

1.- El suelo contaminado se tamiza (tamaño de 5 a 8 cm) y se transporta por bandas a lo alto de la unidad de extracción.

2.- En la unidad de extracción se incorpora el solvente de extracción (diclorometano) al suelo contaminado, el cual fluye a través de éste, disolviendo y separando los contaminantes en un proceso de extracción común.

El proceso de extracción se adapta para cada caso específico, de manera que el contaminante se remueva totalmente, esto se logra por ajustes en la relación de alimentación de suelo y de solventes.

3.- El líquido de extracción se drena por gravedad, separándolo del suelo lavado.

4.- Terminando la operación se elimina completamente el líquido de extracción del suelo por calentamiento con una corriente de vapor inyectada a través del suelo, a una temperatura aproximada de 212°F (100°C). El vapor se genera en una unidad vaporizadora independiente.

5.- El líquido de extracción contaminado entra a una unidad de destilación, donde se separa del resto de la corriente. Se condensa y almacena para poderse reutilizar.

6.- Los contaminantes se separan en la destilación en forma de emulsión, la cual se dispone para tratarse en plantas autorizadas para su recuperación o estabilización.

El proceso CONTEX fue diseñado en un principio para tratar suelos arenosos o con arcillas pesadas. Sin embargo, el uso de transportadores de tornillo hace posible tratar material no-homogéneo, así como suelos que contengan grava y piedras, suelos orgánicos, lodos, etc.

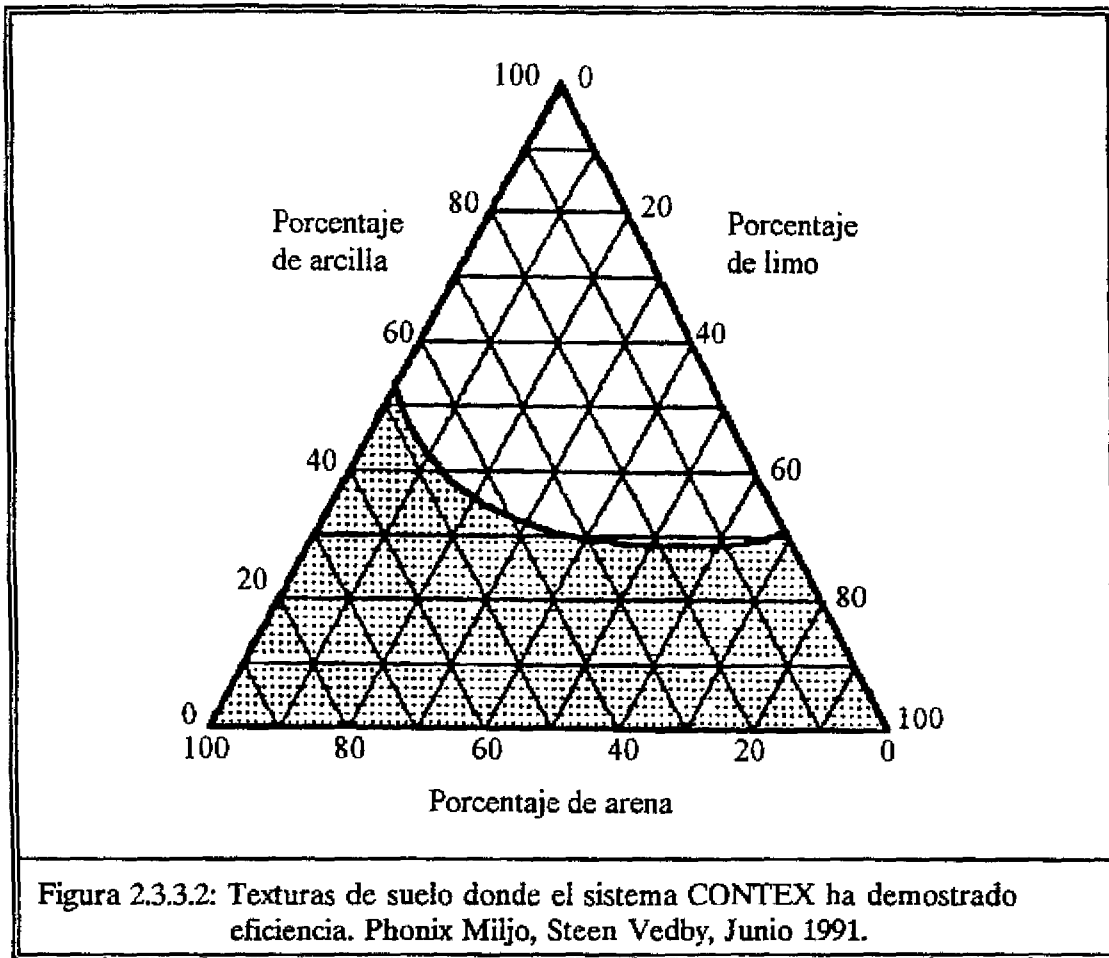
Algunas pruebas han demostrado el éxito del sistema para distintos tipos de suelo. La figura 2.3.3.2 muestra un diagrama triangular para diferentes texturas de suelo en donde el sistema CONTEX se ha aplicado con buenos resultados.

Los fragmentos de suelo mayores a 10 cm se tratan en un contenedor separado, en un sistema no continuo, con el mismo principio de extracción.

El diclorometano tiene un punto de ebullición de 40°C y una densidad a 20°C de 1.336. Este compuesto es efectivo para la mayoría de los contaminantes orgánicos como aceites, gasolina, solventes, breas, fenoles, plaguicidas, bifenilos policlorados (PCBs), etc.

El cuadro 2.3.3.3 muestra los resultados que se han obtenido al aplicar el sistema CONTEX a varios suelos contaminados. Se indican los contenidos máximos de contaminantes antes y después de la descontaminación para algunos compuestos.

Todos estos resultados se obtuvieron por laboratorios independientes, utilizando cromatografía de gases.



