



Organización Techint



Ecoeficiencia en remediación de subsuelo por extracción por alto vacío

Actividades de Consultoría Ambiental y Remediación de SYUSA

Desde 1994, **Saneamiento y Urbanización S.A. (SYUSA)** ha participado en numerosos proyectos de Remediación de áreas contaminadas, Análisis de Riesgo, Evaluaciones de Impacto Ambiental, Diagnósticos de Estado Ambiental Base, Diseño y Seguimiento de Sistemas de Gestión Ambiental (s/ ISO 14001), Auditorías Ambientales, Diseño y Operación de Sistemas de Gestión Integral de Residuos Sólidos, Optimización de Procesos Industriales, Evaluación de Pasivos Ambientales (Due Dilligence), etc.

ESTUDIO DE CASO:

Eco-Eficiencia en sistemas de Remediación

El presente artículo desarrolla una metodología de aplicación de **Indices de Eco-Eficiencia** a distintas alternativas de remediación de subsuelos contaminados con hidrocarburos (napa freática, suelos y gases ocluidos en suelos), ilustrándose dicha metodología a través del análisis comparativo aplicado a un caso real de contaminación por pérdida de estanqueidad de tanques soterrados de una Estación de Servicio.

Para el desarrollo de Indices de Eco-Eficiencia, basados en la protección ambiental y de



la salud humana, se consideraron los siguientes factores:

- ▶ **Precio** competitivo para el desarrollo del Proyecto.
- ▶ Reducción del **Consumo de energía** de los bienes y servicios.
- ▶ Reducción del **Consumo de insumos** de los bienes y servicios (incluyendo recursos no renovables, como el Agua).
- ▶ Reducción de la **Dispersión de Contaminantes** (incluido gestión de residuos, efluentes y emisiones de gases de invernadero).
- ▶ Mejora de la **Reciclabilidad** de los materiales.
- ▶ Extensión de la **Durabilidad** de los productos (bienes y servicios).

Cada caso de Remediación es único en lo que respecta a las características del sitio (físicas, actividades productivas, comunidad vecina, infraestructura, servicios, etc.), y en cuanto al alcance de la contaminación: medios afectados, parámetros

y valores de los mismos. La energía insumida, consumo de bienes y servicios, riesgos e interferencias asociadas, son particulares no sólo de lo anterior, sino también del sistema de descontaminación que se aplique. En este sentido, los Índices de Eco-Eficiencia permiten facilitar la toma de decisiones respecto de la alternativa de mayor Eco-Eficiencia, en casos específicos de contaminación sobre los que se evalúan diversas alternativas de remediación.

Índices de Eco-Eficiencia de Proyectos de Remediación

El primer índice considerado es el de Eco-Eficiencia de Remediación ($EcoEf_{REM}$). Surge del cociente entre el total de Hidrocarburos removidos (HC_{REM}), estimados a partir de estudios previos, registro de resultados operativos y seguimiento de muestreo, y el costo industrial incurrido (C_{IND}), desglosado éste en los componentes que hacen a la Eco-Eficiencia (ver Ec. 2).

Ec. 1

$$EcoEf_{REM} = \frac{HC_{REM}}{C_{IND}}$$

Ec. 2

con

$$C_{IND} = H_2O + \xi + INS + EFL + AIR + RES + C_{AMB}$$



H ₂ O	Costos resultantes del consumo de agua.
ξ	Costos resultantes del consumo energético.
INS	Costos por consumo de insumos / servicios subcontratados.
EFL	Costos necesarios para tratamiento de efluentes líquidos hasta límites de vertido aceptables por legislación.
AIR	Costos de tratamiento de efluentes gaseosos hasta límites normativos.
RES	Costos de gestión de residuos sólidos/semisólidos en el marco normativo.
C _{AMB}	Compensación ante eventual detrimento ambiental / socioeconómico - Pérdidas económicas / compensación de impactos ocasionados al medio físico y social por las tareas de remediación. Este factor presenta una alta incertidumbre.

