



# Descontaminación de suelos

## Master en Ingeniería del Medio Ambiente Módulo Suelos

Carlos Dorronsoro Fernández  
Dpto Edafología y Química Agrícola  
Facultad de Ciencias. Universidad de Granada  
[efdorrón@ugr.es](mailto:efdorrón@ugr.es)  
<http://edafologia.ugr.es>  
<http://www.edafologia.net>



# Descontaminación de suelos

*Programa general*

- 1 Introducción
- 2 Técnicas de anulación del suelo
- 3 Técnicas físicas y químicas
- 4 Técnicas biológicas
- Casos prácticos

En cada una de las técnicas se mostrarán una serie de casos prácticos.



## Técnicas de descontaminación de suelos

Técnicas de eliminación de los contaminantes.

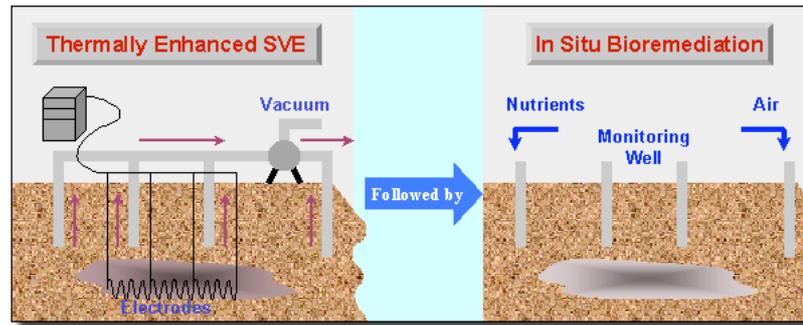
Técnicas de limpieza, el suelo se recupera.

Para la extracción o destrucción de los contaminantes de los suelos se utilizan procesos físicos, químicos y biológicos.

Los procesos físicos y químicos, en general, son más eficaces, más disponibles y más rápidos que los biológicos.



Introducción



www.ftr.gov

En ocasiones se combinan varias técnicas para reforzar el proceso de descontaminación.

Soil Vapor Extraction + calor + Bioremediation



- 1 Introducción
- 2 Técnicas de anulación del suelo
- 3 Técnicas físicas y químicas
- 4 Técnicas biológicas
- Casos prácticos



## Técnicas físicas y químicas de descontaminación del suelo

Introducción

- arrastre
- lavado
- extracción química
- oxidación/reducción
- deshalogenación
- tratamiento electroquímico
- desorción térmica

Son técnicas mucho más recomendables que las descritas en el capítulo anterior ya que ahora el suelo se recupera al destruir o arrastrar a los contaminantes.



## Técnicas físicas y químicas de descontaminación del suelo

Introducción

- Parte I |  arrastre
- |  lavado
- Parte II |  extracción química
- |  oxidación/reducción
- |  deshalogenación
- Parte III |  tratamiento electroquímico
- |  desorción térmica



## Técnicas físicas y químicas de descontaminación del suelo

Introducción

- Parte I |  arrastre
- |  lavado
- Parte II |  extracción química
- |  oxidación/reducción
- |  deshalogenación
- Parte III |  tratamiento electroquímico
- |  desorción térmica



## arrastre de vapores

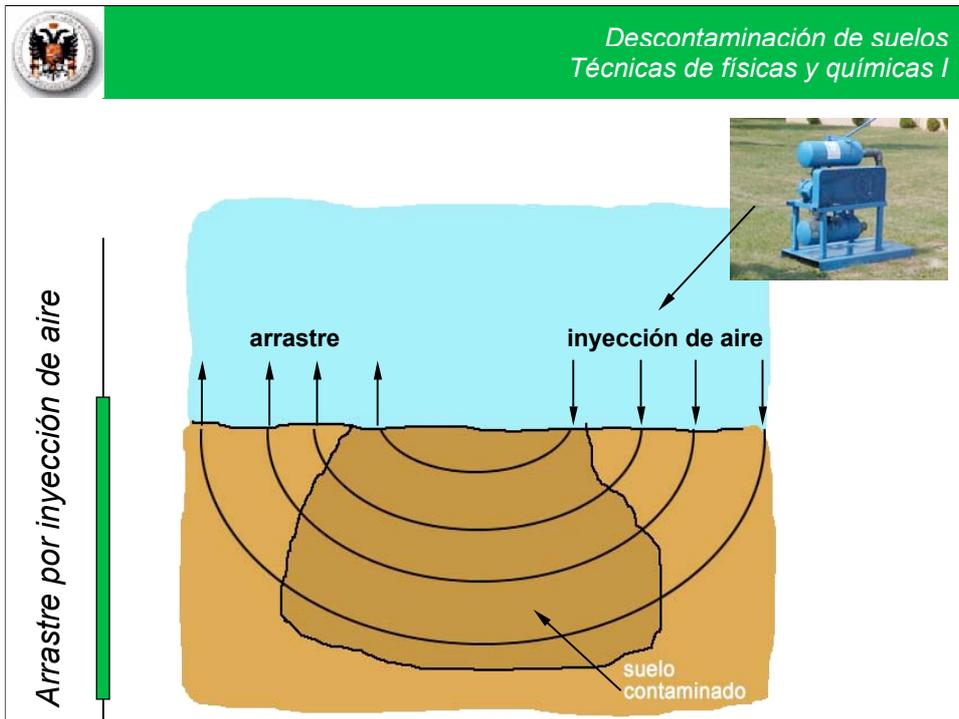
- por inyección de aire
- mediante vacío



Arrastre por inyección de aire

**arrastre de vapores  
por inyección de aire**  
(air sparging)

La aireación a presión utiliza aire (u oxígeno) para arrastrar los vapores dañinos del suelo contaminado.



Además del efecto del arrastre se favorece evaporación de los contaminantes (cuando se bombea aire por debajo de la superficie del terreno, las sustancias químicas se evaporan más rápidamente, con lo que se hace más fácil eliminarlas).

El aire que se inyecta en el terreno puede calentarse para acelerar el proceso. El suelo caliente ayuda a que las sustancias químicas se evaporen con mayor rapidez.

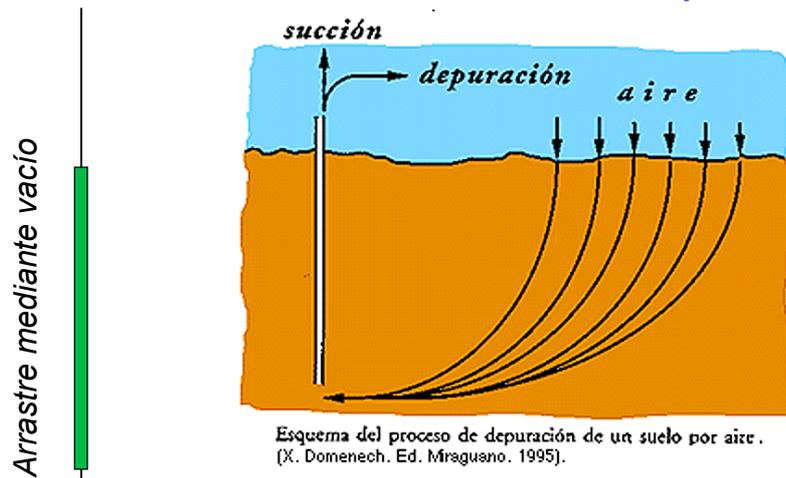
Sólo se necesita de un compresor, pero es un método poco utilizado en la práctica. Pues, ojo, al inyectar aire en el suelo podemos arrastrar la contaminación y difundirla a otras zonas. Pero esta técnica si es práctica frecuente en descontaminación de aguas subterráneas.

Muy adecuada para VOCs y SVOCs, disolventes y combustibles



## arrastre de vapores mediante vacío (SVE)

### Soil Vapor Extraction



Es el procedimiento usual para arrastrar a los contaminantes  
Para facilitar el arrastre de los gases contaminantes, en vez de inyectar aire desde la superficie del suelo lo que se hace es que se fuerza su recirculación excavando pozos que se encuentran conectados a un equipo de vacío.



## Objetivos

**Inducir un flujo de aire** en el suelo que facilite la volatilización de los contaminantes.

Los contaminantes pueden estar.

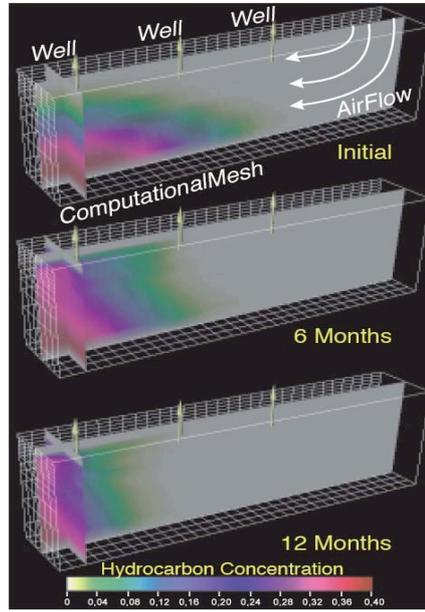
- ⊙ adsorbidos en la matriz del suelo
- ⊙ disueltos en el agua del suelo
- ⊙ libres en el aire del suelo

**Arrastrar los contaminantes volatilizados** fuera del suelo

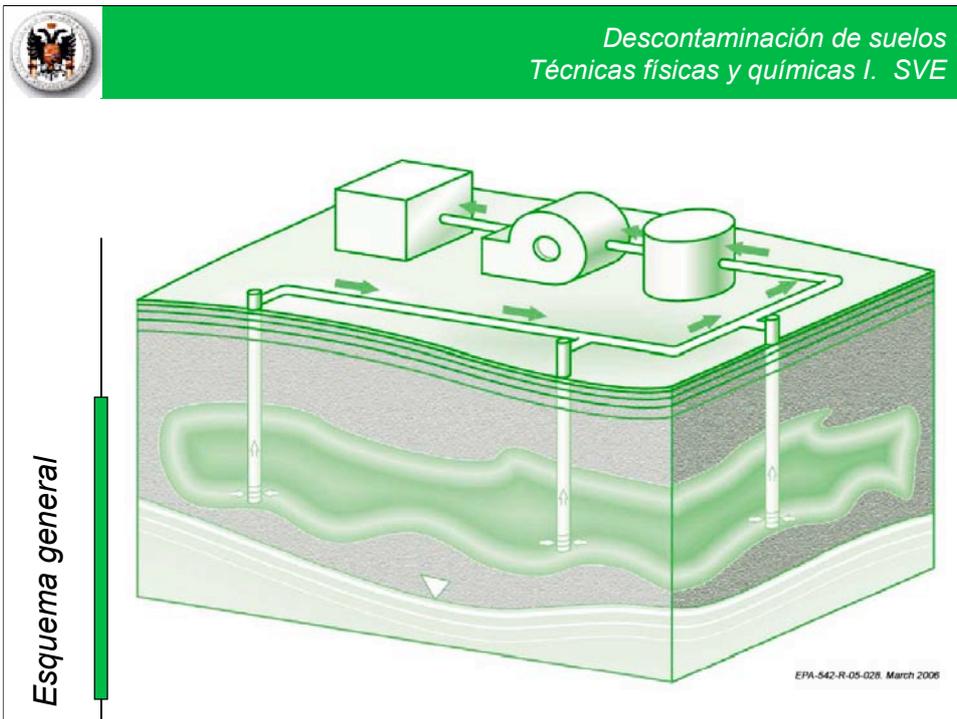


## Descontaminación de suelos Técnicas físicas y químicas I. SVE

Objetivos



Environmental Assessment Division, Argentine National Laboratory



## ESQUEMA GENERAL

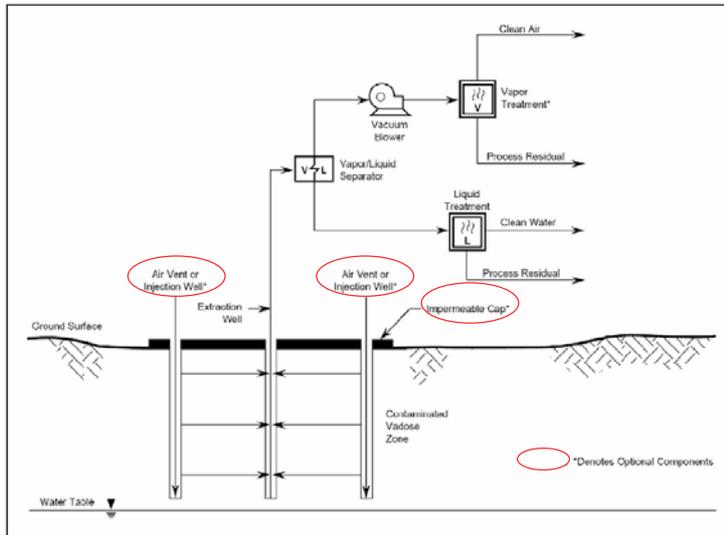
El sistema SVE consta básicamente de los pozos de vacío/extracción que penetran en el suelo contaminado. Las canalizaciones para la circulación de los gases hacia el sistema de descontaminación. La unidad separadora de gases y líquidos. La bomba de extracción o sea el compresor de vacío. Y la unidad depuradora de los gases.

En determinados casos se llegan a excavar cientos de pozos (típicamente a 2m de profundidad pero se ha llegado hasta los 90m).



Componentes de un SVE

Typical Soil Vapor Extraction System



EPA-542-R-05-028, March 2006

Los componentes de un SVE los podemos ver con mas detalle en este esquema.

Los gases extraídos por el SVE se deben a varios mecanismos:

Arrastre directo de la atmósfera del suelo

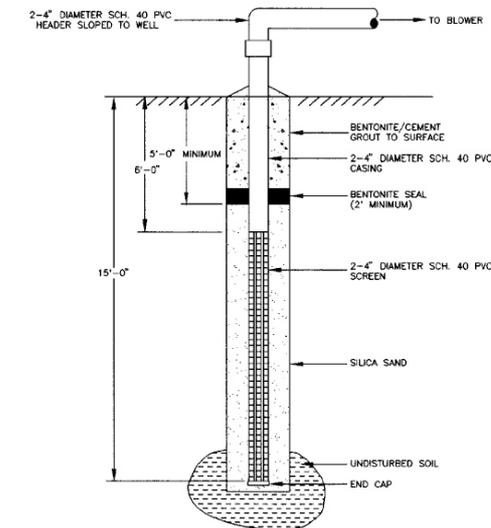
Desorción de contaminantes de las partículas del suelo,

Volatilización desde el agua del suelo

Los resultados mejoran sensiblemente si se procede a la impermeabilización de la superficie del suelo con geomembranas (también se pueden acoplar pozos de inyección de aire).



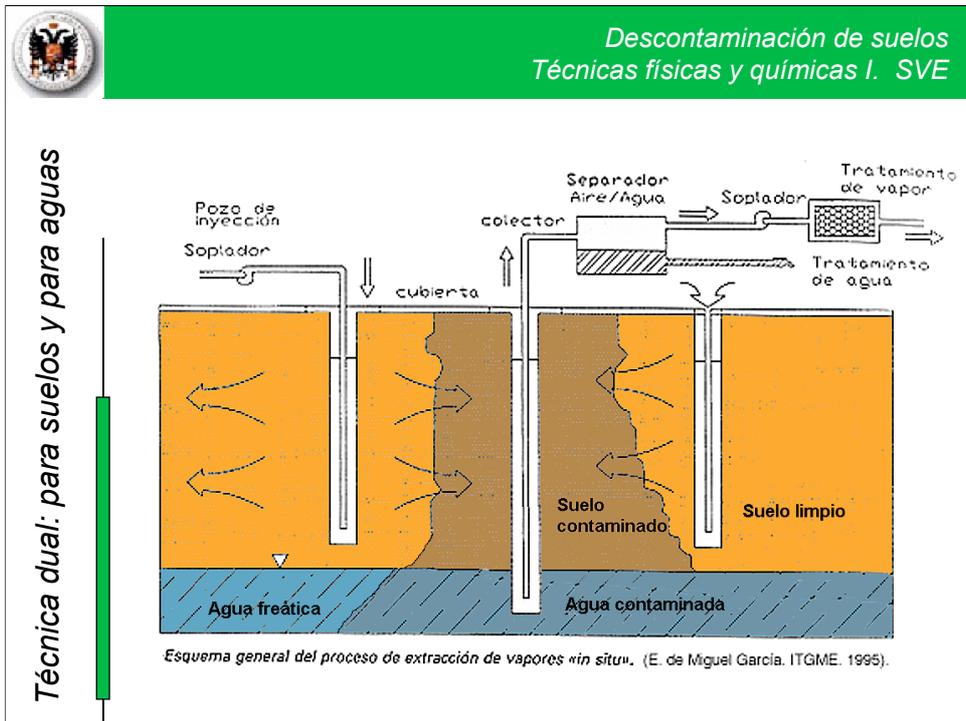
Características del pozo de extracción



Typical SVE well.