La capacidad del sistema para tratar suelo contaminado, puede variar de 10 a 20 toneladas por hora, dependiendo de la textura del suelo, el contenido de agua, el tipo de contaminante, la concentración de éste al inicio y al final de la operación, etc.

En general, la capacidad del sistema es mayor cuando se tratan suelos secos y arenosos, con componentes volátiles; y aumenta cuando se presentan suelos mojados, pesados y con contaminantes no volátiles.

La única corriente de desecho del sistema la forman los contaminantes emulsificados con algo de agua, los cuales se disponen a plantas de tratamiento especializado para su recuperación o destrucción. En caso de que esta corriente tenga un alto contenido de agua, se separa la fase acuosa y se destina a una planta de tratamiento de agua.

El suelo tratado por lo general no se ve afectado por este tratamiento de descontaminación, así pues se puede utilizar como relleno de zonas excavadas.

Cuadro 2.3.3.3: Valores máximos para algunos contaminantes presentes en suelos contaminados, antes y después del tratamiento.

	ANTES ppm	DESPUES ppm
Brea	27 000	<30
Gasolina	15 000	<10
Diesel	22 000	<10
Aceites	30 000	<3
Solventes Clorados	3 600	<1
Compuestos BTX	5 000	<1.5
Naftaleno	5 300	<1.5
Fenantreno	23 000	<1

El costo de operación del sistema es competitivo con el de otras tecnologías pero varía dependiendo del tipo de suelo y de los contaminantes que albergue. El precio por tonelada tratada de suelo contaminado varía de 100 a 1000 dólares.

Este sistema ha dado muy buenos resultados en países como Dinamarca, Alemania y Noruega, cubriendo los requerimientos que operan en ellos.

2.3.4 Otros Procesos de Extracción

El proceso de extracción con solvente de baja energía, LEEP (Low Energy Solvent Extraction Process), utiliza un solvente semejante a la trietilamina del proceso BEST, que presenta características de miscibilidad e inmiscibilidad con el agua (SITE Technology Profile., 1990-III).

El proceso de tratamiento por extracción ácida (Acid Extraction Treatment System, A.E.T.S.), utiliza ácido clorhídrico concentrado como medio de extracción de contaminantes del suelo. El sistema opera a un pH de 2, mezclado con agua y con partículas menores de 4 mm. Principalmente se usa para remover metales pesados. La figura 2.3.4.1 muestra esquemáticamente los pasos de este sistema (SITE Technology Profile., 1990-IV).

El proceso EXTRAKSOL es otra tecnología de extracción móvil, que utiliza solventes orgánicos no clorados como líquido de extracción. Este sistema puede remover policloruros de bifenilo (PCBs), pentaclorofenol (PCP), hidrocarburos aromáticos policíclicos (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH), plaguicidas, aceites e hidrocarburos. Los sólidos tratados se secan con gas inerte caliente. El sistema se muestra en la figura 2.3.4.2 (SITE Technology Profile., 1990-V).

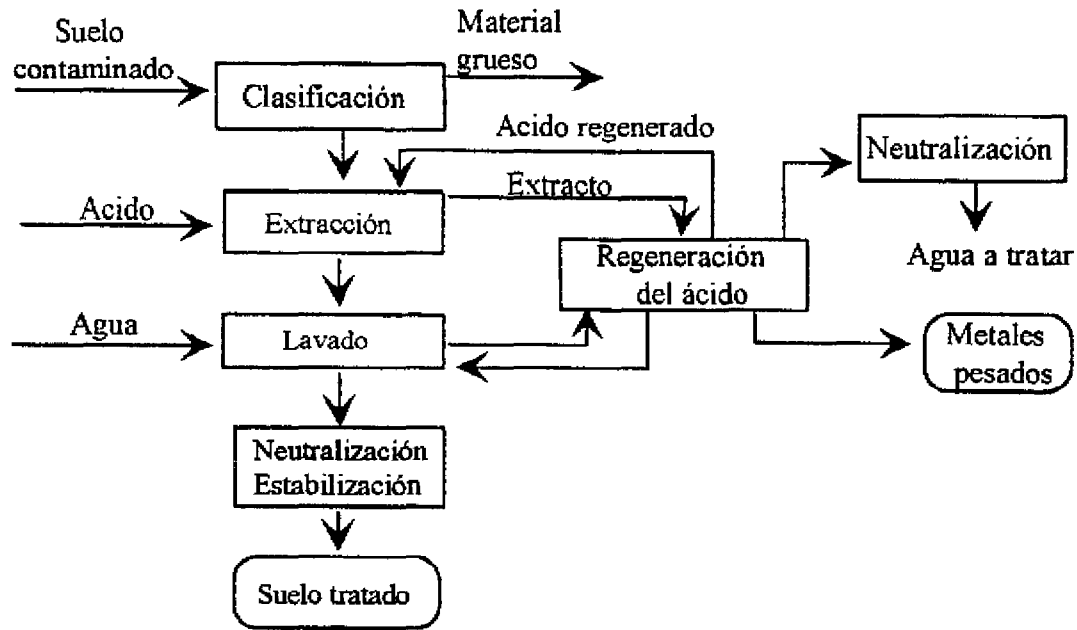


Figura 2.3.4.1: Diagrama del proceso A.E.T.S. para descontaminación de suelos por extracción con ácido. Center for Hazardous Materials Research, Nov 1990.

Otros sistemas utilizan solventes gaseosos licuados como medio de extracción de sustancias orgánicas, aceites y grasas en suelos y agua. Se utiliza propano y/o butano para el caso de suelos contaminados, éste se introduce a presión en un extractor donde se coloca el suelo y una vez realizada la extracción se desplaza el fluido con los contaminantes a través de una válvula. Posteriormente se regenera el gas y se reutiliza. Generalmente para tratar suelos se requieren varias etapas de este proceso. Una unidad de proceso se presenta en la figura 2.3.4.3. (SITE Technology Profile., 1990-VI).