Como puede verse, el índice **Eco-Ef_{REM}** se basa en la transformación de diferentes parámetros en costos económicos, tal de generar unidades compatibles y comparables entre sí a partir de factores diversos.

El segundo Índice considerado es la **Eco-Eficiencia Operativa** (Eco-Ef_{OP}), que combina la eficiencia de remoción de hi-

drocarburos (E remoc.), medida como cantidad de HC removidos respecto al total presente en el sitio, y la eficiencia de recuperación (E recup.) y reinserción al proceso productivo de hidrocarburos sobrenadantes, lo que representa un ahorro económico, energético y ambiental por el reciclaje del producto.

Ec.3

$$E(\text{remoción}) = \frac{HC_{\text{REM}}}{HC_{\text{TOT}}} \times 100$$

Ec.4

$$E(\text{recup.}) = \frac{HC_{\text{REC}}}{HC_{\text{TOT}}} \times 100$$

Ec.5

$$EcoEf_{\text{OP}} = \sqrt{\frac{HC_{\text{REM}} \times HC_{\text{REC}}}{(HC_{\text{TOT}})^2}} \times 100$$



Cálculo Comparativo de Eco-Eficiencia de 4 Alternativas de Remediación

Se evaluó la Eco-Eficiencia de diversas alternativas de Remediación analizadas para un caso de contaminación de aguas freáticas y suelos, incluyendo gases ocluidos, en una Estación de Servicio. La napa freática presentaba niveles de hasta 35.000 ppm y espesores sobrenadantes de entre 1 y 120 mm; y 8.000 ppm de HTP en suelos, hasta 5 m de profundidad. La contaminación provenía de cortes livianos (naftas). La presencia de cámaras subterráneas confería riesgo de explosión.

Para facilitar el análisis, se procedió a estandarizar los datos de cantidades de HC removidos y recuperados, y a costos industriales, asignándose un valor de 100 a la cantidad total de HC y un valor equivalente al costo industrial total (incurrido o presupuestado) mayor de entre las cuatro alternativas, relativizándose los valores parciales correspondientes.

Las alternativas analizadas son explicitadas en los puntos a continuación, consignándose los valores relativos a cada una de ellas y los Índices de Eco-Eficiencia correspondientes, en la siguiente *Tabla Comparativa*:

PARAMETRO	ALT. 1	ALT 2	ALT 3	ALT 4
Descripción	Sistema de Bombas Unitarias e inyección de solución arrastre	Sist. de Bombas Unitarias, Remoc. Sobrenadante y Remoción Suelo	Sist. de Bombas Unitarias + Tratamiento in-situ de suelos	Sistema de Extracción por Alto Vacío (EAV)
HC TOT (*)	100	100	100	100
HC REM	50	90	23	95
HC REC	10	12	5	18
E (remoción)	50 %	90 %	23 %	95 %
E (recuperación)	10 %	12%	5 %	18 %
E (operativa)	22 %	33%	11 %	41 %
H ₂ O	2	0	5	0
ξ	6	20	11	5
INS	14	30	17	8
EFL	8	5	11	3
AIR	0	0	0	2
RES	2	20	3	1
C AMB	3	25	7	1
C IND (**)	35	100	55	20
E (remediación)	1,43	0,90	0,42	4,75



ALT. 1 - Remediación mediante un Sistema de bombas unitarias

Comprende un sistema de bombeo desde cuatro pozos independientes y tratamiento in situ de los efluentes generados mediante un sistema de separación de hidrocarburos sobrenadantes por placas coalescentes, burbujeo (*air stripping*) y reactor de carbón activado para la corriente emergente, previo al vertido. Adicionalmente, con la finalidad de cumplir el objetivo de descontaminación de suelos, se previó un sistema de inyección de una solución de arrastre de hidrocarburos a través de la matriz de suelo.

