

Remediación y Revitalización de Sitios Contaminados: Casos Exitosos en México



Remediación y Revitalización de Sitios Contaminados: Casos Exitosos en México

Wini Schmidt
Rosa María Flores Serrano
Ulises Ruiz Saucedo

Editores

Luis Eduardo De Ávila Rueda

Prólogo



Diseño gráfico:



Publicado:
Noviembre de 2013

Páginas:
245

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, agradece a la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH por la colaboración y asistencia técnica en la elaboración del presente documento. La colaboración de la GIZ se realizó bajo el marco del "Programa de Gestión Ambiental Urbana e Industrial" el cual se implementa por encargo del Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ).

Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad del/ de los autor/es y no necesariamente representan la opinión de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT y/o de la GIZ.

Se autoriza la reproducción parcial o total, siempre y cuando sea sin fines de lucro y se cite la fuente de referencia

© Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT

© Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Dag-Hammerskjöld-Weg 1-5

65760 Eschborn/Alemania

Publicado por:



Programa de Gestión Ambiental Urbana e Industrial, Componente Gestión y Reutilización de Sitios Contaminados

Av. Revolución 1425, nivel 30, Col. Tlacopac, San Ángel, Del. Álvaro Obregón, C.P. 01040, México, D.F.

T +52 55 56 24 35 92

E giz-mexiko@giz.de

I www.giz.de / www.giz.de/mexico

PRÓLOGO



Los gobiernos así como las organizaciones han ampliado su conocimiento a través del desarrollo de proyectos y de la aplicación de sus buenas prácticas. Esto es aún más evidente al momento de aprender de los errores cuyas consecuencias fueron los daños ambientales y la contaminación del suelo. México enfrenta actualmente muchos problemas debido al abandono de sitios contaminados que se han originado en el pasado por las actividades industriales. Esta situación afecta la calidad de vida de la población que vive cerca de estos lugares y contribuye al decremento económico y social de las comunidades y ciudades donde están localizados.

La actual administración, consciente del problema de los sitios contaminados ha establecido estrategias y líneas de acción para atender esta situación. Con el nuevo Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados–PNRSC, para el periodo 2014–2018 se busca coadyuvar a eliminar su rezago y remediar los sitios contaminados con el mayor riesgo.

El presente libro busca aumentar la difusión del conocimiento para que los gobiernos municipales, estatales, las empresas y otras instituciones conozcan y adapten a conveniencia las acciones realizadas para lograr la recuperación y reutilización de áreas contaminadas o degradadas, de manera que se recupere el valor de los sitios y se reintegren a los ciclos económicos de su localidad.

Dar a conocer casos exitosos, permite mostrar algunas metodologías con las que se han podido mitigar o eliminar los riesgos debidos a la contaminación y lograr una mejora significativa en la calidad de vida de las comunidades aledañas a este tipo de sitios. Esperamos que a partir de las experiencias obtenidas durante la remediación y reutilización de los proyectos mostrados, se facilite el aprendizaje en esta materia, además, se resalten los beneficios alcanzables al remediar sitios contaminados y señalen los frutos que esta actividad tiene para la sociedad.

Luis Eduardo De Ávila Rueda
DIRECTOR GENERAL DE GESTIÓN INTEGRAL
DE MATERIALES Y ACTIVIDADES RIESGOSAS,
DGGIMAR / SEMARNAT



INTRODUCCIÓN

Es pertinente hacer una reflexión sobre los avances que se han tenido en la gestión de sitios contaminados a 25 años de la publicación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y a diez años de la publicación de la Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), ambas pilares en la gestión de los sitios contaminados en México, aunado a la entrada en vigor de la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental en julio del 2013.

La LGPGIR estableció un sistema de responsabilidad que más adelante, a partir de la publicación del reglamento de la LGPGIR, originó un proceso de ordenación administrativa en la materia, aportando así claridad a los involucrados con respecto a las vías adecuadas para llevar a cabo la remediación de un sitio. Este proceso dio como resultado la creación de cuatro trámites administrativos que comprenden toda la gestión de sitios contaminados. Paralelamente se publicaron tres normas oficiales mexicanas que establecen los límites máximos permisibles para la remediación de sitios contaminados por hidrocarburos, metales y bifenilos policlorados, además cuatro guías complementarias a la gestión para la orientación en la elaboración de estudios de riesgo ambiental, para la caracterización de sitios contaminados, para la planeación y realización de muestreos finales comprobatorios y para la comunicación de riesgos. Asimismo, en el año 2010 se publicó la primera versión del Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados, cuya vigencia fue del 2010 al 2012, en el cual se planteó la política en la materia.

Los documentos antes mencionados han permitido que la gestión de sitios contaminados se realice de manera más objetiva, disminuyendo las incertidumbres relacionadas a la toma de decisiones. Actualmente se incluyen instrumentos aceptados a nivel internacional, como es la evaluación del riesgo al ambiente y a la salud humana a través de la cual se determinan los niveles específicos de remediación para sitios de acuerdo con sus características y condiciones particulares.

El trabajo que aquí se presenta tiene como objetivo exponer la aplicación de estos instrumentos y cómo las modificaciones a la legislación ambiental han permitido la ejecución de los proyectos de remediación que anteriormente bajo esquemas más rígidos, hubieran sido económica y técnicamente imposibles de realizar. A lo largo del libro, el lector conocerá la historia de seis casos emblemáticos de remediación y revitalización de pasivos ambientales en México, cómo fueron abordados para su caracterización y evaluación de riesgo ambiental y las tecnologías de remediación seleccionadas así como su aplicación.

Desde la perspectiva de los riesgos a la salud humana y del uso de suelo sin impedimentos, el suelo limpio es un recurso valioso en áreas densamente pobladas. La revitalización de áreas degradadas y/o contaminadas en los centros urbanos

contribuye a elevar la vida sustentable en éstos. En el país, los primeros ejemplos de revitalización de sitios contaminados han promovido en los ciudadanos una mejor calidad de vida. La conversión exitosa de sitios abandonados o contaminados en áreas productivas, recreativas y culturales se ha logrado gracias al esfuerzo y buena voluntad de los gobierno estatales y el federal, quienes han financiado su remediación, tales son los casos del “Parque Tres Centurias” en Aguascalientes, el “Parque Bicentenario” en la Ciudad de México y el “Parque Fundidora” y “Paseo de Santa Lucía” en Monterrey. Estos ejemplos constatan que remediar sitios contaminados puede incentivar al desarrollo urbano sostenible y amigable con el medio ambiente, en armonía con el sector público, privado y los ciudadanos afectados.

Si bien los casos presentan la solución exitosa a los problemas de contaminación, lo ideal sería que estos sitios no hubiesen sido afectados. Se espera que este libro sirva como testimonio de cómo se ha eliminado el impacto ambiental negativo y a la salud humana causada por algunos de los pasivos ambientales de mayor importancia en México, pero también como recordatorio. Todavía hay grandes retos por resolver como es el tema de la contaminación del agua subterránea, para el cual aún no se tienen límites máximos permisibles o directrices sobre cómo gestionar su remediación en el marco de una remediación integral.

Wini Schmidt
Rosa María Flores Serrano
Ulises Ruiz Saucedo

Editores

Contenido

Remediación y Revitalización de Sitios Contaminados: Casos Exitosos en México

Prólogo	VII
LUIS EDUARDO DE ÁVILA RUEDA	
Introducción	IV
WINI SCHMIDT, ROSA MARÍA FLORES SERRANO Y ULISES RUIZ SAUCEDO	
1. Remediación y revitalización del predio de los extalleres de Ferrocarriles Nacionales de México en Aguascalientes, Aguascalientes y su conversión en el Parque Complejo Ferrocarrilero Tres Centurias	I
JAVIER LLAMAS VIRAMONTES Y GABRIEL PÉREZ GALLEGOS	
2. Remediación del predio ocupado por Metales y Derivados, S. A., en Tijuana, Baja California	45
JAVIER LLAMAS VIRAMONTES Y GABRIEL PÉREZ GALLEGOS	
3. Remediación de la Ex Refinería 18 de Marzo, en Miguel Hidalgo, Distrito Federal	73
ULISES RUIZ SAUCEDO	
4. Remediación y revitalización del predio de Peñoles, Compañía Minera, Fundidora y Afinadora Monterrey, S. A. y su conversión en el Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa, en Monterrey, Nuevo León	113
BENJAMÍN LIMÓN RODRÍGUEZ Y MARTHA LETICIA HERREJÓN FIGUEROA	
5. Remediación del área de confinamiento provisional La Pedrera, en Guadalcázar, San Luis Potosí	151
ROSA MARÍA FLORES SERRANO Y MIGUEL ÁNGEL IRABIÉN ALCOECER	
6. Remediación de la Unidad Minera Industrial Texistepec (UMIT) en Texistepec, Veracruz	189
JUAN ÁVILA GONZÁLEZ, ROSA MARÍA FLORES SERRANO, ABELARDO PLACERES BEZARES E IGNACIO JUAN RAMÍREZ	

**Remediación y revitalización del
predio de los extalleres de Ferrocarriles
Nacionales de México en Aguascalientes,
Aguascalientes y su conversión en el
Parque Complejo Ferrocarrilero
Tres Centurias**

Javier Llamas Viramontes
Gabriel Pérez Gallegos

Abreviaturas y Acrónimos

ATSDR	Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de los Estados Unidos de América (traducción del inglés)
C RSC	Criterios Interinos para la Restauración de Suelos Contaminados
CP	Cociente de Peligro
CPbS	Concentración de Plomo en el Suelo
CRf	Compuestos de Referencia
CR T	Centro de Rehabilitación Infantil Teletón
DRf	Dosis de Referencia
ERA	Evaluación de Riesgo Ambiental
FCM	Ferrocarril Central Mexicano
F COTRECE	Fideicomiso Complejo Tres Centurias
FNM	Ferrocarriles Nacionales de México
FNML	Ferrocarriles Nacionales de México en Liquidación
FPC	Factor de Pendiente de Cáncer
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares
HDPE	Polietileno de Alta Densidad (traducción del inglés)
HFD	Hidrocarburos Fracción Diesel
HFDLA	Hidrocarburos Fracción Diesel y Largo de Cadena
HTP	Hidrocarburos Totales de Petróleo
HTP FM (Diesel)	Hidrocarburos Totales de Petróleo Fracción Media (Diesel)
EUBK	Integrated Exposure Uptake Biokinetic
NSECAM	Ingeniería en Servicios en Control Ambiental Industrial S A de C V
R S	Integrated Risk Information System
WEM	Industrial Waste Evaluation Management
LGPG R	Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos
LMP	Límite Máximo Permissible
MEP	Máxima Exposición Probable
NOM	Norma Oficial Mexicana
NPS	Nivel de Plomo en Sangre
PECT	Prueba de Extracción para Constituyentes Tóxicos
P R	Plan Integral de Restauración
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
R MSA	Residuos Industriales Multiquímicos S A
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
TPHCWG	Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group
TSE	Tecnología de Solidificación Estabilización
UAA	Universidad Autónoma de Aguascalientes

Aguascalientes

Remediación y revitalización del predio de los extalleres de Ferrocarriles Nacionales de México en Aguascalientes, Aguascalientes y su conversión en el Parque Complejo Ferrocarrilero Tres Centurias

1. Descripción del proyecto	5
2. Antecedentes históricos y uso futuro de los predios	7
3. Caracterización ambiental	12
3.1. Estudio geológico	13
3.2. Suelo y agua subterránea	13
3.3. Clasificación de áreas	17
4. Selección y aplicación de las tecnologías de remediación	19
4.1. Confinamiento controlado	20
4.2. Destrucción térmica	21
4.3. Biopilas	21
5. Evaluación de riesgo ambiental (ERA)	23
5.1. ERA para hidrocarburos	23
5.2. ERA para metales	37
6. Confinamiento dentro del sitio	30
6.1. Celda de estabilización 1	30
6.2. Celda de estabilización 2	34
7. Obras complementarias	37
8. Lecciones aprendidas	39
9. Fuentes de información	41



▲
Parque Tres Centurias Aguascalientes. Vista de la Casa Redonda y predio de los extalleres de FNM restaurado.

Remediación y revitalización del predio de los extalleres de Ferrocarriles Nacionales de México en Aguascalientes, Aguascalientes y su conversión en el Parque Complejo Ferrocarrilero Tres Centurias

1. Descripción del proyecto

El predio de los extalleres de Ferrocarriles Nacionales de México (FNM), ubicado en el centro de la ciudad de Aguascalientes y con una extensión de 88 hectáreas, representaba un problema ambiental debido a su contaminación por hidrocarburos y metales principalmente, derivado de las actividades que ahí se realizaron durante décadas, además de interrumpir el tránsito vehicular.



Figura 1. Vista del sur de los extalleres Generales de Construcción y Reparación de Máquinas y Material Rodante, en Aguascalientes, Ags., durante las labores de remediación (Fuente: INSECAMI).

Ya que Ferrocarriles Nacionales de México en Liquidación (FNML) no tenía los recursos para realizar las acciones de remediación, en el año 2004 el Gobierno del Estado

de Aguascalientes gestionó un esquema que permitiera remediar el sitio e incorporarlo al patrimonio del gobierno del estado. Para que no se convirtiera en una carga económica se propuso que hasta cierto punto fuera autofinanciable. Con este propósito el gobierno estatal creó un fideicomiso denominado Fideicomiso Complejo Tres Centurias (FICOTRECE) que contempló la remediación del predio y su rehabilitación arquitectónica, denominando a este gran proyecto Complejo Ferrocarrilero Tres Centurias.

Para la remediación ambiental del predio se contrató a la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) y posteriormente, a la compañía Ingeniería en Servicios en Control Ambiental Industrial (INSECAMI). Ambas instancias diseñaron el esquema de caracterización y remediación del sitio acorde con la normatividad vigente. Este esquema contemplaba la caracterización del sitio, evaluaciones del riesgo ambiental, aplicación de tecnologías de remediación, remediación del suelo, y la evaluación y limpieza de los edificios (*Figura 1*).

2. Antecedentes históricos y uso futuro de los predios

En 1873 se inauguró el ferrocarril mexicano bajo el mandato del presidente Sebastián Lerdo de Tejada, quien realizó el primer viaje en tren desde la Ciudad de México hasta el puerto de Veracruz el 1 de enero de ese año (Díazmercado, 2009). Sin embargo, las líneas férreas empezaron a tenderse desde la década de 1850, alcanzando el mayor desarrollo en la década de 1880, bajo la presidencia de Porfirio Díaz, quien dio la concesión a la compañía Ferrocarril Central Mexicano (FCM) con sede en Boston, Massachusetts, EUA, para construir una línea férrea que enlazara a la Ciudad de México con Paso del Norte (hoy Ciudad Juárez) (INDAABIN, 2010; Guajardo, 2007). Fue así que la mañana del 24 de febrero de 1884, los habitantes de Aguascalientes recibieron la primera locomotora de vapor y en 1890 se logró unir a esta ciudad con el Golfo de México, con el fin de controlar el tráfico de carga que salía para Veracruz y Tampico (GEA, 2010a).

Poco a poco la actividad ferroviaria en el país fue creciendo y por las características geográficas privilegiadas de la ciudad de Aguascalientes, la compañía FCM decidió establecer ahí los Talleres Generales de Construcción y Reparación de Máquinas y Material Rodante, cuya construcción inició en 1898 y concluyó en 1903 en los terrenos que pertenecían a la hacienda Ojocaliente.

Entre todos los talleres de Ferrocarriles Nacionales de México existentes el principal era el de la ciudad de Aguascalientes, Talleres Generales de Construcción y Reparación de Máquinas y Material Rodante, que se terminó de construir en el año de 1903 (FICOTRECE, 2010) y llegó a ser el más grande en su tipo de América Latina (Figura 2).



Figura 2. Vista sur de los Talleres Generales de Construcción y Reparación de Máquinas y Material Rodante, en Aguascalientes, Ags., a principios del siglo XX (Fuente: GEA, 2010a).

Los talleres de Aguascalientes se constituyeron como los más importantes del país; tenían como función principal el mantenimiento y reparación de los equipos de tracción y de remolque, además que ahí se construyeron muchos trenes y se brindó capacitación a numerosos trabajadores que acudían de toda la república y también de Centroamérica. Hasta la década de 1970, el 80 por ciento de la fuerza laboral del estado se ocupaba en el ferrocarril (GEA, 2010b).

El predio se localiza en la zona oriente de la ciudad de Aguascalientes, en una extensión de 649,368.63 m². El



Figura 3. Croquis de la ubicación de los principales edificios existentes en los extalleres de FNM en Aguascalientes, Ags., antes de la remediación. En la Tabla 1 aparecen los nombres de los edificios, según la numeración aquí presentada (Fuente: INSECAMI).

predio se localiza en la zona oriente de la ciudad de Aguascalientes, tiene un área de 649,368.63 m². El polígono es regular con forma trapezoidal, su lado más largo tiene una orientación de Norte a Sur con una longitud de 2,030 m. De oriente a poniente el lado más largo tiene una longitud de 540 m. El perímetro del polígono es de 4,576 m.

En el siguiente croquis se muestra la ubicación de los principales edificios de los extalleres de FNM (Figura 3), donde se desarrollaron diversas actividades, principalmente de reparación, mantenimiento y almacenaje además de administrativas. En la Tabla 1 aparecen los nombres de tales edificaciones.

No.	NOMBRE DEL EDIFICIO	No.	NOMBRE DEL EDIFICIO	No.	NOMBRE DEL EDIFICIO
1	Noria de 11 niveles	17	Carros	33	Laminación y Troquelado
2	Noria	18	Truck	34	Báscula A
3	Tanque Elevado	19	Sistemales	35	Báscula B
4	Desmantelado	20	Carpintería Mecánica	36	Almacén 2
5	Herrería	21	Carpintería	37	Almacén 3
6	Fumigación	22	Fundición de Zapatas	38	Taller de Reparación de Locomotoras
7	Báscula	23	Talleres varios	39	Casa de Fuerza I
8	Fosa de Cruz	24	Fundición de Fierro Gris	40	Pailería Mecánica
9	Casa de Fuerza 2	25	Almacén General	41	Taller Eléctrico
10	Sopleteado (1, 2 y 3)	26	Taller de Pintura y Es-tensilado	42	Taller de Soldadura y Varios
11	Ejes y Ruedas	27	Taller de Pintura y Es-tensilado	43	Tanque Elevado
12	Baterías	28	Taller de Combustión Interna	44	Edificio frente a tanques
13	Coches	29	Fundición de Bronce	45	Casa Redonda
14	Control de Personal	30	Tanque de Chapopote	46	Edificios de Zona de Abastos
15	Clínica	31	Taller de Enmetalado		
16	Caseta de entrada área norte	32	Almacén		

▲ *Tabla 1. Nomenclatura de los edificios mostrados en la Figura 3, croquis de ubicación de los principales edificios de los extalleres de FNM en Aguascalientes, Ags.*

La Casa Redonda¹ fue el corazón de los talleres, ahí llegaban las locomotoras para ser desmanteladas y las piezas se llevaban al departamento correspondiente para ser reparadas o sustituías por nuevas. Posteriormente, las locomotoras eran armadas. Este edificio se demolió cuando se renovaron los talleres en los años sesenta al cambiar la tecnología de las locomotoras de vapor a diesel. La cimentación de la Casa Redonda fue descubierta en 2004, durante las labores de remediación (Figura 4).



Figura 4. Cimientos de la Casa Redonda en los Talleres de FNM de Aguascalientes. Atrás se observa la estructura del Taller de Reparación de Locomotoras (Fuente: INSECAMI).

Otras áreas importantes en este gran predio fueron la Casa de Fuerza, la Zona de Abastos, el Taller de Reparación de Locomotoras, los Sistemales, el Área de Laminado y los Talleres de Fundición (de zapatas, bronce y fierro).

En la Casa de Fuerza se generaba la energía necesaria para todos los departamentos de los talleres. La Casa de Fuerza 1 (Figura 5) ubicada al sureste del predio, era la más importante; la Casa de Fuerza 2 se situaba al noreste. Debido al uso de combustibles en sus calderas y las actividades realizadas en sus alrededores ambos sitios se encontraron contaminados con hidrocarburos, y la Casa de Fuerza 1, próxima al área de Pailería también estaba contaminada por metales.

En los edificios de fundiciones, donde se fundían piezas metálicas inservibles para fabricar nuevas piezas. Ahí había un área para la fundición de bronce² y otra de fierro

gris. Estos suelos estaban contaminados principalmente por plomo, sobre todo en las áreas donde se ubicaban los hornos. En el año de 1991, siete departamentos del edificio de Fundición de Zapatas fueron clausurados debido a que estaban contaminados y representaban un riesgo para los trabajadores³. Sin embargo, durante las actividades de remediación de estas tres áreas, la zona de fundición de zapatas fue la menos contaminada (Figura 6).



Figura 5. Estructura de la Casa de Fuerza 1 durante las labores de remediación (Fuente: INSECAMI).



Figura 6. Vista de los edificios de fundiciones durante las labores de remediación (Fuente: INSECAMI).

1. Plataforma giratoria ubicada en la parte central que permitía dirigir a las locomotoras a diferentes hangares o fosas de inspección ubicadas alrededor de la plataforma giratoria.

2. Los "bronces" que son una serie de estructuras de ese material (chumaceras, pernos, etc.) que permiten unir las ruedas a los carros y sufren mucho desgaste, por lo que es preciso reemplazarlas cada cierto tiempo.

3. Fuente: La Jornada en línea, Aguascalientes del 14 de octubre de 2009 http://newarior.com/jornadal/index.php?option=com_content&view=article&id=6951:advierten-ex-ferrocarrileros-sobre-los-posibles-enganos-en-la-liquidacion-de-trabajadores-de-lfc-&catid=5:sociedad-y-justicia&Itemid=11 (consultado en octubre de 2010).



▲
Figura 7. Vistas del Taller de Reparación de Locomotoras. A) Vista de los fosos de reparación. B) Obras de remediación. C) Exterior del edificio restaurado, al fondo se ven las instalaciones del CRIT dentro del mismo terreno de los talleres. D) Interior del edificio una vez restaurado como centro de convenciones (Fuente: INSECAMI).

La Zona de Abastos, al Sur de las instalaciones, constaba de varios edificios donde se abastecía a los trenes de combustible, arena, agua y demás insumos necesarios para operar. Es decir, aquí se alistaba a las locomotoras antes de salir de los talleres. Esta zona estaba altamente contaminada por hidrocarburos debido a las malas prácticas al momento de suministrar combustible. El edificio principal de la Zona de Abastos se construyó sobre el área que antes ocupaba la Casa Redonda.

El edificio del Taller de Reparación de Locomotoras, era uno de los más grandes. En él se tenían tres fosos de reparación donde los trabajadores inspeccionaban las entrañas de las maquinarias sin problema alguno (Figura 7). Esta área estaba contaminada con hidrocarburos. Ahora alberga un centro de convenciones.

En el área de Sistemales se proveía todo lo referente a los sistemas eléctricos de las locomotoras por lo que la contaminación en esta zona era poco importante. Casi al lado de este edificio se encuentra el edificio de Carros en donde se almacenaba todo tipo de sistemas de arrastre (carros, góndolas, tanques). En esta zona de 80,000 m² se ha construido el Nuevo Hospital de Especialidades Miguel Hidalgo.

En el área de almacenes (Almacén General, Almacén No. 1, Almacén No. 2 y Almacén No. 3) se acopiaban materiales como madera, combustibles, piezas metálicas y otros insumos empleados en la construcción y reparación de los carros y locomotoras. Esta zona estaba altamente contaminada por hidrocarburos. Posteriormente a su remediación se decidió emplazar ahí el Centro de las Artes de Aguascalientes que ocupa un área aproximada de 50,000 m². El edificio del Almacén General ha sido restaurado arquitectónicamente y ahí se instaló la Escuela de Danza. Posteriormente en los edificios de Almacén No. 2 y Taller de Pintura y Estensilado se han adecuado otras escuelas de arte.

La Chapopotera era una fosa excavada en el terreno no provista de recubrimiento, donde se depositó combustible a cielo abierto (Figura 8) para suministrar a la Casa de Fuerza 1. A un costado de La Chapopotera había tres tanques (dos horizontales y uno vertical) de aproximadamente 25 m de diámetro desde donde se bombeaba el combustible hacia la Casa de Fuerza.

Durante la remediación de esta área de alta complejidad, se encontraron hidrocarburos del tipo de los asfaltenos y gran cantidad de material heterogéneo, como

escoria de fundición, fragmentos y piezas de metales, así como madera y otros objetos, se recuperaron 185,000 litros de combustóleo que se destinaron a combustión térmica en una cementera, así como 50,000 m³ de suelo contaminado que fueron tratados y confinados en una celda de estabilización. Parte de esta zona fue donada al Centro de Rehabilitación Infantil Teletón (CRIT).

En el Edificio de Pailería, uno de los más antiguos del predio, se realizaban labores de soldadura. Se encontró muy contaminado por aceites. El edificio tenía una

armadura de madera que se preservó por ser parte del patrimonio. Fue sometida a un proceso de eliminación de contaminantes al igual que los otros edificios restaurados. El resto de la estructura se encontró en mal estado y fue demolida. Los edificios que se han descrito son los principales en cuanto a contaminación y área de afectación. La caracterización y remediación del sitio gira en torno a ellos, razón por la cual se les usará a lo largo del texto como puntos de referencia.

Resumen cronológico de los eventos significativos en el predio del proyecto.



Figura 8. Vista de La Chapopotera. A) Fosa de chapopote. B) Vista de los tanques de almacenamiento (Fuente: INSECAM).

FECHA	EVENTO
1903-1907	Establecimiento de los Talleres Generales de Construcción y Reparación de Máquinas y Material Rodante, en la ciudad de Aguascalientes.
1947	Inició la reparación de locomotoras a base de diesel y también las de vapor.
1959	Ampliación y remodelación de los talleres.
1963	Todas las locomotoras reparadas operaban a base de diesel.
1963-1967	Renovación de los talleres y construcción de nuevas áreas.
1970	Las calderas de fundición que usaban combustóleo se cambiaron a diesel.
1989-1993	Clausura de las áreas de fundición de fierro gris y bronce.
1994	Inició la privatización de FNM con la liquidación de los talleres.
1997	Los Extalleres de FNM estaban prácticamente abandonados.
28.04.2002	El Gobierno del Estado de Aguascalientes firmó el convenio para revitalizar el sitio e integrarlo al patrimonio social y cultural de la entidad.
2012	Culminada la remediación y revitalización del sitio.

▲ **Tabla 2.** Cronología de los principales eventos relacionados al predio de los extalleres de Ferrocarriles Nacionales de México, en Aguascalientes, Ags., México.

3. Caracterización ambiental

Con la finalidad de conocer el grado de contaminación asociado al predio de los extalleres de FNM en Aguascalientes, Ags. y posteriormente establecer las medidas de remediación más adecuadas, la Secretaría de Desarrollo Social del Estado de Aguascalientes, a través de la Subsecretaría de Ecología estableció un convenio con la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) para desarrollar el proyecto denominado: “Caracterización

del grado de contaminación y alternativas de remediación ambiental en los extalleres de Ferrocarriles Nacionales en Aguascalientes” el 28 de abril del 2002. Esta actividad contempló la investigación geológica y la distribución de contaminantes, fue realizada por el Laboratorio de Estudios Ambientales, adscrito al Centro de Ciencias Básicas de la UAA entre abril y octubre del 2002.

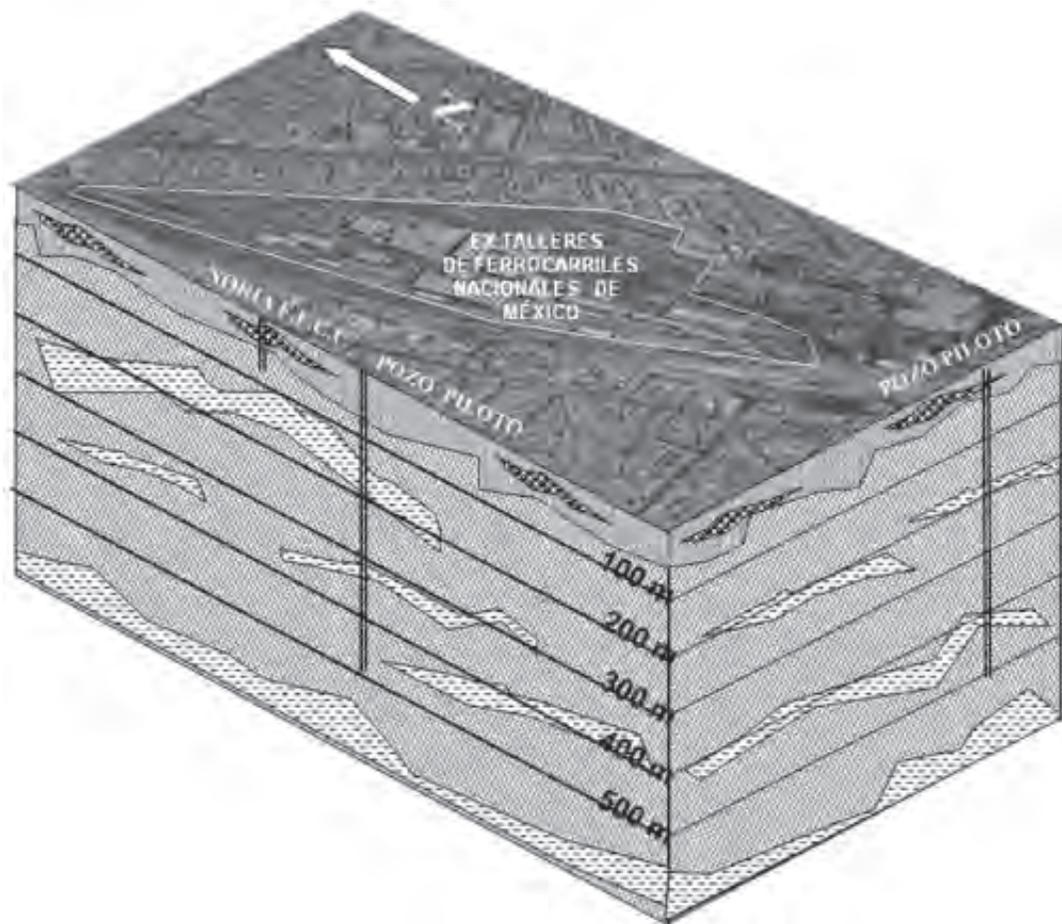


Figura 9. Estratigrafía de la zona de estudio. La parte superior indica suelo tobáceo; se observan zonas de relleno de diversos materiales (escorias, madera y tepetate, entre otros). La parte sólida indica la presencia de tobas arcillosas. Se observan lentes de arena y arcilla distribuidos heterogéneamente (Fuente: INSECAMI).

3.1. Estudio geológico

Para realizar un estudio estratigráfico la UAA contrató a la empresa Geología e Ingeniería Aplicada, S.A. de C.V. (GIA), y al Bufete Geológico e Ingeniería Básica, S.A. de C.V. Se tomaron como referencia los registros eléctricos de algunos pozos localizados en el área circunvecina a los extalleres que suministran agua potable a la zona, además, se realizaron varios macrosondeos: 1) en la parte sur de la recicladora de aceite en el área de abastos, 2) en la zona donde se localizó la Casa Redonda, 3) en la parte central de La Chapopotera, 4) en el área que fue donada al CRIT, y 5) en la Noria de once niveles ubicada en la zona nororiente, cuyo diámetro es de 7.5 m y su profundidad es de 60 m.

Los resultados indicaron la presencia de horizontes de materiales con diferentes conductividades hidráulicas (Figura 9). Se identificó la presencia de materiales constitutivos

como toba arenosa, arena fina a gruesa, limo-arenoso y arena-limosa, fragmentos de roca volcánica y caliza principalmente, y depósitos de arcilla en capas discontinuas de manera interdigitada donde los espesores y litología varían, como es característico en depósitos de tipo aluvial. A mayor profundidad se encontró toba arcillosa con lentes de arcilla y arena distribuidos heterogéneamente, lo cual hace poco probable la contaminación del acuífero profundo por la migración de compuestos producidos por las actividades de los extalleres de Aguascalientes.

3.2. Suelo y agua subterránea

Para la caracterización del suelo se tomaron muestras a diferentes profundidades en 328 puntos de muestreo (Figura 10).



Figura 10. Actividades relacionadas a la caracterización de suelo del sitio.



Figura 11. Zonas delimitadas para el muestreo del sitio y ubicación de puntos de muestreo. Los puntos rojos fueron asignados a juicio del experto en función del levantamiento técnico y los azules se ubicaron siguiendo una retícula predeterminada (Fuente: INSECAMI).



Figura 12. Actividades relacionadas a la toma de muestras de suelo del sitio.

Con los datos reunidos en el levantamiento técnico se delimitaron las principales áreas susceptibles de estar contaminadas. Para este propósito el sitio se dividió en tres zonas como aparece en la Figura 11.

Durante el proceso de muestreo de hidrocarburos se identificaron los sitios para la toma de muestras, mismas que se obtuvieron con tubos de doble caña. La concentración de hidrocarburos ligeros (volátiles) se determinó *in situ* mediante un analizador portátil PETROSENSE®PHA-100 Portable. El analizador tiene un sensor de fibra óptica (FOCS®, fiber optic chemical sensor) sensible a hidrocarburos derivados del petróleo y se empleó como un indicador para delimitar la profundidad máxima del muestreo.

En la Figura 12 se presenta el esquema que se siguió en la toma de muestras de hidrocarburos. Las muestras se preservaron para su traslado a un laboratorio autorizado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), donde se determinaron las cantidades de hidrocarburos totales de petróleo (HTP), hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) e hidrocarburos fracción diesel (HFD) y largo de cadena (HFDLC).

Los análisis realizados fueron los solicitados por la Norma Oficial Mexicana (NOM-EM-138-ECOL-2002) que establecía los límites máximos permisibles de hidrocarburos en el suelo. Se utilizaron tres métodos analíticos: el EPA 418.1 para HTP, EPA 8310-1986M para HAP y EPA 8015 M para HFD y largo de cadena.

Adicionalmente a la determinación de hidrocarburos, en 187 de las 328 muestras de suelo obtenidas, se analizaron los siguientes metales: aluminio, níquel, plomo, manganeso, cromo total y cobre. En algunas zonas las profundidades de muestreo fueron de 0.05 a 105 m y las muestras se tomaron con utensilios de teflón; entre cada muestra los utensilios se lavaron con la solución Liqui-Nox®-Agua. Las muestras se analizaron mediante espectrofotometría de absorción atómica para cuantificar metales pesados en el Laboratorio de Estudios Ambientales de la UAA. Los métodos analíticos utilizados fueron: EPA 7316 (aluminio), EPA 7520 (níquel), EPA 7420 (plomo total), EPA 7085 (manganeso), EPA 7190 (cromo total) y EPA 7463 (cobre).

Los recipientes usados para las muestras de suelo para el análisis de hidrocarburos se lavaron con detergente Extran® y agua de la llave, se enjuagaron con agua destilada y finalmente con metanol grado reactivo analítico. Para el caso de metales, los frascos se lavaron con Extran® y agua de la llave, se remojaron toda la noche en una solución de ácido nítrico y agua desionizada (10:100) y se enjuagaron con abundante agua desionizada.

Con los resultados de espectrofotometría (para los metales) y los datos de las concentraciones de HTP fracción ligera (para la contaminación por hidrocarburos) y de las profundidades límite de perforación, se obtuvo la distribución espacial de los contaminantes mediante modelos geoestadísticos (Figura 13).

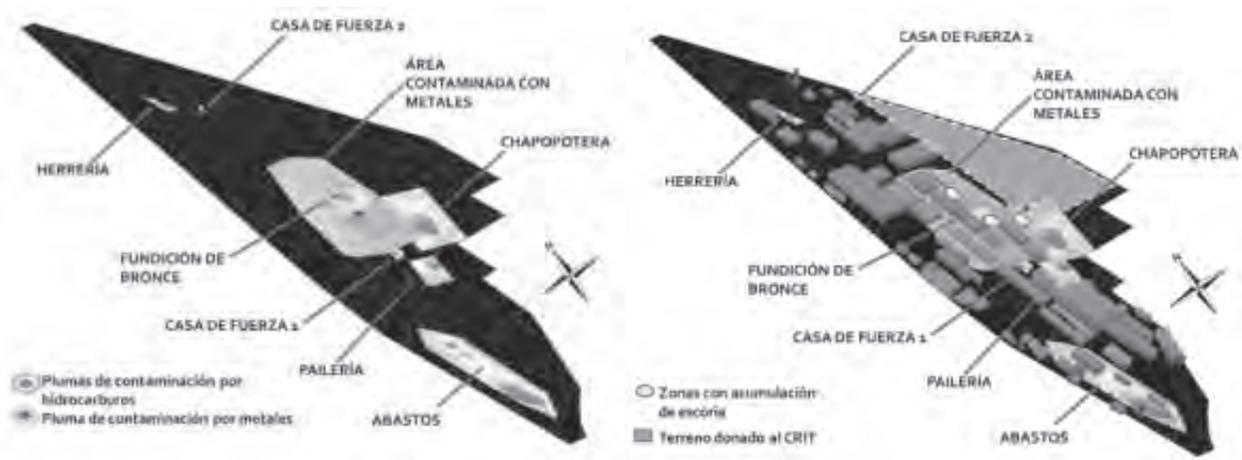


Figura 13. Distribución de las principales plumas contaminantes de hidrocarburos y metales en los extalleres de FNM en Aguascalientes. El plomo se usó como indicador (Fuente: INSECAMI).

ZONA	ÁREA (m ²)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE MUESTREO (m)	VOLUMEN DE SUELO (m ³)*
Abastos	6,800	9.5	22,000
Locomotoras/Pailería	840	2.4	1,450
Frente a Casa de Fuerza I	598	3.2	1,315
La Chapopotera	7,084	2.7	10,626
Fundición de bronce	2,550	2.9	5,610
Herrería	1,450	0.75	960
Casa de Fuerza 2	660	1.9	720
Zona contaminada por metales	15,000	10.5	1,745

▲ **Tabla 3.** Resumen de las principales zonas contaminadas en el predio de los extalleres de Ferrocarriles Nacionales de México, en Aguascalientes, Ags.

* Suelo con concentraciones relevantes de hidrocarburos o metales. Para el cálculo del volumen de suelo contaminado se consideraron concentraciones de plomo por arriba de 200 mg/kg.

En la Tabla 3 se presenta el resumen de las áreas y volúmenes contaminados con las sustancias mencionadas.

Los resultados indicaron que las muestras del suelo que presentaron mayores concentraciones de HTP correspondieron a las áreas de: La Chapopotera (189,638 mg/kg), Herrería (77,508 mg/kg), Casa de Fuerza I (43,480 mg/kg) y Pailería (32,818); en estas zonas también se presentaron las mayores concentraciones de HFD. Para el caso de las zonas de Abastos, Casa de Fuerza 2 y Fundición de Bronce existió una mayor proporción de HFD; en estos casos las concentraciones de HFD fueron de 3,402 mg/kg, 2,361 mg/kg y 973 mg/kg respectivamente, y la proporción HTP/HFD \times 100 fue de 25.9%, 40.45% y 15.6%. Estos resultados sirvieron para corroborar la ubicación de los sitios donde el principal contaminante fue el diesel así como áreas donde se manejaron hidrocarburos derivados del petróleo de mayor peso molecular, como combustóleo, asfaltenos, grasas y aceites de motor.

Los tiempos de retención de los perfiles cromatográficos de las muestras de suelo analizadas por el método EPA 8015 mostraron la presencia predominante de compuestos relacionados con el rango diesel y no con

la gasolina. Lo anterior fue congruente con la información recopilada durante la etapa del levantamiento técnico, donde se observó que sólo en áreas muy concretas y limitadas de los talleres se utilizó gasolina, por ejemplo, en la estación de suministro de combustible para vehículos empleados. La ausencia se ve reforzada por los bajos pesos moleculares de las sustancias contenidas en este combustible que propician su volatilidad y degradación.

Los HAP se localizaron únicamente en las zonas de: la Chapopotera, la recicladora de aceite y el área de suministro de combustible, estas últimas localizadas en la zona de Abastos.

En el caso de los metales sobresalió de forma sistemática el plomo (Pb) que presentó una concentración máxima de 22,285 mg/kg. Por esta razón, y al considerar los efectos tóxicos de este metal, se decidió tomar al plomo como indicador de la contaminación del sitio. En la Figura 14 se muestra el comportamiento de éste y de los otros metales analizados.

Los sitios que presentaban mayores concentraciones de Pb fueron las áreas de fundición de bronce, enmetalado, laminado y troquelado, parte sur de fundición de hierro

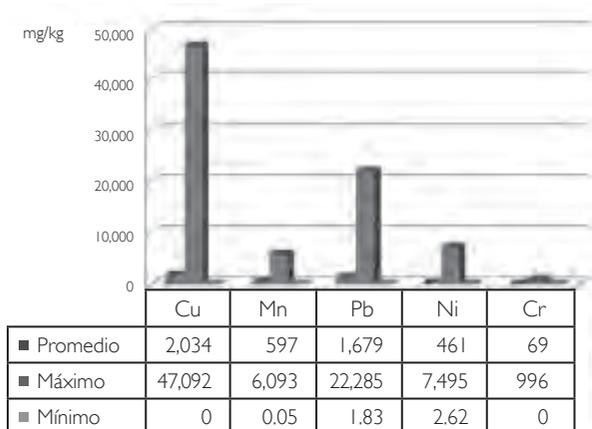


Figura 14. Concentraciones (mg/kg) de los metales encontrados en el suelo de los extalleres de FNM en Aguascalientes.

gris y parte norte de fundición de zapatas. Además, una zona comprendida en la parte oriente de los edificios de fundición de bronce y enmetalado.

Antes del año 2005, cuando se realizó el muestreo de suelos, no existía NOM para la regulación de este tipo de contaminantes, por lo que se utilizaron los Criterios Interinos para la Restauración de Suelos Contaminados (CIRSC) (PROFEPA, 1998) como valores de referencia⁴.

En las zonas de fundiciones se observó la presencia de un polvo fino de gran capacidad de dispersión eólica e hidrológica, y también con un alto potencial de biodisponibilidad. Este polvo se localizó principalmente dentro de los edificios de fundición de bronce, laminado y troquelado, y fundición de hierro gris, en donde se observaron espesores con una variación de unos pocos centímetros hasta 0.4 m. Por este motivo, para el rescate de estos edificios se consideró también el desmantelamiento de las estructuras que se podían desensamblar y la limpieza de las superficies fijas mediante sandblasteo⁵.

Las determinaciones analíticas del agua subterránea se realizaron a las muestras obtenidas de seis pozos de extracción de agua potable, localizados dentro de los extalleres y en sus alrededores. Se analizaron los metales

contemplados dentro de la NOM-127-SSA1 2000 que establece los LMP de calidad del agua potable.

Además, la Subsecretaría de Ecología del Estado de Aguascalientes contrató los servicios del Laboratorio ABC, Química e Investigación y Análisis S.A. de C.V. para cuantificar HAP y HTP. Todas las muestras analizadas presentaron ausencia de hidrocarburos y metales, debido a que el nivel estático se localiza a 140 m de profundidad, subyaciendo a una gran cantidad de estratos geológicos con bajas conductividades hidráulicas.

3.3. Clasificación de áreas

Con base en el análisis de los resultados obtenidos durante el muestreo del suelo, las áreas y edificios se clasificaron en tres tipos (Tabla 4) de acuerdo con el grado de contaminación y las medidas de remediación que se necesitaban (Figura 10). Las áreas Clase I fueron aquellas que no requerían de remediación, las Clase II requerían de ciertas acciones in situ para acelerar los procesos de degradación, y en las Clase III fue necesario retirar y confinar el material contaminado.

Áreas y edificios Clase I:

- Se encontraban edificios de reciente construcción.
- No se utilizaron, almacenaron o derramaron sustancias consideradas como peligrosas.
- El grado de afectación visible era menor a un 15% del total del área.

Áreas y edificios Clase II:

- El grado de afectación visible era menor al 50% del total del área.
- Con evidencia de derrames esporádicos.
- Existían antecedentes de intensa actividad y del uso de considerables cantidades de sustancias.

Áreas y edificios Clase III:

- El grado de afectación visible era por lo menos de un 80% del total del área.
- Había registros y evidencias de derrames o depósitos de materiales considerados como peligrosos de forma muy frecuente.

4. Los valores de referencia de los CIRSC (uso de suelo residencial) son 27 mg/kg para Cu, 380 mg/kg para Mn, 200 mg/kg para Pb, 150 mg/kg para Ni y 375 mg/kg para Cr.

5. Del inglés sandblasting, procedimiento que consiste en aplicar una corriente de material abrasivo (como la arena) a alta presión con el propósito de pulir, dar forma o eliminar recubrimientos y contaminantes de las superficies.

CLASE	ZONA SUR	ZONA CENTRO	ZONA NORTE
I	Áreas no mencionadas en las clases II y III (88.1%)	Áreas no mencionadas en las clases II y III (78.1%)	Áreas no mencionadas en las clases II y III (97.3%)
II	Área de pruebas, Aceitera, Tanques elevados, Área de influencia (2.6%)	Zona de influencia de Fundiciones y La Chapopotera, Taller de Pintura I (7.2%)	Taller de Pintura 2, Baterías, Fosa en Cruz, Ejes y Ruedas, Área de influencia (2.5%)
III	Reparación de Locomotoras, Cobertizo de Locomotoras, Gasolinera, Abastos (9.3%)	Fundición de Fierro Gris, Laminado y Troquelado, Fundición de Zapatas, Enmetalado, Carros, La Chapopotera (14.7%)	Casa de Fuerza 2 (0.2%)

▲ **Tabla 4.** Clasificación de áreas por grado de contaminación y medidas de remediación en los Extalleres de FNM en Aguascalientes.
 Nota: Los porcentajes indican la proporción del terreno dentro de cada clasificación y zona.

4. Selección y aplicación de las tecnologías de remediación

Una vez clasificadas las áreas de acuerdo con el grado de contaminación como se indicó en la sección anterior de este texto, se asignaron las acciones de remediación dentro del Plan Integral de Restauración (PIR), el cual fue aprobado por la Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes de la SEMARNAT en el año 2002. Para las áreas Clase I se estableció la no acción (no se aplicó ningún tipo de medida de remediación); para las áreas Clase II se estableció la remediación mediante biopilas⁶; para las áreas Clase III se estableció el confinamiento del material afectado en un Centro Integral para el Manejo, Tratamiento, Aprovechamiento y Disposición Final de Residuos Industriales y Peligrosos (CIMARI), así como el confinamiento dentro del sitio y el reciclado térmico en hornos cementeros.

Entre los años 2002 y 2004, del área de fundiciones se retiraron 6,912 toneladas de suelo contaminado con metales pesados que fueron transportadas al CIMARI de Residuos Industriales Multiquímicos (RIMSA) en Mina, Nuevo León. Sin embargo, los monitoreos efectuados posteriormente indicaron la necesidad de retirar un mayor volumen de suelo. Para cumplirlo, se realizó un estudio de evaluación de riesgo ambiental (ERA) que estableció un límite máximo permisible (LMP) con base en riesgo a la salud humana de 2,000 mg/kg. El suelo que rebasó este valor se confinó dentro de dos celdas de estabilización construidas en el sitio para este propósito.

Para el caso de La Chapopotera, el principal contaminante fue el combustóleo (producto libre), que se encontraba

FECHA	EVENTO
Abr-Oct 2002	Caracterización ambiental del predio por parte de la UAA.
15 Oct 2002	Inició la primera etapa de la remediación por parte de la UAA e INSECAMI. Área Centro-Oriente: Chapopotera, Laminado y Troquelado, Enmetalado de Bronce, Fundición de Fierro Gris, Fundición de Zapatas y Bronces, Casa de Fuerza I. Área norte: Casa de Fuerza II y Herrería.
Ene-Dic 2003	Evaluación de riesgo ambiental para determinar el riesgo a la salud humana de las áreas afectadas por hidrocarburos que fueron remediadas: Abastos, Pailería/Locomotoras, Casa de Fuerza I, Chapopotera, Fundición de Bronce, Casa de Fuerza 2 y Herrería.
02 Jul 2003	Inició la remediación del área de Abastos y sobre esta área se iniciaron los trabajos de construcción de lo que sería la Avenida del Ferrocarril. Se inició la ampliación de la calle Heroico Colegio Militar.
21 Jul 2003	Inició la segunda etapa de remediación de suelo por parte de INSECAMI. Se incluyeron los edificios del suroriente: Taller de Reparación de Locomotoras, Pailería, Taller Eléctrico y Soldadura. Nororiente: Sistemales, Coches, Baterías. Centro-oeste: Carros, Talleres de Pintura y Estensilado.
25 Ago 2003	Se entregó a FICOTRECE el edificio de Taller de Reparación de Locomotoras para su cuidado y mantenimiento.

▲ **Tabla 5.** Cronología de los principales eventos relacionados con la remediación del predio de los extalleres de Ferrocarriles Nacionales de México, Aguascalientes, Ags., México.

6. Proceso biológico de remediación mediante el cual los microorganismos presentes en el medio afectado degradan a los contaminantes orgánicos, los cuales les sirven de sustrato. El suelo se extrae y se apila fuera de su lugar de origen, adicionando nutrientes como fósforo y nitrógeno así como aire y humedad; en ocasiones se adicionan bacterias previamente aclimatadas para hacer más eficiente el proceso.

FECHA	EVENTO
Jul-Oct 2003	Biorremediación mediante biopilas del suelo extraído de La Chapopotera y otras áreas (compañía Züblin).
25 Jul 2003 a 06 Feb 2004	Desmantelado y demolición de algunas estructuras como el cobertizo de Fundición de Bronce y el edificio de Pailería.
Sep 2004 a Dic 2005	Evaluación de riesgo ambiental para determinar el riesgo a la salud de las áreas afectadas por metales (plomo): área de Fundiciones.
Nov 2004	Se confinó en RIMSA el material contaminado con hidrocarburos de las áreas de la zona norte: al poniente del edificio de Desmantelado, al norte del edificio del Ejes y Ruedas, de la Casa de Fuerza 2, y en el interior del edificio de Fundición de Zapatas.
May 2005	Culminó la primera etapa de remediación del predio.
Abr 2005 a Oct 2005	Construcción de la primera celda de estabilización en el área que ocupaba el edificio de Herrería (empresa INSECAMI).
2006	Construcción del par vial Paso inferior Av. Norberto Gómez - Gabriela Mistral - Blvd. Guadalupano sobre la primera celda de estabilización.
Abr 2008 a Feb 2009	Construcción de la segunda celda de estabilización en el área que ocupaba el edificio de Fundición de Fierro Gris.
Feb 2009	Inició la remediación de la tercera etapa remediación en la parte norte del predio: Ejes y Ruedas, Herrería y Fosa de Cruz.
2010	Se ha restaurado aproximadamente el 90% del predio. Se espera tener culminada la remediación y revitalización del sitio en 2012.

▲ *Tabla 5. Continuación.*

al Sur de la zona (*Figura 16*). Se retiró del lugar y fue enviado a la planta de la cementera Cruz Azul ubicada en el estado de Hidalgo para someterlo al proceso de destrucción térmica. El resto del material con concentraciones muy altas de hidrocarburos y que presentaba una consistencia más sólida se confinó en las celdas de estabilización antes mencionadas. El material menos contaminado fue tratado dentro del predio mediante la técnica de biopilas. En esta zona, sobre todo al Norte, se extrajo material hasta una profundidad de 12 m. Una vez retirado el material contaminado y de haber verificado que el nivel de limpieza logrado cumpliera con los criterios establecidos se rellenó con suelo limpio.

La Tabla 5 muestra el resumen de las principales acciones de remediación realizadas.

4.1. Confinamiento controlado

El suelo contaminado con hidrocarburos, combustóleo principalmente, procedía en su mayoría del área donde se encontraba el edificio de Pailería, del norte de la Casa de Fuerza 2 y oriente de la Casa de Fuerza 1 y el procedente del interior del edificio de fundición de zapatas.

El suelo contaminado con metales procedía de la vialidad al poniente del área de fundición de bronce, del interior de nave de fundición de zapatas y del oriente de fundición de fierro gris. Otros residuos dispuestos en RIMSA fueron 19 tambos de material impregnado con aceite dieléctrico y 60 tambos con capacidad de 200 litros

cada uno que contenían material con hidrocarburos producto de la limpieza realizada en el interior de la Casa de Fuerza I.

4.2. Destrucción térmica

Parte del combustóleo que se encontraba dentro de La Chapopotera era producto libre (Figura 15) que ante las altas temperaturas imperantes en Aguascalientes durante los meses de calor se licuaba. Se aprovechó esta circunstancia para extraer el líquido por gravedad hacia unos tanques colocados en el sitio para ese propósito. El material reunido se trasladó a la planta de la cementera Cruz Azul ubicada en el estado de Hidalgo, para someterlo al proceso de destrucción térmica. En total se transportaron 185,000 litros de este material.

La destrucción térmica es el proceso mediante el cual las moléculas de un residuo tóxico o peligroso se rompen



▲
Figura 15. Vista de La Chapopotera (Fuente: INSECAMI).

en otras de menor tamaño mediante la aplicación de altas temperaturas. La temperatura necesaria para romper estas moléculas depende tanto de las características del residuo como del horno de combustión. Durante el proceso son comunes las temperaturas arriba de 600° C (OPS, 2006). Es común su uso para la destrucción térmica el uso de las altas temperaturas alcanzadas en los hornos cementeros (mayores a 1000° C); en ellos el

residuo es usado como un combustible alternativo para producir el calor necesario en sus procesos.

La industria cementera contribuye a la reducción global de las emisiones de CO₂ acordadas en el Protocolo de Kioto en el año de 1997 a través de tres mecanismos: el mejoramiento de la eficiencia energética, la sustitución de caliza y demás materias primas por residuos minerales y otros aditivos, y la sustitución del combustible fósil por desechos y biomasa. La conjunción de los dos últimos mecanismos origina lo que en algunos países se denomina coprocesamiento de residuos industriales, que consiste en la eliminación ambientalmente segura de residuos industriales, aprovechando en forma eficiente la energía térmica y/o componentes químicos que ese residuo pueda aportar a un proceso productivo. Este es el caso del proceso de fabricación de cemento (Cajas, 2006).

4.3. Biopilas

El suelo extraído del predio con concentraciones inferiores de 20,000 mg/kg de HTP fue sometido al proceso de remediación mediante biopilas (Figura 16). Se consideró que esta técnica era adecuada debido a las características edafológicas del suelo, el tipo y grado de contaminación y las condiciones climatológicas imperantes. En total se remediaron 35,000 m³ de suelo procedente principalmente de La Chapopotera y de la zona de Abastos (ver Tabla 3). El área excavada se rellenó con escombro, balastro⁷ y con suelo que cumplía con los criterios de limpieza que se encontraban acopiados en la zona norte. El 5 de diciembre del 2002 ante el personal de la Delegación de la PROFEPA, se realizaron actividades de muestreo en el suelo residual para verificar el cumplimiento de los LMP de HTP y de HAP establecidos en la NOM-EM-138-ECOL-2002.

Una de las dificultades asociadas a las biopilas es el espacio necesario para su construcción, debido a su abultamiento, el suelo debe excavarse, airearse y acondicionarse mediante el uso de maquinaria pesada. En este caso se tenía espacio suficiente. En total se construyeron seis biopilas: una entre los edificios de Sistemales y Coches, una entre los edificios de Truck y Ejes y Ruedas, una en el área de Sopleteado, dos en el área de Herrería y una al norte del edificio de Carros. Todas se cubrieron con plástico negro para conservar la humedad.

7. Del inglés ballast que significa lastre. Capa de grava o de piedra machacada, que se tiende sobre la explanación de los ferrocarriles para asentar y sujetar sobre ella las traviesas.

La remediación del suelo se realizó en dos etapas. En la primera etapa se trataron 20,000 m³ (julio-octubre del 2003) y en la segunda los 15,000 m³ restantes

(octubre-diciembre del 2003). La asignación de la obra se hizo mediante concurso y la empresa ganadora fue Züblin, S. A. de C. V.



▲ **Figura 16.** Operación de biopilas en los extalleres de FNM en Aguascalientes. Las biopilas se cubrían para conservar la humedad necesaria para los microorganismos. (Fuente: INSECAMI).

5. Evaluación de riesgo ambiental (ERA)

5.1. ERA para hidrocarburos

El volumen y la magnitud de suelo contaminado por hidrocarburos dentro del predio hizo evidente la necesidad de contar con esquemas que permitieran establecer niveles de remediación que protegieran al ser humano y al ambiente, pero que fueran factibles económica y técnicamente. Este esquema fue decidido a partir de la evaluación de riesgo ambiental (ERA).

Cuando se inició este proyecto no existía un marco normativo que regulara los estudios de evaluación del riesgo como instrumento metodológico para calcular los niveles de remediación de sitios contaminados. Afortunadamente, ya se tiene la Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), que se publicó en el 2003 y estableció la pauta legal para que estos estudios fueran aplicados en México; a esta le siguieron los instrumentos prácticos que fueron el reglamento de esta ley y las Normas Oficiales Mexicanas NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 y NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, para establecer niveles de máximos permisibles para suelos contaminados con hidrocarburos y metales, respectivamente; en estas normas se indica la posibilidad de aplicar tales evaluaciones.

Para estructurar el estudio se consideraron factores propios del sitio que influyeron en la dinámica de los contaminantes en el ambiente, así como la interacción de éstos con los organismos vivos y la posible manifestación de efectos tóxicos. Debido a que no existían lineamientos nacionales para aplicar esta metodología se tomaron como referencia diferentes estudios y reglamentaciones

establecidas en varios estados de los Estados Unidos de América, entre los que destacan los siguientes:

- Human Health Risk-Based Evaluation of Petroleum Release Sites. Implementing the Working Group Approach (TPHCWG, 1999).
- Characterizing Risks Posed by Petroleum Contaminated Sites: Implementation of the MADEP VPH/EPH Approach. Final Policy (2002). Massachusetts (MADEP, 2002).
- Developing Soil Cleanup Standards under the Model Toxics Control Act (MTCACR, 2001). Washington.
- Soil Cleanup Level Look-up Table Under the Voluntary Remediation Program (WDEQ, 2000). Wyoming.
- Toxicological Profile for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH). Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 1999).

Con base en estos documentos se desarrollaron las etapas básicas necesarias en los estudios de riesgo a la salud humana (Figura 17).

En este apartado se resume el producto final de la ERA que, como indica esta figura, estableció los niveles de remediación con base en el riesgo. De manera particular, se analizaron los efectos tóxicos producidos por exposición al diesel y al combustóleo, ya que fueron los principales contaminantes presentes en el suelo de los Extalleres de FNM. El diesel, aunque su composición química varía considerablemente, en general presenta bajas concentraciones de compuestos aromáticos, asimismo, actualmente las agencias internacionales que valoran los riesgos a la salud por exposición a sustancias tóxicas, consideran que no existe evidencia suficiente que indique que la exposición



▲
Figura 17. Pasos para la evaluación de riesgo ambiental (ERA).

crónica al combustible diesel produzca cáncer en el humano (IARC, 1989). Sin embargo, se establece que para el de caso de los suelos contaminados con hidrocarburos debe evaluarse el riesgo de efectos cancerígenos producidos por exposición crónica a estos compuestos de forma individual. Los hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP), si bien son un componente de menor proporción comparados con los alcanos, son más tóxicos, por lo que fueron considerados en este estudio para evaluar los efectos cancerígenos, principal característica toxicológica. Se usaron FPC⁸ para este tipo de compuestos.

Para el caso de los efectos sistémicos⁹ el efecto tóxico de los combustibles ha sido valorado a través de diferentes estudios en los cuales, se han empleado fracciones específicas de compuestos alifáticos y aromáticos así como mezclas complejas. Sin embargo, existe escasa

información toxicológica para el caso del diesel y del combustóleo. Con la finalidad de poseer una aproximación al espectro tóxico de estos dos combustibles, se emplearon los valores toxicológicos de Dosis de Referencia¹⁰ (DRf) de MADEP (2002) y TPHCWG (1999). La DRf más restrictiva presentada por estas fuentes es de 0.03 mg/kg·d (TPHCWG, 1999) que corresponde a la cadena molecular de carbonos de fracción aromática C>16- C21. Los efectos asociados a esa DRf son hepáticos.

Tanto para el cálculo de riesgo de sustancias cancerígenas¹¹ de sustancias cancerígenas (HAP) como para el cálculo de cocientes de peligro (CP)¹² de sustancias no cancerígenas (efectos sistémicos de los HFD), se calcularon tasas promedio de exposición de suelo normalizadas por peso y edad (vías oral, inhalatoria y dérmica). Los principales factores considerados para calcular la magnitud de la exposición (máxima exposición probable, MEP) a

ZONA	COCIENTE DE PELIGRO (CP, ADIMENSIONAL)	RIESGO CANCERÍGENO (R, ADIMENSIONAL)
Abastos	5.39	NA
Pailería/Locomotoras	4.28	NA
Casa de Fuerza 1	5.47	NA
La Chapopotera	66.19	1.59E-05*
Fundición de bronce	1.56	NA
Casa de Fuerza 2	1.48	NA
Herrería	9.80	NA

▲ **Tabla 6.** Cocientes de peligro y riesgos cancerígenos por exposición oral, dérmica e inhalatoria por zona, en los extalleres de FNM en Aguascalientes.

NA = No aplica porque la sustancia no tiene efectos cancerígenos o no existen valores con suficiente validez científica.

* Riesgo total = sumatoria del riesgo por exposición a los siguientes HAP encontrados en La Chapopotera: benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno, indeno(1,2,3-cd)pireno que fueron los HAP presentes (máximas concentraciones). Los FPC usados para estas sustancias fueron de 0.73, 7.3, 0.73, 0.07, 0.07, 7.3 y 0.73 (mg/kg·d)-1, respectivamente.

Nota: Los CP se calcularon para HTP-FM (diesel) con la DRf de 0.03 mg/kg·d (TPHCWG, 1999).

8. Factor de pendiente de cáncer, factor de potencia de una sustancia cancerígena. Los toxicólogos determinan estos valores con base en estudios con animales de laboratorio.

9. Efectos no cancerígenos que se presentan de manera general en el organismo.

10. Dosis que se considera segura para la salud humana con base en estudios toxicológicos. Tanto el FPC como las DRf se usan en ecuaciones para determinar el riesgo por exposición a sustancias tóxicas.

11. Riesgo cancerígeno (RC) = dosis diaria de exposición promedio a lo largo de la vida multiplicada por el FPC.

12. CP = dosis diaria de exposición promedio por un periodo determinado dividida entre la DRf.

los suelos contaminados con HTP-FD (Diesel) y HAP existentes en el sitio de estudio fueron los siguientes:

- Uso de suelo de tipo residencial (receptores más vulnerables: infantes de uno a seis años con peso corporal promedio de 18.8 kg).
- La participación de más de un tipo de contaminante que trajo como consecuencia el cálculo MEP realizado para cada una de las zonas afectadas.
- La consideración de la máxima concentración del contaminante identificado para calcular la MEP.
- Las tasas diarias normalizadas por peso y edad, no tanto para los receptores más vulnerables como para otros sectores de la población (adultos de 30 años) para la estimación de ingestión del suelo y polvo.

Con estas consideraciones se obtuvieron los cocientes de peligro (CP) y riesgos cancerígenos indicados en la Tabla 6.

De acuerdo con la información contenida en la tabla anterior, en todas las zonas estudiadas el CP fue mayor de 1, lo que indica que en todos los casos la dosis de exposición estimada fue mayor que la DRf establecida. En la medida que se incrementa el valor numérico del CP, mayor es el riesgo de que se manifieste un efecto adverso, por lo anterior, las zonas de La Chapopotera, Herrería, Casa de Fuerza 1, Abastos y Pailería eran las de mayor prioridad para su remediación.

Para el caso de los HAP detectados en La Chapopotera, el riesgo total de que un individuo expuesto al suelo de esa zona desarrolle cáncer a lo largo de su vida fue de 1.6×10^{-5} , lo que se significa que existe la probabilidad de que se desarrollen 1.6 nuevos casos de cáncer por cada 100,000 personas expuestas a esta zona bajo el escenario propuesto. El valor anterior fue ligeramente superior al valor establecido como aceptable (un caso de cáncer por cada 100,000 individuos expuestos).

Quizás la incertidumbre más importante relacionada a los cálculos realizados para estimar el riesgo fue el uso de la DRf obtenida para una fracción de HTP propuesta por el TPHCWG (1999). Al respecto, el TPHCWG así como los Departamentos de Ecología de los estados de Massachusetts y Wyoming, proponen aplicar el criterio de utilizar la DRf más baja (0.03 mg/kg · día) para evaluar riesgo a la salud por exposición al diesel, cuantificando este combustible por métodos analíticos de HTP. Con respecto a

lo anterior es necesario observar que la DRf usada es 3.33 veces inferior (más restrictiva) a la correspondiente para la fracción diesel (cadena de hidrocarburos C9 – C18) que es de 0.1 mg/kg · día. De esta forma se consideró que este valor numérico proporcionaba una mayor protección para la población potencialmente expuesta.

Para estimar el riesgo a la salud por exposición al combustóleo, las grasas y los aceites (hidrocarburos pesados), se propuso un enfoque novedoso que consistió en restar a la concentración de HTP (método EPA 418.1) la concentración de HTP-FM (diesel) (método EPA 8015). Esto se basa en que el método EPA 418.1 mide la totalidad de hidrocarburos presentes en la muestra y que incluye: rango de gasolina, de diesel, de combustóleo, de grasas y aceites, de tal forma que si se resta la fracción diesel, sólo queda la fracción de hidrocarburos pesados, ya que no hay presencia de gasolina en el suelo de los extalleres.

Para estimar este riesgo se utilizó la DRf más baja calculada para la fracción alifática por el TPHCWG (1999) que es de 0.06 mg/kg · día. Este criterio se consideró adecuado porque estos compuestos son considerados menos tóxicos. La DRf utilizada es 33.33 veces inferior (más restrictiva) a la correspondiente a los hidrocarburos pesados indicados por la misma fuente (C19 –C36) que es de 2.0 mg/kg · día, de esta forma, también se consideró que este valor era protector para los receptores potencialmente expuestos a los hidrocarburos pesados contenidos en el suelo de ese sitio.

Con los resultados obtenidos se estableció que el predio de los extalleres de Ferrocarriles Nacionales de México en Aguascalientes se clasificaba como Categoría B, de acuerdo con los criterios publicados por la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de los Estados Unidos de América (ATSDR, por sus siglas en inglés). Esta categoría es utilizada para los sitios que presentan un riesgo de salud pública como resultado de exposiciones a largo plazo de sustancias peligrosas (ATSDR, 1992).

Puesto que se rebasaron los valores de riesgo aceptable, se calcularon las concentraciones en suelo que harían que estos parámetros no fueran rebasados. Para lo anterior se consideraron escenarios de máxima exposición probable (MEP)¹³, y los valores de riesgo aceptable pre-determinados: CP de 1 (la dosis de exposición es igual a

13. *Parámetros de exposición para niños de 6 años, con peso corporal de 16 kg, tasas de ingestión de suelo de entre 250 y 350 mg/d (valores reportados para niños mexicanos; comunicación personal con el Dr. Fernando Díaz Barriga, Universidad Autónoma de San Luis Potosí).*

la DRf) y valor de riesgo aceptable para sustancias cancerígenas de 1×10^{-6} (probabilidad de 1 en un millón)¹⁴. Las concentraciones máximas permisibles con base en el riesgo se calcularon tanto para la vía de ingestión de suelo, como para la inhalación y contacto dérmico de partículas; en todos los casos se obtuvieron concentraciones para HFD, hidrocarburos pesados (HTP-HFD) y HAP (Tabla 7).

En los datos presentados en la tabla anterior se muestra la concentración de HTP-FM que debe tener el sitio para no rebasar el riesgo aceptable que es de 2,550 mg/kg (el más restrictivo de las vías de exposición evaluadas). La concentración de hidrocarburos pesados es de 5,100.95 mg/kg, y las concentraciones de HAP fluctúan entre 0.13 y 13.56 mg/kg.

Se estableció una profundidad de tres metros de suelo a remediar como suficiente. La mayoría del suelo afectado se encontraba a esta profundidad; por lo que se aseguraba la protección a los procesos bióticos existentes en las primeras capas superficiales del suelo. Por otra parte, la

presencia de ciertas concentraciones residuales de HDP localizadas en algunos sitios a profundidades mayores de tres metros, no representaban un riesgo ecológico y a la salud humana de consideración, por lo que este espesor de suelo funcionaría como una barrera protectora (Figura 18).

La presencia de suelo contaminado con HTP-FM residual a cierta profundidad de la superficie también representaba el riesgo potencial de tener vapores generados, este se localizaba a una profundidad mayor de tres metros. Para evaluar esta migración de vapores se utilizó el modelo de emisión de vapores de zona no saturada de Jury et al. (1990), incluido en el programa computarizado del Sistema Analítico de Transporte de Contaminantes (Maslia y Aral, 2002), versión 6.1. Se consideraron las características edafológicas de un suelo estándar bajo condiciones isotópicas. El análisis se realizó considerando una capa de 7 m de espesor de suelo contaminado con compuestos derivados del petróleo representativos de los grupos aromáticos y alifáticos. Aquí, se optó por el benceno y la fracción específica C12-C16, respectivamente.

VÍA DE EXPOSICIÓN	HTP-FM (DIESEL)	HIDROCARBUROS PESADOS (HTP-HFD)*	HAP	
Ingestión y contacto dérmico	2,550.47	5,100.95	Benzo(a)pireno	0.130
			Benzo(a)antraceno	1.301
			Benzo(b)fluoranteno	1.301
			Benzo(k)fluoranteno	13.56
			Criseno	13.56
			Dibenzo(a,h)antraceno	0.130
			Indeno(1,2,3-cd)pireno	1.301
Inhalación	15,897.98**	NA***	--	--

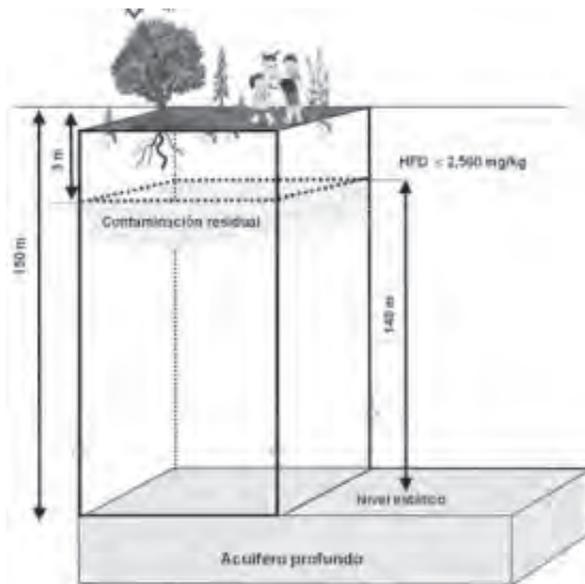
▲ **Tabla 7.** Concentraciones de remediación en suelo (mg/kg) obtenidos con base en ecuaciones de ERA en los extalleres de FNM en Aguascalientes.

* Combustóleo, grasas y aceites.

** NA = No aplica; se considera que los derivados del petróleo de cadenas de más de 17 carbonos no se volatilizan.

*** DRf para la vía inhalatoria obtenida en función de la Concentración de Referencia (CRf = 0.2 mg/m³; Cass, 1997); se usó la ecuación de conversión que relaciona el peso corporal de la población expuesta (16 kg) y la tasa de ventilación pulmonar (15 m³/d).

14. Valor de riesgo más restrictivo. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (U.S.EPA) propone un intervalo de riesgo aceptable de entre 1×10^{-4} y 1×10^{-6} .



▲ **Figura 18.** Profundidad de suelo a remediar con base en las concentraciones obtenidas por medio de la ERA.

Estos compuestos fueron seleccionados a fin de analizar la migración potencial de vapores a partir de dos compuestos con diferencias en volatilización y espectro tóxico. Las tasas de emisión y dispersión de vapores fueron estimadas mediante análisis probabilísticos, utilizando la simulación Monte Carlo. Esta técnica estadística permite considerar la incertidumbre y variabilidad existente en algunos de los parámetros utilizados en la modelación matemática.

Los resultados obtenidos indicaron que una capa de suelo superficial con espesor de tres metros era suficiente para evitar la mayor parte de la migración de vapores generados a partir de una capa de suelo de siete metros de espesor contaminada con 10,000 mg/kg de diesel. Se calcularon CP a partir de las concentraciones de vapores en el aire estimadas con los modelos. Se observó que los CP obtenidos disminuían de manera exponencial a medida que se incrementaba el espesor de la capa de suelo superficial. El CP era menor a 1 cuando el espesor de la capa de suelo superficial se mantenía en tres metros; es decir, este espesor de suelo remediado demostró ser su-

ficiente para prevenir riesgos en la vía inhalatoria en los receptores potenciales ubicados en la superficie del terreno.

Asimismo, para calcular los valores de remediación también se consideraron la afectación al agua subterránea y el riesgo que se tendría por su ingestión. La afectación al agua subterránea se estimó que ocurriría por la lixiviación de los contaminantes en el suelo a ese recurso. Para ello, primero se calculó la concentración de HTP-FM en el agua que no representara un riesgo para la salud humana (efectos sistémicos) ($CP = 1$). El uso de suelo considerado fue residencial con receptores adultos.

Los cálculos indicaron que esta concentración sería de 1.1 mg/l¹⁵. La concentración de HTP-FM (Diesel) en el agua junto con el factor de lixiviación¹⁶ y el tiempo promedio para migrar hasta el nivel estático del agua subterránea¹⁷ (142 m) se usó para calcular la concentración en el suelo que haría que se tuviera el agua una concentración segura (1.1 mg/l). El factor de lixiviación calculado fue de 8.43×10^{-9} /año y el tiempo promedio de 1.57×10^9 años. Estos datos indicaron que se requeriría una concentración en el suelo de HFD de 1.22×10^{12} mg/kg, localizados a una profundidad de 10m, para que el agua subterránea se contaminara con 1.1 mg/l.

Por ello y en términos prácticos, se estableció como poco probable que bajo las circunstancias prevalecientes en los extalleres de FNM en Aguascalientes, se presentara contaminación del acuífero profundo. Esto debido esencialmente a las características fisicoquímicas de los compuestos implicados, la naturaleza del material del suelo y a la profundidad a la cual se localiza el recurso hidrológico.

5.2. ERA para metales

De los metales encontrados en los extalleres de FNM de Aguascalientes, el plomo fue el principal problema y estaba localizado en el área de fundiciones (Figura 19). Como se mencionó en párrafos anteriores, del 2002 al 2004

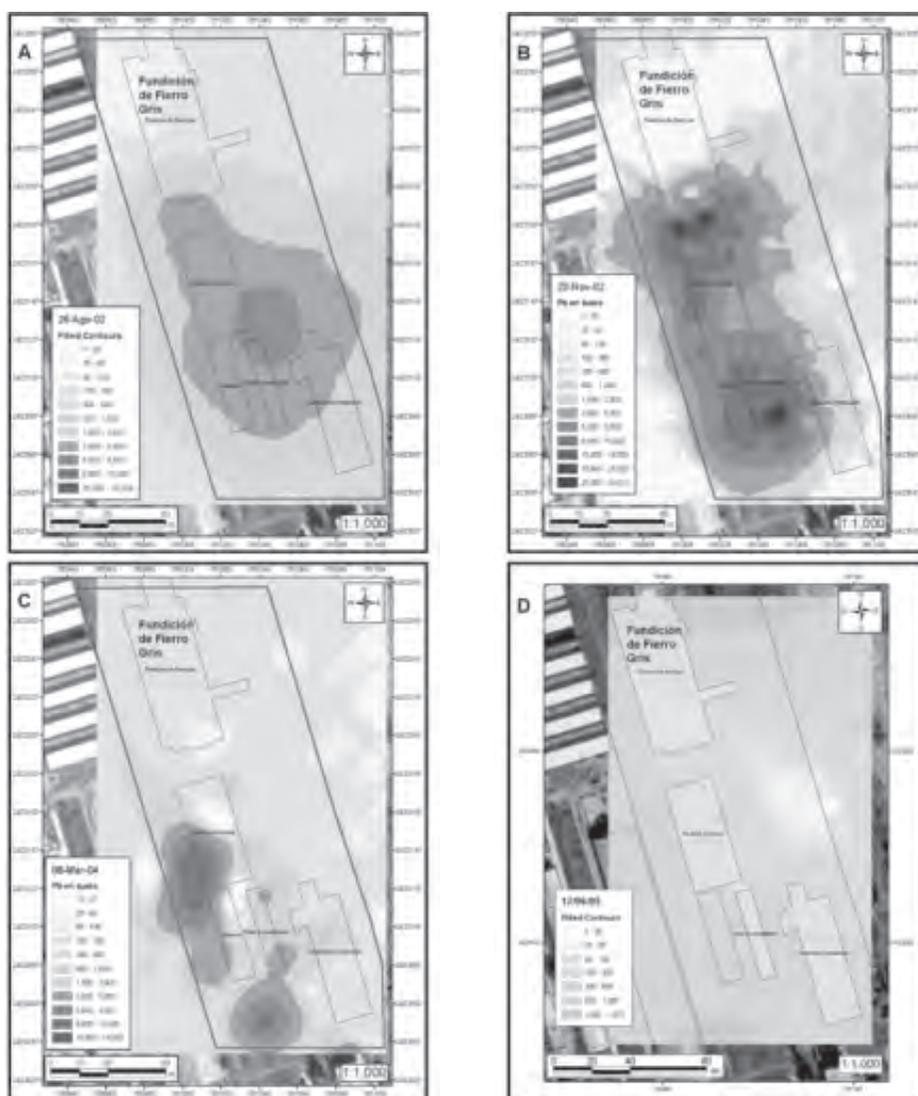
15. $DR_f = 0.03 \text{ mg/kg} \cdot \text{d}$ (valor más restrictivo para mezclas de hidrocarburos propuesto por TPHCWG, 1999), peso promedio corporal = 70 kg, $CP = 1$, Ingestión de agua = 2 l/día, Fracción de la dosis absorbida = 1, Frecuencia de la exposición = 350 días/365 días

16. El factor de lixiviación relaciona la precipitación pluvial media anual, la humedad volumétrica del suelo, la densidad del suelo, el grosor de la capa de suelo contaminado (10 m, peor escenario) y el factor de distribución suelo agua ($K_d = 2053562.417 \text{ cm}^3/\text{l}$). El K_d se obtuvo a partir de del factor de distribución carbono orgánico-suelo (K_{oc}) y la fracción de carbono orgánico del suelo (0.001). El K_{oc} se obtuvo sumando los K_{oc} de los compuestos individuales que forman el diesel.