Suthersan, 1999. CRC Press

El pozo lleva un tubo central de unos 5 a 10 cm de diámetro de PVC con una ventana de extracción en su extremo inferior. La ventana de extracción está rodeada de una capa inerte y porosa de arena de cuarzo y luego, el final de la ventana de extracción se encuentra sellado por una capa de bentonita.



Típicamente este método se utiliza para descontaminar suelos pero también es utilizado para la descontaminación de aguas subterráneas. Bastaría simplemente profundizar los pozos de vacío hasta perforar los niveles freáticos.



Equipos comerciales portátiles



El sistema SVE está muy elaborado con unos equipos comerciales portátiles muy experimentados.



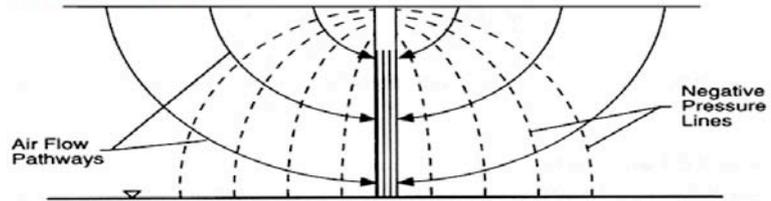
## Principios básicos

- ⊙ El aire fluye desde las zonas de altas presiones hacia las de baja.
- ⊙ Al producir vacío en los pozos se inducen presiones negativas en su entorno.
- ⊙ Los gases de esas zonas se arrastran a los pozos.
- ⊙ Se favorece el flujo si además se inyecta aire a presión en las zonas limítrofes.

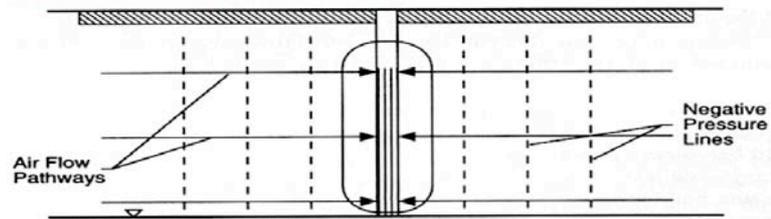


Flujos de aire sin o con recubierta

Superficie del suelo libre



Superficie del suelo impermeabilizada

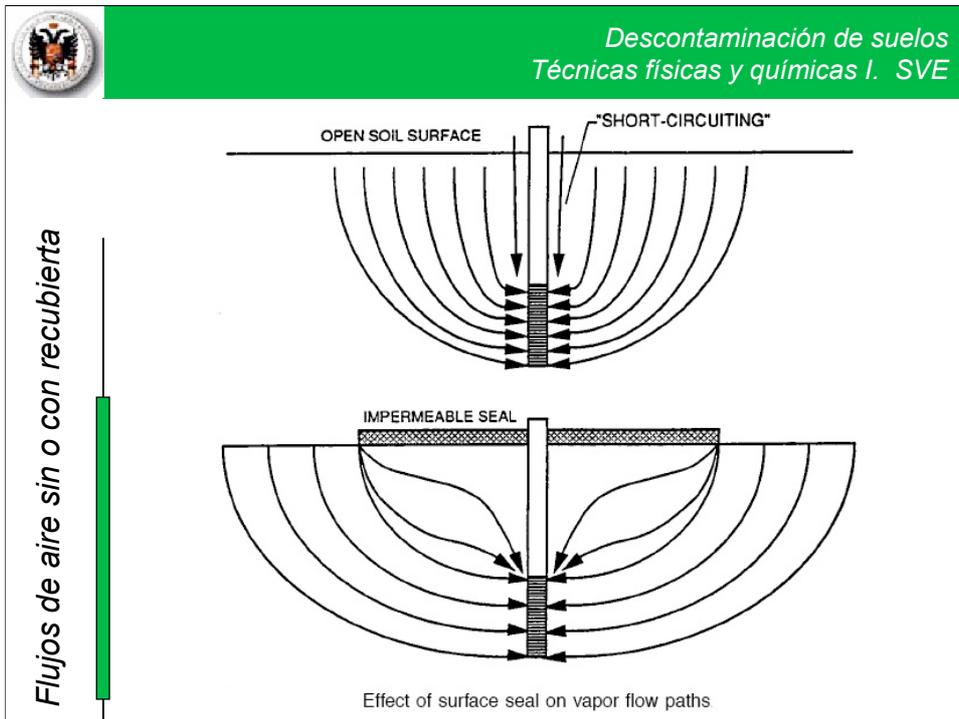


Typical airflow patterns and vacuum distribution during SVE operation.

Suthersan, 1999. CRC Press

El aire se desplaza desde las presiones altas a las bajas siguiendo direcciones perpendiculares a las del campo de presión.

La impermeabilización de la superficie se puede realizar mediante una geomembrana impermeable, una capa de arcillas compactadas, lámina de plástico, asfalto o cualquier otro material impermeable.



Si se sella la superficie del suelo se consigue mejorar los rendimientos al modificar la circulación del flujo del aire en el suelo.

Al sellar la superficie del suelo se consiguen varios efectos:

- se reduce en gran medida la entrada de aire desde la superficie (circulación de aire limpio que compite con el aire contaminado del suelo)
- arrastra el aire desde distancias más largas dentro del suelo
- previene de la entrada del agua de lluvia
- reduce el contenido de humedad del suelo
- reduce el contenido de vapor de agua en los gases extraídos



## Eficacia: parámetros

Del contaminante

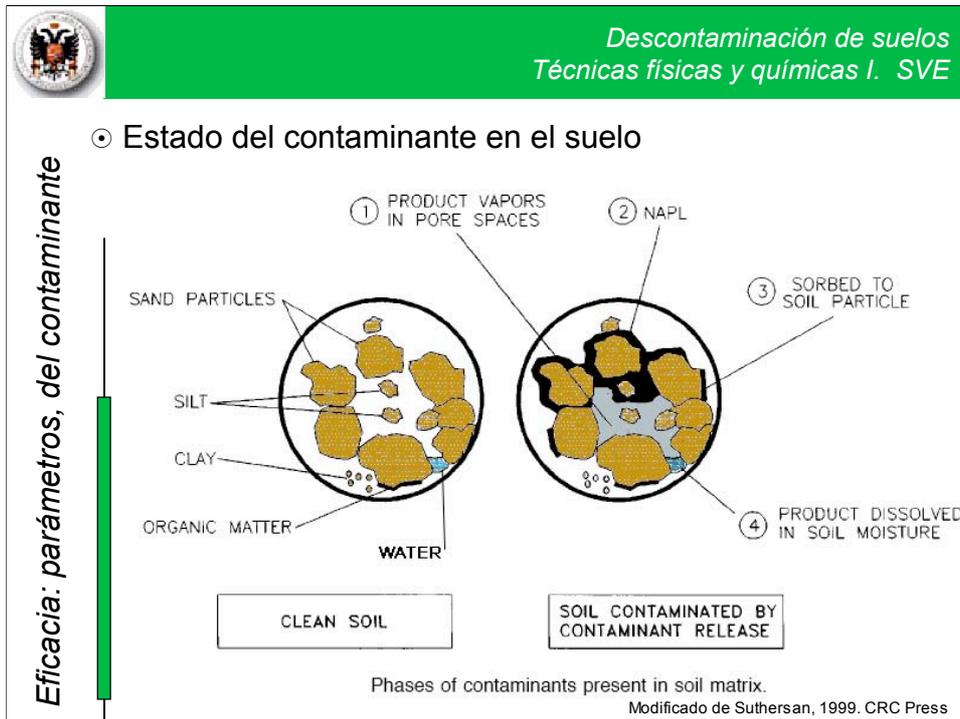
Del suelo

**Del contaminante**

- ◉ Estado del contaminante en el suelo

La eficacia de la técnica dependerá de su habilidad para arrastrar a los contaminantes, lo que dependerá de un amplio conjunto de parámetros.

El primer factor a tener en cuenta es como se encuentra el contaminante en el suelo



Los contaminantes orgánicos en el suelo se pueden encontrar en cuatro formas:

- como gases disueltos en el aire dentro de los poros del suelo
- como líquidos inmiscible con el agua en los poros del suelo (NAPL) formando finas películas sobre la superficie de las partículas
- adsorbidos en el complejo de cambio del suelo
- disueltos en la solución del suelo

El conocimiento del estado del contaminante es fundamental para comprender el comportamiento frente a la extracción mediante vacío. Durante la extracción varios mecanismos pueden ocurrir simultáneamente. Al principio del tratamiento va a ocurrir la extracción del contaminante desde el gas del suelo y después la evaporación del contaminante en situación inmiscible. Después, y sólo cuando estos se hayan agotado se extraerá el contaminante adsorbido y finalmente el que se encuentra disuelto en la solución del suelo.



□ **Del contaminante**

- Estado del contaminante en el suelo
- Presión de vapor
  - > 1mmHg
  - Influencia T<sup>a</sup>, por cada 10° la Pv aumenta x3 ó x4
- Solubilidad en agua

#### PRESIÓN DE VAPOR

Representa la tendencia a volatilizarse y la partición en la fase gaseosa. Todos los sólidos y los líquidos tiene una determinada presión de vapor y puede ser considerada como su solubilidad en aire.

Influenciada por la temperatura. Por ello la inyección de aire caliente mejora el arrastre pero es una solución muy costosa.

Se expresa en términos de milímetros de mercurio o de atmósferas y puede representar un primer índice de ayuda para saber como va a responder un contaminante a su extracción por esta técnica (los mejores >1mmHg, caso del benceno, TCE, ...).

#### SOLUBILIDAD

Representa la tendencia a disolverse en agua (se expresa en término de peso/volumen, por ejemplo mg/L). Infiere en el estado (fase) en que se puede encontrar el contaminante en el suelo.

Definición: máxima cantidad del compuesto que se puede disolver en agua a una determinada temperatura.

En los suelos el contenido de agua oscila normalmente entre el 10 y el 15% y los contaminantes solubles se encontraran disueltos en agua.

Para la SVE se requiere compuestos poco solubles en agua, para que no queden retenidos por el agua, a menor solubilidad mayor facilidad de volatilización.

También se ha de considera la cosolvatación, que es la influencia de un compuesto en la solubilidad de otro (mezcla de varios disolventes solubles entre sí).

La solubilidad es un parámetro de fuerte incidencia en la movilidad y transporte hacia las aguas subterráneas de un contaminante.

Para mezclas orgánicas, como las de gasolinas, en la solubilidad influye la fracción molar de cada compuesto individual, según la fórmula,

$$C_i = X_i A_i C_i^o$$

donde,  $C_i$  es la concentración de equilibrio del compuesto en la mezcla

$X_i$  es la fracción molar del compuesto en la mezcla

$A_i$  es el coeficiente de actividad del compuesto en la mezcla

$C_i^o$  es el equilibrio de solubilidad del compuesto puro.



#### ❑ Del contaminante

- ⊙ Estado del contaminante en el suelo
- ⊙ Presión de vapor
- ⊙ Solubilidad en agua
- ⊙ Constante de Henry

$$K_H = C_v / C_l$$

donde  $K_H$  = constante de Henry (que puede ser expresada en unidades adimensionales o en atm · m<sup>3</sup>/mol)

$C_v$  = concentración de la fase de vapor en la interfase agua/vapor

$C_l$  = concentración del líquido en la interfase agua/vapor

Dependiente de la T<sup>a</sup>: aumenta 1,6 veces por cada 10<sup>a</sup> de

Define la tendencia a la volatización de un compuesto disuelto en agua.

Es análoga a la presión de vapor pero la presión se refiere a una sustancia pura y no a un compuesto.



❑ **Del contaminante**

- Estado del contaminante en el suelo
- Presión de vapor
- Solubilidad en agua
- Constante de Henry
- Coeficiente de adsorción

Desorción compuestos hidrofóbicos

- no polares
- repelentes al agua
- baja solubilidad

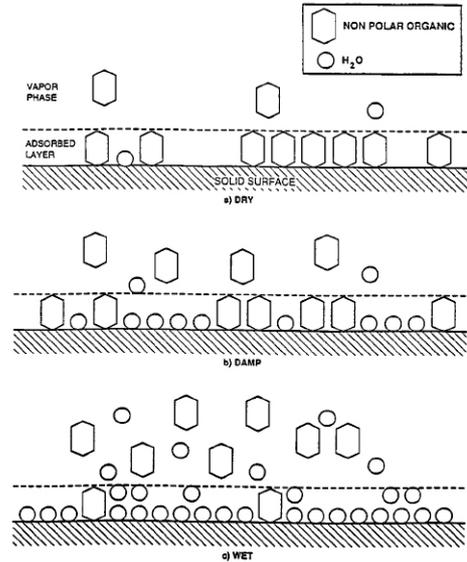
Desorción disminuye al desecarse el suelo

Va a regular la fuerza de fijación del contaminante a las partículas del suelo.

Mayoría de los contaminantes orgánicos son apolares



Eficacia: parámetros, del contaminante



Suthersan, 1999. CRC Press

Illustration of VOC adsorption under three moisture regimes

Diferencias del potencial de adsorción bajo diferentes grados de humedad.

La adsorción del suelo se vuelve especialmente importante en los suelos secos.

Durante el proceso SVE la humedad del suelo va bajando (extraída por el aire)



Coeficiente de adsorción de los contaminantes:  $K_d$   
materia orgánica y arcillas

$$K_d = f_{oc} \cdot K_{oc}$$

donde  $K_d$  = coeficiente de reparto  
 $f_{oc}$  = porcentaje de carbono orgánico en el suelo  
 $K_{oc}$  = coeficiente de reparto del carbono orgánico

Valores típicos de  $f_{oc}$ : 2-6% (0,3-1% suelos cultivados)

$K_{oc}$  calculado a partir del coeficiente de reparto octanol/agua

$$\log K_{oc} = 0,999 \cdot \log K_{ow} - 0,202$$

Contaminantes más fácilmente adsorbidos que desorbidos

La adsorción de un contaminante al suelo se determina por el coeficiente de adsorción,  $K_d$ .

Mayoría de los contaminantes orgánicos son apolares y por ello la adsorción muestra poca relación con arcillas pero si con el contenido total de materia orgánica.

La  $K_d$  de un contaminante es muy variable de un suelo a otro dependiendo % materia orgánica. Por ello se maneja el valor de  $K_d$  adaptado al % de materia orgánica =  $K_{oc}$  que es más significativo.

Los investigadores han propuesto diversos procedimientos para calcular  $K_{oc}$ ; uno de los más fáciles es a partir del coeficiente de reparto octanol/agua del contaminante ( $K_{ow}$ ). El  $K_{oc}$  de un contaminante describe su partición entre agua (fase polar) y octanol (fase apolar). El reparto octanol/agua es similar al reparto en la matriz del suelo y la materia orgánica. Una ecuación aceptada es:  $\log K_{oc} = 0,999 \cdot \log K_{ow} - 0,202$

La mayoría de los contaminantes orgánicos son más fácilmente adsorbidos que desorbidos. Es por ello que se consume mucho más tiempo y energía en la desorción que en la adsorción de los contaminantes en el suelo. Este fenómeno es conocido como histéresis tiende a reducir la capacidad de remover gases durante el proceso SVE, particularmente en su etapa final.

Para valores de materia orgánica < 0,5 a 1 % la adsorción por la fracción mineral es predominante.



- **Del contaminante**
  - Estado del contaminante en el suelo
  - Presión de vapor
  - Solubilidad en agua
  - Constante de Henry
  - Coeficiente de adsorción
  - Degradabilidad

La circulación de aire dentro del suelo es por sí misma una causa importante de degradabilidad por los microorganismos del suelo (proceso llamado bioventing)

Al provocar el SVE la circulación del aire en el suelo favorece descomposición de los contaminantes orgánicos por actuación de microorganismos.

La degradabilidad del contaminante orgánico será también un factor a tener en cuenta.



Eficacia: parámetros, del contaminante

**Del contaminante**

- Estado del contaminante en el suelo
- Presión de vapor
- Solubilidad en agua
- Constante de Henry
- Coeficiente de adsorción
- Degradabilidad
- Otras propiedades
  - peso
  - estructura molecular
  - polaridad

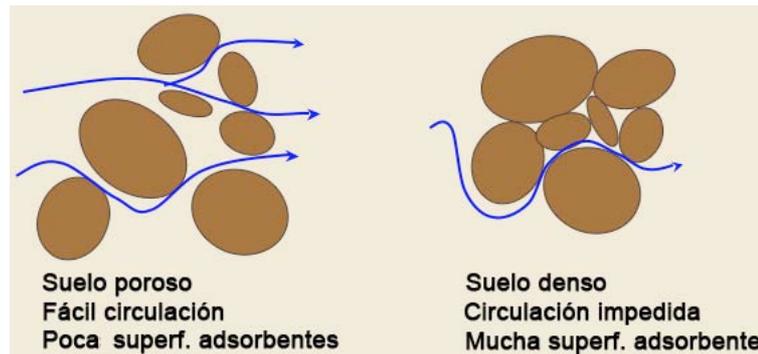
Existen otras propiedades del contaminante que influyen en su eliminación, como el peso molecular, su estructura y su polaridad, pero lo hacen en mucha menor medida que los parámetros considerados anteriormente, por lo que estos tres deben ser considerados como secundarios.