El análisis efectuado determinó que este sistema es **inviable**, desde el punto de vista de Eco-Eficiencia, en virtud de las siguientes consideraciones:

- ▶ Elevado costo industrial por el bajo rendimiento y eficiencia de la remediación, involucrando excesivos tiempos de operación.
- ▶ No permite el cumplimiento de los objetivos de remediación para gases ocluidos.
- ▶ No presenta una óptima capacidad para captación y recuperación de producto libre sobrenadante, lo que se ve reflejado en un bajo índice de recuperación.
- ▶ El bombeo de la solución de arrastre presenta dificultades operativas sensibles (pozos e infraestructura de bombeo), con gran consumo de energía y costos por el tratamiento del efluente. A su vez, implica un abundante consumo de agua.
- ▶ La generación de residuos especiales (ej: carbón activado impregnado con HC) es elevada.
- ▶ Existe mayor riesgo de dispersión de contaminantes asociada al balance inyección/extracción, y al tiempo operativo insumido.
- ▶ El costo por compensación ambiental resultante de las limitaciones operativas determinadas por el bombeo y el tiempo de operación es elevado, ya que entorpece la movilidad y condiciones operativas de la Estación de Servicio.
- ▶ Las condiciones de seguridad son delicadas, debiendo segarse las cámaras subterráneas y monitorearse exhaustivamente VOCs.



ALT. 2 - Sistema de Remediación por Bombas Unitarias, remoción de Sobrenadante y Remoción / Reemplazo de Suelos

Es igual a la Alt. 1, con adición de un sistema de "skimmers" de remoción de hidrocarburos sobrenadantes, frentes de remoción de suelos contaminados para tratamiento ex-situ en el marco de la normativa ambiental vigente, e incorporación de suelos limpios. Se consideraron dos alternativas de tratamiento: incineración y land-farming. Se concluyó que esta alternativa es **inviable** desde el punto de vista de Eco-Eficiencia, debido a los puntos siguientes:

- ▶ Si bien la eficiencia de la remediación será completa, el costo industrial para lograrla es muy elevado, no sólo en cuanto a los términos tangibles (insumos, energía, gestión de residuos –transporte, tratamiento, disposición–, etc.) sino también en lo que respecta al costo ambiental, resultando una fuerte limitación en la operatividad de la Estación de Servicio por clausura de áreas o de toda la E/S, rotura de pavimento, movimiento de suelos, tránsito de camiones (para egreso del residuo peligroso resul-

tante de los suelos contaminados, e ingreso de suelos de reemplazo).

- ▶ El sistema genera grandes volúmenes de suelos a tratar, elevándose el costo industrial (en mayor medida para el segundo caso). Implica, por último, el aporte de suelos limpios, lo que resulta en la explotación de un recurso no renovable e incremento del costo.
- ▶ El tratamiento de las aguas freáticas importa consideraciones similares al caso anterior, aunque de menor intensidad.
- ▶ El sistema ofrece óptima reinserción de HC sobrenadantes a la cadena productiva.
- ▶ En cuanto a emisiones al aire, la remoción de suelos liberará importantes cantidades de VOCs, generando además olores y riesgo de incendio.
- ▶ El costo por lucro cesante y molestias ocasionadas a la comunidad es excesivo.

ALT. 3 - Sistema de Remediación por Estabilización in-situ de Suelos

Comprende la estabilización de los contaminantes presentes en el sitio, mediante el



confinamiento de los contaminantes en la matriz de suelos, esto es, la pérdida de la capacidad de dispersión / lixiviación, compatible con los objetivos ambientales.

El sistema requiere la extracción y tratamiento de aguas freáticas y extracción de sobrenadante, tanto sea en virtud de los objetivos de remediación como porque éstos perjudican la estabilización físico-química. Luego se procede a la etapa de inyección de una solución específica (matriz suelo-contaminante) para la inertización in situ.