17. El tiempo de migración del suelo contaminado al agua subterránea relaciona la precipitación pluvial media anual, la humedad volumétrica del suelo, y el espesor de la zona vadosa.

fueron confinadas 6,912 toneladas de suelo contaminadas principalmente con este metal. Se consideró que para alcanzar el criterio de limpieza establecido por las autoridades ambientales, de 200 mg/kg (CIRSC; PROFEPA, 1998), era necesario confinar entre 4,000 y 5,000 toneladas adicionales de suelo. Para esto, se requería que el Gobierno del Estado de Aguascalientes destinara una importante inversión de recursos económicos. Ante esta situación, se consideró oportuno diseñar y proponer a la SEMARNAT, un estudio de ERA (salud humana) con el objetivo de estimar la concentración de Pb en el suelo que no representara un riesgo para la salud de los receptores potenciales, considerando las características específicas de este sitio.

Es común expresar el riesgo a la salud por exposición al Pb en términos de su concentración sanguínea o nivel de plomo en sangre (NPS). La NOM-199-SSA1-2000, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA, por sus siglas en inglés) y otros organismos relacionados con el ámbito de la salud, han establecido que las actividades de prevención primaria deben ser iniciadas cuando el NPS en la población infantil es mayor de 10 µg/dl (microgramos de Pb por decilitro de sangre). Para estimar la relación entre el nivel de Pb en el ambiente y el NPS, es ampliamente utilizado el modelo Integrated Exposure Uptake Biokinetic (IEUBK) de la US EPA. Este modelo estima, bajo condiciones probabilísticas, los NPS y su distribución en la población infantil,



▲ **Figura 19.** Evolución en el tiempo de las concentraciones de plomo durante las actividades de remediación en el área de fundición de hierro gris. Las zonas más oscuras corresponden a concentraciones por arriba de 18,000 mg/kg (Fuente: INSECAMI).

considerando combinaciones específicas de los niveles de Pb en el ambiente. El modelo IEUBK se proveyó con los valores de exposición por defecto (default) proporcionados por el mismo modelo.

De la aplicación del modelo IEUBK se obtuvieron como resultado los NPS expresados como valores promedio geométricos y las probabilidades de la distribución en la población para concentraciones de Pb en el suelo (CPbS) entre 200 y 22,285 mg/kg (máxima concentración identificada en el sitio). Los resultados mostraron que una CPbS de 2,000 mg/kg corresponde a un valor promedio geométrico de NPS de 10.74 µg/dl, esto es, prácticamente igual al valor criterio establecido en la NOM-199-SSA1-2000. Sin embargo, el análisis probabilístico indicó que en el 56.07% de la población los NPS eran mayores a 10 µg/dl, lo cual fue motivo de preocupación.

A manera de aproximación, se propuso una RfD de 0.001 mg/kg día con la finalidad es estimar el CP. Este valor se obtuvo de un estudio científico bien fundamentado pero que no es reconocido de manera oficial por el panel de expertos de la principal fuente de información de valores

toxicológicos: Integrated Risk Information System (IRIS) de la US EPA. Se consideró un escenario de tipo residencial, siendo los niños la población objetivo y las incertidumbres consideradas fueron estimadas mediante análisis probabilísticos utilizando la técnica estadística de la simulación Monte Carlo.

El CP obtenido para una concentración de 2,000 mg/kg de Pb en el suelo fue de 1.46, ligeramente superior al nivel de riesgo aceptable, mientras que el CP obtenido para la máxima CPbS identificada en el sitio fue 13.6 veces superior al nivel de riesgo aceptable. Por lo tanto, se concluyó que existía un riesgo para la salud humana en las zonas con mayores concentraciones de plomo.

Por lo anterior, se propuso un criterio de limpieza promedio de 2,000 mg/kg de Pb en el suelo, siempre que en ninguno de los puntos muestreados se sobrepasara este valor límite y, de manera adicional, se realizaran acciones complementarias para disminuir la incertidumbre. Este valor fue aceptado por las autoridades competentes y se realizaron acciones complementarias de retiro de suelo contaminado, ya no a 200 mg/kg, sino a un nivel de 2,000 mg/kg.

6. Confinamiento dentro del sitio

Debido a la magnitud del volumen de material contaminado y su grado de contaminación, en las zonas Clase III (ver sección 3.3. *Clasificación de áreas*) se optó por construir celdas de estabilización *in situ*. Inicialmente se había proyectado una sola celda pero posteriormente se tuvo la necesidad de construir otra más. En la primera celda de estabilización se depositaron 49,700 m³ de material contaminado, principalmente suelo afectado con residuos de fundición y con derivados del petróleo del tipo pesado, procedentes de La Chapopotera. Este tipo de residuos se caracterizan por su baja peligrosidad y su escasa o nula degradabilidad ambiental; además, son muy limitadas las alternativas para su disposición final a través de tratamientos térmicos, químicos o biológicos. Los procesos de reuso o reciclado no se consideraron en el momento del estudio debido a que no eran técnica ni económicamente factibles.

De acuerdo con el proyecto de desarrollo urbano Complejo Ferrocarrilero Tres Centurias, en el año 2005 se tenía contemplada la construcción de la vialidad denominada prolongación Gabriela Mistral, la cual cruzaría (y actualmente lo hace) los extalleres de oriente a poniente. Se propuso ubicar la celda de estabilización I (CEI) por debajo de esta vialidad. Esta opción aseguraba que en el futuro no se cambiara el uso de suelo; quedaría eliminada la posibilidad de tener receptores residenciales encima de la celda y la capa de asfalto serviría como barrera permanente para los residuos ahí confinados. Por otra parte, desde el punto de vista económico, esta opción era más

conveniente que transportar ese volumen de residuos a un confinamiento.

La segunda celda de estabilización (CE2) se construyó dentro del área de fundición de hierro gris; en ella se depositaron 38,000 m³ de suelo contaminado con metales provenientes de la misma zona, material contaminado colectado de otras zonas, láminas de asbesto procedentes de los edificios que se restauraron y que también estaban contaminadas con metales. La decisión de construir la celda dentro del área de los extalleres se tomó debido a la disponibilidad de espacio, las características del subsuelo y el proceso de estabilización al que se sometió el material.

6.1. Celda de estabilización 1

La celda de estabilización I (CEI), construida en el año 2005, se ubicó en la zona norte de los extalleres, por debajo de lo que ahora es el par vial Gabriela Mistral (Figura 20). Ocupa una superficie de 4,800 m² y una profundidad máxima de 12 m. Las dimensiones fueron: de norte a sur de 83.0 m y 69.5 m de oriente a poniente. En ella se depositaron principalmente residuos con concentraciones muy altas de hidrocarburos procedentes de La Chapopotera, así como escorias de fundición y láminas de asbesto procedentes de los edificios

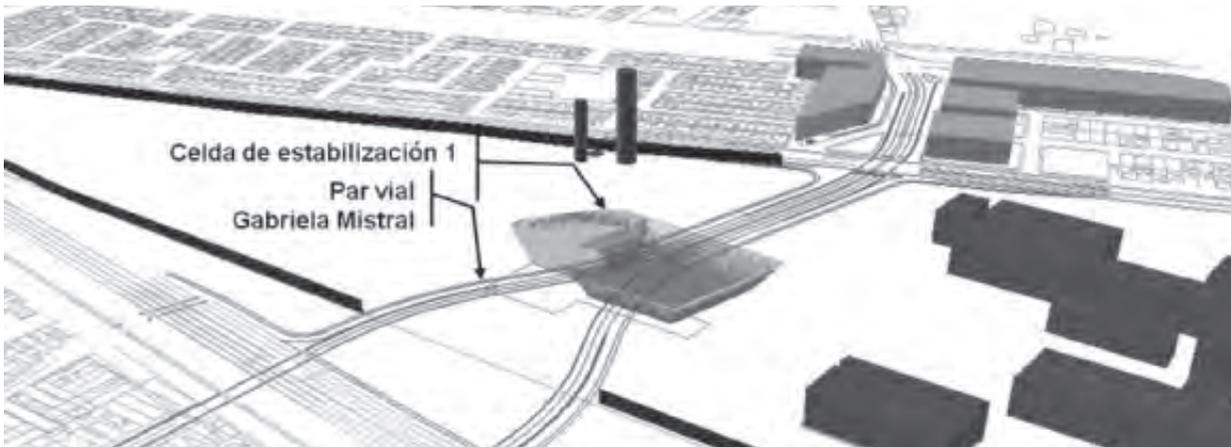


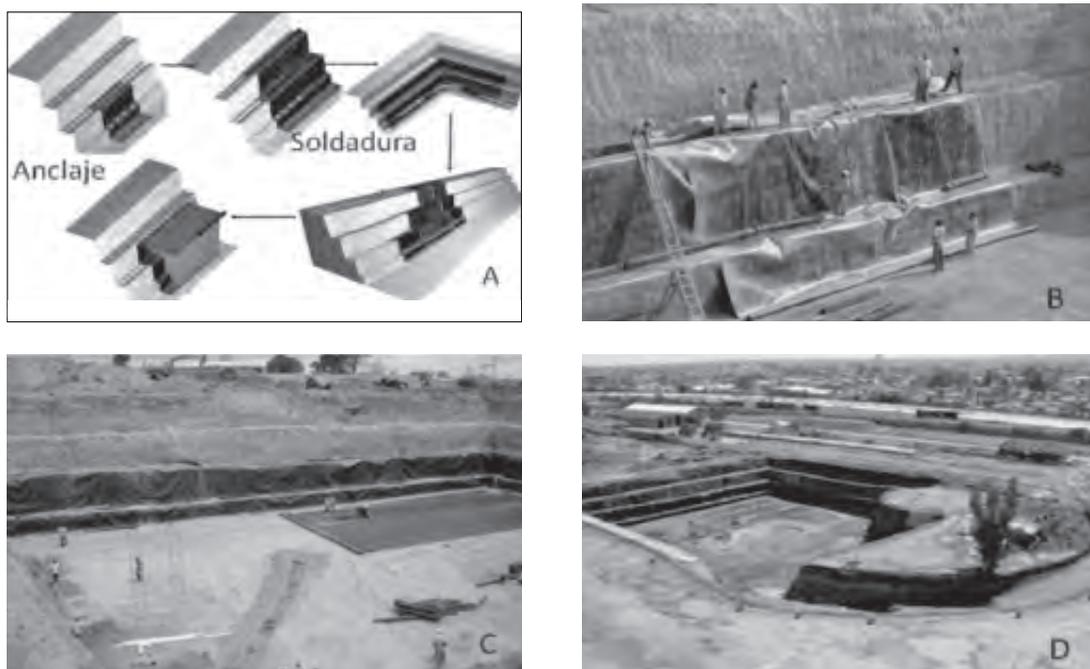
Figura 20. Ubicación de la celda de estabilización I, construida por debajo del par vial Gabriela Mistral que actualmente cruza el predio de los extalleres de FNM, de oriente a poniente (Fuente: INSECAMI).

restaurados o demolidos. Los residuos fueron tratados previamente mediante la tecnología de solidificación-estabilización (TSE).

Para la construcción de la celda se excavó un socavón en el lugar donde se encontraba el edificio de Herrería. La construcción se hizo considerando escalones en los taludes para facilitar la instalación de la geomembrana, que se colocó en el fondo de la celda a fin de que en caso de lixiviación de los residuos (cosa muy poco probable dado el proceso de estabilización al que fueron sometidos) estos fueran contenidos dentro de la celda. Asimismo se colocó un sistema de monitoreo. La superficie de la base de la CEI fue nivelada con una pendiente del 0.5% hacia los filtros del sistema de monitoreo. Además, se realizaron maniobras de compactación hasta lograr el 95% del peso volumétrico máximo seco. Las esquinas y bordes de los taludes fueron bordeados para evitar picos de tensión en la geomembrana. Esta fue colocada de polietileno de alta densidad (HDPE), de 1,500 micras de espesor y se ancló en los taludes mediante zanjas perimetrales sobre los bancos y la colocación de

pesos muertos sobre el plástico. Las juntas de los lienzos de la geomembrana se afianzaron mediante soldadura por cuña caliente (hot wedge) y soldadura por extrusión (welding), (Figura 21).

En una zona adyacente a la celda, adecuada ex profeso, se preparó el material que se utilizaría para conformar la base de la cimentación. Este material, sin evidencia de contaminación, se obtuvo al excavar el socavón y se acopió temporalmente al oriente del edificio de Casa de Fuerza 2. Sobre la base de la cimentación, se construyó un abroche o frontera perimetral de 5.0 m de ancho y 1.6 m de alto, utilizando suelo contaminado, tamizado y estabilizado. Con este suelo se formaron capas sucesivas de 30 cm de espesor y cada una fue compactada al 95%. Un socavón resultó de la conformación de esta frontera perimetral de alta compactación que disminuye notablemente la conductividad hidráulica del suelo y, con ello, la migración potencial horizontal y vertical de los contaminantes. El material contaminado y estabilizado se colocó al interior de este socavón delimitado por el abroche.



▲
Figura 21. Construcción de la celda de estabilización 1 en el predio de los extalleres de FNM en Aguascalientes. A) Esquema de la colocación de la geomembrana en los taludes de la celda. B, C y D) Vistas de la geomembrana en el fondo y los taludes de la celda (Fuente: INSECAMI).

Cabe mencionar que antes de colocar la geomembrana en el fondo de la celda, se acondicionó un área al oeste del socavón para el confinamiento de las láminas de asbesto procedentes de los edificios demolidos o restaurados mediante la técnica de encoframiento en concreto fluido. Esta zona de disposición para las láminas de asbesto dentro de la CEI fue excavada con las siguientes dimensiones: 45 m de largo x 10 m de ancho x 1 m de profundidad. Se hicieron paquetes de diez láminas cada uno, que fueron revestidos con plástico calibre 600, ya acomodados horizontalmente sobre el borde lateral descansando sobre una serie de estructuras. En total se confinaron 8,013 láminas de asbesto y 30 m³ de material fragmentado; se utilizaron 308 m³ de concreto fluido. Después del secado del concreto esta zona fue rellenada con material compactado. (Figura 22).

La tecnología de solidificación-estabilización (TSE) que se aplicó para el confinamiento de los residuos en la CEI es un método de tratamiento usado ampliamente en el manejo y disposición de una gran variedad de residuos. El cemento ha sido empleado en los EUA desde 1950 como agente aglutinante; en la actualidad es muy usado para el tratamiento de los residuos peligrosos industriales. Cuando el cemento se mezcla con el material contaminado ocurren reacciones químicas con el agua de la matriz, lo que provoca cambios en sus propiedades físicas; la solidificación de los contaminantes reduce su permeabilidad, movilidad y toxicidad.

El proceso de tratamiento se realizó incorporando a los residuos previamente homogeneizados, cemento CPC-30R¹⁸ en una proporción del 2% al 5%. Al final de las jornadas laborales el material mezclado con cemento se cubría con un plástico para evitar el ingreso de humedad. El material estabilizado fue transportado desde la zona de mezclado (al norte del predio) en camiones de 14 m³ a la celda. El suelo estabilizado se extendió dentro de la celda en capas sucesivas con un espesor de 50 cm, esto con la finalidad de lograr un grado de compactación del 95% de acuerdo a la prueba estándar Proctor. Posteriormente, para que el cemento ejerciera sus propiedades aglutinantes fue necesario activar el proceso de estabilización mediante la adición de agua en proporciones óptimas para lograr la máxima densidad de compactación de los materiales. Para extender y precompactar el material y formar las capas, se utilizó un tractor de oruga mientras que la compactación final se realizó mediante un equipo tipo "pata de cabra" el cual es el más eficiente considerando las características del material depositado.



▲
Figura 22. Disposición de las láminas de asbesto por medio de la técnica de encoframiento en concreto fluido. A y B) Disposición de los paquetes de láminas revestidos con plástico calibre 600 y aplicación de cemento fluido. C y D) Cubierta de las láminas con tierra (Fuente: INSECAMI).

¹⁸ Cemento portland compuesto que sobrepasa los límites mínimos de la clase resistente 30 de la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004 (Industria de la construcción-cementos hidráulicos-especificaciones y métodos de prueba).

El material estabilizado fue depositado en la celda formando tres estratos. El primero, el más profundo, tiene un espesor de 0.7 m y contiene 5% de cemento y materiales fácilmente compactables y con menor grado de contaminación. La finalidad de este primer estrato es formar una base de sustentación con mayor capacidad de soporte estructural y que participe como una barrera adicional a la posible migración de lixiviados. Para prevenir la ruptura de la geomembrana, de forma manual se retiraron los materiales de mayor tamaño, tales como piezas y fragmentos metálicos, durmientes y objetos punzo-cortantes. El segundo estrato, tiene un espesor de seis a ocho metros y contiene los materiales más contaminados que fueron estabilizados con la incorporación de cemento Portland en una proporción del 3% y compactados al 95%. El tercer y último estrato, el más superficial, tiene un espesor entre 1 y 1.5 metros, contiene material fácilmente compactable y menos contaminado que fue estabilizado con el 2% de cemento y compactado al 95%; a este material también se le retiraron los materiales punzocortantes. Luego de este estrato, fue preparada la superficie para colocar y sellar la geomembrana y evitar infiltraciones superficiales.

En el proceso de estabilización se usaron 947 toneladas de cemento Portland y se depositaron en la celda 49,765.5 m³ de material estabilizado.

Previamente a la construcción de la CEI se realizó una ERA, así como diferentes estudios para conocer la aptitud geohidrológica del sitio y el potencial de migración del material que se pretendía depositar. Los estudios geofísicos y geohidrológicos realizados fueron los indicados por la NOM-055-SEMARNAT-2003¹⁹.

Los resultados de los estudios geofísicos y geohidrológicos mostraron que el sitio seleccionado era apto para el depósito de residuos peligrosos previamente estabilizados. Además, se hicieron pruebas de lixiviación a diversas muestras del material estabilizado. Las pruebas aplicadas fueron las indicadas en la NOM-053-SEMARNAT-1993²⁰, prueba de extracción PECT, procedimiento de laboratorio que permite determinar la movilidad de los constituyentes del residuo que lo hacen peligroso por su toxicidad al ambiente. Además se aplicó el método EPA 1312²¹. Los resultados de ambos métodos mostraron

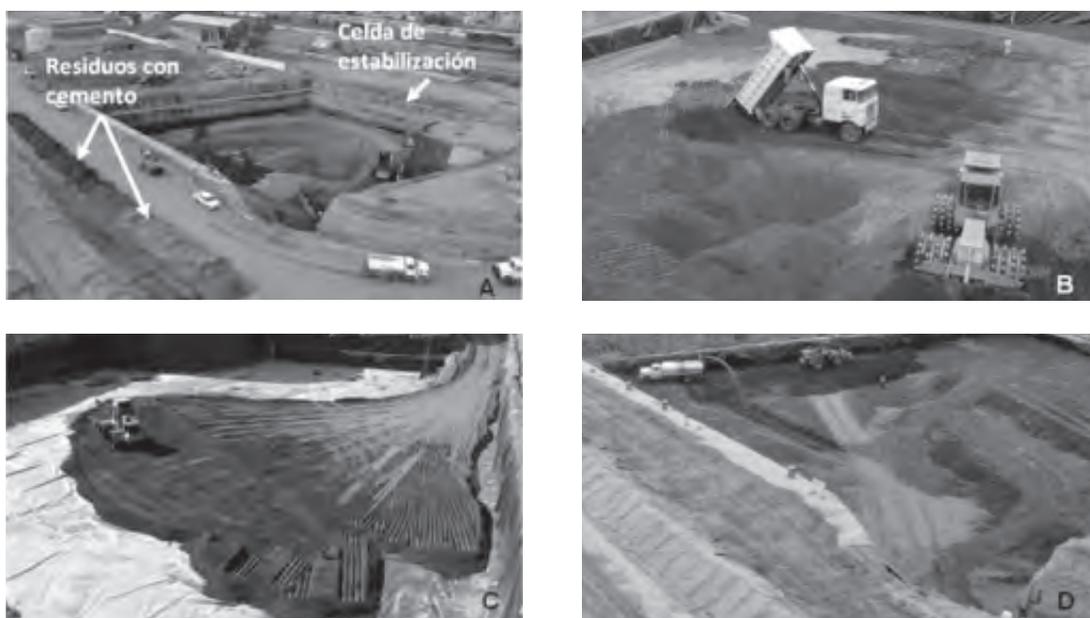


Figura 23. Disposición de los residuos estabilizados dentro de la CEI. A, B y C) Distribución y compactación de los residuos estabilizados con cemento dentro de la celda. D) Hidratación de los residuos estabilizados para activar el efecto aglutinante del cemento (Fuente: INSECAMI).

19. Que establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente estabilizados.
20. 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.

que los residuos estabilizados no rebasaran los límites máximos permisibles indicados por las normas aplicadas. Por ello, los residuos estabilizados se clasificaron como material no peligroso. Estos resultados también se usaron para evaluar el riesgo ambiental que representaría el confinamiento de estos residuos en la celda de estabilización.

Para el cálculo de los riesgos a la salud se seleccionó un grupo de compuestos de referencia (CRf), atendiendo a sus propiedades específicas de transporte en los medios y su potencial tóxico. Con la finalidad de disminuir la incertidumbre generada con el uso de modelos matemáticos para simular el transporte de los contaminantes y estimar los riesgos, bajo cualquier circunstancia se aplicó el esquema metodológico y numérico que permitía la máxima protección probable a la salud humana y al ambiente.

Para modelar el comportamiento de los CRf en el subsuelo y en el acuífero, se empleó el programa de cómputo Industrial Waste Evaluation Management (IWEM), utilizado por la U.S.EPA para evaluar y diseñar los mecanismos de protección del agua subterránea empleados en la construcción de las Unidades de Disposición Terrestres. Para estimar los riesgos asociados a la inhalación de vapores, se usaron los modelos de emisión y dispersión de vapores mediante análisis probabilísticos.

Se obtuvo un CP de 0.0125, inferior al valor aceptable de 1.0. El riesgo por exposición a sustancias cancerígenas obtenido fue de 2.9×10^{-8} (2.9 casos de cáncer por cada 100 millones de habitantes), inferior al riesgo considerado como aceptable de 1.0×10^{-6} , por lo que al considerar los efectos cancerígenos y los no cancerígenos.

Todos los resultados de las diferentes pruebas de tolerancia realizadas a la celda de estabilización indicaron la existencia de un amplio margen de seguridad. Por su ubicación en un sitio con características geohidrológicas que no propician la migración de contaminantes y dadas las condiciones de estabilización aplicadas, esta celda tiene un riesgo aceptable para la salud humana y el ambiente.

Para monitorear la condición de los materiales depositados en la celda, se diseñó un sistema de cuatro pozos de monitoreo: dos para coleccionar posibles lixiviados presentes y los otros dos para monitorear el material estabilizado. El sistema de monitoreo del material estabilizado se colocó directamente en el material, ya que en caso de que se generaran lixiviados, serían detectados en estos pozos. El sistema de monitoreo de lixiviados se instaló por debajo de la geomembrana de la celda que consta de un tubo de PVC hidráulico ranurado de 6" de diámetro colocado al

interior de un colector revestido con geomembrana y material filtrante. Si ésta se rompiera, el sistema detectaría cualquier lixiviado generado. (Figura 24).

El programa de monitoreo de la celda de estabilización consta de tres etapas. La primera está planeada para los primeros tres años de operación a partir de la instalación de los colectores. Se harán muestreos semestrales para evaluar primeramente, la presencia o ausencia de líquidos en los pozos de monitoreo de la estabilización y de lixiviados. En caso de presencia de líquidos se tomaran muestras para la determinación de hidrocarburos y metales pesados (Pb, Hg, Ni, Ba, Cr VI, Cd, Ag, y As). Si durante el primer periodo de observación se registra una baja o nula producción de lixiviados, se propone iniciar una segunda etapa de observación, que incluye realizar revisiones anuales por un periodo de 5 años. En la tercera etapa se contemplan revisiones bianuales por un periodo de 12 años, siempre y cuando, en el segundo periodo de observación exista una baja o nula producción de líquidos.

6.2. Celda de estabilización 2

Debido a la cantidad de residuos acopiados en el predio de los Extalleres de Ferrocarriles Nacionales de México, entre abril del 2008 y febrero del 2009 se construyó la Celda de Estabilización 2 (CE2), con un diseño estructural similar al de la CE1.

La longitud en eje Norte-Sur fue de 190 m y de 23 m en el eje Oriente-Poniente, en su parte más ancha. El socavón tenía una profundidad de 11 m. La capacidad útil estimada fue de 38,000 m³. Se localizó al Este de los edificios de fundición de fierro gris y fundición de zapatas (Figura 25).

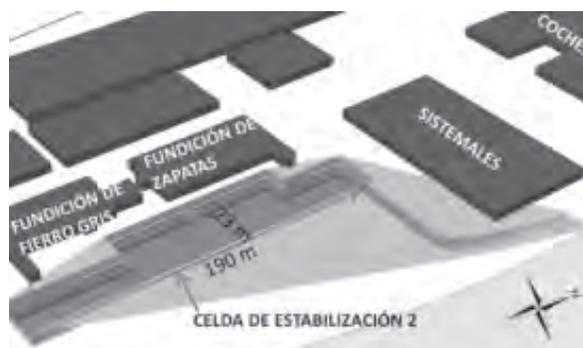


Figura 25. Ubicación y dimensiones de la CE2 dentro del predio de los extalleres de Ferrocarriles Nacionales de México, en Aguascalientes (Fuente: INSECAMI).

21. Procedimiento de lixiviación con precipitación sintética.

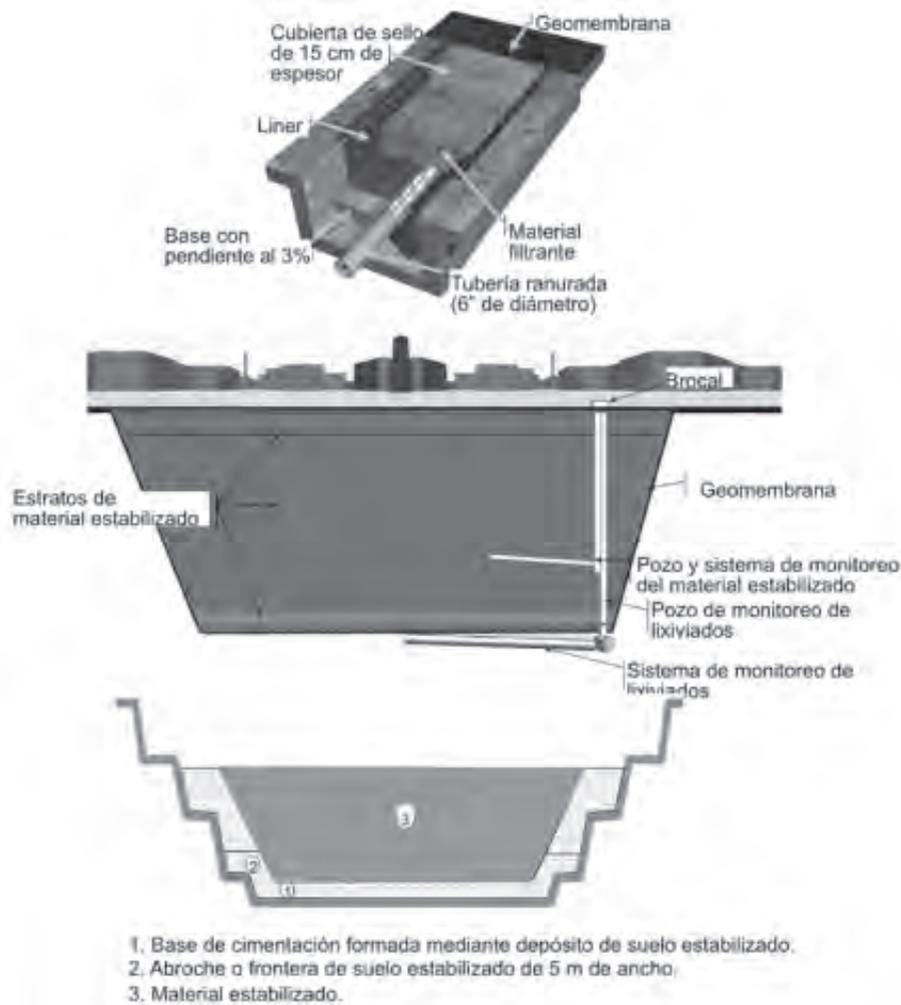


Figura 24. Sistema de monitoreo de la CEI y disposición del material dentro de la celda. La figura superior presenta el esquema del sistema de monitoreo de lixiviados; la del medio corresponde al esquema general de monitoreo de toda la celda; y la de abajo representa el esquema de la disposición del cemento, el abroche y el material estabilizado (Fuente: INSECAMI).



En esta celda se depositaron principalmente suelos contaminados procedentes del área donde se construyó el Nuevo Hospital de Especialidades Miguel Hidalgo (Figura 26), escorias de fundición con metales del área de fundición de hierro gris, así como hidrocarburos fracción pesada procedentes de otras áreas del predio.

◀ **Figura 26.** Suelo contaminado extraído del área donde actualmente se encuentra el Hospital Hidalgo, al norte del predio de los extalleres de FNM en Aguascalientes. El suelo fue depositado en la CE2 (Fuente: INSECAMI).

La construcción y operación de esta celda de estabilización fue similar a la CE1 y también aquí se depositaron láminas

de asbesto procedentes de edificios remodelados y/o demolidos (Figura 27).



▲
Figura 27. Encoframamiento de láminas dentro de la Celda de Estabilización 2 (Fuente: INSECAMI).

7. Obras complementarias

Desde el 2002 hasta el 2010, además de las acciones de remediación que se han descrito en las secciones anteriores, se realizaron obras complementarias que tuvieron la finalidad de concretar los trabajos de incorporación de las instalaciones al patrimonio del estado de Aguascalientes.

Entre estas obras complementarias se encuentra la extracción de combustóleo del tanque de chapapote ubicado justo en las proximidades de La Chapopotera.

Una vez extraído el combustóleo se iniciaron las labores de limpieza en el interior del tanque. Para la limpieza, realizada por una empresa de servicios industriales, se usaron desengrasantes biodegradables y, al final, se lavó con detergente y agua a presión. Una vez limpio el tanque, se llenó con agua y se usa para servicios del CRIT (Figura 28).



▲
Figura 28. Tanque del CRIT próximo a La Chapopotera, antes y después de su limpieza (Fuente: INSECAMI).

En los edificios de laminado y troquelado, fundición de bronce, fundición de zapatas y fundición de fierro gris se realizó una limpieza general. Una vez que concluyeron las actividades de limpieza y con la finalidad de retirar material adherido a las paredes, éstas se sandblastearon con arena fina. Todo el residuo resultante de estas actividades fue recolectado y confinado en las celdas de estabilización. En los edificios de fundición y el de enmetalado se utilizaron, además, productos desengrasantes.

Durante los meses de julio y agosto del 2003 se demolieron el cobertizo de fundición de bronce así como los hornos de secado del edificio de fundición de fierro gris. El

escombro, las estructuras metálicas y otros accesorios fueron clasificados como material peligroso debido a los resultados de las pruebas presuntivas que indicaban la presencia de dioxinas. Ante esta situación, se decidió confinar todo este material en un confinamiento contratado (CIMARI de RIMSA). El material limpio, producto de las demoliciones y el material excavado no contaminado obtenido en el área sur, se utilizó para relleno del socavón de La Chapopotera.

En la zona de abastos se drenaron los tanques elevados que aún contenían diesel y se dismantelaron para su disposición en el CIMARI de RIMSA. Asimismo, se limpiaron, dismantelaron y demolieron los edificios de cobertizo de locomotoras, cuarto de bombas y agua, aceitera, recicladora de aceite, arenero, laboratorio de pruebas, cuarto de baterías y talleres varios.

En la zona suroriente del predio no se encontró afectación por hidrocarburos derivados del petróleo y metales pesados, por lo que se realizaron únicamente labores de limpieza básica general consistentes en segregado de materiales de diversa índole: papel, cartón, vidrio, plásticos, mangueras de plástico, madera, chatarra y escombro. Además, se realizó la carga y transporte de casilleros, estructuras metálicas varias, carretillas y motores eléctricos para su disposición. Estas labores incluyeron a los edificios de taller eléctrico, soldadura, pintura, galvanoplastia, talleres varios, pailería y fluxes.

Debido a su clasificación como edificio histórico por el Instituto Nacional de Antropología e Historia, el inmueble

conocido como Taller de Reparación de Locomotoras, fue uno de los casos más peculiares durante la remediación del predio. Esta área estaba contaminada principalmente por hidrocarburos. Los trabajos de remediación culminaron en agosto del 2003, fecha en que se entregó a FICOTRECE para su restauración y cuidado. El proceso de restauración empezó el 11 de octubre del mismo año, con la limpieza de estructuras metálicas, columnas, grúa viajera y la parte interna de la techumbre, mediante hidroblast. Para estas tareas se contrató una empresa especializada en procesos de limpieza, cuyo trabajo finalizó dos meses después, el 15 de diciembre.

Entre los años 2009 y 2010, los edificios taller de fundición de bronce y almacén general fueron sometidos al mismo proceso de restauración. El edificio de taller de reparación

de locomotoras alberga actualmente al Centro de Convenciones del estado de Aguascalientes, mientras que en el edificio del almacén general está ya instalada la Universidad de las Artes.

Con el objeto de contar con evidencias del grado de limpieza logrado en las superficies, se desarrolló un método calorimétrico que valora la cantidad de derivados del petróleo presentes mediante el desarrollo de color. El proceso consistió en impregnar almohadillas de algodón con un solvente; la almohadilla se pasaba sobre la superficie a evaluar y, posteriormente, se analizaba esta almohadilla para determinar los hidrocarburos por medios colorimétricos (la presencia de hidrocarburos arriba de 1000 mg/l se manifestaba por el desarrollo de color en un espectrofotómetro).

8. Lecciones aprendidas

La realización de este proyecto de remediación en uno de los símbolos emblemáticos de la ciudad de Aguascalientes fue enormemente aleccionador en dos sentidos principalmente: la posibilidad de revitalizar un pasivo ambiental para beneficio de la ciudadanía y la importancia de contar con autoridades ambientales preparadas y dispuestas al trabajo en conjunto.

Si bien existe una tendencia internacional de revitalizar sitios contaminados para integrarlos a la vida productiva o recreativa de una ciudad, son pocos los ejemplos que existen en Latinoamérica. Lograr el éxito de un proyecto como éste, depende en gran medida de una planeación anticipada que debe partir de la autoridad gubernamental donde se encuentra el predio y aterrizar en un equipo preparado de especialistas en áreas del conocimiento como la remediación de sitios, la restauración y conservación de inmuebles, arquitectura del paisaje, entre otras.

El proyecto de recuperación de este sitio se logró por la intervención directa y activa del gobierno del estado de Aguascalientes. El predio estaba abandonado varios años atrás y era un problema para la capital, pues sus grandes dimensiones dividían a la ciudad en dos áreas. Además, para pasar de un lado al otro, se requería rodear este enorme predio, lo que provocaba grandes embotellamientos de tránsito vehicular. Aunque durante mucho tiempo se pensó en rescatar este sitio, la falta de recursos y voluntades detuvo cualquier intención al respecto. La decisión final para resolver este problema surgió cuando el gobierno estatal decidió buscar una alternativa que hiciera posible su remediación, al mismo tiempo que se aprovechara la infraestructura histórica del lugar.

Para lograr este propósito se consideró darle uso futuro al suelo de las diferentes áreas afectadas, lo que llevó a crear un plan maestro de acción, que se denominó Plan Maestro de Desarrollo del Complejo Ferrocarrilero Tres Centurias. Además, se decidió contar con un organismo externo al gobierno que determinara rutas de acción, este fue el Fideicomiso Complejo Tres Centurias (FICOTRECE). Para el desarrollo del plan maestro se contó con la participación de personal del gobierno del estado a través de la Secretaría de Obras Públicas y del mismo gobernador en turno, de especialistas en remediación de sitios y restauración de inmuebles, contratados por el FICOTRECE, quienes en conjunto, establecieron las etapas de acción en el predio: caracterización, remediación

y restauración y conservación de los inmuebles. Se planeó destinar aquellas zonas con mayor grado de contaminación para construir vialidades, estacionamientos, zonas peatonales, plazas y áreas verdes. Lo anterior con el propósito de minimizar lo más posible el riesgo a la salud, ya que se tendría una capa protectora de pavimento o concreto en estas zonas y cortos tiempos de estancia de los visitantes. El resto de las áreas se restauraron hasta niveles aceptables de riesgo.

Los edificios con valor histórico se restauraron, conservando en todo momento los elementos con valor arquitectónico y de infraestructura ferrocarrilera que les aportan un valor histórico y sentimental necesario para recordar tiempos pasados. Los especialistas en restauración arquitectónica tuvieron el cuidado de integrar estos elementos a la vida actual y hacer que esos edificios fueran funcionales y confortables, de tal manera que actualmente son rentables, pues sirven a la sociedad a través del Centro de Convenciones de la ciudad y de la Universidad de las Artes, entre otros.

Como en todo proyecto, se presentaron problemas inesperados que requirieron de soluciones rápidas. En estos casos, todas las decisiones se tomaron en conjunto entre los especialistas y las autoridades ambientales federales (SEMARNAT). Cuando se inició el proyecto no se contaba con muchos de los elementos legales que existen actualmente, como las normas oficiales mexicanas para metales e hidrocarburos en suelos (en este último caso sólo se tenía la norma de emergencia) y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y su Reglamento. Por esto, hubo necesidad de aplicar nuevos enfoques para la evaluación de sitios y la aplicación de tecnologías de remediación no contemplados en la normatividad de esa época, como fue la evaluación del riesgo ambiental y la construcción de las celdas de estabilización. El proceso para concertar acciones con la autoridad ambiental fue un poco difícil al inicio debido al desconocimiento técnico a cerca de estas propuestas; sin embargo, después de pláticas entre los especialistas y la autoridad, de la presentación de protocolos de prueba y resultados numéricos que sustentaban las propuestas fue posible establecer acuerdo de acción. Asimismo, la participación de la PROFEPA fue imprescindible para corroborar los resultados obtenidos a lo largo de todo el proceso de remediación y ayudó a establecer la confianza necesaria para el éxito del proyecto.

Otro punto de difícil solución fue la construcción del par vial Gabriela Mistral que cruza el predio. Dentro del plan maestro se reconoció la necesidad de atravesar el predio para agilizar el tráfico y también se consideró la posibilidad de construir ahí la primera celda de estabilización; sin embargo los trámites con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes no fueron sencillos. Fue necesario integrar a la administración municipal y al Consejo Consultivo de la Construcción. Esta obra benefició a más de 250 mil habitantes del sector oriente de la ciudad de Aguascalientes, reduciendo a la mitad los tiempos de recorrido y el consecuente costo de mantenimiento de los vehículos, pues ahora en tan sólo siete minutos se transita desde Av. de la Convención y Gabriela Mistral hasta el cruce de Norberto Gómez y Av. Independencia, así como en sentido opuesto, de Enrique Estrada y Petróleos Mexicanos hasta Av. de la Convención y Gabriela Mistral.

Mención especial recibe el factor económico en este proyecto. Al iniciar la evaluación del sitio, el Gobierno del Estado de Aguascalientes solicitó un estudio especializado para determinar la plusvalía del predio una vez que se lograra su restauración; el valor estimado fue de 2,500 millones de pesos. El costo estimado de la remediación en

esa época fue de 700 millones pesos, lo anterior indicaba que la remediación del predio era económicamente viable, además tenía un alto componente social. El costo estimado de la remediación se redujo considerablemente debido al depósito de materiales contaminados en celdas de estabilización. Hasta el mes de noviembre del 2010, el costo de la remediación fue de 280 millones de pesos,. Esto indica que los proyectos de remediación pueden ser una inversión atractiva para los desarrolladores de proyectos o para los mismos gobiernos federales, estatales o municipales, siempre y cuando se implemente un proyecto integral que considere las características específicas del sitio (ubicación, infraestructura, extensión, antecedentes históricos), la problemática de la contaminación y los riesgos asociados, el diseño y el desarrollo de estrategias de remediación técnicamente factibles, económicamente viables y ambientalmente seguras, así como el desarrollo de infraestructura que responda a necesidades claramente dimensionadas de tipo: social, cultural, del sector salud, comercial o industriales.

Sin duda, este es uno de los proyectos de revitalización mejor aprovechados y se espera que sirva como ejemplo para realizar otros proyectos de este tipo en México.

Fuentes de información

Aguilar, A. (1967). *Construcción de los talleres de construcciones pesadas de coches y carros de los Ferrocarriles Nacionales de México en la Ciudad de Aguascalientes*, Ags. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 108 p.

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1992). *Evaluación de riesgos en salud por la exposición a residuos peligrosos*. ATSDR.

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1999). *Toxicological profile for Total Petroleum Hydrocarbons*. ATSDR.

Cajas, D. (2006). *Estudio de factibilidad para el co-procesamiento de las aguas de sentina en plantas cementeras*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil. 169 p.

Canudas, E. (2005). *Las venas de plata en la historia de México. Síntesis de historia económica. Siglo XIX. Vol. III*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Editorial Utopía. México.

Cass, J. (1997). *Lahontan Regional Board, Petroleum Hydrocarbon Cleanup approach for soils. Staff Report*. California Regional Water Quality Control Board, Lahontan Region.

Díazmercado, M. (2009). *Inauguración del Ferrocarril Mexicano, 1873. Mirada Ferroviaria*, Boletín Documental. No. 7, 59-61.

Ferrer, G.D. e Ibarra, J. (1998). *La eficiencia de los ferrocarriles mexicanos, 1945-1985*. Comercio Exterior. 48 (9): 721-729.

FICOTRECE – Fideicomiso Complejo Tres Centurias. (2010). *Fideicomiso Complejo Tres Centurias: La llegada del ferrocarril a la Ciudad de Aguascalientes*. URL: <http://www.aguascalientes.gob.mx/ficotrece/historia/historia.aspx> (consultado en octubre de 2010).

GEA – Gobierno del Estado de Aguascalientes. (2010a). *Fideicomiso Complejo Tres Centurias. La llegada del ferrocarril a la Ciudad de Aguascalientes*. URL: <http://www.aguascalientes.gob.mx/ficotrece/historia/historia.aspx> (consultado en octubre de 2010).

GEA – Gobierno del Estado de Aguascalientes (2010b). *Estación de ferrocarril de Aguascalientes*. URL: <http://www.indaabin.gob.mx/dgpif/historicos/Estacion%20Ferrocarri%20Aguascalientes.html> (consultado en octubre de 2010).

Guajardo, G. (2007). *El taller y la confluencia del mundo industrial y ferroviario en México, ca. 1890-1950*. Mirada Ferroviaria, Boletín Documental. No. 1, 3-10.

Hernández, R.F. (2007). *El futuro de la fuerza motriz en los Ferrocarriles Mexicanos*. Mirada Ferroviaria, Boletín Documental. No. 2, 9-13.

IARC – International Agency for Research on Cancer (1989). "Fuel Oils (heating oils)". IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans. 45:119-158.

INDAABIN – Instituto de Administración y Avalúos de Bienes Nacionales (2010). *Reseñas históricas de inmuebles federales: Estación de ferrocarril de Aguascalientes*. URL: <http://www.indaabin.gob.mx/dgpif/historicos/Estacion%20Ferrocarri%20Aguascalientes.html> (consultado en octubre de 2010).

Jury A. W., Russo D., Streile G. y El Abd, H. (1990). *Evaluation of Volatilization by Organic Chemicals Residing Below the Soil Surface*. Water Resources Research. 26(1):13-20.

MADEP – Massachusetts Department of Environmental Protection (2002). *Updated petroleum hydrocarbon fraction toxicity values for the VPH/EPH/APH methodology*. Office of Research and Standards. Boston.

Maslia, M.L. y Aral, M. (2002). *Acts-A Multimedia Environmental Fate and Transport Analysis System*. ASCE Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management.

Medrano, G. (2006). *La morena y sus choriados: los ferrocarriles en Aguascalientes*. Universidad Autónoma de Aguascalientes. México.

Medrano, G. (2010). *Ay morena encantadora! Los talleres ferrocarrileros de Aguascalientes como mundo simbólico*. Mirada Ferroviaria, Boletín Documental. No. 10, 32-41.

MTCACR – Model Toxics Control Act Cleanup Regulation. *Model Toxics Control Act Cleanup Regulation Chapter 173-340 WC*. Amended February 2001.

OPS – Organización Panamericana de la Salud (2006). "Curso de autoaprendizaje: Control de riesgos sanitarios y gestión adecuada de residuos de establecimientos de atención de salud. Incineración y destrucción térmica". URL: <http://www.bvsde.paho.org/cursoreas/e/fulltext/Ponencias-ID54.pdf> (consultado en diciembre de 2010).

PROFEPA – Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (1998). *Memorias del grupo de trabajo sobre restauración de suelos contaminados*. Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. México D.F.

Rocha, M. (2000). *Evaluación de la contaminación, criterios y alternativas de rehabilitación en los talleres de Ferrocarriles Nacionales de México (FNM) en Aguascalientes, Ags., México*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. División de Estudios de Posgrado. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 143 p.

Sacristán, E. (2006). Las privatizaciones en México. *Economía UNAM*. Vol. 3., No. 9, 54-64.

TPHCWG – Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group. (1999). *Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series. Volume 5. Human health risk-bases evaluation of petroleum release sites: Implementing the Working Group Approach*. Amherst Scientific Publishers.

2

Remediación del predio ocupado por Metales y Derivados, S. A., en Tijuana, Baja California

Javier Llamas Viramontes
Gabriel Pérez Gallegos

Abreviaturas y Acrónimos

A MO	Asociación de Industriales de la Mesa de Otay
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte
CE	Celda de Estabilización
COCEF	Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CP	Coefficiente de Peligro
CPbB	Concentración Máxima Permisible de Plomo en la Sangre (traducción del inglés)
DEC	Dosis de Exposición Crónica Diaria
DRfo	Dosis de Referencia Oral
EHC	Coalición de Salud Ambiental (traducción del inglés)
EMA	Entidad Mexicana de Acreditación
ERA	Evaluación de Riesgo Ambiental
FAD	Factor de Atenuación Dilución
NSECAM	Ingeniería y Servicios en Control Ambiental Industrial S A de C V
WEM	Industrial Waste Evaluation Management
LDU	Unidades Terrestres de Disposición (traducción del inglés)
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
MMP	Máxima Migración Probable
MT1	Material Tipo 1
MT2	Material Tipo 2
MT3	Material Tipo 3
MyD	Metales y Derivados
NOM	Norma Oficial Mexicana
PECT	Procedimiento de Extracción para Constituyentes Tóxicos
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PRT	Parámetro de Referencia Toxicológica
RESNOM	Red Sísmica del Noroeste del México
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
US EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América
UTM	Universal Transverse Mercator (sistema de coordenadas)

Baja California

Remediación del predio ocupado por Metales y Derivados, S. A., en Tijuana, Baja California

1. Descripción del proyecto	49
2. Antecedentes históricos	51
3. Caracterización ambiental	55
3.1. Caracterización de los contaminantes	55
3.2. Caracterización del medio físico	57
3.2.1. Estudios geofísicos	57
3.2.2. Estudios geohidrológicos	57
3.2.3. Potencial de riesgo sísmico	59
4. Análisis de incertidumbres	60
5. Evaluación de riesgo ambiental	61
6. Celda de estabilización (CE)	63
6.1. Diseño estructural	63
6.2. Proceso constructivo de la CE	63
7. Lecciones aprendidas	68
8. Fuentes de información	69



▲
Construcción de la celda de confinamiento en el predio de Metales y Derivados.

Remediación del predio ocupado por Metales y Derivados, S. A., en Tijuana, Baja California

1. Descripción del proyecto

Metales y Derivados fue una planta industrial ubicada en Tijuana, Baja California, dedicada a la refinación de plomo y elaboración de granalla de cobre a partir de residuos, principalmente baterías automotrices (Figura 1). Operó desde julio de 1986 hasta 1994, cuando fue clausurada por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).



Figura 1. Vista del predio de Metales y Derivados, en Tijuana, Baja California (Fuente: EHC, 2011).

Durante este periodo se acumularon entre 6,367 m³ (PROFEPA, 1999) y 7,265 m³ (CEC, 2002) de residuos peligrosos, que comprendían principalmente escorias resultantes de la fundición de plomo, así como escombros, acumuladores y tambores apilados con arsénico entre

otros. Algunos de ellos en mal estado (Tetra Tech, 2004). Se estimó que existía un volumen de 20,000 toneladas de suelo contaminado con plomo y otras sustancias tóxicas, como arsénico, cadmio y antimonio (SEMARNAT, 2008; BEJC, 2009).

Metales y Derivados se localizaba en una ciudad fronteriza y era filial de la compañía estadounidense denominada New Frontier Trading Corporation, con sede en San Diego, California, EUA. Debido a que los residuos peligrosos acumulados en ese sitio no se enviaron de vuelta a los Estados Unidos de América, tal como lo indica el Acuerdo de La Paz¹ y las leyes mexicanas² (CEC, 2002), el problema fue abordado a través de una colaboración conjunta entre los Gobiernos de México y de los Estados Unidos de América a través de sus respectivas oficinas de protección ambiental.

Diferentes estudios realizados de 1999 al 2005 por la PROFEPA, la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA)³ y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América

(U.S.EPA por sus siglas en inglés), demostraron la presencia de residuos peligrosos en la superficie y en el subsuelo, además de altas concentraciones de metales pesados, principalmente plomo.

El proceso de saneamiento de este sitio inició el 24 de junio de 2004, cuando se firmó el Convenio de Remedación de Metales y Derivados entre los vecinos afectados por la planta industrial y los gobiernos estatal y federal, representados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la PROFEPA, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), el poder ejecutivo de Baja California y el XVII ayuntamiento del municipio de Tijuana.

En el año 2006, la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF) contrató los servicios de la empresa Ingeniería y Servicios en Control Ambiental Industrial, S.A. de C.V. (INSECAMI) para analizar las alternativas de la remediación, así como para realizar el proyecto ejecutivo del diseño y construcción de una celda de estabilización para el depósito de los residuos y el suelo contaminado.

1. El Acuerdo de La Paz (también denominado Tratado de La Paz) se firmó el 14 de agosto de 1983 en La Paz Baja California Sur, México, entre los gobiernos de los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América. En el Anexo III sobre los movimientos transfronterizos de desechos y sustancias peligrosas, en su artículo XIV, indica que cuando los residuos importados producen daños al ambiente, las propiedades o a la salud pública, estos deberán devolverse al país exportador, y reparar, mediante compensaciones, los daños producidos. El acuerdo entró en vigor el 16 de febrero de 1984 (USGPOW, 1983; INE, 2011).

2. LGEEPA (DOF, 1988a), artículo 153; Reglamento de la LGEEPA en materia de residuos peligrosos (DOF, 1988b), artículo 55; Ley Aduanera (DOF, 1995), artículo 108; LGPGIR (DOF, 2003), artículo 94. En la época que sucedieron los hechos, únicamente estaban vigentes la LGEEPA y su reglamento.

3. La CCA se creó en 1994 con el propósito de atender los asuntos ambientales de preocupación común, contribuir a prevenir posibles conflictos ambientales derivados de la relación comercial y promover la aplicación efectiva de la legislación ambiental en los tres países del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (CONABIO, 2011).

2. Antecedentes históricos

La empresa Metales y Derivados S.A. de C.V. (MyD) fue una filial de la compañía estadounidense New Frontier Trading Corporation que operó de 1972 a 1986 en la Avenida Internacional No. 130-1, Centro Industrial Los Pinos, en la ciudad de Tijuana, Baja California. En el año de 1986 se trasladó a un predio ubicado en la calle Dos Oriente No. 119 en la Ciudad Industrial Mesa de Otoy en el mismo municipio. La empresa operaba bajo el régimen de maquila en la compra, venta, importación y exportación de toda clase de metales no ferrosos, aleaciones y sus derivados, así como la fabricación de artículos utilizando como materia prima los productos antes citados. Las principales actividades productivas durante los primeros años de operación, consistieron en la refinación de plomo y elaboración de granalla de cobre a partir de los siguientes residuos: natas, cables de teléfono, óxidos de plomo, baterías gastadas automotrices e industriales, y otros tipos de chatarra de cobre y plomo, materiales comprados en los Estados Unidos e introducidos a México como productos reciclables. Como resultado se producían lingotes de plomo que eran revendidos en los Estados Unidos de América.

En la Figura 2 se muestra un esquema de la localización del predio. En la Figura 3, la distribución de las principales estructuras dentro del predio de la empresa.

Metales y Derivados operaba mediante dos procesos: la producción de plomo refinado y la producción de granalla de cobre fosfórico. Como materia prima usaba lodos o polvo de filtros tipo bolsa, baterías usadas industriales o de automóviles, suelo contaminado con plomo, óxido de plomo, forro de cable telefónico, y otros tipos de chatarra que contenían plomo, los cuales alimentaban a los hornos de rotación (CEC, 2002). Era considerada altamente riesgosa pues sobrepasaba la cantidad de reporte⁴ de fósforo rojo establecida en el listado de actividades altamente riesgosas (DOF, 1990), donde la cantidad de reporte es de 1 kg y la empresa manejaba hasta 1,850 kg de esta sustancia. La empresa generaba residuos peligrosos sin manejarlos de manera adecuada, principalmente escoria de plomo y cobre, polvo de filtros resultantes del proceso de refinación de plomo, envases usados de arsénico, fósforo y ácido fosfórico,



Figura 2. Ubicación del predio de Metales y Derivados, S.A. de C.V. en la Ciudad Industrial Mesa de Otoy, Tijuana, Baja California (Fuente: INSECAMI).



Figura 3. Principales estructuras dentro del predio.

cajas de plástico de baterías, lodos con metales pesados y aceite residual de montacargas.

El almacenamiento de los residuos peligrosos se llevaba a cabo primero a cielo abierto en el patio trasero de la planta, en un área abierta techada y directamente en el suelo (CEC, 2002; BORDER 2012). El manejo inadecuado

4. Cantidad mínima de una sustancia peligrosa que, en caso de producirse una liberación, provocarían la presencia de límites de concentración superiores a los permisibles, en un área determinada por una franja de 100 metros en torno de las instalaciones, o medios de transporte, y en el caso de la formación de nubes explosivas, la existencia, de ondas de sobrepresión (DOF, 1990).

de los materiales y la mala disposición de los residuos originó la contaminación del suelo durante los ocho años de operación.

En 1992 la PROFEPA del Estado de Baja California inició una serie de inspecciones en las cuales fueron identificadas diferentes irregularidades; entre las principales destacaron la carencia de control de sus hornos y el mal manejo de los residuos peligrosos. En 1994, la PROFEPA procedió a la clausura total indefinida de la empresa e inició una demanda penal en contra del propietario, esto debido a la existencia de una gran cantidad de residuos tóxicos abandonados en el sitio y a la negativa para realizar las acciones de saneamiento (HP Consultores, 1999).

Los residentes de la colonia Chilpancingo, situada justo colina abajo de las instalaciones de MyD, manifestaron su preocupación ante las autoridades mexicanas debido a la presencia de residuos tóxicos en este sitio abandonado y reportaron la incidencia de mareos, náuseas, trastornos gastrointestinales y respiratorios, erupciones cutáneas y otras enfermedades que atribuían a la exfundidora. En 1998 los vecinos afectados⁵ junto con la Coalición de Salud Ambiental⁶ (EHC por sus siglas en inglés, Environmental Health Coalition), presentaron una petición a la CCA, exigiendo la limpieza del sitio.

Ante la indiferencia de las autoridades ambientales y de salud a nivel estatal y federal, los vecinos de la colonia Chilpancingo, principalmente las mujeres, iniciaron una lucha social muy intensa para que se realizaran acciones contundentes para solucionar el problema de contaminación presente en el predio. Fue así como se creó el Colectivo Chilpancingo Pro Justicia Ambiental (Figura 4). El activismo de los vecinos fue un aspecto muy importante en este caso, ya que a diferencia de otros, la población consiguió que se reparara el daño ambiental provocado en su momento por la falta del marco normativo adecuado y las deficiencias en su aplicación.

Motivadas por su genuina preocupación por la salud de sus familias ante el peligro que representaba la cercanía de este sitio contaminado, el grupo de vecinas se instruyó en diversos talleres de capacitación organizados por la EHC, en donde se tocaban temas, y aún se hace, sobre el trabajo en conjunto para lograr el cambio, las sustancias tóxicas en los hogares y la comunidad, la contaminación



▲
Figura 4. Colectivo Chilpancingo Pro Justicia Ambiental (Fuente: EHC, 2011).

proveniente de las maquiladoras y fábricas, los tratados de comercio, la globalización y otros temas de interés ambiental para la región fronteriza (EHC, 2011). Su persistencia y preparación sobre el problema de Metales y Derivados llamó la atención de los medios y ejerció una presión tan importante ante el gobierno de México que finalmente decidió tomar cartas en el asunto en conjunto con el gobierno de los Estados Unidos de América, a través de la U.S.EPA.

En 1999 la PROFEPA realizó un estudio con el objetivo de caracterizar la cantidad y naturaleza de los residuos peligrosos ubicados en el sitio. Fueron analizadas muestras de los residuos y del suelo, los resultados confirmaron la existencia de altas concentraciones de plomo (Pb).

Durante el 2001 el Secretariado de la CCA realizó un segundo estudio enfocado esencialmente a caracterizar el grado de contaminación del subsuelo. Los resultados analíticos ratificaron la existencia de altas concentraciones de plomo principalmente en el área oeste del predio. Ese año también se integró un grupo de trabajo con la finalidad de promover y coordinar las actividades de la remediación ambiental. En éste participaron representantes de los tres niveles del gobierno mexicano: la SEMARNAT por parte del gobierno federal, el

5. En esa época, el organismo no gubernamental denominado Comité Ciudadano Pro-Restauración del Cañón del Padre A.C participó como representante de los intereses de los vecinos de la Colonia Chilpancingo (SCCA, 2000).

6. La EHC es un organismo no gubernamental dedicado a la justicia ambiental y social. Se fundó en 1980 en San Diego, California, Estados Unidos de América y en la década de 1990 abrió una segunda oficina en Tijuana, Baja California, México donde empezó a trabajar activamente en asuntos de contaminación fronteriza.

Gobierno del Estado de Baja California y el municipio de Tijuana; además, se tuvieron representantes de la COCEF y del Colectivo.

En el año 2005 el Gobierno del Estado de Baja California expropió el terreno ocupado por la empresa denominada Metales y Derivados con el propósito de dar certidumbre al proceso de caracterización y remediación del predio, ya que los dueños del terreno continuaban prófugos de la justicia.

En septiembre del 2005 la U.S.EPA realizó la primera limpieza del sitio. Se retiraron 1,976 toneladas de residuos depositados en tambos, sacos y algunos acopios, los cuales se llevaron a Estados Unidos de América financiados por el Estado de Baja California y la U.S.EPA. Después de esta actividad, la agencia realizó un exhaustivo estudio para evaluar el grado de contaminación ambiental del predio. Se tomaron 50 muestras de suelo cuyos resultados indicaron la existencia de material contaminado remanente localizado en la superficie y en el subsuelo. Los principales contaminantes identificados fueron plomo, arsénico, antimonio y cadmio; en el caso del plomo la concentración más alta registrada fue de 200,000 mg/kg.

En el año 2006 la agencia antes mencionada realizó además un estudio de evaluación del riesgo a la salud de línea base,⁷ con la finalidad de identificar las vías probables de exposición considerando las características de la población aledaña y la probable dinámica ambiental de los contaminantes prioritarios, los parámetros de limpieza de acuerdo a los antecedentes de normativas ambientales mexicana y estadounidense, así como las alternativas de remediación. Los resultados de este estudio señalaron que bajo las condiciones existentes la salud en ese momento de los vecinos estaba en riesgo y por lo tanto eran necesarias acciones de remediación. Se estableció que el nivel de limpieza del sitio dependía del uso futuro del suelo. Para el plomo específicamente, el criterio de limpieza en caso de ser uso de suelo industrial fue propuesto de 800 mg/kg, mientras que para el tipo residencial fue de 400 mg/kg y de 150 mg/kg para el suelo cuyo destino posible fuera el cultivo de vegetales para el consumo humano. Debido a la escasa capacidad de lixiviación de los contaminantes detectados, se consideraron como viables las estrategias de remediación *in situ*, con el objetivo de evitar el contacto directo y la dispersión ambiental del material contaminado.

En ese mismo año, la COCEF contrató los servicios de la empresa Ingeniería y Servicios en Control Ambiental Industrial, S.A. de C.V. (INSECAMI), para analizar las alternativas de la remediación. Esta compañía realizó estudios para determinar la distribución de la contaminación, los volúmenes de suelo y material afectado, las características geohidrológicas del sitio, los riesgos sísmicos, los riesgos a la salud y al ambiente, y las tecnologías de remediación más adecuadas. Una vez seleccionada la tecnología de confinamiento *in situ*, INSECAMI realizó el proyecto ejecutivo del diseño y construcción de la celda de estabilización para el depósito de residuos y suelo contaminado. El 14 de agosto de 2007 la SEMARNAT autorizó el programa de remediación del predio.

Durante ese tiempo INSECAMI estableció canales de comunicación con los miembros de la sociedad civil afectados. Ellos, por su parte, obtuvieron asesoría particular con el propósito de tener un tercero que pudiera defender sus intereses con respecto a los aspectos técnicos. Durante el proceso de selección de la tecnología de remediación se les explicaron las condiciones del sitio y las alternativas de remediación que contemplaban desde la no acción hasta el traslado de todo el material y suelo contaminado a un Centro Integral para el Manejo, Tratamiento, Aprovechamiento y Disposición Final de Residuos Industriales y Peligrosos (CIMARI). El Colectivo Chilpancingo acordó con INSECAMI una opción intermedia, por ser técnica y económicamente factible, satisfaciendo los intereses de los afectados y de las autoridades ambientales mexicanas: construir una celda de estabilización *in situ* para depositar ahí los materiales contaminados, tanto los superficiales como los del subsuelo.

El 4 de septiembre del año 2007 se publicó la convocatoria de licitación pública nacional, número 32006002-013-07, para la obra 10010019871 "Construcción de una Celda de Estabilización para el Depósito de Residuos y Suelo Contaminado en el Sitio de Metales y Derivados de Tijuana", y el 20 de septiembre del mismo año se declaró como licitante seleccionado para ejecutar la obra a la empresa "ALMA-CO Construcción y Diseño, S.A. de C.V.". Por su parte, la COCEF contrató nuevamente los servicios de INSECAMI para realizar la supervisión técnica de la obra.

La construcción de la obra inició el 3 de octubre del 2007, fecha en la que se llevó a cabo una reunión informativa con los miembros del Colectivo Chilpancingo para explicarles el proceso de la construcción de la celda

7. Se denomina así a la evaluación de riesgo a la salud que se realiza antes de emprender cualquier acción encaminada a reducir las exposiciones.

y se realizaron las primeras actividades de la compañía ALMACO en el predio. La celda se terminó de construir el 29 de marzo de 2008.

En la Tabla I se presenta la cronología de los principales eventos que tuvieron lugar en el predio de Metales y Derivados.

FECHA	EVENTO
1972	MyD inició actividades en el Centro Industrial Los Pinos, en la ciudad de Tijuana, Baja California.
1986	MyD se trasladó al predio ubicado en la Ciudad Industrial Mesa de Otay en el Municipio de Tijuana.
1992	PROFEPA del Estado de Baja California inició inspecciones principalmente por el mal manejo de los hornos y residuos peligrosos.
1994	PROFEPA clausuró MyD e inició una demanda penal contra el propietario. Los vecinos de la colonia Chilpancingo expresaron su preocupación al gobierno de México por la presencia de residuos tóxicos abandonados en el sitio.
1994-1998	Los vecinos afectados junto con la Coalición de Salud Ambiental exigieron la limpieza del sitio a la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA).
1999	PROFEPA realizó un estudio para caracterizar el predio (residuos y suelo). Se detectaron altas concentraciones de plomo.
2001	La CCA realizó un estudio para evaluar el grado de contaminación del subsuelo. Se creó un grupo de trabajo para coordinar los trabajos de remediación.
2000-2002	Los vecinos de la colonia Chilpancingo crearon el Colectivo Chilpancingo Projusticia Ambiental para luchar por la búsqueda de soluciones para el predio contaminado.
2005	La U.S.EPA retiró y transportó a EUA 1,976 toneladas de residuos. La agencia realizó un estudio para evaluar la contaminación remanente. Se detectó la presencia de arsénico, antimonio y cadmio y altas concentraciones de plomo.
2006	La U.S.EPA realizó un estudio de evaluación de riesgo a la salud. Se concluyó la existencia de riesgo para la población y la necesidad de remediar el predio. La COCEF contrató los servicios de INSECAMI para analizar las alternativas de remediación. INSECAMI realizó estudios de caracterización y acordó con los afectados construir una celda de estabilización in situ para el depósito de residuos y suelo contaminados.
5-Julio-2007	El gobierno de Baja California presentó a la SEMARNAT la propuesta de remediación de MyD.
14-Ago-2007	La SEMARNAT autorizó el programa de remediación de MyD.
4-Sep-2007	Se publicó la convocatoria de licitación pública nacional para la construcción de la celda de estabilización.
20-Sep-2007	Se asignó la obra a la empresa "ALMACO Construcción y Diseño, S.A. de C.V". INSECAMI quedó a cargo de la supervisión técnica.
3-Oct-2007	Iniciaron las obras de construcción de la celda de estabilización.
29-Mar-2008	Concluyó la construcción de la celda de estabilización.

▲ *Tabla I. Cronología de los principales eventos relacionados al predio de Metales y Derivados en Tijuana, Baja California, México.*

3. Caracterización ambiental

Para realizar la caracterización ambiental además de la magnitud y distribución de los contaminantes en el predio, se consideraron las características geohidrológicas y sísmicas del área. Esta información sirvió para analizar las tecnologías de remediación más apropiadas.

3.1. Caracterización de los contaminantes

En el año 2006 la compañía INSECAMI S. A. de C.V. fue contratada por la COCEF para proponer las alternativas de la remediación. Para este propósito, la compañía revisó los estudios de caracterización realizados previamente por PROFEPA en 1999, la CCA en 2001 y la U.S.EPA en 2005 (después de retirar 1,976 toneladas de residuos); asimismo, realizó un estudio de caracterización propio. El objetivo del análisis fue conocer el volumen de material contaminado tanto en la superficie como en el subsuelo, pues había antecedentes de que MyD utilizó escorias, escombros y polvos contaminados para nivelar el terreno.

Debido al giro de las actividades de Metales y Derivados, se determinó al plomo como el indicador más apropiado para medir la contaminación, aunque también hubo registro de otros elementos como el arsénico, el antimonio, el hierro, el cromo y el cobre.

Otro objetivo de análisis fue conocer la presencia, concentración y potencial de lixiviación de contaminantes

hacia el agua subterránea. Esta información era necesaria ya que la construcción de una celda de estabilización fue considerada desde el inicio como una de las alternativas de remediación y se debía estimar sus dimensiones.

Con el objetivo de obtener una mejor caracterización del daño ambiental, se concentraron en una sola base de datos los resultados de los estudios previos y los registrados por INSECAMI.

INSECAMI realizó el muestreo complementario en el año 2006. Se siguió un esquema de tipo reticular, donde los puntos de muestreo fueron equidistantes con el objetivo de proporcionar mayor estabilidad al modelo geoestadístico. Se usó una retícula conformada de 35 puntos de muestreo, 11 de ellos localizados fuera de la barda perimetral del sitio. Los puntos de muestreo se georreferenciaron. Todas las muestras de suelo se colocaron en frascos de vidrio y un laboratorio acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) determinó las concentraciones de plomo mediante el método EPA 6010-B 1996.

La Figura 5 presenta la ubicación de los puntos de muestreo establecidos por INSECAMI en el año 2006, así como los puntos de muestreo de las campañas anteriores. En la Tabla 2 se muestra el resumen estadístico de los resultados encontrados para plomo.

Con los resultados obtenidos se delimitó la distribución espacial de las concentraciones superficiales de plomo lo cual se muestra en la Figura 6. Asimismo, mediante un levantamiento topográfico se estimó el volumen de los diferentes acopios de material contaminado depositados

PARÁMETRO	PROFEPA (1999)	CEC (2001)	U.S.EPA (2005)	INSECAMI (2006)
Promedio	51,796	8,567	31,797	29,234
Desviación estándar	72,517	22,193	53,424	50,183
Máximo	220,500	77,590	230,000	180,951
Mínimo	81	ND	ND	17
Número de datos	19	15	37	39

ND = No detectado

▲ **Tabla 2.** Concentraciones de plomo (mg/kg) encontradas en el predio de Metales y Derivados en los diferentes muestreos realizados.

sobre la superficie, obteniéndose un total de 7,334 m³ de material: suelo contaminado con plomo y otros elementos (86%), carcasas de baterías mezcladas con circuitos electrónicos, basura doméstica y suelo (9%), suelo contaminado tratado con polifosfatos (4%) y escombros (1%). Para efectos prácticos se consideró un 20% de abultamiento, dando como resultado un volumen de material

contaminado depositado en la superficie de 9,280 m³. En el caso del subsuelo, se hicieron perforaciones y zanjas de muestreo de hasta tres metros de profundidad, obteniéndose con ello un volumen estimado de 6,442 m³. Se consideró como criterio de contaminación la concentración de riesgo aceptable para la salud humana, establecida por el estudio de la U.S.EPA de 2005 (800 mg/kg).



Figura 5. Ubicación de puntos de muestreo en las diferentes campañas realizadas en el predio de Metales y Derivados (Fuente: INSECAMI).

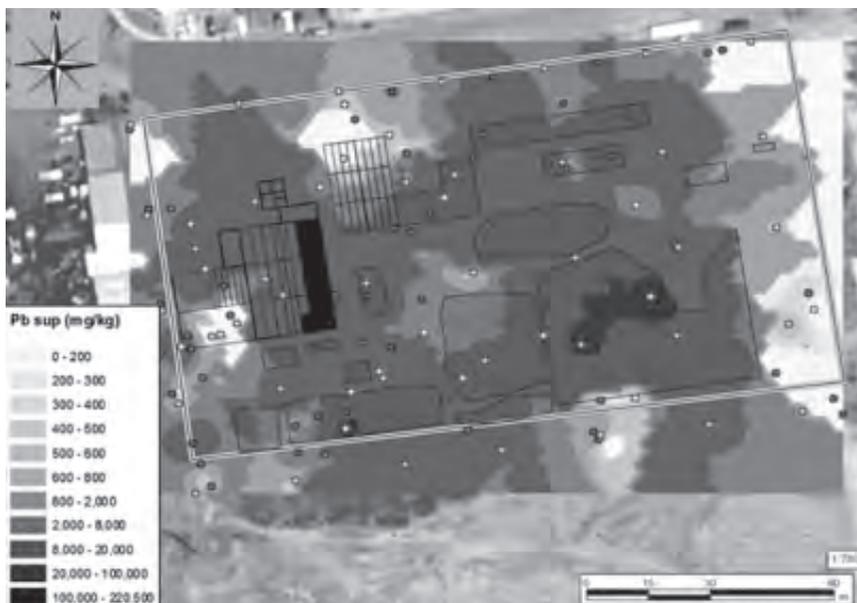


Figura 6. Distribución de plomo superficial en el predio de Metales y Derivados. Los puntos de muestreo sirven como base para la configuración de la pluma contaminante (Fuente: INSECAMI).

3.2. Caracterización del medio físico

Para obtener información relacionada con el grado de contaminación del subsuelo, además de las características litoestatigráficas, geohidrológicas y sismológicas del sitio, se realizaron diferentes estudios que se describen de manera breve.

3.2.1. Estudios geofísicos

Los estudios geofísicos tuvieron el propósito de conocer las formaciones litográficas del sitio. En el área del patio de maniobras se realizaron tres perforaciones y una zanja de exploración o perfil (*Figura 5*).

Se eligió al área oeste para realizar las perforaciones exploratorias con base en los resultados previos que indicaron la presencia de material contaminado en el subsuelo. Adicionalmente, se hizo una zanja de exploración con retroexcavadora de las siguientes dimensiones: 4.35 m de largo, 3.0 m de ancho y 4.35 m de profundidad a fin de ampliar el área de exploración y así tener una mejor identificación de las fronteras litoestratigráficas y mayor facilidad para tomar muestras de suelo con fines analíticos.

Se realizaron exploraciones geofísicas en el área de estudio mediante la ejecución del método de prospección eléctrica, utilizando las técnicas de sondeos dipolo–dipolo. En términos generales se distinguieron dos tipos de conductividades: a) la conductividad metálica que caracteriza a los metales y por consiguiente a los minerales, por ejemplo las piritas, la galena, la magnetita y los sulfuros de cobre y, b) la conductividad electrolítica. En este tipo de estudios, la corriente se propaga en forma de iones, por lo que depende del contenido de agua de las rocas. Debido a lo anterior el método de las resistividades es particularmente útil para valorar las prospecciones hidrogeológicas y geotécnicas

La resistividad de las rocas es en general elevada del orden de 100,000 veces mayor que la de los metales puros. Los minerales que constituyen las rocas, salvo raras excepciones, como el grafito o los sulfuros metálicos, son aislantes perfectos. Entonces la resistividad de las rocas depende esencialmente de su contenido de agua y de su composición química. En resumen, la resistividad del terreno depende de los siguientes tres factores: a) la naturaleza litológica

de las rocas y suelos, b) el contenido de agua y c) la composición química del agua.

La técnica dipolo–dipolo resulta apropiada para los estudios de geotecnia que exigen poca profundidad. La finalidad de este estudio fue la de configurar con detalle las características de continuidad o discontinuidad del subsuelo, especialmente identificar la presencia de estructuras de falla o agrietamientos que pudieran representar riesgo para la construcción de la celda de estabilización. En el estudio se trazaron cuatro líneas geoelectricas tipo dipolo–dipolo, que fueron ubicadas preferentemente al norte y sur del predio de Metales y Derivados.

Los resultados derivados de las perforaciones y el estudio geoelectrico indicaron que:

- El estrato superficial (0 a 3.5 a 4.0 m) corresponde con la presencia de arcillas de comportamiento plástico mezcladas con residuos metálicos, intercalada lateralmente con depósitos superficiales de arena suelta con gravas y boleos. Esta unidad aparece configurada principalmente en la porción media y oriente del predio. En algunos sitios aislados, se registraron cambios eléctricos que indicaron la presencia de residuos de baterías, escombros y basura.
- Debajo de ésta se encuentra una capa de areniscas con mediano grado de consolidación intercaladas con horizontes de gravas y paquetes de boleos medios y gruesos. Esta unidad puede alcanzar entre 10.0 y 13.0 m de espesor.
- La unidad de base corresponde con una secuencia de areniscas, gravas y boleos con mayor grado de compactación, materiales que fueron detectados a partir de 10 a 13 m de profundidad.