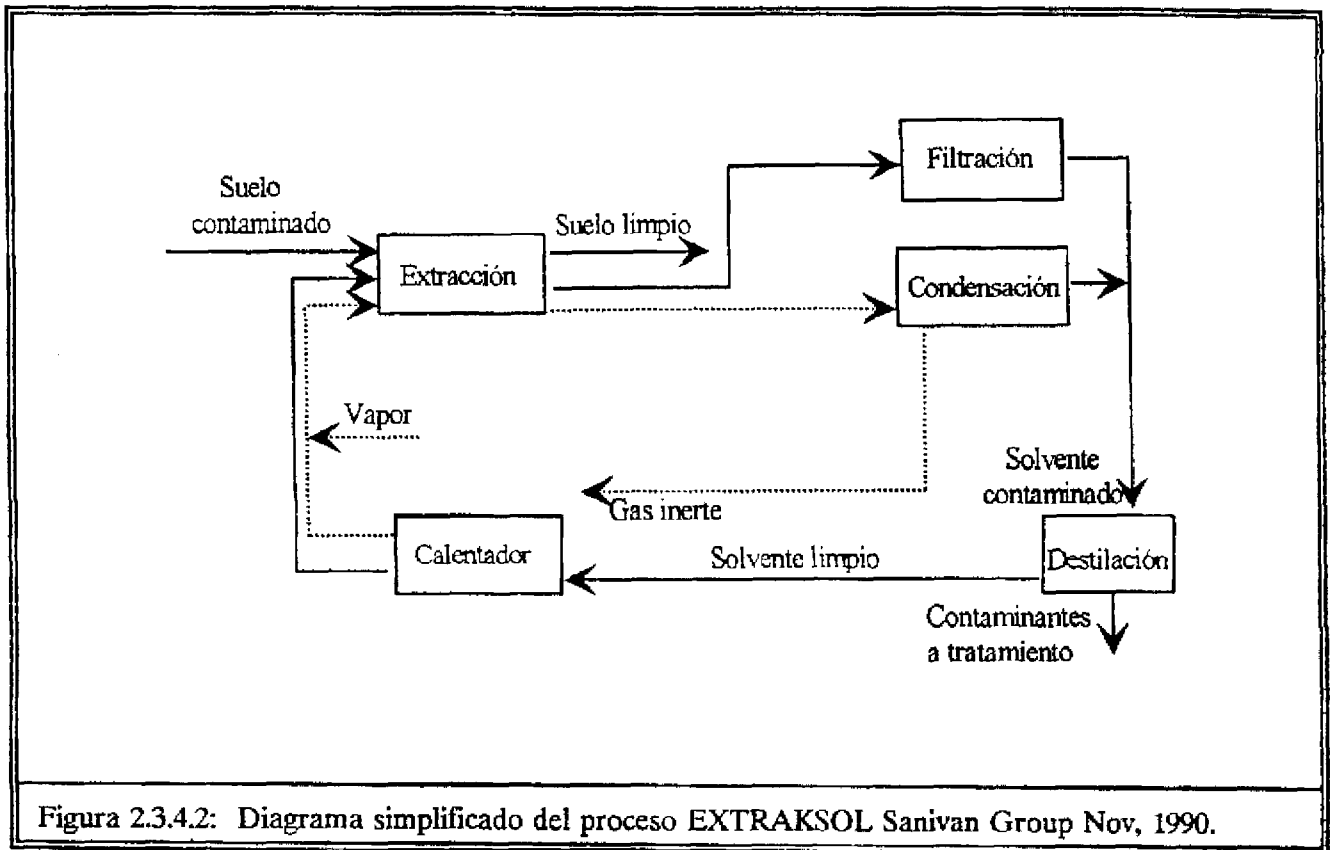


Figura 2.3.4.2: Diagrama simplificado del proceso EXTRA SOL Sanivan Group Nov, 1990.

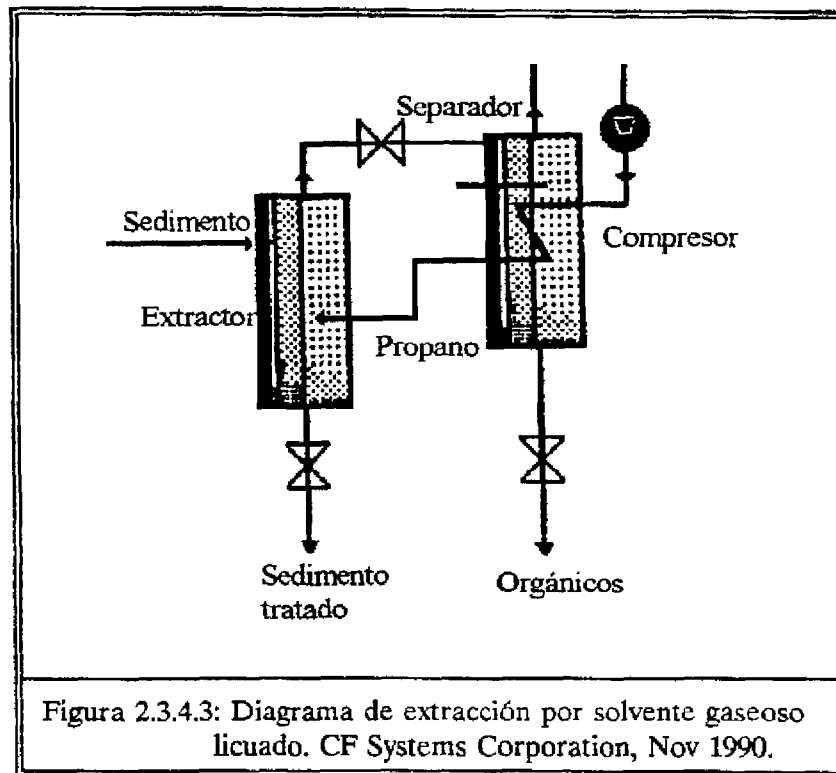


Figura 2.3.4.3: Diagrama de extracción por solvente gaseoso licuado. CF Systems Corporation, Nov 1990.

