

Remediação de áreas contaminadas: proposições para o sítio da Plumbum em Santo Amaro da Purificação/BA

Jose Ângelo Sebastião Araujo dos Anjos¹

Luis Enrique Sánchez²

Luiz Carlos Bertolino³

Introdução

Num bairro da Zona Leste do município de São Paulo, cerca de cem famílias ocupam um terreno onde funcionou uma fábrica de revestimento cerâmico, constroem casas e criam alguns animais domésticos. Em abril de 1997, ao fazerem uma escavação para instalar uma manilha de águas servidas, descobrem uma substância com cheiro muito forte. Uma vaca pasta na área. Descobre-se que a substância é BHC, produto organoclorado usado como agrotóxico, proibido no Brasil, que nada tem a ver com a fábrica de revestimentos cerâmico e que foi provavelmente abandonado clandestinamente no terreno. Apela-se para diferentes repartições dos governos municipal e estadual. Alguma medida urgente parece necessária, tanto em vista a periculosidade desse produto químico. Diversas perguntas se colocam: o que fazer? como fazer? quem deve fazer o que? quando? Esta repartição pública tem atribuição legal para fazer alguma providência? É sua competência? Quais as consequências se nenhuma medida for tomada? Quais as consequências se alguma medida for tomada? (SANCHEZ, 2001)

Com o objetivo de limpar o solo e as águas subterrâneas de substâncias tóxicas foi formulado pela *Environmental Protection Agency* (EPA), em 1986, a primeira sequência de procedimentos de correção para uma área contaminada. Estas ações corretivas foram desenvolvidas em cinco fases, sendo a inicial uma vistoria e avaliação preliminar do sítio, passando pela proposição de técnicas de remediação até a implantação das medidas corretivas e estabilizadoras (BERTENFELDER, 1992).

Neste período, no Brasil, em 1987, ocorre o acidente com o cézio-137 em Goiânia e, segundo Terra e Ladislau (1991), “a não definição dos culpados pelo acidente é que retarda o devido atendimento às vítimas, seja médico, seja financeiramente” o que

¹ Doutorado em Engenharia Mineral/Universidade de São Paulo. jangelotrabalho@gmail.com

² Doutorado em Economia dos Recursos Naturais e do Desenvolvimento pela Escola de Minas de Paris. lsanchez@usp.br

³ Doutorado em Engenharia de Materiais. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. cbertolino@cetem.gov.br

caracteriza uma ação desarticulada das instituições, por falta de leis específicas sobre a contaminação industrial, e suas consequências na saúde humana.

Dentro deste contexto, a partir da década passada, em São Paulo, um número expressivo de trabalhos envolvendo o gerenciamento de áreas contaminadas por resíduos industriais e proposições para remediação de sítios foram se multiplicando, tais como Marker *et al.* (1994), Pompeia (1994), Sanchez (1995), Cunha (1997), Gloeden *et al.* (1997), Hassuda (1997), Leite *et al.* (1997), Sígolo (1997), Anjos (1988), Gloeden (1999), CETESB (1999), Crozera (2001), Silva, A.L.B. (2001), Silva, F. A. N. (2001), Toso Júnior (2001), Borba (2002), Sanchez (2006) e Marker (2008).

O termo *remediation*, na língua inglesa, refere-se à abordagem de cunho educacional, uma “ação ou processo de correção ou domínio do conhecimento ou problema” (WEBSTERS, 1995). Contudo, este termo foi introduzido nos Estados Unidos e Europa, pelos formadores de opinião, como um “conjunto de medidas objetivando a limpeza de sítios degradados por atividades industriais”, notadamente a disposição de resíduos tóxicos, que tenha causado a contaminação do solo ou do aquífero (SÁNCHEZ, 1994).

A USEPA define remediação como um conjunto de ações corretivas aplicáveis a um determinado sítio contaminado por resíduos perigosos. Na prática, essas ações minimizam os efeitos da contaminação, o que significa que dificilmente pode-se recuperar o sítio (BERTENFELDER, 1992). Enquanto que Bitar (1997) define a remediação como técnicas de tratamento que se destinam a “eliminar, neutralizar, imobilizar, confinar ou transformar elementos ou substâncias presentes no ambiente e, assim, alcançar a estabilidade química do ambiente”.

O termo remediação por vezes se confunde com recuperação. Gloeden (1999) e Sanchez (2001) discutiram as diferenças e aplicação destas terminologias, que segundo (GLOEDEN *op. cit.*) podem ser empregadas quando determinarem medidas para compatibilizar o uso atual e futuro da área contaminada. Dentro deste contexto, a recuperação de áreas contaminadas seria todo o processo de aplicação de medidas corretivas necessárias para minimizar ou eliminar a contaminação, visando a utilização da área para um determinado uso, enquanto a remediação está relacionada a medidas de contenção ou isolamento da contaminação. Enquanto Sanchez (*op. cit.*) enfatiza a recuperação como medidas para eliminar ou reduzir a quantidade de substâncias nocivas presentes no solo ou na água subterrânea, enquanto a remediação estaria relacionada a medidas para isolar os setores mais contaminados e remoção dos contaminantes a níveis seguros à saúde humana e ao ecossistema.

Todavia, a aplicação do termo remediação por vezes torna-se improcedente quando dependente de respaldo jurídico, visto que, até o momento, não existe lei específica no Brasil para remediação de sítios contaminados. Entretanto, o mesmo não ocorre com a especificação do termo recuperação na Constituição Federal de 1988, regulamentado pelo Decreto Federal 97.632/89 para projetos de mineração e denominado Plano de Recuperação de Áreas Degradadas. Nestas condições, a recuperação deve

ser entendida como o resultado da aplicação de técnicas de manejo objetivando tornar a área adequada para um novo uso (SANCHEZ, 2001).

Schianetz (1999) não utilizou o termo remediação e correlaciona o passivo ambiental⁴ de áreas contaminadas por resíduos industriais a ações para a sua recuperação, tais como: necessidade de ações imediatas; objetivos da recuperação; duração da ação da recuperação; tipos de contaminantes e suas relações com o subsolo; recursos financeiros disponíveis e; aspectos legais referentes à segurança da operação.

Já o manual de gerenciamento de áreas contaminadas (CETESB, 1999), primeiro protocolo brasileiro sobre áreas contaminadas, define a remediação como a “aplicação de técnica ou conjunto de técnicas em uma área contaminada, visando à remoção ou contenção dos contaminantes presentes, de modo a assegurar uma utilização para a área, com limites aceitáveis de riscos aos bens a proteger”.

Desta forma, o sistema de gerenciamento de áreas contaminadas da CETESB contempla uma etapa para investigação para a remediação (selecionar dentre as varias opções de técnicas existentes aquelas mais apropriadas para o caso considerado) e em seguida um projeto de remediação (base técnica para o órgão gerenciador ou órgão de controle ambiental avaliar a possibilidade de autorizar ou não a implantação e operação dos sistemas de remediação propostas).

Todavia, duas décadas após as primeiras regulamentações efetuadas pelos Estados Unidos⁵ para limpeza de solos contaminados e, da intensa investigação tecnológica patrocinada pelos países industrializados, em especial, Estados Unidos, Canadá, Inglaterra, Holanda e Alemanha, constata-se que as dificuldades de recuperação dessas áreas contaminadas continuam. Esta conclusão decorre da complexidade que envolve a contaminação dos sítios, das técnicas aplicadas não atingirem seus objetivos plenamente e, notadamente, pelos elevados custos para implementação da remediação.

Estas condições vêm favorecendo a especificidade de técnicas de remediação com menores custos, como as apresentadas nas *Sixth and Seventh International Conference on Contaminated Soil*, realizadas sequencialmente, em 1988, em *Edinburgh, UK* e 2000, em *Leipzig, Alemanha*. Nestas conferências foram enfatizadas as dificuldades de atingir padrões mais restritivos com as tecnologias atuais, a

⁴ Segundo Schianetz (*op. cit.*), passivos ambientais são deposições antigas e sítios contaminados que produzem riscos para o bem estar da coletividade, segundo a avaliação tecnicamente respaldada das autoridades competentes. Porém, para Sánchez (*op. cit.*), o passivo ambiental é o acúmulo de danos (impactos) ambientais que devem ser reparados a fim de que seja mantida a qualidade ambiental de um determinado local.

⁵ *Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act* (CERCLA), aprovado em 1980, foi a primeira lei que tratou da contaminação do solo e das águas subterrâneas, também conhecida como “*Superfund*”. Esta lei foi precedida das regulamentações específicas para água, ar e resíduos sólidos, respectivamente, *Water Pollution Control Act* (1948), *Clean Air Act* (1955) e *Solid Waste Control Act* (1965) (SÁNCHEZ 2001)

necessidade de conviver com as áreas contaminadas e a urgência na utilização do bom senso para determinação dos sítios com riscos imediatos, além de serem enfatizadas as pesquisas sobre técnica de atenuação natural dos contaminantes, caracterizada pelo seu baixo custo na execução da remediação.