3.2.2. Estudios geohidrológicos

La caracterización de los aspectos hidrogeológicos del acuífero en el entorno al predio de Metales y Derivados, fue realizada a partir de la recopilación de información geohidrológica proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de recorridos y verificaciones de campo y por los propietarios de los pozos cercanos al área de estudio.

Se realizó un análisis de la distribución de pozos existentes, la relación que guardan entre ellos y su posible influencia sobre el predio de Metales y Derivados. A lo largo del cauce del arroyo Alamar, ubicado al sur de la colonia Chilpancingo, se identificó un acuífero libre

superficial, de poca importancia hidrológica, localizado en materiales medios y finos, cuyo flujo y capacidad de almacenamiento depende esencialmente de las condiciones de recarga pluvial.

El acuífero se extiende de noreste-suroeste y fluye desde las áreas de recarga, en las elevaciones aledañas al Cañón del Padre, hasta la zona de descarga natural e intersección con el cauce mayor del río Tijuana. Los resultados de exploraciones geofísicas y estudios geohidrológicos realizados en la cuenca del río Tijuana, indicaron la existencia de un posible acuífero inferior a una capa de materiales arcillosos detectado entre 100 y 200 metros de profundidad; debido a lo anterior, se sugirió la perforación de pozos a más de 200 m de profundidad, donde existe un posible almacenamiento de agua no captada (SARH, 1978).

La profundidad del nivel estático se determinó del orden de los 81 m. La información de curvas de igual elevación de niveles, señaló la existencia de un gradiente hidráulico general con rumbo noreste-suroeste, con inclinación aguas abajo del cauce del río Alamar y cuyos valores numéricos en algunas franjas dentro del cauce alcanzaban un mínimo de 5 m/km.

Una vez integrada la información de los aspectos y propiedades hidrogeológicas del acuífero, se procedió con la evaluación del potencial de contaminación del sitio, de acuerdo con los requisitos de la NOM-055-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004). Dentro del área de estudio se realizaron tres pruebas de permeabilidad in situ para obtener valores reales del coeficiente de permeabilidad del estrato de confinamiento. Las pruebas consistieron básicamente en la medición de la velocidad de infiltración del agua en tres pozos sin ademe, de cuatro metros de profundidad cada uno y en condiciones de carga constante. Estos resultados mostraron que los materiales depositados en la zona no saturada presentan baja conductividad hidráulica, a diferencia de los materiales que rellenan el cauce del arroyo y su zona de saturación. El factor de tránsito de infiltración calculado fue de 1.753×10^{-11} l/s. Este valor es inferior al valor frontera definido en la NOM-055-SEMARNAT-2003, por lo que el sitio se consideró apto para la construcción de la celda de confinamiento.

También se aplicaron modelos matemáticos para evaluar el potencial de migración de los contaminantes a través del medio poroso hacia el agua subterránea. Para ello se utilizaron los resultados de las pruebas de lixiviación establecidas en la NOM-053-ECOL-1993 (DOF, 1993) y en el método EPA 1312 (U.S.EPA, 1994); en estas pruebas se empleó el plomo como elemento de referencia debido a su potencial tóxico y a que se encontraba en muy altas concentraciones. Las pruebas de lixiviación se realizaron en el suelo contaminado estabilizado con cemento Portland. Se usó el límite máximo permisible para plomo en el lixiviado de extracción (5.0 mg/l) establecido en la NOM NOM-052 SEMARNAT-2005 (DOF, 2006)⁸.

Para estimar la máxima migración probable (MMP) se consideró que la celda de estabilización no contaría con una malla protectora (geomembrana), por lo que los residuos serían depositados directamente en el suelo. Para simular la migración hacia el agua subterránea bajo este escenario se utilizó el programa de cómputo Industrial Waste Evaluation Management (IWEM) de la U.S.EPA, usado frecuentemente en los Estados Unidos de América para evaluar y diseñar los mecanismos de protección del agua subterránea en la construcción de las unidades terrestres de disposición (Land Disposal Units, LDU), reglamentadas en el Programa de Restricciones de Disposición en Tierra (Land Disposal Restrictions Program).

Los parámetros empleados para simular la migración de contaminantes fueron:

- Factor de infiltración específico (m/año)
- Profundidad del nivel estático (m)
- Gradiente hidráulico regional
- Espesor del acuífero (m)
- pH
- Área de la celda de estabilización (m²)
- Distancia de la celda al pozo más cercano (m)
- Tipo de acuífero
- Tipo de suelo
- Tasa de recarga (m/año)
- Distancia del piso de la celda al nivel freático (m)

El programa de cómputo estima la concentración que el plomo alcanzaría en un pozo que suministra agua a la

8. Los resultados del Procedimiento de Extracción para Constituyentes Tóxicos (PECT) obtenidos con el método indicado en la NOM-053-ECOL-1993, se compararon con los límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT contenidos en la NOM-052 SEMARNAT-2005. Las concentraciones promedio obtenidas en las pruebas de laboratorio no rebasaron estos límites, sin embargo, el valor establecido para plomo en esta última norma fue el que se empleó en las simulaciones (5.0 mg/l).

población receptora; en el punto de exposición donde la población tomaría el agua para su abastecimiento. Para lo anterior, se consideró el 90% de los casos probables. Los resultados anteriores fueron comparados con diferentes referencias de calidad del agua potable establecidos por instituciones federales en los EUA. Los parámetros utilizados en la simulación incorporaron la información obtenida de los estudios geofísicos y las pruebas de permeabilidad *in situ*; para aquellos casos en que algunas mediciones no se tenía información específica del sitio fueron estimados mediante el análisis probabilístico MonteCarlo.

Los resultados mostraron que bajo las condiciones geohidrológicas específicas del sitio, y considerando una concentración hipotética inicial de plomo de 5.0 mg/l en el lixiviado que pudiera generarse en los residuos depositados en una celda de estabilización, se tendría una concentración en el agua subterránea de 5.55×10^{-13} mg/l de plomo y un factor de atenuación-dilución (FAD) del 100%. El FAD representa el potencial integrado que poseen los elementos constitutivos del suelo y del medio hidrológico para atenuar la migración de los contaminantes. El valor estimado de atenuación en la migración de los contaminantes fue tan alto debido a los bajos coeficientes de conductividad hidráulica identificados en el sitio y el gran espesor de la zona no saturada, la cual comprende 81.0 m. Por lo anterior, se estableció que el depósito del material contaminado en la celda propuesta tendría un riesgo mínimo de contaminación del agua subterránea.

3.2.3. Potencial de riesgo sísmico

El predio de Metales y Derivados se asienta sobre una zona de actividad telúrica por lo que se evaluó el potencial de riesgo sísmico.

Se consultaron los catálogos y registros instrumentales de la Red Sísmica del Noroeste del México (RESNOM), seleccionándose sismos tipo que aparecen como eventos recientes. También se consideraron un sismo en la falla La Nación, localizada al norte de la ciudad de Tijuana y un posible evento en la falla Imperial, para los cuales se estimó la aceleración máxima a esperar en la zona. En este último cálculo se usaron relaciones de atenuación publicadas para diferentes regiones sísmicas del mundo, principalmente para California, Centro y Sudamérica.

Se estimó el valor de aceleración máxima, considerando los resultados del análisis del evento sísmico de magnitud 3.1° en la escala de Richter, que ocurrió el 27 de noviembre del 2006, cuyo epicentro fue localizado a 47 km al Oeste de la ciudad de Tijuana; el valor obtenido fue de 129 gales. También se analizó el escenario de un terremoto local, a partir de las curvas de valores de intensidades sísmicas, utilizadas en el trabajo de Acosta y Montalvo (1997). Este trabajo supone la ocurrencia de un terremoto de magnitud 6.5° en la escala de Richter en falla La Nación (localizada a 5 km al norte de Tijuana en EUA), la aceleración teórica máxima calculada fue de 0.69 g (690 gales).

Adicionalmente se consideró un sismo de mayor magnitud en el área de la falla Imperial, localizada a 200 km al oriente de Tijuana. La magnitud de este sismo se estimó en 7° en la escala de Richter, con lo cual se obtuvo una aceleración teórica máxima estimada de 0.124 g (124 gales).

Con lo anterior se concluyó que:

- El evento sísmico reciente de 3.1° localizado a 47 km al oeste de la ciudad de Tijuana, registró escaso riesgo sísmico para la ciudad;
- El hipotético evento sísmico de 7°, localizado a 200 km al oriente de la ciudad de Tijuana que pudiera ocurrir sobre el eje principal del sistema de fallas San Andrés – Golfo de California, produciría un escaso riesgo para la zona de estudio.
- En ambos casos debido a la ley de atenuación, la distancia al epicentro, disminuye el riesgo sísmico de generar una elevada aceleración en el suelo.
- El posible evento sísmico de 6.5° que pudiera ocurrir en la falla La Nación, localizada a 5 km al norte de la ciudad de Tijuana, desarrollaría el valor máximo de aceleración esperado en la zona, generando la posibilidad de dañar estructuras civiles.

Por otra parte, se consideraron los fenómenos referenciados como peligros colaterales al posible terremoto, tales como las llamadas fallas del suelo (licuefacción, deslizamientos y expansividad), y tomando en cuenta la litología superficial de la zona de estudio, junto con el mapa de pendientes donde predomina un intervalo de 15 a 30 grados en flancos del arroyo Alamar; fue posible establecer que el potencial de licuefacción y deslizamientos en el área de Metales y Derivados es bajo y por lo tanto la construcción de una celda de estabilización era factible.

4. Análisis de incertidumbres

La principal incertidumbre asociada con la construcción de una celda de estabilización se relacionó con los fenómenos de lixiviación de compuestos contenidos en el suelo estabilizado y el grado de afectación del agua subterránea.

Para caracterizar y dimensionar las tensiones del sistema, se realizaron diferentes pruebas de tolerancia, a fin de establecer los rangos límites de cambio en las principales variables directamente relacionadas con la estimación del riesgo a la salud. La principal variable considerada para este análisis fue el comportamiento teórico de las concentraciones del Pb lixiviable (en el rango considerado fue hasta 500 veces más que el identificado en las pruebas de estabilización), y el nivel de Pb en el agua subterránea que se obtendría en el 90% de los casos probables. El análisis se realizó considerando la tasa de infiltración de 0.022 m/año, establecida de acuerdo a los estudios realizados en el sitio, así como también la simulada a través de MonteCarlo.

Los resultados indicaron que bajo las dos circunstancias y en el peor de los casos (500 mg/l de Pb lixiviable),

la concentración de Pb en el agua sería, por lo menos, dos unidades logarítmicas inferior al nivel límite de referencia de Pb en el agua subterránea (0.015 mg/l). Por otra parte, considerando un valor de Pb lixiviable de 50 mg/l, 50 veces superior al valor promedio identificado en las pruebas de campo, fue necesario incrementar 5 veces la tasa de infiltración de 0.022 m/año para igualar el valor límite antes mencionado. También, bajo la condición de 50 mg/l de Pb lixiviable, hubiera sido necesario un nivel estático (NE) del acuífero subyacente de solo 10 m para alcanzar dicho límite, pero en el sitio se tiene una profundidad mucho mayor (81 m), lo que establece condiciones más protectoras para el acuífero.

Todos estos resultados confirmaron que existía un amplio margen de seguridad para la construcción de una celda de estabilización, sobre todo considerando que en el análisis de tolerancia no se contempló la presencia de barreras físicas, tales como capas de arcilla o materiales geosintéticos, que sí serían usados en el diseño de la celda.

5. Evaluación de riesgo ambiental

Con la finalidad de valorar el efecto en la salud por la probable modificación en las concentraciones de contaminantes en el agua subterránea, resultado de la lixiviación de los residuos depositados en la celda de estabilización en el sitio de Metales y Derivados, se realizó una evaluación de riesgo ambiental (ERA). El escenario de exposición considerado la ingestión de agua subterránea afectada por los lixiviados, teniendo como receptor a la población más vulnerable, niños residentes en el área adyacente al predio.

El contaminante evaluado fue el plomo, ya que presentaba la mayor concentración y distribución espacial en el sitio, y la gravedad de sus efectos tóxicos es bien conocida.

En la bibliografía especializada en información toxicológica no está reportada la dosis de referencia oral del plomo (DRf_o) para esta sustancia, lo que limita el cálculo del coeficiente de peligro (CP)⁹ para este metal. En este estudio se utilizó una DRf_o aproximada calculada de acuerdo con la información publicada en U.S.EPA (2001), en esta se considera que un niño joven que mantiene una ingestión crónica de 15 $\mu\text{g}/\text{día}$ de Pb, no excede el valor crítico de 10 $\mu\text{g}/\text{dl}$ de plomo en sangre, concentración máxima permisible de este metal. De acuerdo con lo anterior; para un niño de 15 kg de peso corporal, una dosis de 1 $\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{día}$ (0.001 $\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{día}$) representaría una dosis que no sobrepasa el valor crítico de Pb en sangre; esta dosis es lo que se tomó como valor aproximado de DRf_o para estimar el CP, con la ecuación:

$$CP_i = \frac{DEC_{ij}}{PRT_{ij}}$$

Donde:

CP_{ij} Coeficiente de peligro para el compuesto i, por la vía de exposición j (adimensional).

DEC_{ij} Dosis de exposición crónica diaria para el compuesto i, por la vía de exposición j ($\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{día}$).

PRT_{ij} Parámetro de referencia toxicológica para el compuesto i, por la vía de exposición j ($\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{día}$ o mg/m^3). En este caso el PRT usado fue la DRf_o estimada para niños expuestos al plomo por la vía oral (0.001 $\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{día}$).

La DEC para ingestión de plomo (agua subterránea) se calculó con la ecuación:

$$DEC = \frac{(C_{as})(TI)(FE)(DE)}{(PC)(TP)}$$

Donde:

DEC Dosis de exposición crónica diaria para el plomo, por la vía de exposición de ingestión de agua subterránea ($\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{día}$).

Cas Concentración del plomo en el agua subterránea (mg/l).

TI Tasa de ingestión de agua subterránea ($\text{l}/\text{día}$).

FE Frecuencia de la exposición ($\text{días}/\text{año}$).

DE Duración de la exposición (años).

PC Peso corporal promedio de los receptores (niños) (kg).

TP Tiempo promedio (días).

En la Tabla 3 se muestran los parámetros empleados para el cálculo de la DEC. Como ya se explicó anteriormente, los resultados de la modelación demostraron que el potencial de lixiviación de este elemento al agua subterránea es mínimo, lo cual se atribuye a la baja conductividad hidráulica del sitio y el espesor de la zona no saturada (81.0 m). Sin embargo, para efectos del cálculo se usó la concentración en el agua subterránea estimada en párrafos anteriores, y que se calculó suponiendo una concentración hipotética inicial de plomo de 5.0 mg/l en el lixiviado que pudiera generarse en los residuos depositados en una celda de estabilización. Esta concentración estimada fue de 5.55×10^{-13} mg/l de plomo.

9. El CP es la forma de estimar el riesgo en el caso de sustancias que producen efectos sistémicos. Este cociente es un número adimensional que resulta de dividir la dosis de exposición de los receptores entre un valor toxicológico de referencia obtenido por los toxicólogos en pruebas de laboratorio y que se denomina dosis de referencia (DRf). Existen DRf para cada vía de exposición (oral, contacto dérmico e inhalación).

En el caso de la vía de ingestión del agua subterránea potencialmente contaminada por plomo fue de 1.57×10^{-12} mg/kg·día y la DRf₀ usada fue el valor de 0.001 mg/kg·día señalada en párrafos anteriores. El

coeficiente así obtenido fue de 1.57×10^{-09} , inferior al valor límite de 1.0. Por lo tanto, considerando los efectos no cancerígenos, se determinó que el depósito de residuos en la celda propuesta representaba un riesgo aceptable.

PARÁMETRO	VALOR
Concentración del plomo en el agua subterránea (mg/l) – CAS	5.55×10^{-13} mg/l
Tasa de ingestión de agua subterránea (l/día) – TI	1 l/día
Frecuencia de la exposición (días/año) – FE	350 días/año
Duración de la exposición (años) – DE	6 años
Peso corporal promedio de los receptores (niños) (kg) – PC	15 kg
Tiempo promedio (días) – TP	70 años

▲ *Tabla 3. Parámetros para el cálculo de la DEC por ingestión de plomo contenido en el agua subterránea.*

6. Celda de estabilización (CE)

A partir de los resultados del análisis de incertidumbres y la ERA, se determinó que la construcción de una celda de estabilización (CE) era factible, por lo que se procedió a seleccionar la localización de ésta en el predio. La celda se construyó en la parte poniente del predio, en las siguientes coordenadas con orientación Este-Oeste, UTM: 5073202.09 y 3599193.83 al Noroeste, 507391.43 y 3599131.87 al Sureste. En una superficie de 6,000 m² y la capacidad útil calculada fue de 21,478m³.

La construcción de la obra se inició 3 de octubre de 2007. Ese día se informó a los miembros del Colectivo Chilpancingo sobre el proceso constructivo de la celda de estabilización y se hizo la entrega oficial del inmueble a la empresa ALMACO que fue la encargada de la construcción de la obra bajo la supervisión de la compañía INSECAMI.

6.1. Diseño estructural

Las actividades preliminares iniciaron con informando a los miembros del Colectivo Chilpancingo del proceso constructivo de la CE. Posteriormente se realizaron las actividades que se muestran en la Figura 7.

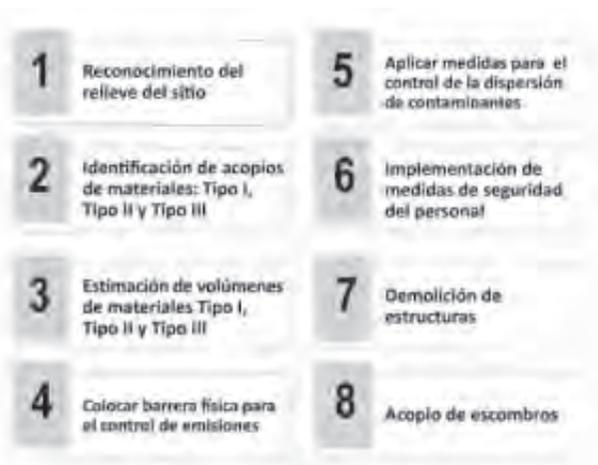


Figura 7. Actividades preliminares a la construcción de la celda de estabilización dentro del predio de Metales y Derivados.

El suelo se clasificó en:

- Material tipo 1 (MT1): suelo contaminado entre 0 y 2 m de profundidad.
- Material tipo 2 (MT2): suelo sin evidencias de contaminación entre 0 y 2 m.
- Material tipo 3 (MT3): suelo no contaminado entre 2 y 4.7 m.

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, material contaminado localizado en la superficie y en el subsuelo, procedente de las áreas del patio de maniobras, edificio de fundición y zona oriente; se le denominó material tipo 1 (MT1) y para la construcción de la celda de estabilización fue necesario extraerlo mediante cortes por medios mecánicos hasta una profundidad estimada de la superficie, 2.0 m. Asimismo, el suelo que durante las inspecciones no mostró evidencias de contaminación y que se encontraba de 0 a 2.0 m de profundidad, se denominó material tipo 2 (MT2). Este material (aproximadamente 9,193 m³) se acopió temporalmente fuera del predio para su posterior aprovechamiento en la formación de bases y abroche de la CE.

El suelo no contaminado, localizado a una profundidad entre 2.0 y 4.7 m, se denominó material tipo 3 (MT3) y se acopió también fuera del predio; este material se usó en las siguientes etapas de la construcción de la CE para la cubierta. Durante la excavación del material se encontraron estructuras tanto en el subsuelo como en la superficie (zapatas, bases, crisoles, etc.), que necesariamente fueron demolidas. El escombros resultante fue almacenado dentro del predio, lo que redujo el área de maniobras para la construcción de la celda de estabilización. Durante el movimiento de tierras se roció agua para evitar la dispersión de partículas y los acopios de material contaminado se cubrieron con polietileno negro calibre 600 (Figura 8).

6.2. Proceso constructivo de la CE

La excavación del material MT1, MT2 y MT3 (Figura 9) se hizo respetando las dimensiones de diseño establecidas para la CE (75.0 m en el eje Norte-Sur, 80.0 m en el

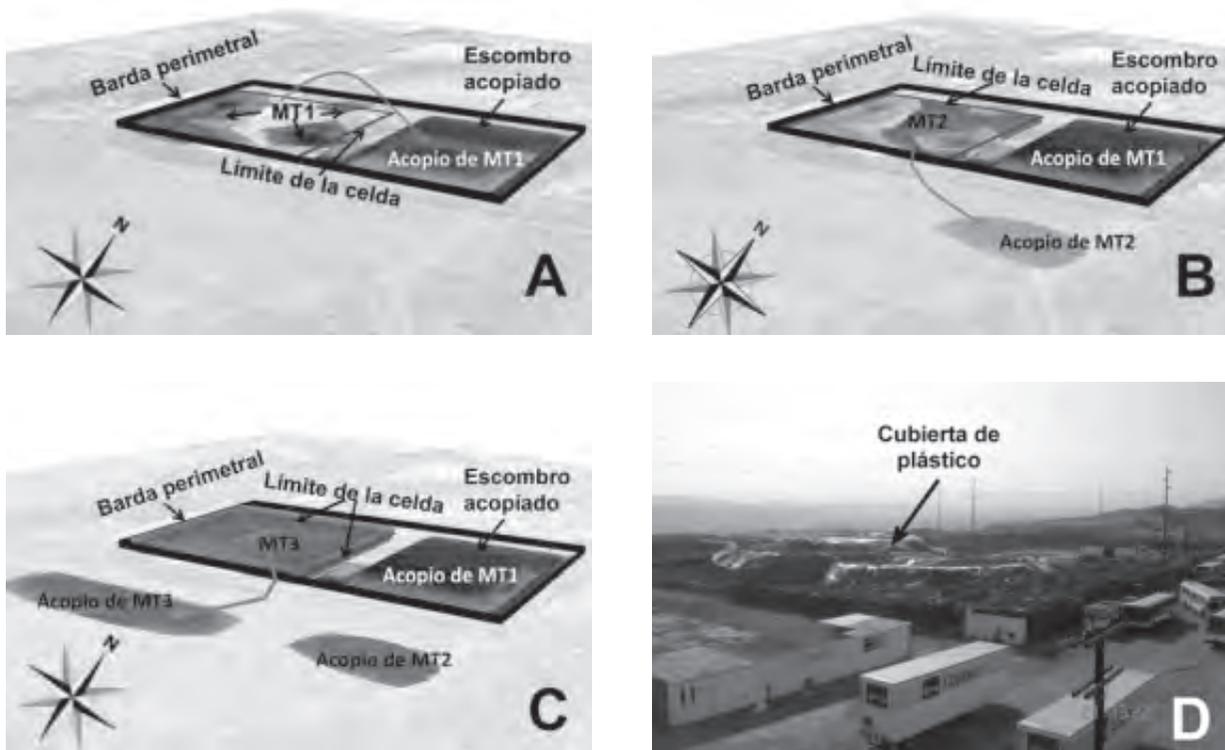


Figura 8. A) Extracción y acopio de material tipo 1. B) Extracción y acopio de material tipo 2. C) Extracción y acopio de material tipo 3. D) Vista del material tipo 1 acopiado dentro del predio de Metales y Derivados.

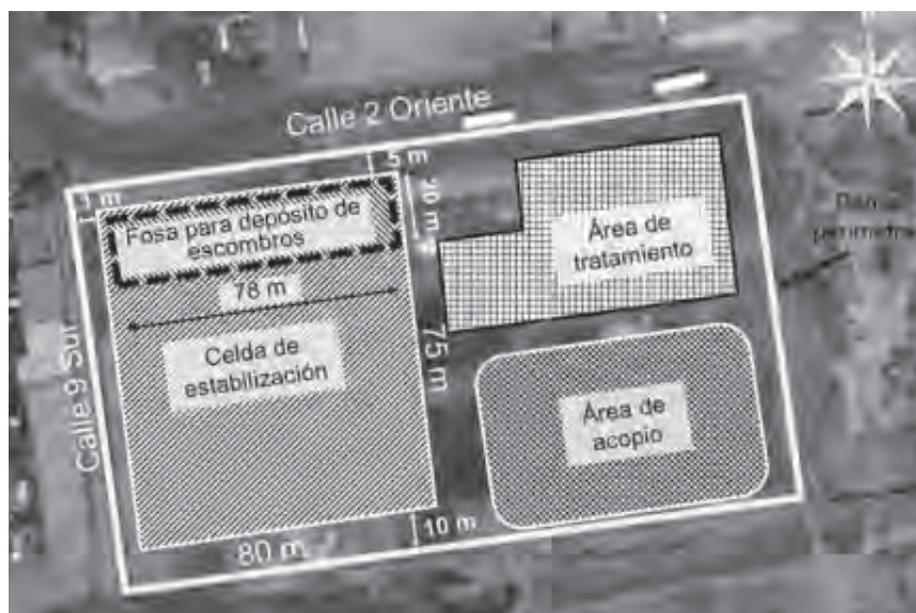
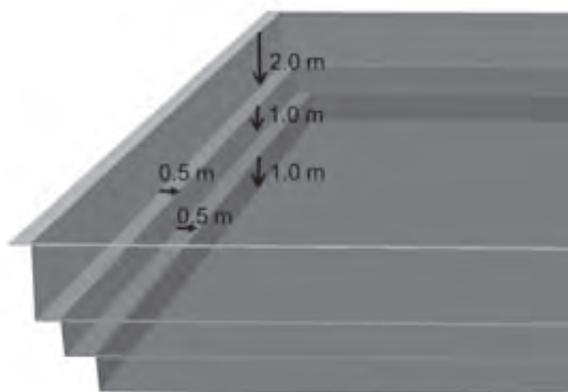


Figura 9. Dimensiones de la celda de estabilización y ubicación de las áreas de acopio y tratamiento de material contaminado dentro del predio de Metales y Derivados.

eje Oriente-Poniente y 4.0 m de profundidad máxima). La fosa se hizo de forma escalonada, cada escalón tiene 50 cm de ancho y el primer escalón un peralte de 2.0 m, el segundo y tercero de 1.0 m, a fin de dar mayor estabilidad a la CE (Figura 10).



▲ **Figura 10.** Escalones de la excavación de la celda de estabilización.

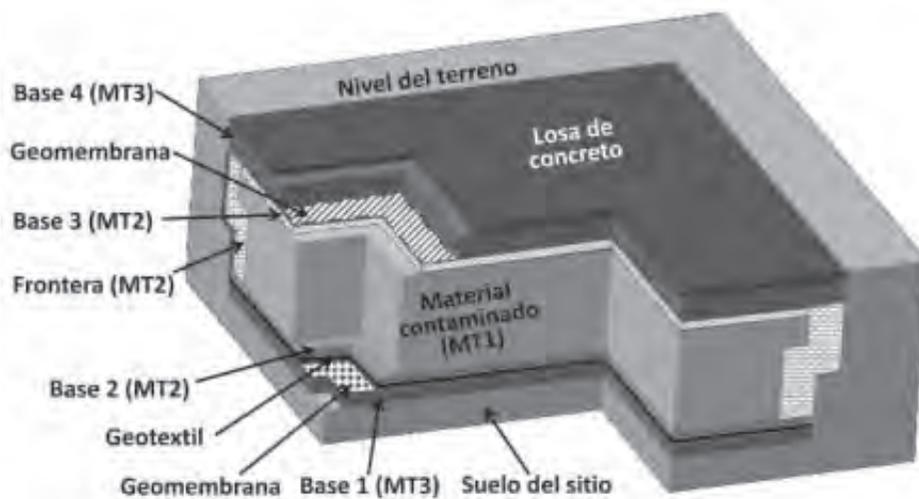
En la Figura 9 se observa la ubicación de la fosa para el depósito del escombro ubicada en la sección norte de la celda de estabilización. Esta fosa fue un ajuste que se hizo al diseño original de la celda, ya que durante el proceso de demolición y acopio de las estructuras y

edificaciones se observó que este material no estaba contaminado y su disposición fuera del predio era muy costosa. Más adelante se explica lo referente a esta fosa.

La CE se diseñó para que el MT1, previamente estabilizado, fuera depositado en su interior de manera segura, de tal forma que en caso de que se produjera algún lixiviado, fuese contenido por la estructura de la celda. El diseño consideró capas de diferentes materiales en el basamento y una cubierta de concreto en la parte superior para su sellado (Figura 11). El MT3 se empleó en la formación de la base y la capa de cerrado de la CE que está en la parte más externa de la celda, en contacto más directo con el suelo limpio de la base y la superficie del terreno. Esto, debido a que se clasificó como suelo definitivamente no contaminado, mientras que en las capas más internas de la CE, en contacto con el material contaminado, se colocaron capas de MT2.

La denominada Base 1 (Figura 11) tiene un espesor de 20 cm y se construyó con una mezcla de MT3, arenisca y 6% de cemento Portland, compactada al 95% utilizando el método Proctor modificado. Sobre la Base 1 se colocó la geomembrana de 1,500 micras de espesor y después un geotextil como protección de los posibles materiales punzocortantes encontrados en la Base 2.

El proceso de elaboración de la Base 2 es similar al de la Base 1 pero el material utilizado fue el MT2. Esta base fue colocada sobre las membranas y a su vez, está en contacto directo con el material contaminado y confinado, MT1. A fin de asegurar su impermeabilidad, se



▲ **Figura 11.** Esquema del diseño de la celda de estabilización dentro del predio de Metales y Derivados.

hizo una mezcla con el cemento Portland y la arenisca. Alrededor del material MT1, se colocó un relleno o frontera de 70 cm de espesor de material impermeable — MT2, cemento al 3% y arenisca — esta frontera es un abroche perimetral que protege a los taludes de la celda.

Previo a su depósito en la celda de estabilización, el MT1 recibió tratamiento para evitar la generación de lixiviados. El material contaminado se transportó desde la zona de acopio hasta la zona de tratamiento, donde se mezcló con cemento Portland al 3% y arenisca, posteriormente la mezcla se transportó con equipo mecánico hasta la celda de estabilización donde se compactó en capas de 20 cm con equipo mecánico hasta obtener el 95% de su peso volumétrico seco máximo (PVSM). Las capas de MT1 se intercalaron con material heterogéneo (MH) reunido dentro del predio de Metales y Derivados.

Durante el proceso inicial de demolición y acopio de materiales se identificaron 200 m³ de diversos residuos, tales como: carcasas de baterías automotrices, placas de circuitos electrónicos y otras piezas metálicas (Figura 12). La naturaleza de este material dificultaba grandemente el proceso de estabilización por lo que se decidió depositar estos residuos directamente (sin tratamiento) dentro de la CE, intercalando capas de entre 15 y 20 cm de espesor con las capas de 20 cm de MT1 estabilizado, de tal forma que el material quedara limitado en la base y los bordes por el material tratado y fuertemente compactado; y fuertemente compactado; estas características disminuyen de forma muy notable la conductividad hidráulica del suelo y con esto la migración potencial horizontal y vertical de los contaminantes. Como ya se mencionó, los escombros resultantes de la demolición de estructuras también se dispusieron dentro de la celda de estabilización pero en una fosa adicional que se excavó al fondo de la celda.

La fosa tiene un área aproximada de 1,560 m² y 0.70 m de profundidad. No tiene ningún tipo de revestimiento ya que el material es totalmente inocuo. En la Figura 13 se muestra la disposición de las capas alternadas de MT1 estabilizado y material heterogéneo, así como la ubicación de la fosa para escombros.

Con el propósito de monitorear la posible generación de lixiviados, la falla de las geomembranas y demás sistemas de impermeabilización se construyó el sistema que se muestra en la Figura 13. Se excavó una zanja de 0.91 m de ancho, 1.2 m de profundidad y con pendiente del 1% hacia el colector. En la zanja se colocó una cama de arena de 10 cm de espesor a lo largo de la excavación sobre la cual se instaló una geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1500 micras de espesor. Posteriormente se colocaron tramos de tubo de PVC cédula 40 de 4" de diámetro y ranurados en la parte superior. Una vez instalados los tramos de PVC se relleno la zanja con material filtrante de una capa de 68 cm de grava de 3/4, y finalmente una cama de gravilla de 15 cm.

En la Figura 14 se muestran los escombros dentro de la fosa, así como las zanjas del sistema de monitoreo.

Para el cerrado de la celda con los materiales tipo 2 y tipo 3 (bases 3 y 4, Figura 11), el 11 de febrero de 2008 se tomaron 60 muestras de estos materiales con el propósito de verificar que los niveles de contaminación estuvieran por debajo de los límites máximos permisibles. El 7 de marzo, se tomaron 48 muestras de suelo dentro del predio a diferentes profundidades (0.0, 0.4, 1.0 y 1.5 m) para verificar que ya no hubiera material contaminado fuera de la celda de estabilización; los elementos analizados fueron arsénico, cadmio, plomo y antimonio. Los resultados señalaron que en todas las muestras tomadas en la superficie, a 0.4 y a 1.5 metros de profundidad, las concentraciones de todos los elementos



Figura 12. Material heterogéneo colocado dentro de la celda de estabilización: A) carcasas de baterías y placas de circuitos eléctricos, B) otros materiales metálicos.

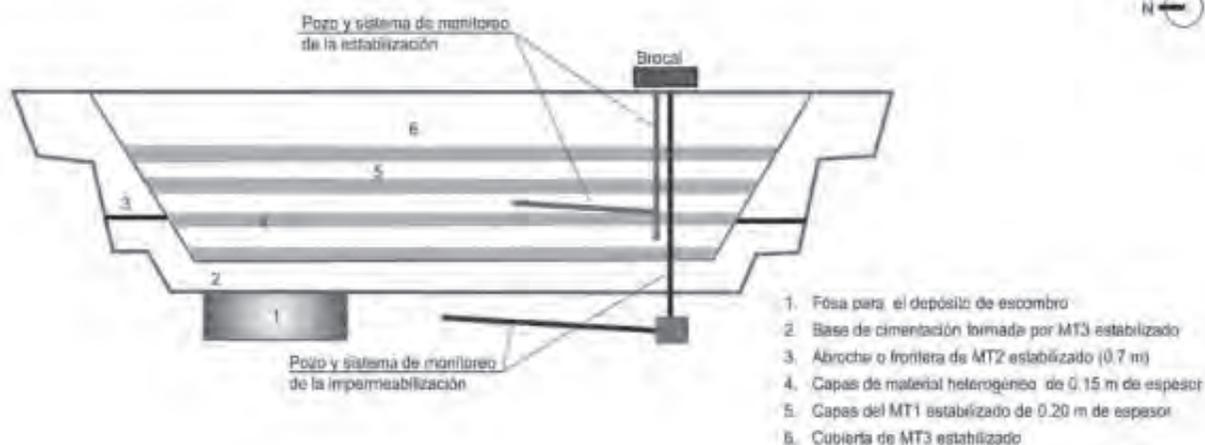


Figura 13. Esquema de la celda de estabilización que muestra el sistema de monitoreo de lixiviados, la ubicación de la fosa para escombros y la disposición de capas de suelo contaminado estabilizado (MT1) intercaladas con material heterogéneo.

fueron inferiores a los niveles de remediación autorizados por la SEMARNAT; sin embargo, en el nivel -1.0 m, hubieron tres muestras dentro de un sector, que reportaron concentraciones de plomo entre 2,000 y 8,000 mg/kg. Se tomó la decisión de retirar el suelo contaminado identificado en un polígono de 35 x 20 m y a una profundidad entre 0.75 y 1.5 m, un volumen aproximado de 490 m³, que fue depositado dentro de la celda de estabilización junto con el resto del material estabilizado.

Durante el mes de marzo del 2008 y se construyeron las bases de material tipo 2 y 3 que se indican en la Figura 11 para el cerrado de la celda; con esto se concluyó el 95% de la obra. En julio de 2008 se firmó el convenio para las conclusiones del 5% restante que consistió en colocar la cubierta de concreto en la parte superior de la celda (losa de concreto hidráulico de 0.20 m de espesor y 8,154 m²),

adecuar la infraestructura para los escurrimientos pluviales, la construcción de las banquetas y la cerca perimetral. De julio a octubre del 2008 se realizaron los trabajos finales.

En octubre del 2008, el Gobierno del Estado de Baja California entregó en comodato el terreno ya remediado, a la Asociación de Industriales de la Mesa de Otay (AIMO), con el propósito de darle uso de centro deportivo.

Posterior a la entrega del terreno remediado por parte del Gobierno del Estado de Baja California a la comunidad, se construyeron canchas deportivas y de recreación para los habitantes y trabajadores de la zona industrial de Otay. El 28 de enero del 2009 se llevó a cabo un evento para celebrar la limpieza y revitalización del sitio de Metales y Derivados.



Figura 14. Colocación de los escombros en la fosa y el sistema de monitoreo de lixiviados.

7. Lecciones aprendidas

La remediación del predio de Metales y Derivados se convirtió en el primer sitio remediado dentro del marco del Programa Frontera 2012 y en uno de los mejores ejemplos de cooperación ambiental entre dos países, ya que en este proyecto participaron organizaciones gubernamentales y no gubernamentales de México y de los Estados Unidos de América: la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA, por sus siglas en inglés), el Gobierno del Estado de Baja California, el Gobierno de la ciudad de Tijuana, el Colectivo Chilpancingo Pro Justicia Ambiental y la Coalición de Salud Ambiental (EHC, por sus siglas en inglés).

Este proyecto demuestra también que de haberse tenido un marco legal, adecuado, oportuno y eficiente, como el ahora vigente en México, probablemente se hubiera evitado la existencia de este pasivo ambiental.

Esta carencia normativa permitió que una compañía extranjera contaminara durante largo tiempo sin problema y luego abandonara el sitio sin aplicar la más mínima reparación del daño.

El caso expuesto es un ejemplo extraordinario de lo que la sociedad civil organizada puede lograr. El predio estuvo abandonado durante años y ante la indiferencia de las autoridades ambientales y de salud a nivel estatal y federal, los vecinos, particularmente las mujeres, se organizaron e incluso fundaron la organización no gubernamental Colectivo Chilpancingo Pro Justicia Ambiental. Sin su participación, la remediación del sitio hubiese demorado más y no habría sido exitosa.

En una visión retrospectiva de este caso, se advierte con claridad que el cuidado ambiental es una responsabilidad compartida. Los gobiernos deben crear normas y leyes que protejan la salud de los humanos y al ambiente, y la sociedad tiene que vigilar tanto la generación de instrumentos legales necesarios como su cumplimiento.

Fuentes de información

Acosta, C.G. y Montalvo-Arrieta, J.C. (1997). *Intensidades sísmicas para la región de Tijuana, Baja California, a partir del posible rompimiento de la falla La Nación (MW=6.5)*, GEOS, v 17, No. 3.

BEJC – Border Environmental Justice Campaign (2009). *Metales y Derivados Toxic Site*. URL: <http://www.environmentalhealth.org/BorderEHC/BorderPollution.html> (consultado en abril de 2009).

BORDER 2012 PRELIMINARY DRAFT. *Metales y Derivados development of remedial alternatives*

CEC – Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (2001). *Estudio de Caracterización de Sitio en Metales y Derivados de México, S.A. de C.V., en Tijuana, Baja California, México*. Preparado por Levine-Fricke de México, S.A. de C.V., para la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, 9 de marzo de 2001.

CEC – Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (2002). *Metales y Derivados Final Factual Record (SEM-98-007)*. North American Commission for Environmental Cooperation.

CONABIO – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2011). *Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte*. URL: http://www.conabio.gob.mx/institucion/cooperacion_internacional/doctos/cca.html (consultado en junio de 2011).

Convenio de Coordinación (2008). *Convenio de Coordinación de Acciones Derivadas del Convenio para la Remediación del Sitio de Metales y Derivados Celebrado entre la Secretaría de Protección al Ambiente del Gobierno de Baja California y la Promotora para el Desarrollo de las Comunidades Rurales y Populares de Tijuana*. 8 de julio de 2008. URL: <http://www.environmentalhealth.org/BorderEHC/pdfs/AgmtToFinalize.pdf> (consultado en abril de 2008).

DOF – Diario Oficial de la Federación (1988a). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Diario Oficial de la Federación del 28 de enero de 1988 (últimas reformas publicadas en el DOF 28-01-2011). URL: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf> (consultado en junio de 2011).

DOF – Diario Oficial de la Federación (1988b). *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Residuos Peligrosos*.

Diario Oficial de la Federación del 25 de noviembre de 1988. URL: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGEEPA_MRP.pdf (consultado en junio de 2011).

DOF Diario Oficial de la Federación (1990). *Acuerdo por el que las secretarías de Gobernación y Desarrollo Urbano y Ecología, con fundamento en lo dispuesto por los artículos 5o. fracción X y 146 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 27 fracción XXXII y 37 fracciones XVI y XVII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, expiden el Primer Listado de Actividades Altamente Riesgosas*. Diario Oficial de la Federación del 28 de marzo de 1990. URL: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/materialesactividades/Documents/primerlaar.pdf> (consultado en junio de 2011).

DOF – Diario Oficial de la Federación (1990). *Primer Listado de Actividades Altamente Riesgosas*. Diario Oficial de la Federación del 28 de marzo de 1990.

DOF – Diario Oficial de la Federación (1993). *NOM-053-SEMARNAT-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*. Diario Oficial de la Federación del 2 de octubre de 1993.

DOF – Diario Oficial de la Federación (1995). *Ley Aduanera*. Diario Oficial de la Federación del 15 de diciembre de 1995 (últimas reformas publicadas en el DOF 02-02-2006). URL: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/12.pdf> (consultado en junio de 2011).

DOF – Diario Oficial de la Federación (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Diario Oficial de la Federación del 8 de octubre de 2003 (últimas reformas publicadas en el DOF 19-06-2007). URL: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263.pdf> (consultado en junio de 2011).

DOF – Diario Oficial de la Federación (2004). *NOM-055-SEMARNAT-2003, que establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos previamente estabilizados*. Diario Oficial de la Federación del 3 de noviembre de 2004.

DOF – Diario Oficial de la Federación (2006). *Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación y clasificación y los listados de los residuos peligrosos*. Diario Oficial de la Federación del 23 de junio de 2006.

EHC – Environmental Health Coalition (2011). *Colectivo Chilpancingo Pro Justicia Ambiental*. URL: http://www.environmentalhealth.org/BorderEHC/BorderEHC_Espanol/BorderESCommActnTm2Hist.html (consultado en junio de 2011).

GODF – Gaceta Oficial del Distrito Federal (2010). *Norma técnica complementaria al reglamento de la Ley de Protección Civil del Distrito Federal NTC-002-SPCDF-PV-2010 que establece los lineamientos técnicos para la aprobación, utilización, operación y funcionamiento de instrumentos de alerta sísmico en inmuebles del Distrito Federal*. Gaceta Oficial del Distrito Federal del 4 de agosto de 2010.

HP Consultores (1999). *Estudio de Caracterización del sitio contaminado con residuos peligrosos Metales y Derivados en Baja California*. Preparado por HP Consultores, S.A. de C.V. para la PROFEPA.

INE – Instituto Nacional de Ecología (2011). *Plan Integral Ambiental Fronterizo*, URL: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/33/plan.html> (consultado en junio de 2011).

López, L.A. (2001). *Diagnóstico de riesgos urbanos en el área metropolitana de Tijuana*. Dirección Municipal de Protección Civil, H. Ayuntamiento Constitucional del Municipio de Tijuana B. C., Tijuana.

Nava, A. (1998). *Terremotos. La ciencia para todos*, Fondo de Cultura Económica S.A. de C.V., ISBN 968-16-5768-3, Tercera edición, México D.F.

PROFEPA – Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (1999). *Estudio de Caracterización del Sitio Contaminado con Residuos Peligrosos Metales y Derivados en Baja California*. Preparado por HP Consultores, S.A. de C.V. para la PROFEPA.

Rosenblueth, E. (1992). *Sismos y sismicidad en México en Rosenblueth et al. (1992)*, Macrosismos. Aspectos físicos, sociales, económicos y políticos, Impresores Cuadratin y Medio S.A. de C.V., México D.F.

SCCA – Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (2000). *Metales y Derivados – Plan general para la elaboración de un expediente de hechos (petición SEM-98-007)*. A14/SEM/98-007/FR-OP. URL: http://www.cec.org/Storage/71/6513_98-7-dev-s.pdf (consultado en junio de 2011).

SEMARNAT – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2008). *Saneamiento de Terreno de Metales y Derivados*. URL: <http://www.semarnat.gob.mx/estados/bajacalifornia/temas/Paginas/MetalesyDerivados.aspx> (consultado en abril de 2009).

Simpson, A. (2007). *Warren County's Legacy for Mexico's Border Maquiladoras*, *Golden Gate University Environmental Law Journal*, Volume 1, issue 1. URL: <http://digitalcommons.law.ggu.edu/gguelj/vol1/iss1/11> (consultado en septiembre de 2011).

Taylor, W. (1994). *Características sismo-dinámicas del suelo blando en la región central de la ciudad de Cartago, Costa Rica*, Tesis de Licenciatura en Geología, Universidad, Facultad de Ciencias Básicas, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Tetra Tech (2004). *Summary report for the removal action at the Metales y Derivados site Tijuana, Mexico*. U.S. Prepared by Tetra Tech Em. Inc for the U.S. Environmental Protection Agency, San Diego.

U.S.EPA – United States Environmental Protection Agency (1994). *Method 1312, Synthetic precipitation leaching procedure. SW-846 On-Line (Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods)*, 1000 Series Methods, URL: <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1312.pdf> (consultado en noviembre de 2011).

USGPOW – US Government Printing Office Washington (1983). *“Environmental Cooperation Agreement between the United States of America and Mexico on Cooperation for the Protection and Improvement of the Environment in the Border Area”*. Treaties and Other International Acts Series 10827, US Government Printing Office, Washington, DC.

Vela, R. y Winckel, A. (2000). *Aportes para un escenario sísmico en Tijuana, Baja California, México*. El Colegio de la Frontera Norte. ISBN: 9686075804, Tijuana.

3

Remediación de la Ex Refinería 18 de Marzo, en Miguel Hidalgo, Distrito Federal

Ulises Ruiz Saucedo



Abreviaturas y Acrónimos

AA	Áreas de Amortiguamiento
BETX	Benceno Etilbenceno Tolueno Xilenos
BPC	Bifenilos Policlorados
BUAP	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
C C	Capacidad de intercambio Catiónico
C NVESTAV	Centro de InveSt y Estudios Avanzados Instituto Politécnico Nacional
COFEPR S	Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
CR	Concentración de Referencia Total
DGG MAR	Dir. General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas
ERA	Evaluación de Riesgo Ambiental
FBC	Factor de Bioconcentración
FPC	Factor de Pendiente de Cáncer
GDU	Grupo Diseño Urbano S C
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
HC	Hidrocarburos
HTP FL	Hidrocarburos Totales del Petróleo Fracción Ligera
HTP FM	Hidrocarburos Totales del Petróleo Fracción Media
HTP FP	Hidrocarburos Totales del Petróleo Fracción Pesada
HTP	Hidrocarburos Totales del Petróleo
MP	Instituto Mexicano del Petróleo
NEG	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
PN	Instituto Politécnico Nacional
K	Conductividades Hidráulicas
LMP	Límites Máximos Permisibles
MTBE	Metil Terbutil Éter
NAF	Nivel de Agua Freática
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PEMEX REF	Petróleos Mexicanos Refinación
PL	Producto Libre
SAC	Sistema de Aguas Colgadas
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SS	Secretaría de Salud
TAR	Terminal de Almacenamiento y Reparto
UADEC	Universidad Autónoma de Coahuila
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
UNACAR	Universidad Autónoma del Carmen
UASLP	Universidad Autónoma de San Luis Potos

Distrito Federal

Remediación de la Ex Refinería 18 de Marzo, en Miguel Hidalgo, Distrito Federal

1.	Descripción del proyecto	77
2.	Antecedentes históricos	80
3.	Estudios previos	81
4.	Caracterización ambiental 2006	83
4.1.	Topografía	83
4.2.	Instalaciones de la Ex Refinería	83
4.3.	Área de estudio en la caracterización del 2006	84
4.4.	Elección de la estrategia de muestreo	84
4.4.1.	Muestreo en retícula	85
4.4.2.	Muestreo por asignación	85
4.4.3.	Geoposicionamiento de pozos	85
4.4.4.	Muestreo perimetral	85
4.4.5.	Sondeos estratigráficos	86
4.4.6.	Sondeos geoeléctricos	86
4.4.7.	Muestreo de agua somera	86
4.4.8.	Muestreo de lodos plomizos	86
4.4.9.	Muestreo de metales pesados	86
4.5.	Número de muestras analizadas	86
4.6.	Resultados de muestreos, análisis y pruebas geofísicas de la caracterización del 2006	87
4.6.1.	Clasificación litológica	87
4.6.2.	Niveles de aguas subterráneas someras	88
4.7.	Impactos ambientales generados por la contaminación a partir de los resultados de la caracterización del 2006	89
4.7.1.	Distribución horizontal de la contaminación	89
4.7.2.	Distribución vertical de la contaminación	91
4.8.	Conclusiones del estudio del 2006	92
5.	Caracterización ambiental 2007	95
5.1.	Área de estudio en la caracterización del 2007	95
5.1.1.	Losas de concreto	95
5.1.2.	Producto libre	96
5.1.3.	Gasometrías	96
5.1.4.	Estudios geofísicos	96
5.1.5.	Muestreos de suelo	96

5.1.6. Resultados del estudio de caracterización	98
5.1.6.1. Resultados de pruebas de permeabilidad	98
5.1.6.2. Medición de niveles de agua subterránea	99
5.1.6.3. Resultados analíticos	99
5.1.7. Distribución horizontal de la contaminación	99
5.1.8. Distribución vertical de la contaminación	99
5.1.9. Distribución de la contaminación en agua subterránea (zona saturada somera)	101
6. Evaluación de riesgo ambiental y a la salud humana	103
6.1. Estimación de los niveles de remediación específicos del sitio	104
7. Remediación	106
7.1. Biorremediación por biopilas	106
7.2. Extracción de vapores y bioventeo	107
7.3. Inyección de aire al agua subterránea y extracción de vapores	107
7.4. Tratamiento del agua subterránea	107
7.5. Actividades complementarias a la remediación	107
7.6. Trabajos de remediación realizados	108
8. Lecciones aprendidas	110
9. Fuentes de información	111



▲
Parque Bicentenario, vista de cubos presentando ecosistemas de México.

Remediación de la Ex Refinería 18 de Marzo, en Miguel Hidalgo, Distrito Federal

1. Descripción del proyecto

Al noroeste de la Ciudad de México, en un predio situado entre las delegaciones Azcapotzalco y Miguel Hidalgo y colindante con el municipio de Naucalpan, Estado de México (*Figura 1*), operó la Refinería 18 de Marzo desde 1933 hasta 1991, en una zona cuyo uso de suelo se modificó drásticamente pasando de uso agrícola a uso habitacional, comercial e industrial.

Durante su operación se generó un pasivo ambiental formado por la contaminación de hidrocarburos de petróleo, Benceno, Etilbenceno, Tolueno, Xilenos (BETX), producto en fase libre (PL) y lodos plomizos. Abarcó los primeros 3.5 m debajo del nivel del terreno en la mayor parte del predio y en algunas áreas alcanzó hasta los 9 m.

La contaminación se extendió hasta el cuerpo de agua subterráneo somero existente en el sitio. Además del producto libre, en el sitio se identificó contaminación por hidrocarburos intemperizados alifáticos disueltos, BETX principalmente Benceno y Metil Terbutil Éter (MTBE).

El 18 de marzo de 1991 la refinería cerró definitivamente sus operaciones y comenzó el proceso de desmantelamiento de sus instalaciones y plantas. Algunas fueron trasladadas a otras refinerías y las demás se desmantelaron para ser dispuestas como chatarra. Entre 1991 y el 2004 se realizaron diversos trabajos para caracterizar la contaminación del sitio y eliminar los residuos y tanques subterráneos que habían quedado en el mismo. A partir del 2005 Petróleos Mexicanos (PEMEX) inició las labores para determinar la extensión del pasivo



Figura 1. Localización de los terrenos de la Ex Refinería 18 de Marzo (Fuente: SEMARNAT 2008).

ambiental. En ese año se desarrollaron las primeras investigaciones extensas del sitio (UNAM, 2005) y se elaboró un estudio para proponer la reutilización del predio (GDU, 2005).

Por encargo de PEMEX Refinación (PEMEX REF), en el año 2006 se realizó el primer Estudio de Caracterización luación de Riesgo Ambiental y a la Salud Humana (EERySH). Ese mismo año, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) emitió un oficio por medio del cual se señalaba como viable al proyecto de remediación con el fin de destinar el predio para uso recreacional. Este proyecto de remediación consideraba la parte Norte del predio de la Ex Refinería, la cual comprende una superficie aproximada de 55 ha. PEMEX y SEMARNAT establecieron un convenio de colaboración para la remediación del sitio. Asimismo, PEMEX se comprometió a donar el predio al gobierno federal para tal propósito, al término de los trabajos de remediación (SEMARNAT-PEMEX, 2006).

Como resultado de la caracterización integral del sitio se determinó que 80% del predio se encontraba contaminado por algún hidrocarburo. De acuerdo con los Límites Máximos Permisibles (LMP) de la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, el volumen total estimado de suelos contaminados era de alrededor de tres millones de metros cúbicos y el volumen de agua contaminada

rebasó los 400,000 m³. La primera etapa de la remediación del sitio se inició a finales del 2006 continuando durante 2007. Esta primera etapa de remediación comprendió una superficie de 22 ha. Entre el 2007 y principios del 2008 se realizó un segundo estudio de caracterización integral de la contaminación en las 33 ha, en las que aún no iniciaban los trabajos de remediación.

A partir de este análisis y las consideraciones acerca de los riesgos ambientales, la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) determinó los niveles de remediación definitivos para la segunda etapa de la remediación del sitio de la Ex Refinería, que comprendía aproximadamente 33 ha. Las acciones de remediación de la segunda etapa del proyecto iniciaron en el 2008 y se extendieron hasta 2010.

En las actividades de caracterización, evaluación de riesgo y de remediación del sitio participaron las siguientes instituciones (PEMEX, 2010):

- Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).
- Instituto Politécnico Nacional (IPN).
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR).
- Universidad Autónoma de Coahuila (UADEC).
- Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).
- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

- Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).
- Instituto Tecnológico Agropecuario de Oaxaca (ITAO).
- Instituto Tecnológico de Ciudad Madero (ITCM).
- Colegio de Postgraduados Campus Puebla (COLPOS Puebla).
- Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV).
- Universidad de Waterloo (Canadá).
- Züblin Ambiental (México).
- Züblin Umwelttechnik GMBH (Alemania).
- Remediation Service International (Estados Unidos de Norteamérica).
- SERPOL (Francia).

Los estudios de caracterización y de evaluación del riesgo ambiental y a la salud humana fueron dictaminados por la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR) de la SEMARNAT en coordinación con la COFEPRIS y con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Los procesos o técnicas de remediación seleccionadas para llevar a cabo la remediación del sitio comprendieron:

- La biorremediación por biopilas para los suelos contaminados principalmente por hidrocarburos de la fracción media y pesada,
- La extracción de vapores combinada con la inyección de aire para los suelos contaminados especialmente con BETX e hidrocarburos de la fracción ligera y media,
- La extracción del producto libre encontrado en el sitio,
- El tratamiento del agua subterránea somera en plantas de tratamiento biológico (aeróbico),

- La disposición final de los residuos peligrosos hallados en el sitio en volúmenes menores.

Se remediaron también las áreas de amortiguamiento (AA) entre la terminal de almacenamiento y Reparto de la Ciudad de México (TAR) y el predio donado de 55 ha, además de otras zonas en el parque delegacional y los terrenos colindantes aún pertenecientes a PEMEX. Adicionalmente se construyó una barrera subterránea de 1.1 km de longitud con profundidad de 8.5 m por debajo del nivel de terreno para separarlo de la TAR y de las áreas de derecho de paso de los ductos que conectan las refinerías del centro del país con esta terminal. Se demolieron losas y elementos de concreto armado que cubrían el terreno, este material se dispuso o reutilizó en el sitio, se desmantelaron las antiguas líneas de conducción subterráneas aún existentes y se enviaron a reciclamiento como chatarra, y el producto libre extraído en el sitio se envió a recuperación.

Para los estudios de caracterización se perforaron más de 1,250 puntos de muestreo, por ello, este caso de remediación puede ser considerado como uno de los más estudiados a nivel mundial. Durante la remediación se perforaron alrededor de 3,312 pozos a 3.5 m de profundidad para la extracción de vapores y bioventeo y se perforaron alrededor de 529 pozos a 8 m de profundidad para la inyección de aire en la zona saturada del suelo para impulsar la extracción de los contaminantes disueltos principalmente el Benceno. En un lapso de cuatro años se remediaron cerca de 1.44 millones de m³ de suelo en las 55 ha del sitio de donación y en las áreas adyacentes al predio.

2. Antecedentes históricos

A principios de 1901 inició la primera etapa de la producción petrolera a gran escala en México. En agosto de ese año se estableció la "Compañía Mexicana de Petróleo El Águila" filial de la empresa estadounidense "S. Pearson & Son", con la cual entró al negocio de la distribución al menudeo de productos refinados en el mercado mexicano. A pesar de su éxito comercial, "El Águila" dependía de las actividades productivas de "S. Pearson & Son" y de las importaciones de Estados Unidos de América. (Celis-PEMEX, 1988), (De la Borda, 2006).

En 1930, se decidió construir una refinería en las afueras de la Ciudad de México con capacidad inicial de 7,500 barriles diarios. En 1930 y 1931 las autoridades otorgaron los permisos para la instalación de un oleoducto de 500 km de longitud, que correría de Palma Sola, Veracruz hasta Azcapotzalco. En 1932 "El Águila" se concentró en desarrollar sus campos en el Istmo y el Sur de Tuxpan, localizando yacimientos importantes en Poza Rica (Celis-PEMEX, 1988), (De la Borda, 2006). El 18 de febrero de ese año, se inauguró el oleoducto Tampico-Azcapotzalco. Al año siguiente, en 1933, el presidente de la República, Abelardo L. Rodríguez, inauguró la Refinería de Azcapotzalco.

Después de la expropiación de la industria petrolera en 1938, aumentó el consumo nacional de combustibles y la mayor demanda se registró en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, por lo que la refinería tuvo varias modificaciones hasta su reinauguración en 1946 (Figura 2). En 1954 el consumo de gasolina en esta zona representó el doble del consumo nacional registrado en 1937 por lo que en 1955 se amplió la refinería, (Enríquez, 1956), (Ruiz, 1988) año en que alcanzó un nivel muy alto de producción.

Debido a la expansión de la mancha urbana de la Ciudad de México hacia el norponiente, entre los años 40 y 80, la refinería quedó rodeada por zonas industriales y habitacionales, generando situaciones conflictivas y representando riesgos ambientales y de seguridad cada vez mayores para la ciudad y sus habitantes (De la Borda, 2006), (Enríquez, 1956).

En mayo de 1954 se inició una ampliación importante en las capacidades de refinación en el sitio y a finales de 1955 las nuevas plantas iniciaron su operación. Con estas acciones se abarcaron las 174 ha correspondientes



Figura 2. Vista aérea de la Refinería de Azcapotzalco, en 1945, tomada por la Compañía Mexicana Aerofoto (Fuente: www.mexicomaxico.org).

a la totalidad del área en uso y la producción llegó a 100,000 barriles por día. A partir de 1956 la refinería de Azcapotzalco se llamó Refinería 18 de Marzo. En ese año se llegaron a procesar 90,000 barriles diarios (mezcla de 80,000 barriles de crudo de Poza Rica y 10,000 barriles de Ezequiel Ordóñez). En la década de los setentas hasta su cierre al inicio de los noventas, con algunas modificaciones y pequeñas ampliaciones, la Ex Refinería 18 de Marzo alcanzó su máxima capacidad de producción, con 105,000 barriles diarios.

Desde 1975 hasta que se cerró en 1991, la refinería tuvo las siguientes instalaciones: 14 plantas de refinación, tres plantas petroquímicas, servicios auxiliares, casas de bombas, quemadores de campo, 218 tanques de almacenamiento, planta de tratamiento de aguas residuales, talleres, almacenes, edificios administrativos, baños, vestidores, laboratorios, terminal de especialidades y lubricantes, central contra incendio, colonia de empleados, zona recreativa, campos deportivos y áreas verdes (Figura 3).



Figura 3. Vista panorámica de la Refinería 18 de Marzo en Miguel Hidalgo, antes de su cierre (Fuente: PEMEX, GDU, 2005).

3. Estudios previos

Entre los años noventa y el 2005 se realizaron distintos estudios en el sitio de la Ex Refinería (Tabla 1); cada uno se enfocó a problemas específicos o a una sola área del predio.

El 29 de marzo del 2005 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, que señala los límites máximos permisibles (LMP) de hidrocarburos en suelos, así como

FECHA	AUTOR	TÍTULO DEL DOCUMENTO
1994, Marzo	Instituto Mexicano del Petróleo	Evaluación de la Contaminación del Suelo y Agua Subterránea en el Área de Construcción del Campo de Béisbol en la Zona Norte de la Ex Refinería 18 de Marzo.
1994, Agosto	Instituto Mexicano del Petróleo	Evaluación de la Contaminación del Suelo en la Colonia de Ingenieros de la Ex Refinería 18 de Marzo.
1996, Mayo	Instituto de Ingeniería UNAM	Evaluación de las Condiciones Ambientales y Análisis de Riesgo en el Parque Ecológico de la Ex Refinería de Azcapotzalco.
1997, Julio	Instituto Mexicano del Petróleo	Diagnóstico de la Contaminación del Subsuelo del Área de Embarques y Repartos en la Ex Refinería 18 de Marzo.
sin fecha	Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V.	Evaluación de áreas Impactadas por Hidrocarburos en el Suelo, Subsuelo y Manto Freático en la Ex Refinería 18 de Marzo en Azcapotzalco.
1997, Junio	OZTOC Ingeniería, S.A. de C.V.	Estudio de mecánica de suelos del área en que se ubicarán las Instalaciones del Centro de Investigación, Capacitación y Desarrollo de la Franquicia PEMEX.
1998, Octubre	DMT Gesellschaft für Forschung und Prufung mbH	Diagnóstico de la contaminación en el suelo, subsuelo, manto acuífero somero, y profundo de la totalidad de la superficie de la Ex Refinería "18 de Marzo", incluyendo la nueva Terminal de almacenamiento y distribución y la primera etapa del parque ecológico, para la elaboración del estudio de riesgo a la salud y medio ambiente y propuesta de alternativas del saneamiento. Evaluación de riesgos para la Ex Refinería "18 DE MARZO" en la Ciudad de México y anexos.
1998, Octubre	DMT Gesellschaft für Forschung und Prufung mbH	Propuesta de saneamiento del sitio.
2001, Noviembre	Instituto de Geología UNAM	Detección de la Presencia de Tanques Metálicos Enterrados que Pudieran Contener Sustancias Tóxicas, a través de métodos indirectos, en la Ex Refinería 18 de Marzo (estudio magnetográfico).
2001, Diciembre	Instituto de Geología UNAM	Monitoreo para caracterización actual del subsuelo en el área Norte de la Ex Refinería 18 de Marzo, Delegación Azcapotzalco (estudio magnetográfico).
2001, Diciembre	Instituto de Geología UNAM	Detección de la Presencia de Tanques Metálicos Enterrados que Pudieran Contener Sustancias Tóxicas, a través de métodos indirectos, en la Ex Refinería 18 de Marzo en los centros recreativos Ranchito, Aula Magna, Parque Ecológico y área administrativa (estudio magnetográfico).
2005, Agosto	Centro de Geociencias UNAM	Actualización de la contaminación por hidrocarburos en el suelo de la Ex Refinería "18 de Marzo".
2005, Noviembre	Grupo de Diseño Urbano, S.C.	Estudio de Evaluación de Riesgo al Ambiente y a la Salud.

▲ Tabla 1. Estudios de caracterización del área Norte de la Ex Refinería 18 de Marzo, financiados por PEMEX Refinación.

una metodología de muestreo y los métodos de análisis de laboratorio para las distintas fracciones de los hidrocarburos. La NOM 138 señaló un nuevo procedimiento para el muestreo y el análisis de los hidrocarburos en suelos. Antes de su publicación era usual que se determinaran los hidrocarburos totales de petróleo sin diferenciar las distintas fracciones. El 10 de enero del 2006, la Gerencia de Protección Ambiental de PEMEX REF presentó ante la DGGIMAR de la SEMARNAT, el documento denominado “Evaluación de Riesgo al Ambiente y a la Salud” de la Ex Refinería 18 de Marzo, realizado por Grupo Diseño Urbano, S. C. (GDU). El 21 de abril del 2006, la SEMARNAT, a través de la DGGIMAR, emitió un oficio en el cual se acordó que la remediación del terreno era viable para uso recreativo con base en el Estudio de Riesgo Ambiental, una vez que las observaciones emitidas por la SEMARNAT al estudio presentado por PEMEX fueran solventadas, siguiendo el programa de trabajo propuesto por PEMEX REF para este efecto. Derivado de las observaciones realizadas por la SEMARNAT en el oficio antes mencionado, PEMEX REF contrató los servicios del IMP para elaborar un estudio de caracterización integral del sitio a ser realizado en 2006.

El 6 de septiembre de 2006 se suscribió un convenio de colaboración entre la SEMARNAT, PEMEX y PEMEX REF, en el cual se señala:

“con el objeto de establecer los mecanismos de cooperación de estas tres instancias para llevar a cabo las acciones necesarias para la remediación del predio que ocupó la ex refinería que se destinaría a la construcción de un Parque Ecológico,

que permita generar beneficios al medio ambiente de la Zona Metropolitana del Valle de México y fortalecer la educación integral de la población.”

Por medio del convenio, PEMEX se comprometió a donar una superficie de 550,068.86 m² de los terrenos que alojaron la Ex Refinería 18 de Marzo, a favor de un fideicomiso constituido por la administración pública federal. Asimismo, se obligó a solicitar la autorización de transferencia del sitio contaminado a la SEMARNAT. Se estableció también la responsabilidad por los eventuales daños a la salud causados por la contaminación de los terrenos de la Ex Refinería y se obligó a realizar las acciones de remediación del sitio hasta su conclusión.

El 16 de noviembre del 2006 se firmó el contrato de fideicomiso Parque Ecológico 18 de Marzo, entre la SEMARNAT y BANOBRAS. El objeto del fideicomiso fue la contratación para la elaboración del proyecto ejecutivo de la construcción y operación del parque y proceder a la donación del predio que había sido entregado por PEMEX REF a la federación. El patrimonio del fideicomiso fue conformado por las aportaciones del gobierno federal y el terreno donado por PEMEX.

A continuación se describen los resultados de los estudios de caracterización del sitio elaborados en el 2006 por el IMP y en el 2007 por diversas universidades —segunda fase del proyecto de remediación— por encargo de PEMEX REF. Con base en esos estudios se estimaron los riesgos ambientales a fin de determinar los niveles de remediación del sitio y a definir las acciones de remediación pertinentes para eliminar los riesgos¹.

1. La Cooperación Alemana al Desarrollo (GIZ) actuó en el marco de un convenio entre los Gobiernos de México y Alemania, como consultor y asesor técnico de la SEMARNAT y de PEMEX.

4. Caracterización ambiental 2006

Dentro de los terrenos que conformaron la Ex Refinería 18 de Marzo están: el actual Parque Ecológico Delegacional, con una superficie de 9.16 ha, el predio Norte con aproximadamente 55.07 ha y la parte Sur de la Ex Refinería en donde actualmente se encuentra en operación la TAR de la Ciudad de México, con una superficie de 65 ha (Figura 4).

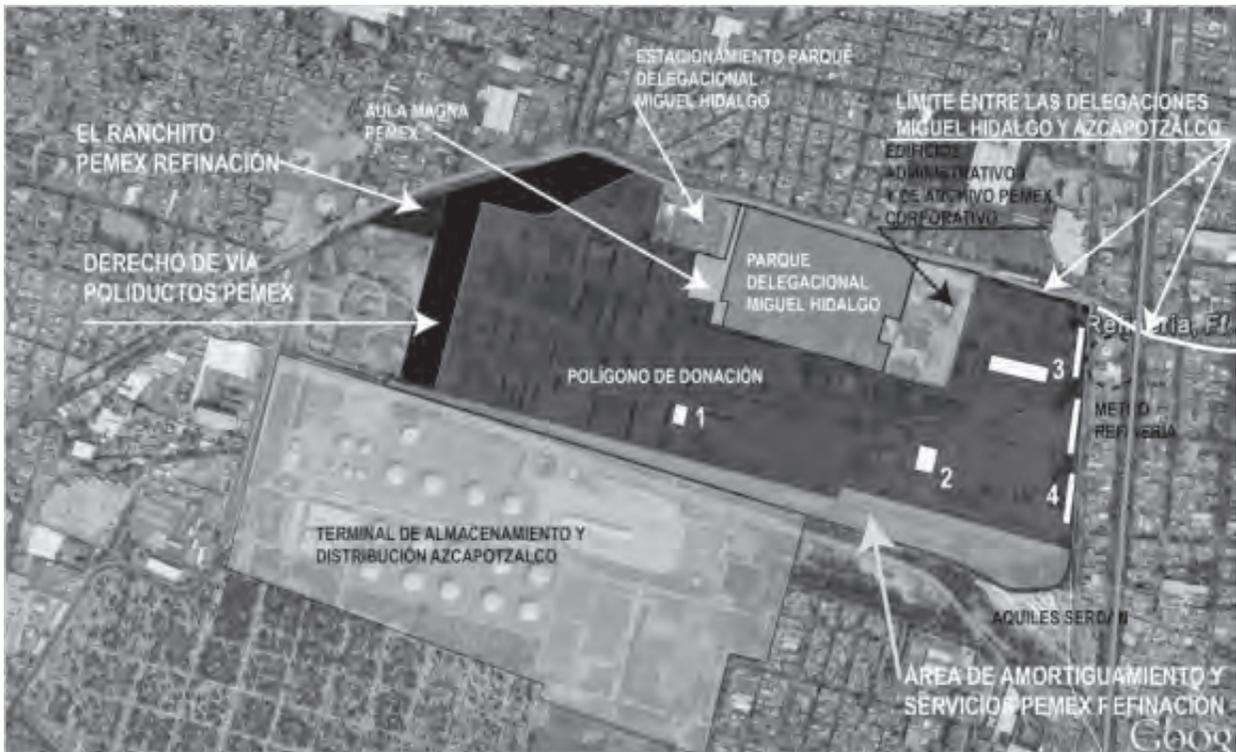
de México. En el año 2005, mediante un levantamiento topográfico, se dispuso que en una distancia horizontal de 1,600 m el predio tenía un cambio de nivel de 6.5 m, pendiente menor al 1% dirección O-NO → E-SE.

4.1. Topografía

El predio de la Ex Refinería es prácticamente plano, presenta ligera inclinación en la parte Oeste-Noroeste en dirección a la estación del metro Refinería al Este-Sureste y se localiza al Oeste de la planicie lacustre del Valle

4.2. Instalaciones de la Ex Refinería

El proceso de desmantelamiento de las instalaciones en el predio se realizó entre 1991 y el 2000. Hacia finales del 2005 sólo quedaban las siguientes estructuras: 1. Edificio de la ex-casa de fuerza, 2. Fosa de captación de aguas pluviales, 3. Edificio administrativo y 4. Galerías de recuperación de hidrocarburos (Figura 4).



1. Casa de fuerza (Turbinas), 2. Edificio de mantenimiento, 3. Cárcamo de aguas residuales, 4. Galería de pozos de recuperación de hidrocarburos.

Figura 4. Distribución de áreas y usos actuales en los terrenos de la Ex Refinería 18 de Marzo y plano de instalaciones en el 2005 (Fuente: SEMARNAT 2008, IMP, 2006).

4.3. Área de estudio en la caracterización del 2006

El estudio integral de caracterización se realizó en el área Norte del predio de la Ex Refinería, que incluye el polígono de donación de 55 ha y otras áreas adyacentes.

En esta área se ubicó la mayoría de los tanques de almacenamiento de los diferentes productos manejados en la refinería y de las plantas de refinación: dos plantas de destilación primaria (Mc Kee RA y AA), dos plantas desulfuradoras catalíticas (Perco RV y AW), una planta de fuerza (RK), una planta fraccionadora de gases (RC), dos plantas depentanizadoras (DCS), dos plantas fraccionadoras de gasolinas (AY y FN), una planta de tratamiento de turbosina (RTK AC), una planta de alquilación (RH AR), una planta de duodecibenceno (AU) y una planta reductora de viscosidad (RE).

4.4. Elección de la estrategia de muestreo

De acuerdo a la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 el número total de puntos de muestreo para el área de estudio debía ser entre 55 y 60. Sin embargo, se consideró que la cantidad era insuficiente para delimitar con precisión las plumas de contaminación y se decidió aumentar el número de puntos de muestreo. Por lo que se diseñó una estrategia de caracterización complementaria considerando las actividades industriales realizadas en el sitio y accidentes ocurridos a lo largo de su historia.

El objetivo fue que el muestreo de suelos cubriera toda el área de estudio; se perforaron a pozos de muestreo de suelos muchos de los cuales fueron posteriormente ampliados para instalar pozos de monitoreo del agua subterránea y realizar estudios complementarios.

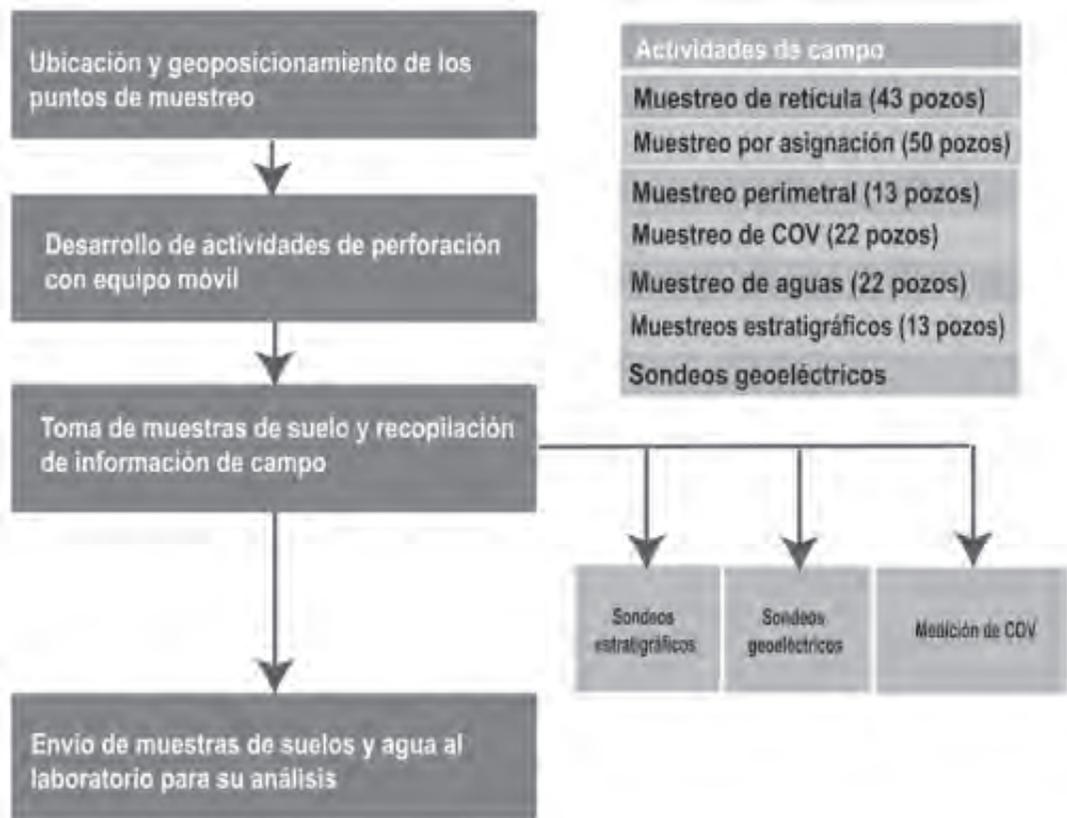


Figura 5. Actividades involucradas en el muestreo 2006 en la Ex Refinería 18 de Marzo.

Se estableció una técnica de muestreo múltiple que incluyó la evaluación reticular; los muestreos dirigidos o de asignación y las evaluaciones perimetrales (Figura 5).