2.3.5 Sistema "EXCALIBUR"

El siguiente método de descontaminación de suelos, (Sistema Excalibur) se puede clasificar dentro de los métodos de extracción, aunque utiliza una serie de recursos que anteriormente no se habían considerado.

El sistema EXCALIBUR es una tecnología desarrollada para tratar suelos contaminados con contaminantes orgánicos e inorgánicos. El proceso presenta dos etapas: la primera extrae los contaminantes depositados en el suelo, y la segunda los oxida. La extracción se efectúa con agua ultrapura y ultrasonido. La oxidación involucra ozono, luz ultravioleta y ultrasonido. Los productos finales de este proceso son suelo descontaminado y sales inertes. (SITE Techology Profile, 1990-VII).

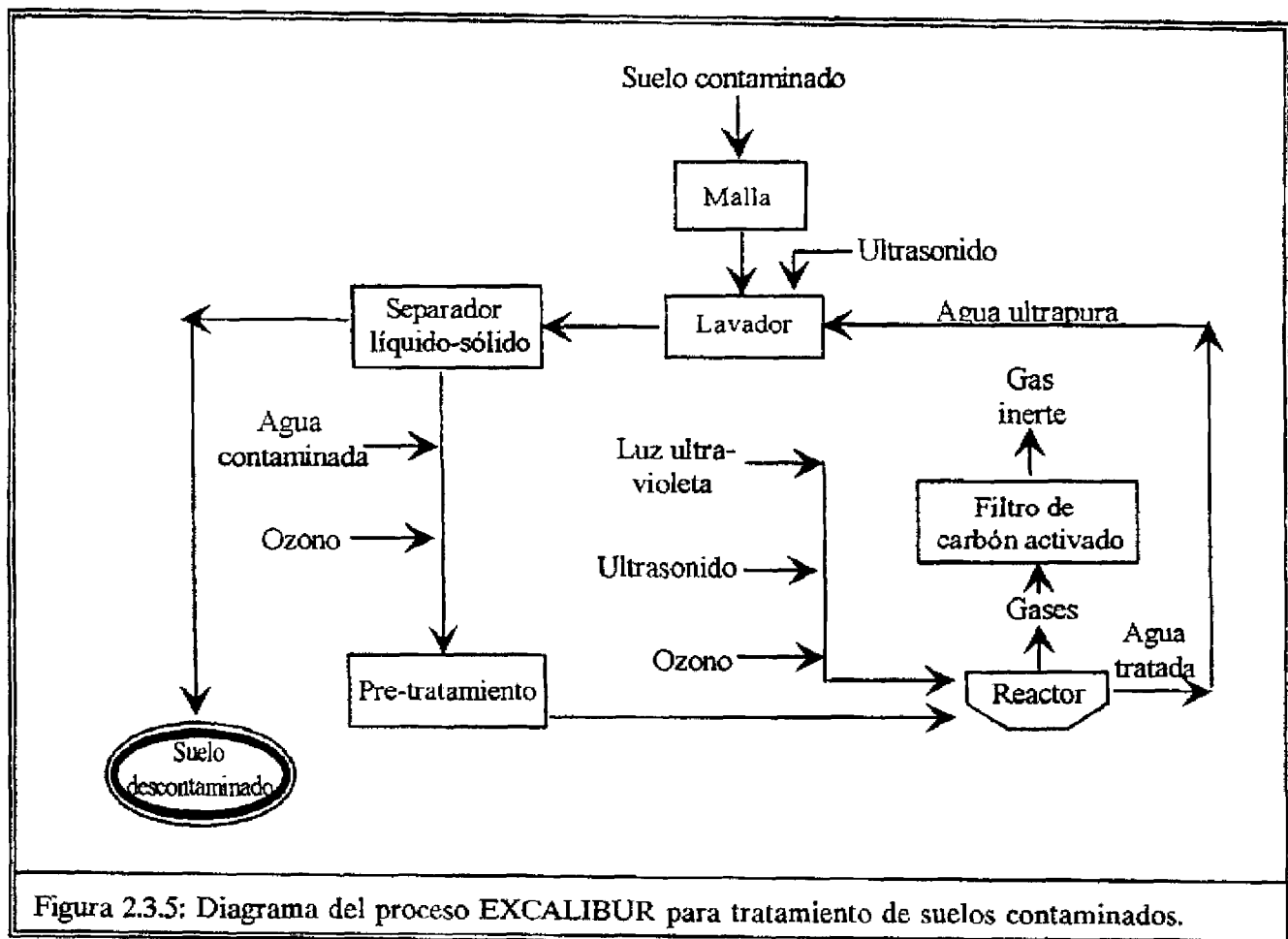


Figura 2.3.5: Diagrama del proceso EXCALIBUR para tratamiento de suelos contaminados.

Se muestra un diagrama esquemático del proceso en la figura 2.3.5. Después de la excavación, el suelo contaminado se pasa por una malla de 1 pulgada de abertura. El resto del material se divide en partículas menores y se une al anterior. Se pasa el suelo al lavador, donde el agua ultrapura extrae los contaminantes presentes. El ultrasonido actúa como un catalizador para agilizar el lavado. Comúnmente el agua se agrega en una relación de 10 a 1 con respecto al suelo. Se separa la fase acuosa de la sólida por medio de un ciclón, quedando el suelo libre de impurezas y capaz de regresar a su lugar de origen.

La corriente líquida contaminada generalmente está formada por dos fases, una orgánica y otra acuosa, se separan ambas por decantación. La fase acuosa se somete a contacto con ozono en un reactor y se pasa por filtros para remover partículas finas, posteriormente entra a otros filtros de carbón activado y se desioniza.

En el reactor donde se lleva a cabo la oxidación de los contaminantes se adiciona el ozono gaseoso acompañado de rayos ultravioleta y de ultrasonido como catalizadores para acelerar el proceso. El agua tratada queda lista para poder reutilizarse en otro lote de suelo contaminado.