□ Del suelo

○ Porosidad

Eficacia: parámetros, del suelo



En cuanto a los parámetros del suelo que condicionan la eficacia del método SVE, es la porosidad el más importante pues va a condicionar la facilidad de circulación del aire y por tanto puede limitar la eficacia del arrastre de contaminantes.

Los poros con aire representan las vías de circulación y por otra parte la abundancia de poros implica muy poca superficie para la adsorción.

De lo que se acaba de exponer se deduce que el SVE funcionará bien en suelos porosos

Un suelo poroso tiene del orden de un 50% de volumen de poros.



**Del suelo**

- ◉ Porosidad
- ◉ Permeabilidad al aire
- ◉ Textura y estructura
- ◉ Contenido de materia orgánica
- ◉ Homogeneidad/heterogeneidad

Otra propiedad, condicionada por la anterior, es la permeabilidad al aire. El sistema SVE requiere permeabilidades al aire  $> 10^{-10} \text{ cm}^2$ .

La textura va a influir en la porosidad y permeabilidad. Así valores altos los presenta los suelos francos y arenosos, mientras que los arcillosos son muy impermeables y no son aptos para la SVE.

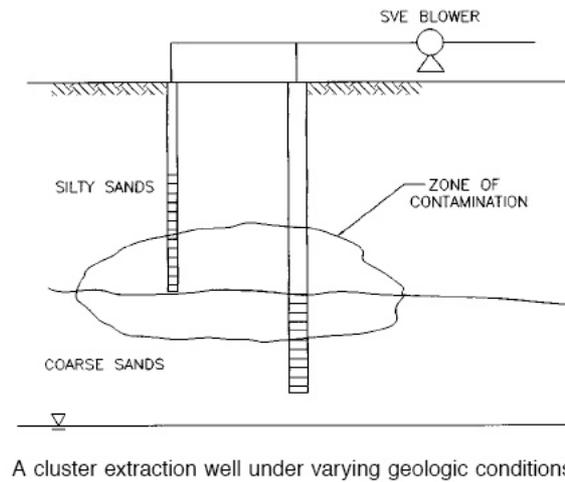
La estructura desarrolla agregados que quedan limitados por espacios porosos. Los suelos con un buen grado de desarrollo de la estructura son ideales para aplicar el sistema SVE, mientras que los suelos de bajo grado de desarrollo estructural son medios masivos en los que el SVE no ofrece buenos rendimientos.

Finalmente, la existencia de capas heterogéneas dentro de un suelo influye de una manera importante en la circulación del aire.



○ Heterogeneidad

Eficacia: parámetros, del suelo



Southern, 1999, CRC Press

La heterogeneidad de un suelo se presenta por cambios de estructura y de textura (los propio procesos edáficos tienden a dar heterogeneidad; formación de horizontes con distintas texturas y estructuras; típicamente el proceso genético de iluviación de arcilla forma un horizonte arenoso sobre uno arcilloso). Si los contaminantes ocupan dos o mas capas diferentes el SVE va a tender a extraer preferentemente los contaminantes de la capa permeable y va a resultar muy difícil descontaminar la zona impermeable ya que las corrientes de aire van a circular preferentemente por las capas de alta permeabilidad.

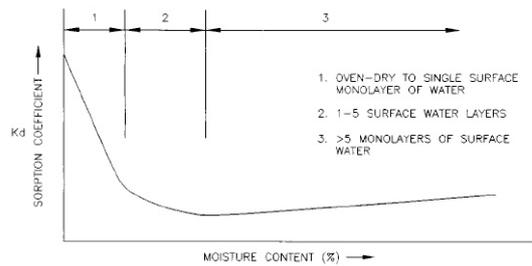
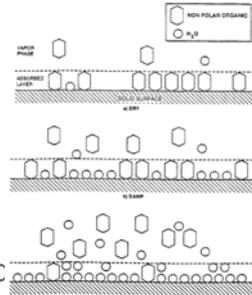




Eficacia: parámetros, del suelo

### □ Del suelo

- Porosidad
- Permeabilidad al aire
- Textura y estructura
- Materia orgánica
- Homogeneidad/heterogeneidad
- Humedad



Adsorption of contaminants as a function of moisture content.

La humedad del suelo es otro factor que condiciona el resultado de la SVE ya que directamente representa un pérdida de porosidad para el aire (el poro está ocupado por agua en vez de por aire) y por otro lado proporciona un medio (el agua) para que los contaminantes se disuelvan y queden en parte protegidos del arrastre (han de ser volatilizados para ello). Aunque influye en el poder de adsorción disminuyéndolo al aumentar la humedad y por tanto favoreciendo la desorción.



Eficacia: parámetros, del suelo

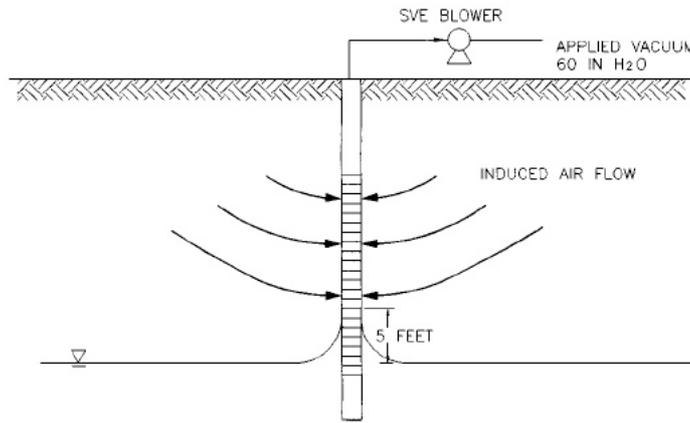
Del suelo

- Porosidad
- Permeabilidad al aire
- Textura y estructura
- Materia orgánica
- Homogeneidad/heterogeneidad
- Humedad
- Profundidad de la capa freática

Al producirse el vacío la corriente creada puede afectar al agua subterránea si esta se encuentra próxima al suelo contaminado.



○ Profundidad de la capa freática



Water table rise during SVE operation.

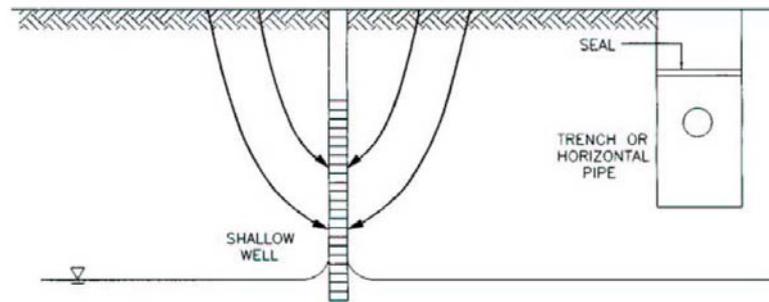
Eficacia: parámetros, del suelo

Southern, 1999, CRC Press



- Profundidad de la capa freática

Eficacia: parámetros, del suelo

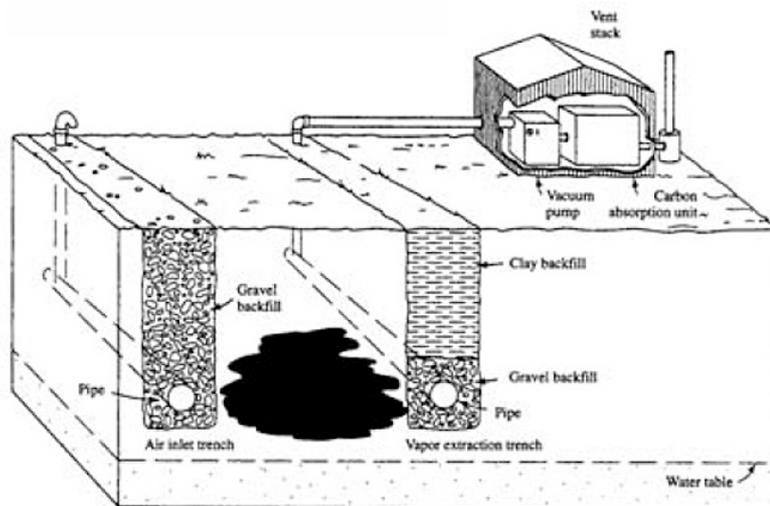


Southersan, 1999. CRC Press

Para evitar que el agua afecte a la extracción se pueden establecer pozos horizontales en vez de verticales.



Eficacia: parámetros, del suelo

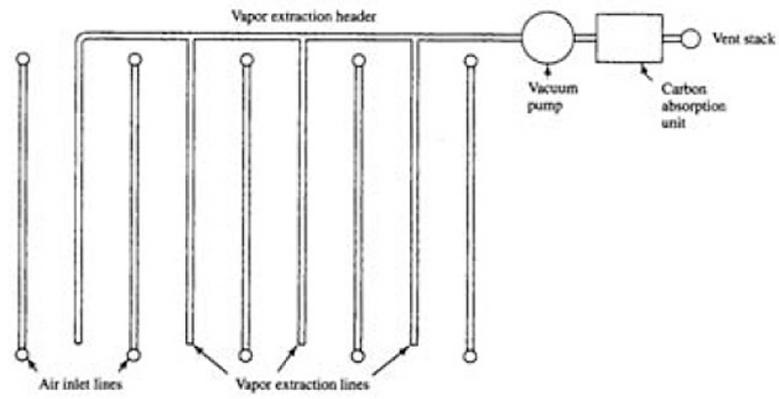


Pozos horizontales para nivel freático a 1 a 3 metros

Agua subterránea superficial a de 1,5 a 3 metros. Pozos horizontales. Pozo de inyección de aire enterrado en gravas. Pozo de extracción sellado con arcillas.



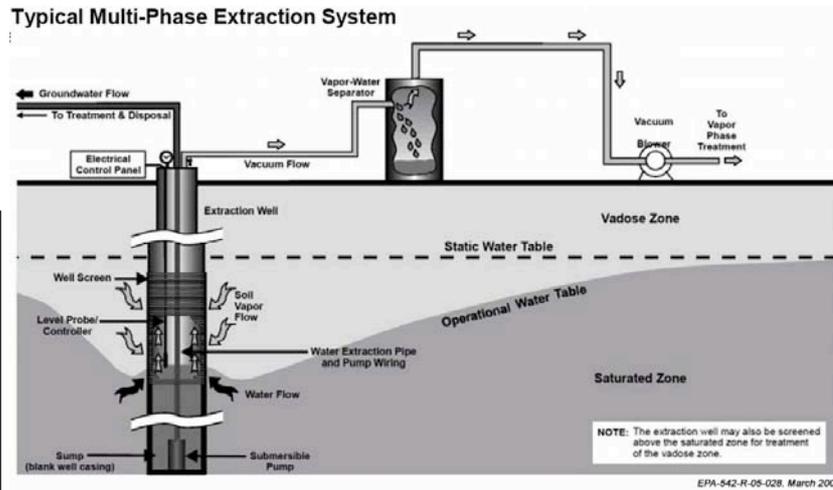
Eficacia: parámetros, del suelo



Distribución de una red de pozos horizontales



Sistema dual o multifase DVE ó MDE



Una variante del sistema SVE es el dual fase (DVE) o el multifase (MVE)

Se utiliza para suelos con moderada/baja permeabilidad u horizontes de textura heterogénea. Se emplea alto vacío (<30 cm Hg).

Si hay capa de agua, primero rebaja el nivel freático y luego extrae por SVE.

Remoción de gases y líquidos a la vez (en el suelo y en el agua subterránea), por eso también se llama Dual Phase o Múltiple Phase.



- Alto vacío para extraer a la vez la contaminación de:
  - ◉ vapores del suelo
  - ◉ aguas subterránea
- Cada medio tiene comportamiento distinto, por ejemplo para un vacío de 32 atm (24 cm Hg)
  - ◉ Para el gas
    - extracción 1.000 L/min
    - radio de influencia 11 metros
  - ◉ Para el agua
    - extracción 3,4 L/min
    - radio de influencia de 8 a 14 metros



## Aplicabilidad

### Condiciones idóneas

#### Del contaminante

- Presión de mercurio  $> 1,0$  mm
- Constante de Henry  $> 0,001$  atm m<sup>3</sup>/mol
- Baja solubilidad en agua
- Bajo valor  $K_{ow}$

#### •Del suelo

- Permeabilidad para el aire  $> 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>
- Contenido en humedad  $< 50\%$
- Bajo contenido en materia orgánica

### Eficacia del sistema

- Constante de Henry  $> 0,001$  atm m<sup>3</sup>/mol (o también expresado por 0,01 adimensional)

Permeabilidad mas alta que  $10^{-10}$  cm<sup>2</sup> corresponde a suelos de textura arenosas y francas.



## Aplicabilidad

Aplicabilidad del sistema SVE

Contaminants Amenable to SVE		
Contaminant	Henry's law constant (atm·m <sup>3</sup> /mol)	Vapor pressure (mmHg)
Benzene	0.00548 (25°C)	76 (20°C)
Toluene	0.00674 (25°C)	22 (20°C)
Trichloroethylene (TCE)	0.0099 (20°C)	57.8 (20°C)
Tetrachlorethylene (PCE)	0.00029	20 (26.3°C)

Prestaciones del SVE dependerán del tipo de parámetros tanto los referentes a los contaminantes como a los del suelo, pero son dos los que más influyen: la constante de Henry y la presión de vapor.

Por ejemplo estos son los valores de estos dos parámetros para cuatro contaminantes orgánicos comunes fácilmente arrastrados en la SVE, especialmente los tres primeros (ya que el PCE no presenta un adecuado valor de la constante de Henry).



Aplicabilidad del sistema SVE

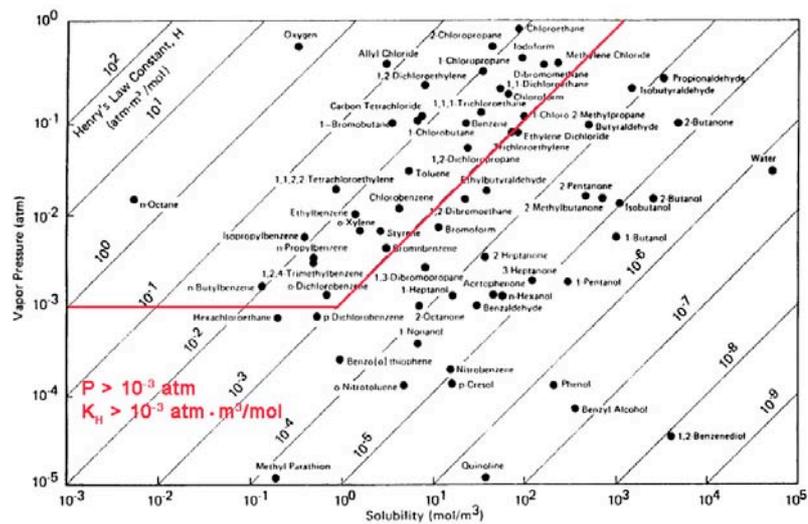
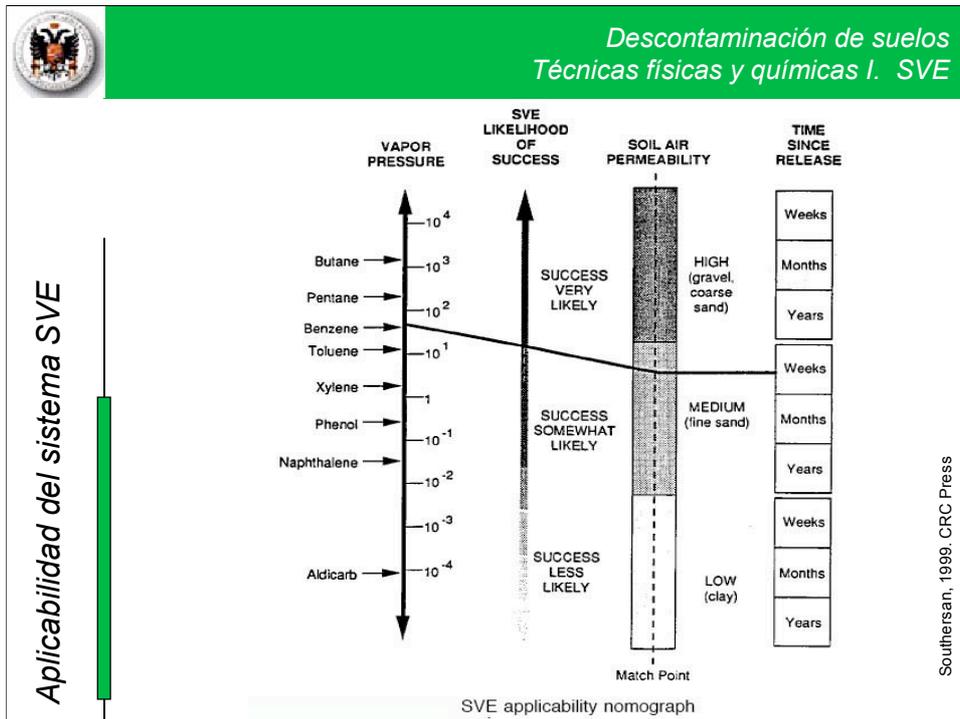


Figure 3.6 Solubility, vapor pressure, and Henry's law constant for selected chemicals. (After Lyman, W. J., Reehl, W. F., and Rosenblatt, D. H., *Handbook of Chemical Property Estimation Methods: Environmental Behavior of Organic Compounds*, McGraw-Hill, New York, 1982.)

