

LA REPARACIÓN DEL DAÑO. ASPECTOS TÉCNICOS: REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

Susana SAVAL BOHÓRQUEZ

SUMARIO: I. *Introducción*. II. *Remediación y restauración*. III. *El suelo como recurso natural*. IV. *Materiales y residuos peligrosos*. V. *Impactos ambientales de la industria petrolera*. VI. *Evaluación del daño*. 1. *Análisis del sitio y sus alrededores*. 2. *Análisis geohidrológico*. 3. *Análisis químico del (los) contaminante (s)*. 4. *Análisis fisicoquímico*. VII. *Alternativas técnicas para la reparación del daño*. 1. *Medidas de mitigación*. 2. *Remediación*. 3. *Confinamiento*. 4. *Restauración*. VIII. *Procedimiento administrativo para la limpieza de sitios contaminados*. 1. *Acreditación de la tecnología*. 2. *Evaluación del plan de remediación*. 3. *Establecimiento de los niveles de limpieza*. IX. *Marco legal para la limpieza de sitios contaminados*. X. *Instrumentos legales de apoyo*. XI. *Conclusiones*. XII. *Bibliografía*.

I. INTRODUCCIÓN

La industria petrolera en México tiene un significado estratégico de primera magnitud, que se manifiesta por los niveles de contribución a la economía nacional. La necesidad de satisfacer, día con día, una mayor demanda de energéticos ha ocasionado el crecimiento de esta industria, y con ello el impacto sobre los recursos naturales, los ecosistemas y las zonas urbanas.

Ante las reformas de la Ley Federal del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, donde se camina hacia la responsabilidad por daño ambiental, se requieren elementos técnicos que faciliten la interpre-

tación de las causas que ocasionaron el daño y de las posibles formas para la reparación del mismo, que sirvan de apoyo en el campo jurídico.

El objetivo del presente capítulo es precisamente aportar los elementos técnicos que puedan servir como base para evaluar el daño que ha sufrido un sitio debido a la presencia de contaminantes de la industria petrolera y la manera como debe proceder la reparación del mismo. Entendiendo al daño, no solamente como lo que se aprecia a simple vista, sino también los efectos que ocurren en el subsuelo.

II. REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

En el artículo 3 fracción XXXIII de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), *restauración* se define como *el conjunto de actividades tendentes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales*

De acuerdo al *Diccionario de la Lengua Española* (1992) *restaurar* es *reparar, renovar o volver a poner algo en el estado que antes tenía; reparar una pintura, escultura o edificio del deterioro que ha sufrido*. Esta definición aplica perfectamente en la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas, cuando se refiere a la protección, conservación, restauración y recuperación de monumentos arqueológicos, artísticos e históricos.

En las reformas hechas a la LGEEPA,¹ no se aprovechó la oportunidad para dar más precisión a las definiciones, y desafortunadamente se corre el riesgo de interpretar la restauración de sitios contaminados, como una actividad meramente cosmética, más que de saneamiento o limpieza.

El término *remediación* no está registrado en los diccionarios de la lengua española, es por eso que en nuestro país no ha sido incluido en documentos oficiales. Se ha vuelto del dominio público como una traducción de *remediation* que en Estados Unidos, Canadá y otros países de lengua inglesa, se ha venido usando para referirse a todas aquellas actividades de limpieza de sitios contaminados.

Un término que sí aparece en los diccionarios de la lengua española es el verbo *remediar*, cuya definición es *poner remedio al daño; corregir o*

¹ *Diario Oficial de la Federación*, 1997.

enmendar una cosa; socorrer una necesidad o urgencia; librar, apartar o separar de un riesgo; evitar que suceda algo de que pueda derivarse algún daño o molestia. Si nos ubicamos dentro del terreno ambiental, esta definición es precisamente lo que se busca una vez que se detecta un daño por contaminación.

En una propuesta de anteproyecto de norma,² se hizo un intento para definir *remediación* de la siguiente forma: *conjunto de acciones necesarias para llevar a cabo la limpieza de cualquier descarga o sospecha de descarga de contaminantes, incluyendo mas no limitado, a la realización de una evaluación preliminar, investigación del sitio, determinación del alcance del problema, estudio de factibilidad y acciones correctivas.* La definición es muy completa, pues contempla la limpieza de un sitio contaminado en todo su concepto.

Con base en lo anterior, se puede decir que los términos, *restaurar* y *remediar*, aplican en el terreno ambiental sólo si son empleados en el contexto de su definición. Para ilustrar lo anterior, se presentan tres casos:

1. Únicamente restaurar, es el hecho de hacer crecer plantas en un sitio dañado sin haber eliminado o destruido los contaminantes previamente. Esto suena extraño, sin embargo, se hace depositando una importante capa de desechos agroindustriales y de suelo limpio encima de derrames de petróleo o de descargas de lodos aceitosos, de tal forma que éstos quedan enterrados y encima se siembran pastos y especies vegetales de raíz corta. Cuando estas especies se desarrollan y crecen, se restablecen condiciones para la evolución de procesos naturales, a pesar de que no se haya limpiado el suelo. Otro ejemplo que no se relaciona con la industria petrolera se presenta en los rellenos sanitarios, donde todos los desechos sólidos quedan enterrados y en la superficie se construyen alamedas y lugares de recreación, sin importar el efecto de materiales contaminantes en la profundidad.
2. Únicamente remediar, es decir, limpiar el suelo sin devolverle su función biológica. Esto se practica principalmente dentro de instalaciones industriales en operación o que van a ser desmanteladas, que son sitios en donde no se observaba el desarrollo de especies vegetales o animales antes de ser contaminados.

² INE, 1996.

3. Remediar y restaurar, esto es, limpiar y demostrar que el suelo recobra su actividad biológica. Un ejemplo de este caso es cuando se logra la eliminación de contaminantes o su transformación en compuestos menos dañinos, y posteriormente se permite el crecimiento y proliferación de especies vegetales y/o animales. Esto se aplica a suelos y cuerpos de agua que antes de ser contaminados cumplían con una función biológica.

Para ser congruentes con el título y el contenido del presente trabajo, así como con las definiciones correctas, se hará distinción entre los dos conceptos: *remediación* y *restauración*.