Nessas circunstâncias, diversas organizações mundiais, em especial as instituições ligadas ao Mercado Comum Europeu⁶, Leste Europeu e América do Norte, vêm apresentando propostas de cooperação, para troca de conhecimento científico e proposições de metodologias e testes de novas tecnologias de remediação para os solos e as águas subterrâneas.

No Brasil, desde 1992, algumas técnicas de descontaminação de solo já vinham sendo executadas pelo setor privado, dentre elas o processo *Bergmann* e tecnologias convencionais como: incineração, extração química, descoloração, biodegradação, estabilização e vitrificação. Todavia, um dos grandes empecilhos à implementação da remediação nos solos contaminados estava relacionado ao custo operacional das tecnologias que variava de US\$ 122/m³ quando utilizado o processo *Bergmann*, a US\$ 1.282/m³ o custo para a incineração com remoção do contaminante (ROHRIG; SINGER 1996).

Contudo, em 1997, a revista *Química e Derivados* apresentou uma grande discussão denominada de "Controle ambiental chega ao subsolo". Neste artigo são apresentadas as proposta dos planos de ação da CETESB para sítios contaminados em conjunto com a Agência Ambiental do Governo Alemão (*GTZ*) e, são enfatizados os procedimentos para desenvolvimento do Manual de Áreas Contaminadas, além do estabelecimento dos valores de referência e intervenção para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo (FURTADO, 1997).

Durante este período, a metodologia adotada para diagnóstico e avaliação de áreas contaminadas seguiu os procedimentos aplicados pela *USEPA*, e sequenciado em três fases:

Fase 1 – Auditoria de conformidade, quando serão levantadas as legislações ambientais pertinentes; licenças Municipais, Estaduais, Federais e Ambientais; mapas e laudos de riscos ambientais, saúde ocupacional, ergonômico e notificações de acidentes, além de inspeção e conhecimento dos equipamentos instalados a céu aberto e em sub-solo;

Fase 2 – Delineamento da contaminação, quando serão levantadas as informações que permitam quantificar o nível de contaminação existente no solo e água subterrânea, por meio do conhecimento geológico e hidrológico da área, utilização de proce-

⁶ O Concerted Action on Risk Assessment for Contaminated Sites in the European Union (CARACAS); Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies in Europe (CLARINET); Network for Industry Contaminated In Europe (NICOLE) e Risk Abatement Center for Central and Eastern Europe (RACE).

dimentos normalizados para amostragem e caracterização da/s fonte/s de contaminação e qualificação e quantificação das substâncias tóxicas por meio de análises químicas. Nesta fase também devem ser estabelecidas as prioridades para a remediação, o risco imediato à saúde pública, além dos custos e detalhamento para a remediação; e

Fase 3 – Programa detalhado de monitoramento e ações corretivas, por meio de programas de risco à saúde e ao ecossistema, aplicação de técnicas de remediação e avaliação sistemática da persistência das substâncias tóxicas no sítio contaminado.

Porém é cada vez maior o número de sítios contaminados que vêm sendo identificados no Brasil, principalmente, em função do descarte inadequado ou clandestino dos resíduos industriais⁷ existentes no passado. Embora não exista um cadastro de áreas contaminadas no Brasil, somente o estado de São Paulo contempla um programa para a região metropolitana e, que já teria 2300 áreas potencialmente identificadas. Dados apresentados por Gloeden (1999) apresentam somente para a bacia do Guapiranga, no Estado de São Paulo, 1267 áreas potencialmente contaminadas.

Todavia, com a implantação de protocolos específicos para os sítios contaminados no Estado de São Paulo, em especial o Manual para Gerenciamento de Áreas Contaminadas (Figura 1), os Valores de referência de qualidade do solo e águas subterrâneas e a nova legislação implementada pela prefeitura de São Paulo para ocupação de lotes urbanos que dispõe de diretrizes e procedimentos relativos ao gerenciamento de áreas contaminadas no Município⁸, o Estado de São Paulo tornou-se pioneiro na América do Sul por possuir mecanismos específicos e legais para avaliação de sítios contaminados.

A partir da implementação dos protocolos estaduais, a CETESB apresentou em maio de 2002 o primeiro cadastro de áreas contaminadas, compreendendo 255 sítios já em fase de remediação. Este cadastro, disponível na internet (www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/relacao_areas.htm), é compreendido por uma ficha com dados sobre a área contaminada.

Em 2009, foi promulgada a Resolução CONAMA 420/2009 que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quando à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

⁷ Segundo a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA), órgão do governo federal, as áreas com maior potencial de risco a saúde humana são: Santana, no Estado do Amapá, presença de arsênio; Santo Amaro da Purificação, no Estado da Bahia, contaminação por chumbo e cádmio; Duque de Caxias, no Rio de Janeiro, contaminação por pesticidas; Goiânia, Goiás, contaminação por material radioativo e, em São Paulo, entre outros o Condomínio Barão de Mauá, presença de benzeno, Recanto dos Pássaros em Paulínea, presença de organoclorados e Fabrica de Bateria Ajax, contaminação por chumbo.

⁸ Decreto n° 42.319, de 21 de agosto de 2002.

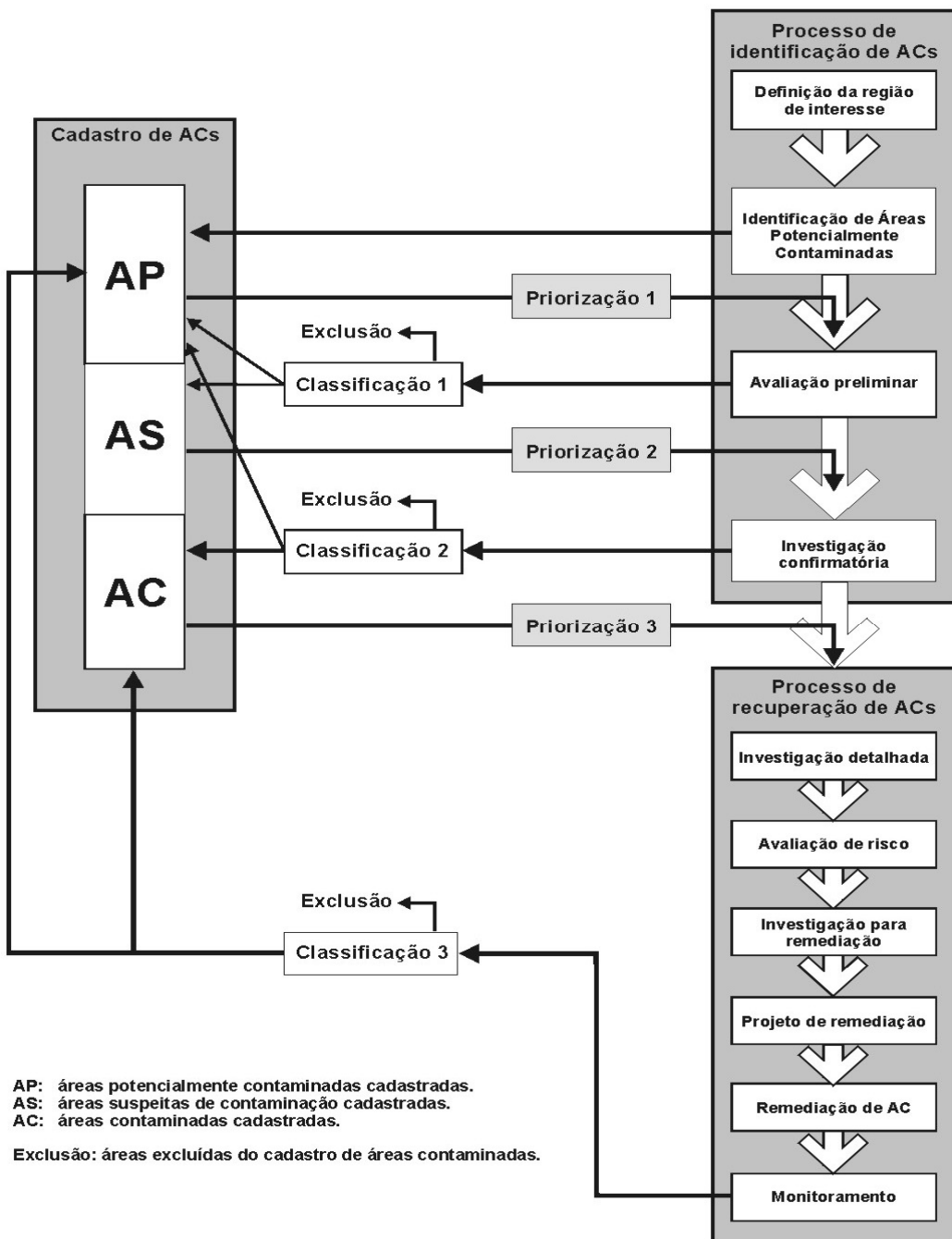
Nesta Resolução fica estabelecido que a avaliação da qualidade do solo, quanto à presença de substâncias químicas, deve ser efetuada com base em Valores Orientadores de Referência de Qualidade, de Prevenção e de Investigação, sendo que os Valores de Referência de Qualidade do solo-VQRs (concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinada com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos) para substâncias químicas naturalmente presente serão estabelecidos pelos órgãos ambientais competente dos Estados e do Distrito Federal, em até 04 anos após a publicação desta Resolução, de acordo com o procedimento estabelecido no anexo I desta Resolução (CONAMA 420/2009). O prazo final para estabelecimento do VRQs finda em 27 de dezembro de 2013.

