	○	○	○	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
4.20 Solidification/Stabilization	●	●	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	●	●	○
3.6 Ex Situ Thermal Treatment (assuming excavation)																
4.21 Hot Gas Decontamination	○	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.22 Incineration	●	●	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●
4.23 Open Burn/Open Detonation	●	●	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	●
4.24 Pyrolysis	●	●	○	○	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	○	○
4.25 Thermal Desorption	●	●	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●

Processo de Extração Química

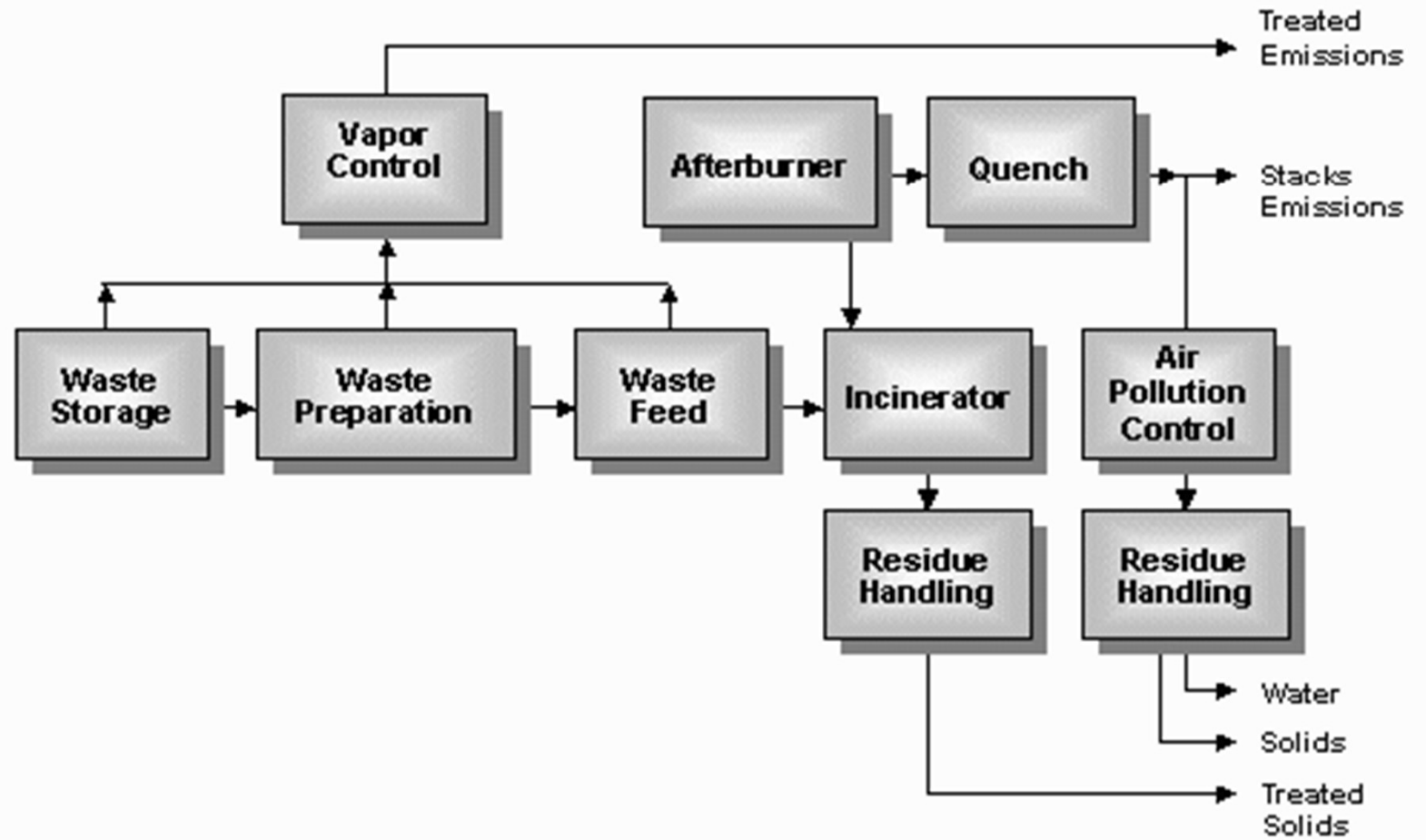



- 
- Pode ser feita por meio da utilização:
 - Solução ácida → remoção de metais;
 - Solventes → remoção de compostos orgânicos ou metais complexados.
 - Aplicação:
 - A extração por solventes pode ser utilizada para tratamento de sedimentos, lodos e solos contaminados;
 - Os contaminantes de interesse são os compostos orgânicos, como PCBs, COVs, solventes halogenados e derivados de petróleo;
 - A extração ácida é utilizada para os mesmos tipos de materias, porém contaminados com metais.

Redução/Oxidação química



Incineração



- 
- São utilizadas as mesmas técnicas que àquelas utilizadas para remediação de solos, lamas ou sedimentos;
 - A sua aplicação pode ser menos complexa, dependendo do tipo de contaminante e extensão da contaminação;
 - Deve-se ter atenção com relação aos tratamentos relacionados à extração da água contaminada dos aquíferos contaminados, o que pode exigir o seu descarte em mananciais superficiais.