III. EL SUELO COMO RECURSO NATURAL

Un recurso natural es *un elemento natural que se presenta sin la inducción del hombre y es susceptible de ser aprovechado en beneficio de éste*. El suelo entra en esta definición de recurso natural, y además tiene la característica de ser no renovable. Tiene diversas funciones, como servir de filtro amortiguador al limpiar el agua de lluvia que recarga los acuíferos, es un medio productor de alimentos, es hábitat biológico y de reserva genética, es el medio físico para la construcción, además de fuente de materias primas y herencia cultural.³

En la LGEEPA, la importancia del suelo está más bien dirigida hacia actividades agrícolas y forestales, esto es, a la capa superficial del suelo. Para ser una ley federal, es muy poco el énfasis que se hace en relación al subsuelo y llama la atención que en ninguno de los artículos referidos a la Prevención y Control de la Contaminación del Suelo (título IV, capítulo III) se menciona el término subsuelo. En la Consulta Nacional sobre Legislación Ambiental que llevó a cabo la Comisión de Ecología de la Cámara de Diputados en julio de 1995, se presentó una propuesta de modificaciones al capítulo citado.⁴ Uno de los aspectos principales de dicha propuesta era dejar asentado "suelo y subsuelo" cada vez que en la redacción de la ley original se hablara de "suelo" en casos específicos de prevención y control de la contaminación, pero desafortunadamente ésta

³ Saval, 1995.

⁴ Saval, 1995a.

no fue tomada en cuenta. La Ley Ambiental del Distrito Federal en cambio, sí refiere a los dos términos en conjunto, "suelo y subsuelo", incluso, en muchas ocasiones menciona también a los acuíferos, cuando se habla prevención y control de la contaminación.

Por otra parte, cuando se habla del uso que se le va a dar al suelo, comúnmente se cita el término de vocación natural. Este concepto, por definición, se refiere a *las condiciones que presenta un ecosistema para sostener una o varias actividades sin que se produzcan desequilibrios ecológicos*. La aplicación correcta de este término, debe enfocarse a suelos de uso agrícola y forestal, cuando se estudian las especies vegetales que pueden desarrollarse en sitios específicos, cuyo material geológico posee características fisicoquímicas particulares. En el caso de sitios contaminados, su aplicación se debe referir a las actividades que se van a desarrollar en el sitio después de la limpieza del sitio, como suelo recreativo, residencial, comercial, industrial o de conservación.

IV. MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS

De acuerdo a la LGEEPA, un *material o residuo peligroso por sus características representa un peligro para el ambiente, la salud o los recursos naturales*. Para calificar a un material o residuo como peligroso se debe aplicar el análisis conocido como CRETIB. El nombre de este análisis lo conforman las siglas que corresponden a cada una de las características del material como sigue: Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y Biológico-Infecioso. Dicho análisis se debe practicar de acuerdo a la normatividad⁵ y se considera confiable únicamente cuando se realiza en los laboratorios reconocidos por el Sistema Nacional de Laboratorios de Prueba.⁶ Cualquier material o residuo cuyo resultado sea positivo para alguna de las características citadas, se considera peligroso.

Los suelos contaminados con hidrocarburos se consideran materiales peligrosos, por lo que anteriormente se solicitaba el análisis CRETIB. Sin embargo, el INE, a través de la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, se ha dado a la tarea de rescatar al suelo como

⁵ NOM CRP-052-ECOL/1993 y NOM CRP-053-ECOL/1993.

⁶ SINALP, 1997.

recurso natural y establecer nuevos criterios basados en análisis químicos. En la actualidad, lo que procede es identificar el tipo y concentración de los contaminantes, lo cual constituye el punto de partida para estudiar las alternativas que permitan su tratamiento.⁷ Lo anterior también está fundamentado en que la información que aportan los análisis CRETIB en relación con los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, no es representativo en el caso de hidrocarburos intemperizados, porque éstos seguramente se volatilizaron durante la toma de muestra. Además, algunas de las características naturales de los suelos pueden dar reacciones positivas y generar interpretaciones equivocadas. Lo que sí se sigue aplicando para muestras de suelo y agua contaminados, es la cuantificación de metales pesados de acuerdo con la normatividad,⁸ el cual se debe practicar simultáneamente con una muestra de suelo limpio, para saber si se trata de una característica natural del suelo o de una contaminación. Los resultados que se obtengan formarán parte de la caracterización de los contaminantes, como se verá más adelante, y servirán para evaluar las alternativas de tratamiento.

V. IMPACTOS AMBIENTALES DE LA INDUSTRIA PETROLERA

El impacto ambiental ocasionado por la industria petrolera comprende los efectos de todas y cada una de las fases involucradas en las etapas que son: exploración, explotación, transformación, distribución y comercialización. Las actividades en cada una de ellas han afectado los recursos naturales, representados básicamente por agua, aire, suelo y biota.⁹

Durante la exploración terrestre, se habla de desmontes para la construcción de rutas de acceso y eliminación de la cubierta vegetal y edáfica para la instalación de campamentos, que trae como consecuencia el desplazamiento de especies animales. Se presentan problemas de contaminación por derrames y explosiones. En la exploración marina, además de la alteración de los ecosistemas marinos, existen mayores posibilidades de dispersión de contaminantes que en el medio terrestre.

En la explotación terrestre, la perturbación de los ecosistemas se da por los asentamientos irregulares que se instalan a las orillas de las vías de

⁷ Sánchez, 1997.

⁸ NOM CRP-053-ECOL/1993.

⁹ SEDUE-INE, 1994.

acceso, deforestación por la construcción de caminos y cambios en la dinámica del flujo de las aguas superficiales. Se presenta una mayor acumulación de desechos industriales como recortes y lodos de perforación, lodos aceitosos, aditivos químicos y aceites gastados, las posibilidades de derrame de crudo son mayores y se observa también la emisión de contaminantes a la atmósfera. El establecimiento de asentamientos humanos genera aguas negras que también tienen impacto sobre los ecosistemas. Una situación similar se presenta en la exploración marina, además de la acumulación de los sedimentos de dragado.

Una gran parte de terrenos localizados cerca de las zonas de explotación, en el pasado albergaban abundante flora y fauna, cuyo desarrollo se veía favorecido por el clima cálido-húmedo. La destrucción de estos ambientes naturales se inició hace varias décadas, cuando tomó auge la actividad petrolera.