Todavia, em 2011 foi negada pelo órgão ambiental do Estado da Bahia, a licença de localização do projeto imobiliário MCMV – Residencial Solar Paraíso, vinculado ao PAC- Programa de Aceleração do Crescimento do Governo Federal, localizado na Fazenda Mucumbe, à 200 (duzentos) metros da metalurgia da Plumbum. Embora o projeto estivesse fora da área de restrição do uso do solo segundo o plano diretor do município de Santo Amaro, o órgão ambiental considerou que a área apresentava risco à saúde humana.

1. Tecnologias de remediação

Após a revolução industrial, responsável pela concentração e disposição inadequada de resíduos tóxicos, e dos problemas causados à saúde humana pela migração dos metais pesados no solo e águas subterrâneas nas formas potencialmente disponíveis, tais como os exemplos mundialmente conhecidos do “*Love Canal*”, nos Estados Unidos, “*Lekkerkerk*” na Holanda, e “*Minamata*” no Japão.

As técnicas de remediação evoluíram rapidamente, principalmente as oriundas dos processos consagrados na metalurgia. Porém, as pesquisas sobre sítios contaminados conviveram, por muito tempo, dividida em dois grandes grupos de tecnologias de remediação (ANDERSON, 1994a; 1994b; 1994c; 1994d e 1994f; USEPA, 1990). A realizada *ex situ*, caracterizada por técnicas que promovem a remoção do solo para descontaminação e posterior reposição no local de origem ou disposição em aterro adequado. E a técnica *in situ*, realizada no local da contaminação, e sendo largamente utilizada tanto para remover a contaminação do solo como para as águas subterrâneas.



Fonte: CETESB (1999)

Figura 1 - Fluxograma de procedimentos para avaliação de sítios contaminados

Segundo Schianetz (1999), as técnicas de remediação podem ser diferenciadas entre processos *in site* (sem remoção do material), *on site* (remoção e tratamento no local) e *off site* (tratamento fora do local). Estas técnicas apresentam vantagens e desvantagens que devem ser avaliadas, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens dos processos de remediação

	Processo <i>in site</i>
Vantagem	<ul style="list-style-type: none"> • relativamente barato
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • dificuldade de descontaminar de forma uniforme; • problemas consequentes são de difícil avaliação; • grande dispêndio de tempo; e • êxito da recuperação não pode ser constatado com confiabilidade
	Processo <i>on site</i>
Vantagem	<ul style="list-style-type: none"> • êxito da recuperação é de fácil repetibilidade
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • após o tratamento o solo fica biologicamente morto e mineralogicamente alterado; • a utilização de solventes para a extração compromete sua separação no final do processo; • na escavação ocorrem riscos ao meio ambiente e a saúde; e • é 2 a 3 vezes mais caro que os processos <i>in site</i>
	Processo <i>off site</i>
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • geralmente rentável; e • a área ter um destino imediato a uma utilização
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • problema é transferido; • são necessários centros de tratamento para a descontaminação; e • grande dispêndio no transporte e proteção no trabalho

Fonte: Schianetz (1999)

As principais técnicas de remediação testadas pela *USEPA*, durante o período de 1990, nos países industrializados, e aplicadas em escala piloto e reais (ROEHRING; SINGER, 1996), se deram em função do número expressivo de áreas potencialmente contaminadas na Comunidade Européia, cerca de 1.500.000 (CROZERA, 2001), e das 500.000 áreas na América do Norte (SANCHEZ, 2001).

Isso foi possível graças a políticas específicas para esses sítios e à disponibilidade de recursos financeiros pelos Governos envolvidos. Segundo Cunha (1997), entre 1980 e 1986 foi destinado pelo *Superfund*, respectivamente, US\$ 1,6 bilhão e 9,0 bilhões, e segundo Sanchez (2001), o custo médio da remediação do *Superfund* por sítio ficou em US\$ 29 milhões.

Porém, já no ano fiscal de 1993, a *USEPA* realizou a primeira seleção de tecnologias de remediação mais frequentemente usadas nos sítios contaminados e controladas

pelo *Superfund*. A aplicação e desenvolvimento destas técnicas nos sítios *Superfund* proporcionaram a elaboração de uma coletânea denominada *Innovative site remediation technology*, organizada pela *American academy of environmental engineers* com a assistência da USEPA, composta por oito volumes. Este trabalho foi desenvolvido por mais de 100 especialistas, que classificaram como principais tecnologias de remediação, a biorremediação, o tratamento químico, o tratamento por extração, os processos de solidificação e estabilização, a lavagem e vaporização do solo, a dessorção termal, a destruição termal e a extração por vapor a vácuo.

Esta publicação se constituiu em uma grande avaliação dos resultados quantitativos das principais técnicas empregadas pela USEPA, sendo discutido amplamente o potencial de aplicação das técnicas, seus processos e evolução, suas limitações e seu potencial como tecnologia inovadora (ANDERSON, 1994a e 1994b).

Em USEPA (1990), foram apresentadas três classes de tecnologias utilizadas especificamente para metais pesados. Elas foram classificadas como contenção, solidificação/estabilização e separação/concentração (Quadro 2).

Quadro 2 - Tecnologias de remediação

Classificação da tecnologia	Tecnologia específica
Contenção	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura • Barreiras verticais • Barreiras horizontais
Solidificação/Estabilização	<ul style="list-style-type: none"> • Micro-encapsulamento de polímeros • Vitrificação
Separação/Concentração	<ul style="list-style-type: none"> • Lavagem de solo <i>in situ</i> • Lavagem solo <i>ex situ</i> • Pirometalurgia • Eletrocínética

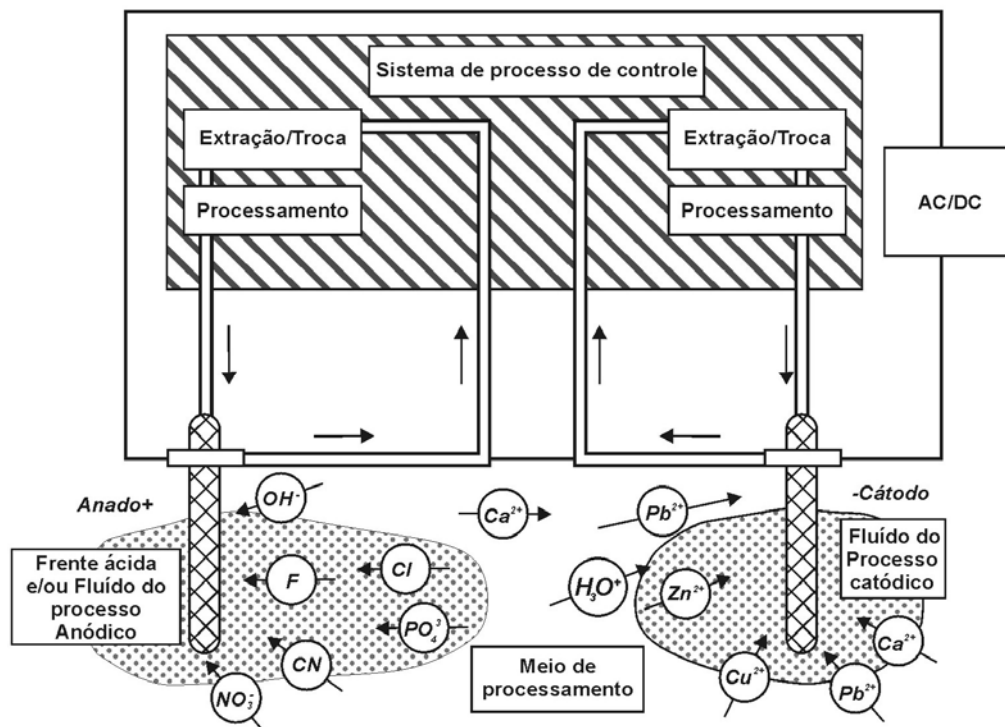
Fonte: USEPA (1990)

Na USEPA (1990) foram selecionadas as mais promissoras tecnologias *in situ* de remediação para sítios contaminados por compostos orgânicos e inorgânicos. Esta proposição foi determinada pelo aumento significativo destas tecnologias nos processos de seleção e avaliação das remediações desenvolvidas nos sítios *Superfund*. As tecnologias para tratamento de solo foram:

- Eletrocínética – a) eletromigração (transporte e troca de espécies químicas dentro do gradiente elétrico, acarretando a captura dos contaminantes (Figura 2); b) eletro-osmose (transporte de fluido no gradiente elétrico); e c) eletrólise (reações químicas associadas com o campo elétrico).
- Fitorremediação – a) fitoextração (tecnologia que usa plantas hiperacumuladoras para transporte de metais (Ni, Co, Cu, Cr e Zn) do solo para dentro da raiz); b) fi-

toestabilização (uso de plantas para limitar a mobilidade e biodisponibilidade dos metais (Zn, Pb e Cu) no solo; e c) rizofiltração (uso de raízes de plantas aquáticas para absorver, concentrar e precipitar metais de resíduos).