4.4.1. Muestreo en retícula

Se perforaron y muestrearon 43 pozos distribuidos en una retícula equidistante, que cubrieran todo el sitio. La profundidad de los pozos fue de 10 m, con una sección ranurada de 7.5 m entre los 2.5 y los 10 m por debajo del nivel del terreno. En cada pozo se obtuvieron muestras de suelo a 6 profundidades y en cada una se determinó analíticamente el contenido de Hidrocarburos Totales del Petróleo Fracción Ligeras (HTP-FL), Hidrocarburos Totales del Petróleo Fracción Media (HTP-FM), Hidrocarburos Totales del Petróleo Fracción Pesada (HTP-FP), Benceno, Etilbenceno, Tolueno, Xileno (BETX) y los Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).

En la norma NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 se indica que estas fracciones se deben determinar cuando la contaminación en suelos es por mezclas de hidrocarburos. Además de lo anterior se determinaron los parámetros físico-químicos del suelo y el agua subterránea pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, densidad real, densidad aparente, textura, capacidad de intercambio catiónico (CIC). Para completar la caracterización se determinaron los compuestos orgánicos volátiles (COV) en muestras de 22 pozos.

La perforación y terminación de los pozos se realizaron con barrena helicoidal hueca y en seco, con recuperación del suelo a la profundidad señalada mediante un tubo de penetración estándar. La toma de muestras se hizo con equipo pesado (Mobile Drill) de barrena helicoidal hueca (Hollow Steam Auger) de 6 5/8" I.D. por 11" de O.D. El equipo se montó en un camión, con barrenas huecas de 11" de diámetro para la toma de núcleos con penetrómetro de 3" de diámetro, que se introdujo por medio de percusión.

4.4.2. Muestreo por asignación

La segunda estrategia de muestreo consistió en instalar 50 pozos dirigidos o de asignación, para generar información e incrementar la precisión al delimitar las manchas de la contaminación, tanto en el plano horizontal y vertical.

Las muestras de estos pozos fueron analizadas para determinar: HTP-FL, HTP-FM, HTP-FP y BETX plomo

orgánico como Tetraetilo de Plomo, $(CH_3CH_2)_4Pb$, MTBE, Fenoles, Bifenilos Policlorados (BPC) y algunos metales pesados, sustancias relacionadas con las actividades que se llevaban a cabo en las diferentes plantas encontradas en el área de estudio. Asimismo, se midieron las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) y metano, etano, propano y butano en muestras de gas del subsuelo. Se colectaron muestras también para determinar los parámetros físico-químicos del suelo.

En este muestreo se utilizaron equipos de perforación hidráulica, montados en unidades móviles (Geoprobe), los barrenos se hicieron por percusión. Las muestras del suelo se obtuvieron con tubos de penetración equipados con "liners", tubos de PVC donde se almacenaban las muestras. La profundidad máxima de investigación fue de 7.80 m.

4.4.3. Geoposicionamiento de pozos

Este estudio consistió en la nivelación topográfica georreferenciada de los pozos perforados para conocer con precisión su ubicación espacial, fundamental para estimar las áreas contaminadas, definir la topografía del sitio y la dirección más probable del flujo subterráneo. Se usó una estación total o taquímetro electrónico marca Leica, Modelo 650 L con prisma infrarrojo para alcanzar distancias de hasta 1,200 m con precisión en centímetros.

Como complemento a las mediciones directas en campo, se utilizaron dos posiciones geográficas con referencias de bancos de nivel del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para establecer las posiciones geográficas exactas de los sitios de muestreo y perforación así como la altura del nivel del suelo y su referencia con respecto al nivel medio del mar (msnm). También se emplearon mapas georreferenciados para la ubicación precisa de los puntos de perforación.

4.4.4. Muestreo perimetral

Para evaluar posibles aportes de hidrocarburos fuera del predio, que pudiesen producir situaciones de riesgo hacia las zonas habitacionales cercanas, se realizó un muestreo perimetral en áreas donde los resultados de HC de los muestreos realizados en el interior mostraban plumas de afectación con posibilidad de continuar hacia el exterior. Este muestreo se realizó en lugares específicos y no cubrió todo el perímetro. Se utilizó el mismo sistema de perforación que para los pozos de asignación.

4.4.5. Sondeos estratigráficos

Con el equipo de perforación por percusión, igual que para los pozos de asignación y perimetrales, se perforaron 13 pozos estratigráficos, de 10 m de profundidad. Se obtuvieron muestras continuas a lo largo de toda la columna de suelo para proceder a su clasificación y conseguir así la secuencia estratigráfica. También se realizaron pruebas tipo Lefranc, para definir la permeabilidad de los distintos estratos presentes en la columna de suelo.

4.4.6. Sondeos geoelectrónicos

Con el propósito de determinar la composición más probable del suelo en los estratos profundos hasta 250 m de profundidad, se realizaron tres sondeos eléctricos verticales (SEV) para conocer la variación de las propiedades eléctricas del subsuelo en función de su profundidad, y ubicar la presencia de discontinuidades litológicas y niveles freáticos mediante anomalías de alta y baja resistividad. Aquí se utilizó el arreglo Schlumberger con aberturas electrónicas AB/2 mínima y máxima de uno hasta 500 m, con lo que se alcanzó una penetración real cercana a los 180 m.

Para detectar la posible contaminación en el acuífero profundo que pudiera proceder de las actividades industriales en la Ex Refinería 18 de Marzo, se buscaron pozos de abastecimiento de agua potable en un radio de hasta un kilómetro alrededor de la refinería. De los pozos encontrados se seleccionaron diez para evaluar los niveles de hidrocarburos disueltos en el acuífero profundo. Los pozos se localizaron en todas las direcciones y cubrieron las diferentes trayectorias de la posible contaminación.

4.4.7. Muestreo de agua somera

De los 43 pozos que se construyeron para el muestreo en retícula, se seleccionaron 22 para realizar el muestreo del agua somera en el polígono de estudio. En la selección de estos puntos se consideraron criterios tales como determinar la posible migración de los contaminantes hacia la zona urbana, obtener información general de la contaminación y cubrir la totalidad del área de estudio. En los casos donde hubiera presencia de agua freática somera se efectuó el análisis de BETX, de HTP-FL y HTP-FM. Se excluyó la fracción pesada ya

que incluye HC que por su tamaño son prácticamente insolubles. Cuando se registró la presencia de producto en fase libre en el interior de los pozos, se tomaron muestras a fin de realizar las pruebas destilación simulada y conocer su composición más probable.

En los pozos construidos se hicieron mediciones del nivel de agua freática (NAF) y de producto libre (PL) con una sonda de interfases para establecer la dirección del flujo y el posible comportamiento de la migración de los hidrocarburos presentes en el subsuelo.

4.4.8. Muestreo de lodos plomizos

Los resultados obtenidos en la evaluación de la presencia de lodos plomizos dentro de la zona de estudio se presentaron como valores de tetraetilo de plomo (mg/L). Su detección en los puntos de muestreo seleccionados coincidió con los sitios donde se almacenaba este residuo dentro de la refinería 18 de Marzo. Cabe señalar que la presencia de plomo no está normada en México, sin embargo se sabe que el plomo orgánico tiene una reconocida capacidad tóxica y cancerígena, que fue revisada con mayor detalle en la parte correspondiente al análisis del riesgo.

4.4.9. Muestreo de metales pesados

La localización de los puntos de muestreo para metales pesados se asignó conforme a la información histórica del sitio. Los resultados obtenidos confirmaron que las concentraciones estaban significativamente por debajo de los límites de las Concentraciones de Referencia Totales (CRT) de metales establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSAI-2004.

4.5. Número de muestras analizadas

En la caracterización del 2006 el número de análisis realizados (*Tabla 2*) rebasó los lineamientos de la NOM 138, referentes al número de puntos de muestreo en predios con extensiones hasta las 100 ha.

En la Figura 6 se aprecian los puntos de muestreo del estudio de caracterización.

PARÁMETRO	NO. DE MUESTRAS PROCESADAS*
Hidrocarburos Fracción Ligera	831
Hidrocarburos Fracción Media	813
Hidrocarburos Fracción Pesada	368
Benceno	775
Etilbenceno	751
Tolueno	751
Xilenos	754
Benzo[a] pireno	181
Dibenzo[a,h] antraceno	181
Benzo[a] antraceno	181
Benzo[b] fluoranteno	181
Benzo[k] fluoranteno	181
Indeno (1,2,3-cd) pireno	181

* Incluye los datos de GDU, UNAM e IMP en los distintos niveles muestreados.

▲ *Tabla 2. Número de análisis realizados en la caracterización del 2006 de la Ex Refinería 18 de Marzo.*

4.6. Resultados de muestreos, análisis y pruebas geofísicas de la caracterización del 2006

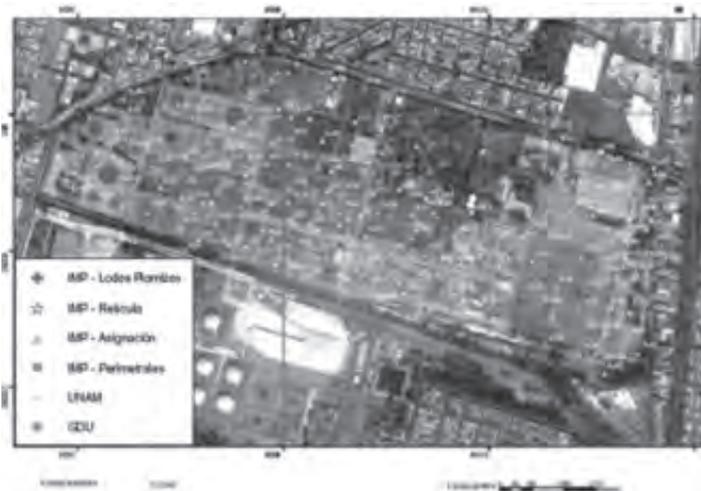
4.6.1. Clasificación litológica

Los estratos se agruparon según su granulometría predominante (*Tabla 3*). Los espesores de cada estrato se estimaron con base en los resultados, por lo que se consideró un intervalo ligero de variación en cuanto a su profundidad vertical.

La conductividad hidráulica de los estratos se midió a través de pruebas de permeabilidad tipo Lefranc, en 13 pozos estratigráficos, determinando que en general es baja, con valores predominantes de 10^{-7} y 10^{-6} cm/seg.

ESTRATO / UNIDAD	DESCRIPCIÓN	ESPESOR APROXIMADO (m)
CONCRETO:	Losas variables armadas y simples.	0.1 – 0.4 / 0.1 – 1.0
SUPERFICIAL: Unidad 1	Suelo vegetal y material de relleno artificial muy heterogéneo. <i>Relleno.</i>	0.1 – 2.0
ESTRATO 1: Unidad 2	Limo arcilloso y limo arenoso, con algunos lentes de arena fina limosa y arcillosa. <i>Limo arcilloso arenoso.</i>	2.0 -4.5
ESTRATO 2: Unidad 3	Arena fina limosa. <i>Arena fina.</i>	4.5 – 6.0
ESTRATO 3: Unidad 4	Arena fina volcánica con cuarzo y feldespatos. <i>Arena fina volcánica.</i>	6.0 – 8.0
ESTRATO 4: Unidad 5	Arcilla limosa, con restos de madera. <i>Arena limosa.</i>	8.0 – 11.0

▲ *Tabla 3. Unidades o estratos identificados en la caracterización 2006 de la Ex Refinería 18 de Marzo.*



▲ *Figura 6. Localización de todos los puntos de muestreo.*

Dentro de estos rangos de baja permeabilidad se presentaron excepcionalmente valores de 10^{-5} cm/seg, donde la granulometría de los limos y las arenas se incrementó dentro del rango correspondiente a cada una de ellas. La Figura 7 muestra la interpretación geológica realizada con base en los resultados de muestreos y pruebas.

de los pozos varió entre 200 y 300 m, se extrajo agua de la parte superior del acuífero profundo, a 85 m en promedio. Para el período de junio de 1995 a junio del 2003, el nivel del agua en el acuífero varió de 59.1 a 64.2 m.

Se elaboró un modelo geohidrológico aplicando los datos generados y recopilados hasta el 2006. La estructura

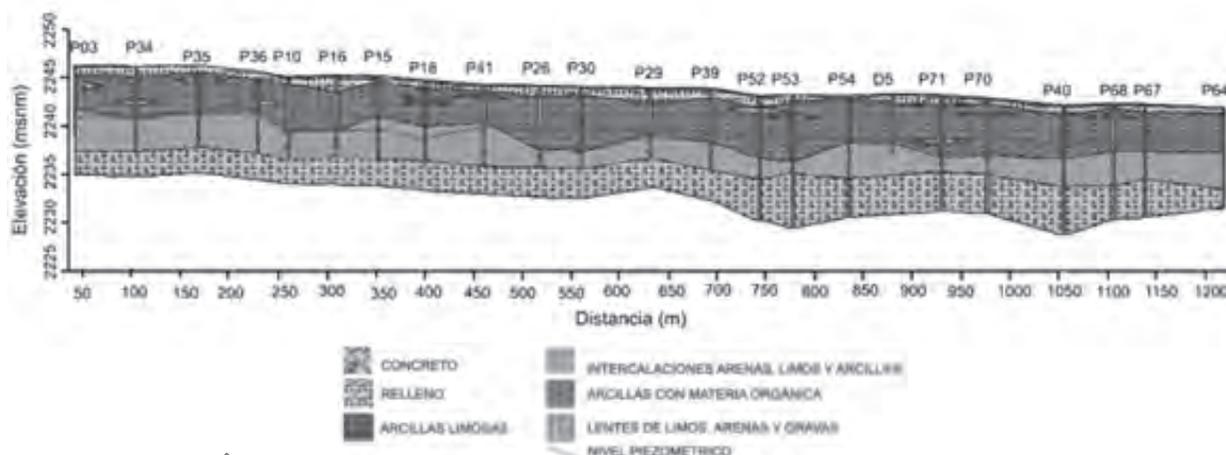


Figura 7. Estratos litológicos en la Ex Refinería 18 de Marzo de Oeste a Este.

4.6.2. Niveles de aguas subterráneas someras

En distintos períodos del 2006 se monitoreó el nivel del agua en los 36 piezómetros instalados entre 4 y 9.50 m de profundidad mostrando ascensos y descensos estacionales (Figura 8). Al inicio del verano tuvo un ascenso de 70 a 82 cm en la parte Este del predio y un ascenso de 1.9 a 2 m en la parte Oeste. Debido a las diferencias en la altura piezométrica del agua subterránea somera en el sitio existe un gradiente hidráulico de 0.002% hacia el Este-Sureste del predio. La diferencia en la altura topográfica del terreno entre los puntos más al Este y los puntos más al Oeste, en una distancia aproximada de 1,700 m fue de 6 m. La profundidad del nivel del agua subterránea somera registrada en los piezómetros en el mes de junio fue de 5.9 m en el lado Este del predio y 4.7 m en la parte Oriente del predio (B). En el mes de septiembre la profundidad del nivel fue 5.8 m, y 3.6 m, respectivamente (C).

En el caso del acuífero profundo se obtuvo información de diez pozos profundos, cuyo nivel de agua fue monitoreado periódicamente por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM). También se contaba con los datos anuales del caudal extraído de cada pozo. La profundidad

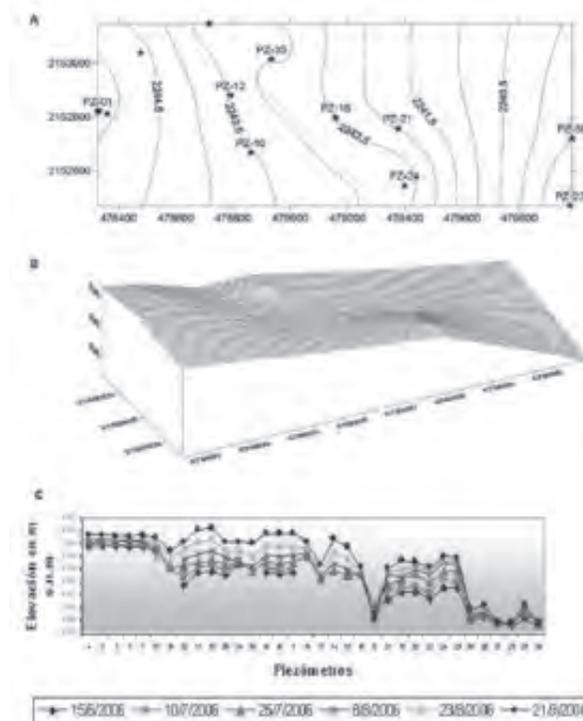


Figura 8. Niveles de aguas subterráneas someras en la Ex Refinería 18 de Marzo en el 2006: A) de oeste a este, en plano, B) en tres niveles, C) entre junio y septiembre del 2006.

NO.	PROBLEMA AMBIENTAL	IMPACTO AL AMBIENTE
1	Producto libre en las áreas 5, 6 y 7.	Contaminación continua del suelo.
2	Suelo contaminado con hidrocarburos en las áreas 5, 6 y 7 con una distribución diferente a la contaminación en las áreas 2, 3 y 4.	Posible evaporación de contaminantes volátiles generando riesgos a futuros usuarios del sitio.
3	Aguas subterráneas someras (Sistema de Aguas Colgado) contaminadas con hidrocarburos.	Emanaciones de vapores al suelo y transporte de contaminantes en el predio.
4	Cimentaciones no contaminadas.	Las losas de concreto de distinto tipo como obstáculos a la remediación.
5	Contaminación se extiende a los linderos con la TAR.	Transporte de contaminantes de un predio a otro.

▲ *Tabla 4. Problemas ambientales identificados en la Ex Refinería 18 de Marzo.*

básica del modelo fue el perfil estratigráfico. Para su desarrollo, se consideraron los parámetros de la zona con mayor concentración de benceno, contaminante móvil presente en una amplia superficie. Se hizo una simulación con un período de diez años y la distribución del contaminante.

Los resultados de esta simulación del transporte del agua y de los contaminantes mostraron que su movimiento era muy lento y que el efecto de la atenuación natural en los contaminantes podía ser significativo. Asimismo, se concluyó que no había vulnerabilidad del acuífero profundo y que el flujo en el acuífero más somero no representaba riesgo aguas abajo fuera del sitio, dado que la combinación de un flujo lento con biodegradación intrínseca en el suelo de los hidrocarburos no permite que la contaminación salga del predio. La presencia de atenuación natural en el sitio fue descrita en el 2005 en estudios e investigaciones de la UNAM.

4.7. Impactos ambientales generados por la contaminación a partir de los resultados de la caracterización del 2006

Los principales problemas ambientales identificados así como sus impactos al ambiente se muestran en la Tabla 4.

4.7.1. Distribución horizontal de la contaminación

La distribución de la contaminación de los HTP-FL, HTP-FM y del benceno en el predio de la Ex Refinería se muestra en la Figura 9. No aparece distribución de

PARÁMETRO	LMP NOM-138-SEMARNAT/SS-2003	NO. DATOS VÁLIDOS	VALORES > NOM 138	% DE VALORES > NOM 138
Hidrocarburos Fracción Ligera	200	831	335	40.31
Hidrocarburos Fracción Media	1200	813	222	27.31
Hidrocarburos Fracción Pesada	3000	368	22	5.98
Benceno	6	775	52	6.71
Etilbenceno	10	751	28	3.73
Tolueno	40	751	16	2.13
Xilenos	40	754	2	0.27
Benzo[a] pireno	2	181	2	1.1
Dibenzo[a,h] antraceno	2	181	1	0.55
Benzo[a] antraceno	2	181	2	1.1
Benzo[b] fluoranteno	2	181	2	1.1
Benzo[k] fluoranteno	2	181	1	0.55
Indeno (1,2,3-cd) pireno	2	181	1	0.55

▲ *Tabla 5. Distribución general de resultados de análisis químicos en la Ex Refinería 18 de Marzo.*

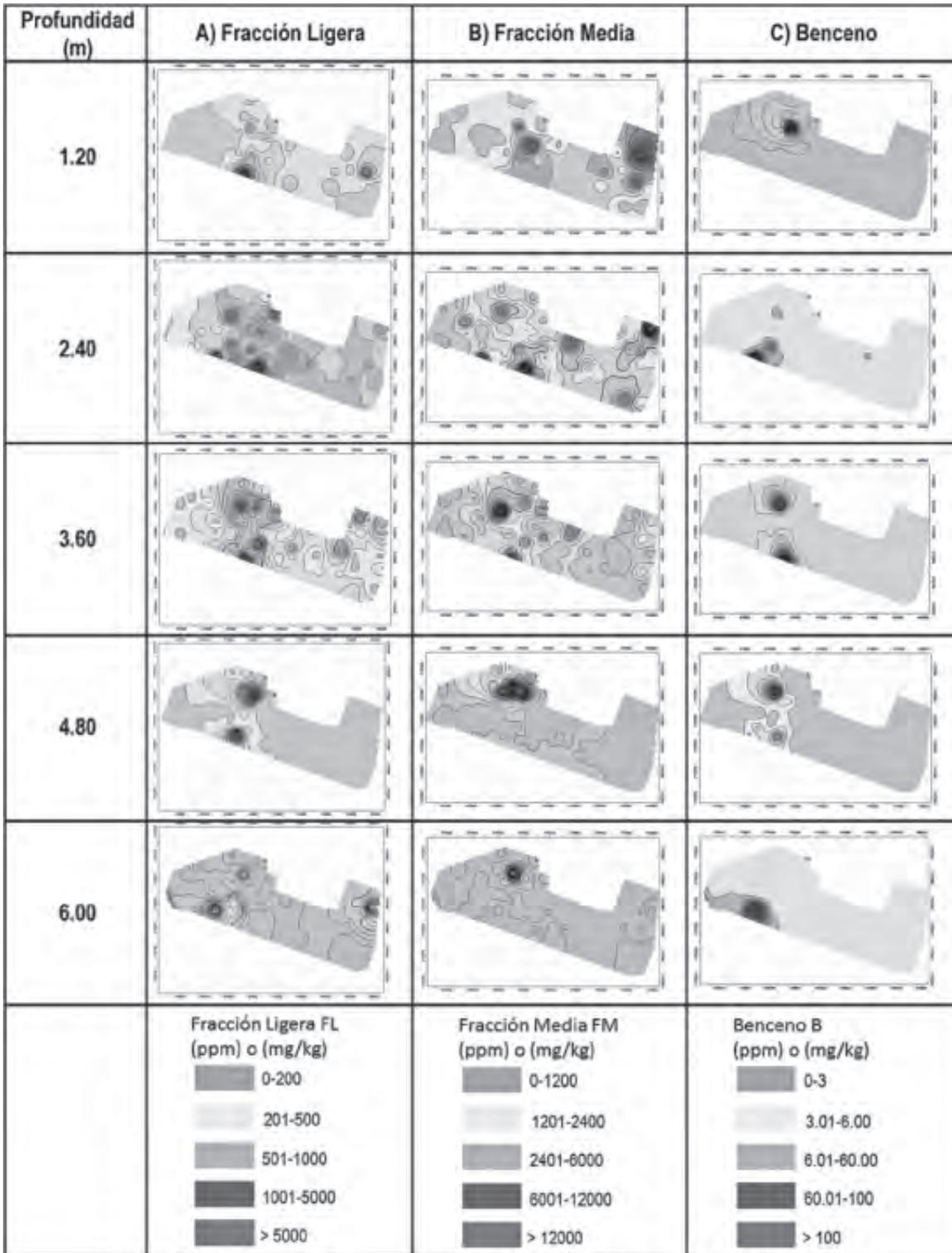


Figura 9. Hidrocarburos Totales de Petróleo – A) Fracción Ligera, B) Fracción Media y C) Benceno, en los distintos niveles de profundidad en referencia a las unidades.

los HTP-Fracción Pesada ni de otros monoaromáticos, pues coinciden con la distribución de la fracción media o del benceno.

En la Tabla 5 se muestra que el principal problema de contaminación por hidrocarburos en la Ex Refinería 18 de Marzo se debió a hidrocarburos fracción ligera, en el 40.3% de los casos se observaron valores por arriba del límite máximo permisible de la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, a pesar del cese de actividades en 1991.

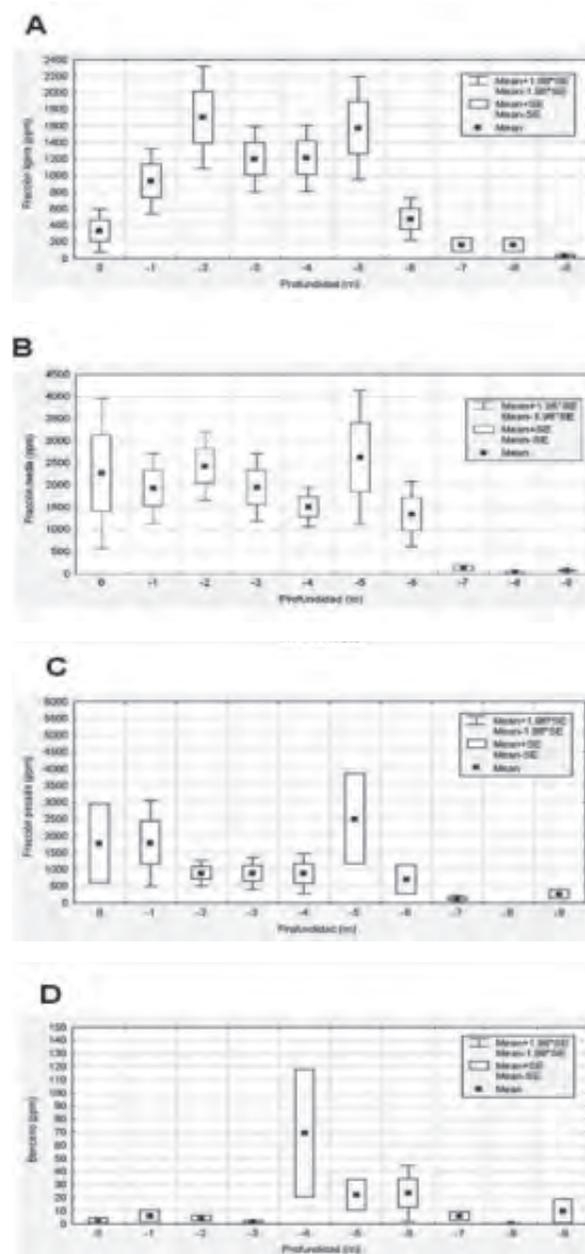
- Los HTP-FM tuvieron menor importancia, sólo el 27.3% de los suelos evaluados demandaban acciones.
- Los HTP-FP sólo fueron importantes en menos del 6% de las muestras evaluadas.
- El Benceno, compuesto de alta toxicidad, presentó valores que demandaban acciones de limpieza en el 6.7% de los casos. La mayoría de estos valores se presentaron en áreas de la planta de alquilación y de almacenamiento de BETX y delimitaban áreas críticas que demandaban acciones específicas de saneamiento.
- El Tolueno, Etilbenceno y Xilenos presentaron valores anómalos siempre asociados con las áreas afectadas por benceno, por ello no aportaron información adicional.
- Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP), en general, no estuvieron en la zona Norte del sitio.

4.7.2. Distribución vertical de la contaminación

Como ya se describió, el nivel de contaminación en el predio se distribuía horizontalmente de forma particular; por lo que se originaron dos grandes zonas con distinto tipo de contaminación y diferentes niveles de concentración. Los datos recabados durante la caracterización se analizaron estadísticamente para encontrar la distribución según su profundidad, con lo cual, se agruparon los resultados de los análisis químicos.

La Figura 10 muestra el promedio de la concentración vertical de los hidrocarburos por fracción (ligera, media y pesada) y del benceno. Las cajas representan los extremos cuando se suma o resta la desviación estándar (SE) además, se aprecian valores que son prácticamente dos veces mayores a la SE. La principal contaminación con fracción ligera se ubicó entre los 2 y 5 m abajo del nivel del terreno, profundidades que coincidieron con las variaciones del nivel freático del agua subterránea somera (A). Las concentraciones de fracción media se distribuían desde la superficie del terreno hasta los 5 m bajo nivel del terreno, este comportamiento se debe a las propiedades fisicoquímicas de la fracción media,

menor movilidad y mayor absorción (B). Al igual que en el caso de la fracción ligera, el agua subterránea somera fue el medio que disminuyó la dispersión vertical de la contaminación. En la sección anterior se mostró que la dispersión horizontal, controlada principalmente por la velocidad del agua freática, determina la extensión de la contaminación. La fracción pesada demostró



▲ **Figura 10.** Distribución de hidrocarburos totales de petróleo (HTP), en la Ex Refinería 18 de Marzo, según la profundidad: A) Distribución de HTP-FL, B) Distribución de HTP-FM, C) Distribución de HTP-FP, D) Distribución de benceno.

un comportamiento diferenciado, una alta concentración en los primeros metros debido a sus propiedades fisicoquímicas (C). Después se apreció que en el estrato donde estaba el nivel freático ésta se acumuló junto con la fracción media acompañada de producto libre. Las concentraciones de benceno muestran un comportamiento asociado al nivel del agua freática y a sus propiedades fisicoquímicas —particularmente su volatilidad, su densidad menor al agua y su alta solubilidad— lo que explica su escasa presencia en los estratos no saturados del suelo entre los 3.5 y 4 m de profundidad desde la superficie por debajo del nivel del terreno y se acumulen al entrar en contacto con el agua subterránea (D).

4.8. Conclusiones del estudio del 2006

En el estudio del 2006 se concluyó que el predio podía dividirse en varias zonas según el tipo y el grado de contaminación identificados (Figura 11).

La zona 2 incluía las áreas de entrada y de descarga, presentaba un grado de contaminación por debajo de lo señalado en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

La zona 3 incluía el área de embarques y repartos, los talleres, la parte oriente de las plantas de proceso y

llegaba hasta la planta primaria 1 RA. Esta zona se caracterizó por presentar contaminación moderada, en un intervalo de 0 a 25 veces por arriba de la norma en suelos someros, es decir, con afectaciones que en términos generales no iban más allá de los 4 m de profundidad y cuyos espesores de suelo afectado eran de casi 2 m en promedio. El tipo de contaminantes tenía un espectro de riesgos potenciales menor.

La zona 4 incluía el patio de garzas donde se cargaban los carros tanques que distribuían productos en la Ciudad de México, en esta zona se encontraba contaminación con HTP-FM, HTP-FP, HTP-FL. En particular, la contaminación con fracción ligera se ubicaba en un área de aproximadamente 0.5 ha, las profundidades de contaminación también eran moderadas variando hasta los 4 m.

En la zona 5 se presentaban las mayores concentraciones de HTP-FL y HTP-FM, así como los mayores espesores de suelos contaminados e incluso producto en fase libre. Esta abarcaba la mayor parte del área donde se ubicaban los tanques de almacenamiento al Oeste del polígono de estudio y al Este del Parque Ecológico Delegacional.

Debido al mayor grado de contaminación y los riesgos potenciales asociados al tipo de contaminantes identificados, en estas áreas se reconoció la necesidad de realizar una caracterización adicional.

La zona 6 presentaba contaminación por las tres fracciones y ahí ella se ubicaba la mayor extensión de fase

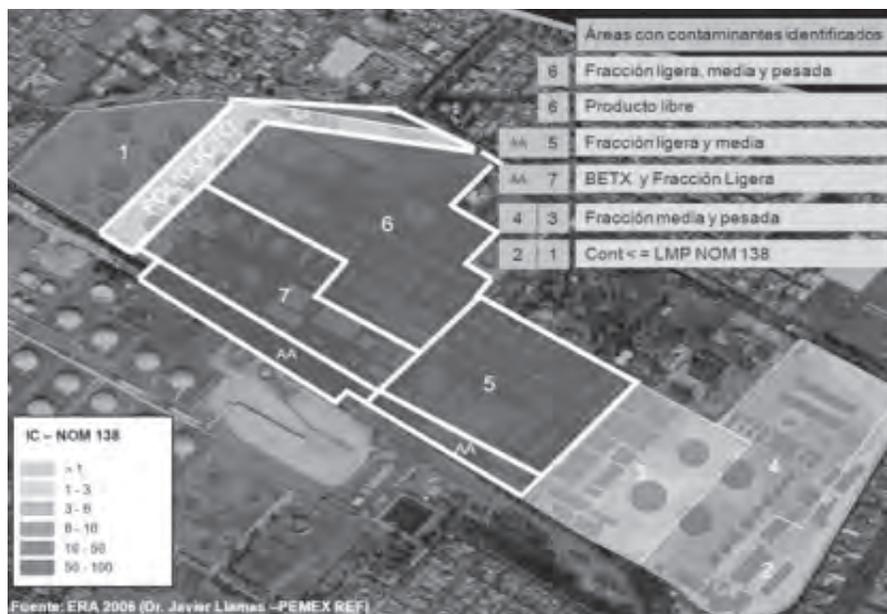


Figura 11. Distribución de áreas según el grado de contaminación.

libre. En esta área las profundidades de contaminación eran mayores pero los contaminantes eran los menos móviles principalmente la fracción pesada.

La zona 7 era el área que presentaba los mayores riesgos, debido a la presencia de los BETX, el MTBE y la HTP-FL principalmente en la franja de embarramiento que se producía por los ascensos y descensos del nivel de aguas subterráneas someras.

En el agua somera se identificó contaminación por HTP-FL y HTP-FM así como BETX. En sitios específicos también se registró la presencia de tetraetilo de plomo y MTBE. La falta de normatividad para hidrocarburos en acuíferos en México no impidió identificar claras anomalías de afectación que debían ser estudiadas a mayor detalle.

El subsuelo de la Ex Refinería 18 de Marzo presentaba una estratigrafía menos heterogénea que la descrita en estudios precedentes, por lo que la movilidad lateral de los contaminantes era muy lenta, la conductividad hidráulica oscilaba entre 10^{-7} y 10^{-6} cm/seg y su descenso a profundidad está prácticamente confinado por los estratos 2 y 5 debajo del nivel del terreno. Estas características favorecieron la retención de los contaminantes principalmente dentro del predio y que su transporte hacia la zona urbana fuese reducido, también significó que la restauración tenía que realizarse con tecnologías agresivas, a fin de obtener resultados en tiempos razonables.

En el sitio existe un cuerpo de aguas subterráneo somero o acuitardo, cuyo nivel estático varía estacionalmente, según las temporadas de estiaje y lluvia. Su alimentación principal es por aportes laterales y presenta un gradiente hidráulico debido a la diferencia de altura del terreno de 6 m entre el Este y el Oeste, dirección preferencial de flujo del agua freática. Por las propiedades hidrogeológicas del acuitardo, los estratos dos y cinco antes señalados, aunados a los procesos de intercambio catiónico y sorción que coadyuvan a la biodegradación natural del HC, constituyen en su conjunto una frontera que evita el flujo de contaminantes orgánicos hacia el acuífero profundo.

Según los resultados de la simulación de la movilidad de los contaminantes, se encontró que sus partículas viajarían durante los primeros diez años con una fuerte componente vertical a través de la capa superior de arcilla (estrato dos) hasta llegar a la capa de arena limosa (estrato tres y quizá cuatro). En los siguientes diez años, el flujo se tornaría fuertemente horizontal y llegaría a desplazarse hasta una distancia de 300 m desde el punto inicial de partida. De acuerdo a la calibración del flujo, los desplazamientos de masa del fluido no rebasarían los 300 m desde el punto de partida. La sorción, la

biodegradación y las reacciones químicas disminuirían la concentración al final de su trayecto. Por ello la concentración de los compuestos aquí simulados, al alcanzar el límite del predio de la Ex Refinería, llegaría muy diluida por debajo del límite de detección. Este hecho se confirmó con los datos obtenidos en muestras de suelo procedentes de los pozos perimetrales.

Los resultados de esta caracterización permitieron concluir que el principal problema de contaminación por hidrocarburos en la zona Norte de la Ex Refinería estuvo dado por los HTP-FL, que presentaron valores elevados en más del 40% de las muestras analizadas. Los HTP-FM estuvieron fuera de la norma en el 27% de los casos y los HTP-FP afectaron suelos sólo al 6%.

En términos generales, la contaminación por HC alcanzó un valor máximo hacia los 2 m de profundidad, sin embargo la distribución vertical estuvo afectada por la presencia del acuitardo, el cual fluctúa estacionalmente entre los 3 m y 5 m. En este intervalo se presentaron elevadas concentraciones de HTP-FL y HTP-FM, lo que definió la franja de embarramiento y que representó la porción del tirante de suelo contaminada por las variaciones anuales de las aguas freáticas. Por debajo de los 6 m de profundidad, capa 3 arena fino-limosa permanentemente inundada, los suelos presentaron concentraciones iguales o por debajo del límite de limpieza establecido en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, donde en la mayoría de los casos no fue necesario realizar actividades de limpieza. Este comportamiento también significó que la contaminación por hidrocarburos no produjo lixiviados cuyo transporte representara un riesgo significativo de contaminación a los estratos profundos.

El Benceno fue el segundo compuesto de interés por la afectación que produjo tanto en suelos superficiales como de fondo. A diferencia de los HC, el Benceno atravesó el acuitardo el cual no constituyó una barrera que limitara su distribución vertical, encontrándose concentraciones elevadas al menos hasta los 10 m de profundidad. Los hidrocarburos poliaromáticos se presentaron sólo en dos puntos del muestreo en la capa de material de relleno de la planta de alquilación. Por ello, se concluyó que no hubo contaminación por hidrocarburos poliaromáticos, en el agua o en el suelo. De los resultados de las concentraciones analizadas en el agua de diez pozos de abastecimiento dentro y en torno al polígono de estudio, se concluyó que no hubo evidencia de contaminación por HTP-FL o de BETX en el acuífero profundo. El acuitardo actuó como vehículo de transporte, presentando sobre todo concentraciones elevadas de HTP-FL y BETX, información relevante al seleccionar las tecnologías de remediación.

Se registraron concentraciones de tetraetilo de plomo en el suelo en el rango de 0.2 a 39 mg/kg, lo cual representó una condición de riesgo ecotoxicológico. Dado que estos valores derivaron de un muestreo prospectivo, no fue posible establecer con precisión las áreas de afectación, por lo que se consideró necesario evaluar la distribución de este parámetro a mayor detalle en trabajos futuros.

Los hidrocarburos en fase libre se detectaron sólo en tres de los 43 pozos de monitoreo construidos dentro del polígono de estudio. Esto permitió considerar que la mayor parte de la contaminación se encontraba adherida a la matriz orgánica y mineral del suelo, y otra parte en forma disuelta. Esta conclusión debió ser corroborada durante una caracterización complementaria de las áreas donde se encontró el producto libre.

En los muestreos perimetrales se identificó el aporte de hidrocarburos fuera del predio hacia el Sureste, sobre la Av. Ferrocarriles Nacionales, pero su influencia hacia la zona urbana no rebasaba los 20 m debido al alto grado de intemperismo de los hidrocarburos, hecho comprobado por la ausencia de BETX.

Al final de este estudio se presentaron las siguientes recomendaciones:

- Realizar el seguimiento mensual del nivel estático de los 43 pozos de monitoreo, por lo menos durante un ciclo anual, para corroborar la ausencia de producto en fase libre y para determinar la variación del nivel estático, lo que aportará información crucial en el diseño optimizado de pozos y equipos que pudiera utilizarse en la restauración.
- Instalar pozos de monitoreo en el perímetro de la zona Sureste (Av. Ferrocarriles Nacionales), ya que es la dirección de la trayectoria preferencial del agua subterránea somera. La presencia de una galería de recuperación en la zona Noreste y una barrera de contención hacia el Sureste, son obras que en apariencia modifican el gradiente hidráulico, por lo que la presencia de estos pozos en los sitios adecuados permitiría mantener vigilancia sobre la posible migración de contaminantes.
- Realizar perforaciones adicionales a mayor profundidad en áreas donde hay concentraciones elevadas de Benceno para definir los límites verticales de su distribución.
- Realizar estudios complementarios donde existe Tetraetilo de Plomo en suelo en concentraciones

que representan una condición de riesgo, para precisar su distribución.

Hay dos opciones básicas para conducir la remediación: A) una vez definidos los usos específicos que tendrá el suelo, establecer los niveles de limpieza que tendrán que alcanzar y seleccionar los trenes de tecnologías que permitan cumplir con el nivel de saneamiento comprometido, B) modificar el proyecto urbanístico de uso del sitio y, por tanto, el uso específico del suelo, a los límites de limpieza que técnicamente sean factibles de alcanzar dado los tiempos y montos asignados para la restauración del sitio. Esta opción es la más conveniente.

Con base en las características y distribución de los contaminantes antes descritos en la Ex Refinería 18 de Marzo, las tecnologías de remediación que se consideraron para su aplicación fueron:

1. Bioventeo, que consiste en inyectar aire atmosférico al subsuelo para favorecer la actividad microbiana e incrementar las tasas de degradación de hidrocarburos. Esta tecnología permite sanear los suelos en su porción no saturada, en los primeros tres metros de profundidad. Sólo es efectiva si la ausencia de oxígeno en el subsuelo es el factor limitante del metabolismo microbiano.
2. Extracción de vapores en el subsuelo, se emplean pozos para la extracción de vapores orgánicos, de tal manera que es posible remover las fracciones volátil y semi-volátil de los HC adsorbidos y absorbidos en la porción no saturada del suelo. El vacío generado induce la infiltración de aire atmosférico al subsuelo, logrando por este medio estimular la actividad microbiológica e incrementar las tasas de biodegradación de HC. Es el proceso inverso al bioventeo.
3. Inyección de aire atmosférico por debajo de las zonas contaminadas, en alguna región de la zona saturada del suelo, creando una cortina de micro burbujas que remuevan los contaminantes, tanto disueltos en el agua como adsorbidos en el suelo de la zona no saturada. La remoción de contaminantes se realiza fundamentalmente mediante dos mecanismos, por el arrastre físico del aire inyectado y por la estimulación de la flora bacteriana autóctona. Estas tres tecnologías no son excluyentes y pueden utilizarse combinadas simultáneamente o a través de trenes de tratamiento, para optimizar los tiempos y costos de la restauración.
4. Biorremediación por biopilas.

5. Caracterización ambiental 2007

5.1. Área de estudio en la caracterización del 2007

Con base en los resultados del Estudio de Caracterización y el EERAySH en 2006 se determinó la necesidad de efectuar un segundo estudio de caracterización. Éste se debía realizar en las zonas 5, 6 y 7 del polígono de donación del sitio. Este estudio fue encomendado a diversas instituciones académicas. La distribución de áreas asignada a cada una aparece en la Tabla 6 y en la Figura 12.

El estudio de caracterización cubrió las áreas 5, 6 y 7 pero también abarcó también las áreas o zonas de amortiguamiento de riesgo (AA) entre las instalaciones actuales de PEMEX, en específico la TAR y la zona de ductos, y el predio en estudio (Figura 13).

5.1.1. Losas de concreto

En los años 2006 y 2007 se realizó el levantamiento topográfico de las losas y estructuras de concreto que cubrían gran parte del sitio.

INSTITUCIÓN ACADÉMICA	SUPERFICIE APROXIMADA (m ²)
ITCM	23,631
UANL	91,659
UADEC	64,782
UASLP	133,401
CINVESTAV	94,494
Área total	406,576

▲ *Tabla 6. Distribución de áreas de estudio por institución en la caracterización del 2007.*



▲ *Figura 12. Distribución de áreas de estudio en la caracterización de 2007.*



Figura 13. Áreas en las que se dividió el predio de la Ex Refinería 18 de Marzo para su estudio y remediación.

5.1.2. Producto libre

Como ya se ha mencionado anteriormente en el 2006, el IMP construyó nueve zanjas y 43 pozos de monitoreo del agua subterránea somera. Solamente de una zanja y de siete pozos se identificó producto en fase libre. En el 2007, durante la segunda etapa de la caracterización, se diseñaron y construyeron ocho zanjas y 85 pozos de monitoreo distribuidos en las zonas 5, 6 y 7; de los cuales sólo en 15 pozos hubo presencia de producto en fase libre (PL), de éstos, 13 pozos fueron localizados en la zona 6 y dos en la zona 7.

5.1.3. Gasometrías

En toda el área de estudio se realizaron 461 mediciones gasométricas y se determinaron Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) con un analizador portátil, método equivalente al EPA 8020. Los resultados de las mediciones obtenidas en campo usaron una configuración con equivalencia a p-xileno.

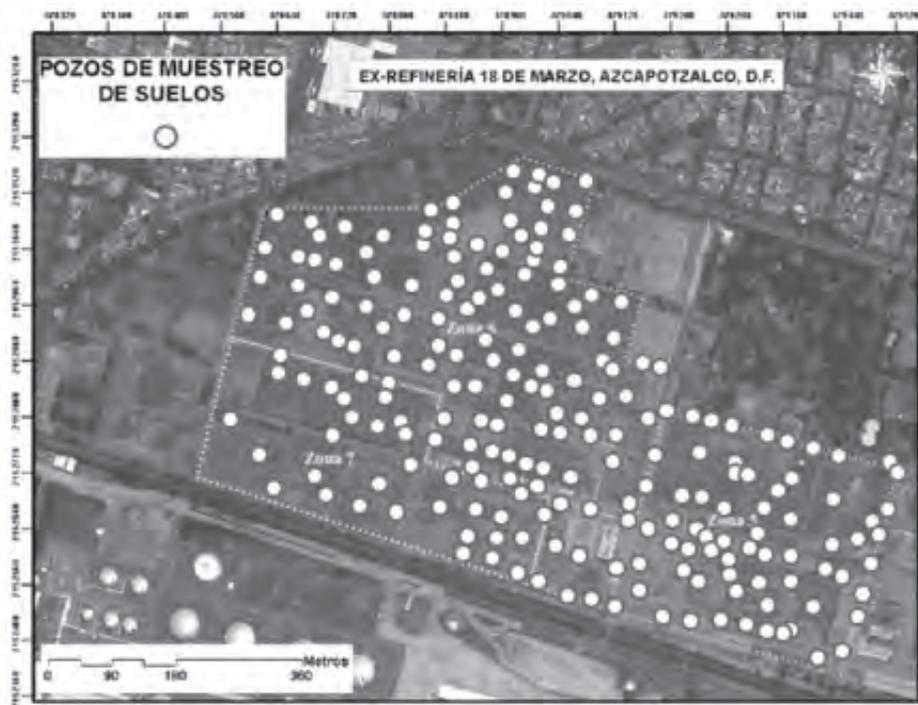
5.1.4. Estudios geofísicos

Durante esta caracterización se efectuaron mediciones geofísicas de resistividad y de georradar, para calibrar la respuesta de las condiciones del medio con presencia de hidrocarburos.

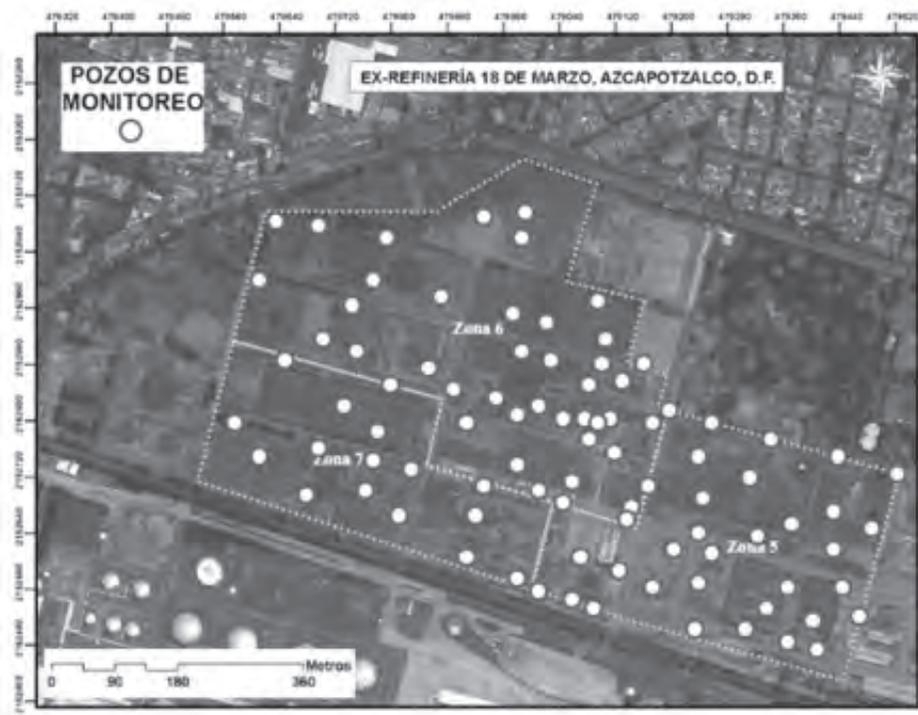
5.1.5. Muestreos de suelo

La estratigrafía local del área de la Ex Refinería 18 de Marzo se basó en la clasificación y descripción de las muestras obtenidas en 254 pozos estratigráficos por medio de sondeo directo en seco a una profundidad de 8.4 m en promedio. La información obtenida se correlacionó con los métodos geofísicos de prospección indirecta, georradar y tomografía eléctrica, para complementar la información en aquellos puntos donde no se alcanzó la profundidad de 15 m.

Para las fracciones alifáticas de los HC (FL, FM y FP) se realizaron 3,000 análisis químicos aproximadamente y



▲
 Figura 14. Localización de puntos de muestreo en suelo.



▲
 Figura 15. Localización de puntos de muestreo en agua.



Figura 16. Localización de todos los puntos de muestreo y análisis de la caracterización 2007.

para los Hidrocarburos Monoaromáticos (B, E, T, X), alrededor de 1,250 análisis de laboratorio. Para los metales pesados se realizaron 36 análisis.

La localización de los pozos de muestreo en suelo y en agua aparecen en las Figuras 14, 15 y 16.

5.1.6. Resultados del estudio de caracterización

5.1.6.1. Resultados de pruebas de permeabilidad

Los valores de las conductividades hidráulicas (K) utilizadas en el modelo matemático se obtuvieron por medio de pruebas de carga variable, al utilizar el método de Hvorslev (1951), Bouwer y Rice (1976) y Cooper-Bredehoeft-Papadopolos (1967). En la Tabla 7 se muestran los valores de las K en m/s, determinados en 72 pozos de monitoreo para las zonas 5, 6 y 7.

De los resultados de la determinación de las K se observó que para la unidad arcillo-limosa la conductividad hidráulica tenía valores entre 3.7 a 5.2×10^{-8} m/s.

La unidad areno-limosa presentó una variación de K de tres órdenes de magnitud al ser de 1.0×10^{-4} m/s a 8.8×10^{-7} m/s, lo cual confirmó su carácter heterogéneo. Esa unidad constituyó la zona saturada somera en el área de la Ex Refinería. En las muestras de suelo se advirtió que el contenido de limos variaba del cero hasta más del 50%, principalmente en la base de la unidad. Se apreció que al aumentar el contenido de suelos finos en la unidad arenosa, disminuía el valor de la conductividad hidráulica.

ZONA	VALORES DE LAS CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS	CLASIFICACIÓN
7	1×10^{-5} m/s hasta 1×10^{-7} m/s	Suelos arenosos y limo-arenosos.
6a	1.04×10^{-5} m/s hasta 8.73×10^{-7} m/s	Suelos arenosos y limo-arenosos.
6b	1.22×10^{-5} m/s hasta 8.81×10^{-8} m/s	Suelos arenosos y limo-arcillosos.
5	1×10^{-4} m/s hasta 8.6×10^{-7} m/s	Suelos arenosos con gravas y limo-arcillosos.

▲ Tabla 7. Distribución de conductividades hidráulicas (K) por zona de estudio.

5.1.6.2. Medición de niveles de agua subterránea

De diciembre del 2007 a febrero del 2008, semanalmente se realizaron mediciones de la profundidad del nivel del agua subterránea en los pozos de monitoreo instalados en la primera y segunda etapa de la caracterización.

5.1.6.3. Resultados analíticos

Los resultados de la caracterización complementaria de las zonas 5, 6 y 7 mostraron que el porcentaje de valores por arriba de los criterios de limpieza de la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, aumentó para los HTP-FL, HTP-FM y HTP-FP 52%, 32% y 18%, respectivamente, en relación a los valores reportados por el IMP en el 2006. Este incremento se atribuyó a que esas áreas tenían los mayores índices de contaminación de acuerdo al estudio de 2006, ya que se instaló un mayor número de pozos de muestreo, por lo que se tuvieron datos más precisos del nivel de contaminación.

Acorde a lo reportado por el IMP en el 2006, el mayor incremento del porcentaje (58 a 72%) de puntos por arriba del LMP para HTP-FL se encontró entre los 2 y 6 m. Su distribución disminuyó ligeramente después de los 6 y hasta los 8.4 m, donde sólo 12% de los puntos analizados tuvo un valor superior al Límites Máximos Permisibles (LMP) de la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, de 200 mg/Kg HTP-FL. Los HTP-FM y los HTP-FP tuvieron un comportamiento similar, pero su distribución después de los 6 m fue aún más limitada (<10%), respecto a los HTP-FL.

En los BETX, el porcentaje de puntos por arriba de los LMP establecidos en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 es inferior al 3%. En la mayoría de los casos coincidió la alta concentración de Benceno con la de Tolueno y Etilbenceno, sin embargo, el Benceno se distribuía sobre todo a profundidades ligeramente inferiores respecto a los hidrocarburos, ya que su mayor concentración estuvo entre los 4.8 y 6.0 m, aunque se limitaba a áreas específicas del sitio. En este nuevo estudio se confirmó que no se tenían valores de HAP por arriba de los LMP correspondientes.

Para los metales estudiados, en menos del 1% de los puntos analizados se encontraron valores de plomo superiores a la CRT de la NOM-147-SEMARNAT/SSAI-2004 de 400 mg/kg para suelos de uso agrícola y residencial, inclusive esos valores se limitan a 1.2 m de profundidad.

Los valores se confirmaron a través de los análisis de tetraetilo de plomo.

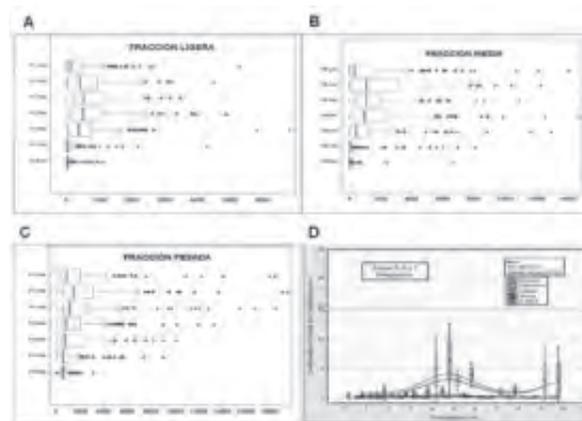
5.1.7. Distribución horizontal de la contaminación

A partir de los resultados del análisis de suelos, se elaboraron los diagramas de distribución estadística correspondientes a los HTP-FL, HTP-FM y benceno (Figura 17), para los distintos niveles de profundidad establecidos en el estudio.

5.1.8. Distribución vertical de la contaminación

Los datos recabados durante la caracterización se analizaron estadísticamente para identificar su distribución y agruparlos según profundidad. En la Figura 18 se muestra el promedio de las concentraciones y las cajas que representan los extremos cuando se suma o resta la desviación estándar (SE), también se aprecian valores que son aproximadamente dos veces mayores a la SE.

La comparación de las medianas de estas distribuciones confirmó que la mayor concentración se localizó a profundidades entre 2 y 6 m, y que su concentración disminuía significativamente por debajo de los 7 m. En el caso de los HTP-FL y HTP-FM, el valor de la mediana estuvo por arriba de los LMP establecidos por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, y se limitó a profundidades



▲ **Figura 18.** Distribución vertical de la contaminación por estrato para los HTP-FL, FM, FP y Benceno en la Ex Refinería 18 de Marzo.

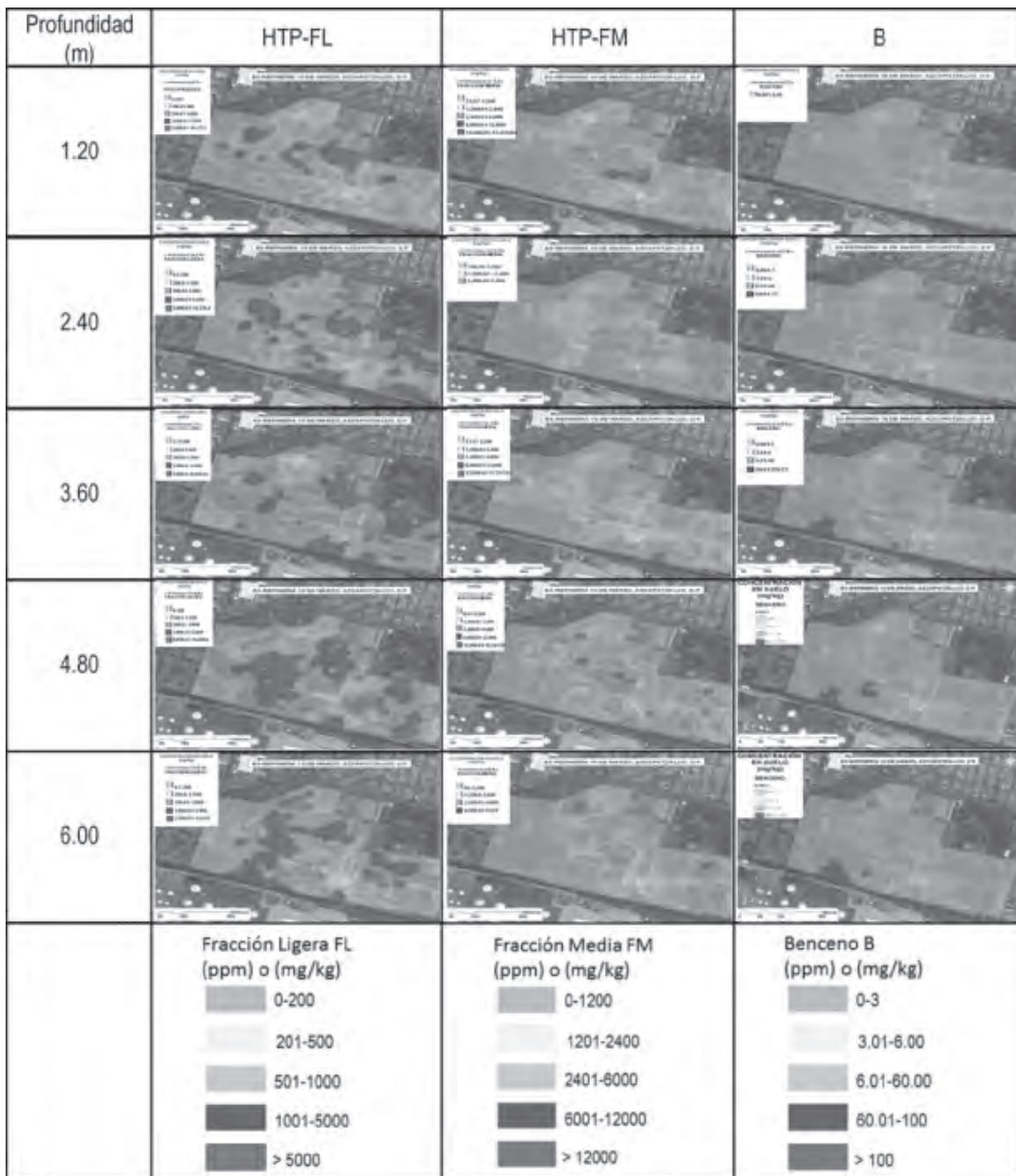


Figura 17. Distribución horizontal de Hidrocarburos Totales de Petróleo Fracción Ligera, Fracción Media y Benceno, en la Ex Refinería 18 de Marzo.

entre 2 y 6 m, mientras que para los HTP-FP, todos sus valores de mediana fueron inferiores a los 3,000 mg/kg, que es el LMP de dicha norma a cualquier profundidad. No obstante, en los tres casos el rango de concentraciones superiores a los valores de la mediana fue tan grande a cualquier profundidad ente 1.2 y 6.0 m, confirmando una mayor contaminación a esas profundidades, de acuerdo a los LMP de limpieza establecidos por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

5.1.9. Distribución de la contaminación en agua subterránea (zona saturada somera)

Debido a que no existía y aún no existe una Norma Oficial Mexicana (NOM) que regulara las concentraciones de contaminantes en cuerpos de aguas subterráneas en particular en zonas saturadas someras, se consideraron para una comparación como límites, los criterios de limpieza establecidos por la CNA en 1997. Como referencia se utilizaron los lineamientos de calidad del agua del DOF del 29 de diciembre de 1997, ya que el agua caracterizada en este estudio no fue considerada para uso o consumo humano. Estos criterios no cubrieron toda la gama de contaminantes analizados y fue útil sólo para verificar los valores de cadmio, fenoles, plomo y BETX. Para el cadmio no existieron valores que rebasaran el nivel de referencia establecido, 0.005 mg/L, pero para los otros dos contaminantes sí existieron valores superiores al criterio.

En el caso del plomo, se sobrepasó el criterio de 0.01 mg/L en nueve puntos localizados en distintas partes de la zona 5, la zona de tanques, la planta de servicios auxiliares y la planta reductora de viscosidad. Es importante mencionar que las concentraciones en agua no tuvieron relación espacial con las concentraciones en suelo asociadas a los lodos plomizos tampoco se observó un patrón de dispersión a partir de los mismos.

Respecto a los fenoles, cinco zonas estuvieron por encima del valor regulado, en la zona 7 y cercanas a la

planta de servicios auxiliares y la planta de turbosina en la zona 5. Finalmente fueron pocas muestras las que sobrepasaron los criterios establecidos para estas sustancias, con valores por encima de 0.001 mg/L considerando los criterios ecológicos de calidad del agua. Su máxima concentración se encontró localizada al Sureste de la zona 7 en el agua de la zona saturada, pudo deberse a la contaminación por posibles derrames de tanques que contenían este compuesto, aunque fueron ubicados los tanques en los planos de antecedentes del predio sí se reportó la presencia de fenoles en los tanques TV-102A y TV-103.

Por otra parte, para el MTBE no existían criterios normativos para su evaluación. Las mayores concentraciones de MTBE se encontraron asociadas al área de plantas (zona 5), mientras que las fracciones ligera, media y pesada guardaron semejanza con lo observado en el suelo a las profundidades de 2.4 a 6.0 m, viéndose asociadas al área de tanques al norte del predio (zona 6), en las plantas de proceso (zona 7) y fracción media en los tanques (zona 5). Al igual que lo observado en el suelo, los HTP fracciones media y pesada tuvieron una correlación estadísticamente significativa para las concentraciones en agua ($r = 0.85$, $p < 0.05$). De manera similar, los BETX las presentaron entre ellos, pero también mostraron una correlación relevante con el MTBE ($0.59 p < 0.05$).

La aplicación de los métodos geofísicos, geoquímicos, geológicos e hidrogeológicos, permitieron definir la ubicación de las zonas con presencia de fase libre. Las zanjas se ubicaron en forma perpendicular a la dirección del gradiente hidráulico. En las zonas 6 y 7, la fase libre se encontró entre los 4.8 a 6.0 m de profundidad y sus espesores aparentes variaron desde una película de 1 mm a 15 cm en pozos de monitoreo.

En la segunda etapa de caracterización se construyeron ocho zanjas y 85 pozos de monitoreo distribuidos en las zonas 5, 6 y 7. Del total de los pozos de monitoreo únicamente en 15 se encontró presencia de producto en fase libre; 13 se localizaron en la zona 6 y los otros dos, en la zona 7. En la Figura 19 se muestra la distribución de la contaminación en el agua en la Ex Refinería 18 de Marzo.

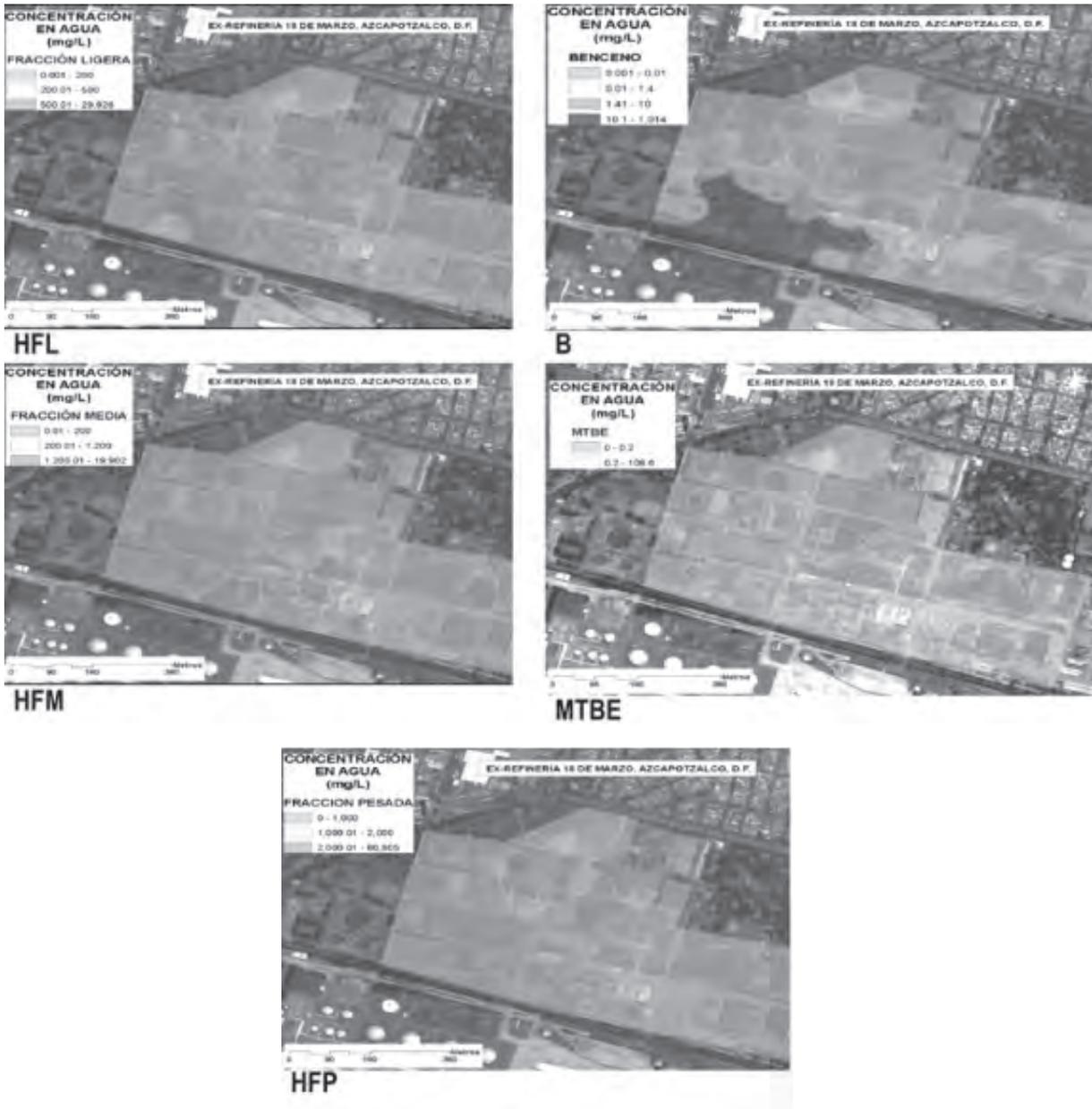


Figura 19. Distribución de la contaminación en agua en la Ex Refinería 18 de Marzo, según contaminante.

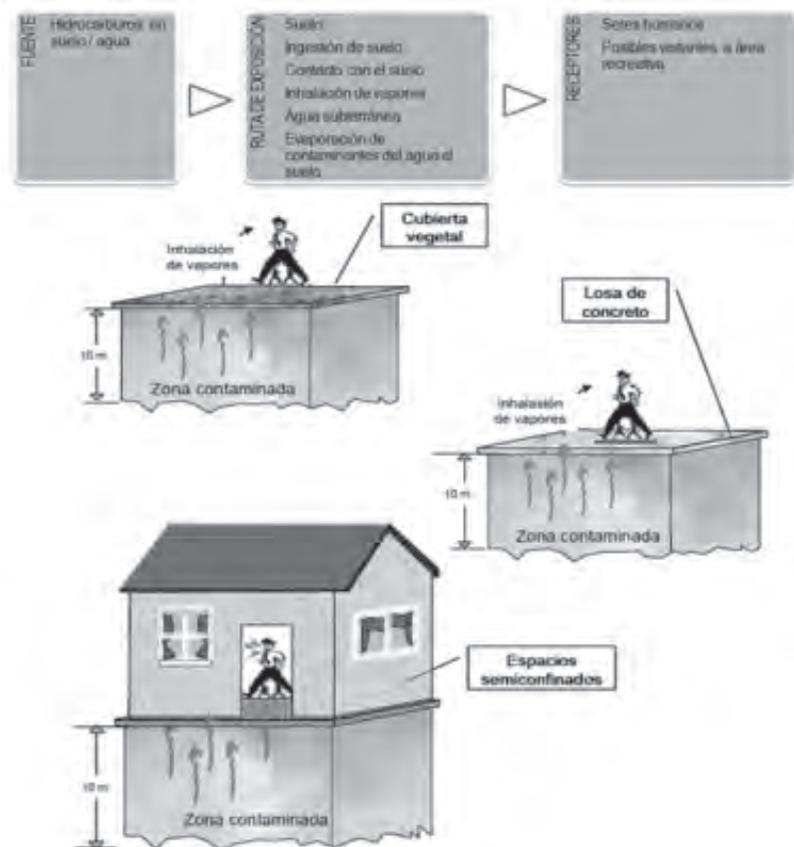
6. Evaluación de riesgo ambiental y a la salud humana

Con base en los resultados de las caracterizaciones del 2006 y 2007 realizadas en la Ex Refinería 18 de Marzo, PEMEX REF elaboró varios estudios de evaluación de riesgo (Tabla 8).

Estos estudios se enfocaron a determinar los riesgos para probables visitantes de un área recreativa. Las principales vías y rutas de exposición se muestran a continuación. Se consideraron tres escenarios de exposición: A) Exposición a los vapores del suelo de un visitante de un parque al aire libre en áreas verdes con cubierta vegetal, B) Exposición de un visitante al parque en áreas con una cubierta de losa de concreto o asfalto en áreas al aire libre y C) Exposición de visitantes al parque en áreas semicerradas como son oficinas o edificios (Figura 20).

ESTUDIO	ÁREAS DONDE SE APLICÓ
Estudio de Evaluación del Riesgo a la Salud y Establecimiento de los Criterios de Limpieza en la Ex Refinería 18 de Marzo, 2006.	2, 3 y 4
Estudio de Evaluación del Riesgo a la Salud de las zonas 5 y 7 del predio norte de la Ex Refinería 18 de Marzo, 2007.	5 y 7
Estudio de Evaluación de Riesgo a la Salud en la Zona No. 6 del predio norte de la Ex Refinería 18 de Marzo, 2007.	6
Estudio de evaluación de los riesgos potenciales para la salud humana asociados con compuestos químicos en las zonas 5, 6 y 7 del predio norte de la Ex Refinería 18 de Marzo, 2008.	5, 6 y 7

▲ **Tabla 8.** Estudios de evaluación de riesgo ambiental realizados para la Ex Refinería 18 de Marzo.



▲ **Figura 20.** Modelo conceptual de los ERA y escenarios aplicados en la estimación de riesgos en la Ex Refinería 18 de Marzo: A) Visitante en áreas verdes al aire libre, B) Visitante en áreas de andadores (concreto, asfalto o semejantes), C) Visitante en espacios semicerrados construidos a nivel de suelo (por ejemplo, sanitarios).

6.1 Estimación de los niveles de remediación específicos del sitio

A partir de las ecuaciones de la evaluación de riesgo que se aplican en el ámbito internacional se estimaron los niveles de riesgo para cada área, para cada grupo poblacional (niños y adultos) y para cada escenario de exposición ya mencionado. Esta estimación de riesgos se realizó para cada ruta de exposición y para contaminantes que habían sido identificados como críticos: HTP-FL, HTP-FM, BETX.

A manera de ejemplo, aquí se presenta la ecuación para la ruta de exposición subsuelo–aire en interiores.

$$C-NRA_{\text{SUB-SUELO-AIRE-INT}} = \frac{THQ \times PC \times RfD_{\text{INH}} \times AT}{DE \times FE_{\text{XP}} \times FB_{\text{INH}} \times TI \times VF_{\text{AIRE-INT}}}$$

Donde:

$$C-NRA_{\text{SUB-SUELO-AIRE-INT}} = \text{Concentración de HDP en el suelo (mg/kg) que genera una fase vapor en espacios semi-confinados (interiores) y representa un nivel de riesgo a la salud aceptable (HQ = 1).}$$

$$THQ = \text{Coeficiente de peligro aceptable} = 1$$

$$PC = \text{Peso Corporal (kg)}$$

$$AT = \text{Tiempo Promedio (días)}$$

ZONA		2	3	4	5	6	7
Superficie (m ²)		38,857	69,501	101,926	42,715	202,715	89,906
Promedio del índice de contaminación	NOM-138	0.7 ^{(a)*}	1.0 ^(a)	1.5 ^(a)	2.7 ^(a)	3.6 ^(a)	12.6 ^(b)
	Fracción Ligera	0.8	1.1	2.4	3.3	3.6	5.5
	Fracción Media	0.4	0.5	0.8	0.7	0.8	0.8
	Fracción Pesada		0.1	0.2	0.1	0.1	0.4
	Benceno		0.4				14.5
	Etilbenceno			0.1			0.5
	Tolueno						3.4
	Mezcla de Xilenos						0.1
	Aromáticos Policíclicos						0.1
Profundidad Límite (m)		-3.2 ^(a)	-4.8 ^(a,b)	-4.3 ^(a,c)	-4.2 ^(a,c)	-5.7 ^(b,c)	-6.5 ^(b)
Valores Máximos (**)	Tetraetilo de Plomo en suelo (ppm)	0.02		0.73	0.068	36.1	39.5
	Espesor de producto Libre (m)				0.810	1.7	1.9
	Tetraetilo de Plomo en agua somera (ppb)				0.01		31.8
	Metil Terbutil Eter en agua somera (ppm)				0.11		19.6

* Las letras diferentes en cada grupo indican diferencias significativas, $p < 0.05$, Tujey, ANOVA

** Se refiere a los valores máximos registrados durante el periodo de octubre 2006 a marzo 2007

▲ Tabla 9. Resultados de la ERA realizados para la Ex Refinería 18 de Marzo.

DE =	Duración de la Exposición	(años)
FE _{XP} =	Factor de Exposición	(días/año)
FB _{INH} =	Factor de Biodisponibilidad Inhalatorio	%
TI =	Tasa Inhalatoria	(m ³ /día)
RfD _{INH} =	Dosis de Referencia Inhalatoria	(mg/kg x día)
VF _{AIRE-INT} =	Factor de Volatilización del Subsuelo hacia interiores	(mg/m ³) o (mg/kg suelo)

En la Tabla 9 se muestra la estimación de riesgos del estudio de evaluación de riesgos del 2006.

Con base en los estudios se determinaron dos grupos de Niveles de Remediación Específicos (NRE) para el sitio,

- Para la etapa I del proyecto que se aplicaron para las áreas 2, 3 y 4, y
- Para la etapa II del proyecto que se aplicaron para las áreas 5, 6 y 7, así como en las áreas adyacentes y en las áreas del parque delegacional que fueron remediadas.

La Tabla 10 muestra a detalle estos resultados.

ETAPA DEL PROYECTO DE REMEDIACIÓN	ÁREAS DE APLICACIÓN	SUSTANCIA CONTAMINANTE	CONCENTRACIÓN DEL NIVEL DE REMEDIACIÓN (mg/kg)	NIVEL DE REMEDIACIÓN DEL SAC ** (mg/l)
I	2, 3 y 4	Fracción Ligera	HFL = 650	
		Fracción Media	HFM = 3,500	
		Fracción Pesada	HFP = 6,500	
II	5, 6 y 7 así como las Áreas de Amortiguamiento (AA)	Benceno*	6	
		Tolueno	650	
		Etilbenceno	400	
		Xilenos (suma de isómeros)	270	
		Benzo[a]pireno	2	
		Dibenzo[a,h]antraceno	2	
		Benzo[k]fluoranteno	8	
		Indeno (1,2,3-cd)pireno	2	
		Benzo[a]antraceno	2	
		Benzo[b]fluoranteno	2	
		Fracción Ligera	400	350
		Fracción Media	1,800	1,000
		Benceno		1.4
		Etilbenceno		6.9
		Tolueno		15
Xilenos		270		
MTBE		0.2		

** Sistema de Aguas Colgadas (SAC) o Cuerpo de Agua Subterránea Somera.

▲ Tabla 10. Niveles de remediación con base en la estimación del riesgo ambiental realizados para la Ex Refinería 18 de Marzo.