La industria de refinación requiere de grandes espacios para la instalación de tanques de almacenamiento. Su actividad es básicamente la separación de los productos del petróleo, en diferentes fracciones de acuerdo con sus características químicas y usos. Los principales productos que se procesan son: crudo pesado, ligero, superligero y reconstituido, gas seco y licuado, gasolinas, querosenos, diésel, gasóleos, combustóleo, asfaltos, grasas y lubricantes. Las actividades de proceso requieren líneas de distribución para fluidos, vapores y gases, se tiene un importante consumo de agua de enfriamiento y el vertimiento de aguas residuales conteniendo compuestos tóxicos. Aumentan las posibilidades de fugas, derrames y explosiones.

La actividad de la industria petroquímica requiere instalaciones de proceso más sofisticadas que la refinación, dado que es básicamente una industria de transformación. Produce una gran variedad de sustancias complejas entre las que destacan: anhídrido carbónico, amoníaco, metanol, etileno, dicloroetano, polietileno, acetaldehído, cloruro de vinilo, xilenos, tolueno, benceno, etilbenceno, estireno, acrilonitrilo, propileno, dodecibenceno y pentano. Dentro de las instalaciones se tienen también riesgos de fugas, derrames y explosiones, así como descarga de aguas residuales muy contaminadas, tal como ocurre en refinación, pero en petroquímica los compuestos que se manejan son aún más tóxicos. Por lo general, los residuos de la petroquímica están considerados peligrosos y en una importante mayoría no son susceptibles de ser sometidos a tratamiento. Se tienen además, emisiones gaseosas que afectan la calidad

del aire de los alrededores, e incluso, ocasionan corrosión de materiales metálicos empleados en la construcción de viviendas.

La distribución de productos a través de ductos y pipas, así como su almacenamiento en grandes tanques, presenta un alto riesgo por las posibilidades de fugas y derrames que afectan principalmente el suelo y los cuerpos de agua aledaños al sitio de trabajo.

VI. EVALUACIÓN DEL DAÑO

La evaluación del daño es realmente un diagnóstico que debe ser muy preciso, ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las medidas de mitigación, limpieza y, en su caso, restauración. Es una actividad en la que necesariamente confluyen diversas disciplinas, las cuales deben interactuar para arrojar resultados completos.

Cuando ocurre un derrame en suelo o en cuerpos de agua, los contaminantes inmediatamente tienden a dispersarse hacia donde el medio físico lo permite. Las características fisicoquímicas del contaminante, así como las propias del sitio, determinan su permanencia o migración. Esta es la razón por la que derrames subterráneos que ocurrieron en el pasado, años después se detectan fuera del predio donde acontecieron, y alejados varios metros o incluso kilómetros, en dirección de la corriente de agua subterránea. Ejemplos de lo anterior se presentan comúnmente en zonas aledañas a poliductos, centros de almacenamiento y distribución de combustibles, así como en estaciones de servicio. En estos casos se pone en riesgo la salud de los habitantes de la zona, debido a que el agua de los pozos por estar contaminada con hidrocarburos deja de ser apta para consumo humano.

Todos los hidrocarburos del petróleo son insolubles en agua y por ser menos densos que ésta tienden a flotar, esta característica es importante porque marca la estrategia del diagnóstico en un sitio contaminado. Los combustibles no siempre se ven, pero tienen la ventaja de que huelen y de que su olor es fácilmente reconocido. Otros productos químicos no se ven, tampoco huelen, únicamente son detectados por análisis químicos. Los derrames de petróleo crudo y de residuos de perforación tienen la característica de ser completamente visibles por su color y aspecto. Tal

vez éstos son los que más daño han ocasionado a los ecosistemas, y el daño puede empezar a ser estimado por las claras evidencias.

PEMEX tiene bien identificados los sitios afectados en las zonas de exploración y explotación, de hecho, ha realizado muchos estudios para cuantificar los daños. Específicamente en Tabasco, se han reportado daños a los ecosistemas, que incluso han afectado otras actividades económicas de la región. Los daños han afectado zonas de cultivo, de caza y de pesca, se dice incluso que se han violado zonas decretadas como reserva ecológica y de amortiguamiento, donde se concentra la mayor parte de las especies de flora y fauna protegidas, por lo que es necesario redefinir dichas áreas. Desafortunadamente, la situación no ha podido ser controlada, y en la actualidad se manejan tantos intereses políticos que dejan poco espacio para la toma de decisiones bien fundamentadas.

La evaluación del daño constituye un estudio completo de caracterización que incluye: un análisis del sitio y sus alrededores, un análisis geohidrológico, un análisis químico de los contaminantes y un análisis fisicoquímico de suelo o agua contaminados.

1. *Análisis del sitio y sus alrededores*

Para esta actividad es indispensable visitar el lugar, una parte importante de la información se puede obtener cuando se entrevista a los trabajadores y a los pobladores del lugar, pero también es necesario recurrir a los acervos bibliográficos. A continuación se enlistan los conceptos que deben ser investigados:

- Ubicación geográfica del sitio afectado
- Tipo de instalación que dio origen a la contaminación (sitio de exploración o explotación, industria de proceso, centro de almacenamiento, terminal marítima, centro de abastecimiento, estación de transferencia o ducto de transporte, entre otros)
- Plano de las instalaciones superficiales y vías de acceso (terrestre, fluvial y marítimo)
- Plano de instalaciones subterráneas con identificación
- Ubicación de las zonas urbanas aledañas
- Resultados de estudios previos que se hayan realizado (auditorías ambientales, gasometrías, mediciones de la profundidad del nivel freático)

- Apariencia del material contaminante (materia prima, producto o residuo de proceso)
- Ubicación de la(s) fuente(s) de contaminación (obra subterránea o superficial)
- Antigüedad de la contaminación
- Precipitaciones pluviales (frecuencia y nivel)
- Escorrentías
- Ubicación de los cuerpos de agua aledaños
- Clima y temperatura ambiente del sitio
- Pozos de extracción de agua aledaños (en uso, clausurados y planeados)
- Uso del suelo afectado (agrícola, forestal, recreativo, residencial, comercial, industrial o de conservación)
- Topografía
- Tipo de vegetación

Como sucede en todo trabajo de investigación, las evidencias documentadas, como las fotografías con un mismo punto de referencia, o bien, fotografías aéreas o imágenes de satélite tomadas tiempo atrás, son de gran utilidad. En este último aspecto, el Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), así como Petróleos Mexicanos a través de su propio sistema de información geográfica (SICORI) constituyen un gran apoyo para conocer aspectos muy generales de las zonas en estudio.