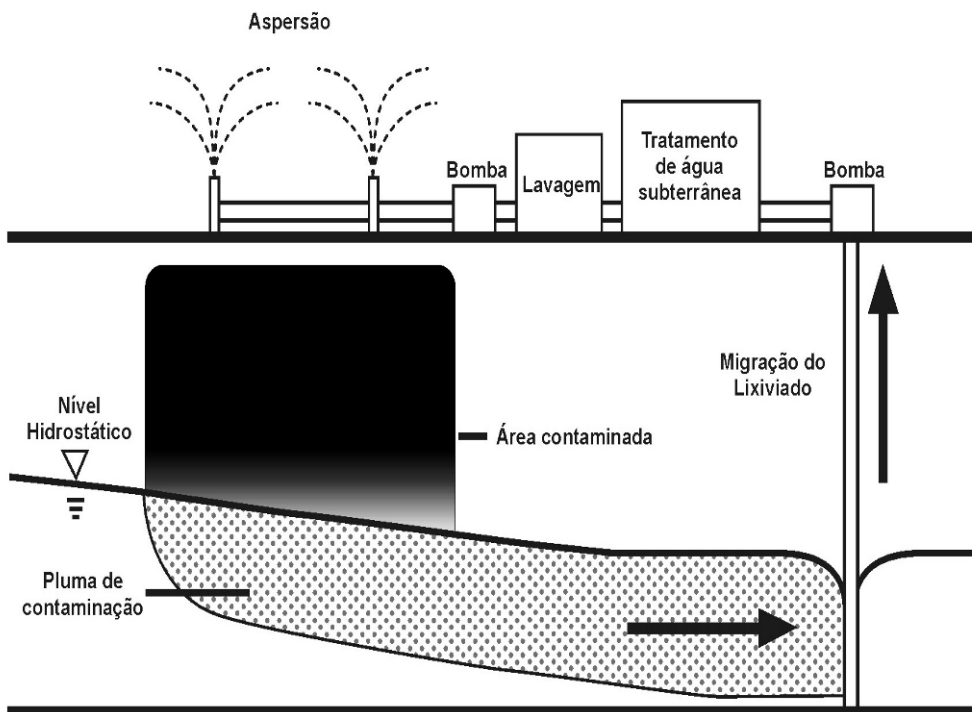
- Lavagem do solo *in situ* (*soil flushing*) – usado em solos com alta permeabilidade quando são utilizadas águas ou reagentes químicos para solubilização e extração dos contaminante (Figura 3).



Fonte: USEPA (1990)

Figura 2 – Remediação de solo contaminado por eletromigração

- Solidificação/estabilização (S/S) – solidificação é o processo de troca das características físicas no resíduo para controle e redução da mobilidade dos contaminantes, criando uma barreira física para a lixiviação. Enquanto a estabilização é o processo de tratamento que converte o contaminante para baixas formas de mobilidade através interações termais e químicas (imobilização). Exemplos de S/S são a vitrificação do solo e a utilização de reagentes de estabilização *in situ* (Quadro 3).



Fonte: USEPA (1990)

Figura 3 – Remediação por lavagem do solo.

Jaagumagi (2002) apresentou, além das técnicas *in situ* e *ex situ* (remoção seguida de tratamento e disposição), a atenuação natural como a terceira e mais nova categoria básica de remediação para limpeza de sedimentos de canais de porto. Segundo o autor, a atenuação natural é uma abordagem baseada em procedimentos e monitoramento de processos biológicos e químicos que ocorrem naturalmente, reduzindo a contaminação do solo e águas subterrâneas. Requer o conhecimento detalhado de químicos, físico-químicos, hidrologistas e biólogos. Esta nova forma de remediação vem se consagrar com a *European conference on natural attenuation* realizada em outubro de 2002, em Heidelberg na Alemanha.

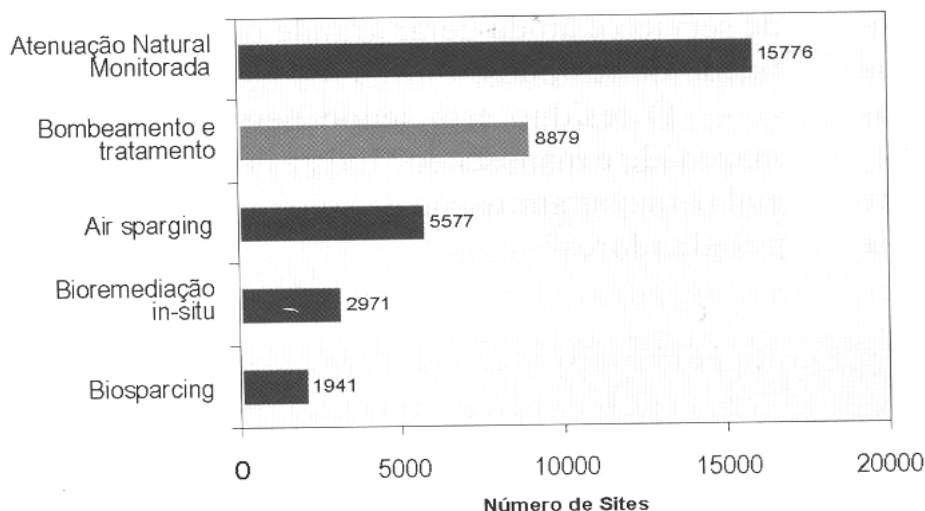
Segundo Oliveira (2000), a Atenuação natural monitorada (ANM) se caracteriza como a tecnologia de remediação com maior viabilidade econômica para o acompanhamento geoquímico e atividade microbiológica de contaminantes orgânicos em subsuperfície. Estes dados são referendados pelos projetos de remediação utilizando ANM em tanques subterrâneos nos Estados Unidos (Figura 4). Entretanto, para o National Reserch Council (NRC) dos Estados Unidos a ANM é uma técnica de remediação até o momento desenvolvida para os contaminantes orgânicos, BTEX,

hidrocarbonetos oxigenados (álcoois, cetonas e ésteres de baixo peso molecular) e cloreto de metileno.

Quadro 3 - Tecnologias de solidificação/estabilização

Reagentes de estabilização <i>in situ</i>	Vitrificação
Adição de reagentes pozzolanicos com ou sem aditivos para converter quimicamente e fisicamente contaminantes para baixas formas de mobilidade	Uso de energia para dissolver solos e encapsular contaminantes quimicamente e fisicamente produzindo baixa mobilidade e maior forma estável
Aplicado para muitos metais tais como o arsênio, mercúrio e cromo hexavalente	É aplicada geralmente para arsênio , chumbo, cromo, cádmio, cobre, zinco, asbesto e metais radioativos
A sua eficiência depende de baixas percentagens de argilas	A presença de voláteis e altas concentrações de contaminantes orgânicos pode diminuir a sua eficiência.

Fonte: USEPA (1990)



Fonte: Tulis et al. (1997 apud Oliveira, 2000)

Figura 4 – Programas de remediação em tanques subterrâneos

Outra forma de implementar técnicas de remediação em sítios contaminados é definida por meio da caracterização do alvo a ser atingido no projeto de remediação (SMITH *et al.*, 1995). Por meio deste procedimento devem ser enfatizados critérios e opções aproximadas para os principais objetivos da remediação, sendo preponderante a redução do volume do contaminante; o estabelecimento de forma de estacionar a mobilidade do meio contaminado e diminuir sua mobilidade. Estes procedimentos são distribuídos nos seguintes grupos:

1. Tratamento por imobilização - são técnicas *in situ* que se caracterizam pela redução da mobilidade dos contaminantes na matriz do solo ou no transporte dos contaminantes nas águas, por meio dos seguintes mecanismos: redução da infiltração no meio contaminado por meio do uso de barreiras; redução da infiltração através da modificação da permeabilidade da matriz contaminada; redução da solubilidade e consequentemente a mobilidade do contaminante nas águas subterrâneas; e o controle do fluxo dos contaminantes nas águas para permitir a coleta e tratamento (SMITH *et al.*, 1995). As técnicas mais empregadas são:

- Sistema de encapsulamento;
- Barreiras verticais;
- Barreiras horizontais, e
- Solidificação/Estabilização.