El sistema también está equipado con trampas de carbón activado para prevenir emisiones a la atmósfera de gases contaminantes.

El proceso Excalibur tiene un rango de capacidad de un pie cúbico por hora de suelo contaminado, con un flujo de agua de un galón por minuto a 27 yardas cúbicas por hora de suelo contaminado, con un flujo de agua de 50 galones por minuto.

Esta tecnología puede ser aplicada a suelos contaminados con orgánicos como policloruros de bifenilo (PCB), pentaclorofenol (PCP), plaguicidas y herbicidas, dioxinas e inorgánicos. También cubre ámbitos de concentración de contaminantes de 1 ppm a 20,000 ppm.

2.3.6 Suelos Contaminados con Plomo

La contaminación de suelo por plomo es de alto riesgo para la salud de los seres humanos principalmente en zonas urbanas. Muchos estudios han relacionado la cantidad de plomo en el suelo, con los niveles de plomo en la sangre (Fairey y Gray, 1970; Neri et al., 1978; y Rabinowitz con Bellinger, 1988).

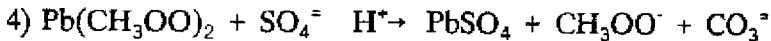
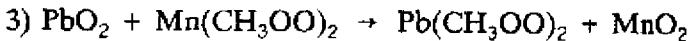
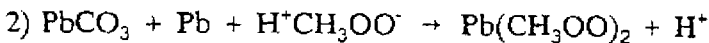
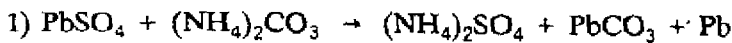
En zonas urbanas, la contaminación de plomo proviene de varias fuentes, entre las que se incluyen la pintura con plomo, baterías de plomo y componentes de automóviles. Olson y Skogerbee (1975), determinaron los principales compuestos de plomo que se encuentran en los suelos, la mayoría de ellos provenían de automóviles; sulfato de plomo, óxido de plomo, dióxido de plomo, plomo metálico, tetraóxido de plomo y plomo blanco. De entre todos éstos el más común es el sulfato de plomo.

Actualmente el Laboratorio de Ingeniería de Reducción de Riesgos, de Edison, New Jersey, desarrolla una serie de técnicas que permitan solubilizar las especies de plomo localizadas en suelos por agentes apropiados, y posteriormente precipitarlos como sulfato de plomo. (UC,EPA, 1992-III).

Inicialmente se utilizó ácido nítrico para disolver el plomo metálico, pero debido a razones ambientales se utiliza ácido acético en presencia de oxígeno. La justificación teórica para esta decisión, es el favorable potencial REDOX que tiene la reacción entre el plomo metálico, ácido acético y oxígeno gaseoso.

En la primera etapa a la mezcla de agua con suelo contaminado por plomo se le agrega carbonato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]$, con el propósito de convertir el sulfato de plomo a carbonato; después de una filtración, el suelo contaminado reacciona con oxígeno gaseoso en medio ácido (se emplea ácido acético), en esta etapa el plomo metálico y el carbonato de plomo se solubilizan como acetato de plomo. El suelo se vuelve a filtrar y reacciona con acetato de manganeso, con el propósito de convertir el dióxido de plomo en acetato de plomo soluble, dejando subproductos insolubles de manganeso. Las corrientes de filtrado se combinan para precipitar sulfato de plomo.

Reacciones químicas para la remoción de plomo en el suelo:



Los resultados obtenidos con esta técnica, en un suelo contaminado con 5000 mg de plomo/kg, muestran que aproximadamente el 82% del plomo que se encuentra en el suelo se recupera. En la primera etapa, en la carbonatación solamente el 0.7% del plomo se solubiliza. En el paso de oxidación se recupera el 67.3%. La etapa final donde se agrega el acetato de manganeso remueve un 14.2% del plomo total.

Todavía se trata de optimizar esta técnica para recuperar la mayor cantidad de plomo posible.

2.4 TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE SUELOS CONTAMINADOS

2.4.1 Introducción

La biorestauración de suelos se evaluó por la USEPA como una técnica de tratamiento para manejar residuos peligrosos. El proceso implica la estimulación de la microfauna superficial para degradar los contaminantes del lugar, en algunos casos es necesario agregar microorganismos con metabolismo especializado para degradar los contaminantes. El objetivo de la biodegradación es transformar los residuos orgánicos en biomasa y compuestos más simples (productos del metabolismo de los microorganismos, como el dióxido de carbono, metano y sales inorgánicas).

Casi todos los contaminantes orgánicos son biodegradables; sin embargo, se presentan algunas dificultades que se requieren solucionar para poder utilizar este método. La principal de estas dificultades se debe a la escasez de oxígeno en los suelos, principalmente en suelos finos y con baja permeabilidad, este elemento es esencial para el buen desempeño microbiológico (UC, EPA, 1992), por lo tanto en la mayoría de los casos se modifica el ambiente en donde actúan los microorganismos, propiciando un habitat adecuado para la mejor adaptabilidad y función de éste.

El proceso es similar al tratamiento convencional de agua residual en que los nutrientes y el receptor de electrón (O_2), se adicionan al residuo orgánico para facilitar la biodegradación en un bioreactor. Sin embargo, el bioreactor en este caso es la superficie, la cual no se puede definir y controlar como un bioreactor.

2.4.2 Requisitos de Aplicación

Hay dos criterios que se deben tomar en cuenta para implementar el proceso de bio-restauración en el sitio.

a) La matriz superficial debe ser lo suficientemente permeable para difundir la solución de O_2 y nutrientes. Este criterio se determina por mediciones de conductividad hidráulica de formación (K). Una conductividad hidráulica mayor a 10^{-4} cm/s es la más recomendable.

b) Que se encuentren en el lugar microorganismos y contaminantes a degradar. En este caso se realizan bioensayos para determinar la biodegradabilidad del contaminante.

Es importante determinar parámetros hidrológicos, como la profundidad del agua, el campo específico del acuífero, dirección del flujo de agua subterránea y el tipo de contaminante.