2. Análisis geohidrológico

La importancia del análisis geohidrológico del sitio, es que aporta elementos para entender la forma en la que se han movido los contaminantes, del punto específico donde ocurrió un derrame y hacia dónde se tienen zonas afectadas. Esta investigación ayuda a conocer si la migración de los contaminantes ha sido producto de un proceso natural, o bien, ocasionado por la acción del hombre. Durante la caracterización geohidrológica se debe obtener la siguiente información:

- Profundidad del nivel freático
- Dirección y velocidad del flujo del agua subterránea
- Espesor de producto libre (cuando éste ha alcanzado el nivel freático)

- Definición tridimensional de la mancha de contaminación subterránea
- Perfiles estratigráficos

Cuando se trata de un derrame antiguo, esta información es útil para entender cómo se ha desplazado la mancha de contaminación hacia fuera del predio de las instalaciones, o bien, en el caso de derrame recientes, se puede predecir hacia dónde migrarán los contaminantes y el tiempo en que alcanzarán pozos de abastecimiento o zonas urbanas.

Durante la recopilación de la información se debe definir un sitio que servirá como control cuyas características físicas, químicas y biológicas, se considere sean similares a las del sitio, antes de que haya sido afectado. Este sitio control debe estar libre de contaminación, de ahí deberán tomarse muestras, las cuales serán procesadas simultáneamente a las muestras del sitio contaminado.

a. *Diagnóstico de la contaminación in situ*

El diagnóstico *in situ* permite obtener información de una manera relativamente rápida y simple. Se puede conocer la ubicación de la mancha de contaminación en el suelo, sobre un plano y a profundidad, con estas técnicas se pueden detectar varios niveles de concentración de contaminantes. Existen varios métodos para el diagnóstico *in situ*, dos de los más comunes son los geoelectrónicos y la gasometría, de ahí se derivan otros. Lo que es importante es saber cuál es el método más adecuado para cada caso.

Los métodos geoelectrónicos crean muy poco disturbio en el sitio, porque solamente se encajan los electrodos a una profundidad no mayor a 20 cm, mientras se toman las lecturas. A través de estos electrodos se hace pasar una señal eléctrica y en cada punto se toman lecturas para medir la conductividad o resistividad. Aparentemente, el método se puede aplicar con éxito a diversos tipos de derrames y tiene la ventaja de dar información sobre el tipo de material geológico que se encuentra en el subsuelo. La toma de lecturas en campo es relativamente sencilla, pero la interpretación de los resultados requiere de personal muy especializado.

Las gasometrías se aplican exitosamente cuando los contaminantes son compuestos volátiles y semivolátiles, básicamente combustibles. Para esta determinación es necesario hacer perforaciones someras, de un diámetro

reducido, que puede ser incluso de 2.5 cm, y pueden llegar hasta 3 m de profundidad. Las lecturas se toman con gasómetros portátiles que cuantifican la concentración de hidrocarburos volátiles. Simultáneamente, se pueden tomar lecturas de explosividad, con explosivímetros también portátiles. En los puntos donde se presenta una alta concentración de hidrocarburos volátiles corresponde a un alto grado de explosividad. El trabajo en campo es un poco más laborioso que en el método geoelectrico, pero la interpretación es más sencilla, incluso en el momento de las lecturas se pueden ubicar las manchas de contaminación más importantes, en las que es conveniente tomar muestras para realizar los análisis pertinentes.

b. *Muestreo directo*

Las muestras de suelo y agua que se tomen deben ser inalteradas y representativas del problema que se está analizando. Una vez que éstas se toman, deben protegerse de la intemperie para conservar sus características originales, si es posible, se mantienen en refrigeración durante su traslado al laboratorio, y deben procesarse lo más pronto posible.

3. *Análisis químico del (los) contaminante(s)*

Los análisis químicos se practican en muestras de suelo y agua, para identificar el tipo de contaminantes y su concentración. Los resultados que se obtengan serán complementarios al diagnóstico *in situ*, así se podrá conocer la forma en cómo están distribuidos entre la zona no saturada y la saturada en el caso de suelo, así como la concentración de contaminantes disueltos cuando es agua. Para el análisis químico de los contaminantes se utilizan métodos que son del dominio público. Algunos de los más utilizados son:

- Compuestos monoaromáticos volátiles: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), método EPA 8020 por cromatografía de gases o método EPA 8060 o EPA 8240 por espectrometría de masas
- Hidrocarburos totales de gasolina y diésel, método EPA 8015
- Hidrocarburos totales del petróleo (HTPs), método EPA 418.1 M
- Hidrocarburos polinucleoaromáticos: naftaleno, antraceno, fenantreno, benzopireno y otros, método EPA 8310
- Bifenilos policlorados, método EPA 8080

- Metales pesados: arsénico, bario, cadmio, cromo VI, níquel, mercurio, plata, plomo y selenio, de acuerdo con la NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
- Plaguicidas de acuerdo con la NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993

La decisión de los métodos a utilizar está en función de cada caso en particular, por ejemplo, el análisis de plaguicidas se realiza simultáneamente al análisis de hidrocarburos o de metales pesados, cuando se dice que un terreno cultivable ha dejado de serlo por la presencia de hidrocarburos contaminantes. En este caso en particular conviene probar si hay presencia de plaguicidas y si éstos han afectado la fertilidad del suelo.