Las sustancias contaminantes quedan fijadas químicamente a la matriz de suelo, con lo cual la contaminación queda remanente en el mismo sitio y se controla mediante ensayos de lixiviación, la no afectación a otros medios físicos adyacentes. En cuanto a las aguas freáticas, las mismas son remediadas en forma parcial, algo menor a lo visto para la Alt. 1.

- ▶ Si bien los objetivos de remediación son susceptibles de ser cumplidos, este sistema presenta una baja Eco-Eficiencia, por la razón de que los índices consideran la tasa de remoción de HC, la cual es baja (los HC permanecen en el sitio). Si consideramos que la pérdida

de potencial de afectación es equiparable a la remoción de los contaminantes, la Eco-Eficiencia mejora sustancialmente.

- ▶ El sistema presenta limitaciones operativas en la Estación de Servicio (rotura parcial de pavimento; presencia de equipos de inyección, etc.).
- ▶ Se trata de un sistema con altos costos industriales.

ALT. 4 - Sistema de Remediación por Extracción por Alto Vacío (EAV)

El Sistema de Remediación de Extracción por Alto Vacío (EAV) permite la remoción de hidrocarburos contaminantes presentes en suelos, napa freática y arrastre de gases ocluidos en suelos, óptimo para permeabilidades moderadas a bajas: 10^{-3} a 10^{-5} , para el ulterior tratamiento in situ de dichos componentes mediante la oxidación catalítica de los hidrocarburos. El sistema logra los requerimientos normativos de descarga de efluentes líquidos y emisiones a la atmósfera, como así también reglamentaciones eléctricas, explosivas y sonoras.

De las 4 alternativas analizadas, el Sistema de EAV resultó el de mayor Eco-Eficiencia, ya

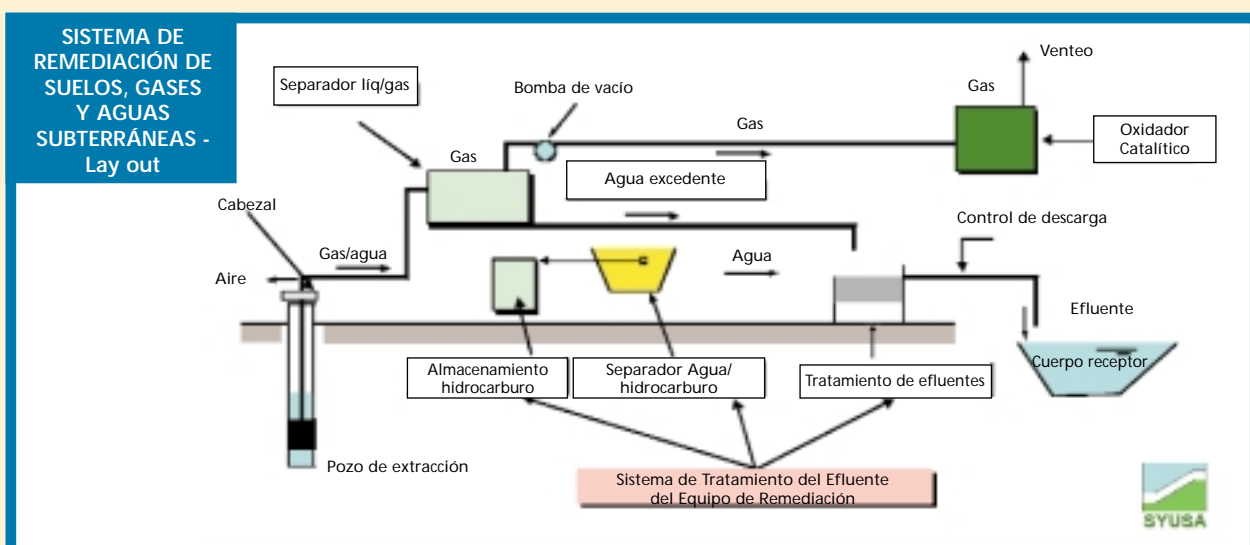


que permite lograr el cumplimiento de los objetivos en tiempos relativamente cortos y a un costo industrial razonable (moderado en energía e insumos, y bajo en consumo de agua, gestión de residuos y tratamiento de emisiones al aire y al agua) y a bajo riesgo. Ello se debe a los siguientes factores:

- El sistema permite la captación simultánea de vapores de suelo, aguas no gravitacionales presentes en capilares de suelos, aguas freáticas y producto libre sobrenadante. Ello se debe a que opera mediante una bomba generadora de Alto Vacío (hasta 24" Hg, es decir, entre 4 y 8 veces más que los sistemas convencionales), que deprime el nivel freático y extrae junto con la corriente líquida, los gases

ocuidos en la matriz de suelo.

- La corriente extraída es derivada a una primera cámara de separación de fases (líquido - vapor), derivándose la primera a un sistema de tratamiento de efluentes compuesto por un separador de hidrocarburos sobrenadantes, que determina una óptima recuperación y reinsertión de este componente a la cadena productiva. El efluente es tratado en fases ulteriores que pueden requerir acondicionamientos similares a los mencionados en los anteriores casos, si bien con una notablemente menor intensidad de tratamiento, ya que el sistema EAV maximiza la localización de la contaminación en la corriente gaseosa extraída.





Equipos de extracción por alto vacío en diferentes instalaciones para proyectos de remediación de SYUSA.

- ▶ La generación de residuos es mínima.
- ▶ La dispersión de contaminación asociada a la dinámica subterránea es la menor de las alternativas consideradas, en virtud de una mayor capacidad de arrastre y captación del sistema.
- ▶ El costo por compensación ambiental es también el mínimo de los considerados. El sistema permite la continuación de las actividades comerciales previas y representa un bajo riesgo a la salud humana y al medio ambiente, una vez puesto en régimen.

Conclusiones

El enfoque utilizado respecto de Índices de Eco-Eficiencia de Sistemas de Remediación de sitios contaminados con hi-

drocarburos es una herramienta válida para la toma de decisiones relativa a la selección de la alternativa tecnológica a utilizar. Efectivamente, esta aproximación es idónea para sopesar los costos industriales, riesgos e impactos. El enfoque requiere el conocimiento cabal de la siguiente información:

- ▲ las características del medio ambiente (físicas, socioeconómicas, operativas, comerciales, etc.) y de la contaminación;
- ▲ las alternativas tecnológicas analizadas en relación a las condiciones del sitio, y las respectivas consideraciones ambientales;
- ▲ los costos presupuestados para las distintas fases y componentes de cada alternativa de proyecto, a partir



de hipótesis y estimación de resultados de gestión.

Ello permite la generación de índices de Eco-Eficiencia a ser utilizados en la toma de decisiones, sopesándose los factores que hacen a un máximo logro de los objetivos de remediación al menor costo ambiental posible (reflejado a su vez en el cómputo económico de los distintos factores que hacen a la Eco-Eficiencia).

En este marco, la Extracción por Alto Vacío resultó la alternativa ampliamente más efectiva de las consideradas, por cuanto:

- ▶ permite el arrastre de gases junto con la corriente de

agua edáfica y aguas freáticas, aumentando su potencial de captación de contaminación;

- ▶ favorece la operación en un medio gaseoso, minimizando los esfuerzos de acondicionamiento de los efluentes emergentes;
- ▶ genera la oxidación catalítica de la corriente de hidrocarburos, proceso de elevada eficiencia, que no requiere aportes energéticos específicos y que adecua las emisiones al aire.

Todo ello favorece un óptimo logro de los objetivos de remediación a un óptimo nivel de Eco-Eficiencia.



Contacto:

Ing. Alejandro J. Sarubbi

Tel.: 54-11-4318-5597

tcbsar@tearg.com.ar