Existen varios métodos que se pueden usar para aplicar el oxígeno en la superficie, la fuente de oxígeno puede ser aire, oxígeno puro o peróxido de hidrógeno. La forma de suministrarlo es regar el agua o el oxígeno puro, la concentración es de 8 y 40 mg de O_2/L respectivamente, dependiendo de la temperatura a la que se inyecte el fluido. El peróxido de hidrógeno se disocia para formar una molécula de agua y $\frac{1}{2} O_2$, este compuesto es infinitamente soluble en el agua, sin embargo el oxidante puede ser tóxico para los microorganismos a concentraciones tan bajas como 100 ppm.

El peróxido de hidrógeno y los nutrientes inorgánicos se determinan dependiendo de los contaminantes a biodegradar, se deben hacer pruebas de compatibilidad con el material superficial del sitio. Los nutrientes se adicionan en solución por inyección o infiltración; la solución se percola en las zonas insaturadas hacia las saturadas por infiltración.

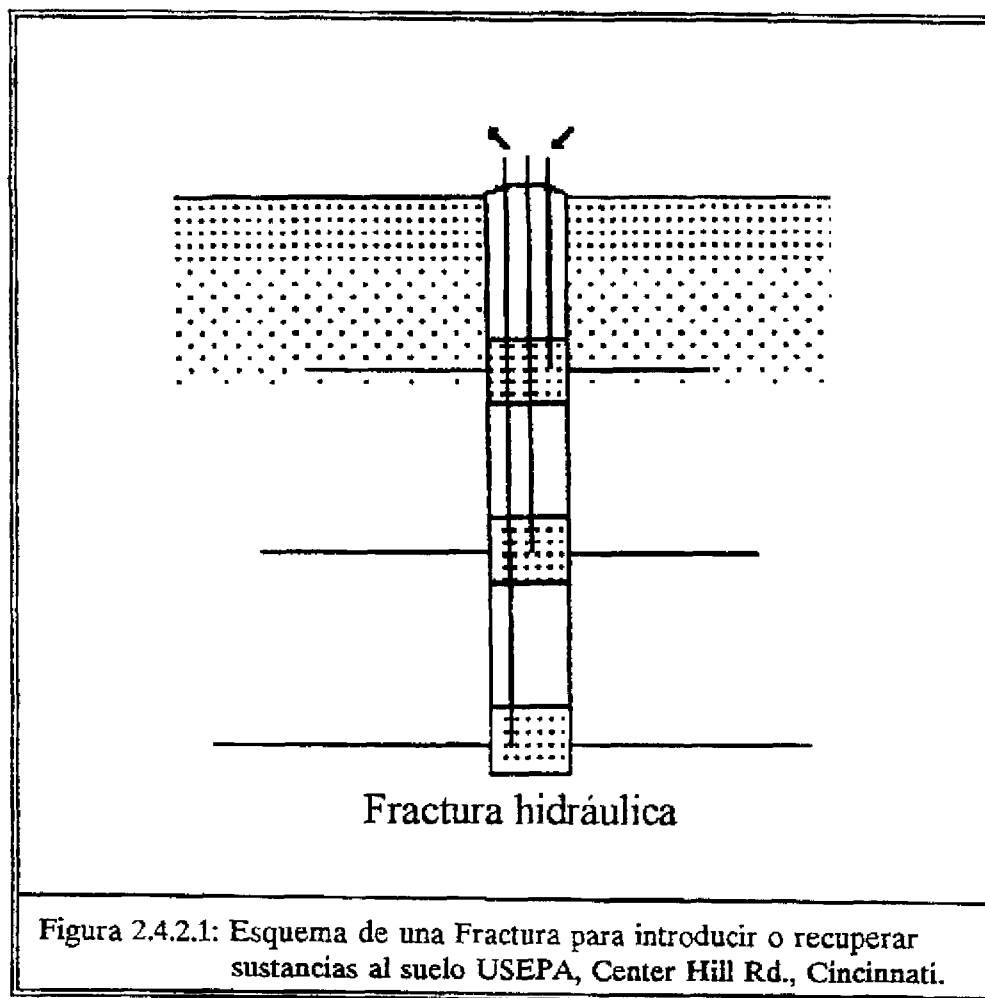
Los nutrientes inorgánicos generalmente se adicionan primero seguidos por la fuente de oxígeno; porque el suministro de oxígeno y nutrientes al mismo tiempo podría resultar en un crecimiento excesivo de microorganismos alrededor del punto de inyección y consecuentemente en la formación de un tapón.

Los nutrientes se pueden adicionar por alimentación continua o discontinua, a diferencia del oxígeno que se debe suministrar continuamente, ya que la transferencia de oxígeno es limitante para la degradación de las contaminantes.

Por otra parte se han implementado algunas técnicas hidráulicas, como es perforar la zona con cavidades por las cuales se hace circular oxígeno o peróxido de hidrógeno, esto requiere que el gas se mueva varios metros para poder llegar a toda la zona contaminada, por lo que se considera un proceso lento e ineficiente.

Debido a esto se han desarrollado otras alternativas, como la de crear capas permeables en el suelo afectado, a las que se les ha denominado fracturas hidráulicas (Hydraulic fracturing, HF), ver figura 2.4.2.1. Estas fracturas pueden llenarse con arena para producir canales que lleven oxígeno y nutrientes a las zonas contaminadas. De esta forma, el oxígeno y los posibles nutrientes que se requieran sólo deben moverse unos cuantos centímetros y no varios metros como en el caso del otro método (UC, EPA, 1992-II).

Antes de determinar la localización de las fracturas es necesario conocer perfectamente el sitio donde se encuentran los contaminantes, luego entonces se procede a diseñar la distribución, ángulo y profundidad necesarias de las capas permeables.



Este método se aplicó en un sitio contaminado con hidrocarburos en Dayton, Ohio; después de estudiar la zona, se determinó que se requerían cuatro fracturas hidráulicas. El arreglo utilizado se muestra en la figura 2.4.2.2.