En esta pantalla se representa gráficamente las relaciones entre la presión de vapor, la constante de Henry y la solubilidad.

Los contaminantes que pueden ser fácilmente extraíbles por SVE se encuentran distribuidos en la esquina superior izquierda delimitados por los valores de una presión de vapor  $> 10^{-3}$  atm y una constante de Henry  $> 10^{-3}$  atm  $\cdot$  m<sup>3</sup>/mol y bajas solubilidades.

Por ejemplo, muchos compuestos situados a la derecha de la gráfica pueden ser muy volátiles pero no son extraíbles por SVE al ser muy solubles en agua (este es el caso, por ejemplo, de la acetona).



El grado de aplicabilidad del sistema SVE se puede calcular en esta gráfica a partir de los valores de la presión de vapor y de la permeabilidad del suelo.

Se une el valor de la presión de vapor con la permeabilidad y esa línea cruzará otra vertical que dará el grado de efectividad de esta técnica. Por otro lado trazando una horizontal desde el valor de la permeabilidad aparecerá el tiempo aproximado requerido para el tratamiento de este suelo por esta técnica.

La mayoría de los compuestos del petróleo tales como benceno, tolueno, etilbenceno y xileno son fácilmente biodegradados durante la extracción por SVE.



## Diseño operativo

1. Caracterización de los contaminantes
2. Caracterización del suelo
3. Ensayos de laboratorio
4. Ensayo piloto en el terreno

Hay muchos criterios que hay que valorar antes de decidir la aplicación del sistema SVE en un sitio.

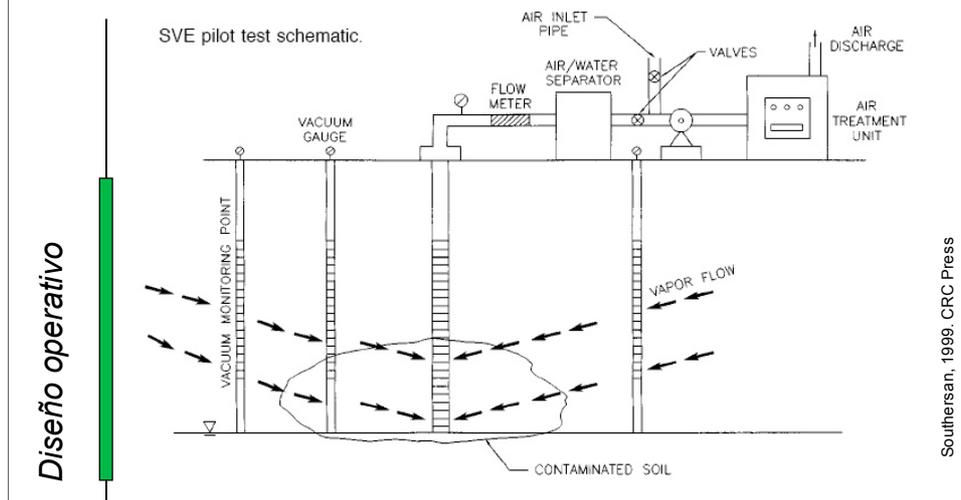
La aplicabilidad de esta tecnología depende de muchos factores relacionados con el sitio y con la naturaleza de los contaminantes y la caracterización de los contaminantes y del suelo constituyen los primeros e insoslayables pasos que hay que realizar.

Habrá que analizar la composición, tipo, edad, concentración, fase, presión de vapor, constante de Henry, solubilidad y distribución horizontal y vertical de los contaminantes en el suelo. Y del medio habrá que conocer la permeabilidad, humedad, textura, heterogeneidad, entre otros.

Después vendrá una fase de experimentos en el laboratorio y en el campo sobre las condiciones de arrastre de los contaminantes, para optimizar las condiciones de aplicación de la extracción práctica con el SVE en el sitio. Los ensayos de laboratorio se pueden realizar en columnas de suelo, pero, dado que es imposible simular en el laboratorio el comportamiento del suelo en el campo, los experimentos han de ser luego contrastados con ensayos de campo.



#### 4. Ensayo piloto en el terreno. Permeabilidad del suelo al aire



Es aconsejable planificar un ensayo piloto para determinar los parámetros de trabajo como son la permeabilidad del suelo, el radio de influencia de los pozos, la composición y concentración de los gases arrastrados, la intensidad del flujo del aire, los niveles de vacío en distintos puntos del suelo, los niveles de vacío requeridos, capacidad de la bomba de vacío, sistema de depuración requerido y puntos de muestreo requeridos para el control del funcionamiento.

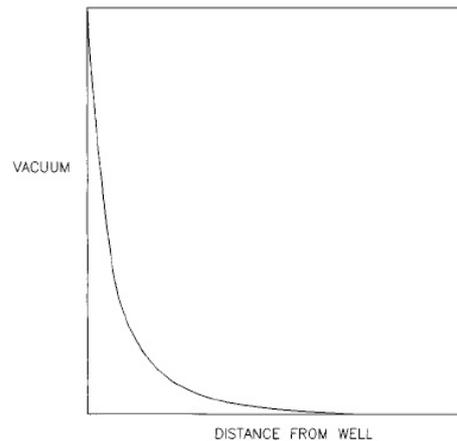
La obtención de información sobre las concentraciones y los flujos de aire en capas horizontales es de gran importancia para la optimización del SVE definitivo. Por ejemplo si el 90% de los contaminantes se están extrayendo de sólo un intervalo vertical del 5%, el sistema se está diluyendo por la entrada de aire no contaminado y se deberá cambiar la situación de los pozos y la profundidad de las ventanas de extracción.



#### 4. Ensayo piloto en el terreno

##### Radio de influencia de los pozos

Diseño operativo



Tailing effect of vacuum away from an extraction well.

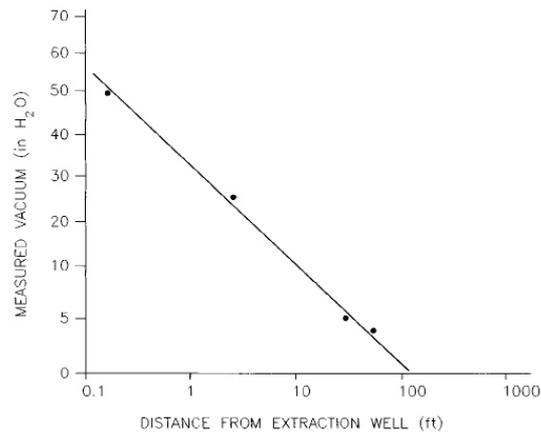
El radio de influencia de los pozos es un parámetro de suma importancia que hay que investigar en el ensayo piloto. Alrededor de los pozos de vacío se establecen una serie de pozos de medida con manómetros para controlar las pérdidas de vacío a distancias cada vez mayores del pozo de vacío (se colocan varios pozos de medida formando anillos para compensar las irregularidades del suelo). Con los datos se construye una gráfica que representa los vacíos medidos en función de las distancias.



#### 4. Ensayo piloto en el terreno

##### Radio de influencia de los pozos

Diseño operativo



Vacuum vs. distance plot on a semi-log paper.

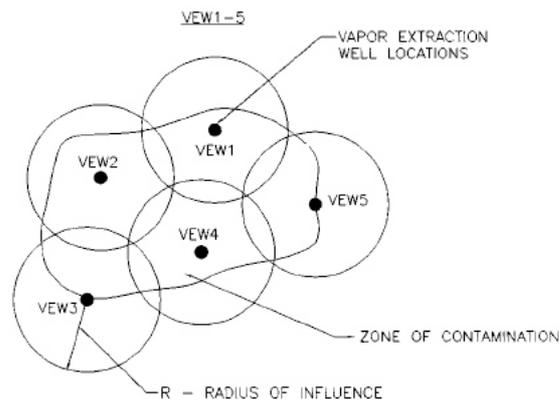
Un buen experimento debe dar una representación lineal si se utiliza escala semilogarítmica. El radio de influencia de un pozo se determina de una manera arbitraria por la caída del vacío a valores no operativos (no se será suficiente para producir arrastre de vapores); una regla puede ser determinarlo por la distancia a la que aparece un vacío de 1 pulgada de agua o un 10% del vacío aplicado.



#### 4. Ensayo piloto en el terreno

##### Radio de influencia de los pozos

Diseño operativo



Determination of the required number of wells from the radius of influence.

Una vez conocido el radio de influencia de los pozos se hace una distribución de ellos en el suelo contaminado de manera que se solapen sus influencias entre pozos contiguos. En la distribución de los pozos hay que tener en cuenta que debido a las irregularidades del terreno no todos los pozos tienen que tener el mismo radio de influencia (por igual razón tampoco la zona de influencia tiene que ser un círculo).



Diseño operativo

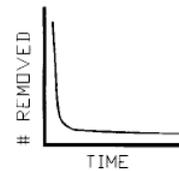
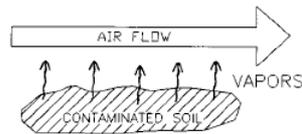
1. Caracterización de los contaminantes
  2. Caracterización del suelo
  3. Ensayos de laboratorio
  4. Ensayo piloto en el terreno
- Permeabilidad del suelo al aire
- Radio de influencia de los pozos
- Composición y concentración de los gases
- Intensidad del vacío y de los flujos del aire

El control del flujo a lo largo del proceso se ha de controlar pues no es constante

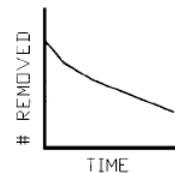


Diseño operativo

### DIFFUSION CONTROLLED



### FLOW CONTROLLED



↓ Decline in vapor concentrations under diffusion and flow-controlled regimes.

Southern, 1999, CRC Press

Cuando el aire del suelo permanece indisturbado después de producirse el vertido y la infiltración de la contaminación se vuelve saturado con los vapores volatizados desde los contaminantes. Este vapor saturado es el inicialmente arrastrado cuando comienza el proceso SVE. Este vapor es rápidamente extraído y cuando se consume la concentración del gas extraído decrece bruscamente hasta alcanzar un equilibrio. Después el flujo de aire para arrastrar los contaminantes primero los tiene que volatilizar desde la solución del suelo, desde la posición de líquido inmiscible y desde las posiciones de cambio, con lo cual la extracción es más lenta pero más constante.

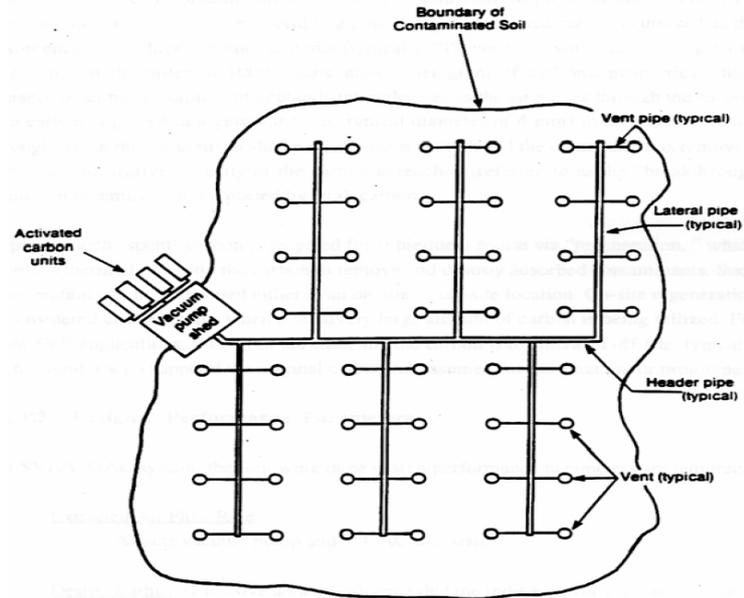


1. Caracterización de los contaminantes
2. Caracterización del suelo
3. Ensayos de laboratorio
4. Ensayo piloto en el terreno
5. Elección de los componentes del equipo
6. Planificación de la red de extracción



Descontaminación de suelos  
Técnicas físicas y químicas I. SVE

Diseño operativo



Se ha de planificar en función de los radios de influencia y de la extensión de la contaminación.



1. Caracterización de los contaminantes
2. Caracterización del suelo
3. Ensayos de laboratorio
4. Ensayo piloto en el terreno
5. Elección de los componentes del equipo
6. Planificación de la red de extracción
7. Calibración del sistema
8. Definición de los límites alcanzables
9. Planificación del calendario
10. Estimación de costes
11. Implementación
12. Monitorización



### En definitiva, en desarrollo de un sistema SVE

Se han de determinar varios parámetros:

- intensidad del flujo de aire
- intensidad del vacío
- radio de influencia

El sistema consta de los siguientes componentes

- número y localización de pozos de extracción
- número y localización de pozos de monitoreo
- bomba de vacío
- separador aire/liquido
- llaves, manómetros y tuberías
- depuradores de gases
- instrumentación de control

Diseño operativo



**Localización In situ**

**Aplicaciones y ventajas**

- Muy efectiva para volátiles (VOCs, SVOCs), pero mucho menos eficaz para el diesel y el queroseno.
- Puede tratar grandes cantidades de contaminantes.
- Produce modificación mínima en el suelo.
- Equipos completos desarrollados por numerosas casas comerciales, portátiles y muy fáciles de instalar.

La técnica de extracción de vapores mediante vacío es extraordinariamente utilizada. El arrastre de vapores mediante vacío (Soil Vapor Extraction) es una de las técnicas más utilizadas en USA y en Europa (por sus rendimientos y costes). En el listado de sitios SUPERFUND de la EPA en 2004 el sistema SVE se utilizó en un 15% de los sitios. Sin embargo la inyección de aire (Air Sparging) es muy poco utilizada para los suelos pero si es frecuente encontrarla combinada con el SVE. Air Sparging sí es muy frecuente para descontaminar las agua subterráneas.

Localización. Casi siempre in situ, pero puede trabajarse ex situ (on site, sobre pilas del suelo excavado)



Descontaminación de suelos  
Técnicas físicas y químicas I. SVE

Depuración de los vapores



<http://www.remediationequipment.com/>



Localización In situ

Aplicaciones y ventajas

- ⊙ Muy efectiva para volátiles (VOCs, SVOCs), pero mucho menos eficaz para el diesel y el queroseno.
- ⊙ Puede tratar grandes cantidades de contaminantes.
- ⊙ Produce modificación mínima en el suelo.
- ⊙ Equipos completos desarrollados por numerosas casas comerciales, portátiles y muy fáciles de instalar.
- ⊙ Se complementa muy bien con otras tecnologías.
- ⊙ Puede ser usada debajo de edificios y en otras localidades que no puedan ser excavadas.



Descontaminación de suelos  
Técnicas físicas y químicas I. SVE

Depuración de los vapores





**Limitaciones e inconvenientes**

- No elimina los metales pesados, ni PCBs, ni dioxinas.
- No utilizable en suelos de baja permeabilidad.
- Contenidos en humedad necesitan de altos vacíos.
- Difícil arrastrar los VOCs con altos contenidos de mat. org.
- No destruye a los contaminantes
- Se puede arrastrar el agua subterránea.

**Tiempo** Corto tiempo de ejecución (semanas/años).

**Costes** de muy bajo coste, de 10-50 €/m<sup>3</sup>, pero variable según tipo de contaminación, extensión y concentración.

No destruye a los contaminantes, sólo los extrae. Los vapores extraídos necesitan normalmente de tratamientos de descontaminación.

Al realizar el vacío se puede arrastrar el agua subterránea si el nivel freático está superficial.



## Tecnología SVE en dos fases

1º Fase. Extracción de vapores

2ª Fase. Depuración de vapores

Primera fase la acabamos de considerar. Terminamos SVE con la segunda fase.