4. *Análisis fisicoquímico*

El análisis fisicoquímico del suelo se realiza para conocer qué tan afectado se encuentra un suelo por la presencia de contaminantes. Este análisis se practica simultáneamente a una muestra de suelo no contaminado que sirva como control, con la finalidad de hacer comparaciones. La muestra control se toma de una zona no contaminada, cercana a la zona dañada para asegurar que comparta sus características. Las determinaciones que se realizan son:

- pH
- humedad
- capacidad de retención de agua
- concentración de materia y carbono orgánicos
- contenido de materia inorgánica (sólidos fijos)
- contenido de carbono inorgánico (carbonatos y bicarbonatos)
- porosidad
- permeabilidad
- tipo de suelo (tamaño de partículas)

Los tres últimos parámetros se practican únicamente en la muestra del suelo control, porque la presencia de algunos contaminantes, como el aceite crudo, no permiten la realización del análisis. Su utilidad es básicamente para evaluar las alternativas de limpieza del sitio.

Cuando se tienen muestras de agua las determinaciones a realizar son:

- pH
- demanda química de oxígeno
- demanda bioquímica de oxígeno
- alcalinidad
- concentración de sólidos (totales, fijos y volátiles)
- concentración de bacterias coliformes totales y fecales

La determinación del último parámetro se realiza para descartar una contaminación por aguas residuales, debida a descargas en cuerpos de agua o infiltraciones hacia los acuíferos.

VII. ALTERNATIVAS TÉCNICAS PARA LA REPARACIÓN DEL DAÑO

Desde el punto de vista técnico, la estrategia para la reparación del daño es única para cada caso, y debe estar bien soportada en todos los resultados de caracterización. Se debe hacer una muy buena planeación para evitar que el tratamiento pueda afectar aún más el ambiente que ya se encuentra dañado. Se puede hablar de varios niveles de reparación del daño, que son: mitigación, remediación y restauración. La reparación del daño se debe realizar de manera inmediata a su evaluación, de lo contrario la información obtenida puede ser poco confiable, dado que los mismos eventos naturales, como las lluvias, modifican las características del sitio contaminado.

1. *Medidas de mitigación*

Las medidas de mitigación son todas aquellas acciones inmediatas que se toman para evitar un daño mayor. Ejemplos de éstas son: la clausura de pozos de extracción de agua que estén contaminados, la extracción de combustibles en pozos de abastecimiento de agua, la colección de aceite crudo derramado en cuerpos de agua, o bien, la excavación de zanjas o introducción de cortinas para evitar la dispersión de los contaminantes.

Con estas acciones se puede retirar la mayor cantidad de contaminantes, pero queda una fracción asociada a la estructura del suelo, o bien, disuelta

en el agua, por lo que es necesario aplicar tratamientos de remediación más avanzados.

2. Remediación

En el mercado ambiental existen diversas tecnologías para la limpieza de suelos, acuíferos y cuerpos de agua. La opción tecnológica más conveniente, se define de acuerdo a criterios técnicos establecidos para cada caso particular. De las opciones tecnológicas de remediación que se ha comprobado su efectividad en sitios contaminados con hidrocarburos se pueden citar: biorremediación, extracción, fijación, incineración y filtración. En la literatura se han descrito gran cantidad de opciones tecnológicas, pero no han sido llevadas a gran escala en campo.

No todas las tecnologías son aplicables a todos los casos, por lo que siempre se recomienda la realización de estudios de tratabilidad a nivel de laboratorio, con el fin de obtener información relacionada con su efectividad, su aplicación a gran escala en campo, la estrategia de operación, así como tiempo y costo de operación. Para ello, se requiere que la escala a la que se realizan los estudios de tratabilidad sea representativa de la superficie que se pretende tratar, y que los modelos experimentales representen el comportamiento físico del sitio. El costo de aplicación de una tecnología es un punto muy importante en la toma de decisiones, pero es conveniente hacer un balance, ya que por lo general, la mejor opción económica no corresponde a la mejor alternativa técnica.

La aplicación de cualquier tipo de tratamiento a un sitio contaminado implica un riesgo que debe ser evaluado de manera muy particular. Es muy importante llevar un registro periódico durante el tratamiento para confirmar su efectividad, es decir, que la superficie de la mancha de contaminación y las concentraciones de contaminantes se estén reduciendo. La aplicación de los métodos de diagnóstico *in situ* y los análisis químicos en el laboratorio son la herramienta principal.

Los aspectos referentes al establecimiento de los niveles de limpieza se discutirán en el inciso VIII, debido a que esta actividad se realiza en conjunto con las autoridades ambientales.

a. *Biorremediación*

La biorremediación ha surgido recientemente como una alternativa tecnológica para la limpieza de suelos, acuíferos y cuerpos de agua contaminados con hidrocarburos, ya que en su mayoría éstos son biodegradables. Los contaminantes son transformados en compuestos químicamente más simples, por ejemplo, en bióxido de carbono cuando hay una completa mineralización. Uno de los retos de las tecnologías de biorremediación es acelerar la actividad microbiana para reducir los tiempos de biodegradación de contaminantes en suelo y agua.

El éxito de la biorremediación obedece a la capacidad metabólica de los microorganismos involucrados. La opción más segura es aprovechar la flora autóctona, y su actividad se estimula mediante la adición de nutrientes. A pesar de que la biorremediación toma tiempo, tiene la ventaja de que el suelo tratado puede recuperar su actividad biológica natural. Entre las opciones que existen para la limpieza de sitios contaminados con hidrocarburos, la biorremediación es de las mejores desde los puntos de vista ambiental y económico, no obstante, las altas concentraciones de hidrocarburos o la presencia de otros contaminantes como metales pesados y compuestos clorados pueden limitar el tratamiento.

La biorremediación es muy versátil, existen opciones para tratar suelo y agua, subterránea o retenida en presas, lagos y lagunas. El tratamiento puede aplicarse *in situ* o fuera de él, y la adición de nutrientes y microorganismos exógenos está en función de las características del material geológico. En el caso de agua subterránea, la biorremediación se aplica mediante la técnica de bombeo-tratamiento-inyección, con ayuda de reactores en donde se proporciona a los microorganismos condiciones que estimulan su actividad. En otros cuerpos de agua se suministra oxigenación a través de aeradores, y concentraciones limitadas de nutrientes, también se aplica recirculación para favorecer la homogeneidad del sistema.