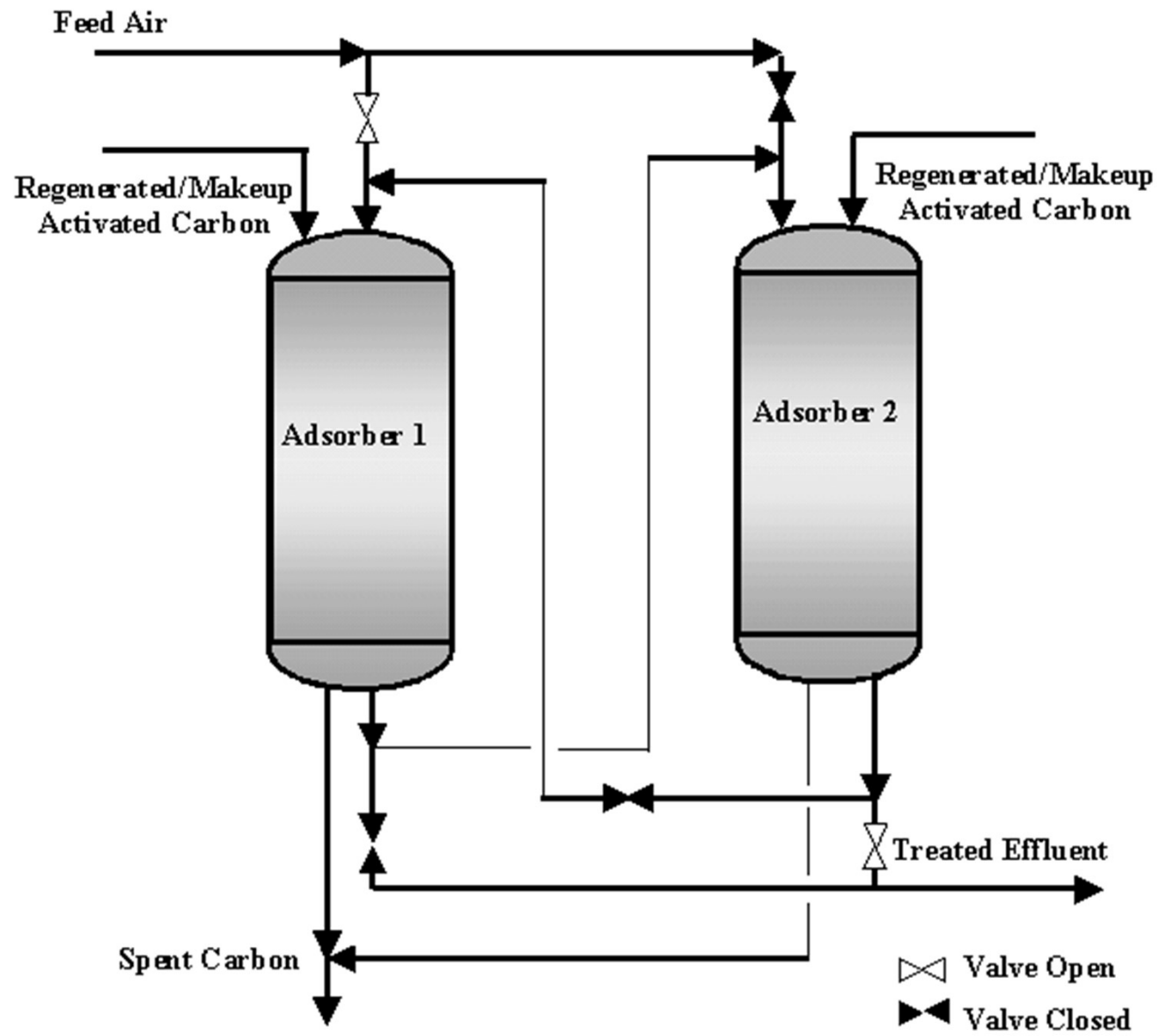

- 
- Muitas tecnologias aplicadas para o tratamento de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis podem resultar em emissões atmosféricas;
 - Isto pode requerer a utilização de sistemas para o controle destas emissões.

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	Non halogenated VOC's	Halogenated VOC's	Non halogenated SVOC's	Halogenated SVOC's	Fuels	Inorganics	Radionuclides	Explosives
			O&M	Capital	System Reliability & Maintainability	Relative Costs	Time									
3.14 Air Emissions/Off-Gas Treatment																
4.54 Biofiltration	●	N/A	●	●	◇	●	●	○	●	◇	◇	◇	●	○	I/D	◇
4.55 High Energy Destruction	○	N/A	I/D	I/D	○	○	I/D	○	●	●	●	●	●	○	I/D	○
4.56 Membrane Separation	○	N/A	I/D	I/D	○	○	I/D	○	●	●	○	○	○	○	I/D	○
4.57 Oxidation	●	N/A	●	●	●	●	I/D	●	●	●	●	●	●	○	I/D	○
4.58 Scrubbers	●	N/A	○	○	●	●	I/D	●	○	○	○	○	○	●	I/D	I/D
4.59 Vapor Phase Carbon Adsorption	●	N/A	●	●	●	●	I/D	●	●	●	●	●	●	○	I/D	●

Adsorção em carvão ativado da fase vapor



- 
- A maior parte das tecnologias utilizadas apenas transferem o contaminante de um meio para outro;
 - Necessidade de técnicas complementares para assegurar a destruição do contaminante e a disposição final do meio no qual o mesmo estava presente;
 - Após o processo de remediação é necessário monitorar o solo ou água contaminada para assegurar a sua efetiva remediação;
 - Um dos principais desafios para o projeto dos processos de remediação é o seu dimensionamento.