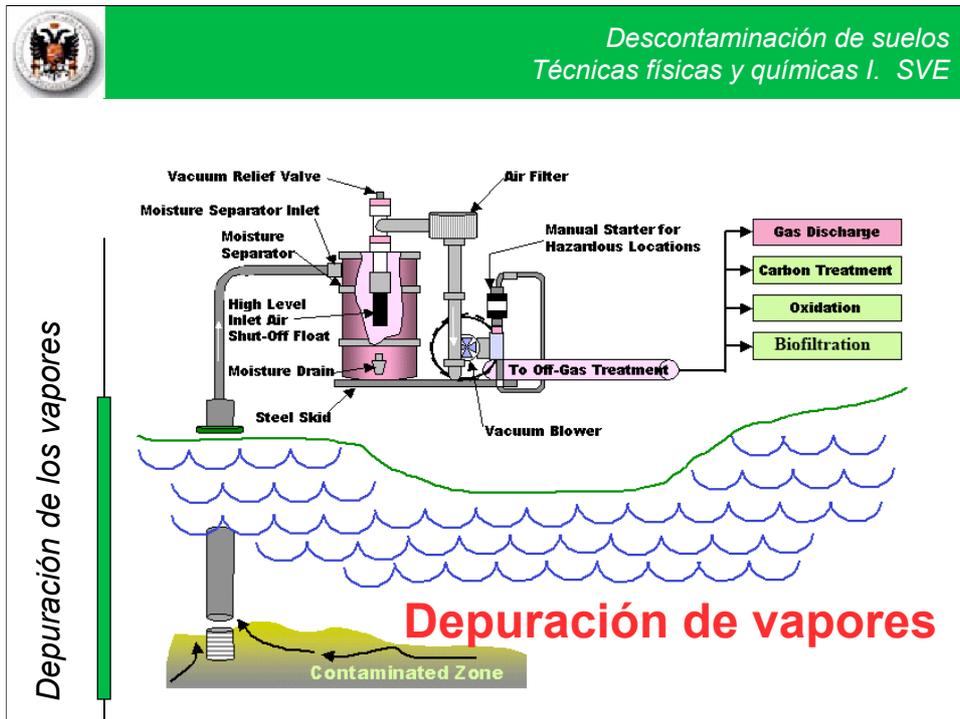


Tecnología SVE en dos fases

1º Fase. Extracción de vapores

**2ª Fase. Depuración de vapores**

Primera fase la acabamos de considerar. Terminamos SVE con la segunda fase.



## TRATAMIENTO DE GASES.

Una vez que los pozos de extracción sacan del suelo al aire y a los vapores, un equipo especial para el control de la contaminación del aire los colecta. El equipo separa los vapores dañinos del aire limpio. Luego los vapores se pegan o se absorben a unos materiales sólidos, o se condensan formando líquidos. Estos sólidos y líquidos contaminados se eliminan de manera segura. El equipo de extracción por vacío (SVE) debe ir, pues, conectado a un sistema completo para depurar el aire antes de soltarlo a la atmósfera (algunos cancerígenos, otros tóxicos, otros inflamables, etc). Por tanto en la gran mayoría de los casos la liberación directa es inaceptable exigiendo un post-tratamiento de gases. En los listados de la EPA se puede comprobar que de los 170 proyectos de descontaminación por SVE llevados a cabo, 146 utilizaron algún sistema depurador de los gases extraídos.

Básicamente existen tres tipos de tecnologías.

**Adsorción.** No destruye los contaminantes solo los separa. Retención de los contaminantes al pasar por un medio o matriz, muy frecuentemente carbón. Muy utilizada para los VOCs.

**Tratamiento térmico.** Destruye determinados contaminantes como los VOCs por oxidación al someterlos a altas temperaturas.

**Biofiltración.** Consiste en la utilización de organismos para consumir o metabolizar a los VOCs.

En la elección de un equipo para el tratamiento de los gases intervienen varios factores: tipos de gases y contaminantes (composiciones y concentraciones: VOCs, halogenados y no halogenados, presencia de gases venenosos, presencia de partículas sólidas en suspensión, contenido en humedad, intensidad del flujo, temperatura, etc).

En los listados SUPERFUND de la EPA se comprueba que la adsorción es el procedimiento más usual, representando el 70% de los casos y el segundo sistema depurador más utilizado fue la oxidación térmica con una frecuencia del 25%.



## Adsorción

Depuración de los vapores

**Ventajas:** sencillez, bajos coste y efectividad (>95%)

**Inconvenientes:** no destruye, regeneración adsorbentes

**Idoneidad:** moderados flujos (3 a 2.000 m<sup>3</sup>/m y bajas concentraciones (<2.000 ppmv)

### Materiales adsorbentes

- carbón activo
- zeolitas
- polímeros sintéticos

Representa la técnica más usada. Es el más sencillo. Consiste en la atracción del contaminante por un material adsorbente.

Los materiales adsorbentes a utilizar han de ser extremadamente porosos y con mucha superficie.

Llegan a alcanzar una efectividad del 95-98%.

Los contaminantes se concentran en el adsorbente pero al quedar retenidos en las superficies pueden ser fácilmente desorbidos para su posterior recogida. Al final del proceso el contaminante o es regenerado o se almacena en vertedero.

La capacidad de adsorción se mide por la isoterma de adsorción (cantidad de adsorbente adsorbido por cantidad de adsorbente).

Como adsorbentes se utiliza:

Carbón activo granulado. Es el más utilizado. Pero no válido para VOCs polares (alcoholes y ácidos orgánicos) o de alta presión de vapor (compuestos altamente volátiles: cloruro de vinilo, cloruro de metileno y éter metil ter-butílico).

Otros materiales adsorbentes empleados son las zeolitas (que son minerales del grupo de los silicatos de aluminio) y los polímeros sintéticos. Estos materiales tienen la ventaja de que la capacidad del adsorbente no queda afectada por la alta humedad.



## Adsorción por carbón

Depuración de los vapores

- Es el más utilizado
- Muchos tipos comerciales
- Ideal para bajas concentraciones (<2.000 ppm)
- Flujos muy variables, de 3 a 2.000 m<sup>3</sup>/minuto
- Barato
- Problemas con la humedad

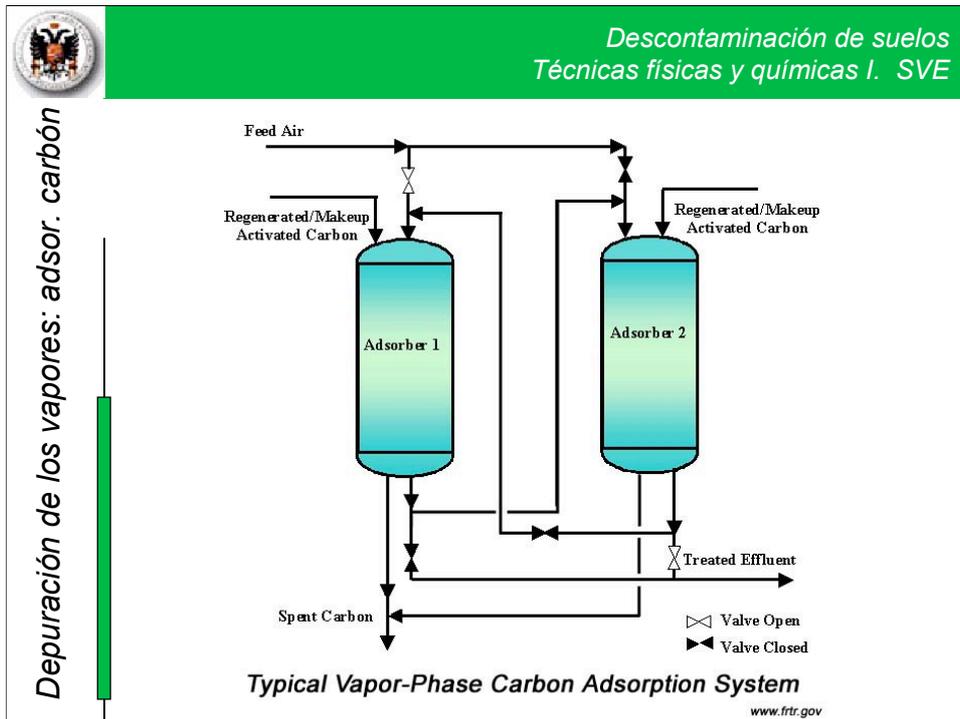
Carbón activo granulado. Es el más utilizado.

Existen muchos tipos comerciales de carbón activo válidos para este uso. Diversas formas de presentación del carbón activo: gránulos, polvos, perlas y bolitas.

Las condiciones ideales para la adsorción por carbón es para bajas concentraciones de contaminantes (<2.000 ppm en volumen).

El sistema trabaja con flujos de 3 a 2.000 m<sup>3</sup>/minuto.

Es un sistema barato pero la alta humedad disminuye la capacidad de adsorción.



Se coloca en unos recipientes (bidones) en serie y se hace atravesarlos al gas del SVE y los contaminantes quedan adsorbidos.

El carbón se activa por pirolisis a partir de carbón de hulla, de madera, de cáscaras de almendra y otros frutos. La activación se produce sometiendo a al material a altas temperaturas, se consigue aumentar en gran medida la porosidad, con lo que aumenta el área superficial para la adsorción.

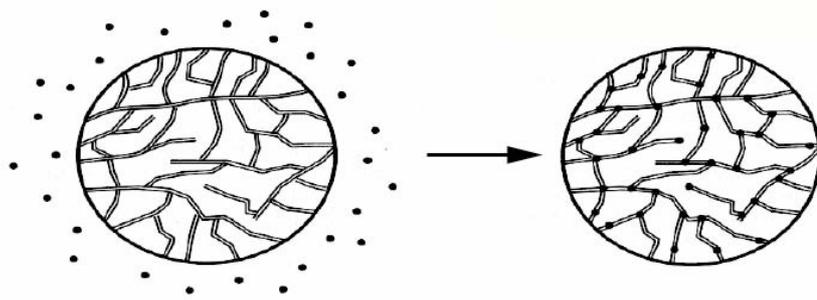
El carbón activado presenta un tamaño de poros de 2 a 500 ángstrom y una superficie activa del orden de 800 a 1.400 m<sup>2</sup>/g.

El carbono activo tiene una capacidad de adsorción del 10 al 20% de su peso, en condiciones de baja humedad.

Periódicamente necesitan ser regenerados o reemplazados.



Depuración de los vapores: adsor. carbón



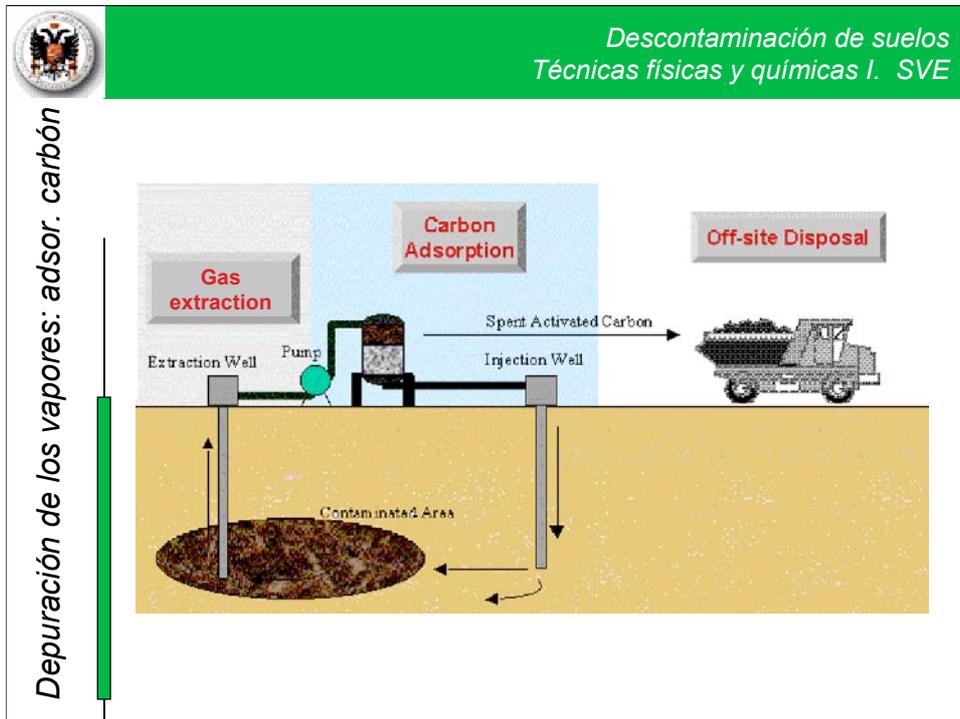
Granulo de carbón activo adsorbiendo contaminantes



Depuración de los vapores: adsor. carbón



Los bidones de carbón activo tienen varias capacidades normalmente son de 2.000 y 4.500 kg. Los de la imagen son de 3.000 kg.



El principal coste de estos equipos es el reemplazamiento del carbón.

Para la regeneración de los filtros de carbón activo (solo un número limitado de veces) se invierte el sentido de circulación con corrientes de vapor caliente y también se pueden llevar a una planta especializada.

Los líquidos limpiadores pueden destruir los contaminantes (tales como tetracloruro de carbono y cloroformo;  $\text{CCl}_4$  y  $\text{CHCl}_3$ ) por medio del calor; posteriormente son hervidos, enfriados, concentrados y almacenados.



**Aplicabilidad**

- ⊙ COVs, también inorgánicos y metales pesados.
- ⊙ Para concentraciones de baja densidad.

## **Aplicabilidad**

Efectivo para un ancho rango de COVs, también compuestos para inorgánicos y metales pesados. Mejores resultados para concentraciones de baja densidad.



### ❑ Limitaciones

- No adecuado para
  - COVs con alta polaridad (alcoholes y ácidos orgánicos)
  - COVs altamente volátiles, (cloruro de vinilo, éter metílico tert-butílico, cloruro de metileno, formaldehido)
  - para gases con alta humedad.
- Costes de reposición, transportes y regeneración.
- Se pierde efectividad al aumentar la humedad y la T<sup>a</sup>
- Se puede producir crecimientos microbianos
- Algunos compuestos, como la acetona, pueden producir combustión.
- No se destruyen los contaminantes, sólo se separan.

## Limitaciones

•No adecuado para COVs con alta polaridad (alcoholes y ácidos orgánicos) ni altamente volátiles, (cloruro de vinilo, éter metílico tert-butílico, cloruro de metileno, formaldehido) ni para gases con alta humedad.

•Costes de reposición, transportes y regeneración del carbón. El reemplazamiento se debe de llevar a cabo de 6 meses a 5 años.

•Al aumentar la humedad de los gases (>50%) pierde efectividad

•Con elevadas temperaturas (>38°C) de los gases se pierde capacidad de adsorción.

•Se puede producir crecimientos microbianos que entrapan los filtros.

•Algunos compuestos, como la acetona, pueden producir combustión.

•No se destruyen los contaminantes, sólo se separan.



**Requerimientos:** los factores que influyen en el rendimiento son:

- tipo y tamaño de los poros del carbón
- temperatura
- humedad
- pH
- tipo y concentración del contaminante

**Características:**

- velocidad del flujo, de 200 a 6.000 litros por minuto
- tiempo de residencia, de 1/10 de segundo a 1 minuto

**Costes:**

- <1.000\$ para 3 m<sup>3</sup>/m a 40.000\$ para 200 m<sup>3</sup>/m
- Reposición del carbón de 4 a 7 \$/kg

Al aumentar temperatura aumenta volatilización y por tanto disminuye capacidad de adsorción.

Los contaminantes básicos son mejor adsorbidos a pH altos. Los de moléculas grandes son bien adsorbidos por el carbón, tales como el naftaleno.

Existe en el mercado muchos tipos comerciales de carbono activo con test probados para diferentes contaminantes (isotermas patrones).



## Adsorción con zeolitas

Depuración de los vapores: zeolitas

- Filtros de partículas inverso
- Naturales y sintéticas
- Hidrofílicas e hidrofóbicas
- Adecuadas para gases con altos contenidos en humedad y a altas temperaturas
- Adecuadas para tratar VOCs halogenados y no halogenados, NOx
- Adecuadas para la adsorción de compuestos no polares y altamente volátiles (cloruro de vinilo, formaldehído, sulfuros y alcoholes)
- Por su pequeño tamaño de poros (de 8 a 13 amgstrons) son idóneas para compuestos de moléculas pequeñas

Zeolitas actúan como un filtro de partículas inverso. Se les llama tamices moleculares, porque sus estructuras cristalinas tienen huecos regularmente distribuidos en su red cristalina. Los poros tienen un tamaño de 8 a 13 amgstrons y su superficie específica es de  $1.200\text{m}^2$  (tamaño de poros mucho más homogéneo que los del granulado de carbón). Y tienen capacidad selectiva para determinados iones.

Las zeolitas naturales pertenecen a un grupo mineral con más de 40 especies. Son aluminosilicatos anhídridos e hidrofílicos.

Hidrofílico sustancia que absorbe agua con facilidad. Hidrofobia que rechaza el agua.

Las zeolitas sintéticas son hidrofílicas o hidrofóbicas y se pueden sintetizar con propiedades específicas. Por ejemplo, hidrofóbicas con afinidad para los VOCs no polares.