Una tecnología de biorremediación sería debe contar con un respaldo científico, sin embargo, en el mercado ambiental se comercializan productos microbianos y aditivos químicos de composición desconocida, que no son efectivos e incluso pueden aumentar el riesgo de un problema de contaminación, más que remediarlo.

b. *Extracción*

Se han desarrollado diversas tecnologías para la extracción de hidrocarburos pesados que se asocian a la estructura del suelo, como el aceite crudo. Mediante estas tecnologías se puede separar el producto para reciclarlo, si en el suelo queda hidrocarburo residual puede aplicarse otro tratamiento para alcanzar los niveles de limpieza.

c. *Fijación*

Los métodos de microencapsulación y solidificación son ejemplos de tecnologías para la fijación de los hidrocarburos a las partículas de suelo. Mediante éstas se pretende inmovilizar los contaminantes en la estructura del suelo, de tal forma que no puedan migrar. Algunas tecnologías de este tipo aseguran que después del tratamiento, se puede proceder a la siembra de especies vegetales.

Otra opción de fijación es la incorporación de asfalto a suelos contaminados con petróleo, y su utilización en la construcción de caminos.

En ambos casos es necesario hacer un seguimiento posterior al tratamiento para asegurarse de que los contaminantes permanecen retenidos a través del tiempo y que no están lixiviando.

d. *Incineración*

Se recomienda únicamente para suelos con muy altas concentraciones de contaminantes que no puedan ser sometidos a otro tipo de tratamiento, pero se tiene la desventaja de que junto con los contaminantes, el suelo también se destruye.

e. *Filtración*

Algunos hidrocarburos pueden solubilizarse en el agua, por lo que no pueden ser separados de ésta durante la extracción de la capa de producto libre. En el caso de aguas subterráneas se aplica el bombeo-tratamiento-inyección, el tratamiento consiste en filtrar a través de carbón activado, en el cual se quedan retenidos los hidrocarburos solubles y se obtiene agua libre de ellos. Los filtros tienen una cierta capacidad de retención, por lo que deben ser renovados periódicamente. El carbón activado con hidro-

carburos puede someterse a tratamiento biológico para transformar los contaminantes, o bien, llevarse a confinamiento.

Aspectos más detallados sobre tecnologías de remediación fueron descritos previamente.¹⁰

3. *Confinamiento*

Cuando los suelos están contaminados con altas concentraciones de metales pesados, bifenilos policlorados o compuestos altamente clorados, generalmente se recomienda su confinamiento. En estos casos, se requiere aplicar un pretratamiento para eliminar la fase líquida, en virtud de que no se permite el confinamiento de materiales peligrosos en estado líquido.

4. *Restauración*

Acordes con las definiciones establecidas en el primer inciso de este capítulo, la restauración de un suelo viene después de su remediación, cuando los niveles de contaminantes permiten el desarrollo de especies vegetales propias del lugar. En cuerpos de agua, se depositan especies acuáticas propias de la región, las cuales también cumplen la función de indicadores. Cuando se observa el restablecimiento de los procesos naturales, se puede comprobar la restauración de un sitio.

VIII. PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO PARA LA LIMPIEZA DE SITIOS CONTAMINADOS

En los términos de la legislación vigente, el responsable de un derrame o fuga de materiales peligrosos, debe realizar las actividades enfocadas a la limpieza del sitio. Para ello, generalmente los contaminadores recurren a empresas prestadoras de servicios ambientales. Debido a las diversas alternativas que existen para la limpieza de sitios contaminados, es de vital importancia evaluar y analizar las diferentes tecnologías que pueden ser aplicadas a problemas específicos.

Con base en lo anterior, la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas del Instituto Nacional de Ecología, en febrero de

¹⁰ Saval, 1995.

este año, dio a conocer formalmente la nueva política a seguir para la limpieza de sitios contaminados. En dicha reunión, a la que asistieron representantes de todos los sectores involucrados, se entregó un documento donde se describe de manera detallada cada uno de los pasos que deben seguir las empresas para cumplir con los requisitos técnico-administrativos (INE, 1997). Básicamente, se habla de dos trámites, que son los siguientes.

1. *Acreditación de la tecnología*

Para este trámite es necesario llenar los formatos correspondientes a la *Solicitud de acreditación para la empresa y la(s) tecnología(s) que ofrece servicios de restauración de sitios*, a la cual se debe anexar la información correspondiente a la tecnología y a la empresa, es decir, la descripción detallada de la tecnología propuesta, los documentos que avalen su certificación o aplicación satisfactoria en el extranjero, un listado de experiencias previas y los datos curriculares de la empresa prestadora de servicios y de su personal. Con esto se conforma un expediente que deberá ser evaluado por un órgano colegiado reconocido en la materia, el cual será designado por la dirección general citada. Cuando se ha cumplido con este trámite se pasa al siguiente.

2. *Evaluación del plan de remediación*

Para este trámite se debe integrar un documento que lleva el título de *Presentación del plan de restauración de sitios contaminados por materiales y residuos peligrosos*, el cual debe contener los estudios de caracterización del sitio, el programa de trabajo calendarizado, el protocolo de pruebas a nivel laboratorio y en campo, y el estudio de riesgo a partir del cual se definen los niveles de limpieza a alcanzar. En este caso, el protocolo de pruebas deberá estar avalado por un órgano colegiado reconocido en la materia.

Las empresas que con anterioridad iniciaron trabajos de remediación, deberán ajustarse a los nuevos procedimientos, de lo contrario, no se les permitirá continuar con la aplicación de las tecnologías en campo.

Con los dos procedimientos descritos, se abren las puertas para realizar la reparación del daño a la luz de las autoridades ambientales, quienes tendrán que realizar muchos ajustes no sólo con las empresas de servicios ambientales, sino también con las empresas contaminadoras. La práctica

cotidiana ha dejado ver que otros instrumentos administrativos, como la Ley de Adquisiciones y Obras Públicas, limitan el desarrollo de trabajos confiables y de buena calidad, que en general, no cumplen con los compromisos ambientales establecidos. Bajo el esquema de las licitaciones públicas, se debe tener claro que las mejores ofertas económicas, no siempre corresponden a las mejores alternativas técnicas, y una manera de abatir costos es maquillar los problemas de contaminación. Otros dos ejemplos de lo que ocurre en las licitaciones públicas y que desde el punto de vista ambiental requiere algunos ajustes, son: cuando se establece que la empresa que realiza la caracterización del sitio, no puede encargarse de la restauración, o bien, cuando se solicitan ofertas de la aplicación de tecnologías de remediación específicas de las cuales no se tienen buenos antecedentes.