2. Tratamento de redução da toxicidade - são técnicas aplicadas para redução da toxicidade por processos químicos e biológicos. Geralmente converte os contaminantes metálicos da matriz do resíduo sólido para uma forma menos tóxica. As principais tecnologias de tratamento químico são:

- Oxidação química - reações que alteram o estado de oxidação dos átomos através da perda dos elétrons. As reações predominantes são a precipitação e a solubilização, e são processos utilizados basicamente para compostos orgânicos;
- Redução química - é um processo de redução no qual o estado de oxidação de um átomo tende a decrescer. As principais reações são a precipitação e a solubilização, e
- Neutralização química - reações que regulam as concentrações de soluções de íons hidróxido e hidrogênio. São utilizados para tratamento de sólidos que são excessivamente ácidos ou básicos.
- Os processos biológicos empregados na remediação de áreas contaminadas obtidos por intermédio da decomposição da molécula orgânica em moléculas mais simples, por exemplo: CO₂, CH₄, sais inorgânicos e água. Este processo envolve reações de absorção, oxidação, redução, biolixiviação, bioextração, biosorção e redução ou oxidação biológica. As principais tecnologias de tratamentos biológicos são:
 - Bioacumulação - é o processo de transferência de metal da matriz contaminada para a biomassa, podendo o metal ser acumulado em organismos vivos seletivos ou biomassas não vivas;
 - Oxido-redução biológica - é uma técnica utilizada para selecionar microorganismos através da redução ou oxidação dos metais, e
 - Metilização - é o processo através do qual organismos atacam o grupo metil (CH₃) para formar metais inorgânicos.

3. Tratamento por concentração e separação – são tecnologias desenvolvidas a partir das técnicas de tratamento de minério. As principais técnicas são os processos físicos de separação pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas. As tecnologias *in situ* são os processos por lavagem de solos e a extração eletrocinética por águas subterrâneas. O principal problema que envolve a implementação destas tecnologias é o elevado custo e a obtenção de um desejável nível dos resultados.

Principais tecnologias de remediação aplicada para metais

Algumas tecnologias para tratamento de solos e águas contaminadas por metais pesados, especialmente, chumbo, cádmio, zinco e cobre, são encontradas em grande densidade na literatura. Daí, sua aplicação e eficiência no processo de remediação dependem do tipo de remediação proposto (contenção, estabilização ou limpeza), do acesso a tecnologias disponíveis no mercado além do custo para a remediação. Estes fatores têm levado muitos sítios contaminados a utilizarem mais de uma tecnologia de remediação para que haja êxito no processo de recuperação.

A USEPA (1990) apresentou uma listagem dos principais contaminantes que sofreram tratamento *in situ* enfocando somente a contaminação no solo. Os metais identificados são: chumbo (445 sítios); arsênio (388 sítios); cromo (352 sítios); cádmio (276 sítios); níquel (276 sítios) e zinco (273 sítios), além do mercúrio e cobre em menores proporções em sítios *Superfund*. O Quadro 4 apresenta as tecnologias de contenção aplicadas nos principais sítios do *Superfund*.

Quadro 4 - Tecnologias de contenção

Nome do sítio	Tecnologia específica	Metais	Tecnologia associada	Situação
Ninth Avenue Dump, IN	Contenção	Pb	Barreira vertical e cobertura	Selecionado
Industrial Waste Control, AK	Contenção	As, Cd, Cr e Pb	Cobertura e drenos	Em operação
E.H. Shilling Landfill, OH	Contenção	As	Cobertura e berma de argila	Selecionado
Chemtronic, NC	Contenção	Cr e Pb	Cobertura	Selecionado
Ordnance Works Disposal, WV	Contenção	As e Pb	Cobertura	Selecionado
Industriplex, MA	Contenção	As, Pb e Cr	Cobertura	Selecionado

Fonte: USEPA (1990)

O Quadro 5 apresenta as tecnologias de solidificação/estabilização aplicada no *Superfund*.

Quadro 5 - Tecnologias de solidificação/estabilização

Sítio	Tecnologia específica	Metais	Tecnologia associada	Situação
DaRewal Chemical, NJ	Solidificação	Cr, Cd e Pb	Bombeamento e tratamento	Selecionada
Marathon Battery Co.,m Ny	Fixação química	Cd e Ni	Dragagem e disposição <i>off-site</i>	Em operação
Nascolite, Millville, NJ	Estabilização de solo em <i>wetlands</i>	Pb	Disposição <i>on-site</i>	Selecionada
Roebbling Steel, NJ	Solidificação/estabilização	As, Cr e Pb	Cobertura	Selecionada
Waldick Aerospace, Nj	Solidificação/estabilização	Cd e Cr	Disposição <i>off-site</i>	Executado
Palmerton Zinc, Pa	Estabilização	Cd e Pb	_	Em operação
Tonnoli Corp., PA	Solidificação/estabilização	As e Pb	Barreira química	Selecionada
Whitmoyer Laboratories, PA	Oxidação/ficação	As	Bombeamento e tratamento, cobertura e revegetação	Selecionada
Bypass 601, NC	Solidificação/estabilização	Cr e Pb	Cobertura e bombeamento e tratamento	Selecionada
Flowood,MS	Solidificação/estabilização	Pb	Cobertura	Executada
Independente Nail, SC	Solidificação/estabilização	Cd e Cr	Cobertura	Executada
Papper's Steel and Alloys, FL	Solidificação/estabilização	As e Pb	Disposição <i>on-site</i>	Executada
Gurley Pit, AR	Solidificação/estabilização	Pb		Executada
Pesses Chemical, TX	Estabilização	Cd	Cobertura com concreto	Executada
E.I. Dupont de Nemours, IA	Solidificação/estabilização	Cd, Cr e Pb	Cobertura e revegetação	Executada
Shaw Avenue Dump, IA	Solidificação/estabilização	As e Cd	Cobertura e monitoramento das águas subterrâneas	Executada
Gould Site, OR	Solidificação/estabilização	Pb	Cobertura e revegetação	Em operação

Fonte: USEPA (1990)

O Quadro 6 apresenta as tecnologias de lavagem de solo *ex-situ* (*soil washing*)¹ e *in-situ* (*soil flushing*)² aplicada no *Superfund*.

Quadro 6 - Tecnologias de lavagem de solo

Sítio	Tecnologia específica	Metal	Tecnologia associada	Situação
Ewan Property, NJ	Tratamento da água ¹	As, Cr, Cu e Pb	Pré-tratamento com extração de solventes para remoção de orgânicos	Selecionada
GE Wiring Divices, PR	Água com solução aditiva de KI ¹	Hg	Tratamento de resíduo, disposição <i>on site</i> e cobertura com solo argiloso	Selecionada
King of Prússia, NJ	Água tratada com aditivos ¹	Ag, Cr e Cu	Disposição de solo no solo	Executada
Zanesville Well Field, OH	Lavagem de solo ¹	Hg e Pb	SVE para remover orgânicos	Selecionada
Twin Cities Army Ammunition Plant, MN Sacrament Army Depot CA	Lavagem de solo ¹	Cd, Cr, Cu, Hg e Pb	Lixiviação do solo	Executado
	Lavagem de solo ¹	Cr e Pb	Disposição de resíduos líquidos off-site	Selecionado e posteriormente retirado
Lipari Landfill, NJ	Lavagem de solo e resíduos ²	Cr, Hg e Pb	Contenção com barreiras horizontais e <i>wetlands</i>	Em operação
United Chrome Products, OR	Lavagem de solo ²	Cr	Eletrocínética	Em operação

Fonte: USEPA (1990)

No ConSoil' 98 diversas tecnologias de remediação para metais pesados foram apresentadas. Entre elas as técnicas hidrometalúrgicas para a remoção de metais por lixiviação apresentaram resultados significativos com a utilização de ácido cítrico (H₃C), Na₂ EDTA e HCl-CaCl₂ (Quadro 7), a lavagem de partículas finas do solo contaminado com zinco por flotação e a utilização de tecnologias usando fosfatos, sedimentos de origem biológicas e cinzas para a estabilização de solos altamente contaminados nas área de mineração (KONTOPOULOS; THEODORATOS 1998).

Quadro 7 - Testes de lixiviação para extração de metais

	Pb	Zn	Cd	As	Ca	Mg	Al	Fe	Mn
Conc. inicial do solo (mg/kg)	34800	2020	100	2800	72800	15200	12900	60000	3500
Ácido cítrico (H ₃ C)									
3,3 moles H ₃ C/kg solo %	54,6	61,4	72,0	3,6	65,2	37,5	9,3	3,5	74,3
6,6 moles H ₃ C/kg solo %	66,1	72,8	92	10	70,9	53,3	12,1	5,5	86
Na ₂ EDTA%									
2,5 moles Na ₂ H ₂ L/kg solo	75,6	55,4	96,0	21,0	78,7	6,4	6,3	2,8	82,9
2,5 moles Na ₂ H ₂ L/kg solo	79,9	67,8	100	26,1	82,6	6,7	7,9	4,2	90,0
HCL									
5,6 moles HCL/kg solo %	88,1	87,8	87,4	0,01		88,1		1,4	93,0
6,7 moles HCL/kg solo %	91,1	91,3	91,8	6,1	91,7	93,9	47	7,0	94

Fonte: Papassiopi *et al.* (1998)

Enquanto que no Prague (2000⁹), foi dada grande ênfase na remediação *in situ* de sedimentos, principalmente em canais de portos com grandes movimentações de produtos industrializados. Estes sedimentos geralmente precisam ser dragados, remediados e dispostos adequadamente. Desta forma as principais técnicas de remediação *in situ* para metais pesados em sedimentos são apresentadas no Quadro 8.

⁹ Fifth International Symposium and Exhibition on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe, 12-14 setembro de 2000, Praga/Republica Checa.