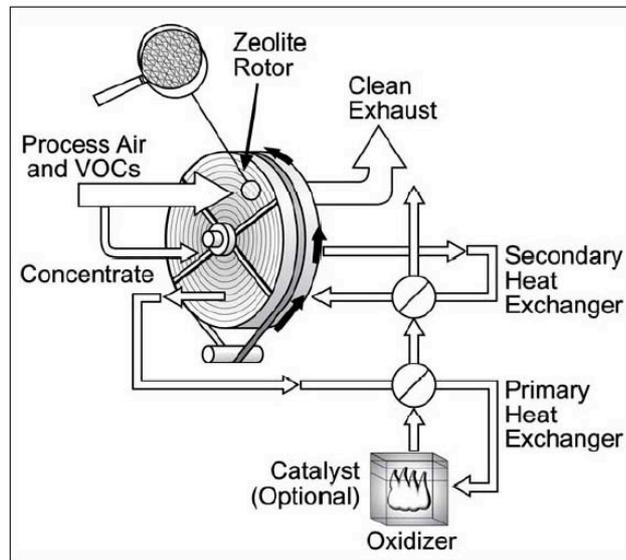
Las zeolitas pueden ser regeneradas y reusadas. Los contaminantes desorbidos deben ser tratados y almacenados.

Por presentar buena capacidad de adsorción con muestras conteniendo alta humedad, por su resistencia al fuego y su afinidad para adsorber VOCs a bajas concentraciones constituyen los materiales idóneos en muchas ocasiones.

Tienen más alta capacidad de adsorción que el carbón activo.



Depuración de los vapores: zeolitas



Zeolite Adsorption System

Source: Munters Corporation 2005

Sistema típico de adsorción por zeolitas. Consta de un concentrador de zeolita rotatorio, dos intercambiadores de calor y un sistema catalítico opcional.



## Adsorción con polímeros

Depuración de los vapores: polímeros

Poliéster, plásticos y gomas

Mucho menos utilizados que el carbón pero más que las zeolitas

Adsorción no selectiva, aplicable a un amplio grupo de VOCs clorurados y no clorurados:

- hidrocarburos de las gasolinas (BTEX, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno)
- PCE,
- TCE,
- TCA,
- DCE,
- freones,
- tolueno,
- aldehidos, y
- disolventes oxigenados (acetonas, y alcoholes).

Son de diversa naturaleza: poliésteres, plásticos, gomas y cauchos.

Comportamiento similar al de las zeolitas, pero no son selectivos como eran aquellas.

Son mas caros pero no necesitan reemplazarse con tanta frecuencia.

Menos sensibles a la humedad y al fuego que el carbón.

Mas fácilmente regenerados que el carbón.

Menos utilizados que el carbón pero mas que las zeolitas.

En ocasiones los compuestos orgánicos recuperados pueden ser reciclados o reutilizados directamente.

Un aspecto muy interesantes es que las capas de resina pueden trabajar con corrientes de aire con humedades relativas tan altas como un 90%.

Las resinas se regeneran automáticamente con lo que se pueden reutilizar sin perder prácticamente capacidad de adsorción.

El sistema puede emplear distintos tipos de resinas sintéticas según la naturaleza de los contaminantes.

Admite entradas de aire de hasta 3000 m<sup>3</sup>/minuto.

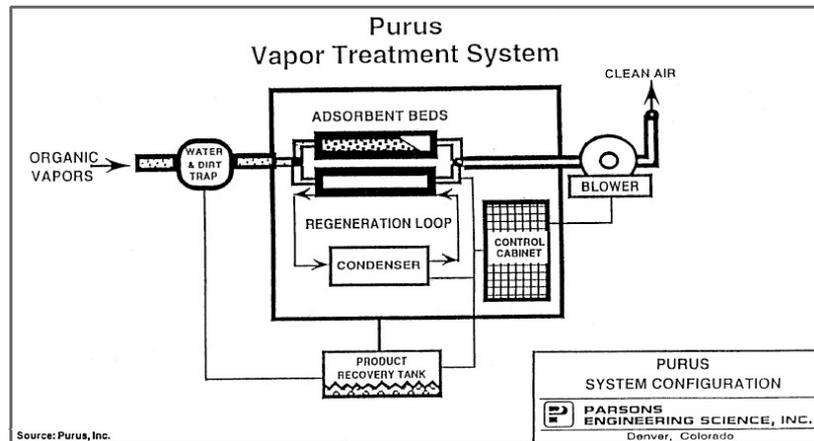


## Adsorción con polímeros

# Purus PADRE

Parsons Engineering Science

Existe un equipo comercial de buenos rendimientos para la depuración de gases, el equipo Purus Padre (EPP) de Parsons Engineering Science (USA).



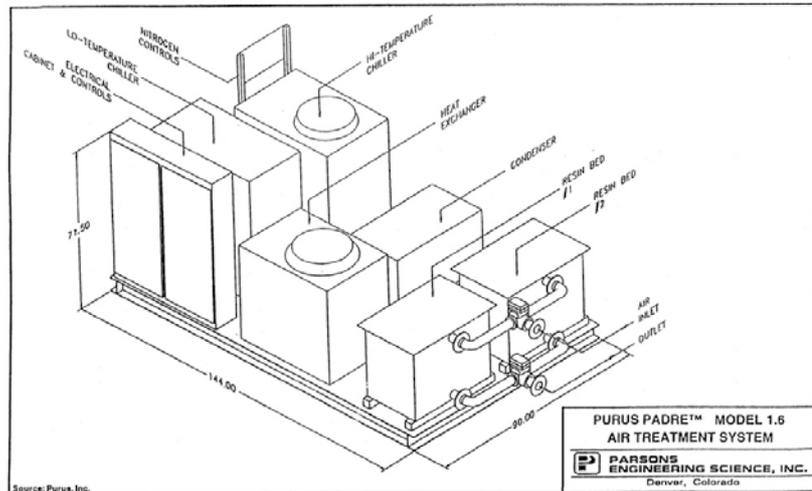
Los gases entran directamente en el equipo y mediante unas capas de resinas sintéticas se adsorben los contaminantes.

La, o las, capas de adsorción se cambian alternativamente a situación de desorción mediante un conmutador. La desorción se produce al inyectar un gas que transporta los contaminantes (frecuentemente nitrógeno) con control de la temperatura y presión. Los contaminantes orgánicos atrapados en la resina adsorbente son removidos, condensados y transferidos en forma líquida a un tanque de almacenamiento.

La condensación se realiza en una cámara con temperatura de 2°C para condensar el vapor de agua y otra a -45°C para los gases con bajos puntos de ebullición.



Depuración de vapores: polímeros Purus



Esquema detallado del equipo



### Purus PADRE. Demostración práctica

#### Fugas en una gasolinera

	Concentración Suelos sitio (mg/kg)
benceno	210
tolueno	2.000
etilbenceno	490
xileno	2.900
Total hidrocarburos petróleo y gasolinas	22.000

### DEMOSTRACION PRACTICA DEL EQUIPO.

En 1985 se detectó la existencia de fugas en los tanques de almacenamiento subterráneos y en el sistema de tuberías de distribución en un estación de servicio de carburantes (es decir, una gasolinera) rodeada de edificios. Los suelos resultaron encontrarse fuertemente contaminados en hidrocarburos del petróleo y en gasolinas. El agua subterránea también resultó contaminada.



## Purus PADRE. Demostración práctica

### Fugas en una gasolinera

	Concentración Suelos sitio (mg/kg)	Niveles Genéricos de Referencia. Uso industrial (mg/kg)
benceno	210	10*
tolueno	2.000	100*
etilbenceno	490	100*
xileno	2.900	100*
Total hidrocarburos petróleo y gasolinas	22.000	1.000**

\* Real Decreto 9/2005 (BOE 18/01/2005)

\*\* Nivel para la limpieza según Organismos Locales



## Purus PADRE. Demostración práctica

### Fugas en una gasolinera

	Concentración Suelos sitio (mg/kg)	Niveles Genéricos de Referencia. Uso industrial (mg/kg)	Número de veces que se supera el Nivel Genérico de Referencia***
benceno	210	10*	20
tolueno	2.000	100*	19
etilbenceno	490	100*	5
xileno	2.900	100*	28
Total hidrocarburos petróleo y gasolinas	22.000	1.000**	21

\* Real Decreto 9/2005 (BOE 18/01/2005)

\*\* Nivel para la limpieza según Organismos Locales

\*\*\* (concentración en el suelo - Nivel Genérico de Referencia) / Nivel Genérico de Referencia



## Purus PADRE. Demostración práctica

Suelo de textura areno limoso, permeabilidad alta

Contaminación 1 a 4 metros de profundidad

Nivel freático oscilación de 2 a 6 metros

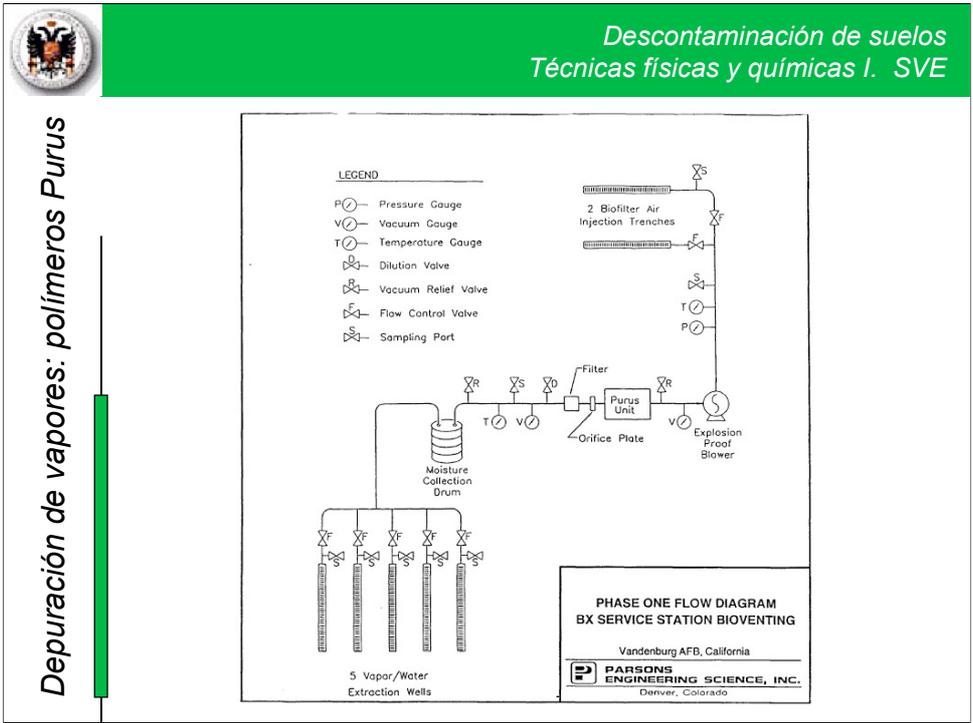
Operaciones de limpieza en dos fases

1ª Fase. Altas concentraciones. SVE + Purus Padre

Inyección en el suelo del gas tratado (biodegradación)

2ª Fase Bajas concentraciones <1.000 ppmv sólo SVE

Recirculación del gas en el suelo para su  
biodegradación



Depuración de vapores: polímeros Purus

Descontaminación de suelos  
Técnicas físicas y químicas I. SVE

Planificación del ensayo



Depuración de vapores: polímeros Purus

**Resultados del SVE**

**VAPOR EXTRACTION WELL SOIL GAS ANALYSES**

**BX SERVICE STATION VANDENBERG AFB**

Date	Vapor Extraction Well	Total Hydrocarbons	Percent Oxygen
1/5/94 pre startup	VEW 1	54,000	1.0
	VEW 2	9,000	2.0
	VEW 3	5,200	1.5
	VEW 4	8,000	0.0
	VEW 5	94	13.0
3/1/94 After 18 days of treatment	VEW 1	9,000	16.0
	VEW 2	3,600	20.2
	VEW 3	700	20.8
	VEW 4	580	20.5
	VEW 5	260	20.8
6/1/94 After 110 days of treatment	VEW 1	1,900	19.9
	VEW 2	1,600	18.9
	VEW 3	32	19.0
	VEW 4	56	11.8
	VEW 5	46	19.2

Intensidad de la extracción de vapores 0,5 a 1,5 m<sup>3</sup>/minuto

**RESULTADOS DEL SVE**

Concentraciones en el gas del suelo extraído.

Columna de oxígeno, representa la entrada de oxígeno del suelo circundante no contaminado al suelo contaminado para ocupar el espacio dejado por los contaminantes extraídos; además de servir como indicador de la efectividad de la limpieza mide la posibilidad de que los organismos actúen en la biodegradación.

Total hidrocarburos: 1/5/94, 76.290; 3/1/94, 14.140; 6/1/94 3.634



Descontaminación de suelos  
Técnicas físicas y químicas I. SVE

Depuración de vapores: polímeros Purus

Resultados de la depuración del gas por el Purus PADRE

PURUS PADRE® SYSTEM TREATMENT PERFORMANCE - HYDROCARBON REMOVAL EFFICIENCY BX SERVICE STATION, VANDENBERG AFB

Date	Purus Influent (ppmv)	Purus Effluent (ppmv)	Flow Rate	Extraction Well Source	Treatment Efficiency (percent)
Startup 2/11/94					
2/11/94	8,600	110	40 cfm	VEW 3 - 5	98.7
2/12/94	3,600	140	40 cfm	VEW 3 - 5	96.1
2/13/94	5,600	85	40 cfm	VEW 3 - 5	98.5
Benzene**	385	<.1			99.9%
2/14/94	18,600	80	40 cfm	VEW 1 - 5	99.6
2/15/94	6,400	110	40 cfm	VEW 3 - 5	98.3
Benzene	147	<.1			99.9%
2/17/94	5,600	80	20 cfm	VEW 1 - 5	98.6
2/18/94	<b>13,000</b>	<b>64</b>	20 cfm	VEW 1 - 5	99.5
Benzene	220	<.1			99.9%
3/2/94	<b>6,000</b>	<b>6.8</b>	20 cfm	VEW 1 - 5	99.9
Benzene	110	<.1			99.9%
3/21/94	<b>4,000</b>	<b>50</b>	20 cfm	VEW 1 - 5	98.8
Benzene	96	<.1			99.9%
3/30/94	<b>4,500</b>	<b>9.1</b>	20 cfm	VEW 1 - 5	99.8
4/14/94	<b>3,000</b>	<b>*430</b>	20 cfm	VEW 1, 2, 4	*85.7
Benzene	60	.14			99.8%
4/28/94	<b>3,700</b>	<b>30</b>	46 cfm	VEW 1, 2	99.2
5/24/94	<b>4,300</b>	<b>71</b>	49 cfm	VEW 1, 2	98.3
Benzene	35	<.01			99.9%

Values in boldface are EPA Method TO-3 data quantified as gasoline. All other values were measured with a GasTech TraceTector hydrocarbon meter calibrated to ambient air and 4,800 ppmv hexane.  
\* = Anomalous result - adsorption on a resin bed for twice normal period causing saturation of bed.  
\*\* = Benzene removal data for the sampling date above.  
VEW 1 - 5 are in order of contamination magnitude, with VEW 1 having highest contamination and VEW 5 the lowest.  
Hydrocarbon data were collected at random times during adsorption cycles. Therefore, the effluent concentrations may have varied from the measured values by up to a factor of 2 during each adsorption cycle.

## RESULTADOS DE LA DEPURACIÓN DE LOS VAPORES POR EL PURUS PADRE

Purus influent = gas a la entrada del Purus; Purus influent = gas depurado por el Purus (a la salida del equipo).

Eficacia de la limpieza por el Purus Padre, para hidrocarburos del 98%, para el benceno 99%.

Concentraciones de los gases de extraídos del suelo de 3.000 a 18.600 ppmv. A unos flujos de 20 a 49 scfm, es decir de 0,6 a 1,4 m<sup>3</sup> / minuto.

Purus Padre recupera aproximadamente 1.600kg de hidrocarburos y 265 litros de agua de los vapores extraídos durante un periodo de 110 días.



Depuración de vapores: polímeros Purus

### Costes

TABLE 2.2

**Purus PADRE® MODEL 1.6 VENDOR COST ESTIMATE**

Cost Item	Price
Purchase	\$132,500
Rental (monthly) (\$3,500 if over 12 months)	7,000
Operating Costs (monthly)	
electrical*	254
nitrogen gas**	487
Estimated Maintenance (monthly)	500

\* Excludes site blower and assumes \$0.06 per kilowatt hour.

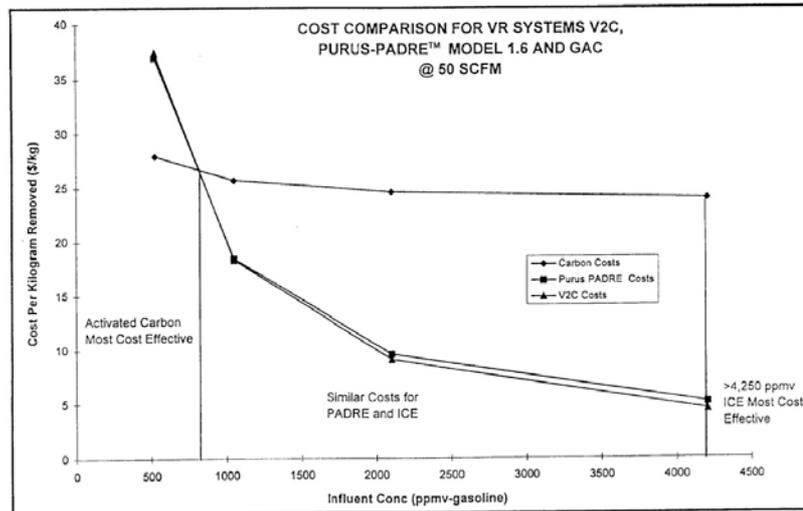
\*\* Assumes \$80 per liquid nitrogen dewar costs.