3. *Establecimiento de los niveles de limpieza*

El INE es quien fija los niveles de limpieza por alcanzar, en acuerdo con la empresa contaminadora y con la empresa de servicios ambientales.¹¹ Los elementos que sirven como referencia para establecer estos niveles de limpieza son estudios de riesgo, pero es necesario contar con la caracterización completa del sitio.

En los estudios de riesgo se consideran dos aspectos básicos que son: la peligrosidad de la contaminación y el tipo de exposición. Para ello es necesario conocer los componentes tóxicos del producto contaminante, el cual se considera un parámetro indicador. Por ejemplo, el benceno es el indicador de contaminación con gasolinas porque tiene características de persistencia, bioacumulabilidad y riesgos de cáncer, por lo que se recomienda reducir a un mínimo la exposición humana. De manera similar, el naftaleno se utiliza como parámetro indicador de contaminación con diésel. La base para la realización de los estudios de riesgo es un anteproyecto de norma,¹² el cual empieza a ser utilizado con el fin de realizar los ajustes pertinentes antes de hacerlo oficial.

En algunas ocasiones se manejan estándares oficiales extranjeros, pero es conveniente conocer la base de razonamiento que llevó a esas cifras con la finalidad de tener elementos que permitan definir su aplicabilidad

¹¹ Sánchez, 1997.

¹² INE, 1996.

a otro sitio. Por ejemplo, en los Estados Unidos de Norteamérica cada gobierno estatal tiene sus propios estándares, los cuales fueron definidos después de una evaluación de los riesgos específicos. Las cifras que se utilizan para el benceno están dentro de un intervalo que va de 0.005 a 50 mg/kg para suelo, y de 0.2 a 71 mg/l para agua subterránea.¹³ La amplitud de estos intervalos indica que cada región se maneja de manera particular en función de sus propias características.

Un instrumento que puede servir de apoyo para el caso de aguas son los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89). Estos criterios establecen el uso que se le puede dar al agua en función de su calidad, la cual está en función de los compuestos químicos que en ella se encuentren. Los usos del agua están clasificados como: agua potable, agua para actividades recreativas de contacto primario, agua para riego agrícola, agua para usos pecuarios y agua para la protección de la vida acuática en agua dulce y agua marina. Si se toma nuevamente el benceno como parámetro indicador, el límite permisible para agua potable es de 10 mg/l, de 50 mg/l para vida acuática en agua dulce y de 5 mg/l para especies de agua marina en áreas costeras. Algunas otras cifras de interés para este trabajo, se presentan en la tabla 1, en la que también se incluyen intervalos de límites permisibles que manejan gobiernos estatales en los Estados Unidos de Norteamérica.

Tabla 1. Límites permisibles de algunos compuestos tóxicos en agua

Parámetro indicador	Criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89			Intervalos permisibles
	Agua potable	Protección de la vida acuática		En Estados Unidos de Norteamérica
Concentración (mg/l)		agua dulce	áreas costeras	agua subterránea
BTEX ^a	—	—	—	5 - 50
Benceno	10	50	5	0.2 - 71
Tolueno	14 300	200	60	790 - 1000
Etilbenceno	1 400	—	500	74 - 700
HPNA ^b	0.03	—	100	—

¹³ Saval, 1995.

Naftaleno	—	20	20	100 - 143
Acenafteno	20	20	10	—
Fluoranteno	40	40	0.4	370
Bifenilos policlorados	0.0008	0.01	0.03	—

^a BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos en mezcla.

^b HPNA: mezcla de hidrocarburos polinucleoaromáticos de la familia del naftaleno.

IX. MARCO LEGAL PARA LA LIMPIEZA DE SITIOS CONTAMINADOS

El marco legal dentro del cual se realizan las actividades de limpieza de sitios contaminados está conformado por: artículo 1 fracciones III y V; artículo 5 fracción II; artículo 98 fracción V; artículo 134 fracción V; artículo 136, fracciones I a IV; artículo 151 bis, fracciones I a III y artículo 152 bis, de la nueva Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.¹⁴ Adicionalmente, el artículo 10 y artículo 42 fracción VI del Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos.¹⁵

El artículo 134 fracción V de la LGEEPA dice que *en los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.* La redacción del artículo 152 bis es similar, pero hace referencia a que los responsables de la contaminación del suelo ocasionada por el manejo de materiales o residuos peligrosos deben llevar a cabo las acciones de limpieza.

En el artículo 139 se involucra a la Comisión Nacional del Agua, mencionando que *toda descarga, depósito e infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta ley (LGEEPA), la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas.* Respecto a la Ley de Aguas Nacionales, título séptimo, capítulo único, Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas, en su contenido de 12 artículos, hace referencia principalmente a la descarga de aguas residuales que pueden

¹⁴ Diario Oficial de la Federación, 13 de diciembre de 1996.

¹⁵ INE, 1997.

contaminar cuencas hidrológicas y acuíferos. Por lo que respecta a la contaminación por hidrocarburos, interpretados como materiales peligrosos, únicamente en el artículo 86, fracción VI, se menciona que *la Comisión Nacional del Agua tendrá a su cargo: promover y realizar las medidas necesarias para evitar que basura, desechos, materiales y sustancias tóxicas, y lodos producto de los tratamientos de aguas residuales, contaminen las aguas superficiales o del subsuelo.* De la misma forma el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, en su artículo 150 reafirma lo anterior diciendo que *en el caso de que el vertido o infiltración de materiales y residuos peligrosos que contaminen las aguas superficiales o del subsuelo, la Comisión Nacional del Agua determinará las medidas correctivas que deban llevar a cabo personas físicas o morales responsables o las que, con cargo a éstas, efectuará la comisión.* Cabe mencionar que estos dos documentos legales referidos a aguas nacionales, consideran que el vertimiento de aguas residuales es el factor más importante de la contaminación del subsuelo y acuíferos.