Otros factores importantes para el mejor desempeño microbiológico son la temperatura y el pH, actualmente se hacen pruebas para determinar un ámbito específico en el cual la degradación alcance su máximo desarrollo.

Corte Transversal de Fracturas Hidráulicas

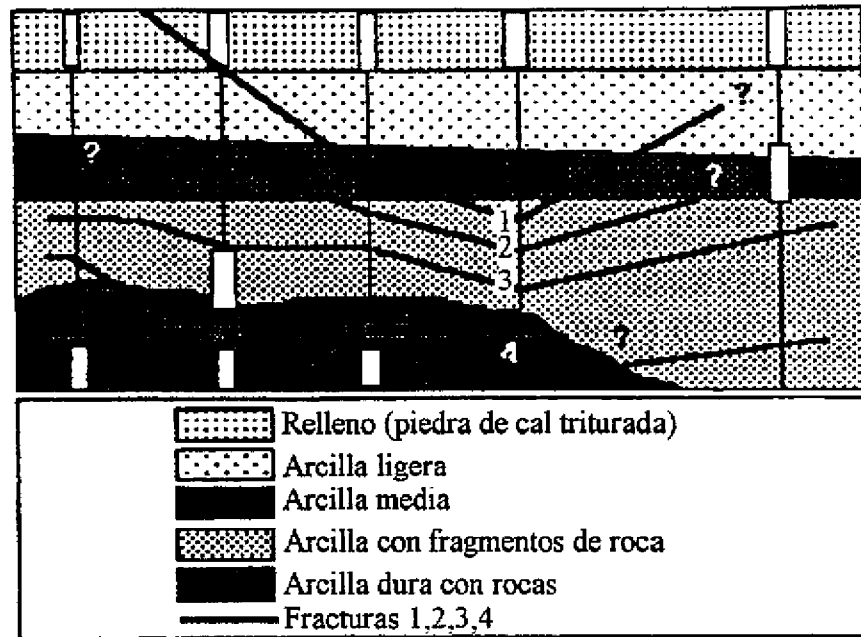


Figura 2.4.2.2: Fracturas hidráulicas diseñadas para un sitio contaminado en Dayton, Ohio. Stephen Vesper, Dept. Civil Eng. 1992.

El monitoreo durante la operación es importante para determinar el progreso de la biorremediación. Un decremento en el número de células puede indicar la toxicidad del peróxido de hidrógeno, pero en general lo que se monitorea es el oxígeno o peróxido residual y la remoción de contaminantes en el área.

2.4.3 Microorganismos que pueden degradar contaminantes

Existe una gran variedad de microorganismos que pueden degradar contaminantes:

* La microfauna propia del lugar.

* **BACTERIAS METANOTROFICAS.** La presencia de solventes alifáticos clorados como el 1,1,1-tricloroetano y tricloroetileno en acuíferos, son recalcitrantes y los microorganismos no pueden degradarlos; sin embargo, con el enriquecimiento del ambiente con gas natural (metano), aereación y una población microbiana selectiva, se puede lograr la degradación de estos compuestos por medio de co-metabolismo. El co-metabolismo es la biodegradación de sustancias orgánicas por microorganismos que no pueden usar esos compuestos directamente para su crecimiento, por lo tanto deben estar presentes otros compuestos como fuente de carbono y energía, estos microorganismos producen una enzima, la *mono-oxigenasa*, que oxida el metano, alcanos, alquenos y metano-halogenados, los cuales son la fuente primaria de energía y carbono que utilizan los microorganismos para realizar el co-metabolismo de los compuestos recalcitrantes.

* Más recientemente se han utilizado cultivos mixtos y puros que puedan degradar compuestos recalcitrantes o mezclas de diversos residuos, ya que cada tipo de microorganismos producen diferentes enzimas. Los microorganismos con capacidad de degradación especializada se pueden obtener por medio de técnicas de enriquecimiento del medio y por manipulación genética. Generalmente, estos criterios se pueden controlar en bioreactores semejantes a las plantas de tratamiento de aguas residuales, pero no se pueden controlar fácilmente en el sitio o el área contaminada.

2.5 ESTABILIZACION DE SUELO CONTAMINADO CON SILICATOS

A continuación se describe un método que aunque no elimina los contaminantes del suelo los inactiva en una masa no reactiva, ni peligrosa que se puede manejar sin ningún riesgo.

La tecnología de inmovilización (solidificación/estabilización) de sustancias peligrosas se reconoce actualmente como un buen método para inactivar contaminantes metálicos y otros inorgánicos de sitios contaminados. Sin embargo, este método no es tan efectivo con desechos de sustancias orgánicas, ya que no reducen la toxicidad (movilidad) de este tipo de componentes. En Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) determina que para poder llevar a cabo un método de estabilización se debe demostrar que significará una reducción de toxicidad considerable del 90 al 99%, esta práctica deberá estabilizar químicamente el desecho, lo que debe limitar su solubilidad o movilidad.

Durante los últimos 10 años, se han desarrollado varios tipos innovadores de tecnologías de estabilización. El propósito principal de todas ellas es reducir significativamente la concentración de contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluyendo los más difíciles de inactivar como es el arsénico, cromo hexavalente, hidrocianuros, etc. Estas tecnologías han utilizado agentes modificadores de superficie, surfactantes y otros agentes (como los silicatos), para estabilizar contaminantes, en conjunción con solidificación.

Una técnica de inmovilización desarrollada por la Corporación Tecnológica de Silicatos (Silicate Technology Corporation, STC) se mostró recientemente en la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) en el Programa de Evaluación de Tecnología Innovadora (SITE) en un lugar contaminado en Selma California. Este sitio estaba contaminado con compuestos inorgánicos y orgánicos procedentes de sustancias para tratar madera.

Esta técnica de inmovilización utiliza principalmente compuestos de amino-silicatos para estabilizar contaminantes orgánicos e inorgánicos en suelos. De acuerdo con el STC, los compuestos orgánicos se estabilizan a través de una reacción de partición con la superficie orgánica modificada de los amino-silicatos. Los inorgánicos se estabilizan por incorporación a la estructura cristalina de los amino-silicatos.