Coste unitario unos 23\$/kg de hidrocarburos extraídos.



Descontaminación de suelos  
Técnicas físicas y químicas I. SVE

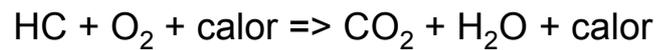
Depuración de vapores: polímeros Purus



Comparación de los costes con el Purus Padre frente a la adsorción por carbón.



## Oxidación térmica



donde

HC = hidrocarburos

O<sub>2</sub> = oxígeno atmosférico

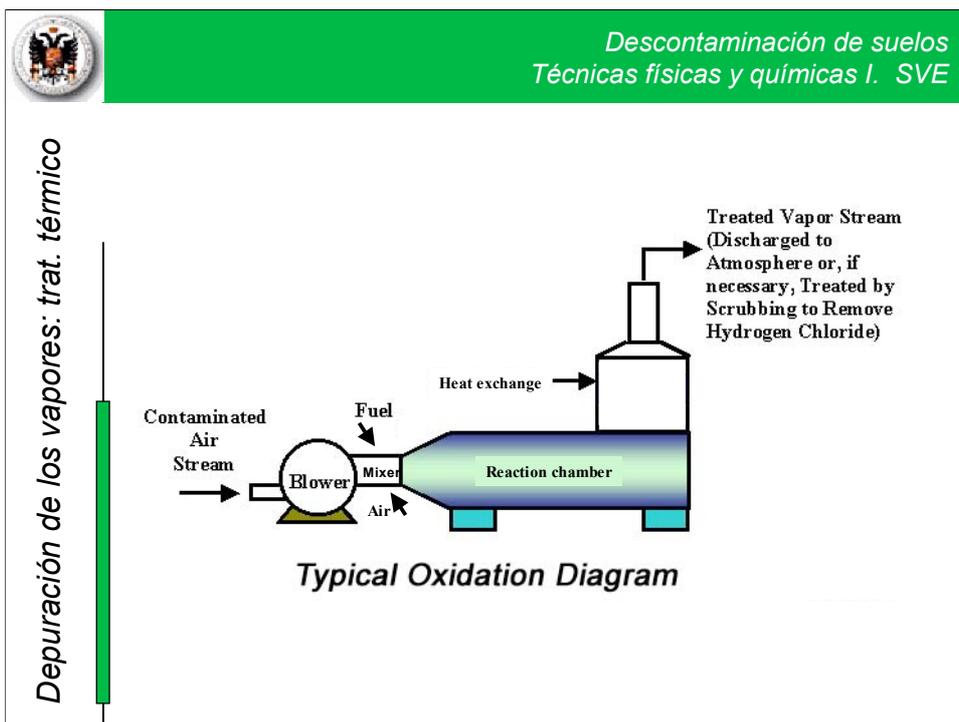
CO<sub>2</sub> = dióxido de carbono

H<sub>2</sub>O = agua

Combustión con transformación por oxidación mediante calor de los contaminantes hasta productos inorgánicos sencillos.

Procedimiento muy conocido y tradicionalmente usado en la industria de todo tipo (pinturas, farmacéutica, química, ...). Un revisión hecha por la EPA cuenta más de 6.000 equipos de oxidación térmica funcionando en el mundo en 1997 y de ellos el 20% lo eran en casos de remediación de suelos y aguas.

En un listado de la EPA en 2002 relaciona 170 sitios Superfund y encuentra que esta tecnología se uso en un 25% de los casos.



**PARTES DE UN SISTEMA DE OXIDACIÓN TÉRMICA.** Típicamente consta de una turbina para introducir los vapores en el equipo; un mezclador que posibilita le entrada de aire y fuels; el horno de combustión; un intercambiador de calor; y una salida directa a la atmósfera, o en ocasiones una conexión con otro sistema depurador (que puede ser otro segundo tratamiento de oxidación térmica).

Los VOCs pueden ser utilizados como combustibles. Si no hay bastantes VOCs se añaden carburantes; si hay demasiados se diluyen con una corriente de aire.

Los compuestos orgánicos son descompuestos a altas **temperaturas**, unos 1.000°C, pero el uso de catalizadores puede rebajar esta temperatura hasta los 300°C.

**EFICACIA.** Pueden oxidar del 95 al 99% de los VOCs.

Este sistema es válido para VOCs no halogenados (también SVOCs) y fuel, alcoholes, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, ésteres y quetonas.

La cámara de combustión tiene una capacidad calorífica de 0,5 a 2 millones BTUs por hora.

Las temperaturas de trabajo varían entre 760 y 870°C

El tiempo de residencia es de 0,5 segundos.

La unidad BTUs es una unidad inglesa que representa la energía necesaria para elevar la temperatura en un grado F a una libra (0,45 kg) de agua.

Si a la salida del equipo existe sulfuros o compuestos halogenados o con alta carga de partículas en la emisión de gas final, no se puede soltar a la atmósfera y se ha de pasar por los adecuados sistemas de depuración ya descritos anteriormente en el sistema SVE.

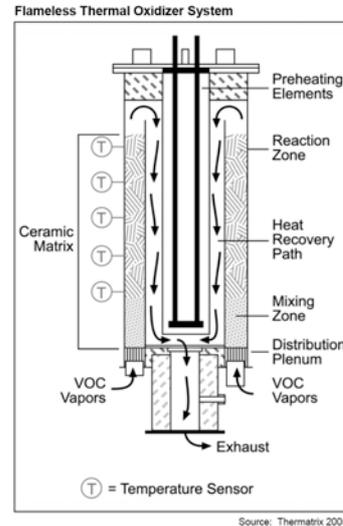
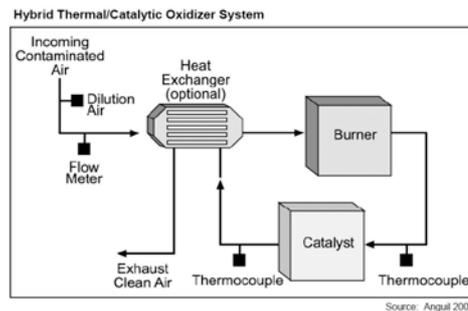
**LIMITACIONES.** Altos costes. Varían desde \$25,000 para una unidad de 20 m<sup>3</sup>/minuto hasta \$200,000 para otra de 200 m<sup>3</sup>/m. El consumo energético de propano, operando de 10 a 20m<sup>3</sup>/m puede oscilar entre 8\$ a 15\$ por día y de 20\$ a 49\$ por día de electricidad.



Depuración de los vapores: trat. térmico

Tres tipos de equipos

- De llama directa
- Sin llama
- Catalítico



Cada tipo actúa de diferente manera para destruir los contaminantes por oxidación (combustión).

Para concentraciones altas de VOCs se usan los dos sistemas no catalíticos: Los 650 a 1.000°C necesarios se pueden conseguir con las altas concentraciones de VOCs sin requerir combustibles adicionales, mientras que las bajas se tratan con el sistema catalítico, ya que para la temperatura requerida por este equipo (250 a 500°C) no se necesita quemar grandes cantidades de combustibles.

Los VOCs halogenados suelen producir gases ácidos que hay que tratar posteriormente para neutralizarlos.

Eficacia del sistema regulada por las tres T: temperatura, Tiempo de residencia y turbulencia.

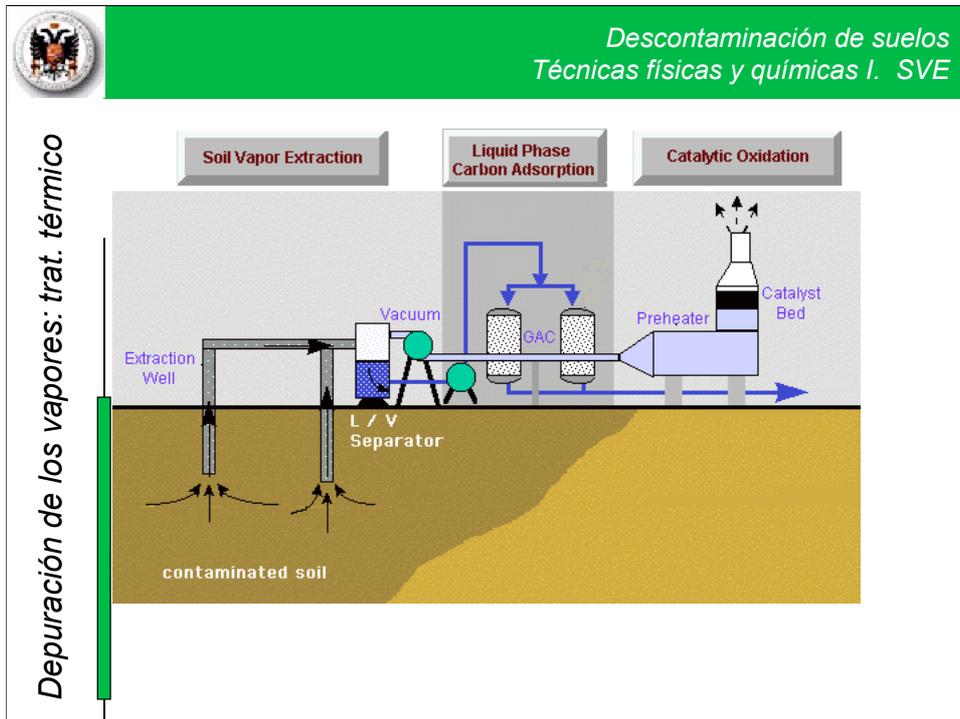
**OXIDACIÓN MEDIANTE LLAMA DIRECTA.** Los gases con los contaminantes entran en una cámara y son quemados a altas temperaturas, 1.000° C mediante un mechero.

**SIN LLAMA** utiliza una cámara cerámica que es calentada por un equipo eléctrico. Los vapores contaminados se hacen circular por estas paredes cerámicas calientes.

**EN EL SISTEMA CATALÍTICO** utiliza un catalizador para conseguir la oxidación de los contaminantes a bajas temperaturas (250-500°C). Los catalizadores más frecuentes son metales nobles como platino, paladio y rubidio. El gas a tratar se precalienta y se hace pasar por unas placas de catalizador produciéndose unas reacciones exotérmicas que producen la oxidación de los contaminantes.

El sistema catalítico al trabajar a temperaturas más bajas resulta más económico.

Como las características del gas extraído en un sistema SVE varía con el tiempo resulta adecuado utilizar distintos sistemas de oxidación térmica en las distintas fases del proceso.



También es frecuente alternar diversos sistemas de depuración de los vapores, como por ejemplo utilizar en primer lugar una adsorción por carbón y a continuación un sistema térmico.



## Máquina de combustión interna

(internal combustion engine = ICE)



Source: RSI 2005

La ICE es una máquina que destruye los gases del equipo SVE al utilizarlos como combustible interno. Los gases se introducen en el carburador de un motor similar al los automóviles y se queman.

Se utiliza para eliminar los VOCs y si su concentración no es suficiente se suplementa el gas contaminado con combustibles tipo diesel o gas natural o butano y propano. En este sistema a la vez que se destruyen los gases se produce energía que puede ser utilizada para producir vacío mediante un sistema interno o para suministrar la energía a una bomba de vacío externa de manera que el equipo es autosuficiente y no necesita de una fuente de energía eléctrica externa.

Los equipos comerciales están diseñados para trabajar con intensidades de flujos de 2 a 14 m<sup>3</sup>/min y producen vacíos de hasta 46 cm Hg.

Este sistema resulta ideal para sitios contaminados con petróleos, con altas concentraciones. Se obtiene una alta eficacia con los VOCs pero no va bien con los VOCs halogenados.

Para depurar los gases tratados se puede usar un sistema de depuración catalítica estándar para automóviles.

La idoneidad de este sistema depende de los tipos de VOCs presentes, de sus concentraciones y de la permeabilidad del suelo. La ICE es mas efectiva para concentraciones altas (típicamente superiores a los 3.000 ppmv) y deja de ser utilizables para concentraciones mas bajas de 1.000 ppmv. Válida para concentraciones mas altas que las de los motores normales de los coches (por encima del limite LEL, del 1% de gasolina en aire e incluso mas alla del limite explosivo de ULE del 7 al 8% de gasolina en aire). Las concentraciones ideales para un mantenimiento del equipo sin aportes externos son del orden de 30.000 ppmv

Se alcanzan eficacias del 90 al 98%.

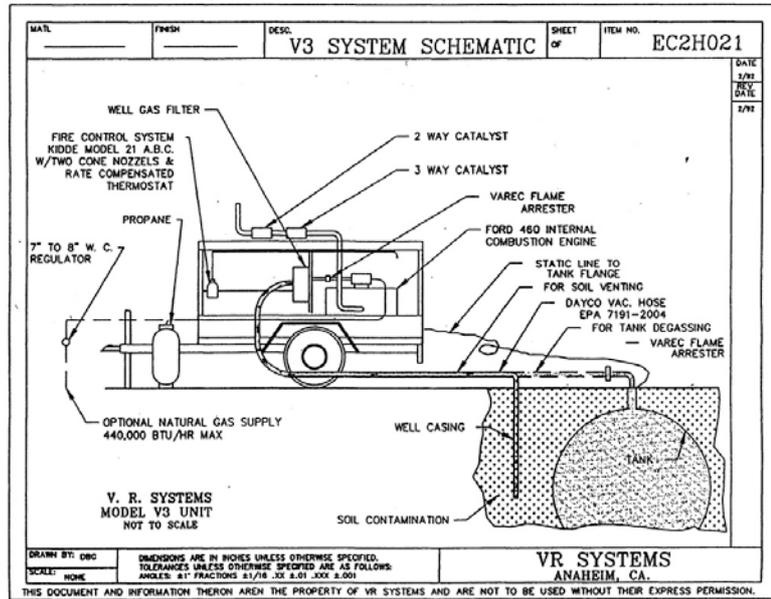
Limitaciones. La humedad relativa ha de ser menor del 95%, para evitar condensaciones. La combustión de los VOCs produce gases corrosivos que pueden destruir los componentes de la maquina.

En el listado de la EPA de sitios SUPERFUND desde 1982 a 2002 se encuentra que este sistema ICE ha sido seleccionado para el tratamiento de vapores del SVE en el 1% de los casos.



Descontaminación de suelos  
Técnicas físicas y químicas I. SVE

Depuración de los vapores: trat. térmico



ICE: extracción y destrucción de vapores de los contaminantes de un sistema SVE en una sola maquina.



## Descontaminación de suelos Técnicas físicas y químicas I. SVE

Depuración de los vapores: trat. térmico

### MANUFACTURER PERFORMANCE SPECIFICATIONS FOR VR SYSTEMS MODELS V2C, V3, AND V4 VAPOR EXTRACTION/INTERNAL COMBUSTION ENGINE EVALUATION PATRICK AFB, FLORIDA

Feature	V2C	V3	V4
Max. Hydrocarbon Destruction Rate	15 lbs/hr	55 lbs/hr	110 lbs/hr
Destruction Efficiency for TVH/BTEX <sup>a/</sup>	>99%	>99%	>99%
Engine Size in Cubic Inch Displacement	140	460	920 (2 x 460)
Max. Flow Rate in Cubic Feet/Min	65	250	500
Max. Vacuum in Inches of Mercury/Approx. Inches of Water	18/245	18/245	18/245
Required Soil Gas Hydrocarbon concentration (ppmv as gasoline) <sup>b/</sup>	40,000	40,000	40,000

<sup>a/</sup> TVH = total volatile hydrocarbons; BTEX = benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes.

<sup>b/</sup> The influent vapor concentration in ppmv = parts per million, volume per volume required to sustain >99% destruction efficiency without the addition of supplemental fuel (propane or natural gas).