7. Remediaci3n

Una vez realizadas la caracterizaci3n del sitio y la evaluaci3n de riesgos a la salud humana se determinaron las tecnologías de remediaci3n que debían ser aplicadas. Los criterios que se usaron para dicha selecci3n fueron el tipo de contaminante y las condiciones geohidrol3gicas del sitio. El análisis de toda la informaci3n determin3 que las alternativas con la mejor relaci3n costo-beneficio así como las que garantizaban una eliminaci3n de riesgos en el sitio fueron, para el suelo:

- la biorremediaci3n,
- la extracci3n de vapores combinada con el bioventeo,
- la inyecci3n de aire en el agua subterranea, y
- la disposici3n de residuos peligrosos, aú presentes en bajos volúmenes, fuera del sitio en un confinamiento debidamente autorizado.

Lo anterior se combinaría con el tratamiento del agua subterranea en las instalaciones del sitio, la excavaci3n, la extracci3n del producto libre y finalmente el aislamiento hidr3ulico del predio en el área perimetral frente a la TAR. Adem3s, se determin3 que los residuos de demolici3n que se generaran durante el proceso de remediaci3n, fueran reintegrados al sitio o reutilizados como el caso del concreto, las tuberías y la varilla.

7.1. Biorremediaci3n por biopilas

En suelos contaminados con hidrocarburos FM y FP la biorremediaci3n por biopilas sería trav3s de celdas de tratamiento. Esta tecnología implicaba excavar un elevado nÚmero de metros cÚbicos de suelo, generando grandes volúmenes de residuos de demolici3n (Figura 21).

La tecnología sería aplicada en sus variantes principales: con la utilizaci3n de aditivos orgánicos y venteo mecánico o con aplicaci3n de un cribado previamente al tratamiento. Se basa en la mineralizaci3n que las bacterias autóctonas del suelo realizan al establecerse condiciones óptimas para su crecimiento, lo cual depende sobre todo del aireamiento, la humedad y la relaci3n C:N:P.



▲
Figura 21. Biorremediaci3n por biopilas.

7.2. Extracción de vapores y bioventeo

La extracción de vapores combinada con el bioventeo se aplicó en aquellas áreas en donde mayoritariamente hubo contaminación con HFL y BETX. La tecnología consiste principalmente en la instalación de pozos de extracción / bioventeo que son operados a través de válvulas magnéticas y están accionados por ventiladores o extractores, lo cual conduce los vapores del suelo a equipos de oxidación catalítica para el quemado de los hidrocarburos (Figura 22). Esta tecnología usada en la zona no saturada del suelo se aplicó de manera combinada en un ciclo de intercalación en cada pozo de inyección o extracción, lo que permitió aumentar su eficiencia.

7.3. Inyección de aire al agua subterránea y extracción de vapores

La inyección de aire directamente al agua subterránea somera se aplicó para aumentar la evaporación y degradación de los contaminantes volátiles en el agua y, en la zona saturada del suelo. En combinación con la extracción de vapores en la zona no saturada, aumenta la extracción de los contaminantes volátiles. A diferencia de la tecnología anterior, en los pozos de inyección no se alterna la extracción y la inyección.



▲
Figura 22. Extracción de vapores y bioventeo.

7.4. Tratamiento del agua subterránea

El tratamiento del agua subterránea se realizó a través de un gran número de zanjas abiertas de longitudes variables, desde 20 y hasta 50 m (Figura 23). Esto se combinó con la instalación de equipos de tratamiento en el sitio para extraer los contaminantes en el agua y aumentar el oxígeno disuelto, además de capturar los vapores en tanques de carbón activado.

7.5. Actividades complementarias a la remediación

Se realizó la excavación y disposición final de los suelos contaminados con plomo orgánico que en menor volumen se identificaron en el sitio. Además, se extrajeron las tuberías subterráneas, se demolieron los drenajes y las losas de concreto de distintos espesores, se molieron y dispusieron en el lugar.

Aparte, se construyó una barrera subterránea desde la superficie hasta los 8.5 m por debajo del nivel del terreno, entre el predio del polígono de donación (el futuro parque) y el predio de la TAR, con una longitud aproximada de 1.1 km para cubrir también el perímetro entre la línea de ductos. Un número significativo de drenajes



▲ **Figura 23.** Tratamiento del agua subterránea

existentes en el sitio y el cárcamo de tormentas, así como otras estructuras masivas en el sitio debieron ser saneadas y recuperadas para su uso futuro.

7.6. Trabajos de remediación realizados

El proyecto de la remediación del polígono de donación de aproximadamente 55 ha fue dividido en dos etapas principales (Tabla 11).

ETAPA	ÁREAS	SUPERFICIE APROXIMADA (ha)
I	2, 3 y 4	22.00
II	5, 6 y 7	33.05
	Áreas de Amortiguamiento (AA)	2.92
Adicional	Áreas del corporativo de PEMEX (Archivo y Aula Magna) así como áreas pequeñas del parque delegacional. Todo ello fuera del polígono de donación.	4.12

▲ **Tabla 11.** Áreas remediadas en la Ex Refinería 18 de Marzo.

Es importante recalcar que los volúmenes de suelos tratados por biorremediación se muestrearon al final del tratamiento y cumplieron con los niveles de remediación establecidos en la primera etapa así como con los niveles

de remediación de la segunda etapa sancionados y señalados por COFEPRIS. En algunos casos los suelos tratados por biorremediación adicionalmente cumplieron con la NOM 138 SEMARNAT/SS 2003.

Además, se extrajeron y dispusieron más de 140,000 litros de producto libre y en cuatro módulos de tratamiento en el sitio se sanearon poco más de 412,000 m³ de agua del denominado SAC, cuerpo de aguas someras subterráneas que se encuentra entre los 3.5 y 9.5 m abajo del nivel del terreno y que está completamente aislado del acuífero profundo.

Como medida de seguridad adicional se construyó la barrera subterránea antes descrita, que impide el flujo del agua y posibles afectaciones futuras que pudieran ocurrir por la presencia de la TAR que continua en operación. Se extrajeron volúmenes reducidos de suelos contaminados por lodos plumizos del sitio, cerca de 532 m³ y se enviaron a un confinamiento autorizado. En la Tabla 12 se indica el número de pozos instalados en el sitio para el tratamiento de las áreas con Fracción Ligera (EV/BV) y áreas con BETX (IA/BV).

POZOS	NO. POZOS TOTALES	NO. POZOS A 3.5 m EV/ BV	NO. POZOS A 8.0 m IA/ BV
2007- 2009	3,841	2,780	623

▲ **Tabla 12.** Número de pozos de tratamiento instalados en la remediación de la Ex Refinería 18 de Marzo.

El volumen estimado de suelos tratados durante la remediación se muestra en la Tabla 13. Se incluyen también los volúmenes de las áreas de amortiguamiento.

ÁREAS DE TRATAMIENTO	SUPERFICIE APROXIMADA (ha)	VOLUMEN TRATADO (m ³)
Polígono de donación.	55.05	1,154,111.06
Áreas de amortiguamiento.	2.92	96,561.60
Polígonos adicionales PEMEX.	4.12	74,115.00
Volumen remanente por préstamos y excavaciones.		117,000.00
TOTAL	62.09	1,441,787.66

▲ *Tabla 13. Volúmenes totales de suelo remediado en la Ex Refinería 18 de Marzo.*

8. Lecciones aprendidas

El proyecto de remediación de la Ex Refinería 18 de Marzo sentó un precedente tanto en la inclusión de instituciones de educación superior en la realización de trabajos de considerable magnitud como en la aplicación de tecnologías especiales a gran escala. Además, comprobó que es posible remediar un sitio contaminado y posteriormente utilizar el terreno con fines públicos, reintegrarlo a la vida social y económica de la Ciudad de México.

Cuando se realizó el proyecto no había ocurrido una remediación tan extensa y compleja en el país, no se habían conjuntado los esfuerzos de suministradores internacionales de equipos y tecnología con personal de investigación en materia de remediación de sitios contaminados y tampoco había sido realizado un proyecto de esta magnitud en un tiempo tan corto. Todo con base en estudios de caracterización y evaluación de riesgos.

El movimiento de materiales en grandes cantidades en sitios de remediación es un aspecto poco estudiado, que requiere de especial atención y planeación previa al desarrollo de los proyectos a gran escala. El suministro de los equipos de tratamiento en México sigue siendo un problema a resolver y más en caso de involucrar tecnología de nivel internacional.

El cribado preliminar a la biorremediación contribuye a la disminución de los tiempos de tratamiento, a disminuir la variabilidad así como al determinar el número de muestras finales comprobatorias del mismo, tema que tanto en la biorremediación como en tratamientos *in-situ* o sin movimiento de materiales, requiere la elaboración de lineamientos generales y específicos aún no claros en México.

La disposición y manejo de materiales reciclables y materiales de demolición son aspectos que también deben de ser regulado en el futuro a fin de disminuir las transferencias de residuos a otras localidades y aumentar la eficacia de la remediación.

En México se requieren lineamientos adicionales y guías sobre ventajas y desventajas de cambios estacionales en la remediación, aditivos y procesos preliminares a la biorremediación, muestreos de aguas subterráneas, muestreos de gases y vapores de suelos, niveles de saneamiento de cuerpos de agua subterráneos no explotables, beneficios y limitaciones de estudios y pruebas geofísicas en sitios contaminados. Los lineamientos bajo los cuales se da por concluida la remediación de un pasivo ambiental merecen especial atención, al considerar los riesgos remanentes y las medidas de monitoreo post-remediación que deben implementarse.

Fuentes de información

COFEPRIS – Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (2008). *Análisis de Riesgo “Parque Bicentenario” Documento Ejecutivo* (Estimación de los niveles de remediación).

García Villanueva, Luis Antonio (2013). *Evaluación de la Eficiencia de Remediación de Sitios Contaminados por Hidrocarburos*. Tesis doctoral. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

IMP – PEMEX (2006). *Apoyo para la caracterización y restauración del área norte de la ex – Refinería 18 de Marzo*.

Llamas Viramontes, Javier. IMP – PEMEX (2006). *Análisis histórico de la Ex Refinería 18 de Marzo*.

Llamas Viramontes, Javier. PEMEX (2006). *Evaluación del Riesgo a la Salud y Establecimiento de los Criterios de Limpieza en la ex – Refinería 18 de Marzo*. (Zonas 2, 3 y 4).

PEMEX (2007). *Caracterización de las Zonas 5, 6 Y 7 del Predio Norte de la Ex Refinería 18 de Marzo, Azcapotzalco México, D.F.*

PEMEX (2008). *Evaluación de Riesgo a la Salud en la Zona No. 6 del predio norte de la ex – refinería 18 de Marzo*.

PEMEX (2008). *Evaluación del Riesgo para la Salud de las Zonas 5 y 7 del Predio Norte de la ex – Refinería 18 de Marzo*.

PEMEX (2008). *Evaluación de los Riesgos Potenciales para la Salud Humana Asociados con Compuestos Químicos en las Zonas 5, 6 y 7 del Predio Norte de la ex-Refinería 18 de Marzo*.

4

**Remediación y revitalización del predio
de Peñoles, Compañía Minera, Fundidora y
Afinadora Monterrey, S. A. y su conversión en el
Paseo de Santa Lucía, 2^a etapa,
en Monterrey,
Nuevo León**

Benjamín Limón Rodríguez
Martha Leticia Herrejón Figueroa

Abreviaturas y Acrónimos

ASARCO	American Smelting and Refining Co
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (traducción del inglés)
CAPE	Concentraciones Aceptables en el Punto de Exposición
C MAR	Centro Integral de Manejo y Aprovechamiento de Residuos Industriales
C /P	Constituyentes de Interés o Preocupación
C RSC	Criterios Interinos de Restauración de Suelos Contaminados
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CSA	Asociación Canadiense de Estándares (traducción del inglés)
D A C	Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería Civil
DGG MAR	Director General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas
DRX o XRD	Difracción de Rayos X (XRD por sus siglas en inglés)
EAS	Evaluación Ambiental de Sitio
EEMSSA	Estudios Especializados de Mecánica de Suelos S A de C V
EM	Electromagnético
EMA	Entidad Mexicana de Acreditación
ERA	Evaluación de Riesgo Ambiental
FRX o XRF	Fluorescencia de Rayos X (XRF por sus siglas en inglés)
GPR	Ground Penetrating Radar
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
MMSA	Industrial Minera México S A
C F	Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil
PAB	Instituto para la Protección al Ahorro Bancario
LMR	Límites Máximos Recomendables
NCP o PCL	Niveles de Concentración de Protección
NMC o MCL	Niveles máximos de contaminantes
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana
NTE	Norma Técnica Ecológica
PECT	Prueba de Extracción para Constituyentes Tóxicos
PCL	Protective Concentration Levels
ppm	Partes por Millón
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PRRT o TRRP	Programa de Reducción de Riesgos de Texas (traducción del inglés)
PVC	Cloruro de polivinilo (traducción del inglés)
RPT	Radar de Penetración Terrestre
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
S E V	Sondeo Eléctrico Vertical
TPHCWG	Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
UTM	Universal Transverse Mercator (sistema de coordenadas)
V L F	Very Low Frequency
VTR	Valores Toxicológicos de Referencia

Nuevo León

Remediación y revitalización del predio de Peñoles, Compañía Minera, Fundidora y Afinadora Monterrey, S.A. y su conversión en el Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa, en Monterrey, Nuevo León

1. Descripción del proyecto	117
2. Antecedentes históricos	120
3. Caracterización ambiental	123
3.1. Descripción del medio físico	123
3.1.1. Geología	123
3.1.2. Hidrología	123
3.2. Levantamiento topográfico	124
3.3. Métodos indirectos de reconocimiento del subsuelo	124
3.3.1. Método geoelectrico	125
3.3.2. Georradar o radar de penetración terrestre	125
3.4. Toma de muestras de los medios afectados	125
3.4.1. Muestreo de suelo/residuos	126
3.4.2. Muestreo de agua subterránea	128
3.5. Análisis de resultados del laboratorio y selección de Constituyentes de interés o preocupación	129
3.5.1. Suelo/residuos	130
3.5.2. Agua subterránea	132
3.6. Estimación de los volúmenes de residuos	133
4. Evaluación de riesgo ambiental (ERA)	134
4.1. ERA-nivel 1	134
4.2. ERA-nivel 2	134
5. Selección de las tecnologías de remediación	139
6. Implementación del programa de remediación	141
6.1. Excavación-disposición	141
6.2. Cubierta multicapa	143
7. Ejecución del proyecto arquitectónico	145
8. Lecciones aprendidas	146
9. Fuentes de información	148



▲
Paseo Santa Lucía, 2da. Etapa.

Remediación y revitalización del predio de Peñoles, Compañía Minera, Fundidora y Afinadora Monterrey, S.A. y su conversión en el Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa, en Monterrey, Nuevo León

1. Descripción del proyecto

En 1890 se fundó la Compañía Minera, Fundidora y Afinadora Monterrey, S.A. conocida también como Fundición No. 2, dedicada a fundir plomo argentífero (Morado, 2003). 30 años después, en 1920 (*Figura 1*) la compañía pasó a formar parte de la empresa Peñoles hasta su cierre en 1976. Las instalaciones fueron desmanteladas y demolidas, y la maquinaria se trasladó a Torreón, Coahuila donde hasta la fecha opera la planta Met Mex Peñoles (UANL, 2005).



Figura 1. Vista panorámica en 1920 de la Compañía Minera, Fundidora y Afinadora Monterrey también conocida como Fundición No. 2. (Fuente: Morado, 2003; Archivo General del Estado de Nuevo León).

El predio permaneció abandonado durante casi tres décadas y se convirtió en uno de los grandes pasivos ambientales de México hasta que en el año 2004, iniciaron las gestiones para recuperar el terreno y revitalizarlo a través de la construcción de un parque, que sirviera como espacio recreativo para la sociedad regiomontana, en conjunto con otros grandes proyectos ya consolidados como la Macroplaza y el Parque Fundidora.

Con un área aproximada de 28 ha, el sitio se localiza en el Área Metropolitana de Monterrey, una zona totalmente urbanizada. Está rodeado por una amplia gama de usos de suelo, donde abundan aquellos relacionados a actividades recreativo-culturales, comerciales, de servicios hospitalarios y habitacionales. De aquí la importancia de recuperar este predio para integrarlo a la ciudad. Aunado a esto, el daño ambiental debía ser reparado, pues sí en el sitio se hallaban más de 1.6 millones de m³ de residuos peligrosos de la industria minero metalúrgica.

Durante el largo período que operó la planta metalúrgica los residuos industriales generados en los procesos productivos, principalmente cenizas y escorias de fundición con niveles elevados de arsénico, plomo, mercurio y otros residuos, se depositaban directamente en los patios de la empresa, práctica común en el pasado. Esto ocasionó la contaminación del suelo subyacente y por ello fue necesario buscar la alternativa técnico-económica más apropiada que permitiera reusar el terreno.

Desde el año de 1976 se intentó rehabilitar el terreno, pero fue hasta el año 2004, cuando finalmente se concretó

el proyecto de integración urbanística, al considerar la remediación de este predio dentro del Plan Estatal de Desarrollo 2004-2009 del Gobierno del Estado de Nuevo León.

El proyecto de caracterización y propuesta de remediación del sitio fue realizado por el Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería Civil (DIA-IIC) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), que después de evaluar varias alternativas, propuso para un área de 147,000 m² aproximadamente, confinar de manera controlada los residuos peligrosos, alrededor de 14,519 toneladas que representaban un riesgo mayor para el ambiente y la salud de los vecinos y, realizar "capping" tipos A y B donde se detectó escoria de fundición. Estos trabajos fueron ejecutados por varias compañías consultoras contratadas por el gobierno estatal, bajo la supervisión de la UANL.

El proyecto arquitectónico del parque recreativo "Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa"¹ estuvo a cargo de la Secretaría de Obras Públicas del Estado de Nuevo León. Este parque se integró a la Macroplaza y al Parque Fundidora (Figura 2).



► **Figura 2.** Ubicación del proyecto Macroplaza–Paseo de Santa Lucía–Parque Fundidora.

1. El proyecto se integró como segunda etapa del proyecto general de revitalización del área donde se encontraban los manantiales de Santa Lucía. La primera etapa del Paseo de Santa Lucía corresponde a la construcción del canal en el área habitacional ubicada al oeste del predio de 28 has considerado en el presente estudio (400 m del canal de la Macroplaza hacia el oriente). Inicialmente el proyecto de rehabilitación de este predio se conoció como Estrategia de Adecuación Ambiental del Sitio "Fundidora II" por su proximidad con el Parque Fundidora, ubicado en los terrenos que ocupó durante muchos años la compañía Fundidora Monterrey S.A. al este del predio, cuyo Plan Maestro de recuperación comenzó a delinearse en el año de 1989 (ver Figuras 2 y 6).

A través de una licitación pública, el gobierno de la entidad convocó a arquitectos y paisajistas a presentar proyectos para integrar el predio recuperado al paisaje urbano del área Macroplaza–Parque Fundidora.

El proyecto de rehabilitación del predio incluyó la ejecución de estudios de evaluación ambiental del sitio (EAS) Fase I y Fase II. Los estudios EAS, originados en Estados Unidos de América, tienen como objetivo identificar problemas y responsabilidades ambientales actuales y potenciales en un sitio presumiblemente contaminado. En los estudios Fase I se realizan visitas al predio pero no se toman muestras de medios contaminados. Además, se entrevista a personas relacionadas con el sitio y se realizan investigaciones históricas para obtener información de los contaminantes que pudieran estar presentes en los diferentes medios, la geohidrología del sitio, su posible distribución y transferencia entre

medios, y los posibles riesgos a la salud humana o el ambiente. Si con esos datos se establece que el sitio puede estar contaminado, se procede a realizar un estudio Fase II.

En éste se realiza una caracterización ambiental mediante la toma de muestras de los medios o materiales presumiblemente afectados, por ejemplo: suelo, agua, aire, sedimentos, residuos, e incluso materiales de construcción; con base en los análisis de las muestras se establece si el sitio está contaminado así como la distribución espacial y vertical de los contaminantes en los medios afectados. Los resultados obtenidos en el estudio Fase II sirven como base para determinar las medidas de remediación pertinentes.

En la Figura 3 se muestran las etapas del proyecto de rehabilitación de este sitio.



Figura 3. Etapas del proyecto de rehabilitación del predio de la Fundación No. 2 o Peñoles, actualmente Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa.

2. Antecedentes históricos

La primera fase de la industrialización de Monterrey se registró durante los turbulentos años de 1890 al 1910. En este período se fundaron empresas de diferentes ramos de la industria, destacándose el sector metalúrgico. Una de ellas fue la Compañía Minera, Fundidora y Afinadora Monterrey, llamada Fundición No. 2, ya que fue la segunda fundidora establecida en esa ciudad. La primera fue The Nuevo Leon Smelting, Refining & Manufacturing Company Limited o Fundición No. 1.

El 21 de junio de 1890 se constituyó la Compañía Minera, Fundidora y Afinadora de Monterrey S.A. o Fundición 2, que fusionó a la compañía Minera Santa Elena. Similar a de otras metalúrgicas establecidas en el área, su objetivo

era abastecer la creciente demanda de metales industriales, principalmente plomo, del noreste de los Estados Unidos, por lo que las principales actividades de la empresa eran la fundición de plomo argentífero, moldeo y refinación de plomo, y la separación de oro y plata.

Las operaciones de los procesos minero-metalúrgicos generaban diversos tipos de residuos, que en su mayoría eran escorias de fundición con niveles elevados de arsénico, plomo y mercurio, y otros como cenizas de fundición o calcinas.

Después del año 1976 las instalaciones fueron demolidas y el predio se puso en venta. Lo adquirió la Compañía Inmobiliaria Tamrey S. de R. L. de C. V., que urbanizó parte de la propiedad que en la actualidad corresponde al Centro Urbano Reforma. El resto del predio pasó luego a ser propiedad de una institución financiera que después entregó al Instituto para la Protección al Ahorro Bancario (IPAB), que a su vez transfirió mediante la operación de compra-venta, al Gobierno del Estado de Nuevo León (UANL, 2005).

Mientras operó la Fundición No. 2 o Peñoles el uso de suelo fue industrial. Actualmente es recreativo-cultural, denominado Paseo de Santa Lucía 2ª etapa (Figura 5) rodeado por una zonificación variada principalmente por predios relacionados al comercio, servicios hospitalarios y habitacionales.



▲
Figura 4. Sala de fundición y moldeo continuo de plomo en la Fundición No. 2 (Fuente: Morado, 2003; Archivo General de Estado de Nuevo León).



▲
Figura 5. Vistas del Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa y sus alrededores (Fuente: Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Nuevo León).

2. La segunda fase se llevó a cabo entre los años cuarenta y sesenta (Cerutti et al., 2000).

En su totalidad, el terreno ocupado por la Fundación No. 2 o Peñoles, de 90 ha aproximadamente, estaba emplazado a las orillas de la ciudad de Monterrey. El área del proyecto comprende 28 ha y es la zona donde se realizaban prácticamente todos los procesos industriales de la empresa, se ubicaban las naves, los hornos de fundición y los graseros o tiraderos de escorias; se generaban cenizas, escombros y otros residuos propios de la fundición, mismos que se acumularon a lo largo de 86 años.

En la parte sureste del predio se localizaba el lecho del río Santa Catarina que fue canalizado. La empresa usó esa depresión para disponer tanto la escoria procedente de los procesos como gravas y escombros. En algunas partes del terreno el relleno de escorias llegó hasta los 16 m de profundidad. La estratigrafía del área indica que bajo este lecho había una capa pequeña de grava y una capa de arcilla prácticamente impermeable, lo que contribuyó a que no migraran los contaminantes al acuífero. En esta etapa del proyecto se efectuaron recorridos a lo largo del margen norte del cauce actual del río Santa Catarina, desde la Ave. Félix U. Gómez hasta el Parque Plaza Sésamo (Figura 6), a fin de detectar posibles afloramientos

de aguas freáticas y ubicar las descargas de drenaje pluvial en ese tramo.

Dada la localización del predio con respecto al centro de la ciudad de Monterrey, en años posteriores se realizaron estudios de caracterización que incluyeron suelo, subsuelo y agua subterránea, con el propósito de conocer el tipo de contaminantes, su distribución en el sitio y los posibles riesgos que representaban para la salud de la población vecina.

El primer estudio de este tipo se realizó en septiembre de 1992 por la compañía Trammell Crow Company y Southwestern Laboratories Inc. En este estudio se tomaron muestras de suelo, residuos y agua subterránea. En los residuos muestreados (escorias y cenizas) se encontraron concentraciones de plomo y arsénico lixiviable por arriba de lo que indicaba la Norma Técnica Ecológica (NTE) vigente en ese tiempo para determinar a los constituyentes que hacen peligroso a un residuo (NTE-CRP-002/88³), así como concentraciones detectables de plomo, arsénico, cadmio y plata. En el agua subterránea se encontró bario y plata en concentraciones apenas superiores al límite de detección analítico. Los análisis del



Figura 6. Ubicación del predio de la Compañía Peñoles, ahora Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa.

3. Norma Técnica Ecológica NTE-CRP-002/88 que establece los procedimientos para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación. México. 14 de diciembre de 1988.

suelo indicaron que éste estaría afectado mínimamente por debajo de la capa superficial de la escoria.

El estudio realizado por la Alianza de Grupos Ecologistas, A. C. determinó que a diferencia del anterior, las ocho muestras del suelo analizadas no se consideraron como residuos peligrosos.

Ningún estudio incluyó una propuesta de remediación o contención viables. Sin embargo, sirvieron como fuente

de información para conocer los antecedentes del sitio cuando el Gobierno del Estado de Nuevo León inició el proyecto de restauración y revitalización del predio en el año 2004. Como parte de estas actividades se incluyeron los estudios demecánica de suelos, realizados por el Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil (IIC–FI) de la UANL que incluyeron 14 sondeos y perfiles estratigráficos; determinando además la capacidad de carga del terreno, la profundidad y material para el desplante y el tipo de cimentación.

FECHA	EVENTO
21.06.1890	Fundación de la Compañía Minera, Fundidora y Afinadora de Monterrey, S.A.
1908	Finalización de las operaciones de la Compañía Minera, Fundidora y Afinadora de Monterrey, S.A. y alquiler de la planta por la empresa Industrial Minera de Monterrey, S.A. (IMMSA), hoy Grupo México.
1914	Ampliación de la planta y aumento de la producción de plomo a 700 toneladas diaras.
1918	Arrendamiento a la Compañía Minerales y Metales, a razón del 50% de las utilidades anuales.
1920	Fusión de la Compañía Minerales y Metales con la empresa Peñoles. A partir de esta fecha el predio se conoció como Peñoles o Graseros de Peñoles.
1976	Clausura definitiva de la empresa Peñoles y desmantelamiento de las instalaciones.
1992–2004	Realización de estudios de caracterización, impacto ambiental y mecánica de suelos, por compañías e instituciones nacionales e internacionales como Trammel Crow Company, Southwestern Laboratories Inc. y el Instituto de Ingeniería Civil de la UANL.
2004	Inclusión de la remediación del predio de 28 ha de Peñoles en el Plan Estatal de Desarrollo 2004-2009 del Gobierno del Estado de Nuevo León.
2004	Encargo de la Corporación de Proyectos Estratégicos del Gobierno del Estado de Nuevo León al Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería Civil (DIA–IIC) de la UANL la realización del Estudio de Evaluación Ambiental del Sitio Fase II, de las 28 ha donde operó la Fundición No. 2 o Peñoles.
2004–2005	Realización de la Evaluación Ambiental del Sitio Fase II y planteamiento de alternativas de la remediación por parte del DIA–IIC de la UANL, en alianza con la Compañía ERM México, S.A. de C.V.
2005–2006	Ejecución de las actividades de la remediación del predio de 28 ha e implementación del proyecto paisajístico para la integración del área remediada a la Macroplaza y al Parque Fundidora.
09.05.2006	Inauguración del Paseo de Santa Lucía, 2ª Etapa.

▲ *Tabla 1. Cronología de eventos relacionadas al predio de 28 ha del actual parque recreativo Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa.*

3. Caracterización ambiental

De acuerdo a los resultados de la investigación histórica de la Evaluación Ambiental del Sitio (EAS) Fase I, se realizó la descripción del medio físico, el levantamiento topográfico y la evaluación ambiental. Se incluyó la toma de muestras de los medios afectados, suelo y agua subterránea. También se aplicaron una serie de métodos indirectos como estudios geofísicos y prospección de rayos X. Durante la elaboración de los estudios, se seleccionaron Constituyentes de Interés o Preocupación (CI/P) a fin de ser considerados en la evaluación de riesgo ambiental.

describen a continuación y que se abordan con más detalle en la sección correspondiente al plan de muestreo.

Suelo vegetal: Unidad que consiste en arcilla arenosa a limosa, con espesor variable de 3 a 50 cm.

Arcilla oscura: Unidad presente en la porción noreste del predio, que consiste de una arcilla color café oscura, de moderada a fuertemente plástica, y presenta contenidos de arena y gravas en diferentes proporciones. El espesor de esta unidad es variable.

Arcilla clara: Unidad presente en la porción noreste del predio, consiste de una arcilla de color café clara, y presenta contenidos de arena/limo en diferentes proporciones. Su espesor es variable.

Material aluvial: Unidad presente a profundidades que van de los 6 a los 12 m por debajo de superficie, que consiste de gravas no consolidadas con fragmentos de sub-redondeados a redondeados menores de 7 cm y boleos en menor proporción. La unidad corresponde con antiguos cauces del río Santa Catarina, modificado a través del tiempo hasta su forma actual.

3.1. Descripción del medio físico

3.1.1. Geología

El área de estudio está formada por sedimentos aluviales producto de la erosión y el transporte de los materiales rocosos provenientes de la Sierra Madre Oriental. Desde el punto de vista hidrogeológico es sabido que dentro de los sedimentos aluviales se localiza un acuífero en un medio poroso que corresponde a los canales de gravas. Debajo de estos sedimentos aluviales se localiza la formación Méndez compuesta por lutitas y lutitas calcáreas. En la parte superior se encuentra la zona meteorizada de las lutitas y debajo de ésta, el acuífero en el medio fracturado, que puede interactuar con el acuífero de los canales de gravas aluviales.

De acuerdo a las perforaciones de los barrenos de muestreo y las trincheras de exploración excavadas, se determinó la columna litológica local, cuyas unidades se

3.1.2. Hidrología

La ciudad de Monterrey está situada en la Región Hidrológica del Río Bravo. Dentro del área de estudio hay un acuífero somero clasificado como Clase III, según el sistema de clasificación del agua subterránea de la U.S.EPA. Se instalaron pozos de monitoreo en los alrededores del predio y entre los 8.30 y 14.11 m de profundidad, se descubrió el agua somera. Con la información de los niveles estáticos de los pozos de monitoreo instalados se determinó que el flujo del agua subterránea somera es en dirección al sureste.

4. La estrategia de protección del agua subterránea de la U.S.EPA considera tres clases generales de agua subterránea o acuíferos, en función del valor que ésta tiene para la sociedad: Clase I, cuerpos de agua especiales, altamente vulnerables, que son fuente de agua potable y que se consideran irremplazables o ecológicamente vitales; Clase II, acuíferos que son fuente de agua potable actual o potencial; Clase III, agua subterránea que no es una fuente potencial de agua potable o que su uso es limitado por ser salina o porque el grado de contaminación es tal que no permite el aprovechamiento de este recurso. Incluye cuerpos de agua con: 1) concentraciones de sólidos disueltos totales por encima de los 10,000 mg/L o 2) que están contaminados, ya sea por actividades humanas o fenómenos naturales, que no pueden ser tratados por métodos o tecnologías convencionales utilizados en plantas potabilizadoras manejadas por el servicio público de suministro de agua.

El agua superficial, en el caso del río Santa Catarina, fluye al sur-sureste del sitio, aproximadamente a 140 m del límite de la propiedad (Figura 6).

nivelación del terreno utilizando una estación total, generación del plano topográfico escala 1: 1,250 con curvas de nivel cada 50 cm y levantamiento de tres puntos con sistema de posicionamiento global (GPS) y traslación a coordenadas UTM WGS 84).

3.2. Levantamiento topográfico

En un estudio de caracterización los levantamientos topográficos permiten conocer con mayor precisión las dimensiones y accidentes físicos del sitio de estudio, así como la ubicación de los puntos de muestreo del suelo, pozos de monitoreo del agua subterránea, líneas estratigráficas y perfiles geofísicos, entre otros. Además, respaldan la elaboración de las secciones transversales y longitudinales del lugar.

En esta etapa del proyecto se contó con el apoyo del Departamento de Topografía del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL y se realizaron las siguientes actividades: levantamiento de retícula para el muestreo,

3.3. Métodos indirectos de reconocimiento del subsuelo

Mediante la realización de inspecciones no invasivas y no destructivas estos métodos (Tabla 2), permiten obtener información de las características del subsuelo como perfiles estratigráficos, fracturas del terreno, presencia de ductos enterrados, niveles freáticos y aéreas contaminadas.

Entre noviembre y diciembre del 2004, la compañía Geoproyectos S. A. de C. V, aplicó técnicas de resistividad eléctrica y de georradar en tres áreas donde estaban los edificios de la planta Peñoles para detectar estructuras

MÉTODOS INDIRECTOS DE RECONOCIMIENTO DEL SUBSUELO		
MÉTODO	TÉCNICA	DESCRIPCIÓN
Eléctrico	Sondeo Eléctrico Vertical (S.E.V.)	Interpretación geológica, grado de alteración, cubicación de materiales, contenido de agua y salinidad.
	Calicatas eléctricas	Ídem que el anterior, pero para estudiar su variación lateral.
	Dipolo-dipolox	Ídem al anterior, pero para el estudio de su variación a lo largo de una sección.
Sísmico	Sísmica de refracción	Espesor de recubrimientos, susceptibilidad de los materiales a ser excavados, cubicación de áreas de préstamo, calidad de la roca, condiciones de cimentación.
	Sísmica de reflexión	Investigación geológica profunda en obras subterráneas y laderas.
	EM en dominio de frecuencias	Interpretación geológica, grado de alteración, contenido en agua y salinidad.
Electromagnético (EM)	EM en dominio de tiempos	Ídem al anterior pero a grandes profundidades.
	Very Low Frequency (V.L.F.)	Resistividad del terreno en superficie, interpretación geológica y variaciones laterales.
	Georradar	Huecos y elementos enterrados, contactos litológicos, investigación del trasdós de estructuras, etc.
Gravimétrico	Gravimetría	Contactos litológicos con contraste de densidad, terrenos blandos, cavidades, zonas de disolución, zonas de falla.
Magnético	Microgravimetría	Ídem al anterior, pero de mayor detalle.
	Magnetometría	Galerías mineras abandonadas, huecos rellenos de arcilla, conducciones enterradas, fallas, diques, masas mineralizadas.

▲ Tabla 2. Ejemplos de métodos geofísicos de prospección del subsuelo. Fuente: Adaptado de Hürlimann (2009).

enterradas tanques, tuberías y túneles, así como residuos producto de los procesos de fundición.

3.3.1. Método geoelectrico

Se aplicó la Ley de Ohm y para calcular el factor geométrico del arreglo de electrodos y de forma indirecta se determinó en Ohms-m la resistividad eléctrica de los materiales geológicos que conforman el subsuelo.

3.3.2. Georradar o radar de penetración terrestre

La técnica del georradar o radar de penetración terrestre (RPT) o Ground-Penetrating Radar (GPR), término aplicado a los métodos que emplean ondas electromagnéticas de alta frecuencia (10 a 2000 MHz), está basada en la misma teoría del radar convencional excepto que las ondas electromagnéticas son transmitidas dentro de la tierra en vez del aire.

Para utilizarla, el área de estudio se dividió en dos zonas. Por las condiciones del terreno, los perfiles de resistividad eléctrica se realizaron en las zonas 1 y 2 (Figura 7) En total fueron 16 perfiles de resistividad y 20 perfiles GPR. La distancia entre los perfiles varió entre 20 y 50 m, aproximadamente.

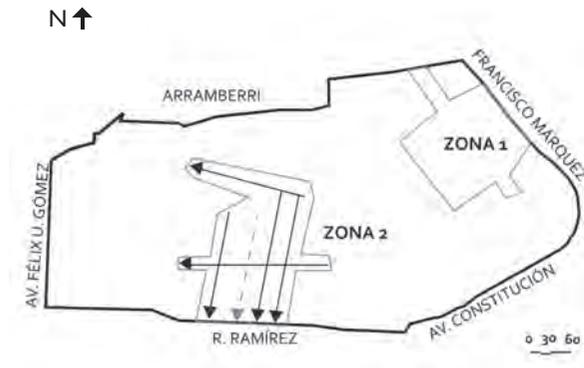


Figura 7. Perfiles de resistividad eléctrica.

Las técnicas de exploración geofísica aplicadas ayudaron a detectar cimentaciones de concreto que contenían varillas, mismas que se observan como fuertes reflexiones y a la vez pequeñas hipérbolas de difracción en los radargramas, posibles tuberías o tanques enterrados que se muestran en el radargrama como grandes hipérbolas de difracción, oquedades y escombros presentes en el subsuelo del área de estudio.

Por medio de estudios geoelectricos se identificaron las áreas con posibles oquedades, y zonas donde están presentes los residuos de escoria, correlacionándolos con valores altos de resistividad eléctrica. Otra de las contribuciones importantes del método de resistividad eléctrica, fue la determinación de la profundidad aproximada del nivel freático.

3.4. Toma de muestras de los medios afectados

La EAS Fase I permitió establecer de manera confiable el tipo de contaminantes presentes en el sitio, por ejemplo metales generados por las actividades de la industria metalúrgica. Ésta sirvió para proponer los métodos más adecuados de muestreo además de la ubicación y profundidad de los puntos de muestreo.

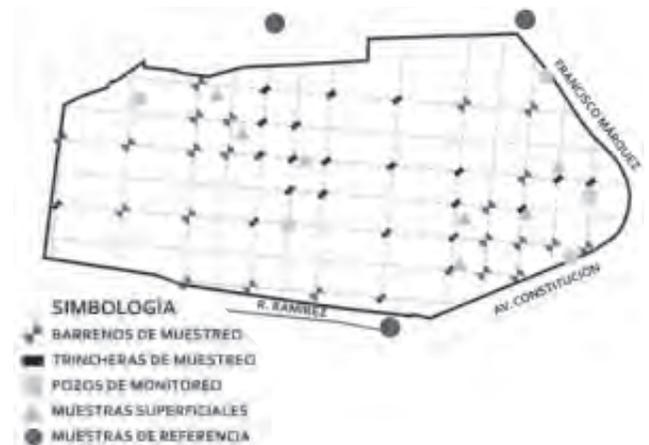


Figura 8. Ubicación de puntos de muestreo de suelo. Residuos y agua subterránea.

3.4.1. Muestreo de suelo/residuos

Antes de iniciar las actividades intrusivas de la investigación, se trazó una retícula con orientación norte-sur con espaciamiento aproximado de 100 m. En las áreas donde se tenía información previa sobre la ubicación de plumas de contaminación, se realizó un muestreo más exhaustivo, reduciéndose la distancia a 50 m.

Para el muestreo del suelo/residuo se perforaron 22 barrenos de muestreo y 22 trincheras de exploración. Además, se obtuvieron siete muestras de suelo superficial y tres de referencia (Figura 8).

Barrenos de muestreo

Fueron realizados por el Departamento de Geotecnia del IIC de la UANL y supervisados por la compañía ERM, los barrenos de muestreo se perforaron con una máquina Mobile Drill B-53, utilizando barrena tricónica y circulación con agua (Figura 9).

Las muestras de suelo y escoria, se obtuvieron en forma de recortes de perforación, mediante un cedazo colocado a la salida en superficie de la tubería de perforación por el espacio anular y por medio de la cuchara partida de la prueba de penetración estándar⁵.

En cada perforación se tomaron muestras de suelo y escoria a diferentes profundidades e intervalos de 1.50 m, específicas para la construcción de la columna litológica (Figura 10). La toma de las muestras de suelo/residuos se hizo hasta la profundidad donde se encontró el material aluvial, entre 6.40 y 12 m de profundidad aproximada.

Trincheras de muestreo

Con la excavación de las trincheras se procuró identificar con exactitud las escorias y calcinas o cenizas de fundición, dispuestas bajo la superficie. En total se excavaron 22 trincheras de exploración (Figura 8) con profundidad máxima de 4.40 m, empleándose una retroexcavadora tipo Case 480 (Figura 9). En estas trincheras se tomaron 41 muestras de suelo/residuos.

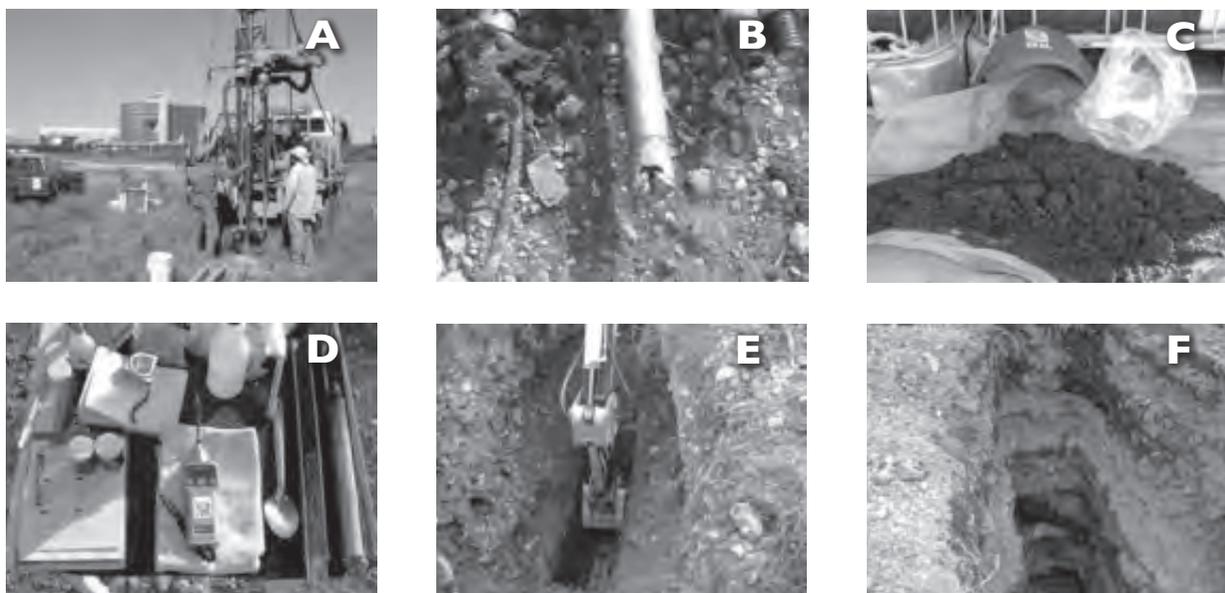


Figura 9. Toma de muestras de suelo y residuos. A) Equipo de perforación con barrena tricónica, B) Barrena tricónica, C) Muestras de escoria obtenida con barrena tricónica, D) Equipo de muestreo de suelo con la cuchara partida de la prueba de penetración estándar, E) Excavación de trinchera con retroexcavadora, F) Trinchera donde se observa la alternancia de capas de escoria y arcilla. (Fotografías: UANL, 2005).

5. Es una prueba dinámica que permite obtener muestras representativas de suelo alterado para determinar en laboratorio sus propiedades índice así como información respecto a la estratigrafía del sitio; la compactibilidad relativa de los suelos granulares y la consistencia de suelos cohesivos (ASTM, 1999).

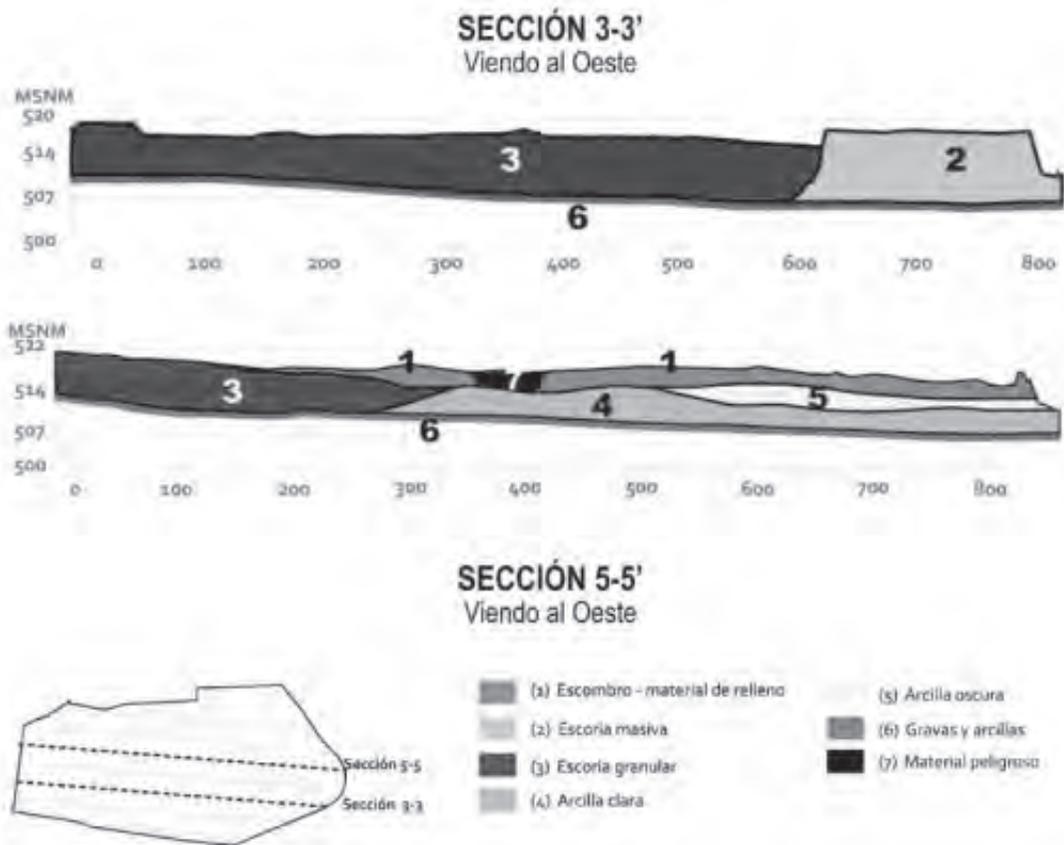


Figura 10. Perfiles estratigráficos.

Muestreo superficial y de referencia

Se obtuvieron siete muestras superficiales de suelo y tres muestras de referencia (Figura 8) para determinar las concentraciones de los Constituyentes de Interés o Preocupación (CI/P) —sustancias que pueden causar un efecto adverso— contaminantes considerados en el estudio de Evaluación de Riesgo Ambiental. Las muestras también sirvieron para determinar la distribución de estas sustancias fuera del predio. Las muestras seleccionadas se colocaron inmediatamente en envases para muestras, proporcionados por el laboratorio analítico. Las profundidades de las muestras seleccionadas variaron de acuerdo a las observaciones de campo, como color, olor y textura.

En el muestreo del suelo/residuo se usaron guantes de nitrilo para la integridad de las muestras y para proteger la piel. Las muestras tomadas fueron etiquetadas, almacenadas

en contenedores cubiertas con hielo y mantenidas a una temperatura aproximada de 4°C durante su transportación a través de un servicio de mensajería nocturno, hacia el laboratorio analítico. En la toma y manejo de las muestras se siguió el protocolo de la cadena de custodia⁶.

Para reducir el riesgo potencial de contaminación cruzada, todo el equipo reutilizable se descontaminó sistemáticamente después de cada uso. Para esta acción se usó detergente neutro libre de fosfatos y agua purificada, el enjuague se hizo con agua corriente y un enjuague final con agua destilada.

Muestreo y análisis utilizando fluorescencia de rayos X

Las técnicas no destructivas de análisis son cada vez más importantes en el área ambiental. Dos de las más usadas en la determinación de metales en muestras son la

6. Para mayor información, consultar la NMX-AA-132-SCFI-2006, Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra, y la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación.



Figura 11. Lecturas con un instrumento de FRX, marca Niton Modelo XLt 800 series, A) Lecturas en la superficie del terreno, B) Toma de lecturas en escoria granular, C) Lecturas en muestras de recortes de perforación. (Fotografías: UANL, 2005).

difracción de rayos X (DRX o XRD por sus siglas en inglés) y la fluorescencia de rayos X (FRX o XRF por sus siglas en inglés). Esto se debe en gran medida a la velocidad con que se hacen estos análisis, su precisión, reproducibilidad y flexibilidad, ya que pueden aplicarse a una variedad de matrices y la simplicidad en la preparación de la muestra (Shibata et al., 2009; Pyle et al., 1996). La DRX proporciona una visión de la estructura de los materiales sólidos y polvos, produciendo una huella digital inconfundible para diferentes tipos de muestras. La FRX identifica y determina la concentración de algunos elementos químicos específicos en todo tipo de materiales, sólidos, líquidos y polvos, incluso a niveles por debajo de las partes por millón (ppm). Se aplicó esta técnica debido a la facilidad de la preparación de las muestras en campo.

Con un instrumento de FRX, marca Niton Modelo XLt 800 series, se realizó una prospección superficial y se obtuvieron lecturas de concentraciones de metales pesados (Figura 11). Adicionalmente se analizaron las muestras obtenidas en la perforación de barrenos de muestreo. En este caso, a diferencia de las muestras enviadas a los laboratorios certificados para el análisis de metales totales por los métodos convencionales⁷, se obtuvieron lecturas de FRX en muestras obtenidas cada 1.50 m a lo largo del perfil de perforación. De las muestras enviadas a laboratorio sólo se analizaron una o dos, de todo el perfil.

Las concentraciones de metales totales obtenidas con FRX mostraron una correlación de 0.81 en el caso del plomo respecto a las muestras analizadas con métodos

convencionales, pero en otros casos, como el cadmio, la correlación fue inadecuada (Figura 12).

3.4.2. Muestreo de agua subterránea

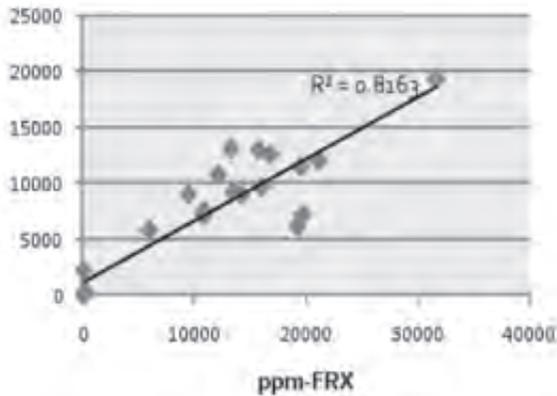
Se tomaron seis muestras de agua, una por pozo de monitoreo como se señala en la Figura 8 y además una muestra duplicado.

La compañía de perforaciones Estudios Especializados de Mecánica de Suelos S.A. de C.V. (EEMSSA) realizó las perforaciones e instalaciones de los pozos de monitoreo en cinco localizaciones. Dos de los cinco pozos de monitoreo fueron construidos con tubería de PVC cédula 40 de 4 pulgadas de diámetro; el resto fueron construidos con tubos de dos pulgadas de diámetro. La tubería estaba ranurada a partir de 1m por arriba del nivel freático detectado, tenía un filtro de arena sílica rematado con tapón de cemento/bentonita, sello de cemento y una cubierta metálica en la parte superficial.

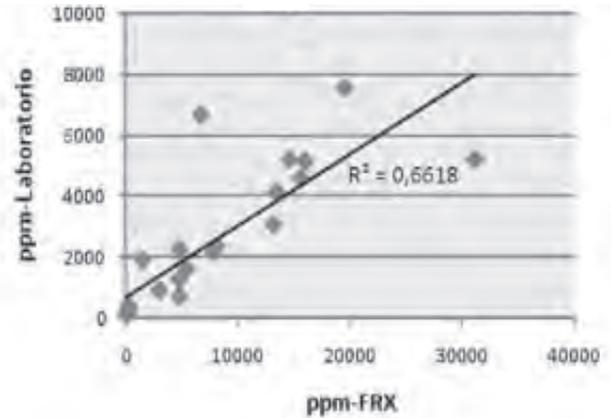
Antes de tomar las muestras del agua subterránea, representativas del acuífero, cada pozo de monitoreo fue purgado con el propósito de reducir su turbiedad. Las muestras del agua subterránea se colocaron en envases de plástico, preservadas con ácidos proporcionados por el laboratorio analítico. Se almacenaron en hieleras a 4°C hasta su entrega al laboratorio. Además, se identificaron las elevaciones de los pozos para determinar la

7. Para mayor detalle sobre métodos convencionales de análisis de metales en suelos, ver NMX-AA-132-SCFI-2006.

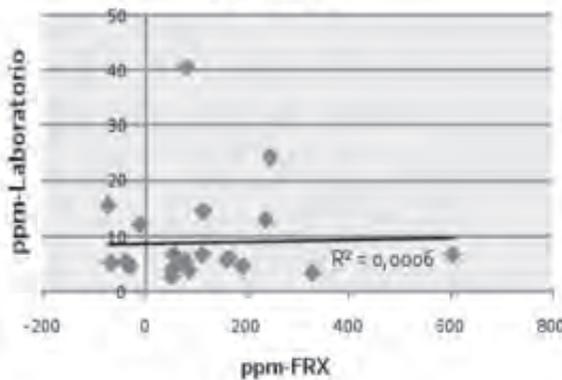
Plomo



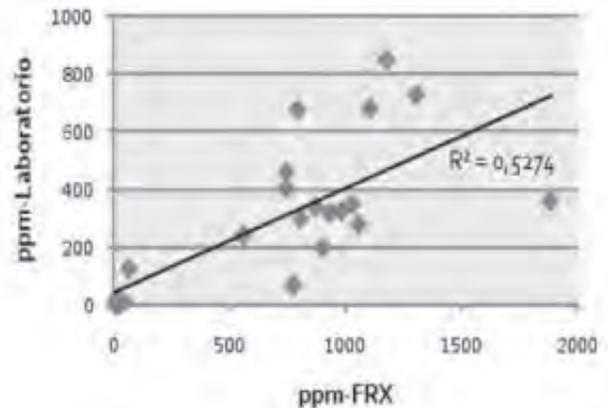
Manganeso



Cadmio



Arsénico



▲

Figura 12. Correlación de las concentraciones de algunos metales obtenidas con FRX mediante análisis convencional en laboratorio de muestras de escorias y otros materiales obtenidos de los barrenos de perforación.

dirección de flujo asociada, con dirección s ureste. El agua subterránea somera se localizó entre los 11.70 y los 14.15 m de profundidad.

Las muestras del suelo/residuo y agua subterránea fueron enviadas a un laboratorio acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA)⁸ y se analizaron con los métodos indicados en la Tabla 3 que resume los resultados obtenidos.

⁸ El laboratorio que realizó los análisis fue Intertek México.

3.5. Análisis de resultados del laboratorio y selección de constituyentes de interés o preocupación

Un total de 94 muestras de suelo y escoria recolectadas de 54 diferentes localizaciones fueron analizadas para

metales totales; asimismo, a estas muestras se les determinó cianuro total, sulfuro total y pH. A continuación se presenta un resumen de estas concentraciones así como los criterios de comparación mexicanos existentes en la época en que se realizó este estudio o, en su defecto, los establecidos por el Programa de Reducción de Riesgos de Texas (PRRT o TRRP por sus siglas en inglés); (TCEQ, 2004).

3.5.1. Suelo/residuos

Este estudio se realizó entre los años 2004-2005 cuando aún no estaba vigente la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece las concentraciones de remediación de suelos para 12 metales y metaloides, la cual fue publicada el 2 de marzo del 2007 (DOF, 2007). Por lo que se usaron los criterios interinos de restauración de suelos contaminados (CIRSC) publicados por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) en el año 2000 (Tabla 4). Si bien no tenían validez oficial debido

MATRIZ	MÉTODO ANALÍTICO
Suelo/residuos	
Metales totales	EPA Serie 7000
Metales lixiviables	EPA Serie 7000
Cianuros	EPA Serie 7000
Sulfuros	EPA Serie 7000
pH	EPA Serie 7000
Método de lixiviación	EPA 1310 y NOM-053-ECOL-1993
Agua subterránea	
Metales totales	NMX-AA-051
Metales disueltos	NMX-AA-051
Cianuros	NMX-AA-058
Sulfuros	NMX-AA-084
pH	NMX-AA-008

▲ *Tabla 3. Métodos analíticos para el análisis de muestras de suelo y agua subterránea.*

PARÁMETRO	CRITERIOS DE COMPARACIÓN (USO DE SUELO RESIDENCIAL, mg/kg)	RESULTADOS DEL MUESTREO		
		PROMEDIO (mg/kg)	MÁXIMO (mg/kg)	MÍNIMO (mg/kg)
Antimonio	*15	58.87	2157.10	0.03
Arsénico	20	1465	85651	1.16
Bario	750	1228	5190	11.25
Cadmio	20	16.78	245.53	1.37
Cromo hexavalente	**375	N.D.	N.D.	N.D.
Estaño	*35292	127.71	1290	17.63
Manganeso	*3410	1383	7528	28.74
Níquel	150	31.02	150.00	16.01
Mercurio	20	10.79	375.51	0.04
Plata	*95	24.55	153.53	1.49
Plomo	200	9134	73028	24.18
Selenio	20	17.97	251.53	0.04
Zinc	800	16897	111208	0.00
Cianuro	*2000	0.61	1.67	0.13
Sulfuro	NA	315.46	1995	21.90
pH	NA	8.65	12.86	7.01

▲ *Tabla 4. Resultados analíticos para metales totales de las muestras de suelo y sedimentos y su comparación con criterios de remediación. N.D. = No detectado.*

* NCP-nivel 1 del PRRT (TCEQ, 2004), los demás valores corresponden a los CIRSC (PROFEPA, 2000).

** Se consideró el valor de cromo total de los CIRSC (PROFEPA, 2000).

a que este organismo no tiene atribuciones para elaborar normas o leyes en México, sirvieron muy bien de guía para la evaluación de sitios contaminados.

Los niveles de concentración de protección (NCP) o protective concentration levels (PCL) nivel I (Tier 1) del PRRT, son estándares genéricos de evaluación o limpieza de suelos establecidos por el Estado de Texas en los Estados Unidos de América. El PRRT está vigente desde el 23 de septiembre de 1999 y los NCP-nivel I asociados a este programa se revisan y actualizan cada año. Los NCP están desarrollados para escenarios de exposición industrial y residencial, y se basan en escenarios de exposición incluyendo contacto con la piel, ingestión e inhalación. Por lo anterior, se decidió usar tales valores de comparación ya que en México no se tenían criterios correspondientes. El PRRT también considera NCP específicos del sitio. Se pueden calcular al usar ecuaciones apropiadas para la estimación de la magnitud de la exposición y los riesgos asociados, estos son los llamados NCP-nivel 2 (Tier 2).

Las concentraciones de metales lixiviables se fijaron además a las 94 muestras de suelo y escoria. En la Tabla 5 se presenta un resumen de estas concentraciones y los niveles de comparación de la normatividad mexicana o en su defecto, de la U.S.EPA y el PRRT (2004) para agua subterránea de acuíferos Clase III. Al igual que en el caso de los metales totales, en la época en que se realizó este estudio no se había publicado aún la norma que estableciera concentraciones de metales solubles en suelos. Por esta razón, se decidió trabajar con las concentraciones señaladas por la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1996) que indica los límites máximos permisibles de calidad para el agua potable, pero afectados por un factor de 100. Para aquellos metales que no están considerados dentro de esta NOM, se tomaron los niveles máximos de contaminantes (NMC o MCL por sus siglas en inglés) de los estándares primarios y secundarios⁹ para el agua potable establecidos por la U.S.EPA, afectados también por un factor de 100 (U.S.EPA, 2009), o bien los NCP para acuíferos Clase III del PRRT (TCEQ, 2004).

PARÁMETRO	CRITERIOS DE COMPARACIÓN (USO DE SUELO RESIDENCIAL, mg/l)	RESULTADOS DEL MUESTREO		
		PROMEDIO (mg/l)	MÁXIMO (mg/l)	MÍNIMO (mg/l)
Antimonio	*0.6	0.06	1.36	0.00050
Arsénico	5	5.77	498.40	0.00100
Bario	70	3.35	26.40	0.17000
Cadmio	0.5	0.13	1.48	0.01000
Cromo hexavalente	5	N.D.	N.D.	N.D.
Estaño	NA	0.41	0.48	0.33000
Manganeso	15	2.56	14.70	0.03600
Níquel	NA	0.15	0.60	0.02000
Mercurio	0.1	0.0036	0.03	0.00040
Plata	*10	0.03	0.10	0.01000
Plomo	2.5	18.53	122.20	0.16000
Selenio	*5	0.02	0.60	0.00040
Zinc	500	53.30	477.75	0.01200

▲ **Tabla 5.** Resultados analíticos para metales lixiviables de las muestras de suelo y sedimentos.

N.D. = No detectado.

* NMC de U.S.EPA x 100 (U.S.EPA, 2009), el resto de los valores provienen de la NOM-127-SSA1-1994 multiplicados también por un factor de 100.

Nota: Los valores de antimonio y selenio también corresponden con los NCP-nivel I del PRRT para el agua subterránea de acuíferos Clase III (TCEQ, 2004).

9. Los estándares secundarios son guías no obligatorias que norman a los contaminantes que pueden tener efectos estéticos (como decoloración de los dientes) o cosméticos (color y olor). Los estándares primarios son obligatorios, ya que con ellos se protege a la población de efectos adversos, como cáncer u otros efectos sistémicos.

El evaluar los metales lixiviables es importante por el hecho de que los constituyentes lixiviables de los materiales migran al agua subterránea y pueden representar un riesgo. Los criterios desarrollados para el agua subterránea se multiplicaron por 100 para representar la mezcla de los constituyentes con el agua subterránea que lo transporta. Multiplicar los criterios por el factor 100 es una práctica aceptada para la comparación de datos de constituyentes lixiviables de suelos.

Los resultados de metales totales apuntaron la presencia de constituyentes con concentraciones por encima de los criterios de comparación de suelo, dentro de los que se encuentran: antimonio, arsénico, bario, cadmio, manganeso, mercurio, plata, plomo, selenio y zinc. Cada uno de estos constituyentes fue retenido como CI/P para la evaluación de riesgo ambiental.

En el caso de metales lixiviables, los únicos constituyentes reportados por encima de los criterios comparativos fueron antimonio, arsénico, cadmio y plomo. Se retuvieron como CI/P para análisis adicional en el nivel 2 de la evaluación cuantitativa del riesgo.

Muestreo superficial y de referencia

Como se mencionó, se obtuvieron tres muestras de suelo de referencia (*Figura 8*): una al Norte, en el parque situado en la Unidad Habitacional Reforma, otra al Sur, en una pequeña glorieta situada en intersección de la Av. Constitución y Calle R. Ramírez y la última al Noroeste, en el camellón sobre la calle Antonio Coello. De acuerdo con los resultados analíticos, solamente en una de las muestras se detectaron concentraciones por arriba de los criterios de comparación utilizados en esta evaluación, para plomo (912.22 mg/kg) y arsénico (36.68 mg/kg).

3.5.2. Agua subterránea

En la Tabla 6 se presenta un resumen de los resultados analíticos del laboratorio para metales totales así como la comparación con los límites establecidos por la norma NOM-127-SSAI-1994 para el agua potable, y los establecidos por el PRRT (TCEQ, 2004). En ninguna

PARÁMETRO	CRITERIOS MEXICANOS DE COMPARACIÓN (USO DE SUELO RESIDENCIAL, mg/l)	NCP-NIVEL I (PRRT, USO DE SUELO INDUSTRIAL, mg/l)	RESULTADOS MUESTREO		
			PROMEDIO (mg/l)	MÁXIMO (mg/l)	MÍNIMO (mg/l)
Antimonio	*1.5	0.006	0.007	0.016	0.0028
Arsénico	0.025	0.001	0.152	0.531	0.0010
Bario	0.7	2	1.298	2.780	0.1100
Cadmio	0.005	0.005	0.038	0.070	0.0050
Cromo hexavalente	*0.1	0.1	0.027	0.100	0.0008
Estaño	*44	44	44.00	44.00	44.00
Manganeso	0.15	10	6.868	20.05	0.3600
Mercurio	0.001	0.002	0.002	0.002	0.0020
Níquel	*1.5	1.5	0.381	1.50	0.0600
Plata	*0.365	0.365	0.365	0.365	0.3650
Plomo	0.01	0.015	0.495	1.040	0.0150
Selenio	0.05*	0.05	0.099	0.385	0.0049
Zinc	5	22	4.217	22.00	0.4670

▲ **Tabla 6.** Resultados analíticos para metales totales en agua subterránea.
 N.D. = No detectado.
 *NCP-nivel I del PRRT (TCEQ, 2004).

PARÁMETRO	RESULTADOS MUESTREO		
	PROMEDIO (mg/l)	MÁXIMO (mg/l)	MÍNIMO (mg/l)
Antimonio	0.004	0.006	0.001
Arsénico	0.010	0.017	0.002
Bario	0.100	0.100	0.100
Cadmio	0.007	0.010	0.001
Cromo hexavalente	N.D.	N.D.	N.D.
Estaño	N.D.	N.D.	N.D.
Níquel	0.055	0.080	0.030
Manganeso	0.305	0.720	0.060
Mercurio	N.D.	N.D.	N.D.
Plata	N.D.	N.D.	N.D.
Plomo	0.118	0.140	0.100
Selenio	0.051	0.190	0.003
Zinc	0.067	0.155	0.010

▲ **Tabla 7.** Resultados analíticos para metales disueltos en agua subterránea.
N.D. = No detectado.
Nota: No existen criterios de comparación en la normatividad mexicana o en la U.S.EPA.

muestra analizada para metales totales se detectó cromo hexavalente, mercurio, plata o estaño. El resto de los metales rebasaron los criterios de comparación empleados en al menos uno de los pozos de monitoreo instalados.

Los resultados obtenidos para metales disueltos se muestran en la Tabla 7.

3.6. Estimación de los volúmenes de residuos

Con la información obtenida de los barrenos de muestreo y las trincheras de exploración, así como de las secciones longitudinales y transversales generadas por los métodos geofísicos, se identificaron los residuos y se estimó su volumen aproximado. Los materiales reconocidos fueron escoria masiva, escoria granular, arcilla clara, arcilla oscura, calcinas y material de relleno o escombros, pero sólo se estimaron los volúmenes de los residuos más importantes debido a su peligrosidad (Figura 13). El área total afectada por los residuos fue de 15.96 ha de escoria granular y 1.68 ha de escoria masiva.



Este residuo se presenta en fragmentos angulares a sub-angulares de tamaño variable, de color negro a gris oscuro, con minerales de hierro en las fracturas (color rojizo). Se encontró distribuido en la parte Centro-Oeste y Suroeste. Cubría aproximadamente el 75% del predio. Los espesores detectados con la perforación variaban entre los 1.5 a 11.5 m. El volumen estimado fue de 1'400,000 m³.

Este residuo se encuentra en forma masiva formando bloques en capas horizontales. Tiene texturas de enfriamiento similar a las coladas basálticas. Se localizó en la parte sureste del predio cubriendo un área de aproximada del 5% del mismo. El espesor detectado con la perforación tiene un promedio de 1.2 m. El volumen estimado para este residuo fue de 200,000 m³.

Además existe residuo producto del tostado para la obtención del plomo. El volumen estimado de este residuo fue de 5,240 m³.

▲ **Figura 13.** Volúmenes estimados de los principales residuos encontrados en el sitio de estudio (Fotografía: UANL, 2005).

4. Evaluación de riesgo ambiental (ERA)

Como parte de la EAS Fase II, se realizó una Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA) de acuerdo con las guías de la U.S.EPA (U.S.EPA, 1989, 1991) y el PRRT (TCEQ, 1999)¹⁰, teniendo en cuenta tres niveles de evaluación:

ERA nivel 1: Comparó los contaminantes encontrados en el área de estudio con estándares numéricos que existen en la normatividad y que implican la protección de la población potencial expuesta o estándares no normados pero que están basados en el riesgo. Estos estándares son concentraciones de las sustancias químicas en el suelo y el agua subterránea que no tenían el potencial de presentar efectos adversos para los receptores. En este nivel se evaluaron las rutas de exposición para determinar cuáles de ellas podían descartarse por ser rutas incompletas.

ERA nivel 2: Los constituyentes para los cuales se determinaron rutas de exposición completas en el nivel 1 se evaluaron considerando condiciones específicas del sitio —parámetros geohidrológicos que pueden determinar la migración de los contaminantes en el sitio y factores de exposición— bajo diferentes posibles escenarios para el uso del suelo. Las ERA nivel 2 derivan en NCP calculados para el sitio utilizando factores de exposición específicos del lugar usando las ecuaciones del riesgo que se emplean para calcular valores de comparación del nivel 1 (TCEQ, 1999); este proceso generalmente corresponde al procedimiento tradicional indicado por la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América a través del Consejo de Investigación Nacional (NRC por sus siglas en inglés). Esta evaluación incluyó tres pasos (NRC; 1994): a) *identificación del peligro*, b) *evaluación de la exposición y evaluación dosis-respuesta*, y c) *caracterización del riesgo a la exposición*.

ERA nivel 3: Basado en factores de atenuación natural medidos en el sitio y/o en modelos/ecuaciones de atenuación derivados de los niveles 1 y 2, pueden obtenerse factores de exposición específicos del sitio (TCEQ, 1999). En este caso se consideraron ecuaciones de atenuación para modelar la migración del agua subterránea al río Santa Catarina localizado a 140 m al sureste del sitio.

4.1. ERA-nivel 1

Las concentraciones encontradas en las muestras de suelo se compararon con los CIRS (PROFEPA, 2000) o en su defecto los NCP-nivel 1 del PRRT (TCEQ, 2004). En el caso del agua subterránea se compararon con los valores de la norma oficial mexicana para el agua potable NOM-127-SSA1-1994 o el estándar estadounidense de la U.S.EPA (U.S.EPA, 2009; TCEQ, 2004) de no existir valores de la norma mexicana.

4.2. ERA-nivel 2

Durante la etapa de la evaluación, se aplicaron ajustes a las ecuaciones genéricas del riesgo usadas en el PRRT (TCEQ, 1999) para generar los NCP-nivel 1. No obstante, se utilizaron factores específicos de exposición para generar las concentraciones aceptables en el punto de exposición (CAPE). Estos ajustes implican el cambio de ciertas variables para representar mejor el escenario de exposición del sitio. Para realizarla, se siguieron los tres pasos antes mencionados. Para ser evaluados se seleccionaron antimonio, arsénico, bario, cadmio, manganeso, mercurio, plata, plomo, selenio y zinc, como CI/P en el nivel 2 por rebasar los criterios de protección en la ERA nivel 1.

a) Identificación del peligro: se ratificaron los CI/P del nivel 1: antimonio, arsénico, bario, cadmio, manganeso, mercurio, plata, plomo, selenio y zinc.

b) Evaluación de la exposición y evaluación dosis-respuesta: se realizaron las siguientes actividades para estimar la magnitud, frecuencia, duración de la exposición, y delimitar las rutas de exposición completas:

¹⁰ Cuando se realizó este estudio no existía aún la *Guía Técnica para Orientar en la Elaboración de Estudios de Evaluación de Riesgo Ambiental de Sitios Contaminados* que publicó la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en septiembre del año 2006 (SEMARNAT, 2006).

Caracterización del sitio de la exposición: Describe el uso actual del terreno del sitio, las áreas adyacentes, y las condiciones existentes, que pueden controlar o minimizar la exposición. También se define el uso potencial futuro del terreno, los recursos actuales de agua potable, y la proximidad a cuerpos de agua superficial.

Debido a la cercanía del sitio con el Parque Fundidora y sus terrenos adyacentes cuyos usos de suelo son comercial/industrial, se pretendía (aunque no se tenía la certeza al inicio de la EAS Fase II del proyecto) que el uso futuro del terreno fuera principalmente recreativo (parques), o bien que predominara el uso de suelo comercial/industrial en caso de que no se pudiera construir el parque. Por lo anterior, los receptores más adecuados para la evaluación fueron los invasores/visitantes (población que podía visitar el sitio si se consideraba la construcción de un parque o centro comercial) y los trabajadores de la construcción que pudieran participar en actividades de rehabilitación del sitio.

Basado en la información disponible, se concluyó que el agua subterránea no se podía usar como fuente de agua potable en el futuro. Con una prueba de flujo basado en el desplazamiento volumétrico o "slug test", se ratificó

que el agua subterránea inmediatamente por debajo del sitio es de Clase III, por lo que la ruta de exposición de ingestión del agua subterránea era incompleta.

El cuerpo de agua superficial más cercano que podía afectarse por la migración de los contaminantes en el agua subterránea, es el río Santa Catarina que fluye aproximadamente a 140 m del límite de la propiedad en dirección sureste. Este recurso fue evaluado en el nivel 3, considerando los contaminantes que podían ser transportados por lixiviación del suelo al agua subterránea.

Descripción del modelo conceptual y escenarios de exposición:

El modelo conceptual describe los patrones de actividad para determinar vías y rutas de exposición de los receptores potenciales. Considera el contacto directo del receptor con los medios afectados, como el suelo, en la fuente de contaminación y también las vías de transferencia entre varios medios, como suelo y agua subterránea. Dado que se esperaba que el predio se usara con fines recreativos o comerciales, se anticipó la posibilidad del contacto directo de los receptores con el suelo a través de la ingestión, inhalación y contacto dérmico de partículas sobre la fuente de exposición (Figura 14).



Figura 14. Modelo conceptual del sitio.

La migración lateral de las partículas a las áreas adyacentes también se consideró como una ruta de exposición probable, sobre todo durante las actividades de la construcción por los polvos fugitivos. Debido a la naturaleza industrial del lugar y a la ausencia de un hábitat sensitivo en el sitio, no se consideró la exposición de receptores ecológicos por esta vía.

La ingestión directa del agua subterránea no se consideró como una vía de exposición viable. Los CI/P que rebasaron los valores de comparación para este medio se valoraron bajo un escenario de acuífero clasificación III, que es agua con posibilidad de contacto con receptores sensitivos pero que no se puede usar como recurso de agua potable. Hubo constituyentes que rebasaron los criterios del nivel 1 para metales lixiviables y que se evaluaron en el nivel 3, como riesgo potencial por transporte en el agua subterránea y afectación al río Santa Catarina.

Determinación de las Concentraciones Aceptables en el Punto de Exposición, CAPE: Es la magnitud a la cual se estima que el receptor está expuesto durante el tiempo de contacto con el medio impactado. Se determinaron las CAPE para los contaminantes del sitio que fueron retenidos para una evaluación adicional (CI/P). Éstas se usaron como criterios de comparación para evaluar las concentraciones obtenidas en los medios analizados del sitio.

Estimación de la dosis de exposición: Con la información presentada en el análisis de las rutas de exposición, se puede estimar la entrada o dosis de cada constituyente o sustancia química para cada receptor potencial, o bien, su concentración en el aire cuando se trata de la vía de inhalación de aire afectado por la presencia de contaminantes debido a la transferencia suelo-aire. Los cálculos de las dosis de exposición de las sustancias químicas combinan información específica del sitio; considerando la concentración de la sustancia en la fuente de exposición o medios afectados, el destino y transporte de esas sustancias, la duración y extensión de la exposición, y las características de la población de los receptores expuestos.

Las condiciones de exposición consideradas para los receptores potenciales del sitio, fueron los valores estándar de las guías de riesgos de la U.S.EPA (U.S.EPA, 1989; U.S.EPA 1991; U.S.EPA 1997; U.S.EPA, 2001) y los TRRP (TCEQ, 1999).

Para estimar la dosis o entrada de los CI/P presentes en el suelo por vía de exposición, se usaron las siguientes ecuaciones:

Ingestión de CI/P presentes en el suelo

$$\text{Dosis}_{\text{ingestion}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{day}} \right) = \frac{(C_s)(IR_s) \left(10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mg}} \right) (EF)(ED)}{(BW)(AT)}$$

Contacto dérmico (CD) de los CI/P presentes en el suelo

$$\text{Dosis}_{\text{CD}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{day}} \right) = \frac{(C_s) \left(10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mg}} \right) (SA)(AF)(ABS)(EF)(ED)}{(BW)(AT)}$$

Inhalación de los CI/P en las partículas de suelo

$$\text{Concentración promedio diaria en aire} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{(C_s) \left(\frac{1}{PEF} \right) (EF)(ED)}{(AT)}$$

Inhalación de CI/P volatilizados

$$\text{Concentración promedio diaria en aire} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{(C_s) \left(\frac{1}{VF} \right) (EF)(ED)}{(AT)}$$

Dilución y atenuación de constituyentes en agua subterránea

$$CA = \{C_o/8\} * \{\text{erfc}[(x-vt)/2(a_x vt)^{1/2}]\} * \{\text{erfc}[(y+Y/2)/2(a_x)^{1/2}] - \text{erfc}[(y-Y/2)/2(a_x)^{1/2}]\} * \{\text{erfc}[(z+Z)/2(a_x)^{1/2}] - \text{erfc}[(z-Z)/2(a_x)^{1/2}]\}$$

En la Tabla 8 se describen las variables mencionadas en las ecuaciones anteriores.