Quadro 8 - Remediações *in situ* de sedimentos

Remediação	Tipo de contaminante	Tecnologia utilizada	Implementação da tecnologia
Remoção dos contaminantes e concentração biológica	Ni, Zn, Cu e Cd	Fitoextração (entrada de metais na planta)	Introdução da espécie vegetal, cultivo e incineração
Transformação química	Metais	Precipitação de metais	Infiltração de sais e construção de <i>wetlands</i>
Fixação de contaminantes por sorção ou imobilização	Metais	Precipitação de metais como hidróxidos ou complexos insolúveis. Encapsulamento de metais em matriz inorgânica.	Aumento do pH por adição de cal ou hidróxidos alternativos; Precipitação ou adsorção perto das raízes das plantas. Adição de cimento; Vitrificação usando corrente elétrica; Adsorção de metais nas superfícies de aluminossilicatos e argilas.
Redução da dispersão advectiva próximo a superfície da água.	Todos os contaminantes	Aumento da resistência hidrológica. Redução da erosão. Isolamento hidrogeológico.	Recobrimento por camadas; Denitrificação do sedimento. Introdução de espécies vegetais Desvio de drenagens
Redução da dispersão advectiva próximo a água subterrânea.	Todos os contaminantes	Aumento da resistência hidrogeológico. Isolamento hidrogeológico.	Aplicação de camada de argila. Medidas de controle do nível hidrostático.
Ações para contenção	Todos os contaminantes	Redução do risco	Troca de função do canal navegável

Fonte: Zeman; Patterson (2000)

Pesquisas desenvolvidas por Marseille *et al.* (2000) enfocaram a mobilidade dos metais pesados nas espécies vegetais (Quadro 9) e sedimentos contaminados dragados do rio *Scarpe*, no norte da França. A contaminação, oriunda de uma metalurgia de zinco, apresentou as seguintes concentrações (mg/kg) nos sedimentos: Zn (6000); Pb (600); Mn (230); Fe (17000) e Ti (1400).

Quadro 9 - Concentrações de Zn, Pb, Cd e Cu nas raízes

Espécies	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)
<i>Urica diosca</i>	1040±10	29,4±0,4	30±0,7	33,6±0,4
<i>Epilobium parviflorum</i>	430±7	8,7±0,2	5,3±0,2	9,5±0,1
<i>Epilobium hirsutum</i>	330±10	7,1±0,7	5,2±0,2	8,0±0,2
<i>Polygonum hydropiper</i>	2400±90	88±4	210±20	63±3
<i>Rononculus sceleratus</i>	1000±1600	50±60	100±140	30±43
<i>Ellytdrigia repens</i>	1700±50	44±4	184±6	60±3

Fonte: Marseille *et al.* (2000)

Quanto aos sítios contaminados por metais pesados no estado de São Paulo e que se encontram em processo de remediação e disponíveis no *site* da CETESB, constata-se que em muitos sítios contaminados, já estão sendo aplicadas técnicas de controle (Quadro 10).

Entre estes sítios avaliados pela CETESB encontra-se a Plumbum Mineração e Metalurgia Ltda, à margem do ribeirão Furnas Iporanga/SP. O plano de recuperação ambiental para este sítio contaminado prevê as seguintes etapas (POMPEIA, 2002): remover e isolar as fontes ativas de contaminação; minimizar o transporte secundário de metais pesados; reduzir o risco de exposição humana aos poluentes; tornar os níveis remanescentes de contaminação em superfícies compatíveis com os usos de preservação ambiental e turismo; e estabelecer mecanismos de monitoramento da contaminação remanescente.

Quadro 10 - Sítios contaminados por chumbo e metais associados

Sítio	Contaminante	Ações imediatas	Remediação
Tonolli do Brasil, Jacareí/SP	Chumbo	Cobertura do resíduo; Remoção do resíduo/solo; Tratamento de líquidos contaminados; Monitoramento ambiental	A ser definida
Saturnia Sistema de Energia Ltda, Sorocaba/SP	Chumbo	Cobertura do resíduo Prevenção/consumo de água; Tratamento de Líquidos contaminados; Monitoramento ambiental	Bombeamento e tratamento das águas subterrâneas
Acumuladores Ajax Ltda, Bauru/SP	Chumbo	Prevenção do consumo de alimentos; Monitoramento ambiental	A ser definido
CAF Argentifera Furnas Mineração, Iporanga/SP Emplas Comércio e Beneficiamento de Metais Ltda, Elias Fausto/SP Gerdau S/A, Cotia/SP	Chumbo	Remoção de resíduos/solo	Projeto - Remoção de resíduos
	Chumbo	Monitoramento ambiental	A ser definida
Mangels Indústrias Ltda, São Bernardo do Campo/SP	Chumbo e Ácido clorídrico	Prevenção ao consumo de água; Tratamento de líquidos contaminados; Monitoramento ambiental	A ser definida
	Chumbo, zinco e bário	Tratamento de líquidos contaminados	Bombeamento e tratamento de águas subterrâneas
Panasonic do Brasil Ltda, São José dos Campos/SP	Chumbo, cádmio e zinco	Barreira física e hidráulica; Remoção de resíduos/solo; Tratamento de líquidos contaminados; Monitoramento ambiental	Bombeamento e tratamento de águas subterrâneas
Prolub Rerrefino de lubrificantes Ltda, Presidente Prudente/SP Região dos lagos de Santa Gertrudes, Santa Gertrudes/SP	Chumbo, cádmio e cromo	Monitoramento Ambiental	A ser definido
	Chumbo, cádmio, zinco e boro	Cobertura de resíduos; Estabilidade de aterro; Isolamento da área; Prevenção ao consumo de água e alimentos; Monitoramento ambiental	Remoção de contaminante e cobertura de sedimento de fundo de lagos
Polibrasil Resinas S.A, Mauá/SP	Chumbo, cádmio e mercúrio	Monitoramento ambiental	A ser definido

Fonte: www.cetesb.sp.gov.br/Solos/areas_contaminadas/relacao_areas.htm (2002)

Proposições para remediação do sitio da PLUMBUM

A estratégia para a recuperação da área afetada pela Plumbum deve alcançar toda a área contaminada em ações que contemplem intervenções imediatas, a médio e em longo prazo. O planejamento e ações seqüenciadas para recuperação do sítio deverão contemplar medidas de intervenção que deverão começar nas instalações industriais da metalurgia, até a área contaminada do estuário do rio Subaé.

Como estratégia inicial de ação foi avaliada a extensão da contaminação por meio da análise de todos os dados disponíveis sobre a área. Nesta averiguação foram delimitadas três áreas distintas para intervenção: a primeira representada pela metalurgia e seu entorno imediato; a segunda compreendendo as áreas de aterros de escória (quintais de residências, sub-base de calçamento das ruas de Santo Amaro e aterros em vias públicas na zona urbana) e; a terceira reunindo a zona rural, o rio Subaé e seu estuário.

Todavia, a implementação de medidas de remediação para o sítio da Plumbum depende do grau de recuperação que se deseja alcançar na área, o que está relacionado com seu uso futuro. Esta condição está subordinada a valores de intervenção do solo estabelecido pela CETESB (2009), e ao aporte de recursos a ser disponibilizados para o Plano de Recuperação Ambiental, que envolve diretamente os custos para implementação das tecnologias de controle, monitoramento ambiental e, principalmente, a remediação do solo e da escória.

De acordo com estas premissas foram levantadas as principais etapas a serem desenvolvidas para formulação do Plano de Recuperação Ambiental no sitio da Plumbum, que são as seguintes (ANJOS, 2003):

Delimitação das áreas de abrangência da contaminação: foram delimitadas as seguintes áreas (Figura 5):

- a área de influência direta e fonte principal de contaminação é delimitada pelas instalações da Plumbum e seu entorno imediato;
- avaliação da fonte de contaminação na área industrial, com o objetivo determinar a extensão e o grau de comprometimento da fonte de contaminação, do solo e sedimento, além das águas superficiais e subterrâneas;
- a área de influência indireta, compreendendo as fontes primárias e secundárias de contaminação situadas na zona urbana da cidade, que ocorreram por meio da deposição inadequada, em forma de aterros, da escória, em ruas sem calçamento e disposição de escória nas sub-base de estradas calçadas ou asfaltadas, dos contaminantes carreados para o do rio Subaé, além da poeira, e
- a área de influência aqui denominada regional é composta pelo entorno da cidade de Santo Amaro até a nascente do rio Subaé e o seu estuário.