Finalmente, la participación del sector académico en las actividades de limpieza y restauración de sitios contaminados se enmarca en el artículo 59 fracción VIII, del Reglamento Interior de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), el cual cita que una de las atribuciones de la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas es *promover la celebración de convenios con universidades y centros de investigación, para la realización de estudios sobre tecnologías y sistemas de manejo de residuos peligrosos*

X. INSTRUMENTOS LEGALES DE APOYO

Existen otros instrumentos legales de apoyo para la limpieza de sitios contaminados, como son:

- el Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y Otras Materias, que data de 1979.
- el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, de 1988.
- el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental, de 1988.

No obstante, estos reglamentos requieren ser actualizados para estar acordes con la nueva legislación ambiental. Un aspecto que llama la atención es que prácticamente todos los documentos hablan de residuos y materiales peligrosos en términos generales, pero en especial el Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar, en su anexo I, inciso 5, sí es muy específico respecto a los derrames de la industria petrolera (petróleo crudo, *fuel-oil*, aceite pesado diésel, aceites lubricantes, fluidos hidráulicos y mezclas que contengan hidrocarburos). Sin embargo, no es muy común hacer referencia a este reglamento cuando se tratan aspectos ambientales.

Por otro lado, se ha verido insistiendo en la necesidad de contar con un Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Suelo, el cual no existe. Si éste se tuviera, se podría establecer un verdadero espíritu sobre la prevención y control de la contaminación. Además, se podrían instrumentar procedimientos para tener un control sobre su limpieza y restauración en términos muy específicos y reforzar la vinculación con otros instrumentos legales como la Ley de Aguas Nacionales y su respectivo reglamento, en los que hace falta un mayor énfasis en lo referente a la contaminación de acuíferos por derrame de hidrocarburos y compuestos químicos.

XI. CONCLUSIONES

La evaluación del daño causado por derrames de contaminantes es una actividad que debe realizarse con mucha seriedad y una muy buena planeación. La información que se integra con el análisis químico de los contaminantes, la dinámica del sitio afectado y las evidencias encontradas durante la caracterización, servirá como respaldo para la definición de responsabilidades. Dicha información será también útil para establecer la estrategia de limpieza del sitio, que es parte de la reparación del daño.

Con las reformas a la LGEEPA, donde se camina hacia el reconocimiento de la responsabilidad ambiental, es indispensable el establecimiento de una vinculación entre el campo jurídico y el técnico. Tal vez en un futuro cercano, los jueces que atiendan demandas ambientales soliciten opiniones de académicos expertos en la materia, las cuales serán determinantes en la resolución de responsabilidades y obligaciones. En este sentido, conviene resaltar que los contaminantes no son estáticos, migran

de acuerdo a lo que les permite el medio físico y cada día crece la zona afectada, por lo que la definición de responsabilidades se debe realizar en tiempos cortos.

Por otro lado, hay muchos sitios que han servido como escenario de actividades petroleras, y están tan afectados, que no es fácil establecer estrategias de recuperación en el corto plazo. Los estudios de impacto ambiental o auditorías ambientales tradicionales en las zonas donde a simple vista se observa una afectación, no son suficientes, se requieren estudios muy completos que sean útiles para la toma de decisiones.

Se sabe que la industria petrolera cuenta con tecnología de punta y personal especializado para la extracción de petróleo, sin embargo, no hay evidencias de una conciencia ecológica en los trabajos de campo. También se sabe que gran parte de los derrames accidentales son resultado de una falta de mantenimiento de instalaciones que tiene una relación muy directa con lo referente a seguridad industrial. Tal vez algo que ha fallado es una verdadera vinculación entre la toma de decisiones detrás de un escritorio ejecutivo y la supervisión de las actividades que se realizan en campo.

Para finalizar, conviene resaltar que la evaluación de un daño ambiental no es un requisito administrativo, es una verdadera necesidad técnica en la que no se deben escatimar recursos. La protección del ambiente y la salud deben ser compromisos éticos de todo ser humano.

XII. BIBLIOGRAFÍA

Criterios Ecológicos de Calidad de Agua, CE-CCA-001/89, *Diario Oficial de la Federación*, 2 de diciembre de 1989.

INE, 1996. Propuesta de Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana "Restauración de suelos contaminados: metodología para la determinación de criterios de limpieza en base a riesgos", Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas.

INE, 1997. Requisitos técnico-administrativos que deben cumplir los promoventes de servicios para la restauración de sitios contaminados por materiales y/o residuos peligrosos, Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas. Febrero 1997.

- Ley de Aguas Nacionales, *Diario Oficial de la Federación*, 1 de diciembre de 1992.
- Ley de Adquisiciones y Obras Públicas, *Diario Oficial de la Federación*, 30 de diciembre de 1993.
- Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- Norma Oficial Mexicana NOM-053-ECOL-1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- Real Academia Española, 1992. *Diccionario de la Lengua Española*, Madrid.
- Reformas a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, *Diario Oficial de la Federación*, 1996, diciembre 13.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, *Diario Oficial de la Federación*, noviembre 23 de 1988.
- Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y Otras Materias, *Diario Oficial de la Federación*, enero 11 de 1979.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental, *Diario Oficial de la Federación*, junio 6 de 1988.
- Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, *Diario Oficial de la Federación*, enero 12 de 1994.
- SÁNCHEZ GÓMEZ, J., 1997. Comunicación personal durante la reunión informativa sobre los Requisitos técnico-administrativos que deben cumplir los promoventes de servicios para la restauración de sitios contaminados por materiales y/o residuos peligrosos, Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, Instituto Nacional de Ecología, México.
- SAVAL BOHÓRQUEZ, S., 1995. "Remediación y restauración", en *PEMEX Ambiente y energía. Los retos del futuro*, México, UNAM-Petróleos Mexicanos.
- SAVAL BOHÓRQUEZ S., 1995a. Propuesta de cambios a la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en lo referente al Título IV, Capítulo III: Prevención y Control de la Contaminación del Suelo.

- Consulta Nacional sobre Legislación Ambiental, Comisión de Ecología, Cámara de Diputados, México, julio de 1995.
- SEDESOL-INE, 1994. "Industria Petrolera", en *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente*. Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología, México, capítulo 13.
- SINALP, 1997. Relación de laboratorios acreditados y en proceso de acreditamiento en caracterización de residuos peligrosos CRETIB, Sistema Nacional de Laboratorios de Pruebas, Departamento de Acreditamiento de Laboratorios de Pruebas Químicas, enero 21 de 1997.