- c) Caracterización del riesgo a la exposición: se realizaron los cálculos del riesgo para estimar los criterios de comparación CAPE para una ERA-Nivel 2 conforme lo que establece el TRRP (TCEQ, 1999). Se usaron los valores de toxicidad establecidos por la U.S.EPA en la base de datos del Sistema de Información de

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
CA	Concentraciones de constituyentes en el agua (mg/l)
C0	Concentraciones del fuente de constituyentes en agua (mg/l)
X	Distancia lateral a receptor potencial (m)
Y	Lo grueso de la zona de fuente (m)
Z	Lo ancho de la zona de fuente (m)
V	Velocidad del agua subterránea (m/día)
T	Tiempo de transporte de fuente al recurso (día)
ax	Dispersión lateral (constante) (m)
ay	Dispersión transversal (constante) (m)
az	Dispersión vertical (constante) (m)
CS	Concentraciones de constituyentes en el suelo (mg/kg)
IRs	Tasa de ingestión de suelo (mg/día)
EF	Frecuencia de exposición (días/año)
ED	Duración de exposición (años)
BW	Peso del cuerpo (kg)
SA	Área de superficie de piel disponible para contacto (cm ²)
ABS	Factor de absorción dérmica (adimensional)
erf	Función de error (función matemática-representa la naturaleza)
erfc	Función de error complementaria (función matemática-representa la naturaleza)
PEF	Factor de emisiones de partículas (m ³ /kg)
VF	Factor de volatilización (m ³ /kg)
ATn	Tiempo de promedio - 365 días/año * ED para no carcinógenos
ATc	Tiempo de promedio - 365 días/año *70 para carcinógenos

▲ **Tabla 8.** Descripción de las variables usadas en las ecuaciones para la estimación de las dosis o concentraciones de exposición.

11. IRIS es una base de datos que reúne la información existente sobre el riesgo de diferentes sustancias en la salud humana (<http://www.epa.gov/iris/>).

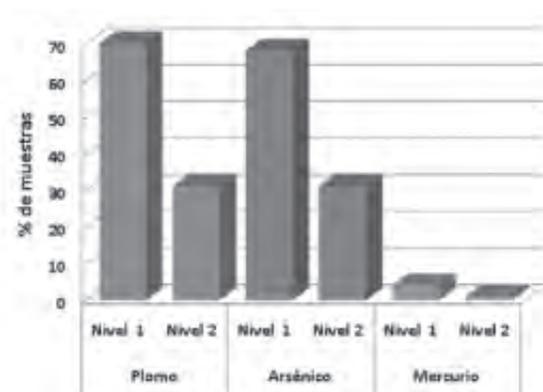
Riesgo Integrado o Integrated Risk Information System (IRIS, por sus siglas en inglés).¹¹

Para representar los escenarios propuestos el único criterio que se cambió fue el tiempo de exposición. Los valores originales usados para calcular los criterios de comparación nivel 1 suponen que un trabajador industrial tiene contacto directo con el material contaminado a lo largo de 25 años. En este estudio para el escenario de trabajador de la construcción antes descrito, se estimó que éste era el receptor que tendría mayor contacto con el material contaminado durante la etapa de la rehabilitación/construcción de las obras. Se previó que la duración de esta obra no excedería los 12 meses, así, el valor original de 25 años se redujo a un año. Los criterios del nivel 2 se basaron en este único cambio.

En la Tabla 9 se muestran las CAPE para metales totales obtenidas con base en las ecuaciones de riesgo, con las cuales se compararon las concentraciones medidas en las muestras de suelo.

Al verificar estas concentraciones con los criterios del nivel 1 se obtuvieron valores muy superiores, lo que redujo sensiblemente el porcentaje de muestras que excedieron los valores de comparación considerados como seguros. En este caso el plomo, el arsénico y el mercurio rebasaron los criterios de comparación nivel 2 (Figura 15).

Se generaron planos de excedencias de los compuestos. En la Figura 16 se muestra el caso del plomo total.



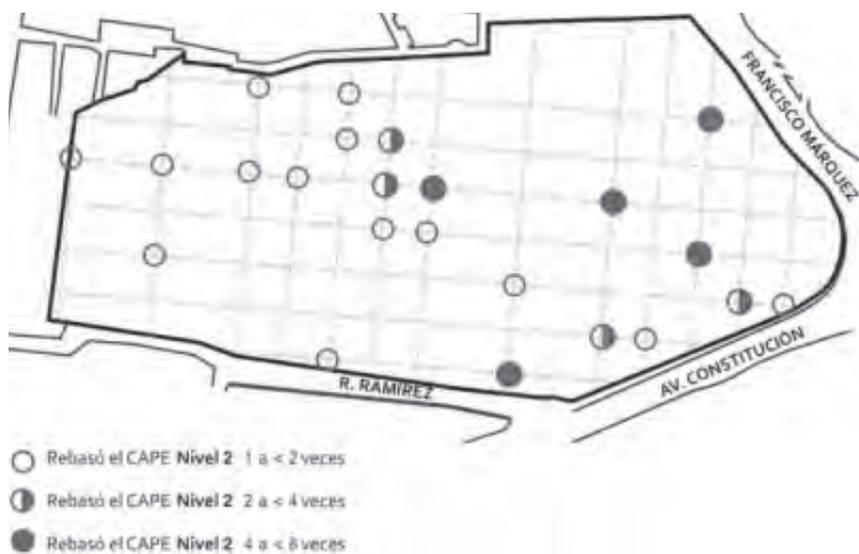
▲ **Figura 15.** Porcentaje de muestras de suelo que rebasaron los criterios de comparación para metales totales en las ERA niveles 1 y 2.

CI/P	CAPE NIVEL 2* (USO DE SUELO INDUSTRIAL, mg/kg)	RESULTADOS DEL MUESTREO		
		PROMEDIO (mg/kg)	MÁXIMO (mg/kg)	MÍNIMO (mg/kg)
Antimonio	3114	58.87	2157	0.03
Arsénico**	414.70	1465	85651	1.16
Bario	37000	1228	5190	11.25
Cadmio	59616	16.78	245.53	1.37
Manganeso	24000	1383	7528	28.74
Mercurio**	45.60	10.79	375.51	0.04
Plata	75173	24.55	153.53	1.49
Plomo**	9347	9134	73028	24.18
Selenio	340666	17.97	251.53	0.04
Zinc	250000	16897	111208	0.00

▲ **Tabla 9.** Concentraciones aceptables en el punto de exposición para metales totales obtenidas con base en riesgo (nivel2).
 * CAPE =Concentración aceptable en el punto de exposición (mg/kg), estas concentraciones son los criterios de comparación de nivel 2 calculados con las ecuaciones de riesgo ajustadas a las condiciones específicas del sitio.
 ** CI/P que rebasaron las CAPE Nivel 2.

A partir de estos resultados se concluyó que la construcción en las áreas donde se excedieron los CAPE nivel 2, podrían surgir riesgos inaceptables para los trabajadores. Por lo que la planificación de la construcción en estas áreas requeriría la remediación de los suelos a las concentraciones de los CI/P por debajo de los criterios del nivel 2, o alguna medida de contención que funcionara como barrera para impedir el contacto del suelo con los receptores potenciales, lo que provocaría que la vía de exposición fuera incompleta y, por lo tanto, el riesgo fuera inexistente.

Para evaluar la posible afectación a los receptores sensibles del río Santa Catarina causado por la migración de los contaminantes del agua subterránea, se realizó una evaluación de riesgo de nivel 3. En esta valoración se modeló la dilución y atenuación de los contaminantes mediante la ecuación "dilución y atenuación de constituyentes en agua subterránea". Se estimaron considerando una distancia de transporte de 140 m de la frontera más cercana de la propiedad al río Santa Catarina, asumiendo conservadoramente que no había dispersión transversal ni vertical. Los resultados mostraron que no existía riesgo por esta ruta de exposición.



▲ **Figura 16.** Plano de excedencias de plomo total respecto a las CAPE nivel 2.

5. Selección de las tecnologías de remediación

Con la finalidad de elegir la tecnología de la remediación más apropiada a las condiciones del sitio se realizó un estudio de factibilidad, incluyendo a la litología del sitio, los CI/P evaluados en la ERA y su distribución espacial, así como una evaluación costo-beneficio.

Para el agua subterránea no se aplicó alguna tecnología de remediación, pues se concluyó que no había exposición potencial en el área de estudio ya que la vía de exposición era incompleta en razón de la clasificación del acuífero somero, Clase III.

Para los suelos y residuos se evaluaron tres tecnologías de remediación y los criterios de evaluación fueron: Costos y tiempos asociados con las acciones de remediación,

Consideraciones específicas del sitio, Consideraciones normativas aplicables, Disponibilidad de cada tecnología en México, Responsabilidades potenciales para el cliente posteriores a las acciones de remediación.

Las tecnologías de remediación seleccionadas fueron: a) excavación-disposición, b) cubiertas multicapa y c) estabilización *in situ*. Los parámetros evaluados son los propuestos en la matriz de selección y guía de referencia de tecnologías de remediación elaborada por el Federal Remediation Technology Roundtable (FRTR, 2009).

a) Excavación-disposición: Se remueven todos los residuos, escorias y calcinas, y el suelo con concentraciones por arriba de los límites de remediación específicos para el

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
EXCAVACIÓN – DISPOSICIÓN	Práctica conocida y aceptada por las autoridades ambientales de México.	Costo alto.
	Incremento significativo del valor de la propiedad con la remoción de todos los residuos y suelo afectados.	Mercado reducido para la disposición final de los residuos. ¹²
	Trámites administrativos sencillos ante las autoridades ambientales.	Existiría dispersión de polvos a los alrededores y exposición de los trabajadores a los contaminantes presentes en el suelo y residuos.
ESTABILIZACIÓN <i>IN SITU</i> – CUBIERTA MULTICAPA	Costo moderado.	Se requiere la importación de maquinaria pesada especializada.
	Se evita la migración de los contaminantes.	Posible responsabilidad futura debido a la permanencia en el sitio de los residuos tratados.
	Se evita la exposición de evita la exposición de los receptores potenciales a los contaminantes contenidos en los residuos.	Mayor cantidad de trámites administrativos ante las autoridades ambientales.
CUBIERTA MULTICAPA	Costo bajo.	Posible responsabilidad futura debido a la permanencia en el sitio de los residuos tratados.
	No se requiere excavación y se evita la exposición de los receptores potenciales a los contaminantes contenidos en los residuos.	Mayor cantidad de trámites administrativos ante las autoridades ambientales.

▲ **Tabla 11.** Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación evaluadas.

12. Cuando se realizó este estudio sólo había un Centro Integral de Manejo y Aprovechamiento de Residuos Industriales (CIMARI) para la disposición de residuos peligrosos en México, Residuos Industriales Multiquim (RIMSA) y estaba en Mina, Nuevo León. Hoy también existe el CIMARI Unidad San Andrés, en Ramos Arizpe, Coahuila, operado por Tecnología Ambiental Especializada S.A. de C.V. Se planea construir otros CIMARI en el país.

sitio en el nivel 2 y su subsiguiente disposición en un confinamiento de residuos peligrosos aprobado por la autoridad ambiental mexicana. Se requiere de material limpio externo proveniente de algún banco de material apropiado para rellenar la excavación, o bien suelo seleccionado del sitio que no esté afectado. Al final es preciso nivelar el terreno.

b) Cubiertas multicapa: Conocida también como “capping”, consiste en colocar varias capas de materiales impermeables con el propósito de prevenir el contacto de los residuos y suelos afectados con los receptores y limitar la infiltración del agua de lluvia. Como se mencionó en la sección de la ERA, si no existe exposición no hay riesgo, por lo que ésta fue una acción razonable para el sitio.

c) Estabilización *in situ*: Encapsula los contaminantes en su medio en vez de removerlos a través de tratamientos físicos o químicos. De esta forma se elimina la movilidad de las sustancias peligrosas. Esta tecnología puede usarse conjuntamente con la instalación de cubiertas multicapa para proporcionar protección adicional y evitar la infiltración vertical de agua dentro del paquete del material estabilizado.

Una vez evaluadas las ventajas y desventajas de cada tecnología (*Tabla 11*) se decidió aplicar una combinación de la excavación–disposición y la cubierta multicapa. La primera, para las áreas con presencia de calcinas y la segunda, para las áreas afectadas con concentraciones de contaminantes por arriba de las CAPE nivel2.

6. Implementación del programa de remediación

El programa de remediación entregado a la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR), de la Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental de la SEMARNAT, incluyó la propuesta de remediación, la descripción de las tecnologías de remediación seleccionadas, los volúmenes y áreas de suelo a tratar. Incluyó información complementaria, antecedentes históricos del sitio, situación del terreno al momento de desarrollar el proyecto, estudios de caracterización y la ERA.

La tecnología de excavación-disposición se propuso para áreas específicas donde se encontraron paquetes de calcinas o cenizas de fundición; dado su potencial tóxico se consideró apropiado enviarlos a un sitio de confinamiento controlado. La tecnología de cubierta multicapa se aplicó en aquellas áreas más impactadas por los contaminantes y que de acuerdo con la Evaluación de Riesgo Ambiental realizada representaban un riesgo por sobrepasar las CAPE nivel 2 estimadas. En la Figura 17 se presentan las áreas del predio en las cuales se aplicaron estas tecnologías.

Cuando iniciaron las actividades para la remediación, el proyecto arquitectónico diseñado para el predio estaba

desarrollado en su mayoría y ya tenía contemplado la construcción del canal de agua para uso recreativo, actualmente existente en el Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa. Debido a que esta parte del terreno soportaría una enorme carga de concreto y agua, se decidió aplicar un capping tipo A en el área correspondiente al cauce (Figura 17). Se requirió la participación de varios contratistas para realizar estos trabajos, bajo la supervisión del Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL.

6.1. Excavación-disposición

Esta tecnología se aplicó en los puntos críticos del predio donde se detectaron cenizas de fundición. El proceso comprendió la excavación, el transporte, el tratamiento y la disposición de los residuos y suelos contaminados a un centro autorizado, relleno del área con suelo no afectado existente en el predio, y nivelación final (Figura 18).

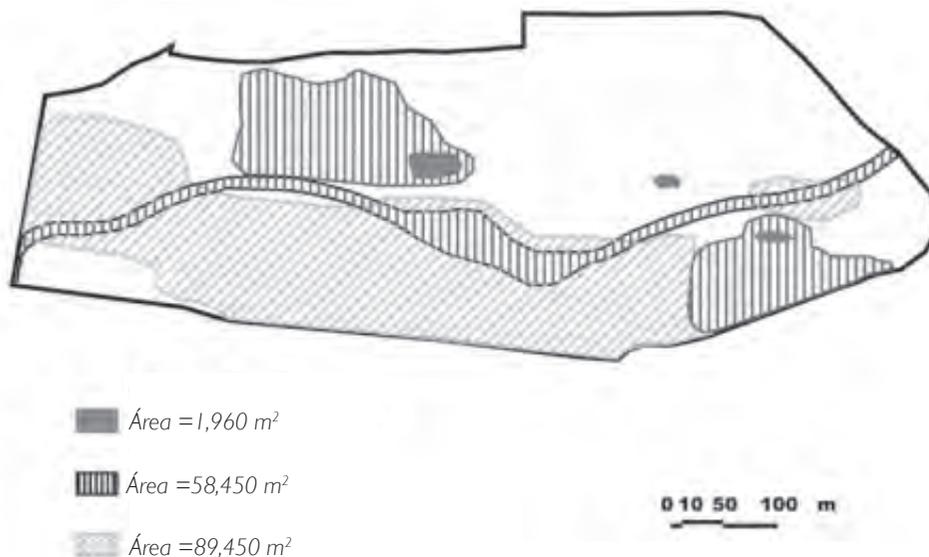
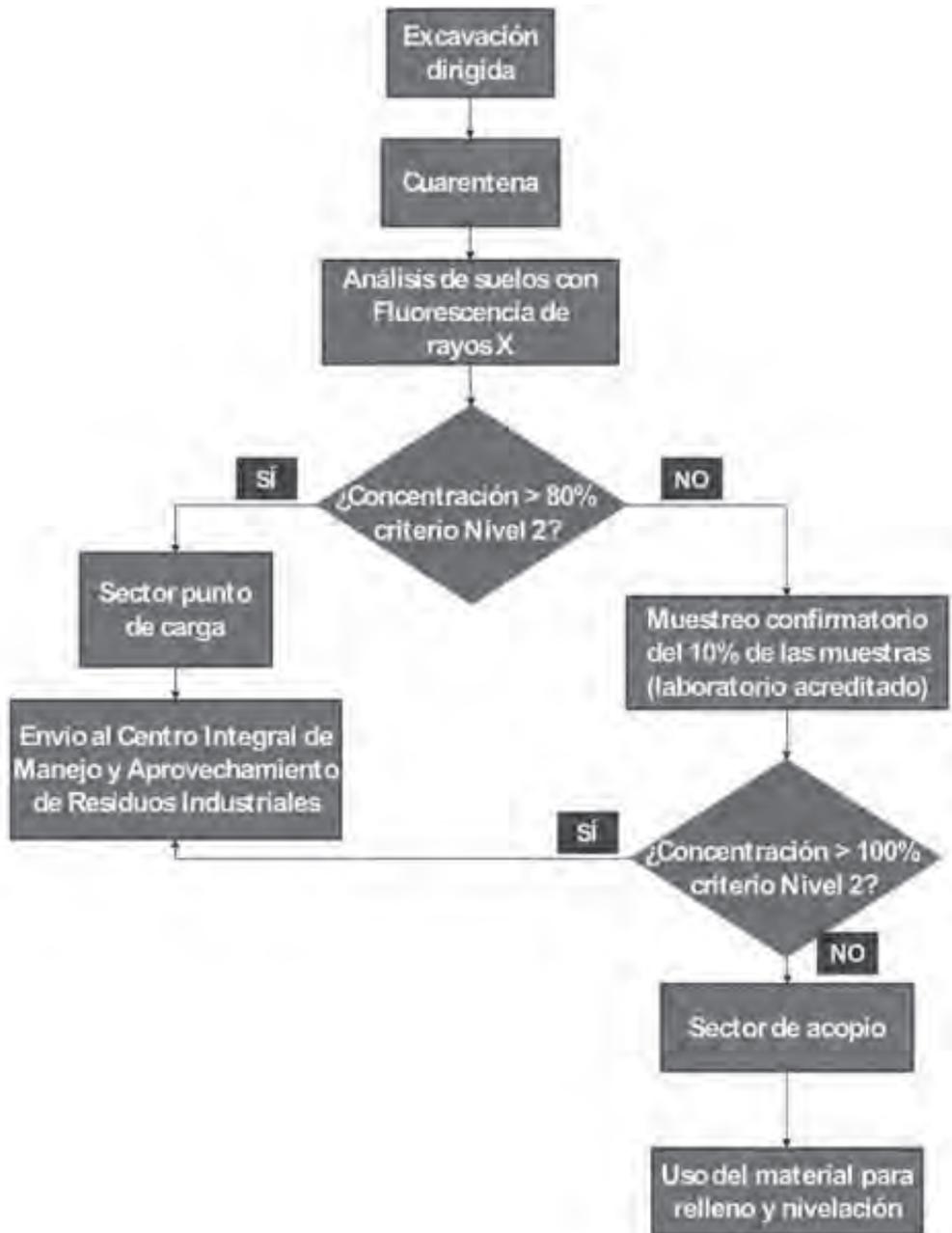


Figura 17. Áreas tratadas con cubierta multicapa (capping) y excavación-disposición.

Se realizaron muestreos confirmatorios para verificar si las concentraciones de los suelos/residuos excavados estaban por arriba de los criterios de comparación nivel 2 obtenidos en la ERA. Los suelos/residuos que rebasaron estos criterios se enviaron a un Centro

Integral de Manejo y Aprovechamiento de Residuos Industriales (CIMARI) para su confinamiento y aquellos que estuvieron por debajo de los criterios se conservaron en el sitio para usarse como material de relleno y nivelación.



▲
Figura 18. Descripción de las actividades relacionadas a la excavación-disposición.

En cada una de las áreas seleccionadas para excavar el material contaminado se ubicaron tres sectores denominados: a) *cuarentena*, b) *acopio* y c) *punto de carga*.

a) Sector cuarentena: En este lugar se almacenó el suelo excavado y retirado de las áreas afectadas para su análisis confirmatorio. Se verificó si el suelo o los residuos excavados tenían concentraciones por arriba de los criterios de comparación nivel 2 (CAPE nivel 2) obtenidos en la etapa de ERA.

El área fue acondicionada mediante una cubierta de arcilla compactada para evitar la afectación al suelo no contaminado y la infiltración de agua de lluvia que pudiera entrar en contacto con el material contaminado hacia el acuífero. Se tenían diferentes secciones en las cuales se colocaban los montículos de cada volumen extraído identificando con una clave que indicaba exactamente de dónde provenían. Los análisis se realizaron con el instrumento de fluorescencia de rayos (XFR) marca Niton Modelo XLt 800 series que fue usado en la etapa de caracterización.

Se consideró que los lotes de suelo que excedieran el 80% de las concentraciones de los criterios de comparación nivel 2 para cualquiera de los contaminantes evaluados eran aptos para su disposición final en el confinamiento autorizado; esto fue para tener un margen de seguridad debido a que el análisis a través de FRX tuvo una correlación de cerca del 81% en el caso del plomo. El 10% de los montículos con las concentraciones más altas pero que estaban por debajo del 80% de los criterios mencionados para cada contaminante se enviaban a un laboratorio acreditado ante la EMA para su ratificación; en este caso, se enviaban al confinamiento los lotes que rebasaban el 100% de los criterios nivel 2. Durante esta etapa del proyecto participó la PROFEPA.

b) Sector acopio: En esta área se acumuló el suelo con concentraciones por debajo de los criterios de comparación nivel 2, de acuerdo con las consideraciones por tipo de análisis ya mencionados, hasta su uso en los trabajos de relleno y nivelación.

c) Sector punto de carga: En esta área los suelos/residuos se embarcaron en los medios de transporte acondicionados (camiones con tolva o doble semi-molque), con autorización de la SEMARNAT para el transporte de residuos peligrosos. Los puntos de

carga eran móviles; se ubicaron en las áreas de trabajo a medida que se avanzaban las excavaciones.

Estas maniobras fueron supervisadas a detalle por el Departamento de Ingeniería Ambiental del IIC de la UANL. Se inspeccionó que el personal y los vehículos cumplieran con las normas de seguridad y salud pertinentes, y que se realizaran las acciones correspondientes para el control de polvos, como el regado constante de las áreas de trabajo. Antes de su salida del predio, los vehículos debían ser totalmente cubiertos y lavados para evitar la dispersión de partículas de suelo o residuos contaminados que pudieran afectar a la población circundante.

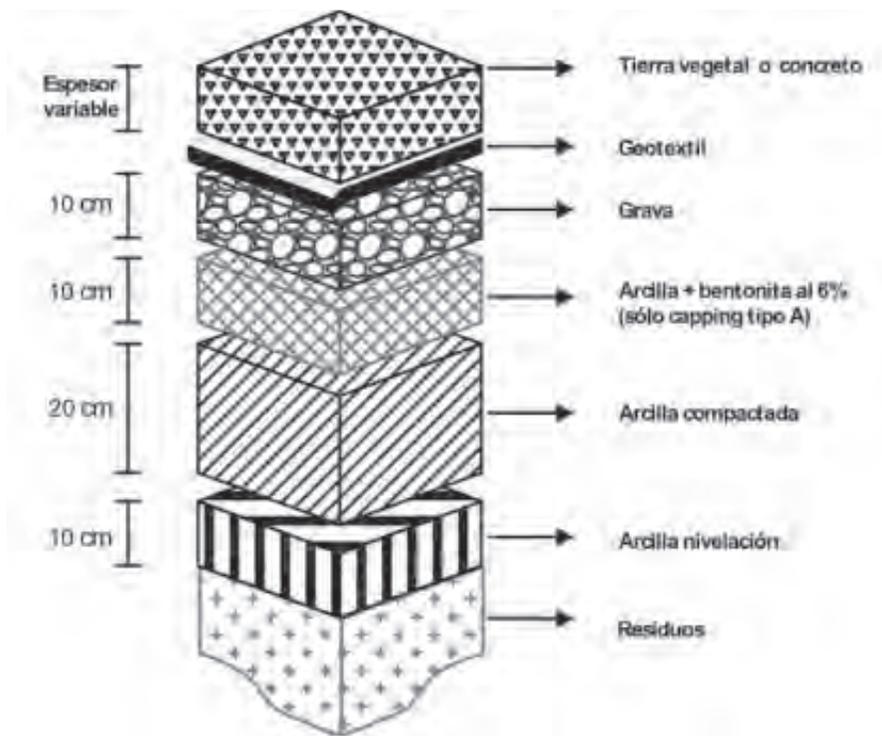
6.2. Cubierta multicapa

Esta tecnología se aplicó en áreas donde se detectó escoria de fundición. Se diseñaron dos tipos de cubierta o capping. El tipo A se aplicó en las áreas de escoria masiva y el tipo B en las áreas de escoria granular (*Figura 17*). Se requirió nivelar la superficie, construir el drenaje perimetral y realizar la nivelación final.

El capping consistió en colocar una serie de capas protectoras sobre la escoria (*Figuras 19 y 20*). Sobre la escoria masiva se colocó protección adicional ya que este material presentó las mayores concentraciones. El capping tipo A se dispuso en estas áreas y también sobre el área donde se construiría el canal recreativo del Parque Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa, que además se recubrió de concreto. El capping tipo A a diferencia del capping tipo B tenía una o varias capas adicionales de arcilla–bentonita compactada de 10 cm de espesor, compactación al 95%, prueba Proctor (*Figuras 20 a 22*).

La función de la capa de grava es drenar el agua que se infiltra por lo cual, se colocó tubería de drenaje en la periferia de las áreas remediadas (*Figura 20*).

La superficie se niveló antes de aplicar las capas mencionadas, dando la pendiente necesaria para asegurar que el agua escurra por la superficie hacia los drenes perimetrales (*Figura 21*).



▲
Figura 19. Esquema de la cubierta multicapa (capping).



▲
Figura 20. Vista en el sitio de la cubierta multicapa (capping)
 (Fuente: UANL, 2005).



▲
Figura 21. Aplicación de arcilla-bentonita y compactación del terreno
 (Fuente: UANL, 2005).

7. Ejecución del proyecto arquitectónico

De manera casi paralela a las actividades de remediación, la Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Nuevo León procedió a ejecutar el proyecto arquitectónico para integrar este predio al corredor Parque Fundidora-Macropiazza, realizando así uno de los cinco proyectos estratégicos planteados por el Gobierno del Estado de Nuevo León dentro del Plan Estatal de Desarrollo 2004-2009. El proyecto se sometió a concurso y en la realización de la obra participaron más de 100 empresas contratistas, destacando la participación del arquitecto y paisajista Enrique Abaroa Castellanos, y el arquitecto Alvin Groves, creador del San Antonio River Walk Extension de San Antonio, Texas en los Estados

Unidos de América. Fue así como surgió el espacio recreativo Paseo de Santa Lucía 2ª etapa (Figura 22).

El tiempo de ejecución del proyecto fue de veinte meses. El parque se inauguró el 9 de mayo del 2006. El rescate de este predio permitió activar social y económicamente un área que estaba deprimida, lo que aumentó significativamente la plusvalía de la zona y brindó a los regiomontanos un nuevo espacio para actividades de esparcimiento, deportivas y culturales. En 2007, este escenario albergó el Forum Universal de la Culturas que en ese año tuvo como anfitrión a México, en particular al Estado de Nuevo León.



Figura 22. A y B) Vistas aéreas del corredor Macropiazza-Paseo de Santa Lucía-Fundidora. C) Vista del Cerro de la Silla y canal ubicado en el parque recreativo Santa Lucía, 2ª etapa (Fuente: Secretaría de Obras Públicas del gobierno del Estado de Nuevo León).

8. Lecciones aprendidas

Un aspecto de gran interés en este proyecto fue la participación de varias administraciones estatales y municipales a lo largo de su ejecución. El proyecto general Fundidora–Paseo de Santa Lucía–Macroplaza inició con la construcción de la Macroplaza, bajo el Gobierno de Alfonso Martínez Domínguez (1979 a 1985). Durante la administración de Jorge Treviño Martínez (1985-1991), en coordinación con el gobierno federal, se adquirió el predio de lo que fue la compañía Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey S.A.¹³ y se rehabilitó como patrimonio del estado de Nuevo León, construyéndose ahí el actual Parque Fundidora. Posteriormente, bajo el mandato de Sócrates Rizzo García (1991-1996), se inició la primera etapa del Paseo de Santa Lucía. Después, durante la gestión de Fernando Canales Clariond (1997-2003)¹⁴, el gobierno estatal adquirió el predio donde estaba la compañía Peñoles o Fundación No. 2, con miras a integrarla al proyecto arquitectónico del Parque Fundidora, lo cual se concretó durante el Gobierno de José Natividad González Parás (2003-2009).

En la ciudad de Monterrey, cuyo origen es industrial, una gran cantidad de empresas quedaron inmersas en el centro de la ciudad como consecuencia del crecimiento de la urbe, los terrenos que albergaron industrias se volvieron pasivos ambientales por lo que resultaron ser muy atractivos para su recuperación, sobretodo en áreas deprimidas.

Cabe destacar la existencia de la Corporación de Proyectos Estratégicos en el Gobierno del Estado de Nuevo León, cuyo objetivo es promover el desarrollo social y el crecimiento económico a través de la colaboración y participación activa de los sectores público y privado, la academia, el sector empresarial y las instituciones gubernamentales tanto nacionales como internacionales. Esta oficina selecciona los proyectos de mayor beneficio para la sociedad, integra la parte económica y logística, y finalmente transfiere los proyectos a las instancias gubernamentales adecuadas para la ejecución de los mismos y lograr las metas establecidas en el Plan Estatal de Desarrollo. En este caso fue la Secretaría de Obras Públicas, quien a su vez contactó a la UANL para la realización de las evaluaciones ambientales del sitio

fases I y II, y la supervisión de las obras de remediación del predio. En el desarrollo del proyecto la participación de la Universidad Autónoma de Nuevo León tuvo también un impacto positivo, a nivel nacional las universidades son las instituciones con mayor credibilidad por parte de la sociedad.

Esta estrategia ha influido en los últimos años en cómo lograr crear un corredor recreativo en la zona del Paseo de Santa Lucía y otros pasivos ambientales de la ciudad. La confianza y credibilidad ganada a través del desarrollo de múltiples proyectos de investigación para la solución de problemas ambientales permitió que la comunicación de los riesgos a la población fuera exitosa.

La comunicación de riesgos es el proceso de informar a la gente de los peligros potenciales a su persona, propiedad o comunidad. Su propósito es ayudar a los residentes de las comunidades afectadas a entender los procesos de evaluación y manejo de riesgos, de tal forma que su percepción al respecto sea la adecuada y, si lo desean, puedan participar de manera informada en las decisiones sobre cómo debe manejarse el riesgo.

El análisis de los riesgos es una disciplina que incluye la evaluación, caracterización, comunicación y manejo de los riesgos de cualquier índole. En el área de riesgos ambientales, México es uno de los países de América Latina que lleva más terreno avanzado en cuanto a evaluaciones y su manejo. Sin embargo, la comunicación de los riesgos ha avanzado lentamente en el país.

El predio de Peñoles o Fundación 2 actualmente parque Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa, se ubica en una zona populosa de la ciudad de Monterrey. Algunos de sus vecinos son la colonia Obrera, la Unidad Habitacional Reforma, la Escuela Normal Miguel F. Martínez, el hospital del Ginecología del Instituto Mexicano del Seguro Social y un Jardín de Niños. Se esperaba que las obras de remediación causaran inquietud entre los habitantes y la sociedad en general, dado que hubo que sacar del predio los residuos contaminados y ejecutar obras de contención dentro del terreno. Estas actividades por su misma naturaleza producirían emisiones de polvos

13. La Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey S.A. operó de 1903 a 1986, fue la cuarta compañía de fundición establecida en Monterrey y la primera siderurgia integrada de América Latina (Cerutti et al., 2000).

14. De 1996-1997 fungió como gobernador el C. Benjamín Clariond Reyes.

cuyo control estaba previsto a través del programa de seguridad y salud ocupacional.

La experiencia previa de la UANL en proyectos en los que se requería solucionar problemas ambientales y que involucraban tanto a la población como a dependencias gubernamentales y empresas privadas, le permitió anticiparse a futuros conflictos con los vecinos del predio, pues tales situaciones habían demostrado que la comunicación con todos los sectores sociales es básica para el éxito de este tipo de proyectos. Fue por eso que desde las primeras etapas del proyecto se propuso a las autoridades gubernamentales ejecutar una estrategia de comunicación de riesgos que implicó pláticas con médicos del hospital, vecinos de las casas habitación, maestros y padres de familia de las escuelas. Ahí se les informó de las actividades que se realizarían en el terreno, su propósito, los beneficios futuros y las medidas de seguridad que se tomarían para mitigar la emisión de polvos hacia sus instalaciones. La respuesta fue positiva sobre todo porque hubo claridad en lo que se exponía mediante el uso de un lenguaje sencillo, además en todo momento estuvo un representante del proyecto para recibir quejas o inquietudes de los pobladores, dispuesto a ofrecer soluciones razonables a sus demandas, por ejemplo el cambio temporal de los horarios de algunas actividades.

Sin embargo, se presentaron ciertas manifestaciones de la población y publicaciones periodísticas en contra del proyecto, derivadas precisamente de la falta de información científica y verídica proveniente de las personas e instituciones a cargo de la obra hacia los medios de comunicación. Inicialmente la estrategia de comunicación se centró en los vecinos inmediatos y no se dispuso de un mecanismo similar hacia la prensa y demás medios, lo que resultó en conjeturas equivocadas, basadas en la percepción errónea de lo que ocurría. Al percatarse de esta omisión, la UANL realizó junto con el Gobierno del Estado de Nuevo León mesas de información para los medios, que mejoraron enormemente la opinión que se tenía del proyecto.

Una vez concluido el proyecto de remediación y revitalización del predio que ocupó la compañía Peñoles durante largos años y antes la Fundición No. 2, se adoptó la estrategia de denominar al parque con un nombre totalmente ajeno a esas empresas, pues se pretendía deslindar este nuevo espacio recreativo de la imagen negativa que la sociedad tenía del lugar. Primero se llamó Parque Fundidora II y luego Paseo de Santa Lucía, 2ª etapa, nombre que hasta ahora lleva. Así fue como el parque se integró rápidamente a la vida social de los regiomontanos.

Otro elemento que contribuyó a lograr resultados positivos fue que la supervisión de las actividades de campo, con respecto a los trabajos ambientales, la realizó un tercero, ajeno al gobierno que promovió el proyecto y a los contratistas que ejecutaron la obra. En este caso, la supervisión externa estuvo a cargo de la UANL, que fungió como un vínculo confiable entre las múltiples empresas contratistas y el gobierno estatal. Este juez de calidad aseguró respuestas apegadas a la normatividad ambiental y de seguridad y salud ocupacional, lo cual redundó en mayor aceptación del proyecto por parte de la sociedad.

Asimismo, la gran cantidad de información que en la actualidad está disponible para la sociedad en torno al deterioro ambiental y el desarrollo sustentable, impulsa a los gobiernos a considerar como buena inversión el ejecutar medidas de protección al ambiente, ya que la comunidad premia los proyectos ecológicos.

La continuidad del proyecto durante 30 años se debió en gran medida a que los diferentes gobiernos participantes en la tarea de convertir un sitio contaminado en el parque Fundidora y el Paseo Santa Lucía, tuvieron la sensibilidad para responder a la demanda de la sociedad de disponer de espacios recreativos y culturales así como asumir la responsabilidad de resarcir el daño ambiental. Adicionalmente este proyecto impactó de manera positiva al desarrollo económico y turístico de la zona.

Fuentes de información

Cerutti, M., Ortega, I., & Palacios, L. (2000). *Empresarios y empresas en el norte de México. Monterrey del Estado oligárquico a la globalización.* *European Review of Latin American and Caribbean Studies.*

DOF – Diario Oficial de la Federación. (1996). *Norma Oficial Mexicana. NOM 127 SSA1 1994. Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano. Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que Debe Someterse el Agua para su Potabilización.* D.F., México: Diario Oficial de la Federación.

DOF – Diario Oficial de la Federación. (2007). *Norma Oficial Mexicana. NOM 147 SEMARNAT/SSA1-2004. Criterios para Determinar las Concentraciones de Remedación de Suelos Contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo Hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio y/o Vanadio.* D.F., México: Diario Oficial de la Federación.

FRTR – Federal Remediation Technology Roundtable. (2009). *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 1.0.* Recuperado en Agosto de 2009, de Federal Remediation Technology Roundtable: http://www.frtr.gov/matrix2/top_page.html

Hürlimann, M. (2009). *Tema 7. Reconocimiento del terreno. Métodos indirectos/geofísicos. Apuntes de Ingeniería Geológica. Estudio de Ingeniería de Caminos.* Recuperado en Agosto de 2009, de Universidad Politécnica de Cataluña: http://www2.etcg.upc.edu/asg/engeol/pdf_files/7.recog_txt_geofis.pdf

Morado, C. (2003). *Empresas mineras y metalúrgicas en Monterrey, México. 1890 - 1908. Parte II. Tres plantas metalúrgicas.* *Ingenierías No. 20* , 53-61.

NRC – National Research Council. (1994). *Science and Judgment in Risk Assessment.* Washington DC: National Academy Press.

PROFEPA – Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. (2000). *Criterios interinos de restauración de suelos contaminados. Memorias 1998 del grupo de trabajo sobre restauración de suelos contaminados.* México, D.F.: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

Pyle S., M. (1996). *Comparison of AAS, ICP-AES, PSA and XRF in determining lead and cadmium in soil.* *Environmental Science & Technology No. 30*, 204-213.

SEMARNAT – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2006). *Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de riesgo ambiental de sitios contaminados*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Shibata, Y., Suyama, J., Kitano, M., & Nakamura, T. (2009). *X-ray fluorescence analysis of Cr, As, Se, Cd, Hg and Pb in soil using pressed powder pellet and loose powder methods*. Recuperado el Agosto de 2009, de Interscience X-Ray Spectrom Online: <http://www.interscience.com>

TCEQ – Texas Commission on Environmental Quality. (1999). *Texas Administrative Code. Title 30 (Environmental Quality), Rule 350. Texas Risk Reduction Program. Subchapter D. Development of protective concentration levels*. Recuperado en Agosto de 2009, de Texas Commission on Environmental Quality: <http://www.tceq.state.tx.us/assets/public/legal/rules/rules/pdflib/350d.pdf>

TCEQ – Texas Commission on Environmental Quality. (2004). *TRRP protective concentration levels*. Recuperado el Agosto de 2009, de Texas Commission on Environmental Quality: <http://www.tceq.state.tx.us/remediation/trrp/trrppcls.html>

U.S. EPA – Environmental Protection Agency. (1989). *Risk Assessment Guidance for Superfund, Volume I, Human Health Evaluation Manual (Part A). Interim Final*. Office of Emergency and Remedial Response.

U.S. EPA – Environmental Protection Agency. (1991). *Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume Human Health Evaluation Manual (Part B). Interim Final. Development of Risk Based Preliminary Remediation Goals*. Office of Emergency and Remedial Response.

U.S. EPA – Environmental Protection Agency. (1997). *Exposure Factors Handbook. Volume I General Factors Office of Research and Development*. EPA/600/P-95/002Fa.

U.S. EPA – Environmental Protection Agency. (2001). *Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I Human Health Evaluation Manual. Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment, Interim Draft Guidance for Dermal Risk*. EPA/540/R/99/005.

U.S. EPA – Environmental Protection Agency. (2009). *Drinking Water Contaminants*. Recuperado en Agosto de 2009, de Safewater Home: <http://www.epa.gov/safewater/contaminants/index.html>

UANL – Universidad Autónoma de Nuevo León. (2005). *Estrategia de adecuación ambiental del sitio "Fundidora II" en Monterrey, Nuevo León, México*. Reporte preliminar. Monterrey: Departamento de Ingeniería Ambiental, Instituto de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Vizcaya, I. (1969). *Los orígenes de la industrialización de Monterrey 1867 - 1920*. Librería Tecnológico.

5

**Remediación del área de
confinamiento provisional**

La Pedrera en
Guadalcázar,
San Luis Potosí

Rosa María Flores Serrano
Miguel Ángel Irabién Alcocer



Abreviaturas y Acrónimos

ASTDR	Registro de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de los Estados Unidos de América (traducción del inglés)
CEN CA	Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental
C AD	Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas a Inversiones
C MAR	Centro Integral de Manejo Tratamiento Aprovechamiento y Disposición Final de Residuos Industriales y Peligrosos
CONAB IO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
CONASENUSA	Comisión de Seguridad Nuclear y Salvaguardas
COTER N	Confinamiento Técnico de Residuos Industriales S A
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
CP	Cociente de peligro
DGG MAR	Dir General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas
ECOPSA	Ecosistemas del Potos S A de C V
ERA	Evaluación de Riesgo Ambiental
GTZ	Agencia de Cooperación Técnica de Alemania (traducción del alemán)
HTP	Hidrocarburos Totales del Petróleo
CS D	Centro Internacional para la Resolución de Disputas en Inversión
NE	Instituto Nacional de Ecología
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LMP	Límite máximo permisible
MLD	Menor al Límite de detección
NOM	Norma Oficial Mexicana
ONG	Organizaciones No Gubernamentales
PEMA	Pauta de evaluación de medios ambientales
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PVC	Cloruro de polivinilo (traducción del inglés)
RAD AN	Corporación RAD AN S A de C V
R MSA	Residuos Industriales Multiquim S A
SAGARPA	Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEDUE	Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología
SEMARNAP	Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación del Suelo
TLCAN	Tratado de Libre Comercio de América del Norte
UASLP	Universidad Autónoma de San Luis Potosí

San Luis Potosí

Remediación del área de confinamiento provisional La Pedrera, en Guadalcázar, San Luis Potosí

1. Descripción del proyecto	155
2. Antecedentes históricos	157
3. Caracterización ambiental	165
3.1. Características de los residuos de las celdas de confinamiento	165
3.2. Lixiviados, niveles de explosividad y radiación en las celdas de almacenamiento temporal	166
3.3. Suelo y agua subterránea en las zonas de almacenamiento temporal y en las celdas de confinamiento	167
4. Evaluación de riesgo ambiental	171
4.1. Selección de los contaminantes críticos	171
4.2. Estimación de la exposición	173
4.3. Caracterización del riesgo	173
5. Selección y aplicación de la tecnología de remediación	175
6. Lecciones aprendidas	182
7. Fuentes de información	184



▲
La Pedrera en el municipio de Guadalcázar.

Remediación del área de confinamiento provisional La Pedrera, en Guadalcázar, San Luis Potosí

1. Descripción del proyecto

En noviembre de 1990 inició la recepción de residuos peligrosos en el predio denominado, La Pedrera, en Guadalcázar, San Luis Potosí (Figura 1). Este sitio fue operado hasta agosto de 1993 por la empresa Confinamiento Técnico de Residuos Industriales S.A. (COTERIN) con sede en la ciudad de San Luis Potosí. A partir de septiembre de ese año, la operación pasó a la empresa estadounidense METALCLAD con sede en Newport Beach, en California, EUA (Bejarano, 2003).



Figura 1. Residuos peligrosos dispuestos sobre el suelo en el predio La Pedrera, en Guadalcázar, San Luis Potosí (Fuente: SEMARNAT).

Entre el 11 de julio y el 21 de noviembre de 1990 COTERIN realizó las gestiones para oficializar la construcción de un confinamiento controlado de residuos peligrosos en el sitio, pero fue hasta enero de 1993 que la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, (SEDUE¹)

1. La SEDUE se creó en 1982 para tratar los temas ambientales del país; en mayo de 1992, se creó la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y las funciones de la SEDUE pasaron a esta nueva Secretaría. En diciembre de 1994 se creó la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) que en el año 2000 cambió de nombre a Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), y el sector pesca pasó a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

le otorgó dicha autorización. Sin embargo, la compañía comenzó a recibir residuos antes de obtener el permiso. Se desconoce exactamente la fecha en que comenzaron estas actividades, pero existen registros que indican que entre noviembre de 1990 y noviembre de 1995 se recibieron en el predio cerca de 20,500 toneladas de residuos peligrosos, las cuales fueron dispuestas de sobre el suelo y luego confinadas en tres celdas cuya operación no fue adecuada.

El predio La Pedrera en el municipio de Guadalcázar, San Luis Potosí ha sido administrado por cuatro propietarios: Ing. Salvador Aldrett León (1990-1991), la empresa COTERIN (1991-1993), la empresa METALCLAD (1993-2001) y a partir del 2001 se transfirió la propiedad al Gobierno de México.

Las constantes quejas de la población y la contaminación que provocaron diversos eventos a lo largo del tiempo dieron lugar a una serie de litigios y auditorias que resultaron en la clausura del predio en 1995. Esto incitó a que la empresa METALCLAD, propietaria de las instalaciones en ese momento, interpusiera una controversia hacia el gobierno mexicano ante el Tribunal del Centro Internacional para la Resolución de Disputas en Inversión (ICSID), exigiendo la indemnización por el trato discriminatorio y de expropiación de la inversión, esta empresa invirtió una gran cantidad de recursos en la construcción de nuevas instalaciones y la adecuación de otras ya existentes (DDCD, 2005). A mediados del año 2000 se dictó sentencia donde se obligó al Gobierno de México a resarcir el daño económicamente a favor de la empresa demandante, así como a adquirir el inmueble y realizar su remediación ambiental.

En octubre del 2001 se transfirió la propiedad a título gratuito a favor del gobierno federal con el propósito de remediar el sitio. Durante este periodo, el predio también fue evaluado por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y se apreció que el sitio no contaba con las condiciones necesarias para el funcionamiento de un confinamiento de residuos. Finalmente, en el año 2004 se celebró un acuerdo entre distintas dependencias estatales y federales para definir un plan de trabajo conjunto para la remediación del predio.

Las actividades previstas incluyeron la extracción de los residuos de las celdas, eliminando los gases y lixiviados, el envío de los lixiviados y residuos líquidos recolectados a un confinamiento controlado, su sellado y la construcción de barreras multicapa para contener los residuos, evitar la infiltración del agua de lluvia y prevenir la migración de los contaminantes al subsuelo.

La remediación de esta área fue muy importante, la sociedad mexicana particularmente la de San Luis Potosí, luchó durante años para lograr la mitigación de los daños ocasionados al ambiente, sobre todo en el año de 1997 cuando el Gobernador del estado de San Luis Potosí expidió un decreto en que declaró a la zona donde se encuentra el predio La Pedrera como Área Natural Protegida "Real de Guadalcázar" bajo la modalidad de Reserva Estatal con características de Reserva de la Biósfera. La remediación se realizó en el año 2007 y luego se reforestó parte del predio con el propósito de integrarla al área natural protegida.

Este sitio fue el resultado de una serie de errores derivados de las carencias en la legislación ambiental mexicana vigente en la década de los años noventa, así como de la mala actuación de algunas autoridades ambientales, de empresarios nacionales y extranjeros, que de forma inescrupulosa obtuvieron beneficios del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) firmado por los Estados Unidos Mexicanos, los Estados Unidos de América y Canadá, novedad en su momento para el país, que entró en vigor en el año de 1994. Sin embargo, después de muchas diligencias y de la participación de organizaciones no gubernamentales (ONG), el gobierno federal y el estado de San Luis Potosí hicieron un esfuerzo conjunto para tomar las medidas necesarias y remediar el sitio. El costo del proyecto fue cubierto por el gobierno federal.

El objetivo es que esta experiencia sirva como ejemplo para demostrar que el conocimiento jurídico, la organización civil y la comunicación de riesgos son importantes por igual a la pericia técnica en el momento de afrontar los problemas ambientales, y que éstos pueden solucionarse de manera efectiva, aún después de tantos años de irregularidades técnicas y legales.

2. Antecedentes históricos

El predio La Pedrera se encuentra en el ejido Los Amoles, municipio de Guadalcázar, estado de San Luis Potosí, a 100 km en dirección NNE de la ciudad de San Luis Potosí, en el borde sur del valle Matehuala-Huizache. Al Norte colinda con el ejido El Huizache, al Sur con el rancho El Tulillo, al Este con el ejido Santo Domingo y al Oeste con el ejido La Verdolaga (Figura 2). El municipio tiene una población total de cerca de 24,893 habitantes. La principal actividad económica en un radio de hasta cuatro kilómetros del predio es la agricultura temporal. Cuatro km hacia el norte se encuentra el ejido de El Huizache con una población aproximada de 490 habitantes, y a seis km en la misma dirección se localiza el ejido La Pólvora, con cerca de 690 habitantes (GESLP, 2007). En el área correspondiente al predio La Pedrera no existen viviendas. En la época en que comenzó el conflicto, ninguna de las localidades mencionadas estaba provista de agua potable, drenaje, teléfono, industria o comercio aunque ha mejorado su situación paulatinamente.

El clima de la región es desértico. De acuerdo con la estación meteorológica de Guadalcázar, la precipitación promedio anual es de 301 mm y la temperatura promedio anual es de 17.8 °C. Los vientos predominantes en la zona provienen del noreste.

El municipio se encuentra configurado principalmente por las derivaciones que se orientan de sur a norte de los sistemas topográficos del Sur del estado sobre la cual se localiza la sierra de Álvarez, que constituye el macizo montañoso que separa el altiplano de las llanuras que forman la cuenca de Rioverde. Así también se encuentra la sierra de Guadalcázar y numerosos cerros como El Grande, San Lucas, Las Comadres y Los Arcos (GESLP, 2007).

El sitio descansa sobre un suelo poco permeable al que le sigue una capa de arcilla impermeable entre 40 a 50 m de espesor. A mayor profundidad se tiene un depósito de boleas de calizas permeables pero sin agua, bajo el

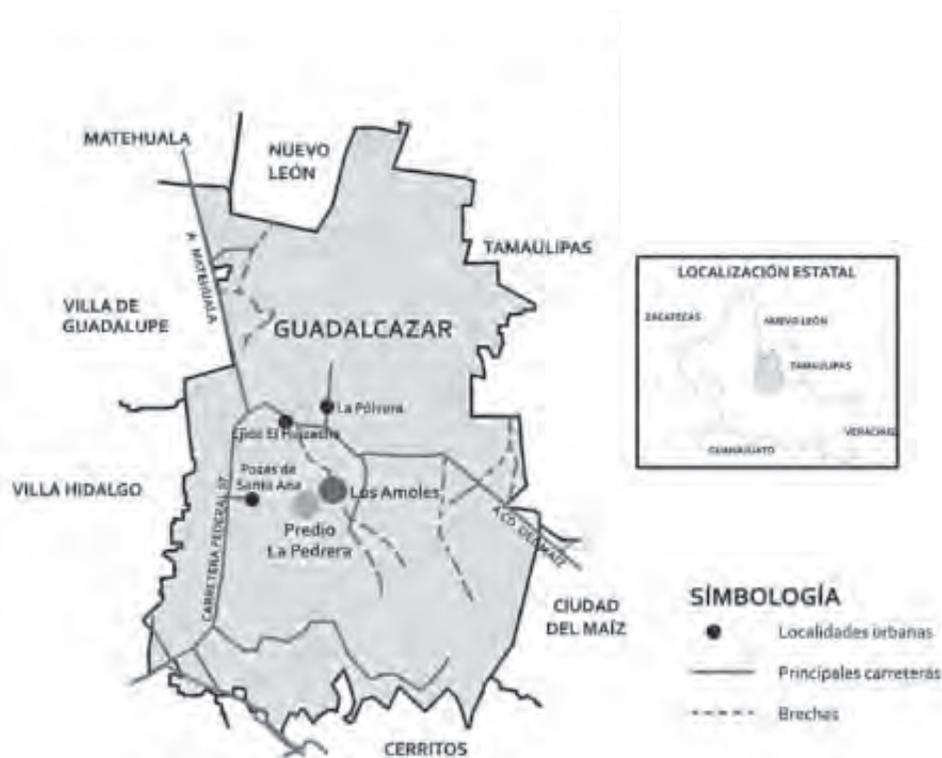


Figura 2. Ubicación del predio La Pedrera, municipio de Guadalcázar, estado de San Luis Potosí.

cual hay una formación de lutitas impermeables, la Formación Cárdenas y más abajo se encuentran las calizas de la Formación Abra, que es compacta y de enorme espesor. No existen acuíferos en la región. En los pozos perforados en un radio de dos kilómetros, se evidenció que se encontró agua hasta una profundidad de 77 m. Sin embargo, en época de lluvia se forman aguas colgadas en niveles más altos que son explotados en norias por las comunidades locales.

El predio La Pedrera tiene un área de 814 ha, de las cuales aproximadamente 20 ha están ocupadas por instalaciones complementarias que nunca fueron usadas y el resto es el área de amortiguamiento (Figura 3), la cual se encuentra cubierta en su mayor parte por vegetación desértica, vegetación del tipo matorral desértico, matorral espinoso, matorral micrófilo, nopalera, izotal, cardonal y pastizal. La fauna se caracteriza por contar con algunas especies en peligro de extinción, como la víbora de cascabel, aguilillas y venado cola blanca (GESLP, 2007). Desde el 16 de septiembre de 1997 esta región está clasificada como Área Natural Protegida "Real de Guadalcázar", bajo la modalidad de Reserva Estatal con características de Reserva de la Biósfera teniendo por finalidad la protección de ciertas especies de



Figura 3. Ubicación del predio La Pedrera: detalle mostrando el polígono total del predio y el área de las instalaciones (Fuente: Elaboración propia).

cactáceas endémicas, bajo la supervisión de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

La historia de este pasivo ambiental comenzó en agosto de 1990 cuando la SEDUE autorizó la realización del proyecto ejecutivo para el confinamiento controlado de residuos en el predio "La Pedrera", municipio de Guadalcázar, SLP. Esta construcción fue autorizada hasta enero de 1993; mientras tanto, en octubre de 1990, la empresa solicitó a la SEDUE la autorización para operar una estación de transferencia en el mismo predio, debido a que en Mexquitic de Carmona, SLP, tenía un confinamiento de residuos peligrosos que ya había llegado a su límite, el cual recibía los residuos de una planta recicladora de mercurio, propiedad de esos mismos empresarios. Este lugar estaba de igual forma, mal operado; ahí se habían enterrado de manera inadecuada más de 70,000 toneladas de desechos tóxicos (Bejarano, 2003).

La autorización se otorgó de manera cuestionable² con una validez de 120 días (Ugalde, 2002). Pese a que aún no se había construido propiamente la estación de transferencia, en noviembre de 1990 comenzaron a recibir residuos peligrosos en tambores, bolsas y a granel, los cuales se dispusieron directamente en el suelo. La extensión de la autorización para la operación de la estación de transferencia por otros 120 días se solicitó en marzo de 1991 y se concedió el 3 de septiembre de 1991.

El problema del predio La Pedrera tuvo factores políticos y sociales, las autoridades municipales y estatales no estuvieron de acuerdo con las decisiones tomadas por el gobierno federal. La población se sentía amenazada por la presencia del confinamiento y la falta de información por parte de los distintos propietarios del predio y de los tres niveles de gobierno.

En mayo de 1991 lluvias torrenciales en la zona derramaron parte del material almacenado, afectando a la represa de abastecimiento de parcelas de la comunidad de El Huizache (Bejarano, 2003). Esto generó inquietud entre los pobladores, quienes se movilizaron para impedir la entrada al predio de más vehículos con residuos peligrosos.

Para prevenir otra emergencia, las autoridades ambientales ordenaron que se traspasaran los residuos a tres celdas de confinamiento que el propietario del predio

2. El reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en materia de Residuos Peligrosos publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de noviembre de 1988 define al confinamiento controlado como la "obra de ingeniería para la disposición final de residuos peligrosos, que garantice su aislamiento definitivo" pero no hace referencia a lo que debe entenderse como "estación de transferencia". Por otra parte, pese a tratarse del mismo predio, el confinamiento de residuos peligrosos y la estación de transferencia son dos instalaciones y por lo tanto dos figuras jurídicamente diferentes, por lo que la autorización de la segunda es cuestionable.

había construido recientemente, llamándolas celdas de almacenamiento temporal (Figuras 4 y 5), aunque con el tiempo se volvieron celdas de disposición final.



Figura 4. Instalaciones construidas por COTERIN en el predio La Pedrera. Entre 1990 y 1991 se dispusieron sobre el suelo, los residuos en las zonas de almacenamiento temporal y luego se transfirieron a las celdas de confinamiento (1, 2 y 3).

A partir de esa fecha COTERIN fue la responsable legal de la operación de la estación de transferencia.

El 24 de septiembre del mismo año, más de 200 personas impidieron una vez más la descarga de 20 camiones que contenían residuos industriales. Un día después de estos hechos la delegación estatal de la SEDUE realizó una visita de inspección tras la cual se ordenó la clausura temporal del lugar debido a las anomalías cometidas por la empresa, como fue la recepción de aproximadamente 800 toneladas de residuos de origen hospitalario y medicamentos caducos procedentes del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). La clausura estipulaba que ésta no se levantaría a menos que se realizara un estudio de impacto ambiental y se hicieran las remediaciones que indicara dicho estudio.

No obstante, el nuevo propietario del predio, la empresa COTERIN, continuó ante las autoridades federales y estatales los trámites necesarios para operar en el sitio un confinamiento de residuos industriales peligrosos, un permiso federal para operar, un permiso estatal de uso de suelo y un permiso municipal de construcción.



Figura 5. Celdas de confinamiento en el Predio La Pedrera. A) Excavación de una celda. B) Preparación del fondo de las celdas con impermeabilizante (Fuente: SEMARNAT).

Las celdas se construyeron con los más altos estándares de ingeniería de la época; el fondo de las celdas contaba con varias cubiertas de diversos materiales (Figura 6), lo que garantizaba que no se presentaran fugas de lixiviados a través de los basamentos de las mismas, y se tenían pozos de monitoreo y tubos de venteo. Sin embargo, los residuos ahí dispuestos, aproximadamente 7,000 t por celda, no se cubrieron con algún tipo de material, por lo que aún despedían emisiones de gases a la atmósfera.

En julio de 1991 se celebró un contrato de comodato entre Aldrett León y la empresa Confinamiento Técnico de Residuos Industriales (COTERIN), creada por la misma familia Aldrett para el usufructo del terreno La Pedrera.

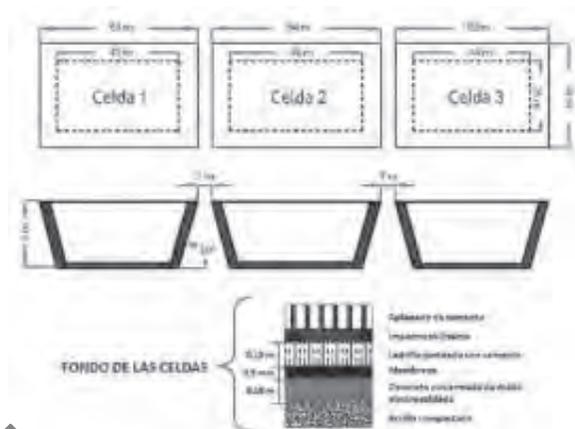


Figura 6. Celdas de confinamiento: vistas de planta y lateral, y composición del fondo de las celdas.

Entre mayo y agosto 1992, a instancias de la delegación estatal de la recién creada Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA³), los desechos industriales dispuestos en las celdas de almacenamiento temporal se cubrieron con una manta de PVC y una capa de arcilla del lugar para evitar las emisiones de gas a la atmósfera y los fuertes olores a productos químicos e hidrocarburos.

Las celdas contaban con pozos de monitoreo de lixiviados, pozos auxiliares de monitoreo y tubos de venteo. Además de las celdas existentes, en esa época se inició la construcción de otras dos celdas de dimensiones y características similares, ubicadas frente a las celdas 1 y 2, las cuales nunca se concluyeron ni utilizaron para recibir residuos. Lo escaso del material de cubierta y las lluvias intensas ocasionales que se presentan en esta zona desértica del país, provocaron la percolación del agua y la generación de lixiviados, causando asentamientos en la superficie de las celdas. Las labores de mantenimiento consistían en colocar tierra arcillosa sobre las celdas y mantener una pendiente adecuada para evitar la acumulación de agua sobre la celda y su infiltración, evitando así que aumentara la generación de lixiviados.

A principios de 1993 COTERIN presentó el estudio de impacto ambiental a la instancia ambiental federal y el 27 de enero de ese año recibió su aprobación, pero no obtuvo el permiso de la instancia estatal. El 11 de mayo de 1993, la delegación estatal de la SEDUE (que para entonces a nivel federal ya había pasado a ser la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) le otorgó a COTERIN la licencia de uso de suelo estatal, sin embargo todavía no contaba con el permiso de construcción que tenía que otorgar el municipio (Ugalde, 2002; DDCCD, 2005; Gerhard, 2007). El 10 de agosto de 1993 la Dirección General de Normatividad Ambiental del Instituto Nacional de Ecología (INE) de la SEDESOL concedió la autorización No. 24-17-PS-VII-01-93 a COTERIN para la construcción y operación del confinamiento controlado, quedando sujeta a 37 condicionantes. La PROFEPA reconoció que dicha autorización fue otorgada a sabiendas de que los desechos ya se habían depositado en el predio de manera inadecuada, lo cual podía interpretarse como un acto en que la autoridad lejos de penalizar al transgresor de la ley, lo recompensaba (Ugalde, 2002).

En septiembre de 1993, la empresa Ecosistemas del Potosí, S.A. de C.V. (ECOPSA) adquirió el 94% de las acciones de la empresa COTERIN mediante un contrato

de opción a seis meses. ECOPSA era una sociedad de nacionalidad mexicana propiedad de ECO-METALCLAD Corporation que a su vez pertenecía a METALCLAD Corporation, empresa con sede en Newport Beach, en el estado de California, Estados Unidos de América. Sus planes consistían en depositar 30,000 toneladas anuales de desechos tóxicos durante 25 años, con ganancias esperadas de 125 millones de dólares en el primer año. Con la entrada en vigor del TLCAN en 1994, esto se consideró como la primera inversión modelo en materia de infraestructura para el depósito de residuos peligrosos dentro de este gran esquema de intercambio comercial; sin embargo, se convirtió en el primer caso de juicio contra el gobierno mexicano debido a las garantías de compensación a la inversión extranjera que establece el capítulo 11 del tratado (DDCCD, 2005).

METALCLAD había adquirido un pasivo ambiental que traía consigo la responsabilidad de remediar la contaminación provocada por la mala disposición de los residuos industriales introducidos a la estación de transferencia, y un activo constituido por la autorización para instalar un nuevo confinamiento. La empresa modificó el proyecto original del confinamiento, mejorándolo sustancialmente tanto en los aspectos técnicos como en los de control y monitoreo ambiental. Las autorizaciones correspondientes al 27 de enero y 11 de mayo de 1993 se limitaban a residuos sólidos, cuya única alternativa de manejo sería la neutralización, estabilización y confinamiento controlado, excluyendo de ella todos los residuos en fase líquida, los radioactivos y otros cuya disposición final fuera diferente al confinamiento, por ejemplo: el caso de los bifenilos policlorados.

Inicialmente La Pedrera sólo contaba con una autorización para funcionar como estación de transferencia y hasta el año de 1993 se obtuvo la autorización de las autoridades ambientales de México para construir y operar un confinamiento controlado.

En abril de 1994 la SEDESOL otorgó una prórroga de 18 meses para concluir las obras del proyecto, y un mes después METALCLAD compró a COTERIN el sitio de confinamiento de manera definitiva, iniciando de inmediato la construcción de las obras complementarias para que la estación de transferencia funcionara como confinamiento controlado, entre ellas una laguna de evaporación con geomembrana para el tratamiento de lixiviados, de la oxidación (Figura 7).

3. Cuando en 1992 se suprimió la SEDUE y se creó la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), desapareció la Subsecretaría de Ecología y se crearon como órganos desconcentrados de la nueva Secretaría tanto el Instituto Nacional de Ecología (INE) como la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), mediante los cuales la SEDESOL ejercería sus atribuciones ambientales (INE, 2010).

otras obras complementarias, el laboratorio, la laguna de evaporación y las oficinas administrativas (Figura 8).

METALCLAD pretendía inaugurar el confinamiento con la presencia de autoridades estadounidenses y mexicanas el 10 de marzo de 1995, pero un grupo de manifestantes impidió dicha acción. A partir de entonces se imposibilitó definitivamente la operación del confinamiento.

La documentación de la auditoría realizada a inicios de 1995 fue puesta a la disposición del público el 2 de mayo de 1995, y desde el 6 de junio se realizaron varias reuniones con participación de varias instituciones públicas y de la sociedad civil, entre ellas, la Comisión Nacional de Agua, los Institutos de Ingeniería y Geología de la UNAM, el Colegio de Ingenieros Civiles, la UASLP, la PROFEPA, el INE, el Gobierno del Estado de SLP, el ayuntamiento de Guadalcázar y miembros de los ONG, entre ellos Greenpeace. En estas reuniones se concluyó que el depósito inadecuado de los residuos había provocado un alto nivel de contaminación. Asimismo, el sitio no cumplía del todo con la normatividad ambiental referente a la construcción de confinamientos controlados: en cuanto a su ubicación contravenía la NOM-055-ECOL-1993, pues se encontraba a menos de 500m de un cuerpo de agua superficial, arroyo La Pedrera, y con respecto a la pendiente, ésta era inferior al 5%. Respecto a la geohidrología, se tenían condiciones de baja transmisividad indicadas por la normatividad, por lo que se recomendaron obras complementarias para la adecuación del sitio.

Para construir y operar un confinamiento controlado de residuos peligrosos se requería de una serie de permisos otorgados por diferentes instancias: un permiso federal para operar, un permiso estatal de uso de suelo y un permiso municipal de construcción, razón por la cual era indispensable la acción concertada de los tres niveles de gobierno.

En diciembre de 1995, trece meses después de que METALCLAD le solicitara al municipio de Guadalcázar el permiso para la construcción del confinamiento, éste emitió el documento oficial donde se negaba dicha autorización, pese a que la instancia federal SEMARNAP, ya la había otorgado.

Ante la creciente animadversión de los pobladores y el gobierno local, METALCLAD inició una serie de acciones encaminadas a mejorar la situación ambiental del sitio y sus áreas circundantes, a mejorar la comunicación con los afectados, la comunicación de riesgos (Figura 9).

Como parte de estas acciones, en noviembre de 1995 METALCLAD estableció a través del INE y la PROFEPA



▲ **Figura 9.** Material usado en la campaña de información realizada por METALCLAD en Guadalcázar (Fuente: Estudio de comunicación ambiental y participación comunitaria en el municipio de Guadalcázar, S.L.P. 1994).

un convenio con el Gobierno de México en el que se contemplaba la remediación del sitio. METALCLAD convino tratar y disponer las más de 20,000 toneladas de residuos peligrosos almacenadas en las tres celdas de almacenamiento temporal y reducir el área para confinamiento de 814 a 34 hectáreas, dejando más de 700 ha como zona de amortiguamiento para el plan de rescate de poblaciones de especies endémicas bajo condiciones que establecería la CONABIO.

En enero de 1996 las autoridades municipales de Guadalcázar, iniciaron un juicio con el objeto de invalidar el convenio federal con METALCLAD. Cuatro años y medio después el litigio se resolvió en contra de las autoridades municipales, pues se argumentó que no eran titulares de garantías individuales, objeto del juicio de amparo (Bejarano, 2003). El 8 de febrero de 1996 METALCLAD presentó un plan de acción para corregir irregularidades y un plan de remediación del sitio. El INE le otorgó un permiso adicional para incrementar la capacidad del confinamiento de 36,000 ton/año a 360,000 ton/año.

Durante todo ese tiempo, los gobiernos estatal y municipal se opusieron a la operación del confinamiento, en contraposición con la autoridad federal que había dado su apoyo a este proyecto dentro del TLCAN. El conflicto

llegó a tal punto que el 20 de septiembre de 1997, tres días antes de terminar su gestión, el gobernador del Estado de SLP expidió un decreto en el que declaró a la zona donde se ubica el predio La Pedrera, Área Natural Protegida Real de Guadalcázar bajo la modalidad de Reserva Estatal con características de Reserva de la Biosfera.

A partir de ese momento se realizaron una serie de litigios en tribunales nacionales e internacionales entre la empresa estadounidense y el gobierno mexicano, cuyo resultado fue la solicitud de METALCLAD de arbitraje comercial al Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas a Inversiones (CIADI), institución ligada al Banco Mundial y con sede en Washington, demandó una compensación al gobierno mexicano por alrededor de 130 millones de dólares, con base a un cálculo exagerado de 20 a 25 millones de dólares por el valor de la inversión realizada, más 90 millones de dólares por ganancias futuras perdidas al no poder operar, más otros 20 a 25 millones de dólares por la baja de sus acciones en otras de sus empresas cuyo impacto fue negativo (Bejarano, 2003).

Con base en la información presentada por METALCLAD, el 30 de agosto del 2000, el CIADI emitió un laudo a favor de la empresa, donde se obligaba al Gobierno de

México a pagar una indemnización de 16.685 millones de dólares, así como a adquirir el inmueble y realizar su remediación ambiental; lo anterior con base en la violación a los artículos 1105 y 1110 del TLCAN (Bejarano, 2003; Ugalde, 2005).

El gobierno mexicano pidió la anulación del laudo del tribunal del CIADI ante la Suprema Corte de Justicia de la provincia de Columbia Británica, con sede en Vancouver, Canadá; sin embargo, la corte canadiense ratificó la decisión que obligaba a México a indemnizar a METALCLAD con aproximadamente 15.5 millones de dólares (Bejarano, 2003). El 23 de octubre del 2001, el gobierno mexicano celebró un convenio general con METALCLAD, en el que se le pagaron 16'002,433 dólares como indemnización cumpliendo con lo que dictaminó el juez canadiense más los intereses acumulados. Además del pago, este convenio general estableció las condiciones de entrega del predio La Pedrera a la Comisión de Avalúos de Bienes Nacionales de la Federación y consideró un segundo convenio específico donde la Secretaría de Hacienda le otorgaría a la SEMARNAT los recursos para realizar la remediación del sitio.

En la Tabla 1 se presenta la cronología de los principales eventos en el predio La Pedrera.

FECHA	EVENTO
Agosto 1990	La SEDUE autorizó el proyecto ejecutivo para la construcción de un confinamiento controlado en el sitio La Pedrera, Guadalcázar, SLP.
Octubre 1990	Se otorgó un permiso de 120 días para operar el sitio como estación de transferencia.
Noviembre 1990	Se inició la recepción de residuos peligrosos, disponiéndolos directamente en el suelo.
Abril-julio 1991	La UASL realizó un estudio de evaluación de efectos a la salud en los trabajadores de la estación de transferencia. Los resultados indicaron que no había efectos adversos.
Mayo 1991	Los residuos almacenados se derramaron en los alrededores del predio debido a los efectos de una fuerte lluvia. Los vecinos impiden la entrada de vehículos con residuos. Se trasladaron los residuos a tres celdas de almacenamiento temporal.
Julio 1991	La empresa COTERIN adquirió la operación del predio a través de un contrato con el Ing. Aldrett.
Septiembre 1991	SEDUE realizó una visita de inspección al predio y lo clausuró temporalmente debido a algunas anomalías.
Agosto 10, 1993	La Dirección General de Normatividad Ambiental del INE autorizó a COTERIN la operación de un confinamiento controlado.
Septiembre 1993	La empresa estadounidense METALCLAD Corporation adquirió el 94% de las acciones de la empresa COTERIN.
Abril 1994	METALCLAD compró la totalidad de las acciones de la empresa COTERIN e inició obras complementarias para que la estación de transferencia funcionara como confinamiento controlado, mejorando los aspectos de control y de monitoreo ambiental.

▲ **Tabla 1.** Cronología de los principales eventos relacionados al predio de La Pedrera, municipio de Guadalcázar, SLP. (continúa ►)

FECHA	EVENTO
Mayo 1994	Se inició una auditoría ambiental que concluyó en marzo de 1995.
Octubre 1994	El municipio de Guadalcázar clausuró la obra de manera temporal por no contar con el permiso municipal de construcción.
Enero 1995	El INE concedió el permiso para la construcción de una celda adicional (macrocelda) para la disposición de los residuos.
Marzo 1995	Se programó la inauguración del confinamiento controlado para el 10 de marzo, sin embargo manifestantes lo impidieron, imposibilitando definitivamente su operación.
Noviembre 1995	METALCLAD estableció un convenio con el INE y la PROFEPA para la remediación del sitio e inició acciones para el mejoramiento ambiental de la zona.
Diciembre 1995	El municipio de Guadalcázar emitió un documento negando el permiso a METALCLAD para la construcción del confinamiento.
Septiembre 16, 1997	El gobernador del Estado de San Luis Potosí decretó la creación del Área Natural Protegida Real de Guadalcázar.
Diciembre 1997	Se realizó un estudio ambiental para determinar la movilidad de los contaminantes.
Agosto 2000	Una corte internacional dictó sentencia a favor de METALCLAD obligando al gobierno de México a indemnizar a la empresa y a adquirir el predio para realizar la remediación ambiental.
Mayo 2001	La Suprema Corte de Justicia de Columbia Británica, Canadá, ratifica la indemnización a favor de METALCLAD.
Octubre 26, 2001	METALCLAD transmitió la propiedad a título gratuito a favor del gobierno federal.
Diciembre 2001	Se celebró un convenio entre la SEMARNAT y la CONABIO para apoyar la remediación del predio La Pedrera.
Julio 2002	SEMARNAT-GTZ realizaron un estudio de diagnóstico para proponer medidas de remediación.
Octubre 2004	Se firmó un acuerdo entre las dependencias estatales y federales además se elaboró un plan de trabajo conjunto para la remediación del sitio. CENICA realizó un estudio para la evaluación de los lixiviados presentes en las celdas de confinamiento.
2005-2006	Se realizaron diversos estudios para evaluar el estado de las 3 celdas de confinamiento, incluyendo una evaluación de riesgo ambiental.
2007	Se efectuó la remediación del sitio (sistema multibarrera), buscando así su integración al área natural protegida.

GTZ = Agencia de Cooperación Técnica de Alemania, por sus siglas en alemán.

▲ *Tabla 1. Continuación.*

3. Caracterización ambiental

Entre los años 1994 y 2006 se realizaron varios estudios para evaluar el estado de las celdas de confinamiento así como el grado de contaminación de los medios circundantes.

3.1. Características de los residuos de las celdas de confinamiento

De noviembre de 1990 a abril de 1991, la estación de transferencia de residuos La Pedrera recibió materiales de 74 empresas y de 49 municipios de todo México. La recepción de los residuos se documentó en bitácoras manuales que contenían registros con fecha de recepción, nombre del generador, ciudad de procedencia, número de la licencia, nombre del residuo, su estado físico, su volumen o peso, tipo de envase y

cantidad de tambores. Sin embargo, muchos de los registros estaban incompletos por lo que eran poco confiables, sobre todo en lo referente al volumen, peso y tipo de envases.

Según éstos, la mayoría de los residuos fueron recibidos en tambores de 200 litros o a granel, también se reportaron residuos recibidos en costales, cajas, sacos, cubetas, porrones y otras denominaciones. Se registraron como residuos los envases vacíos de agrotóxicos, plaguicidas, a los cuales no se atribuyeron pesos o una verificación de su contenido.

De acuerdo con los datos de las copias de las bitácoras mencionadas y de otros estudios realizados, se estimaron aproximadamente 21,024 ton de residuos, de las cuales 10,893 ton se recibieron a granel y 10,131 ton en tambores de 200 litros (52,643 tambores). En total se inventariaron 65 tipos de residuos. En la Figura 10 se muestran únicamente los más importantes. La celda 1 recibió la mayor cantidad de residuos a granel.