Determinação dos valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas:

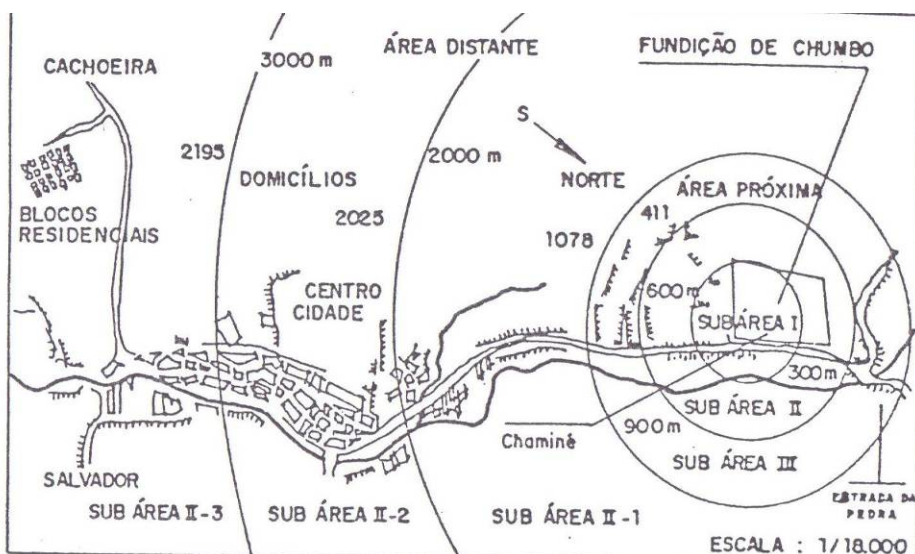
- determinação das áreas de investigação (agrícola e APMax; residencial e industrial); e
- estabelecimento de diretrizes para o gerenciamento ambiental da área contaminada e uso do solo;
- a. **Definição da área emergencial de intervenção:** por se tratar da principal fonte de contaminação, a área industrial da Plumbum e seu entorno deverão sofrer intervenções, em curto prazo, por meio de um Plano de Recuperação Ambiental para o sítio industrial;
- b. **Delimitação das áreas de intervenção a curto e médio prazo:** áreas urbanas, em especial a Av. Ruy Barbosa e o alto da COBRAC;
- c. **Complementação da avaliação de risco à saúde humana:** Reavaliação e complementação dos estudos nos compartimentos ambientais e seu risco à saúde humana, desenvolvido pela FUNASA em 2003.
- d. **Plano de remediação para o sítio da PLUMBUM:** definição das tecnologias e técnicas de remediação para intervenção a curto, médio e longo prazo.
- e. **Plano de recuperação das edificações:** projeto de uso futuro da área que contemple a reutilização ou demolição das instalações;
- f. **Programa de Educação Ambiental:** que contemple a compatibilidade de viver em área contaminada; e
- g. **Plano de monitoramento Ambiental.**

Estratégia para recuperação da área

A estratégia para definição do Plano de Remediação proposta para a área pauta-se nos seguintes critérios:

- delimitação das áreas de validação dos dados disponíveis e intervenção: a) área de influência direta compreendida pelas instalações da Plumbum e seu entorno imediato (Sub-área 0); b) área do entorno até 300m (Sub-área I); c) área entre 300 e 600m (Sub-área II); área entre 600 e 900m (Sub-área III); área entre 900 e 2.000m (Sub-área II-a); área entre 2.000 e 3.000m (Sub-área II-b) e área entre 3.000 e final da zona urbana e estuário do Subaé (Sub-área II-C) (adaptado de TAVARES, 1990) (Figura 5)
- a validação dos levantamentos realizados nas áreas, para determinação de todas ocorrências da escória e resíduos finos depositados nas instalações industriais, sub-base das ruas e quintais, além da poeira e águas superficiais e subterrâneas;

- determinação de todos os metais tóxicos contidos na fonte de contaminação, solo e sedimentos;



Fonte: Tavares (1990)

Figura 5 – Delimitação das áreas e subáreas para intervenção

Proposições para intervenção na Subárea 0 – instalações da Plumbum

- Remoção da escória e solo contaminado para tratamento ex-situ:** O tratamento *ex-situ*, fora da cidade de Santo Amaro, da escória poderá ser viabilizado por meio de tecnologias de hidrometalurgia (PURIFICA, 2002) ou pirometalurgia, retirando-se os metais contidos na escória e a tornando inerte;
- Disposição da escória e solo contaminado das ruas e quintais em aterro industrial dentro das instalações da Plumbum:** A disposição controlada se dará por meio de aterro industrial para os solos contaminados e escória (PURIFICA, 2002), e o controle da contaminação via águas superficial por meio de célula de *wetlands* (ANJOS, 2003)

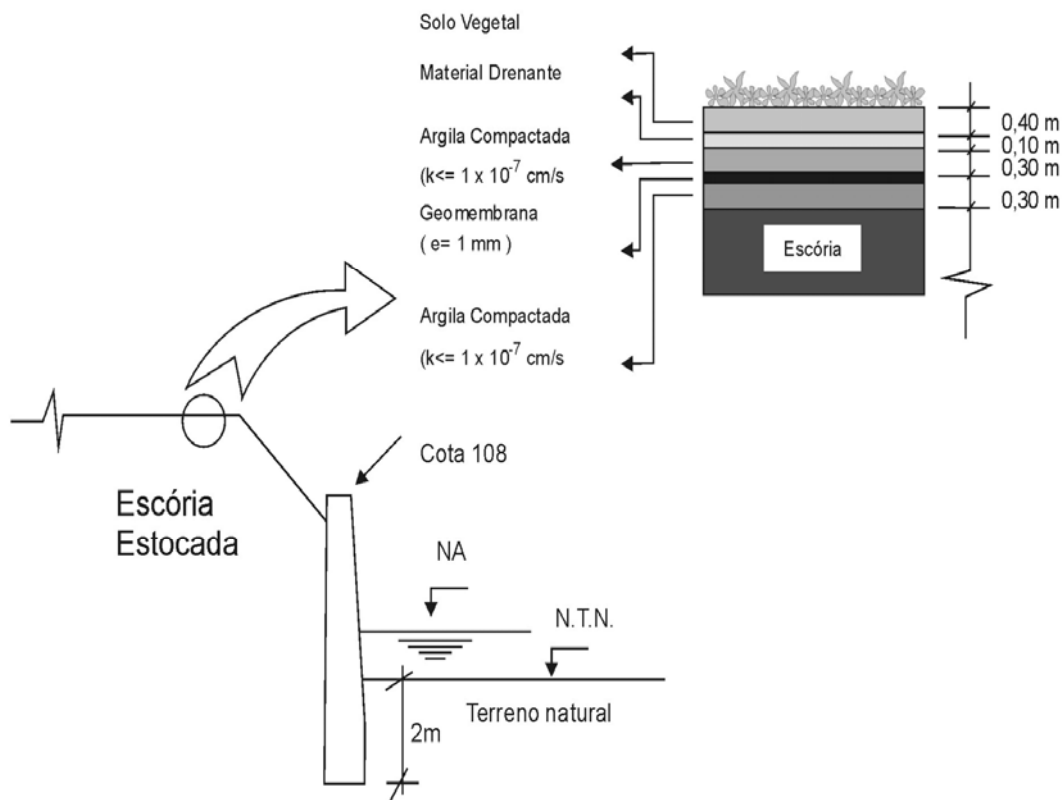
O aterro industrial terá as seguintes características (PURIFICA, 2002):

Primeira etapa – isolamento da área! – se caracteriza pela construção de cerca em todo domínio da Plumbum e que tem como objetivo impedir o acesso de pessoas e animais na área contaminada.

Segunda etapa – deslocamento e aterramento da escória: Esta fase corresponde ao serviço de terraplanagem para deslocamento da escória que se encontra no entorno da fábrica e disposição da mesma no vale onde grande quantidade de escória já se encontra em forma de um barramento. A execução desta etapa tem como objetivo

dispor os 57.160 m³ de escória de forma adequada até a cota 115 e um deslocamento até 53m em direção à zona alagadiça estudada.

Terceira etapa – Sistema de impermeabilização: Esta etapa tem como objetivo a execução do sistema de impermeabilização do topo e laterais do barramento da escória, com o intuito de evitar a lixiviação da escória. O sistema de impermeabilização do topo do barramento é composto por camadas superpostas de solo vegetal, material drenante e uma barreira hidráulica composta por argila compactada (espessura mínima de 0,6, grau de compactação superior a 95%, teor de umidade dentro da faixa de $\pm 2\%$ e permeabilidade inferior a 10⁻⁷ cm/s) intercalada por uma geomembrana de polietileno com espessura de 1mm. Complementando o sistema foi prevista a impermeabilização do fundo da lagoa com camadas de argila compactada de 0,3m e uma geomembrana de 1mm de espessura e uma alvenaria de pedra com fundação situada a 2m de profundidade da superfície e topo na cota 108 (Figura 6).



Fonte: Machado (2001)

Figura 6 – Esquema do sistema de impermeabilização

Quarta etapa – sistema de drenagem: Nesta etapa foram dimensionados os elementos de drenagem superficial composto por canaletas e bermas com o objetivo de interceptar e desviar o escoamento das águas pluviais para fora da área do barramento e evitar o aparecimento de erosão, além de sugerir uma galeria para a remoção e condução das águas acumuladas a montante do barramento da escória.

Quinta etapa – sistema de contenção: Se refere à construção de um muro de gravidade com cerca de 4m de altura total, incluindo a altura da base (2 m), que tem como objetivo evitar a percolação da água da lagoa.