Tipos de máquinas comerciales ICE y sus características



## Descontaminación de suelos Técnicas físicas y químicas I. SVE

Depuración de los vapores: trat. térmico

### CAPITAL AND OPERATING COSTS (2/15/94) VAPOR EXTRACTION/INTERNAL COMBUSTION ENGINE EVALUATION PATRICK AFB, FLORIDA

Cost Item	V2C	V3	V4
Purchase	\$40,450.00	\$73,450.00	98,880.00
Rental (Monthly)	\$3,480.00	\$6,235.00	\$8,923.00
Mobilization/Demobilization 500 miles from vendor via commercial carrier	\$1,000.00	\$1,000.00	\$1,400.00
Daily Maximum Supplemental Fuel Costs (Approx.)@ 2,000-rpm Engine Speed (Assumes all BTUs are supplied by supplemental fuel - propane at \$0.80/gal.)	\$20.00	\$70.00	\$140.00
Monthly Service Maintenance <sup>a/</sup> (Approximate as of 2/16/94)	\$220.00	\$220.00	\$374.00
Miscellaneous Services/Equipment <sup>b/</sup> (As required as of 2/16/94)			

- <sup>a/</sup> Monthly service estimates include: engine oil, oil filters, air filter(s), spark plugs, well gas filter(s), and labor (performed by a VR Systems trained technician).
- <sup>b/</sup> Additional labor and equipment pricing as required may include:
- Maintenance Labor @ \$45/hr.
  - Travel time @ \$30.00/hr.
  - Mileage (first 20 miles free) @ \$0.28/mi.
  - Long Distance (requiring air travel), air fare plus per diem
- Additional equipment not included in the monthly service, will be installed only as required are:
- Computer air cleaner @\$7.22/each
  - Distributor cap @ \$23.75/each
  - Spark plug wires @\$63.00/set
  - Rotor @ \$3.82/each
- Note: All materials shown are at retail cost, and can be purchased in bulk for generally 40 to 50% less.

Costes iniciales y de mantenimiento de las máquinas ICE



## Máquina de combustión interna

(internal combustion engine = ICE)

### Demostración práctica

**Modelo probado:** V3 de VR Systems, Anaheim, California USA

**Parcela experimental:** Gasolinera Patrick AFB, Florida at the BX Service Station.

**Contaminantes del suelo:** de 38.000 a 100.000 ppmv de hidrocarburos volátiles totales (TVH) procedentes de fugas de tanques enterrados de gasolina sin plomo.

**Técnica de descontaminación:** arrastre de vapores por vacío (SVE) acoplado a ICE como fase previa al bioventing.

**Duración del tratamiento** SVE + ICE: 3 meses, octubre a diciembre de 1993.

La concentración inicial de hidrocarburos era demasiado alta para instalar el proceso "Bioventing" (degradación de los contaminantes por los organismos) se redujo mediante la ICE y luego en una segunda fase se pasó al bioventing.



Depuración de los vapores: trat. térmico

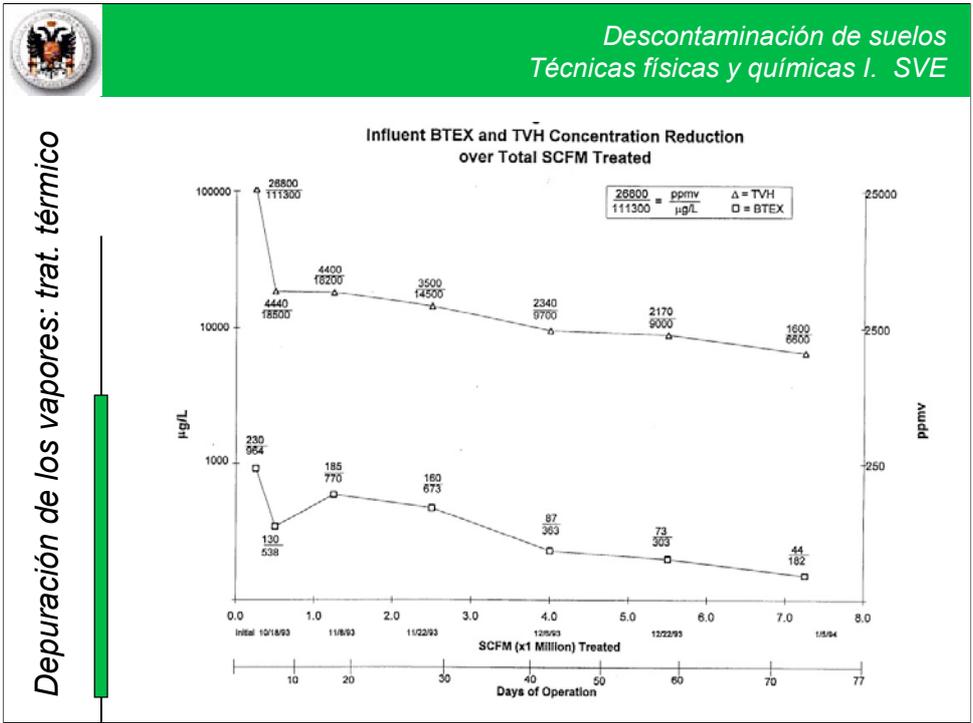
**CHANGE IN INFLUENT CONCENTRATIONS FOR TVH  
AND BTEX OVER TIME @ 150 SCFM  
VAPOR EXTRACTION/INTERNAL COMBUSTION ENGINE  
EVALUATION  
PATRICK AFB, FLORIDA**

Influent Constituent	Concentrations	
	Initial (ppmv)	After 2-Days (ppmv)
TVH	26,800	4,400
Benzene	-- <sup>n/</sup>	-- <sup>n/</sup>
Toluene	15	4.7
Ethylbenzene	14	12
Xylenes	200	110

<sup>n/</sup> Below Detection Limit.

Resultados iniciales y a los dos días de tratamiento a 150 SCFM (4,3 m<sup>3</sup>/m) SCFM = square cubic feet per minute

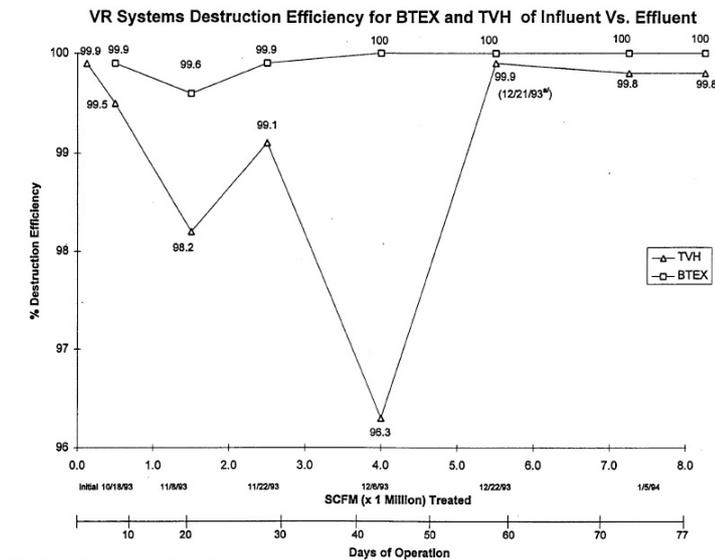
hidrocarburos volátiles totales (TVH)



Esta figura muestra las concentraciones de BTEX (curva inferior) y TVH (total de hidrocarburos; curva superior) (los valores BTEX y TVH se representan en el numerador) sobre el total de gas tratado (square cubic feet per minute; representados en el denominador) tratados en diferentes periodos.



Depuración de los vapores: trat. térmico



\* NOTE: 12/21/93 Replaced VR Systems Unit With Upgraded V3 Model.

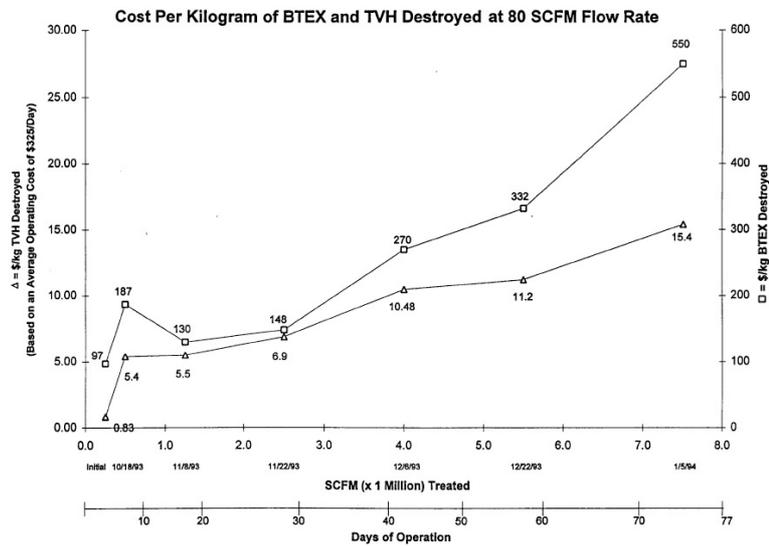
Eficacia de destrucción del sistema para BTEX y TVH a lo largo de la experiencia.

BTEX siempre con una eficacia superior al 99,6. Para el TVH la eficacia bajó al 96,3%. Pero este valor representó un desgaste de los anillos en determinadas válvulas que cuando fueron repuestos el sistema ganó eficacia alcanzando hasta el 99,9%.

SCFM = square cubic feet per minute



Depuración de los vapores: trat. térmico

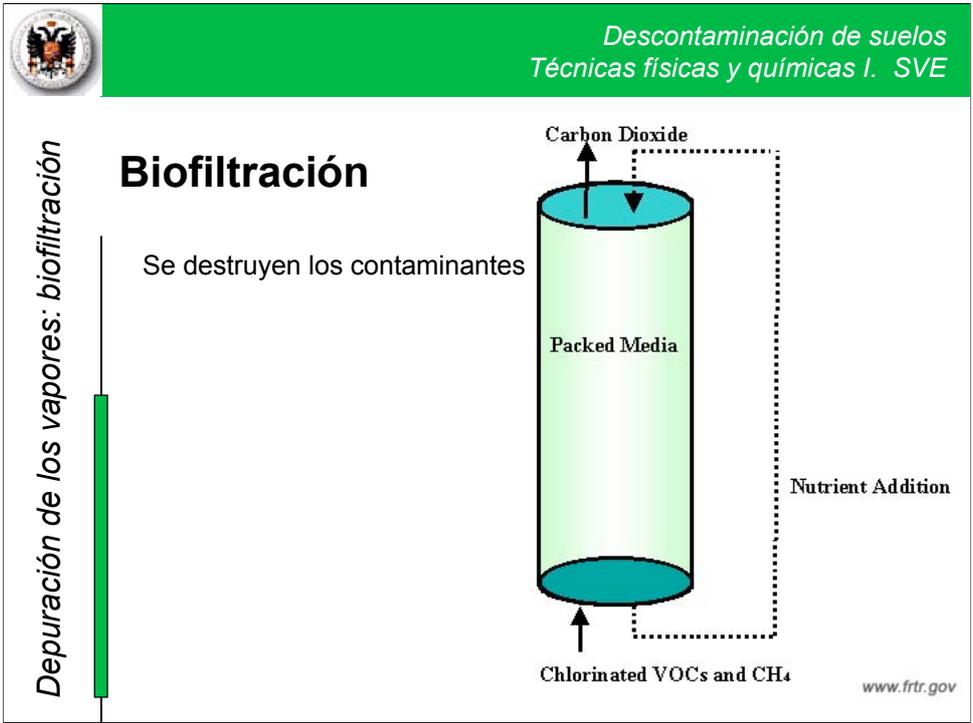


En esta figura se muestran los costes por kilogramo de BTEX y TVH destruidos a lo largo de la experiencia.

Los costes para el TVH varía desde 0,83 \$/kg a los 15,4 \$/kg del final de la experiencia.

Para el BTEX los costes fueron de los 97\$/kg de los momentos iniciales a los 550 \$/kg en la última fase.

80 scfm = 2,3 m<sup>3</sup>/m; 150 scfm = 4,3 m<sup>3</sup>/m; 1 cubic feet = 28,3 litros. SCFM = square cubic feet per minute



Degradación de los contaminantes por microorganismos.  
Descomposición de los VOCs a productos sencillos, a compuestos inertes, como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

Se hace pasar la corriente de gas contaminado a través de una o más vasijas conteniendo las camas de microorganismos.

Los recipientes tienen un tamaño variable, generalmente de 1 a 3 metros de largo.



*Descontaminación de suelos  
Técnicas físicas y químicas I. SVE*

**Depuración de los vapores: biofiltración**

- ❑ **Aplicaciones y Ventajas**
  - Ideal para bajas concentraciones <1.500 ppmv y flujos de 0,5 1,5 m<sup>3</sup>/m
  - Muy adecuado para los VOCs
  - Destruye los contaminantes.
  - De bajo coste y altamente efectiva.
  - Bio-filtros mantiene constantemente su poder
- ❑ **Inconvenientes**
  - Sensible a variaciones de: H, T<sup>a</sup>, pH y nivel de nutrientes.
  - No adecuados para los VOCs halogenados (PCE y TCE).
  - No válido para medias y altas concentraciones (>5.000ppmv).
  - Necesita un periodo de aclimatación (unos 30 días).
- ❑ **Costes.** Varían entre \$5 y \$10 por kg.

Biodegradables por los biofiltros VOCs no halogenados e hidrocarburos del petróleo; hidrocarburos alifáticos del petróleo y compuestos aromáticos tales como hidrocarburos mono-aromáticos, alcoholes, aldehidos y cetonas, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno.

Bio-filtros mantiene constantemente su poder de degradación, ni se entrapan ni se saturan con el tiempo y no requieren regeneración.

### **Inconvenientes**

- sensible a variaciones de: humedad, temperatura, pH y nivel de nutrientes.

- aunque idóneos para los VOCs no halogenados y los hidrocarburos del petróleo, no ofrecen buenos resultados para los VOCs halogenados, tales como PCE y TCE.

Muy utilizados en Europa y Japón se están introduciendo en USA



### RESUMEN

La selección del tratamiento más adecuado depende de varios factores:

- Tipos de contaminantes
- Concentraciones

#### Generalized Volatile Organic Compound Influent Concentration Ranges for Commercially Available Technologies

Technology	Influent Volatile Organic Compound Concentration (ppmv)
Carbon Adsorption	<5,000
Thermal Oxidation	100 – 4,000
Biofiltration	<1,000

ppmv = Part per million by volume

Source: USACE 2002

- Intensidad del flujo
- Duración del tratamiento
- Calidad de la emisión de gases



## Descontaminación de suelos Técnicas físicas y químicas I. SVE

Depuración de los vapores

Evaluation Factors for Thermal Oxidation and Carbon Adsorption Technology Selection

Factor	Thermal Oxidation	Carbon Adsorption
Concentration	More commonly used for higher contaminant concentrations (> 500 ppmv); treatment costs per pound of contaminant decrease as VOC concentrations increase because less supplemental energy is required per pound removed	More frequently used for dilute vapor concentrations (< 1,000 ppmv); treatment costs per pound of contaminant tend to stay same or increase as concentration of vapors increase because carbon replacement frequency increases
O&M requirements	Tends to require more labor and more skilled labor to operate because of safety considerations	Tends to be simpler and less labor-intensive to operate and maintain unless vapor-phase concentrations are high and "breakthrough" occurs frequently
Safety	More safeguards necessary if it is possible for off-gases to reach high concentrations (significant fractions of the lower explosive limits of the contaminants in the vapor); formation of dioxins and furans is possible if not properly operated	Tends to be very safe under most conditions; however, high levels of ketones or similar compounds may pose a fire hazard
Chlorinated vs. non-chlorinated VOCs	Less commonly used for chlorinated VOCs because of formation of hydrochloric acid during vapor combustion, which requires special acid-resistant materials for piping and equipment after combustion chamber	Equally applicable to chlorinated and non-chlorinated VOCs; acid formation not typically an issue
Variety of compounds that can be treated	Except for acid formation during combustion of chlorinated VOCs, wide variety of compounds can be treated	Not all compounds adsorb well to activated carbon (depends on sorptive capacity); some common compounds (such as vinyl chloride) not readily treated; therefore, each compound in off-gas must be considered
Capital vs. O&M costs	Equipment significantly more expensive to purchase than carbon units; however, at high VOC concentrations, O&M costs lower than carbon units	Capital costs fairly low, O&M costs proportional to off-gas flow rates and vapor concentrations

Notes:

O&M = Operation and maintenance  
ppmv = Part per million by volume  
VOC = Volatile organic compound

La adsorción por carbón y la oxidación térmica son las dos tecnologías más utilizadas en los sistemas SVE.

Son dos tecnologías muy robustas que han demostrado su eficacia con un amplio abanico de contaminantes y concentraciones.

En esta tabla se resumen los criterios para la selección de una u otra.

El utilizar una u otra es cuestión de costes y consideraciones operativas. En líneas generales para concentraciones bajas la adsorción por carbón es el método más barato y el que ofrece una más alta eficacia.

Un procedimiento que da óptimos resultados es acoplar ambos métodos. La oxidación térmica se utiliza en las fases iniciales cuando las concentraciones son más elevadas y luego cuando decrecen las concentraciones se sustituye la oxidación térmica por la adsorción por carbón.



## Resumen

### Arrastre de vapores

- Por inyección de aire
- Mediante vacío (SVE)

### Depuradores de gases

- ⊙ Por adsorción
  - carbón activo
  - zeolitas
  - polímeros sintéticos (Purus Padre)
- ⊙ Oxidación térmica
  - Oxidadores de llama directa
  - Oxidadores sin llama
  - Oxidadores catalíticos
- ⊙ Biofiltración



**Casos prácticos**