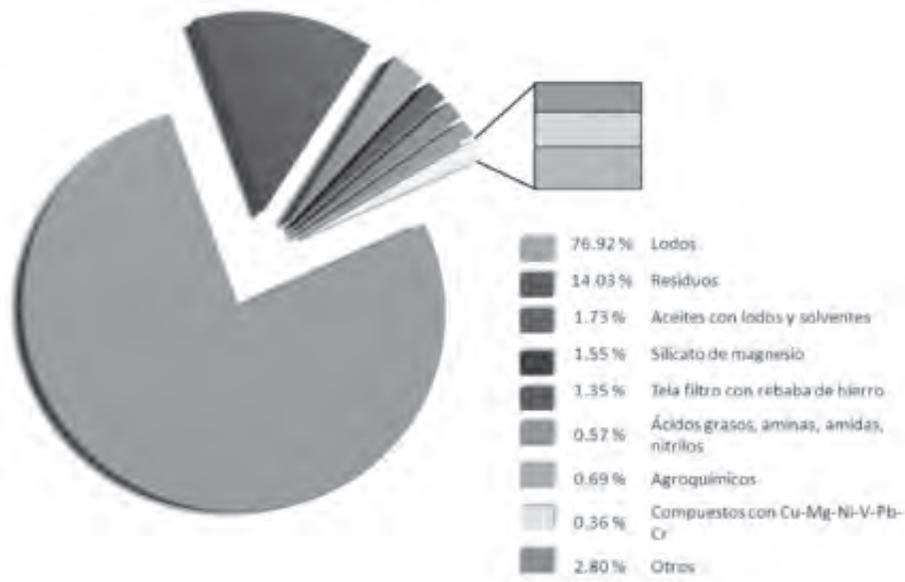


Figura 10. Principales tipos de residuos encontrados en las celdas de confinamiento⁴.

4. Los lodos son principalmente de plantas de tratamiento de agua potable, de lagunas de oxidación, de salmueras, de procesos de fundición y otros conteniendo sustancias tóxicas (por ejemplo, cromo, cianuro, sulfato de calcio, carbamatos). Los residuos incluyen materiales de desecho de pilas, medicamentos, asbestos, ácido acético, fenol, piridina, pintura, polímeros, polioli, resinas sintéticas fenólicas, entre otros.

3.2. Lixiviados, niveles de explosividad y radiación en las celdas de almacenamiento temporal

Debido al manejo inadecuado de las celdas de confinamiento por años, existía la constante preocupación por conocer el estado en que se encontraban. Durante la auditoría ambiental realizada por órdenes de la delegación de la PROFEPA del estado de San Luis Potosí entre 1994 y 1995 (RADIAN, 1995), en el estudio de evaluación de la situación ambiental en La Pedrera del año 1997 para determinar la movilidad de los contaminantes (RADIAN, 1997), se tomaron muestras de los lixiviados presentes dentro de las celdas de confinamiento. En el 2002 y 2004, se realizaron otros dos estudios de evaluación con miras a proponer estrategias de remediación; el primero realizado por Hilmer (2002)

mediante un convenio entre la SEMARNAT y la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ, por sus siglas en alemán) y el segundo, realizado por el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA), (CENICA, 2004).

Estos confirmaron la presencia de lixiviados dentro de las celdas 2 y 3, así como debajo de la celda 1, con altas concentraciones de algunos compuestos orgánicos y de metales (Figuras 11 y 12, que muestran únicamente los promedios de los estudios de RADIAN y del CENICA). Sin embargo, los demás parámetros de contaminación no eran significativos; incluso, el estudio de Hilmer (2002) mostró que los niveles de compuestos orgánicos volátiles (COV) estaban por debajo de los estándares alemanes de concentraciones máximas en locales de trabajo.

Se tomaron mediciones de explosividad en los pozos de monitoreo y de venteo. Se confirmó que la celda 1 no tuvo valores de explosividad, pero sí de riesgo en las celdas 2 y 3 —además de tener tirantes mayores a medio

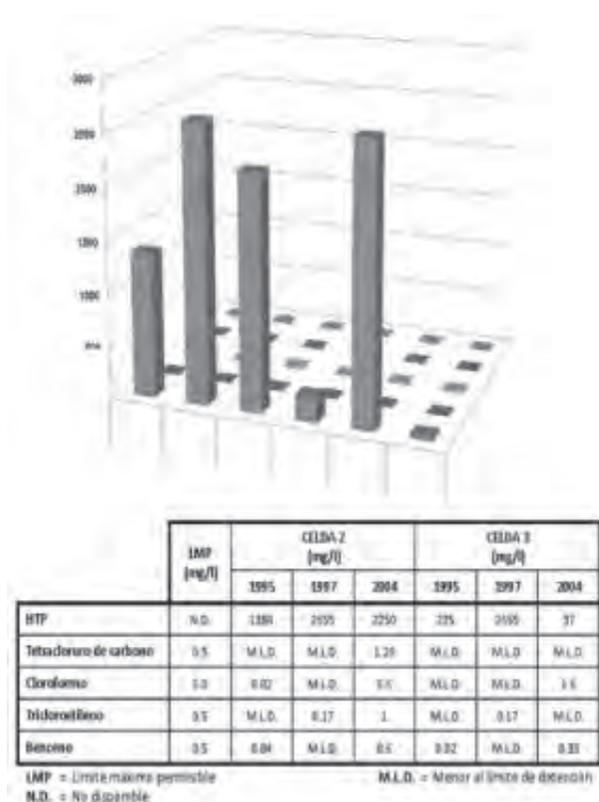


Figura 11. Comportamiento de las concentraciones de compuestos orgánicos en los lixiviados de las celdas 2 y 3. Los datos de 1995 corresponden al estudio de RADIAN (1995), los de 1997 al estudio de RADIAN (1997) y los de 2004 a los estudios del CENICA (2004).

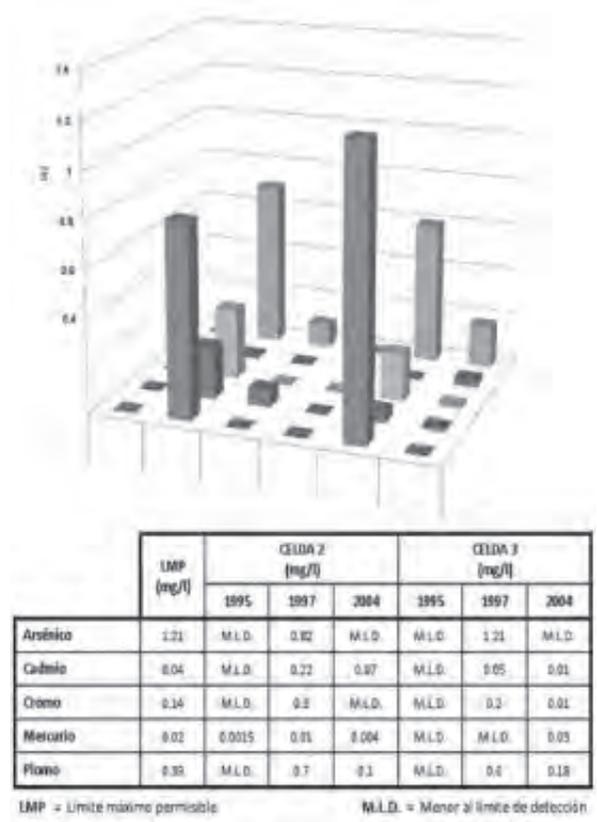


Figura 12. Comportamiento de las concentraciones de metales en los lixiviados de las celdas 2 y 3. Los datos de 1995 corresponden al estudio de RADIAN (1995), los de 1997 al estudio de RADIAN (1997) y los de 2004 a los estudios de CENICA (2004).

metro de lixiviados con concentraciones elevadas de algunos compuestos orgánicos volátiles— en algunos puntos (>60%), sobre todo cuando se registran las mayores temperaturas, entre las 13 y 15 horas del día (Figura 13). En la celda 3 se obtuvieron los mayores valores.

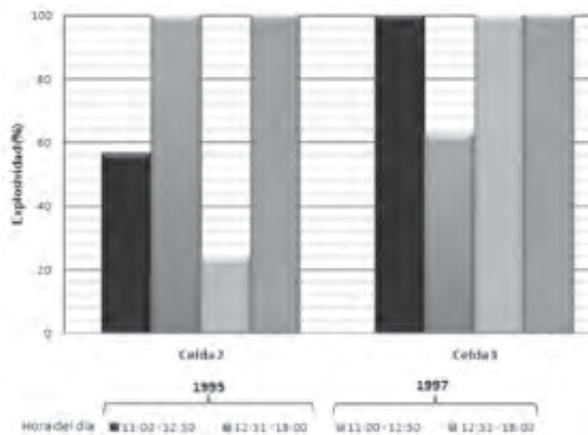


Figura 13. Comportamiento de los valores de explosividad en las celdas 2 y 3. Los datos de 1995 corresponden al estudio de RADIAN (1995) y los de 1997, al estudio de RADIAN (1997).

En 1996, 1997 y 2006 se midieron los niveles de radiación dentro del predio. Los tres estudios concluyeron que los residuos no contenían materiales radiactivos, ya que los niveles medidos sobre y alrededor de las celdas de confinamiento, dentro de los pozos de monitoreo y en los lixiviados, se encontraban dentro de los valores de fondo, sin representar un riesgo a la salud. Los niveles más altos se hallaron en la celda 3, pero sin rebasar los niveles naturales del área.

3.3. Suelo y agua subterránea en las zonas de almacenamiento temporal y en las celdas de confinamiento

En el estudio de evaluación de la situación ambiental realizado en 1997 se diagnosticaron las dos áreas de suelo contaminado sobre las cuales se colocaron los residuos recibidos en 1990 y en 1991, ubicadas al Este y Oeste de las celdas de confinamiento construidas por METALCLAD, zonas de almacenamiento temporal (Figura 4). También se incluyeron el suelo alrededor de estas celdas de confinamiento, los sedimentos del arroyo

La Pedrera y el agua subterránea de algunos pozos ubicados aguas abajo.

Para la identificación de las áreas afectadas se usaron fotografías históricas y los informes de la auditoría de 1995, en la que se advirtió evidencia de derrames y de residuos sobre el suelo natural, las cuales fueron corroboradas durante la visita de campo realizada en el estudio de 1997. En la zona de almacenamiento temporal Oeste se ubicaron nueve puntos de muestreo, tomándose en cada punto muestras a dos profundidades (0.0 - 0.1 m y 0.4 - 0.5 m). En la zona Este en cinco puntos a las mismas profundidades que en la zona Oeste. Asimismo, se consideró un punto "blanco" para determinar la concentración de fondo del sitio. Esta se tomó fuera de las instalaciones, en dirección sur. En la Tabla 2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para los principales contaminantes encontrados.

El suelo de las zonas donde se dispusieron los residuos presentaba concentraciones de metales (arsénico, cadmio, cromo total, mercurio, níquel y plomo), HTP y tetracloruro de carbono entre 3 y 7m de profundidad. El tetracloruro de carbono solo estuvo presente en tres de las 26 muestras analizadas, con concentraciones por debajo de 3.22 mg/kg. Los HTP presentaron concentraciones entre <0.1 mg/kg y 4,172 mg/kg. En el caso de los metales, el 20% de las muestras superaron los valores de fondo (punto blanco); sin embargo, el 24% se consideraron como no contaminadas, ya que cumplieron con alguna de las condiciones siguientes: la concentración difirió en menos del 10% con respecto a la concentración encontrada en el punto blanco, su concentración fue menor a la del blanco, o bien su concentración se encontró por debajo del límite de detección del método analítico.

Los resultados encontrados en ese estudio se retomaron en los años 2006 y 2007 durante la etapa de cierre técnico de las celdas de almacenamiento y, como se observa en la Tabla 2, ninguno de los contaminantes evaluados rebasó los valores de referencia nacionales e internacionales considerados en ese momento, por lo que no fue necesaria la remediación del suelo de esa área.

En cuanto a las áreas aledañas a las celdas de confinamiento, en el 2005 se realizaron estudios geofísicos con la finalidad de detectar el estado de los productos confinados, su interacción con la estructura geológica y geohidrológica, así como la dinámica de migración de la pluma contaminante hacia otros lugares fuera de las celdas. A su vez, se hicieron sondeos verticales. Los resultados mostraron que las celdas estaban cubiertas

CONTAMINANTE	ÁREA OESTE	ÁREA ESTE	BLANCO	VALORES DE REFERENCIA ⁵			
				NOM 147 ^a	NOM 138 ^b	HOLANDA ^c	RCRA ^d
Arsénico total	4.24	4.79	4.05	260	-	50	80
Benceno	< 0.01	< 0.01	N.D.	-	15	-	-
Cadmio total	1.86	1.81	1.45	450	-	20	40
Cloroformo	< 0.01	< 0.01	N.D.	-	-	3	100
Cromo total	15.76	17.86	11.35	510	-	800	400
Etilbenceno	< 0.01	< 0.01	N.D.	-	25	-	-
HTP	425.00	1,666.67	N.D.	-	6,000	-	-
Mercurio total	31.30	2.73	N.D.	310	-	10	20
Níquel total	35.55	36.99	25.95	20,000	-	500	2,000
Plomo total	36.17	54.16	25.75	800	-	600	-
Tetracloruro de carbono	1.66	1.00	N.D.	-	-	-	5
Tolueno	< 1.00	< 1.00	N.D.	-	100	-	-
Tricloroetileno	< 0.01	< 0.01	N.D.	-	-	-	-
Xileno	< 0.01	< 0.01	N.D.	-	100	-	-

N.D., No determinado. Todos los criterios de referencia son para suelo de uso industrial.

< La concentración se encuentra por debajo del límite de detección analítico.

a NOM-147-SEMARNAT/SSA I-2004 (DOF, 2007).

b NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (DOF, 2005).

c Valores de remediación de intervención⁶ de Holanda (MHPPE, 1994).

d Criterios de remediación para suelos y aguas subterráneas contaminados (RCRA, U.S. Resources Conservation and Recovery Act) (U.S.EPA, 1996).

▲ *Tabla 2* Concentraciones promedio (mg/kg) de algunos contaminantes en el suelo de las áreas de almacenamiento temporal y valores referencia nacionales e internacionales, tomados del estudio diagnóstico ambiental, sitio La Pedrera (RADIAN, 1997).

5. En 1997, cuando se realizó el estudio de evaluación de la situación ambiental por parte de la compañía RADIAN, en México no se tenían normas oficiales mexicanas (NOM) que regularan las concentraciones en suelos, por lo que en ese momento se usaron estándares internacionales como los de Holanda y EEUU. Fue hasta el año 2002 que surgió la NOM emergente NOM-EM-138-ECOL-2002 (DOF, 2002) para regular hidrocarburos en suelo, que posteriormente fue sustituida por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 en el año 2005; y en el caso de los metales fue hasta inicios de 2007 que se tuvo una NOM.

6. Los valores de intervención son valores genéricos de calidad del suelo usados para clasificar a los suelos con contaminación histórica (antes de 1987) como "seriamente contaminados" dentro del marco del Acta de Protección de Suelos de Holanda. Los primeros valores se publicaron en 1994, regulando a 70 sustancias, y se han actualizado varias veces con base en la información científica y datos de evaluación de riesgos más recientes (Lijzen et al., 2001).

con una capa de arcilla de 70 a 90 cm de espesor, y también se pudo determinar la distribución de los residuos y de diferentes materiales en las celdas (Tabla 3).

RESISTIVIDAD (Ω/m)	INTERPRETACIÓN
2	Fase líquida, incluyendo agua, de hasta 0.25 m de espesor, con diferentes intervalos de concentración.
2-5	Residuos de características líquidas, como solventes o hidrocarburos pesados, almacenados en tambores de baja densidad.
5	Tambores colapsados.
6	Residuos de metalurgia dispuestos a granel.
6-8	Residuos diversos dispuestos a granel
8	Residuos con baja degradación dispuesto a granel.
12-14	Suelos compuesto por limos y arenas compactados a 80% de prueba proctor. Suelos limo-arenosos con interdigitaciones de gravas.
16-18	Suelos limos arcillosos con lentejones de arena y grava con alta permeabilidad.
50-60	Secuencia de rellenos y suelos alterados, donde predominan limos, arcillas y arenas de alta permeabilidad.

▲ **Tabla 3** Interpretación de los estudios geofísicos en las celdas de confinamiento.

El estudio de RADIANT (1997) señaló que el suelo del perímetro de la celda 3 presentaba concentraciones de tetracloruro de carbono pero su concentración no excedía los valores de referencia considerados (5 mg/kg; U.S.EPA, 1996). También se observó la presencia de hidrocarburos inferior a los niveles establecidos en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

En el año 2006, como parte de la preparación para la remediación del sitio, la SEMARNAT solicitó la elaboración de un estudio ambiental y geológico para el muestreo y análisis de los suelos subyacentes al fondo de las celdas 1, 2 y 3 (realizado por Benavente-Leija, 2006). En ese estudio se tomaron núcleos del concreto del piso de las celdas (Figura 14), y en el suelo subyacente se tomaron muestras para el análisis de contaminantes cuyos resultados se usarían en la elaboración del estudio de riesgo ambiental (ver sección de riesgo ambiental).



▲ **Figura 14.** Núcleos de concreto extraídos del fondo de las celdas de confinamiento en el año 2006 (Fuente: SEMARNAT).

Se eligieron las partes norte y central de las celdas para adquirir los núcleos de concreto, pues se tenían las mejores condiciones de trabajo para esta actividad. Fue necesario extraer los lixiviados que se encontraban en el interior de las celdas mediante una bomba sumergible. Los núcleos permitieron corroborar la composición de la estructura de las celdas como se indica en la Figura 6, con la salvedad de que en ninguno de los casos fue posible verificar la presencia de liner o membrana. Una vez extraídos los núcleos de concreto se realizaron pruebas para determinar el coeficiente de permeabilidad (k) así como la toma de muestras de suelo para elaborar el análisis de contaminantes y su clasificación mediante el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS). Culminado este proceso se sellaron las perforaciones, usando concreto simple con resistencia nominal a la compresión (f'c) de 200 kg/cm². En la Tabla 4 se presentan los resultados.

Respecto al agua subterránea, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México realizó el estudio "Aspectos geohidrológicos e hidrológicos de La Pedrera" (Cruickshank, s/a), en el cual se identificó que el confinamiento descansa sobre suelo poco permeable seguido de un paquete de arcilla (40–50 m) bajo el cual se encuentra un depósito de boleas de calizas permeables sin agua. A estos estratos les sigue una formación de lutitas impermeables (Formación Cárdenas) y más abajo se encuentran las calizas de la Formación Abra, que es compacta y de enorme espesor.

Por lo anterior se concluyó que la contaminación de los cuerpos de agua subterránea era remota y que la contaminación de los cuerpos de agua superficiales se podía evitar con obras de desvío de cauces y muros de protección.

Asimismo, un estudio realizado por la CONAGUA (Chávez, s/a) señaló que el Valle de la Pedrera no es receptora importante de recarga. En el área existen acuíferos profundos ubicados a más de 350 m, que

se encuentran protegidos por una barrera natural de material impermeable y que, en caso que se dieran eventos contaminantes, su gran tamaño podrían diluirse las concentraciones de las sustancias derramadas.

También se señaló que en el área no existen acuíferos someros y por lo tanto la zona seleccionada para ubicar el confinamiento de La Pedrera era apta desde el punto de vista hidrológico.

CELDA	PERMEABILIDAD K (cm/s)	CLASIFICACIÓN SUCS	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)
CELDA 2 (CENTRO)						
0.00 – 0.15 m	3.06 E-03	GP - GM	8.26	23.83	19.83	4.00
0.15 – 0.40 m		GP	6.95	24.90	19.90	5.00
0.40 – 0.60 m		GP - GM	4.11	26.85	20.85	6.00
0.60 – 0.80 m		ML				
CELDA 2 (NORTE)						
0.00 – 0.35 m	1.19 E-05	GP	5.36	23.83	19.83	4.00
CELDA 3 (CENTRO)						
0.00 – 0.20 m	3.03 E-04	GP -GM	6.69	23.83	19.83	4.00
0.20 – 0.55 m		GC - GM	9.41	23.97	19.97	4.00
CELDA 3 (NORTE)						
0.00 – 0.15 m	6.90 E-04	SP - SM	9.09	23.83	19.83	4.00
0.15 – 0.30 m		GW - GM	9.20	24.90	19.90	5.00
0.30 – 0.66 m		GW - GM	9.22	26.85	20.85	6.00
SUCS = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos			ML = Limo de baja plasticidad			
GC = Grava arcillosa			SM = Arena limosa			
GM = Grava limosa			SP = Arena mal graduada			
GP = Grava mal graduada						
GW = Grava bien graduada						

▲ *Tabla 4. Características físicas del suelo obtenido del fondo de las celdas de confinamiento.*

4. Evaluación de riesgo ambiental

Dentro de los estudios previos a la remediación del sitio, en octubre del 2006 la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, contratada por la Agencia de Cooperación Técnica Alemana, GTZ, realizó una Evaluación de Riesgo Ambiental en La Pedrera (Díaz-Barriga y Torrez-Dosal, 2006). Puesto que se deseaba evaluar el riesgo de las celdas de confinamiento, en esa investigación se consideró la exposición a los contaminantes presentes en el suelo subyacente a las celdas. Con este propósito se usaron las concentraciones máximas de las sustancias encontradas en las muestras obtenidas por el M. en I. Javier Benavente-Leija (Benavente-Leija, 2006; ver sección anterior) y que fueron analizadas por los Laboratorios ABC, Química, Investigación y Análisis, S.A. de C.V. Las vías de exposición abordadas fueron la ingestión de suelo y la inhalación de vapores. Se observó como poco probable que la población fuera expuesta a los compuestos orgánicos volátiles (COV) provenientes de los lixiviados que se encontraban en el aire de las celdas, ya que para las obras de remediación se tomaron en cuenta controles para la emisión de vapores (ver la sección de tecnología de remediación); sin embargo, se evaluó esa vía, como un escenario extremo de exposición.

La ruta de migración al agua subterránea, y por ende su ingestión o contacto dérmico, se descartó debido a la distancia a la que se encuentra el agua subterránea y la baja permeabilidad del subsuelo en esa área (ver sección de caracterización ambiental).

4.1. Selección de los contaminantes críticos

Aquí se presenta un resumen de los criterios de evaluación y las ecuaciones usadas para la caracterización del riesgo.

Puesto que los análisis de las muestras obtenidas en el subsuelo de las celdas de confinamiento indicaron la presencia de varias sustancias, se hizo una selección de sustancias críticas o de interés especial, que son aquellas retenidas para realizar la caracterización del riesgo.

Existen varios criterios para la selección de sustancias críticas, la comparación con niveles de fondo, niveles de referencia nacionales, niveles de referencia internacionales, factores de bioacumulación, etcétera [ver SEMARNAT (2006), OPS (2005)]; en este caso se realizó comparando las concentraciones máximas encontradas en el suelo con valores de referencia.

Los valores de referencia usados fueron los existentes en las NOM; en los casos no cubiertos por los estándares nacionales, se usaron criterios internacionales, la Guía Canadiense y los valores denominados pauta de evaluación de medios ambientales (PEMA o EMEG⁸ por sus siglas en inglés) propuestos por la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de los Estados Unidos de América (ATSDR por sus siglas en inglés). Se clasificaron como contaminantes críticos aquellos que rebasaron los valores de referencia.

El cálculo de la PEMA se obtuvo aplicando la ecuación:

$$PEMA = \frac{NRM \text{ o } DRf \times PC}{TI}$$

Donde:

PEMA = Pauta de evaluación de medios ambientales (mg/kg)⁹.

NRM = Nivel de riesgo mínimo (MRL por sus siglas en inglés) propuesto por la ATSDR (específico de la sustancia) (mg/kg·d)¹⁰.

DRf = Dosis de referencia propuesta por le U.S.EPA (específica de la sustancia) (mg/kg·d) .

PC = Peso corporal [10 kg infante, 14 kg niño (3-6 años), 70 kg adultos].

8. EMEG (Environmental Media Evaluation Guide) es la concentración de un contaminante en el agua, el suelo o el aire, que es poco probable esté asociada con cualquier riesgo apreciable de efectos deletéreos no cancerosos, durante una duración de exposición determinada. La EMEG se deriva usando los niveles de riesgo mínimo de la ATSDR, tomando en cuenta pesos corporales y tasas de ingesta, ambos por defecto. La EMEG se calcula por separado para exposiciones agudas (<14 días), intermedias (15-364 días), y crónicas (>365 días) (ATSDR, 2008).

9. NRM para diferentes sustancias pueden consultarse en ATSDR (2010).

10. Dosis máxima que se considera que no produce efectos adversos, obtenida con base en estudios con animales de laboratorio o epidemiológicos. Puede consultarse en IRIS (2010).

TI = Tasa de ingestión diaria de agua (1 l/d niño, 2 l/d adulto), Tasa de ingestión diaria de suelo (350 mg/d niño, 50 mg/d adulto), Tasa de ingestión diaria de polvo (35 mg/d niño, 5 mg/d adulto).

En general, para calcular la PEMA no se usan factores de modificación de la exposición como el índice de biodisponibilidad¹¹. Por lo tanto, la PEMA es un factor conservador que busca prevenir el máximo riesgo y por ello no debe utilizarse como norma ambiental (OPS, 2005).

En la Tabla 5 se muestran las concentraciones máximas encontradas en las muestras extraídas del subsuelo de las

celdas de confinamiento en el estudio de Benavente-Leija (2006) y los valores de referencia con los cuales se contrastaron esos valores.

Como se observa en la tabla, sólo el tolueno rebasó alguno de los valores de referencia de acuerdo con la Guía Canadiense, por lo que fue el único compuesto clasificado como contaminante crítico para realizar la caracterización del riesgo. Los demás compuestos se descartaron como contaminantes críticos o de interés especial, ya no hubo necesidad de realizar los cálculos de riesgo para las 19 sustancias reportadas, reduciendo el tiempo de investigación y el número de cálculos necesarios en la etapa de caracterización del riesgo.

COMPUESTO	VALOR MÁXIMO (mg/kg)	NOM-138-SEMARNAT/SS-2003* (mg/kg) ^a	GUÍA CANADIENSE* (mg/kg) ^b	PEMA (mg/kg) ^c
Acetona	ND	-	-	36,000
Fenol	-	-	3.8	12,000
2-metilfenol	-	-	-	2,000
3-metilfenol	-	-	-	2000
2,4,5-triclorofenol	-	-	-	4,000
2,4,6-triclorofenol	-	-	5.0	-
2,3,4,6-tetraclorofenol	-	-	5.0	1,200
Pentaclorofenol	-	-	7.6	1,200
Tolueno	1.12**	100	0.8	3,200
Etilbenceno	0.25	25	20	4,000
Xileno	2.49	100	20	8,000
Bis-2-(etilhexil)ftalato	14.59	-	-	800
Tetracloroetileno	-	-	0.6	400
Arsénico	-	-	12	12
Cadmio	0.18	-	22	20
Cromo hexavalente	2.36	-	87	120
Mercurio inorgánico	0.12	-	50	12
Níquel	5.07	-	50	800
Plomo	-	-	600	-

* Uso de suelo principalmente industrial.

^a Al momento de la evaluación no se había publicado la NOM para normar metales en suelo.

^b CCME (2002).

^c Considerando un peso corporal de 14 kg y una tasa de ingestión de suelo de 350 mg/día.

** Compuestos que rebasaron alguno de los valores de referencia.

▲ **Tabla 5.** Análisis de los contaminantes encontrados en el suelo obtenido por debajo de las celdas de confinamiento

11. Fracción o porcentaje de un compuesto que es ingerido, inhalado o aplicado a la superficie cutánea que alcanza la circulación sistémica; representa sólo una porción de la dosis administrada, por lo que su aplicación permite estimar valores más precisos y menos restrictivos de riesgo.

Generalmente se encuentran mezclas de decenas de sustancias y es preciso hacer una selección adecuada, rara vez se encontrará en un sitio contaminado un sólo compuesto o sustancia tóxica. De aquí la importancia de realizar esta actividad en la evaluación.,

4.2. Estimación de la exposición

En esta etapa de la evaluación se buscó conocer de forma aproximada la dosis de contaminante (tolueno) absorbida por el individuo expuesto.

Para el caso de la ingestión de suelo, los receptores considerados fueron los trabajadores que laborarían en el sitio durante las obras de remediación. Si bien la presencia de infantes en el área era poco probable, ya que se sabía que el área sería restringida y el uso de suelo permanecería como industrial, por seguridad se evaluó también la exposición a este grupo de la población.

La estimación de la dosis de exposición oral se obtuvo a través de fórmula:

$$D = \frac{C \times TI}{PC} \times FE$$

Donde:

D = Dosis de exposición que está estimándose (mg/kg·d)

C = Concentración del contaminante en el suelo (mg/kg) = 1.12 mg/kg para tolueno

TI = Tasa de ingestión diaria del medio, suelo (350 mg/d niño, 50 mg/d adulto) (para el caso de suelo y polvo la TI se multiplica por 1E-6 kg/mg como factor de conversión)

PC = Peso corporal (10 kg infante, 14 kg niño [3-6 años], 70 kg, adulto)

FE = Factor de exposición (adimensional, 1)¹²

Dosis de tolueno para infante para la vía oral:

$$D = \frac{C \times T \times FE \times IE - 6}{PC} = \frac{1.12 \frac{mg}{kg} \times 350 \frac{mg}{día} \times 1E - 6}{10 \text{ kg}} = 3.92E - 5 \frac{mg}{kg} \times día$$

Dosis de tolueno para adulto para la vía oral:

$$D = \frac{C \times T \times FE \times IE - 6}{PC} = \frac{1.12 \frac{mg}{kg} \times 350 \frac{mg}{día} \times 1E - 6}{70 \text{ kg}} = 5.6E - 6 \frac{mg}{kg} \times día$$

Para la vía de inhalación de vapores, la caracterización del riesgo se hizo en función de las concentraciones y no de la dosis de exposición, por esta razón no se presentan los cálculos de dosis para ese medio. En este caso se midieron concentraciones de COV en las celdas de confinamiento y para efectos de esta evaluación se consideró que el tolueno constituía a la totalidad de los COV medidos, tomándose para la caracterización del riesgo la concentración máxima encontrada, correspondiente a la celda 2 (1,987.5 mg/m³).

4.3. Caracterización del riesgo

El tolueno no se considera cancerígeno para el humano, por lo tanto, la caracterización del riesgo se realizó únicamente para efectos adversos no cancerígenos. En el caso de la exposición oral, la U.S.EPA indica que los efectos asociados a la exposición de este compuesto están relacionados a la toxicidad renal y hepática, mientras que para la vía inhalatoria, se han observado efectos neurotóxicos en trabajadores ocupacionalmente expuestos.

La caracterización del riesgo se realizó a través del cociente de peligro, a veces denominado cociente de riesgo¹³:

$$CP = \frac{D}{NMR \text{ o } DRf} \text{ o } \frac{C}{CRf}$$

Donde:

CP = Cociente de peligro (adimensional)

D = Dosis de exposición (mg/kg·d)

NRM = Nivel de riesgo mínimo (específico de la sustancia) (mg/kg·d)

DRf = Dosis de referencia (específica de la sustancia) (mg/kg·d)

12. Puede incluir datos de biodisponibilidad, absorción y/o temporalidad, los cuales pueden provenir de la literatura científica o ser estimados específicamente para el sitio. En este caso no se consideraron factores de compensación de este tipo y por eso este factor tuvo un valor igual a la unidad.

13. Para el caso de las sustancias cancerígenas se obtienen valores de Riesgo (probabilidad de desarrollar cáncer) en lugar de CP, multiplicando la dosis o concentración de exposición por un valor de potencia, denominado factor de pendiente de cáncer [FPC; consultar IRIS (2010)].

C = Concentración de exposición (mg/m³ de aire)
CRf = Concentración de referencia (específica de la sustancia) (mg/m³ de aire)¹⁴

El CP es un estimado de riesgo que se aplica a sustancias no cancerígenas. Si el CP > 1 indica que la dosis o concentración de exposición superó el valor de referencia considerado seguro y por lo tanto es posible que se desarrollen efectos adversos relacionados a la sustancia. Entre más alto es el CP, mayor es la posibilidad de que se desarrollen los efectos.

Las dosis y concentración de referencia para tolueno se obtuvieron de la base de datos IRIS¹⁵. En la Tabla 6 se presentan los cocientes de peligro (CP) tanto para la vía oral como la inhalatoria.

Los resultados de la Tabla 5 indicaron que de ocurrir la ingestión de suelo contaminado con tolueno (lo cual además es muy poco probable) no representaría riesgo alguno (CP < 1).

En el caso de la vía inhalatoria, si los trabajadores inhalaran el aire contenido en las celdas, se rebasaría 397 veces la concentración de tolueno considerada como segura, por lo que se recomendó la eliminación de la fuente de contaminación, los lixiviados contenidos en las celdas

de confinamiento, y el uso de equipo de protección para los trabajadores que estarían involucrados en las obras de remediación.

El estudio de evaluación de riesgo ambiental junto con el estudio ambiental y geológico del subsuelo de las celdas, ambos realizados en el año 2006, contribuyeron a concluir que la construcción de las celdas evitó la contaminación del subsuelo por lixiviados— pese a que en ellos se encontraron concentraciones relativamente altas de contaminantes — su concentración en el suelo ubicado bajo las celdas fue baja y casi inocua. Ninguno de los contaminantes encontrados en el suelo superó las PEMA calculadas y las NOM existentes en ese momento, tan sólo el tolueno superó los valores de la Guía Canadiense, cuyos valores de riesgo fueron aceptables.

Con base en los resultados se recomendó la eliminación de los lixiviados existentes en las celdas de confinamiento evitándose la entrada de agua a las celdas. Para ello se propuso el recubrimiento de las mismas mediante el uso de la tecnología más adecuada para un ambiente semidesértico, que en los últimos años vio incrementado el aporte de lluvias torrenciales, poca lluvia al año pero de alta intensidad. La tecnología debía contemplar el venteo controlado de gases a fin de eliminar al máximo posible la presencia de volátiles.

RECEPTOR Y VÍA DE EXPOSICIÓN	DOSIS (mg/kg · día) o CONCENTRACIÓN (mg/m ³) DE EXPOSICIÓN ESTIMADA	DRf (mg/kg · día) o CRf (mg/m ³)	CP (ADIMENSIONAL)
Infantes, ingestión de suelo	3.9 E-5 mg/kg · día	0.08 mg/kg · día	4.8 E-4
Adultos, ingestión de suelo	5.6 E-6 mg/kg · día	0.08 mg/kg · día	7.0 E-5
Adultos, inhalación de vapores	1,987.5 mg/m ³	5.0 mg/m ³	397.5

DRf = Dosis de referencia
 CRf = Concentración de referencia
 CP = Cociente de peligro

▲ **Tabla 6.** Cocientes de peligro estimados para tolueno a partir de las dosis y concentraciones de exposición máximas evaluadas.

14. Concentración máxima de una sustancia en el aire para la que no se esperan efectos adversos. Se obtiene de estudios con animales de laboratorio o epidemiológicos. Pueden consultarse en IRIS (2010).

15. La base de datos IRIS es actualizada cada cierto tiempo de acuerdo con la información científica que se va generando. Los valores que se muestran en la Tabla 5 son los que estaban vigentes en el año que se realizó la evaluación (2006).

5. Selección y aplicación de la tecnología de remediación

En octubre del año 2001 el Gobierno de México adquirió la propiedad del predio La Pedrera, las autoridades competentes iniciaron las acciones de remediación que concluyeron con las obras de construcción del sistema multibarrera sobre las celdas de confinamiento del sitio.

La primera acción que emprendió el gobierno mexicano para la remediación del sitio fue solicitar a la Agencia de Cooperación Técnica Alemana, GTZ, un estudio (Hilmer, 2002) en el cual se presentó una propuesta técnica para el confinamiento seguro de los residuos industriales en La Pedrera. La GTZ evaluó toda la documentación existente y realizó una verificación en el sitio; con base en esto propuso tres alternativas de remediación:

1. Transferencia de los residuos peligrosos a un sitio de confinamiento autorizado (CIMARI¹⁶) y tratamiento de los medios afectados con la tecnología adecuada.
2. Transferencia los residuos y el suelo afectado a la macrocelda, adecuándola con membrana y cubriéndola además con un sistema multibarrera. Esta alternativa contemplaba también el tratamiento de los residuos.
3. El encapsulamiento de las celdas 1, 2 y 3, considerando una cobertura (sistema multibarrera) para impedir el ingreso del agua de lluvia, la extracción de los gases y su tratamiento y el bombeo de los lixiviados a un sistema de tratamiento instalado en el local. Además, esta opción incluía un plan de monitoreo ambiental.

Con base en el análisis costo-beneficio, se consideró que la primera opción era inviable, además de ser extremadamente cara, se estaría transfiriendo el problema de un sitio a otro. Se determinó la necesidad de contratar personal altamente calificado y capacitado para excavar, remover e identificar cada uno de los residuos mediante un análisis químico, dar el tratamiento y el envase adecuados; previamente a estas actividades se contempló la extracción y tratamiento de gases con carbón activado, así como el bombeo y tratamiento de los lixiviados. En la segunda opción el costo no fue tan elevado como en la primera, ya que no se requería del transporte a

distancia; sin embargo, el costo estimado aún era alto, debido a la necesidad de sacar todos los residuos, reenvasarlos, adecuar la macrocelda y acomodar los residuos en ella y finalmente cubrirla con un sistema multibarrera e instaurar un sistema de monitoreo. La tercera opción se calificó como la mejor, pues se podía aprovechar la estructura ya existente en las celdas de confinamiento además, en caso de necesitarse el reenvasado de los residuos, el transporte sería mínimo y se obtendría una seguridad de más de 100 años, de acuerdo a los estándares técnicos actuales.

Posteriormente, la SEMARNAT solicitó un estudio denominado "Bases técnicas para la remediación del sitio La Pedrera, Municipio de Guadalcázar, Estado de San Luis Potosí", realizado por Schmidt y Oestreich en el 2005. En ese documento se retomaron los estudios realizados hasta ese momento en La Pedrera, principalmente los resultados obtenidos por RADIANT (1995), RADIANT (1997) y Hilmer (2002); con base en ellos se propusieron lineamientos básicos para las licitaciones de remediación del sitio, considerando el uso de la macrocelda existente como receptáculo final de los residuos contenidos en las tres celdas de confinamiento, cuidando el cumplimiento de las normas mexicanas e internacionales. Schmidt y Oestreich (2005) detallaban los procesos de apertura de las celdas de confinamiento, la extracción de los residuos, su clasificación y tratamiento, al igual que para los lixiviados y gases contenidos en las mismas. Por otra parte especificaban la cubierta multibarrera y el sistema de monitoreo.

Con el estudio antes mencionado del 2005 y el propuesto por Hilmer en 2002, el Gobierno de México diseñó en el 2006 el proyecto ejecutivo para el cierre técnico de las celdas.

El 2 de febrero del 2006 se lanzó la convocatoria para la licitación nacional de una serie de trabajos previos a la remediación, entre los que se encontraban la excavación de las celdas, la extracción de los residuos y su transferencia a tambores en buen estado. El fallo se emitió el 28 de febrero del 2006 a favor de la empresa Entalpía Construcciones S.A. de C.V. Estas obras se iniciaron el día 6 de marzo y concluyeron el 25 de mayo

16. Centro Integral de Manejo, Tratamiento, Aprovechamiento y Disposición Final de Residuos Industriales y Peligrosos.

del 2006. Esta fase fue una apreciación preliminar, teniendo como objetivo sentar las bases para evaluar el daño sufrido por la presencia de residuos peligrosos así como establecer las primeras acciones para la remediación. Los trabajos fueron supervisados por la Dirección de Restauración de Sitios Contaminados de la SEMARNAT, en coordinación con la delegación de esta secretaría en SLP y la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental del gobierno estatal.

Es importante mencionar que el 14 de marzo del 2006, la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental de SLP, modificó la declaratoria de Área Protegida Real de Guadalcázar a la modalidad de Reserva Estatal, con lo que se corrigió y delimitó nuevamente el área, excluyendo el predio La Pedrera, además se hizo el cambio de uso de suelo para realizar su remediación y su incorporación a procesos productivos.

La excavación de las celdas (Figura 15) se hizo con el propósito de realizar un sondeo para conocer la distribución y arreglo de los residuos peligrosos depositados tanto en contenedores como a granel. Se extrajeron porciones representativas de residuos de las celdas de confinamiento, se retiraron los residuos a granel y los tambores de 200 litros que contenían residuos. Muchos de éstos estaban en mal estado, por lo que fue necesario transferir los residuos a 872 tambores nuevos. Con este propósito se realizaron siete excavaciones con dimensiones aproximadas de 2 x 2 x 6.5 m. En las celdas 2 y 3 se realizaron tres excavaciones y una en la celda 1.

Las perforaciones se aseguraron estructuralmente mediante un ademe para evitar el derrumbe de las paredes. Después de su inspección, las celdas fueron selladas con tapas de madera y se les instaló un sistema de filtros para evitar emisiones a la atmósfera. Adicionalmente fue colocada una cerca de protección con acceso restringido. En la Figura 16 se muestra la cronología de los eventos relacionados con la remediación La Pedrera y las actividades previas a la misma.

Una vez realizadas las excavaciones se extrajeron los lixiviados del fondo de las celdas 2 y 3 mediante bombas sumergibles (la celda 1 estaba seca) y se trataron a través de la adición de coagulantes y floculantes para finalmente disponerlos en las instalaciones de la empresa Residuos Industriales Multiquim (RIMSA) con sede en Mina, Nuevo León, junto con los residuos líquidos extraídos de los tambores en mal estado (98 tambores). Este proceso concluyó en agosto del 2006. En la Figura 17 puede verse un esquema del tratamiento aplicado a los lixiviados. A diferencia de lo esperado, únicamente el 6% del total de residuos retirados se encontraron en estado líquido.



▲ **Figura. 15.** Excavaciones para retirar los residuos en las celdas de confinamiento (Fuente: SEMARNAT).



▲ **Figura. 17.** Tratamiento que recibieron los lixiviados extraídos de las celdas de confinamiento en el predio La Pedrera.

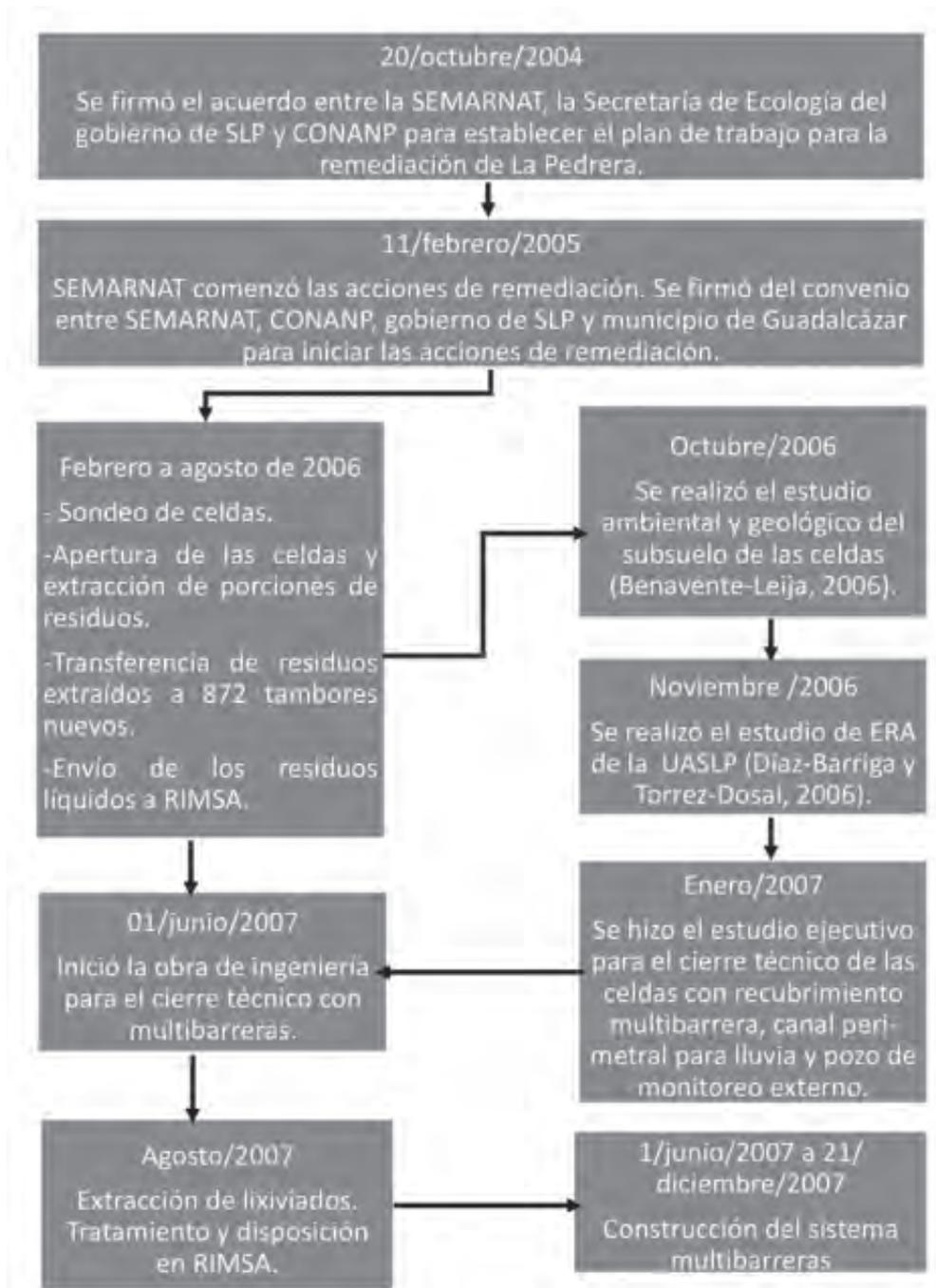


Figura 16. Cronología de las acciones emprendidas por el gobierno de México para la remediación La Pedrera (Nota: CONANP es la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas; RIMSA es la empresa Residuos Industriales Multiquim en Mina, Nuevo León).

Previo a estas actividades fue necesario realizar obras de preparación como el acondicionamiento del área de almacenamiento previo a la disposición que ya se tenía en el predio y la instalación de casetas de seguridad para las actividades de reenvasado de los residuos.

Asimismo, en el ese periodo se retiraron los vapores que contenidos en las celdas. La extracción de los COV se hizo mediante convección natural y tuberías. Los residuos se apartaron mediante grúas, llevándose a las casetas de seguridad o al área de almacenamiento temporal,



Figura 18. Excavación de las celdas de confinamiento. A) Extracción de lixiviados de las celdas. B) Tratamiento de los lixiviados. C) Extracción de vapores. D) Extracción de los residuos con grúas. E) Tambores en mal estado extraídos de las celdas. F) Reenvasado de los residuos (Fuente: SEMARNAT).

donde se reenvasaban. Los trabajadores usaron equipo de seguridad en todo momento (ver Figura 18).

Concluidos los trabajos de extracción de lixiviados y vapores, y el reenvasado de los residuos, se aprovecharon las excavaciones para tomar las muestras de concreto y suelo del fondo de las celdas de confinamiento del estudio de Benavente-Leija (2006) y también se realizó el estudio de Evaluación de Riesgo Ambiental ya mencionado (Díaz-Barriga y Torrez-Dosal, 2006). A la par de estos estudios, la SEMARNAT solicitó la realización del proyecto ejecutivo del cierre técnico de las celdas, en el cual se tomaron en cuenta las conclusiones y recomendaciones del estudio de Evaluación de Riesgo Ambiental, éstas sugerían el recubrimiento superior con el sistema multibarrera (capping), sistemas auxiliares y trabajos periféricos. El proyecto de diseño del cierre técnico de las celdas fue encomendado por la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR) de la SEMARNAT a una consultoría a cargo de la Ing. María Guerrero Landeros, el cual consideraba los siguientes puntos:

- Diseño y planos de construcción de la cubierta superior con el sistema multibarrera de las celdas 1, 2 y 3, así como el establecimiento de las especificaciones materiales.
- Diseño y planos de construcción del sistema de drenajes perimetrales a la cubierta y escurrimientos integrados al drenaje pluvial.
- Diseño y planos de construcción de los pozos del sistema de extracción de lixiviados.

- Diseño y planos de construcción de los pozos del sistema de monitoreo de gases.
- Detalle de los planos topográficos con la localización general de la obra, vista superior, perfiles y cortes.
- Manual de seguridad industrial y de protección ambiental.
- Memorias de cálculo.
- Catálogo de conceptos.

El 26 de abril del 2007 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la convocatoria para la licitación pública relacionada con “las obras de ingeniería ambiental para el cierre técnico de las celdas 1, 2 y 3, mediante un recubrimiento superior con el sistema multibarrera y sistemas auxiliares del exconfinamiento de residuos peligrosos La Pedrera, ubicado en el municipio de Guadalcázar, San Luis Potosí. Etapa final”, así como las bases para “la supervisión técnica de los trabajos de ingeniería ambiental para el cierre técnico de las celdas”. El 8 de junio de 2007 se declaró que la obra de ingeniería ambiental la ejecutaría la empresa Asesoría Técnica y Servicios Ambientales S.A. (ATSI) y en mayo de 2007 la supervisión de la misma se adjudicó a la compañía LAMY Ingeniería y Construcción S.A. Ambas se iniciaron el 1 de junio de 2007.

En la Figura 19 se muestra el diseño de la multicapa construida sobre las celdas 1, 2 y 3 del predio La Pedrera. Este diseño consideró las indicaciones propuestas por Hilmer (2002) así como por Schmidt y Oestreich (2005). En la Figura 20 se muestra un esquema general de las celdas con el sistema multicapa.

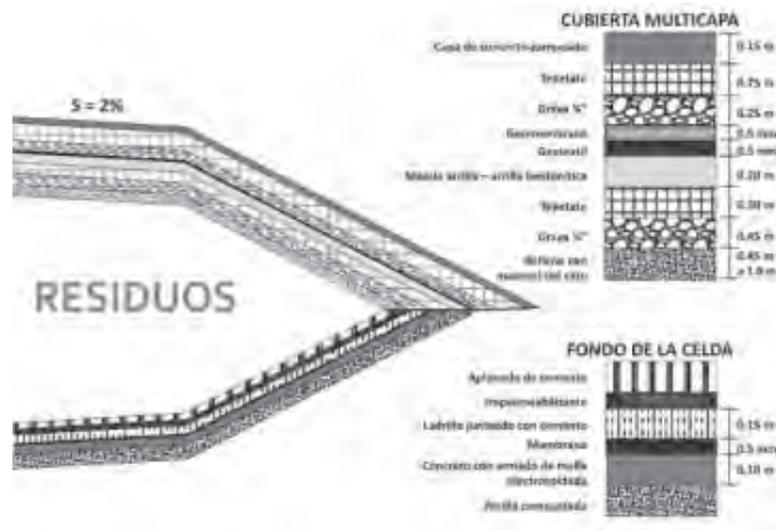


Figura 19. Diseño del sistema multicapa o multibarrera construido sobre las celdas 1, 2 y 3 del predio La Pedrera.

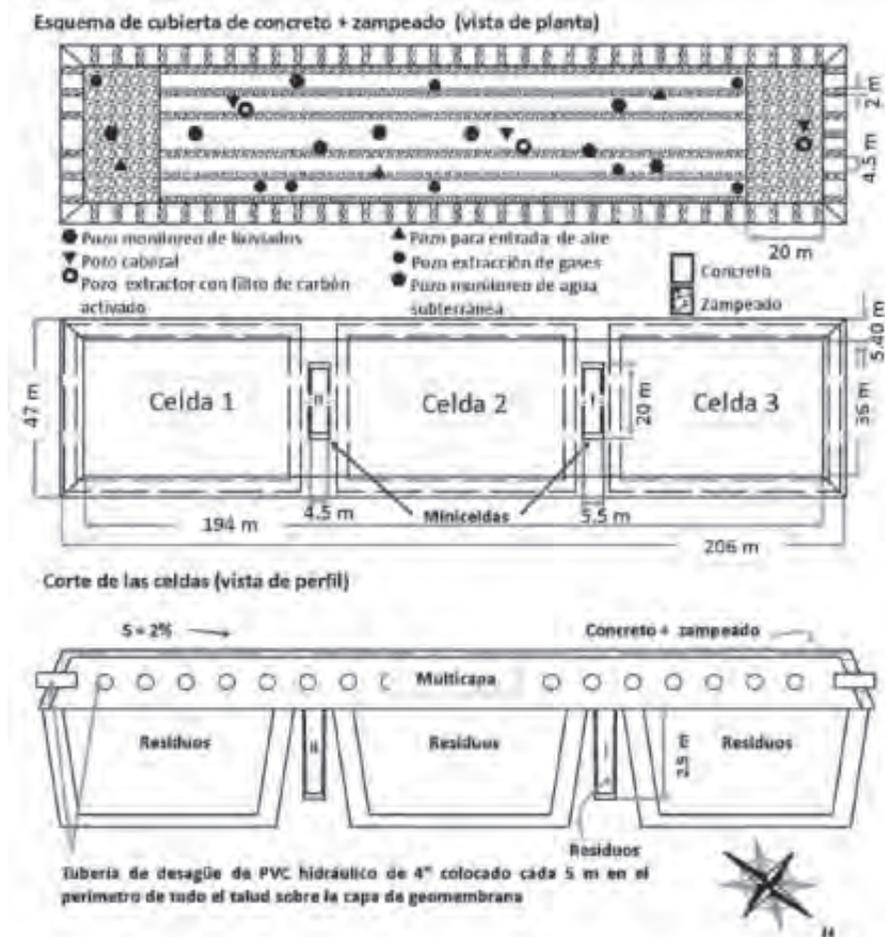


Figura 20. Esquema del sistema multicapa incluyendo la distribución de los pozos de monitoreo en el predio La Pedrera.

Como se indica en la Figura 20, además de las celdas 1, 2 y 3, se construyeron dos celdas más que recibieron el nombre de miniceldas por lo reducido de sus dimensiones. Las miniceldas, identificadas con los números romanos I y II, no estaban contempladas en el diseño original del sistema multibarrera, fueron agregadas al proyecto durante la ejecución de las obras con el propósito de confinar parte de los residuos extraídos de las celdas originales y los encontrados durante una visita técnica de supervisión. Tienen forma trapezoidal (20 m de largo x 2.50 m de alto x 5.50 m de ancho) y se les colocó una capa impermeable formada por geotextil - geomembrana - geotextil.

La minicelda I tiene capacidad para almacenar 686 tambos en dos niveles, cada uno con 343 tambos; en ella

se colocaron únicamente 439 tambos conteniendo parte de los residuos que fueron reenvasados durante las excavaciones de sondeo de las celdas 1, 2 y 3, así como suelo contaminado¹⁷. En la minicelda II se colocaron, previa estabilización, cerca de 500 toneladas de residuos encontrados en un entierro clandestino localizado en el predio durante una visita técnica realizada el 17 de agosto del 2007. Se utilizó material del sitio para la nivelación de las celdas con una pendiente longitudinal del 2%. No se dejó pendiente transversal. Las miniceldas se construyeron previas a la nivelación.

Las excavaciones realizadas durante el sondeo de las celdas se utilizaron para desplantar una tubería vertical para la conducción de lixiviados por bombeo. Se instalaron ocho pozos para la extracción de gases (tres en las

17. 260 tambos llenos al 100% conteniendo suelo contaminado (72 m³), 65 tambos llenos al 50% con suelo contaminado (18 m³) y 7 tambos con lodos (1.9 m³).

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD UTILIZADA
Relleno (nivelación)	Se utilizó material del sitio.	--
Grava ¾"	--	3,678.67 m ³
Tepetate amarillo	Permeabilidad 1x10-6 m/s, compactado al 100% de la prueba Proctor.	2,628.81 m ³
Arcilla – arcilla bentonítica	Permeabilidad 5x10-9 m/s, compactado al 100 % en una relación 1:1	676.52 ton c/u
Geotextil	--	10,653.70 m ²
Geomembrana	Polietileno de alta densidad.	10,653.70 m ²
Grava ¾"	--	2,045.98 m ³
Tepetate	Permeabilidad 1x10-6 m/s compactado al 90% de la prueba Proctor.	7,787.81 m ³
Concreto-zampeado	Piedra de la zona, acabado aparente. Junteado con mortero cemento-arena 1:5	Mortero: 1,177.55 m ³ Piedra: 2,355.69 m ³

▲ **Tabla 7.** Características de los materiales usados en el sistema multibarrera.

celdas 1 y 3, y dos en la celda 2), siete pozos para el monitoreo de lixiviados (tres en la celda 1, y dos en las celdas 2 y 3), tres pozos para entrada de aire (uno por celda), tres pozos con sistema de extracción de COV y filtro de carbón activado (uno por celda), y dos pozos de monitoreo de agua subterránea; estos últimos se colocaron desde el nivel natural del terreno hasta una profundidad de 20 m (Figura 20). Posterior al sistema de multibarrera (Tabla 7) se construyó el drenaje pluvial en el perímetro de las tres celdas, el cual es un canal de concreto reforzado con malla electrosoldada. El agua pluvial descarga en el arroyo La Pedrera.

Finalmente, después de 17 años de haberse recibido los primeros residuos peligrosos en el predio de La Pedrera, y de toda la serie de eventos adversos que desembocaron en la clausura del mismo, la obra de ingeniería para su remediación fue concluida por la empresa ATSI el 21 de diciembre del 2007 (Figura 21).

En el corto plazo se tiene contemplado para este proyecto el monitoreo de las celdas a través de la medición de gases (caracterización y determinación de flujo) y la eficiencia del carbón activado. Asimismo, queda aún pendiente el estudio de la biodiversidad en el predio y sus alrededores, el cual realizará CONABIO dentro un proyecto a nivel nacional denominado "Aspectos biológicos necesarios para la remediación y restauración ambiental (ecológica)". En este estudio se pretende la restauración biológica del sitio, incluyendo la reforestación del mismo, una vez que ha concluido la restauración no biológica, la obra de ingeniería.



▲ **Figura 21.** Vistas del sistema multibarrera construido en el predio La Pedrera. A) Colocación de las piedras para el zampeado. B, C y D) Vistas de la tubería de ventilación, desagüe y monitoreo (Fuente: SEMARNAT y GESLP, 2009).

6. Lecciones aprendidas

Después de los casi 20 años que tardó en remediarse el predio de La Pedrera, surge una pregunta: ¿Pudo haberse operado en este lugar, de manera exitosa, un confinamiento controlado? Es difícil responder a este cuestionamiento. Es bien sabido que a nadie le gustaría tener un confinamiento de residuos peligrosos en su vecindario, ya que se tiene la percepción de que se está expuesto en un riesgo inminente. Estos nunca serán eliminados totalmente, pero una selección adecuada del sitio y un diseño de ingeniería acorde a lo que indican las normas ambientales los minimizan. En Guadalcázar la selección del sitio no fue del todo acertada, pues si bien se ubica en una zona de baja precipitación pluvial, de baja permeabilidad y con un acuífero a gran profundidad, se encuentra a pocos metros de un cuerpo de agua superficial. Esta deficiencia en la elección del sitio y el mal manejo que se dio posteriormente, en parte debido a la escasez del marco ambiental nacional existente en el momento que ocurrieron los hechos, aunado a la novedad del TLC que fue aprovechada por una empresa estadounidense para demandar la indemnización debido a las pérdidas económicas por la clausura de las operaciones en el sitio.

En la actualidad, la normatividad ambiental de México ha mejorado sustancialmente, ya cuenta con trece NOM relacionadas a la caracterización, tratamiento y disposición de residuos peligrosos y de manejo especial. Pese a ello, se sigue careciendo de sitios destinados al confinamiento de este tipo de residuos, sólo se cuenta con dos CIMARI: RIMSA en Mina, Nuevo León, que inició actividades en 1993 y es operada por la empresa Residuos Industriales Multiquim S.A., y Unidad San Andrés, en Ramos Arizpe, Coahuila, que inició sus labores en 2007 y es operada por la compañía Tecnología Ambiental Especializada S.A. Entre ambas empresas se tiene una capacidad de disposición final aproximada de 684,100 toneladas de residuos peligrosos por año. SEMARNAT ha autorizado cinco proyectos más para el confinamiento de residuos peligrosos pero no están operando, por lo que es de vital importancia el consolidar los demás proyectos, para tener disponible la infraestructura para el confinamiento de residuos peligrosos que es requerida por los generadores en el país. La generación estimada es de 1'953,376 toneladas de residuos de este tipo por año (SEMARNAT, 2010). Es evidente que la capacidad instalada de confinamiento es rebasada por la cantidad de residuos producida.

Mientras el país no avance en minimizar la generación de residuos, su reciclaje y reutilización, seguirá siendo necesaria la existencia de sitios de confinamiento en mayor medida. Experiencias como la de Guadalcázar son las que provocan la renuencia de la sociedad a la existencia de este tipo de instalaciones, prefiriendo hacer ojos ciegos a la realidad, los residuos se generan y es preciso tratarlos y disponerlos en algún lugar, — de no existir sitios adecuados, se hace de manera no controlada en sitios que no están diseñados para esta actividad— aumentando el riesgo de contaminación y problemas en la salud en los habitantes que, sin saber, se encuentran próximos a estos sitios.

La forma de revertir esta actitud es devolviendo la confianza de la población en las autoridades, que en estos sucesos se logrará sólo actuando correctamente con base en el seguimiento de las leyes establecidas por las instituciones y, como se ha observado en otros casos, a través de la transparencia y comunicación que se tenga con la población, es decir, la comunicación de riesgos. Esta puede jugar un papel determinante en el éxito o el fracaso de un proyecto. La percepción de los riesgos puede divergir sustancialmente de los riesgos reales y no debe soslayarse el sentir de la población. Deben buscarse los mecanismos de comunicación que propicien el correcto entendimiento por parte de los pobladores de los problemas presentes en un sitio, los riesgos y, de existir estos últimos, la forma en que se afrontarán.

La evaluación de riesgo ambiental realizada en este caso puso de manifiesto que la comunicación de riesgos sigue siendo un área poco explotada y mal apreciada, pues mediante este estudio del 2006 se demostró que los riesgos en ese momento eran bajos y controlables, pero la población tenía la percepción equivocada, lo que era comprensible dado el historial de eventos desafortunados que sucedieron en el sitio bajo la administración de COTERIN. La empresa METALCLAD intentó realizar una campaña de comunicación de riesgos durante su gestión, sin embargo, la mala experiencia que se tuvo en el inicio del funcionamiento del sitio, basada en engaños y subterfugios legales, hizo que este esfuerzo no tuviera los resultados esperados.

Este caso es un excelente ejemplo de la necesidad de contar con acciones concertadas entre los diferentes niveles de gobierno, independientemente de la afiliación política a la que pertenezcan. Para la construcción

del confinamiento en Guadalcázar se requería de una serie de permisos que debían ser otorgados por los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal). La falta de comunicación entre ellos, particularmente del gobierno federal hacia los otros dos, tuvo como consecuencia la toma de decisiones controvertidas que contribuyeron a que la demanda que METALCLAD interpuso al gobierno federal fructificara, resultando en la indemnización de cerca de 16 millones de dólares, cantidad que tuvo que pagar el Gobierno de México.

La intención de compartir es que la experiencia obtenida en este sitio sirva para que todos los actores involucrados, empresas, contaminadores, remediadores, gobiernos municipales, estatales y federal, sociedad civil así como organismos no gubernamentales hagan conciencia de la necesidad de la existencia de los marcos regulatorios, de la comunicación y continuidad de las acciones para la solución de los problemas ambientales, más allá de partidos políticos, ideología e intereses comerciales.

Fuentes de información

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Register (2008). *“Sinopsis de la evaluación de salud pública. II. Evaluación toxicológica y de vías de exposición”*. URL: http://www.atsdr.cdc.gov/es/training/pha_professional2/module2/sv16.html (consultado en julio de 2010).

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2010). *“Minimal Risk Levels (MRLs) for Hazardous Substances”*. URL: <http://www.atsdr.cdc.gov/mrls/index.html> (consultado en julio de 2010).

Bejarano, F. (2003), *El conflicto del basurero tóxico de Metalclad en Guadalcázar, San Luis Potosí en Carlsen, L, Wise, T y Salazar, H (Coord.)* (2003), *Enfrentando la globalización: Respuestas sociales a la integración económica de México*. Primera parte: Medio ambiente, integración e inversión, Colección América Latina y el Nuevo Orden Mundial. México: Miguel Ángel Porrúa, UAZ, Global Development and Environment Institute Tufts University, Red Mexicana de Acción Frente al Libre Comercio, ISBN 970-701-332-X

Benavente-Leija, J (2006). *Estudio técnico ambiental y geológico para el muestreo y análisis físico-químico de los suelos subyacentes al fondo de las celdas 1, 2 y 3 y actividades preparatorias del confinamiento de residuos peligrosos de La Pedrera en Guadalcázar, San Luis Potosí (Informe Técnico)*, Javier Benavente Leija, Estudios de Mecánica de Suelos, Control de Calidad y Construcción en General, S.L.P.

CCME – Canadian Council of Ministers of the Environment (2002). *Canadian Environmental Quality Guidelines. Canada*.

CENICA – Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (2004). *Monitoreo y análisis de muestras de lixiviados, recolectadas en el confinamiento de residuos peligrosos La Pedrera*. Convenio específico de colaboración entre CONA-BIO y la Universidad Autónoma Metropolitana para el muestreo y análisis para la determinación de compuestos orgánicos en lixiviados del confinamiento de residuos peligrosos “La Pedrera”, Guadalcázar, San Luis Potosí, México D.F.

Chávez, R (s/a). *Opinión técnica*, Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), México D.F.

Cruickshank, C (s/a). *Aspectos geohidrológicos e hidrológicos de La Pedrera (Informe Técnico)*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.

DDCD – Diario de los Debates de la Cámara de Diputados (2005), Volumen II: *Continuación de la Sesión No. 9 del 24 de febrero de 2005*. Estado de San Luis Potosí. Año II, Segundo Periodo, I.o. de marzo de 2005.

Díaz-Barriga, F y Torrez-Dosal, G (2006). *Evaluación de riesgo ambiental (ERA) en el confinamiento de residuos peligrosos La Pedrera, Guadalcázar, San Luis Potosí (Informe Técnico)*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P.

DOF – Diario Oficial de la Federación (1988). *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Residuos Peligrosos*. Nuevo Reglamento publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de noviembre de 1988. URL: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGEEPA_MRP.pdf (consultado en septiembre de 2009).

DOF – Diario Oficial de la Federación (1993), “Norma Oficial Mexicana NOM-054-SEMARNAT-1993, Que Establece el Procedimiento para Determinar la Incompatibilidad entre Dos o Más Residuos Considerados como Peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993”, Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre de 1993, México D.F.

DOF – Diario Oficial de la Federación (1993), “Norma Oficial Mexicana NOM-057-SEMARNAT-1993, Que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos”, Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre de 1993, México D.F.

DOF – Diario Oficial de la Federación (1993), “Norma Oficial Mexicana NOM-058-SEMARNAT-1993, Que establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos”, Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre de 1993, México D.F.

DOF – Diario Oficial de la Federación (2002), “Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-138-ECOL-2002, que establece los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimientos para la restauración”. Diario Oficial de la Federación, 20 de agosto de 2002, México D.F.

DOF – Diario Oficial de la Federación (2005), “Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación”, Diario Oficial de la Federación, 29 de marzo de 2005, México D.F.

DOF – Diario Oficial de la Federación (2007), “Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que Establece Criterios para Determinar las Concentraciones de Remediación de Suelos Contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo Hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Talio y/o Vanadio”, Diario Oficial de la Federación, 2 de marzo de 2007, México D.F.

Gerhard, R (2007). *Escrito de opinión sobre el caso de METALCLAD vs. México/ D.I. 2003*. URL: http://elcoyotexpatriciamercado.blogspot.com/2007/01/escrito-de-opinin-sobre-el-caso-de_24.html (consultado en septiembre de 2009).

GESLP – Gobierno del Estado de San Luis Potosí (2007). *Monografías de los municipios de México, San Luis Potosí, S.L.P., Guadalcázar, S.L.P.* Hechos para servir:

Gobierno del Estado de San Luis Potosí, Coordinación Estatal para el Desarrollo Municipal, S.L.P., 55 p.

GESLP – Gobierno del Estado de San Luis Potosí (2009). *Se cumple con remediación del confinamiento de residuos peligrosos La Pedrera*. Hechos para servir: Gobierno de San Luis Potosí, URL: http://www.slp.gob.mx/ver_noticia.cfm?id=7500 (consultado en septiembre de 2009)

Hilmer, Eckart (2002). *Propuesta técnica para el confinamiento seguro de residuos industriales en el sitio “La Pedrera” Municipio de Guadalcázar, S.L.P.* SEMARNAT/GTZ, México D.F.

INE – Instituto Nacional de Ecología (2010), “Historia del INE”. URL: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/260/historia.html> (consultado en junio de 2010).

IRIS – Integrated Risk Information System (2010). “A-Z list of substances”. URL: <http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?fuseaction=iris.showSubstanceList> (consultado en julio de 2010).

Lang, M F (1999). *Azogueería y amalgamación. Una apreciación de sus esencias químico-metalúrgicas, sus mejoras y su valor tecnológico en el marco científico de la época colonial*. LULL, v 22, 655-673.

LGEEPA – Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (1998). *Leyes y Códigos de México: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (y disposiciones complementarias)*. Editorial Porrúa. 784 p, México D.F.

Lijzen, J P A, Baars, A J, Otte, P F, Rikken, M G J, Swartjes, F A, Verbruggen, E M J y Van Wezel, A P (2001). *Technical evaluation of the intervention values for soil/sediment and groundwater human and ecotoxicological risk assessment and derivation of risk limits for soil, aquatic sediment and groundwater*. RIVM report 711701 023. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven.

MHPPE – Ministry of Housing, Physical Planning and the Environment (1994). *Circular on target values and intervention values for soil remediation, Kingdom of the Netherlands*.

OPS – Organización Panamericana de la Salud (2005). “Curso de autoinstrucción en metodología de identificación y evaluación de riesgos para la salud en sitios contaminados”. URL: <http://www.cepis.ops-oms.org/tutorial3/e/capitulo2/index.html> (consultado en julio de 2010).

RADIAN (1995). *Auditoria ambiental al sitio La Pedrera, municipio de Guadalcázar, San Luis Potosí (informe técnico)*. Corporación RADIAN S.A. de C.V., San Luis Potosí.

RADIAN (1997). *Estudio de evaluación de la situación ambiental en La Pedrera (informe técnico)*. Corporación RADIAN S.A. de C.V., San Luis Potosí.

Schmidt, W y Oestreich, A M (2005). *Bases técnicas para la remediación del sitio La Pedrera, municipio de Guadalcázar, estado de San Luis Potosí (Informe Técnico)*. SEMARNAT, México D.F.

SEMARNAT – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006). *Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de riesgo ambiental de sitios contaminados*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, México D.F.

SEMARNAT – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010). "Residuos Peligrosos". URL: http://www.semarnat.gob.mx/tramites/gestionambiental/materiales_actividades/Paginas/ResPel.aspx (consultado en septiembre de 2010).

Ugalde, V (2002). *Las relaciones intergubernamentales en el problema de los residuos peligrosos: El caso de Guadalcázar*. Revista Estudios Demográficos y Urbanos, vol. 17, No. 1, 77-105. Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales de El Colegio de México.

U.S.EPA.– United States Environmental Protection Agency (1996). "Action level under RCRA corrective action" en: Buonicore, A.J. (1996) (Ed.), Cleanup criteria for contaminated soil and groundwater. ASTM Data Series: DS64, Philadelphia.

6

Remediación de la Unidad Minera Industrial Texistepec (UMIT) en Texistepec, Veracruz

Juan Ávila González
Rosa María Flores Serrano
Abelardo Placeres Bezares
Ignacio Juan Ramírez



Abreviaturas y Acrónimos

APSA	Azufrera Panamericana S A
CE	Concentración Efectiva
CED	Compañía Exploradora del Estm S A
CEMEF	Centro Mexicano para la Filantropía
C D	Comisión Intersecretarial de Desincorporación
C GF	Comisión Intersecretarial de Gasto Financiero
C MAR	Centro Integral de Manejo y Aprovechamiento de Residuos Industriales
CL	Concentración Letal
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CRET B	Corrosivo Reactivo Explosivo Tóxico Inflamable Biológico infeccioso
DGG MAR	Dir General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas
ERA	Evaluación de Riesgo Ambiental
FBC	Factor de Bioconcentración
FBT	Factor de Biotransferencia
FPC	Factor de Pendiente de Cáncer
FQ UNAM	Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares
HFP	Hidrocarburos Fracción Pesada
HTP	Hidrocarburos Totales del Petróleo
MTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
NEG	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
TM	Instituto Tecnológico de Minatitlán
TSA	Instituto Tecnológico Superior de Acayucan
LMP	Límite Máximo Permissible
LMR	Límites Máximos Recomendables
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana
OD	Oxígeno Disuelto
OMS	Organización Mundial de la Salud
PAM	Presa Agua de Minas
PECT	Prueba de Extracción para Constituyentes Tóxicos
PEP	Pemex Exploración y Producción
PGPB	Pemex Gas y Petroquímica Básica
PVSM	Peso Volumétrico Seco Máximo
SEDARPA	Secretaría de Desarrollo Agropecuario Rural Forestal y Pesca Estado de Veracruz
TPHCWG	Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group
UJAT	Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
UM T	Unidad Minera Industrial Tuxtla Chico
UT	Unidades de Toxicidad

Remediación de la Unidad Minera Industrial Texistepec (UMIT) en Texistepec, Veracruz

1. Descripción del proyecto	193
2. Antecedentes históricos	195
3. Caracterización ambiental	199
3.1. Residuos ácidos de La Carbonera	199
3.2. Presas de aguas ácidas	201
3.2.1. Neutralización	202
3.2.2. Caracterización y bioensayos de toxicidad en sedimentos	203
3.2.3. Caracterización y bioensayos de toxicidad en agua	207
3.3. Evaluación de riesgo ambiental	208
3.4. Análisis de las rutas de exposición	209
3.4.1. Rutas incompletas	209
3.4.2. Rutas completas	209
3.5. Estimación de los límites máximos recomendables	209
3.5.1. Efectos no cancerígenos	209
3.5.2. Efectos cancerígenos	211
4. Selección y aplicación de las tecnologías de remediación	213
4.1. Celda de estabilización de La Carbonera	213
4.2. Presas de aguas ácidas	217
4.2.1. Evaluación de técnicas de remediación para sedimentos	217
4.2.2. Eliminación de hidrocarburos de la presa Agua de Minas	220
4.3. Taponamiento de pozos abandonados y remediación de los suelos afectados	222
4.4. Hidrocarburos ácidos en caminos de acceso a la UMIT	225
4.5. Actividades complementarias a la remediación	225
5. Avances del proyecto	228
6. Lecciones aprendidas	229
7. Agradecimientos	231
8. Fuentes de información	232



▲ Grupo de trabajo, Unidad Minera Industrial Texistepec, PEMEX Gas y Petroquímica Básica, PGPB.

Remediación de la Unidad Minera Industrial Texistepec (UMIT) en Texistepec, Veracruz

1. Descripción del proyecto

Situada en Texistepec, Veracruz, la Compañía Exploradora del Istmo, S.A. (CEDI) extrajo azufre de los yacimientos subterráneos existentes en esa zona del país desde 1971 hasta 1993, cuando cerró debido a la caída de los precios del producto en el mercado internacional. El proceso de extracción consistía en la inyección de agua caliente en pozos, con lo que se fundía el azufre, luego salía en forma líquida mezclado con hidrocarburos. El azufre se separaba de los hidrocarburos mediante la adición de ácido sulfúrico y filtros prensa, se solidificaba a cielo abierto y posteriormente se comercializaba.

Durante los 22 años de operación, la CEDI generó un pasivo ambiental constituido por un montículo de 525,000 m³ de residuos de carbón ácido y azufre dispuestos a cielo abierto, tres presas que almacenaban 11 millones de metros cúbicos de aguas ácidas, cuyos pH oscilaban entre 0.6 y 2.6, veintiún kilómetros de caminos internos revestidos con el residuo ácido resultante de la separación del azufre y 2,888 pozos de extracción abandonados.

En 1995 Petróleos Mexicanos (PEMEX) inició sus labores en la Unidad Minera Industrial Texistepec (UMIT), atendiendo a la emergencia ambiental que representó ese pasivo ambiental y en el año 2000 arrancó la primera etapa del plan de acción para la remediación de este sitio que consistió en la construcción de una celda de estabilización para los residuos de carbón ácido y la neutralización de las aguas ácidas de las presas. Asimismo, se retiraron cerca de 5,000 toneladas de

chatarra distribuidas por todo el predio, procedentes de la instalación de pozos y otras estructuras que fueron abandonadas por CEDI.

La segunda etapa del plan de acción contempló el taponamiento de los pozos situados en el campo productivo que usaba la CEDI para la extracción de azufre, algunos eran de máxima prioridad debido a las emanaciones de azufre e hidrocarburos presentes. Asimismo, consideró la remediación del suelo de los caminos de la UMIT, que fueron revestidos con los residuos de carbón ácido, y la remediación del suelo de las presas de agua ácida antes mencionadas.

La enorme dimensión de este pasivo ambiental impactó al entorno de la región y derivó también en problemas

de orden social, debido a que las actividades pesqueras y agrícolas en la zona se vieron amenazadas principalmente por el desborde potencial de las aguas ácidas provenientes de las presas.