El sitio localizado en Selma California, contiene aproximadamente 18,000 yardas cúbicas de suelo que se contaminaron durante operaciones de tratamiento de madera que se llevaron a cabo hace algunos años. Las soluciones de desechos de preservativos de madera que contienen pentaclorofenol (PCP) o cromato-cobre-arseniato (CCA) se disponían en líneas de drenaje que contaminaban la zona. El suelo contaminado contiene altas concentraciones de PCP (10,000 ppm) y arsénico (2,700 ppm), también en menor grado cromo (2,200 ppm) y cobre (1,300 ppm), al igual que aceites y grasas (20,000 ppm).

Debido a las altas cantidades de PCP y arsénico, el sitio de Selma fué escogido para probar el método de inmovilización de la STC.

Durante la demostración se trataron aproximadamente 16 toneladas de suelo contaminado, se agregaron los compuestos de amino-silicato, inmovilizando metales pesados y semivolátiles orgánicos. También se adicionaron agentes solidificantes de silicio que microencapsularon los contaminantes absorbidos, produciendo una barrera física adicional.

Los resultados indicaron lo siguiente, la movilidad del PCP se redujo de un 89 a un 99%, para el arsénico de un 71 a un 92%, lo que confirma la eficiencia de esta técnica.

2.6 RESUMEN DE OPCIONES PARA DESCONTAMINACION DE SUELOS

Los procesos considerados se han respaldado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, dentro de sus diferentes programas en los últimos años.

La tabla 2.6 presenta en forma condensada las diversas opciones que se tienen actualmente para eliminar o estabilizar los contaminantes presentes en los suelos. (Testa/Winegardner, 1991); en ésta se puede observar que el proceso más costoso es la excavación y transportación de materiales peligrosos hacia un confinamiento controlado (\$300 dls/yd³), además de contar con el inconveniente de tener que localizar el sitio adecuado.

La inyección de vapor y vaporización, resulta un proceso menos costoso que el anterior (\$100-200 dls/yd³), pero su aplicación se reduce a suelos porosos que contengan contaminantes volátiles. Existe en esta opción la ventaja de recuperar los gases. La instalación del sistema de inyección representa una dificultad en algunos terrenos.

La incorporación de asfalto es una opción para suelos que contienen hidrocarburos no volátiles. Este proceso resulta caro (\$270 dls/yd³), requiere de excavación y la transportación del asfalto.

La biodegradación se aplica a suelos porosos, y requiere de frecuentes monitoreos del suelo. El costo es medio (\$75 dls/yd³), pero necesita de un complejo sistema para inyección de nutrientes, microorganismos y agua.

El material poco peligroso que se haya colocado sobre el suelo, se puede disponer en áreas pequeñas de sitios localizados adecuadamente, es decir, que no representan un riesgo para el ambiente y la salud. El área en donde se realiza la excavación, una vez depositado el material, se debe rellenar con suelo limpio. El costo de la operación es cinco veces más bajo que el material peligroso (\$60 dls/yd³).

La opción de excavar y aerear, requiere también adicionar nutrientes y agua. La compactación del suelo es necesaria dentro de este proceso, debido a que pueden existir emisiones a la atmósfera, se debe contar con un equipo de captación de gases en el exterior. El costo de estas operaciones resulta en comparación a los demás relativamente bajo (\$50 dls/yd³).

La extracción por vacío se aplica a suelos porosos y contaminantes volátiles, en este caso se requiere de la instalación de un sistema de venteo. El costo es el más bajo que se presenta en la tabla.

El "lavado de suelos " mediante una extracción, seguida de una separación y un tratamiento del material extraído, resulta de un alto costo, ya que estará en función del solvente que se utilice para la operación, así como de las sustancias químicas que se empleen para la estabilización del extracto.

La última alternativa que se presenta es la de excavar, aerear y disponer el material peligroso en un lugar seguro cuidando las emisiones a la atmósfera. No se presentan costos ni a que tipo de suelo y contaminantes se aplica.

OPCION	PROCESOS	COSTO	OBSERVACION
Excavación y disposición como material peligroso	Excavar y transportar a un confinamiento controlado para material peligroso	\$ 300/yd ³	Alto costo, localizar sitio adecuado
Excavación y disposición como material no peligroso	Excavar y disponer en un sitio para material poco peligroso. Relleno con suelo limpio	\$ 60/yd ³	Localizar sitio adecuado. Solo pequeñas áreas.
Excavación, aireación y disposición.	Excavar, extender y aerear el suelo. Disponer en lugar seguro.	-----	Cuidar emisiones a la atmósfera
Excavación, aireación y adición nutrientes	Excavar, extender, aerear y agregar nutrientes, y agua; compactar	\$ 50/yd ³	Cuidar emisiones a la atmósfera
Extracción por vacío	Estudio del suelo y contaminantes, instalar sistema de venteo	\$ 20-50/yd ³	Para suelos porosos y contaminantes volátiles.
Biodegradación	Estudio del suelo y contaminantes, instalar sistema de inyección de nutrientes, agua.	\$ 75/yd ³	Suelos porosos, constante monitoreo del suelo.
Inyección de vapor y evaporación	Estudio del suelo y contaminantes, instalar sistema de inyección de vapor y de recuperación de gases.	\$ 100-200/yd ³	Para suelos porosos y contaminantes volátiles. Alto costo.
Incorporar asfaltos	Excavar y transportar	\$ 125/ton	Opción para hidrocarburos no volátiles.
Lavado de suelos (extracción)	Excavar, extraer y separar el extracto obtenido.	-----	Obtener el fluido adecuado para el contaminante principal. Alto costo

Tabla 2.6: Opciones para tratar suelos contaminados. Restoration of petroleum contaminated aquifers, Stephen M. Testa, Duane L. Winegardner, Michigan 1991.