A célula da *wetland* proposta consiste tem como características: solo com alta capacidade de atenuação física (condutividade hidráulica do solo igual a 10^{-9} cm/s), atenuação química dada pela alta capacidade de troca catiônica da montimorilonita e matéria orgânica; terreno plano e de fácil adaptação às obras da *wetland*.

Referências

ANDERSON, W. C. **Innovative site remediation technology: chemical treatment**. Washington, USEPA, Springer, 1994a. v. 2, p. 1.1 – 1.7.

_____. **Innovative Site Remediation Technology: Soil washing/soil flushing**, Washington, USEPA, Springer, 1994b. v. 3, p. 1.1 – 1.6.

_____. **Innovative site remediation technology: stabilization/solidification**, Washington, USEPA, Springer, 1994c. v. 4, p. 1.1 – 1.5.

_____. **Innovative site remediation technology: thermal desorption**, Washington, USEPA, Springer, 1994d. v. 6, p. 1.1 – 1.6.

_____. **Innovative site remediation technology: thermal destruction**, Washington, USEPA, Springer, 1994e. v. 7, p. 1.1 – 1.8.

_____. **Innovative site remediation technology: vacuum vapor extraction**, Washington, USEPA, Springer, 1994f, v. 8, p. 1.1 – 1.6.

ANJOS, J. A. S. A. **Estratégias para remediação de um sítio contaminado por metais pesados - estudo de caso**. São Paulo, 1998. 157p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

_____. **Avaliação da eficiência de uma zona alagadiça (*wetland*) no controle da poluição por metais pesados: o caso da Plumbum em Santo Amaro da Purificação-BA**. 271. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2003.

BARTENFELDER, D. Stabilization: a strategy for RCRA corrective action. In: RCRA CORRECTIVE ACTION STABILIZATION TECHNOLOGIES. **Proceedings**. Washington: USEPA, 1992. p. 1 - 9.

BITAR, O. Y. **Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo, 1997. 185p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

BORBA, R. P. **Arsênio em ambiente superficial: processos geoquímicos naturais e antropogênicos em uma área de mineração aurífera**. Campinas, 2002. 115p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de Campinas.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo, 1999.

——— **Estabelecimento de valores de referência de qualidade e valores de intervenção para solos e águas subterrânea no estado de São Paulo**. São Paulo, 92p. 2009

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA**: n. 420, de 28 de dezembro de 2009. IBAMA, 2009. p. 81-84.

CROZERA, E. H. **Identificação das áreas contaminadas no município de Ribeirão Pires – São Paulo**. São Paulo, 2001. 189p, Tese (Doutorado) – Instituto de Geociência –Universidade de São Paulo.

CUNHA, R. C. A. **Avaliação de risco em áreas contaminadas por fontes industriais desativadas - estudo de caso**. São Paulo, 1997. 152p, Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

FURTADO, M. R. Controle ambiental chega ao subsolo. **Química e Derivados**. 1997. p. 8-22.

GLOEDEN, E. et al. Gerenciamento de áreas contaminadas. In: WORKSHOP SOBRE ÁREAS CONTAMINADAS, São Paulo, 1997. **Resumos Expandidos**. Cetesb/GTZ/USP p. 7 - 9.

——— **Gerenciamento de áreas contaminadas na Bacia Hidrográfica do Reservatório Guarapiranga**. São Paulo, 1999. 225p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

HASSUDA, S. **Critérios para a gestão de áreas suspeitas ou contaminadas por resíduos sólidos – estudos de caso na região metropolitana de São Paulo**. São Paulo, 1997. 142p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

JAAGUMAGI, R. Canadian sediment quality guidelines and their application to sediment remediation. In: **SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DO SEDIMENTO NA BAIXADA SANTISTA**. São Paulo, 2002. 9p.

LEITE, C. B. B. et al. Aspectos metodológicos no estudo e caracterização de contaminação de solo e água. In: WORKSHOP SOBRE ÁREAS CONTAMINADAS., São Paulo, 1997. **Resumos Expandidos**. CETESB/GTZ/USP, p. 35 – 6.

KONTOPOULOS, A; THEODORATOS, P. **Stabilization of highly polluted soils**. In: SIXTH INTERNATIONAL FZK/TNO CONFERENCE. Edinburgh, Thomas Telford, v. 2. p. 1115 – 1116, 1998.

MACHADO, S. L. **Projeto preliminar de atividade de confinamento da escória no entorno da área da antiga fábrica da Plumbum**. Salvador, Universidade Federal da Bahia, 2001. 10p.

MARKER, A.; CUNHA, R. C. A.; GUNTHER, M. A. Avaliação das águas contaminadas na RMSF. **Saneamento Ambiental**, São Paulo, n. 25, p. 36 - 9, 1994.

MARKER, A. **Avaliação ambiental de terrenos com potencial de contaminação: gerenciamento de riscos em empreendimentos imobiliários** – Brasília: CAIXA, 2008, 164p

MARSEILLE, F. et al. Impact of vegetation on the mobility and bioavailability of trace elements in a dredged sediment deposit: two scales of investigation, the pilot deposit and the greenhouse. In: SEVENTH INTERNATIONAL FZK/TNO CONFERENCE ON CONTAMINATED SOIL. Leipzig, Thomas Telford, 2000, v. 2, p. 697 – 704.

OLIVEIRA, O. M. C. **Diagnóstico geoambiental em zonas de manguezal da baía de Camamu – Ba**. Niterói, 2000. 249p. Tese (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense.

OLIVEIRA, E. Monitorando a atenuação natural monitorada. **Revista Meio Ambiental Industrial**. São Paulo, 2000. n. 27, Setembro/Outubro, p. 98 – 99.

PAPASSIOPI, N. et al. Integrated leaching processes for the removal of heavy metals from heavily contaminates soils. In: SIXTH INTERNATIONAL FZK/TNO CONFERENCE. Edinburgh, Thomas Telford, 1998. v. 1., p. 461 – 470.

POMPÉIA, S. L. Procedimentos técnicos para recuperação de áreas degradadas por poluição. In: SIMPÓSIO SUL AMERICANO, SIMPÓSIO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Foz do Iguaçu, 1994. **Anais**. Curitiba, FUPEP, 1994. v. 1, p. 63 - 74.

POMPEIA, S. L. **Recuperação ambiental de área degradada por mineração de chumbo à margem do ribeirão Furnas Iporanga – SP**. Plumbum Mineração e Metalurgia Ltda/Consultoria Paulistas de Estudos Ambientais. São Paulo, v. 2, p. 1 – 30, 2002.

PURIFICA – **Proposta para remediação de áreas degradadas pela atividade extrativa de chumbo em Santo Amaro da Purificação, Salvador**, 2003.

ROEHRIG, J; SINGER, E. M. Técnicas de remediação de sítios contaminados. **Revista Saneamento Ambiental**, São Paulo, 1996. v. 7, n. 37, p. 19 a 27.

SÁNCHEZ, L.E. Gerenciamento ambiental e a indústria de mineração. **Revista de Administração**, São Paulo, 1994. v. 29, n. 1, Jan/mar, p. 67-75.

_____. **Recuperação de áreas degradadas**. São Paulo, Escola Politécnica/EPUSP, Universidade de São Paulo, 1995. (Notas de aulas, PMI - 504: Recuperação de áreas degradadas).

_____. **Desengenharia: o passivo ambiental na desativação de empreendimentos industriais**, São Paulo, EDUSP, 2001. p. 116 – 121.

SCHIANETZ, B. **Passivos ambientais: levantamento histórico: avaliação da periculosidade: ações de recuperação**. Curitiba, Editora Santa Mônica, 1999. 205p.

SÍGOLO, J. B. Resíduos de origem industrial, os metais pesados e o solo: estudo de casos. In: WORKSHOP SOBRE ÁREAS CONTAMINADAS, São Paulo, 1997. **Resumos Expandidos**. Cetesb/GTZ/USP, p.25-8.

SILVA, A. L. B. **Caracterização ambiental e estudo do comportamento do chumbo, zinco e boro em áreas degradadas por indústrias cerâmicas região dos lagos de Santa Gertrudes, SP**. São Paulo, 2001. 157p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

SILVA, F A.N. **Avaliação ambiental preliminar de antigas áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos do município de São Paulo**. São Paulo, 2001. 104p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

SMITH, L. A. et al. **Remedial options for metals-contaminated sites**. New York, CRC Press, 1995, p. 17-33.

TAVARES, T. M. **Avaliação de efeitos das emissões de Cádmiio e Chumbo em Santo Amaro da Purificação - BA**. São Paulo, 1990. 271p. Tese (Doutorado) - Instituto de Química, Universidade de São Paulo.

TERRA, P.; LADISLAU, W. Césio 137. In: **Ecologia e desenvolvimento**. Rio de Janeiro, 1991. ano 1, n. 9, novembro, p. 36 – 41.

TOSO JUNIOR, E. **Avaliação da contaminação e do risco associado em áreas de indústria e duas adjacências, em Cotia-SP**. São Paulo, 2001. 130p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Constructed wetlands treatment of municipal wastewater**. Washington, EPA-625/R-99/010, 1990.

WEBSTER, N. **Webster's new world college dictionary**. 3a ed, 1995.