Aunado a las actividades técnicas emprendidas para ejecutar el plan de acción de la remediación del sitio, PEMEX llevó a cabo diversas acciones para incluir a la población en el proyecto, por lo que se realizaron convenios con el municipio de Texistepec. Considerar a la población como parte de la solución del problema, fue pieza clave en el éxito del proyecto, con lo que se logró recobrar la paz social que se había perdido. Fue la primera vez que PEMEX adoptó este esquema de gestión; por los resultados obtenidos, se replicó en otros proyectos.

2. Antecedentes históricos

Durante las décadas de 1970 y 1980, la mayor producción de azufre en México provenía de la explotación de los domos salinos ubicados en la denominada Cuenca Salina del Istmo, en la parte sur del estado de Veracruz. (Figura 1). La explotación de los yacimientos la realizaban dos empresas de competencia estatal¹: la Azufrera Panamericana S.A. (APSA, en Jáltipan) que inició sus operaciones en 1954 y la Compañía Exploradora del Istmo S.A. (CEDI, en Texistepec) que comenzó a trabajar en enero de 1971, produciendo hasta 1,700 toneladas de azufre (Munch G., 1994).

La CEDI tenía entre sus funciones la extracción y explotación comercial de azufre. Este se explotaba directamente de los yacimientos ubicados en el interior del predio de esta empresa, a través de pozos. Una vez procesado el producto se enviaba en carros-tanque, góndolas de ferrocarril y embarcaciones, llamadas chalanés, a la Terminal Marítima de Coatzacoalcos para su venta y exportación.

En 1969, México ocupaba el segundo lugar como productor mundial de azufre. Las reservas de esta sustancia eran de 77.4 millones de toneladas y se estimaba

que cada tonelada dejaba algo más del 60% de ganancias para las compañías (Munch G., 1994). Sin embargo, al inicio de los años noventa, las operaciones de APSA y CEDI se vieron afectadas, ya que la explotación de los yacimientos fue desplazada por la recuperación de azufre asociado a la producción gas natural² de la industria petrolera. El desplome del precio del azufre, debido a una sobreoferta del producto, aunado a los altos costos de producción, obligaron a los consejos de administración de ambas empresas a determinar su liquidación en 1992, APSA, y 1993, CEDI.

Antes de su cierre, PEMEX proveía a la CEDI del gas necesario para calentar el agua utilizada en el proceso de extracción de azufre, además le entregaba el azufre de alta calidad obtenido en sus procesos para que una mejor comercialización; esto generó un adeudo por parte de la CEDI. Al cierre, como pago de la deuda, se designaron las instalaciones y los activos de la CEDI a la Subdirección de Gas Licuado y Petroquímicos Básicos, de Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB)³. A partir de entonces, al sitio donde se localizaba esta empresa se le conoce como Unidad Minera Industrial Texistepec (UMIT).

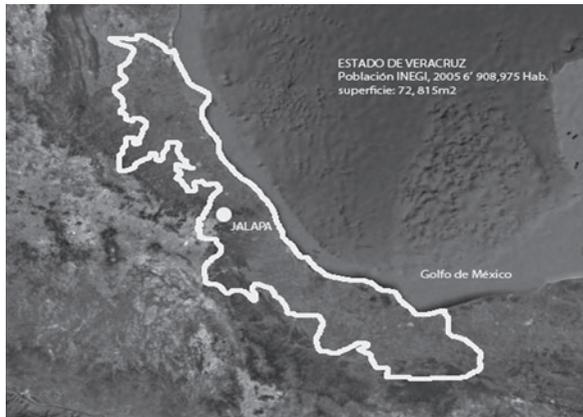


Figura 1. Ubicación de Texistepec, Veracruz (Fuente: Elaboración propia).

1. La explotación de los yacimientos de azufre en la región inició con compañías extranjeras, como Texas Gulf Company Freeport, que se instaló ahí en 1928; Jefferson Lake, inició operaciones en 1946; y Duval Corp, comenzó a operar en 1969.
2. Proceso llamado endulzamiento. Término adoptado de las primeras traducciones del inglés "sweetening". El proceso de endulzamiento del gas consiste en eliminar los componentes ácidos (H_2S y CO_2) que contiene el gas en su estado natural.
3. Pemex Gas y Petroquímica Básica (Pemex Gas o PGPB) es la subsidiaria de Petróleos Mexicanos que procesa, transporta y comercializa gas natural, hidrocarburos líquidos, como el gas licuado del petróleo o gas LP, y productos petroquímicos básicos, como etano, gasolinas naturales y azufre. Es por esto que la UMIT se asignó a esta subsidiaria.

En 1995, PGPB inició el proceso de desincorporación de activos en la UMIT y el de venta del terreno pero fueron detenidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) al identificarse como un pasivo ambiental.

Para la explotación de los yacimientos se empleaba el método Frasch⁴, consistía en inyectar agua caliente, aproximadamente a 160° C, al manto azufroso a través de pozos con el propósito de fundir el azufre y facilitar su extracción. El azufre en estado líquido se asentaba en el fondo de los pozos y se sacaba a la superficie por medio de la inyección de aire comprimido. El agua utilizada para fundir el elemento se extraía del subsuelo por medio de pozos de desfogue que se encontraban flanco abajo de la línea de pozos de producción. Se estima que diariamente se inyectaban 31,822 m³ del líquido. El agua ácida liberada era bombeada hacia una presa denominada presa de Agua Ácida, la recogía procedente del proceso (pH de 0.6), y mantenía una temperatura remanente de alrededor de 60° C. De ahí, era conducida sin tratamiento a través de un canal a cielo abierto de 8 km de longitud, a una presa artificial llamada presa Agua de Minas.

El azufre obtenido se encontraba en forma de mezcla líquida compuesta por azufre e hidrocarburos que se purificaba haciéndola reaccionar con ácido sulfúrico concentrado mínimamente al 93%, lo que provocaba la oxidación de los hidrocarburos que eran retirados posteriormente con un tratamiento de filtración a presión, generando un producto residual compuesto por carbón y ácido sulfúrico que se neutralizaba con cal, transformándose en yeso como resultado de la reacción. El azufre líquido obtenido era dispuesto a cielo abierto en un área denominada "de vats"⁵, donde permanecía hasta su solidificación para comercializarse posteriormente.

La "torta" retenida en los filtros, con altos contenidos de carbono, azufre, ácido sulfúrico y yeso, se disponía directamente sobre el suelo y a cielo abierto en el sitio denominado La Carbonera y en un montículo alledaño

cerca del área de vats. Estos residuos tenían condiciones de alta humedad y acidez, pese a la neutralización que recibían, y parte de ellos se utilizaron para la construcción de caminos dentro de la UMIT.

El predio productivo de la UMIT ocupa 900 hectáreas⁶; al suroeste limita con la población de Texistepec, al noroeste del predio se encuentra La Carbonera y la presa de Agua Ácida que recibía los lixiviados ácidos de La Carbonera; al sureste se localiza la presa de Agua Dulce⁷ de la que se obtenía el agua para el proceso de extracción de azufre y que hasta ahora también abastece de agua potable a la población de Texistepec; a un costado de esta presa se encuentra el área de oficinas. Además, distribuidos a lo largo de todo el predio hay 2,888 pozos que se utilizaron en la extracción de azufre.

Al sureste de la UMIT están, conectadas, las presas Agua de Minas y Anexa. En la presa Anexa se localiza la compuerta de descarga hacia el arroyo Apepecho, que fluye hacia la parte media del río Chiquito, y que después llega al río Coatzacoalcos (Figura 2)⁸. El río Chiquito abastece a la presa Agua Dulce. El agua es bombeada desde el canal de navegación, que se construyó para comunicar a la CEDI con el río Chiquito y transportar el azufre al puerto de Coatzacoalcos a través de chalanes.

El proceso altamente contaminante que por 22 años realizó la CEDI originó un pasivo ambiental de grandes dimensiones en el que se involucró la presencia de 525 mil m³ de residuos de carbón, azufre y ácido sulfúrico, tres presas con 11 millones de m³ de agua ácida, aproximadamente 21 km de caminos contaminados con residuos de ácidos carbón y azufre, y 2,888 pozos utilizados para la extracción de azufre, algunos de los cuales aún presentan emanaciones.

En el año 1995, PGPB inició gestiones ante la Comisión Intersecretarial de Desincorporación (CID) y la Comisión Intersecretarial de Gasto Financiero (CIGF) para solicitar recursos que permitieran realizar la primera etapa del Proyecto de Remediación Ambiental de la UMIT.

4. Herman Frasch nació en Gaildorf, Alemania en 1851. Se especializó en el estudio de los derivados del petróleo y su refinamiento. En 1891 desarrolló un método, que lleva su nombre, para la extracción del azufre y consiste en fundir el azufre bajo la tierra o el mar para luego bombearlo hasta la superficie.

5. Área de tanques, anglicismo usado para denominar al área donde se enfría el producto hasta su solidificación en grandes tanques tipo batea. CEDI contaba con cuatro depósitos de azufre en el área de vats cerca de la línea del ferrocarril.

6. Son 900 ha de terreno de producción donde se extraía el azufre cuando la CEDI estaba en funciones que, aunadas al área de las presas, La Carbonera, el área de vats, la dársena y las oficinas, suman cerca de 1,500 ha de superficie.

7. La presa de Agua Dulce, con una profundidad aproximada de 20 m y 2 ha de superficie, se construyó para almacenar agua que se usaría en el proceso de extracción de azufre.

8. El arroyo Apepecho se conecta al río Chiquito en su parte media. En la Figura 2 se muestra este arroyo, más no se aprecia el punto de contacto entre ambos cuerpos de agua por encontrarse fuera de la escala de la imagen, hacia el noreste.



Figura 2. Distribución de la UMIT (Fuente: Elaboración propia).

En el año 2000, PGPB y el Gobierno del Estado de Veracruz continuaron con la primera etapa de la remediación, para lo cual se integró un grupo de especialistas de PEMEX. En el inicio de ésta, se realizaron diversas obras como la rehabilitación, mantenimiento de bordos y caminos de las presas, la construcción de una red contra incendios y rampas de acceso a La Carbonera así como la neutralización de las presas de agua ácida, obras encaminadas a prevenir y contrarrestar los riesgos ambientales que pudieran ser generados por la

UMIT, como el desborde de aguas ácidas de las presas e incendios en La Carbonera.

Ese mismo año, se decidió contratar al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM) para realizar el diagnóstico ambiental del predio, el cual contempló a su vez el diseño preliminar de la celda de estabilización para contener *in situ* los residuos ácidos de La Carbonera. En este estudio se identificaron cinco grandes problemas ambientales (Tabla 1).

No.	PROBLEMA AMBIENTAL	IMPACTO AL AMBIENTE
1	Tres presas con aguas ácidas (pH 0.6-2.6)	Posible ruptura de los bordos de las presas afectando a la población de los alrededores.
2	487,440 m ³ de residuos de carbón ácido derivado de la extracción de azufre, dispuestos a cielo abierto, sobre el suelo, en La Carbonera.	Lixiviados ácidos que se almacenaban en la presas de aguas ácidas con los riesgos antes mencionados.
3	2,888 pozos de extracción de azufre abandonados.	Emanaciones de gas azufre e hidrocarburos en algunos de ellos.
4	43 depósitos de hidrocarburos (chapopoterías) diseminados por el terreno, procedentes del desazolve del canal de navegación que transportaba las aguas ácidas de la presa de Agua Ácida a la presa Agua de Minas.	Lixiviados ácidos con afectación a la vegetación de las áreas afectadas.
5	21 km de caminos revestidos con residuos de carbón ácido de La Carbonera.	Lixiviados ácidos con afectación a la vegetación de las áreas afectadas.

▲ Tabla 1. Problemas ambientales identificados en la UMIT, derivado del estudio de diagnóstico realizado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México II-UNAM.

A partir del estudio de diagnóstico realizado por el II-UNAM, se planteó el Plan de Saneamiento Ambiental del Sitio, que es parte de la segunda etapa del plan de acción para la remediación del sitio. En esta etapa se contempla el taponamiento de los pozos de azufre ubicados en el campo productivo que usaba CEDI, algunos presentaban emanaciones de azufre e hidrocarburos. Asimismo, se consideró la remediación del suelo de la presa Agua de Minas y del suelo de los caminos de la UMIT que fueron revestidos con los residuos de carbón ácido.

Para la ejecución de algunas de estas acciones se contrataron los servicios de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), el Instituto Tecnológico de Minatitlán (ITM) y el Instituto Tecnológico Superior de Acayucan (ITSA).

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los eventos acontecidos en Texistepec desde el inicio de la explotación de los yacimientos de azufre, en 1971, hasta el presente.

FECHA	EVENTO
1928 -1969	Se instalan en la región las primeras compañías dedicadas a la extracción de azufre, todas con capital extranjero.
1954	La empresa Azufrera Panamericana S.A. (APSA) inicia operaciones en Jáltipan, Veracruz.
1971	La Compañía Exploradora del Istmo S.A. (CEDI) inicia operaciones en Texistepec, Veracruz.
1990	PGPB inicia el proceso de endulzamiento del gas natural y obtiene azufre como subproducto. Se desploma el precio del azufre. PEMEX vende a la CEDI gas y azufre, lo que genera un adeudo.
1992-1993	La CEDI se declara en quiebra y cierra actividades; liquida a 12,500 empleados, aproximadamente. El gobierno federal paga los adeudos de la CEDI hacia PEMEX con las instalaciones de la empresa, heredándole un pasivo ambiental de grandes dimensiones. El nombre del predio pasa a ser Unidad Minera Industrial Texistepec (UMIT).
1993	PGPB inicia el proceso de desincorporación de la empresa, mismo que se detiene porque la SEMARNAT lo identifica como un pasivo ambiental.
1995	PGPB inicia gestiones para afrontar el pasivo ambiental. Identifica como prioritaria la atención de La Carbonera y las presas de aguas ácidas.
2000	Inicia la primera etapa del plan de acción para la remediación de este sitio. PGPB ejecuta obras para prevenir y contrarrestar los riesgos ambientales de la UMIT: reforzamiento de los bordos de las presas y realización de obras para prevenir y atender posibles incendios en La Carbonera. El II-UNAM elabora un diagnóstico integral de la UMIT. Inician las obras prioritarias de atención a la emergencia ambiental: neutralización de las aguas ácidas de las presas y realización del proyecto para construir la celda de estabilización de los residuos de La Carbonera.
Septiembre 2001	Se neutraliza el agua de la presa de Agua Ácida.
Noviembre 2001	Se neutraliza el agua de la presa Anexa. Se inicia el desfogue de las aguas neutralizadas de acuerdo con la normatividad ambiental para prevenir desastres por la ruptura de los bordos.
Marzo 2003	Se neutraliza el agua de la presa Agua de Minas.
Octubre 2004	Se inicia la construcción de la celda de estabilización de los residuos ácidos de La Carbonera, concluyéndose un año después.
2005 a la fecha	Se hace un estudio para la caracterización y distribución espacial de los hidrocarburos en el fondo y los sedimentos de las presas de aguas ácidas; se proponen métodos para su tratamiento. Estudio de riesgo ambiental del sitio. Se hace un estudio de ubicación, evaluación y propuesta de taponamiento de los pozos de extracción de azufre dejados por la CEDI. Se retiran los hidrocarburos del fondo de la presa Agua de Minas.

▲ *Tabla 2. Secuencia cronológica de eventos en el predio de la UMIT (antes CEDI).*

3. Caracterización ambiental

Las obras emblemáticas de este gran pasivo ambiental son La Carbonera y las presas de aguas ácidas.

3.1. Residuos ácidos de La Carbonera

Con el propósito de determinar la extensión, volumen y características de los residuos de La Carbonera (Figura 3), se realizaron las siguientes actividades:

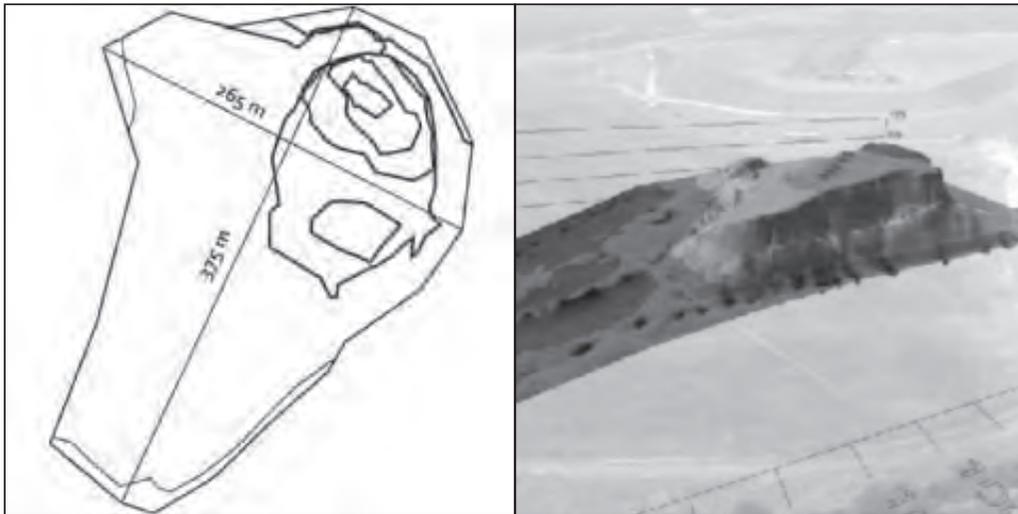
- Levantamiento topográfico a detalle.
- Estudio geofísico con la metodología geoelectrica resistiva de barrido de alta densidad.
- Perforaciones directas para obtener muestras representativas a diferentes intervalos de profundidad, a fin de comprobar anomalías isorresistivas y para realizar los análisis físico-químicos para la caracterización y determinar su peligrosidad



▲
Figura 3. Residuos ácidos de La Carbonera (Fuente: PGPB).

Con los datos del levantamiento topográfico de La Carbonera (Figura 4) se definieron estas características:

- Geofoma parecida a una pera con orientación noroeste, en la que el eje más largo tenía una longitud de 375 m y el eje más ancho inferior de 265 m.
- Altura promedio de 15 m.
- Área de 62,786 m².
- Volumen de 487,440 m³.
- Peso estimado de 682,000 ton, al considerar 1.24 t/m³ como la densidad máxima de los residuos.



▲
Figura 4. Topografía de los residuos de La Carbonera. En el lado derecho se observa la representación tridimensional (Fuente: Instituto de Ingeniería, UNAM).

A partir de los estudios geofísicos las determinaciones de resistividad de resistividad (ρ) en unidades de ohm/metro (Ω/m) a diferentes profundidades. Con la correlación geológica superficial se dedujeron los contactos litoeléctricos que delimitan al grupo de horizontes o estratos que constituían la estructura del subsuelo estudiado; se identificaron cinco estratos (Tabla 3). La interpretación se basó en el análisis de los espectros isorresistivos que se obtuvieron en forma continua, barrido, al considerar las propiedades de conductividad eléctrica del terreno en sus dos direcciones, longitudinal y transversal.

HORIZONTE	RESISTIVIDAD (Ω/m)	ESPESOR (m)	CORRELACIÓN
A	5.0 - 6.0	0 - 20	Residuos de la carbonera
B	8.0 - 9.0	20 - 36	Suelos arcillo-arenosos
C	10.0 - 12.0	36 - 60	Suelos arenosos limolíticos
D	14.0 - 16.0	60 - 70	Arenas
E	25.0 - 30.0	70 <	Limolitas, areniscas y conglomerados

▲ **Tabla 3:** Características de los estratos detectados en el estudio geofísico de La Carbonera (Tomado del estudio de diagnóstico realizado por el Instituto de Ingeniería, UNAM.)

Se analizaron las anomalías eléctrico-resistivas bajo dos aspectos: de alta conductividad y de baja conductividad, las cuales se correlacionan con los diversos fenómenos provocados en algunos casos por elementos de naturaleza artificial; por ejemplo de la presencia de contaminantes que alteran el estado físico-químico del terreno, puesto que la ionización existente en la porosidad tiende a reaccionar con el paso de la corriente eléctrica artificial enviada. Los otros fenómenos pueden corresponder a fallas en la estructura, compactación, fracturas, fisuras y oquedades, así como a cambios contrastantes en la litología.

Los estudios geohidrológicos indicaron valores de permeabilidad que varían de 4.1×10^{-7} a 3.38×10^{-9} cm/s, y denotan una permeabilidad muy baja. Si bien los horizontes B, C y D, estaban correlacionados con la existencia de fracturas —por los parámetros isorresistivos obtenidos— se dedujo que había sedimentación en las fracturas por el acarreo de detritos finos, lo que provocó que la lixiviación no fuera vertical, sino horizontal, ya que las fracturas al parecer actuaron como vías de escurrimiento al exterior de La Carbonera en forma de socavaciones o veneros.

Con base en los resultados del estudio geofísico se decidió realizar seis sondeos por perforación directa a través del procedimiento de penetración estándar convencional y se obtuvieron ocho muestras de los residuos ácidos, una de suelo en contacto con los residuos y una del lixiviado que fluía de La Carbonera hacia la presa de Agua Ácida. Las muestras se analizaron de acuerdo con las normas oficiales mexicanas vigentes en su momento para establecer la peligrosidad de un residuo (NOM-052-ECOL-1993 y NOM-053-ECOL-1993) (Tabla 4).

CARACTERÍSTICA CRETIB*	MUESTRAS DE RESIDUOS	MUESTRAS DE SUELO	MUESTRAS DE LIXIVIADO
Corrosividad	Corrosivas (pH 1.2-1.55)	No corrosiva (pH 8.2)	Corrosiva (pH 0.8)
Reactividad	No reactivas**	No reactiva	No reactiva
Explosividad	No explosiva	No explosiva	No explosiva
Toxicidad	No tóxica	No tóxica	No tóxica
Inflamabilidad	No inflamable	No inflamable	No inflamable
Biológico infeccioso***	140-12,100 UFC/g	6,500UFC/g	< 10 UFC/g

▲ **Tabla 4.** Características CRETIB de las muestras de material de La Carbonera.

* Acrónimo de clasificación de las características a identificar en los residuos peligrosos y significa: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico ambiental, inflamable y biológico-infeccioso (DOF, 2006).

** A excepción de una muestra que resultó reactiva al agua.

***Cuenta en placa de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) por gramo de material. En el caso de las muestras de residuos se observó que las UFC/g decrecieron con la profundidad.

En general, los resultados de las pruebas CRETIB de los residuos de La Carbonera señalaron que todos los parámetros, a excepción de la corrosividad, estaban dentro de lo indicado por la normatividad vigente, lo que era predecible debido a la condición altamente ácida de los residuos. Sin embargo, se observó que la acidez de éstos no afectó al suelo pues en la muestra obtenida el pH fue ligeramente alcalino y esto puede atribuirse a la naturaleza arcillosa e impermeable del material, que hizo que los escurrimientos ácidos siguieran una trayectoria horizontal en lugar de vertical. También se hicieron análisis físico-químicos a dos muestras de suelo tomadas a 1 y 4 m de profundidad en los residuos de La Carbonera, cuyos resultados se compararon con los de una muestra testigo tomada al norte del sitio, después de la línea de ferrocarril.

Los resultados de las pruebas físico-químicas (Tabla 5) indicaron que con respecto a los contaminantes distintos al azufre, el suelo de los alrededores presentó valores de mayor magnitud, lo que evidenció que estos sitios están más impactados por las actividades antropogénicas propias de la región, como la aplicación de plaguicidas, fertilizantes y otras sustancias usadas en el sector agropecuario.

PARÁMETRO	UNIDADES	LA CARBONERA	SITIO TESTIGO
Carbón orgánico total	mg/kg	25 600	31 200
Densidad	g/ml	1.20	1.48
Arsénico	mg/kg	0.57	11.30
Bario	mg/kg	1.50	27.30
Cadmio	mg/kg	<0.01	0.80
Calcio	mg/kg	40 550	24 500
Cobre	mg/kg	1.94	62.20
Cromo	mg/kg	4.15	68.10
Hierro	mg/kg	74.70	39 800
Mercurio	mg/kg	0.16	0.14
Níquel	mg/kg	9.33	45.50
Plomo	mg/kg	1.51	91.90
Sílice total	mg/kg	1 090	1 270
Sulfatos	mg/kg	20 255	1 722
Azufre	%	66.36	3.52
Zinc	mg/kg	5.30	500

▲ **Tabla 5.** Análisis físico-químicos de las muestras de suelo de La Carbonera.

3.2. Presas de aguas ácidas

Las presas Agua de Minas y Anexa son artificiales, construidas por la CEDI para capturar el agua ácida resultante del proceso de separación del azufre. En la Tabla 6 aparece el área aproximada de cada una.

PRESA	SUPERFICIE (ha)	VOLUMEN (m ³)	pH (ADIMENSIONAL)
Agua de Minas	350	11'000,000	2.60
Anexa	30	754,000	2.60
Agua Ácida	2	70,000	0.60

▲ **Tabla 6.** Características de las presas de aguas ácidas en la UMIT.

Las presas Agua de Minas y Anexa se encuentran en una depresión geológica cerca del arroyo Apepecho, el estero Boquiapan y el río Chiquito, afluente del río Coatzacoalcos, (Figura 2). Con base en los restos de árboles encontrados en ambas presas y la geomorfología del sitio, se infiere que originalmente la zona fue una planicie de inundación de bosque y matorral probablemente con un arroyo intermitente muy pequeño en medio del brazo noroeste de la presa Agua de Minas y con lagunas someras en las partes central y oriente de la misma. Cuando se desbordaba el río Chiquito inundaba un área amplia al sur de la presa y, en la época de secas, la parte norte se usaba como potreros.

El material nativo del fondo de las presas es limoso de color café grisáceo; en algunas partes está cubierto con un fango café verdoso muy descompuesto o con una turba poco degradada, característica de áreas pantanosas y lagunas someras. La profundidad de las presas varía espacialmente y por temporada. El norte y suroeste de la presa Agua de Minas y la presa Anexa están libres de agua casi todo el año; la sección noroeste de la presa Agua de Minas con una profundidad entre 0.5 y 1.5 m. El resto de la presa entre 0.5 m hasta 2.5 m.

Personas de las comunidades cercanas, Palmillas, El Canal y Boquiapan, comentaron que antes de construir las presas, en el área existían dos lagunas que producían buena pesca. En la actualidad, durante el período de creciente, los peces de estas presas migran al río, lo que favorece a las comunidades de Palmillas y El Canal. Por ello, se consideró que una vez que concluyera el proceso de rehabilitación

del sitio, la pesca y la acuicultura serían actividades de aprovechamiento económico en estas presas. Otra actividad productiva es la ganadería, especialmente en las áreas de inundación frecuente y lomerío al Norte, Oeste y Sur de las presas.

Como se ha mencionado, gran parte del peligro de este pasivo ambiental se debía al riesgo de desborde de las presas debido a que los bordos no eran los adecuados para el volumen y naturaleza del líquido contenido, sobre todo en el caso de la presa Agua de Minas, que es la de mayor volumen y extensión (Tabla 6). Cuando la CEDI construyó esta presa se utilizó el material de dragado para hacer los bordos sin realizar obras de ingeniería apropiadas.

Para afrontar este problema, PGPB decidió aplicar una estrategia en etapas, en la cual la primera, por su urgente aplicación, fue la neutralización de las aguas ácidas para finalmente restaurar el fondo de las presas Agua de Minas y Anexa (Figura 5). En este apartado se hablará de todo este proceso.

3.2.1. Neutralización

La primera acción ejecutada por PGPB para afrontar la emergencia ambiental dentro de la UMIT, tras el cierre y abandono de las instalaciones por parte de la CEDI, fue la neutralización de la presa de Agua Ácida, que recibía los lixiviados de La Carbonera cuando ésta se encontraba a cielo abierto. Todavía recibe los pocos lixiviados que aún emanan de la celda de estabilización que contiene los residuos de La Carbonera, y que son neutralizados antes de ser descargados a la presa. El agua ácida almacenada se bombeaba a una zona alta del terreno y de ahí fluía por gravedad hacia la presa Agua de Minas. Para su neutralización se usaron 560 toneladas de amoníaco (NH₃), las cuales se aplicaban por medio de pipas. Se decidió usar esta sustancia ya que PGPB produce este gas en el complejo de Cosoleacaque⁹, de manera que se podía obtener la cantidad suficiente en un corto tiempo. La premura por atender esta emergencia ambiental se debía a que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

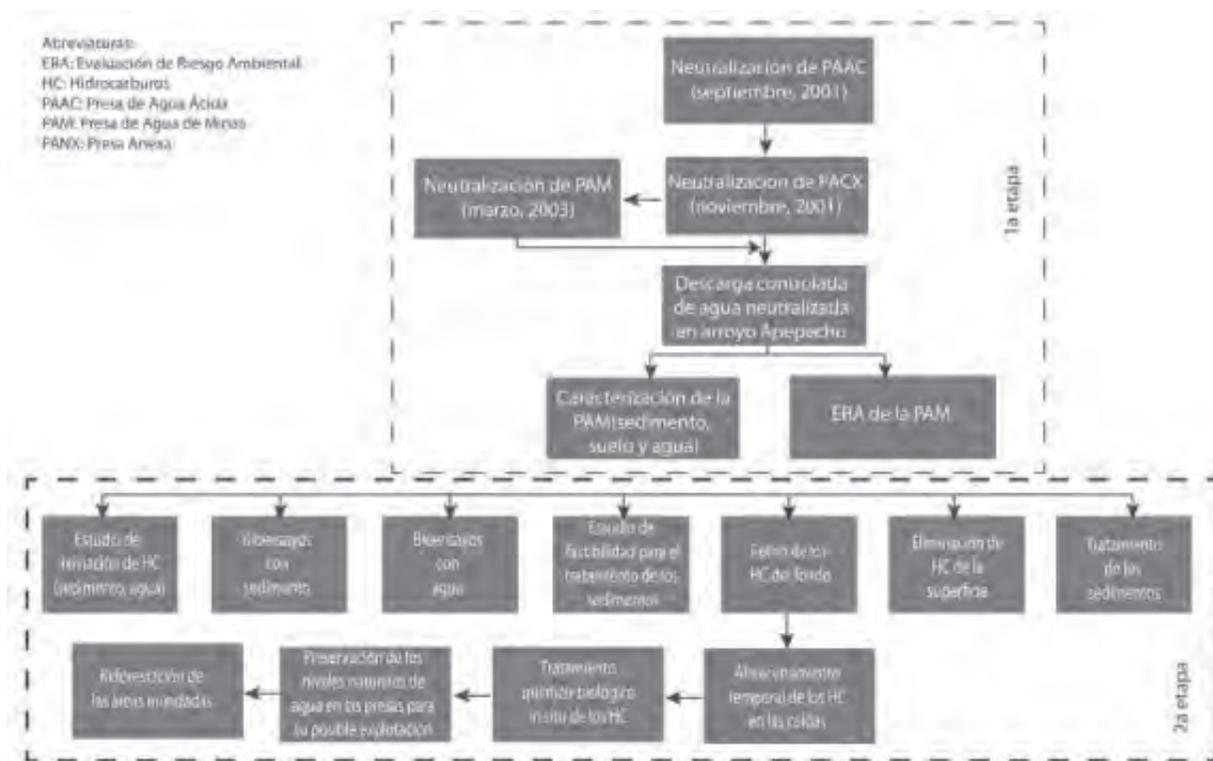


Figura 5. Etapas de la estrategia de remediación de las presas de aguas ácidas.

9. El complejo petroquímico de Cosoleacaque, conocido como PECOSA, produce en promedio 2,394 t/d, usadas principalmente para la producción de fertilizantes y, en menor medida, para producir textiles, plásticos, papel, alimentos, bebidas, productos domésticos de limpieza y refrigerantes (González, 2010).

ordenó la apertura de la compuerta de descarga hacia el arroyo Apepecho, pues se temía el desborde de las presas con afectación a cientos de personas y hectáreas de terrenos de no ejecutarse tal acción. En septiembre del 2001 se neutralizó el agua de esta presa.

Dos meses después se logró la neutralización de la presa Anexa, para lo cual se usó sosa cáustica, $\text{Na}(\text{OH})$, al 50% de concentración. En esta presa se encuentra la compuerta de descarga hacia el arroyo Apepecho y fue precisamente en este punto donde se aplicó el álcali.

Si bien el amoníaco dio buenos resultados para la neutralización de la presa de Agua Ácida, también se identificaron riesgos¹⁰ al momento de su aplicación. Se decidió usar sosa cáustica pues su riesgo es menor. La neutralización se consiguió al aplicar 800 ton de este producto. Para lograrlo, se instaló una tubería o sosaducto a lo largo de ocho kilómetros, desde la dársena hasta la compuerta de descarga (Figura 2), pues en esa época, el camino existente era intransitable.

La parte más ardua de esta etapa fue la neutralización de la presa Agua de Minas, ya que por su gran volumen y extensión requirió una enorme cantidad de producto, una gran logística y planeación. En este caso, PGPB solicitó al II-UNAM un estudio de factibilidad para seleccionar el mejor neutralizante. Este indicó que el óxido de magnesio (MnO) era preferible pues el punto de equilibrio se lograba de manera rápida respecto a otras sustancias y con el aliciente de que el pH no rebasa el valor de 10, no es tóxico, no es combustible o explosivo y es de fácil aplicación.

Para la neutralización de esta presa se usaron 3,865 toneladas de óxido de magnesio (MnO), que fue aplicado por pescadores de la región, a través del convenio que realizó PGPB con el municipio de Texistepec. Los pescadores fueron provistos de equipos de seguridad, mascarillas para polvos, lentes, guantes y uniformes. Para la aplicación se necesitaron lanchas, ya que se hacía a través de costales que se vaciaban sobre el agua (Figura 6).

La neutralización se completó en marzo del 2003, año y medio después de haberlo logrado en la presa de Agua Ácida. Este lapso fue necesario para resolver diversos problemas logísticos, entre los que destacó el hecho de



Figura 6. Aplicación de óxido de magnesio en la Presa Agua de Minas (Fuente: PGPB).

que el óxido de magnesio es producido en México por una sola compañía: Química del Rey¹¹, propiedad de la compañía minera Peñoles, con sede en Laguna del Rey, Coahuila. Dada la enorme cantidad de producto requerido, se negoció un pedido especial para el proyecto, que requirió de un año para completarse. Además, fue necesario planear su transporte hasta Veracruz y su almacenamiento dentro de la UMIT. Después se implementó la metodología para su dosificación a través de costales y su monitoreo constante en diferentes puntos.

Una vez neutralizada la presa Anexa, comenzó el proceso de descarga controlada del agua hacia el arroyo Apepecho, como lo solicitó la CONAGUA, con lo que se dio cumplimiento a la normatividad establecida en la legislación ambiental, la NOM-001-SEMARNAT-1996; DOF, 1997.

3.2.2. Caracterización y bioensayos de toxicidad en sedimentos

El almacenamiento del agua ácida en las presas Agua de Minas y Anexa durante 22 años, tuvo como consecuencia la acumulación de los hidrocarburos remanentes del proceso de separación del azufre, los cuales eran transportados junto con el agua ácida hacia éstas. A su vez, en la parte suroeste de la presa Agua de Minas había depósitos de bentonita. Todo esto se puso de manifiesto al bajar el nivel del agua en las presas debido a las descargas

10. El amoníaco es altamente irritante y corrosivo, por lo que debe aplicarse con equipo de respiración autónoma, especialmente cuando se usa en grandes cantidades. También presenta riesgo de incendio o explosión al mezclarse con una gran cantidad de sustancias (FQ-UNAM, 2010). En la UMIT se tenía conciencia de los riesgos existentes, pero nunca se presentó accidente de este tipo ni intoxicación.

11. El óxido de magnesio se obtiene a partir de la calcinación de la dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] que se extrae de la mina La Esmeralda en Laguna del Rey, Coahuila (Peñoles, 2010).

controladas realizadas después de la neutralización. Para determinar la distribución y características de estos depósitos en el fondo de las presas, así como la afectación a los sedimentos (suelo) subyacentes, PGPB solicitó en 2006 el estudio “Caracterización físico-química y toxicológica de la presa Agua de Minas y presa Anexa. Unidad Minera Texistepec”, que fue elaborado por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) y el Instituto Tecnológico de Minatitlán (ITM).

Para la caracterización se dividió la zona de estudio en ocho secciones, incluyendo la presa Anexa, (Figura 7). Se realizó un muestreo dirigido utilizando una densidad de puntos de muestreo según la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (DOF, 2005), pero concentrando el muestreo aún más a las áreas donde estudios previos advirtieron concentraciones más altas de hidrocarburos, dando como resultado una densidad de puntos de muestreo de aproximadamente 0.86 puntos/ha, superior a la indicada por la norma antes citada que es de 0.6 puntos/ha para la superficie del sitio de estudio (350 ha). Para la toma de muestras se utilizó un equipo especial, diseñado y fabricado específicamente para el muestreo en esta área, que consiste en un nucleador de cuchara partida, tipo

“split spoon”, para obtener núcleos enteros no alterados. Las muestras de suelo se analizaron como se indica en la Tabla 7.

El volumen inicial de hidrocarburos depositados en el fondo de la presa Agua de Minas se calculó en 340,000 m³ con un grosor promedio de 12.5 cm. Las secciones en donde la capa de hidrocarburos era más espesa son el Playón Suroeste, parte media del Brazo Noroeste, la parte Norte y Oeste del Playón Norte, parte de las secciones presa Agua de Minas (PAM) Noreste y PAM Sureste, y en la orilla de presa, donde se retiraron las capas de hidrocarburos (Figura 7). Se espera en el futuro cercano hacer lo mismo para el resto del área afectada. Actualmente se estima que en el fondo de la presa aún existen cerca de 240,000 m³ distribuidos en el 60% de la superficie de la presa (191 ha) con un espesor que varía de 1 a más de 15 cm. Se observó que después de las actividades de remoción manual de la capa de hidrocarburos, la mayor parte de los sedimentos presentaban concentraciones por debajo de los 3,000 mg/kg de HFP, es decir, menores al LMP establecido por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 para uso de suelo agrícola/residencial. Sólo algunos puntos presentaron concentraciones por arriba de 63,500 mg/kg,

PARÁMETRO	MÉTODO DE DETERMINACIÓN O NOM DE REFERENCIA	NÚMERO DE PUNTOS DE MUESTREO
HFP (Hidrocarburos Fracción Pesada)	NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (DOF, 2005)	301
Hidrocarburos del Petróleo por Cromatografía de Gases	U.S.EPA 8015B	35
HAP (Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares)	NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (DOF, 2005)	35
Metales pesados (Cr, Pb)	Absorción Atómica	70
pH	Potenciométrico	70
Conductividad eléctrica	Potenciométrico	70
Análisis CRET1*	NOM-053-SEMARNAT-1993 (DOF, 1993)	12
Prueba Predictiva de Lixiviación (de HTP) y análisis de HTP** del extracto	NOM-053-SEMARNAT-1993 (Prueba PECT***) (DOF, 1993) U.S.EPA 418.1 (HTP)	65
Toxicidad de los sedimentos (toxicidad aguda) por: • Daphnia magna • Vibrio fischeri	NMX-AA-087-SCFI-1995 (DOF, 1996a) NMX-AA-112-SCFI-1995 (DOF, 1996b)	65

▲ **Tabla 7.** Parámetros determinados a las muestras de sedimentos extraídos de la presa Agua de Minas.

* Acrónimo de clasificación de las características a identificar en los residuos peligrosos y que significa: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico e inflamable.

** HTP = Hidrocarburos Totales del Petróleo.

*** Prueba de extracción; procedimiento de laboratorio que permite determinar la movilidad de los constituyentes de un residuo, que lo hacen peligroso por su toxicidad al ambiente.

u V. fischeri es el nombre actual de la bacteria que antes era conocida como Photobacterium phosphoreum (que es el nombre con el que aparece en la NMX mencionada).



Figura 7. Distribución de hidrocarburos en las presas Agua de Minas y Anexa. Las concentraciones se refieren a HFP (Fuente: Elaboración propia).

sobre todo en el extremo suroeste de la presa, incluso cerca de 300,000 mg/kg en un punto de muestreo. Se contempló la presencia casi nula de HAP. El área donde se encontraron algunos de estos hidrocarburos fue en la orilla de la presa Agua de Minas.

En la presa Anexa son pocas las áreas donde se observaron capas de hidrocarburos, principalmente en la parte Norte de la sección occidental de la presa, en la parte sureste fue escasa. El análisis de los hidrocarburos por cromatografía de gases indicó que se trataba en su mayoría

de alcanos cíclicos y ramificados, similares a los de un lubricante gastado pero mucho más viscosos. El 80% del material fue de hidrocarburos con cadenas de carbonos entre C15 y C25, con el 14% en el intervalo de de C10 a C15 y el 6% restante en el intervalo de C25 a C28. En las orilla de las presas, las partes más intemperizadas, se hallaron los hidrocarburos más pesados (C20 a C25 y C25 a C28). La casi nula infiltración de éstos en los sedimentos es resultado de la viscosidad e intemperización, que es más característica de una fracción pesada de hidrocarburos (Tabla 8).

ÁREA	ÁREA CUBIERTA POR HC	CONTAMINACIÓN POR HFP EN SEDIMENTOS			
		SIN HFP	0 – 3,000 mg/kg	3,000 – 63,500 mg/kg	> 63,500 mg/kg
Fondo de la PAM (no incluye playones)	60 % del total	87%	8%	4%	1%
Playón suroeste de la PAM	95 % del total	8%	15%	67%	10%
Fondo de la presa Anexa	10% del total	50%	30%	20%	0%

Tabla 8. Relación de contaminación entre la capa de hidrocarburos e hidrocarburos en sedimentos en las presas Agua de Minas y Anexa HC = Hidrocarburos; HFP = Hidrocarburos Fracción Pesada; PAM = presa Agua de Minas.

La poca presencia de HAP es típica en áreas donde ha habido más intemperización. En ninguna de estas muestras la concentración fue superior a lo indicado por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

El cromo y plomo en el sedimento de las presas se encontraron en general en concentraciones inferiores o similares a las muestras testigo aledañas a estos cuerpos de agua. En la presa Agua de Minas las concentraciones de plomo y cromo fueron de 17.15 y 28.13 mg/kg y en la presa Anexa las concentraciones de estos dos metales fueron de 22.3 y 23 mg/kg, respectivamente. En el sitio testigo las concentraciones de plomo y cromo fueron de nueve y 45 mg/kg. Por ello, los niveles actuales de estos metales no se consideran de importancia ambiental.

Además, se observaron depósitos de bentonita¹² en la sección denominada Playón Suroeste. Probablemente esta sustancia llegó a la presa a través del canal desde la zona de producción, y al llegar a la presa, se sedimentó cerca al área de descarga, en el extremo suroeste de la presa. Si bien en términos generales la bentonita no se considera peligrosa, se decidió aplicar pruebas CRETIB a algunas muestras de sedimentos (suelo subyacente a la capa de hidrocarburo o bentonita) tomadas en esa sección, al igual que en las orillas de la presa Agua de Minas, donde se observó la presencia de HAP y de HFP. Las concentraciones de HFP de estas muestras variaron entre 3,275 y 66,169 mg/kg, y la capa de bentonita en las muestras tomadas en el Playón Suroeste varió entre 0 y 1.35 m de profundidad. Los resultados indicaron que todas las muestras cumplieron todos los criterios de peligrosidad CRETIB considerados en la NOM-053-SEMARNAT-1993, además, los sedimentos no son residuos peligrosos según la NOM-052-SEMARNAT-2002 (Figura 8).

Todas las secciones presentaron pH neutros, a excepción de la presa Anexa y la sección del Playón Norte donde fueron ligeramente ácidos, alrededor de cinco unidades, es decir, la acidez de los líquidos depositados no afectó a los sedimentos y, por otra parte, después de la aplicación del óxido de magnesio, el agua de la presa Agua de Minas presenta una alta dureza (600 a 1,500 mg/l) factor que pudo haber tenido algún efecto de amortiguamiento. La conductividad eléctrica mostró valores muy bajos, por lo que se clasificaron los sedimentos como no salinos.

En lo que respecta al potencial de lixiviación de los hidrocarburos de los sedimentos en el agua, a través de la prueba de extracción PECT de la NOM-053-SEMARNAT-1993, la mayoría de las muestras tuvieron potenciales relativamente bajos de lixiviación, consistentes con los niveles permisibles de descargas a cuerpos de agua tipo B según la NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1997). Sin embargo, en algunas muestras los niveles fueron ligeramente más altos (< 15 mg/l) y en dos puntos las concentraciones de lixiviación resultaron altas (< 100 mg/l). Estos puntos no fueron preocupantes al considerar que la mayoría de las muestras de estas áreas presentaban potenciales de lixiviación bajos o nulos.

Las pruebas de toxicidad aguda se aplicaron a muestras de sedimentos obtenidas dentro de las presas Agua de Minas y Anexa, que se compararon con los resultados obtenidos en muestras de sitios testigo para tener un parámetro de referencia. Las pruebas se hicieron con la bacteria bioluminiscente *Vibrio fischeri* y la pulga de agua *Daphnia magna*. La bacteria *V. fischeri* al ser expuesta al extracto obtenido de los sedimentos de prueba reduce su luminiscencia en función de la toxicidad del extracto. La mayoría de los puntos evaluados fueron no tóxicos o



Figura 8. Toma de muestras de sedimentos de las presas Agua de Minas y Anexa (Fuente: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco).

12. La bentonita es un tipo de arcilla expandible muy fina que es utilizada en la formulación de lodos para la perforación de pozos.

ligeramente tóxicos. Algunas muestras presentaron toxicidad media en o cerca de la parte occidental del Playón Norte. Esto pudo haber resultado de la acidez residual observada en esta sección. En el Playón Suroeste, en las zonas con gran espesor de bentonita o en zonas con altos contenidos de hidrocarburos, se encontraron algunos puntos con toxicidad alta. Estos resultados se complementaron con los obtenidos en la evaluación de riesgo ambiental.

Las pruebas con *D. magna* reportan la concentración del contaminante a la que el 50% de la población presenta un efecto adverso determinado (CE50, concentración efectiva 50), que en este caso es la reducción de la movilidad de los organismos después de 48 horas de exposición. Al igual que con *V. fischeri*, la mayoría de los resultados indicaron toxicidad nula o muy baja y sólo se encontraron casos aislados de toxicidad media o alta en casos con altas concentraciones de hidrocarburos o con presencia de azufre en forma de H₂S debido a la existencia de condiciones anóxicas.

3.2.3. Caracterización y bioensayos de toxicidad en agua

Para el muestreo y caracterización fisicoquímica del agua de la presa Agua de Minas, se consideraron 50 puntos de

muestreo, a media columna de agua y con 15 de estas muestras se hicieron bioensayos de toxicidad aguda con *Daphnia magna* (Informe GTZ, Knie, 2003). La caracterización fisicoquímica del agua de la presa Agua de Minas, se efectuó de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997) y a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (DOF, 1989), (Tabla 9).

Todos los parámetros evaluados bajo la NOM-001-SEMARNAT-1996 estaban dentro de los intervalos establecidos. Los resultados de acuerdo con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para la protección de la vida acuática, el oxígeno disuelto (OD) en la mayoría de las muestras presentó concentraciones ligeramente inferiores (4 mg/l) a la concentración mínima indicada por estos criterios no oficiales (5 mg/l), pero en algunos casos llegó a ser de 7 mg/l. Es importante mencionar que pese a las condiciones no óptimas de concentración de oxígeno, se observó en la presa la presencia de algas y de múltiples peces pequeños. El nitrógeno amoniacal, el nitrógeno de nitritos y los fosfatos son otros parámetros que superaron los valores establecidos por estos criterios ecológicos; es probable que estos criterios no sean del todo apropiados para sistemas pantanosos tropicales, pues aún con los niveles encontrados se observó un desarrollo importante de la fauna y no se observó eutrofización.

Los bioensayos de toxicidad aguda con el cladóceros *Daphnia magna*, se realizaron exponiendo a los organismos

PARÁMETRO	MÉTODO DE DETERMINACIÓN O NOM DE REFERENCIA	NÚMERO DE PUNTOS DE MUESTREO
Metales pesados (Cr, Pb)	NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997)	50
Fósforo total		
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)		
Sólidos Suspendedos Totales (SST)		
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)		
pH	Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, CE-CCA-001/89 (DOF, 1989)	50
DQO (Demanda Química de Oxígeno)		
Oxígeno disuelto (OD)		
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₄)		
Nitrógeno de nitratos (N-NO ₃)		
Nitrógeno de nitritos (N-NO ₂)	NMX-AA-087-SCFI-1995 NMX-AA-087-SCFI-1995 (DOF, 1996a) NMX-AA-112-SCFI-1995 (DOF, 1996b)	15
Fosfatos (PO ₄ ³⁻)		
Toxicidad del agua (toxicidad aguda) por • <i>Daphnia magna</i> • <i>Vibrio fischeri</i>	NMX-AA-117-SCFI-2001	15
HTP en agua		

Tabla 9. Parámetros determinados a las muestras de agua extraídas en la presa Agua de Minas.

a las muestras de agua de la presa Agua de Minas a distintas concentraciones: 100, 50, 25, 12 y 6%.

La respuesta a la presencia de sustancias tóxicas se presentó con la inhibición en el movimiento del organismo, seguido por la muerte del mismo; de tal manera que se midió la concentración letal 50, CL50, como parámetro de toxicidad, concentración a la que se muere el 50% de la población expuesta. 10 de 15 muestras tomadas resultaron no tóxicas y las moderadamente tóxicas a tóxicas. Los resultados obtenidos con la bacteria *V. fischeri* indicaron nula toxicidad. Las diferencias se atribuyen a que probablemente los cladóceros son más resistentes al H₂S residual que aún pueda existir en la presa (Figura 9).

Se midieron HTP en la columna de agua, que resultó en concentraciones muy bajas (< 4 mg/l), lo que refuerza el resultado obtenido de las muestras de sedimentos, que indicaron bajo potencial de lixiviación. En términos generales se consideró que la descarga del agua de las presas hacia los cuerpos de agua vecinos cumple con la normatividad ambiental.



▲ **Figura 9.** Toma de muestras de agua de la presa Agua de Minas y su procesamiento en el laboratorio (Fuente: Instituto Tecnológico de Minatitlán).

3.3. Evaluación de riesgo ambiental

En el año 2006 la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) realizó una evaluación de riesgo ambiental (ERA) para las presas Agua de Minas y Anexa, con el objetivo de proponer criterios de remediación para evitar la dispersión de los contaminantes y asegurar la protección a los procesos biológicos en suelo y sedimentos, como a la salud pública.

Previa consulta a estudios anteriores del sitio (ver sección de caracterización), en la ERA se identificaron a los hidrocarburos como el contaminante de mayor importancia, principalmente alcanos ramificados y cíclicos, además se determinaron los escenarios de exposición que pudieron presentarse por la presencia de hidrocarburos en los sedimentos. El modelo conceptual consideró tanto a receptores humanos como a la biota que podría encontrarse en el área (Figura 10).

Un modelo conceptual relaciona los daños que podrían sufrir los receptores, seres humanos y recursos biológicos,



▲ **Figura 10.** Modelo conceptual de la ERA de las presas Agua de Minas y Anexa. Afectaciones causadas por exposición a hidrocarburos (HFP).

al estar en contacto con un contaminante a través de las rutas de exposición. En el modelo planteado para este sitio se dio un especial interés a los seres humanos, habitantes de las comunidades cercanas, debido a la exposición directa con los sedimentos contaminados y de la cadena trófica. Los otros receptores considerados fueron el ganado bovino que ingresa al lugar a pastar en las zonas de los playones de las presas y los peces de las presas Agua de Minas y Anexa.

La ingestión accidental del suelo contaminado y la ingestión de carne de pescado o ganado son las posibles vías de exposición. Esto se debe a la cercanía del municipio de Texistepec con la UMIT, otras comunidades como Palmillas, El Canal y Boquiapan en ciertas temporadas del año se abastecen de pescado proveniente de las presas Agua de Minas y Anexa.

3.4. Análisis de las rutas de exposición

3.4.1. Rutas incompletas

Consumo de agua contaminada: el estudio geohidrológico realizado por la UNAM demostró que los hidrocarburos presentes en la presas están confinados a los primeros estratos y aún con las concentraciones existentes en los sedimentos no existe contaminación del agua subterránea, la cual es un acuitardo que no podría ser aprovechado por su baja conductividad hidráulica.

3.4.2. Rutas completas

Contacto directo de humanos con el suelo contaminado: esta ruta se enfoca a niños o adultos que ingieren partículas de suelo contaminado de forma accidental. Esto aplica principalmente a los trabajadores agrícolas y a los niños que pudieran jugar en áreas aledañas. Esta ruta sólo se considera importante en el caso de los HAP.

Cadena trófica: esta ruta considera a las personas que pudieran ingerir carne o leche contaminada con hidrocarburos, aunque la probabilidad de consumo de estos productos es baja. Asimismo, se consideró que existe un riesgo potencial por el consumo de pescado proveniente de las presas ya que para estas comunidades es su principal

fFuente de alimentación por su abundancia en el área, su bajo costo y las prácticas del lugar. En estos casos las rutas de exposición son:

- Sedimento (suelo) → fitoplancton → zooplancton → peces pequeños → mojarra → humanos.
- Sedimento (suelo) → ganado (carne) → humano.

3.5. Estimación de los límites máximos recomendables

Con la ERA se determinaron las concentraciones en los sedimentos de la presa Agua de Minas para las cuales no se rebasan los valores de riesgo aceptable establecidos. Estas concentraciones se denominan límites máximos recomendables (LMR).

3.5.1. Efectos no cancerígenos

Se estimaron los LMR de exposición para los humanos en función del consumo potencial de pescado y ganado proveniente de las presas Agua de Minas y Anexa, para la población rural.

Para el pescado se estimó el LMR con la siguiente ecuación (efectos no cancerígenos). Las variables de esta ecuación y de las siguientes citadas en este apartado se definen en la Tabla 10:

$$LMR = \frac{DRf \times \text{Peso} \times FCU \times CP}{FBC \times TIP \times Abs \times FDPe \times FJP}$$

El factor de bioconcentración (FBC) se obtuvo de forma empírica a partir de las concentraciones de hidrocarburos (HFP; para los HAP los efectos de interés son los cancerígenos) en los sedimentos de la presa Agua de Minas y la concentración medida en la carne de los pescados. La fórmula utilizada es:

$$FBC = \frac{C_{carne}}{C_{sedimento}}$$

Para el consumo de carne de res, la ecuación usada para el cálculo del LMR fue:

$$LMR = \frac{DRf \times \text{Peso} \times FCU \times CP}{FBC \times TIC \times Abs \times FDC \times FP}$$

3.5.2. Efectos cancerígenos

Los LMR de HFP y HAP en sedimentos para una exposición por consumo de pescado procedente de las presas Agua de Minas y Anexa, se calcularon con la ecuación siguiente:

$$LMR = \frac{\text{Riesgo} \times \text{Peso} \times \frac{\text{Vida}}{\text{DUR}} \times \text{FCU} \times \text{FPC}}{\text{FBC} \times \text{TIP} \times \text{Abs} \times \text{FDPe}}$$

Para el caso del consumo de la carne de ganado bovino que pudiera estar contaminada se utilizó la siguiente ecuación, para ambos contaminantes:

$$LMR = \frac{\text{Riesgo} \times \text{Peso} \times \frac{\text{Vida}}{\text{DUR}} \times \text{FCU} \times \text{FPC}}{\text{FBC} \times \text{TIC} \times \text{Abs} \times \text{FDC} \times \text{FP}}$$

Para la población expuesta el peso promedio se estableció en 59 kg para la población rural, según las encuestas.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
DRf	Dosis de referencia aceptable del contaminante de interés. Dosis determinada mediante estudios toxicológicos para la que se ha probado que no existen efectos adversos. Se expresa en miligramos de la sustancia por unidad de peso corporal de los individuos expuestos por día (mg/kg d).
LMR	Límite máximo recomendable. Concentración máxima aceptable en el medio de exposición para el cual no se rebasan los valores aceptables de riesgo (mg/kg).
Peso	Peso promedio de la población expuesta al contaminante de interés durante el período de exposición (kg).
CP	Para sustancias no cancerígenas (efectos sistémicos) el riesgo se entiende como un cociente que resulta de dividir la dosis de exposición de los receptores entre la dosis de referencia. Generalmente se considera que el riesgo es aceptable cuando la dosis de exposición es igual o menor a la dosis de referencia (CP = 1, no tiene unidades).
Riesgo	Riesgo aceptable de desarrollo de cáncer para un individuo en el área contaminada. Para sustancias cancerígenas el riesgo se entiende como la probabilidad adicional (respecto a un grupo control) de desarrollar cáncer por exposición a una sustancia. Valores aceptables están en el intervalo de 1×10^{-4} y 1×10^{-6} .
Vida	Promedio de expectativa de vida de la población expuesta (años).
Ingesta	Tasa de ingestión de insumos por parte de la biota (suelo, alimentos o agua) (kg/d; l/d).
DUR	Duración de la exposición (años).
FCU	Factor de conversión de unidades (1×10^3 g/kg).
FPC	Factor de pendiente de cáncer. Representa la potencia de una sustancia para producir cáncer. Es la pendiente de la curva dosis (mg/kg d)-respuesta (e.g., casos de cáncer) [(mg/kg d) ⁻¹].
TIP	Tasa de ingestión de pescado de la población expuesta (g/d).
TIC	Tasa de ingestión de carne de ganado bovino de la población expuesta (g/d).
Abs	Factor de absorción gastrointestinal. Representa la fracción de la sustancia que se absorbe a través del tracto gastrointestinal (no tiene unidades). Se usó un factor conservador de 1 (todo se absorbe).
FP	Factor de Pastoreo (Soil Use Factor – SUF). Tiempo que el ganado pastorea en el área contaminada (estimada en 50% = 0.5, según entrevistas y observaciones).
FDPe	Fracción de la dieta total, de la población expuesta, compuesta por pescado proveniente del área contaminada (no tiene unidades).
FDC	Fracción de la dieta total, de la población expuesta, compuesta por carne de ganado bovino proveniente del área contaminada (no tiene unidades).
FBT	Factor de biotransferencia. Relaciona la concentración de contaminante en la carne de la biota con su ingesta diaria de la masa de contaminante (d/kg).
FBC	Factor de bioconcentración. Relaciona la concentración en la biota respecto a la concentración en un medio de contacto (no tiene unidades).
FJP	Factor de juicio profesional. Se aplicó un factor de 10 considerando la incertidumbre que se podría haber en los datos estimados para los cálculos.
C _{sedimento}	Concentración del contaminante en el sedimento (mg/kg).
C _{carne}	Concentración en carne de la biota (mg/kg).
C _{HC ingesta}	Concentración de hidrocarburos (contaminante de interés) en la ingesta de la biota (alimentos o suelo consumidos por la biota, en este caso por el ganado bovino y los peces) (mg/kg).

▲ **Tabla 10.** Descripción de las variables usadas en las ecuaciones para la estimación de LMR con base en la ERA.

Nota: el término biota, en este caso, se refiere a los organismos, ganado bovino y peces, que sirven de alimento a la población expuesta, a los humanos.

El promedio de expectativa de vida considerado fue de 65 años para efectos cancerígenos (WSD, 1991) y de 30 años para efectos sistémicos. El riesgo aceptable para efectos cancerígenos se estimó en 1×10^{-4} considerando que según la Organización Mundial de la Salud (OMS) o por su nombre en inglés, World Health Organization (WHO, 2005) la tasa de mortandad por todas las clases de cáncer en México es de $1/877 = 1.14 \times 10^{-3}$, o aproximadamente $1/1000$. Para el propósito de este estudio se usó un nivel conservador 10 veces más exigente ($1/10,000 = 1 \times 10^{-4}$).

Por su naturaleza, para evaluar a los HTP-FP se usó la dosis de referencia oral para efectos no cancerígenos propuesta por TPHCWG (1997) para aceites que contienen fracciones alifáticas de C17 – C34, que es de 2 mg/kg/día. En el caso de los HAP, su principal riesgo es por el desarrollo de cáncer. Para evaluar este efecto por exposición a los HAP definidos en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 se usaron los valores de factor de pendiente de cáncer (FPC) indicados por la base de datos Integrated Risk Information System de la U.S. EPA para el benzo(a) pireno (que es el HAP usado como subrogado) que al momento de la evaluación era de $7.3 \text{ (mg/kg/d)}^{-1}$ (IRIS, <http://www.epa.gov/iris/>).

- En resumen se muestran las tasas de consumo de alimentos, carne de res y pescado, obtenidas mediante encuestas: Tasa de ingestión de carne de res en peso fresco (población rural): 33.8 g/persona/día.
- Tasa de ingestión de pescado en peso fresco (población rural): 167.3 g/persona/día (19.3 g/persona/día en base seca).

El valor de la fracción de absorción gastrointestinal para los hidrocarburos en la población expuesta se estimó en 36% (0.36), obtenido a partir de estudios en animales en los cuales se ha demostrado que los hidrocarburos minerales tienen un máximo de absorción de 4%. Este número fue afectado por los factores de incertidumbre recomendados por el Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group (TPHCWG, 1997): tres para la extrapolación de estudios en animales a efectos en humanos y tres para la extrapolación de un estudio subcrónico a un efecto crónico. La fracción de la dieta compuesta por carne de res en el sitio de estudio se estimó con un valor conservador de 1.0 (población rural) y para el consumo de pescado de 0.05. Para calcular su concentración en la población expuesta se usaron los valores de factores de bioconcentración (FBC) y biotransferencia (FBT).

Para los hidrocarburos semivolátiles y no volátiles, como se encuentran en la presa, la ruta de exposición suelo – raíz – hoja – ganado es inconsecuente debido a la muy

baja transferencia del suelo a la hoja (Briggs et al. 1982; Pattanayek y DeShields 2003). Sin embargo, el ganado consume suelo accidentalmente con el pasto, y a veces es intencional, al buscar sales y minerales en una proporción aproximada de 6% (IAEA 1994), esto es una ruta de exposición de importancia para varios compuestos orgánicos (Zach y Mayoh, 1984), por lo que al calcular el FBT se consideró una mezcla de pasto no contaminado y suelo contaminado, como la ingesta del ganado.

Aunque había muy poca información acerca de la biotransferencia de hidrocarburos del petróleo, este factor se evaluó de manera conservadora, al utilizar los FBT para carne de res (Bb, biotransfer in beef) de Travis y Arms (1988) en función del coeficiente de partición octanol-agua (Kow) de los compuestos estudiados. En ese trabajo mencionan siete compuestos con Kow alto ($\log Kow > 5.75$). Para la concentración de HFP y HAP en la carne del ganado bovino procedente del área de sedimentos expuestos de la presa Agua de Minas se utilizó la ecuación:

$$C_{\text{carne de res (mg/kg)}} = (\text{FBT}) \times (\text{Ingesta}) \times (C_{\text{HC ingesta}})$$

Los HFP en la ingesta coincidieron con las concentraciones de HFP medidas en los sedimentos superficiales del fondo de la presa y en el pasto creciendo sobre él. Con estas consideraciones, el valor calculado de concentración de HFP en la carne de res fue de 2,310 mg HFP/kg carne. Comparando la concentración en suelo (50,000 mg/kg, valor determinado como promedio general por la UJAT) y la concentración en la carne (2,310 mg/kg) se calculó un factor de bioconcentración (FBC): 0.0462. Este mismo valor se usó para los HAP.

El FBC para pescado se determinó empíricamente a través de la concentración de HFP de la carne de pescados de la presa Agua de Minas (172 mg/kg) y la concentración de hidrocarburos en los sedimentos superficiales de la presa (3,547 mg/kg). El valor estimado fue de 0.0485 y se usó para ambos tipos de contaminantes.

Con las ecuaciones indicadas se obtuvieron los límites máximos recomendables de concentraciones de HFP y de HAP en los sedimentos de las presas Agua de Minas y Anexa. Estos límites son las concentraciones máximas permisibles para no rebasar el riesgo aceptable en la población humana por consumo de pescados y ganado en contacto con los sedimentos de las presas (Tabla 11).

Los resultados de la ERA y los ensayos ecotoxicológicos de la caracterización (bioensayos con *D. magna* y *V. fischeri*),

CONTAMINANTE	EXPOSICIÓN	RECEPTOR	LMR (mg/kg)
HFP	Consumo de carne de ganado bovino	Poblaciones rurales	95,600*
	Consumo de carne de pescado	Poblaciones rurales	70,000***
	Consumo de carne de pescado	Poblaciones urbanas	78,000
	Producción de pasto forrajero	Pasto	2,600
HAP **	Consumo de carne de pescado	Poblaciones rurales	18
	Consumo de carne de ganado bovino	Poblaciones rurales	120

▲ **Tabla 11.** LMR en los sedimentos de las presas Agua de Minas y Anexa por consumo de carne de pescado y de res. Resultados de la ERA.

* Esta concentración en suelo no produce efectos adversos en los receptores pero dificulta el crecimiento del pasto debido a los cambios en las propiedades físico-químicas del suelo. Por este motivo se obtuvo de forma experimental la concentración a la que es posible el crecimiento natural del pasto sin necesidad de un tratamiento extra; como resultado de los experimentos se propuso el LMR de 2,600 ppm.

** Todos los HAP de NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

*** Concentración limitante para HFP, esto es, la más restrictiva en función de riesgo.

permitieron hacer una evaluación más completa del lugar. Si bien los LMR obtenidos para los sedimentos de las presas Agua de Minas y Anexa con la ERA son bastante altos (70,000 mg/kg para exposición a pescados y 95,600 mg/kg para exposición a carne de ganado bovino en contacto con los sedimentos) se decidió remediar los sedimentos de las zonas donde las concentraciones sobrepasaran la concentración límite (70,000 mg/kg) y cuyos valores de toxicidad con *V. fischeri* fueran altos (en el Playón Suroeste). En esa zona se construiría un bordo de contención para separar el área a tratar y bordos de contención de aguas para propiciar el paso de vehículos y así facilitar el transporte de los hidrocarburos que se retiraran del fondo en etapas posteriores del proyecto (Figura 11).

El área total remediada fue de 23 ha de sedimentos con un metro de profundidad, equivalente a 23,000 m³ de suelo. La capa de hidrocarburos y bentonita se retiraría previamente y se llevaría a celdas de almacenamiento temporal dentro de la misma UMIT.



▲ **Figura 11.** Zona de remediación de sedimentos en la Presa Agua de Minas. Las líneas blancas señalan los bordos para trasportar los hidrocarburos retirados (Fuente: Elaboración propia).

4. Selección y aplicación de las tecnologías de remediación

4.1. Celda de estabilización de La Carbonera

Una vez realizada la caracterización de La Carbonera se evaluaron tres alternativas de tratamiento o disposición de los residuos ácidos:

- Confinamiento controlado, considerando la factibilidad de enviar los residuos a un confinamiento autorizado.
- Construcción de celdas de confinamiento *ex situ* (en un sitio cercano a la UMIT).
- Construcción de celdas de confinamiento *in situ*.

Para cada una de estas opciones, se elaboró un análisis del beneficio (Tabla 12), así como el factor social. En experiencias previas relacionadas al transporte de residuos peligrosos se observó que para evitar fricciones sociales era preferible que las partes involucradas en la solución del problema fuesen locales. Se analizó la posibilidad de activar la economía de la zona al utilizar mano de obra del municipio. Para ello, la estabilización de los residuos se realizó dentro de la localidad.

La construcción de la celda *in situ* inició en octubre del 2004 y concluyó un año después. Como primera etapa

ALTERNATIVA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Disposición en confinamiento controlado (CIMARI)**	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de la fuente de contaminación • El CIMARI es responsable del confinamiento • No requiere gastos de mantenimiento • Liberación del terreno • No se requiere evaluación de impacto ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de transporte • Generación de partículas • Riesgos durante el transporte (21 localidades en tres estados) • El residuo requiere tratamiento previo
Celdas de estabilización <i>ex situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de la fuente de contaminación • Generación de empleos para la población local 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere movimiento de material (corta distancia) • Requieren trámites de autorización ambiental • Requiere realizar obras de ingeniería • Generación de partículas • Se requiere evaluación de impacto ambiental
Celdas de estabilización <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de la fuente de contaminación • Generación de empleos para la población local • Movimiento mínimo de los residuos (reacomodo) • Poca generación de partículas • Es posible la neutralización de los lixiviados remanentes • El sitio es adecuado (estratigrafía y topografía) 	<ul style="list-style-type: none"> • El residuo se queda en el predio del generador (terreno inutilizable) • Requieren trámites de autorización ambiental • Requiere realizar obras de ingeniería • Generación de partículas • Se requiere evaluación de impacto ambiental

▲ Tabla 12. Análisis comparativo de alternativas de confinamiento de los residuos ácidos de La Carbonera.



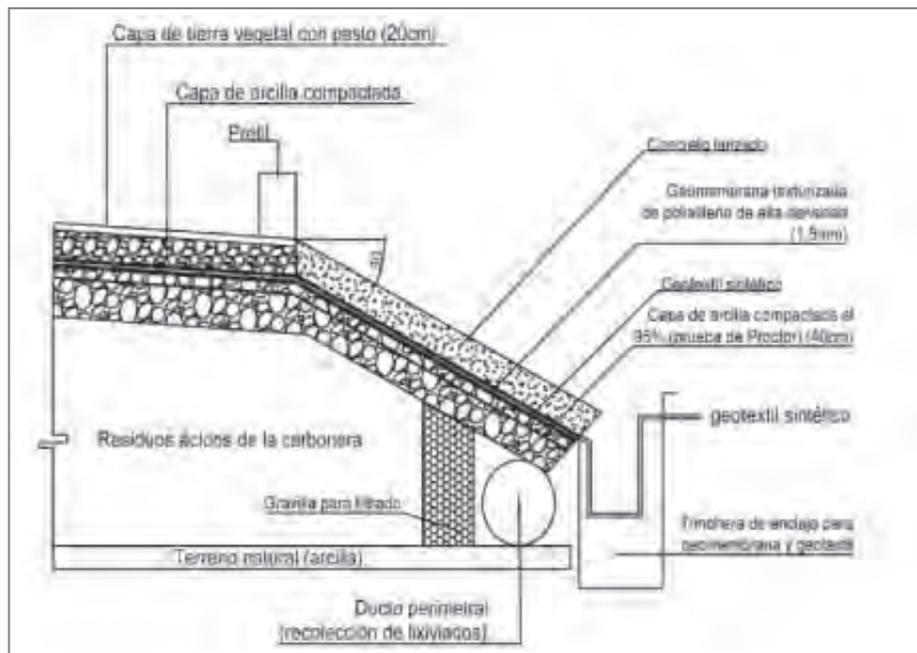
▲
Figura 12. Movimiento de tierras en La Carbonera
(Fuente: PGPB).



▲
Figura 13. Compactación de arcilla en La Carbonera
(Fuente: PGPB).

se hizo el movimiento de tierras dentro de la Carbonera (Figura 12), se desmontaron las estructuras metálicas existentes y se demolieron las bases y construcciones de la ex planta de filtrado, ubicada junto al área de vats.

Posteriormente se inició el extendido y nivelado del terreno, incluyendo las áreas anexas a La Carbonera y las rampas de acceso a la misma. Para esta actividad se usó maquinaria pesada de diferentes tipos (Figura 13).



▲
Figura 14. Diseño de la celda de estabilización de los residuos ácidos de La Carbonera.



▲
Figura 15. Colocación de la geomembrana en la celda de estabilización (Fuente: PGPB).

Paralelamente se acarrió a La Carbonera el material contaminado con carbón y azufre disperso en el predio productivo, 43 montículos, con un volumen aproximado de 250,000 m³. Todo este material se acomodó y compactó en una forma geométrica parecida a una pirámide truncada.

Como se aprecia en la Figura 14, una vez formada la celda de estabilización se colocaron sobre ella dos capas de arcilla impermeable de 40 cm, compactada hasta el

95 % PVSM (peso volumétrico seco máximo, prueba Proctor). Posteriormente se colocó una cubierta con membrana de alta densidad y resistencia química, geomembrana de polietileno de alta densidad, y una capa de geotextil de polipropileno (Figura 15). En la parte de la corona, la geomembrana quedó empotrada entre las dos capas de arcilla.

Los taludes fueron cubiertos con una malla metálica electrosoldada y una capa de concreto lanzado. (Figura 16).



Figura 16. Construcción de la celda de estabilización. Colocación de la malla metálica electrosoldada (izquierda) y aplicación de concreto lanzado (derecha), (Fuente: PGPB).

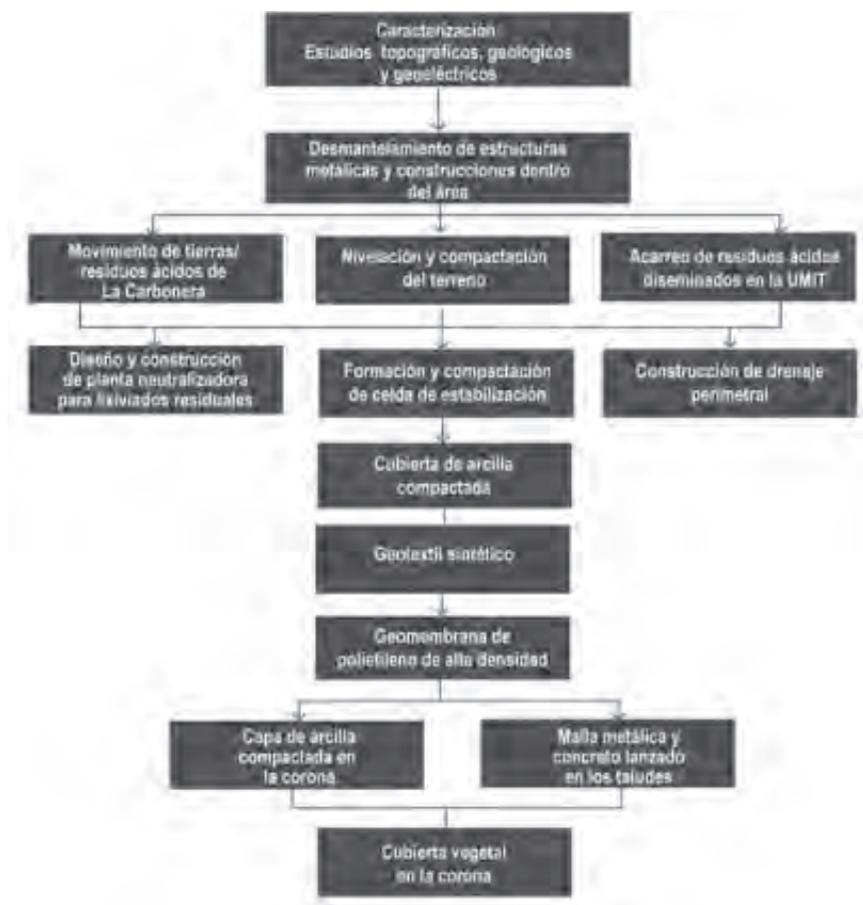


Figura 17. Diagrama de flujo para la construcción de la celda de estabilización de La Carbonera.

En la parte superior se distribuyó una capa de 20 cm de tierra vegetal con pasto, un pretil y escurrideros para drenar el agua de lluvia, colectada por un drenaje lateral colocado en una trinchera de anclaje para la geomembrana. En la parte superior de la celda se instalaron pozos de venteo para evitar una subpresión de los lixiviados y permitir su escurrimiento.

En la Figura 17 se muestra el diagrama de flujo de la construcción de la celda de estabilización.

Para captar los escurrimientos de lixiviados ácidos, se construyeron un canal de filtración y un dique en el perímetro del montículo, con pendiente adecuada para descargar los lixiviados residuales a un laboratorio de neutralización. Para filtrar se utilizó grava de 19 mm (3/4") y como conducto, tubería de polietileno de alta densidad con diámetro de 18".

El laboratorio de neutralización está integrado por un cárcamo para recibir los lixiviados remanentes de los residuos ácidos (Figura 18). Estos lixiviados se neutralizan diariamente con óxido de magnesio antes de descargarse a la presa de Agua Ácida.

Las obras complementarias son: subestación eléctrica de 13.8 kva, sistema de protección contra incendios y



▲ **Figura 18.** Laboratorio para la neutralización con óxido de magnesio de los lixiviados ácidos remanentes de la celda de estabilización.



▲ **Figura 19.** Vistas de la celda de estabilización que contiene los residuos ácidos de La Carbonera (Fuente: PGPB).



Figura 20. Reforestación en la zona de la celda de estabilización. A) Cubierta vegetal en la corona de la celda y ducto de ventilación. B) Siembra de especies vegetales en los alrededores (Fuente: PGPB).

riego, barda perimetral para resguardar las instalaciones, caseta de vigilancia, caminos de tercerías, alumbrado y pozos de monitoreo.

Esta gran obra de ingeniería tiene un volumen total aproximado de 800,000 m³ de residuos ácidos contenidos, con un área de 62,256 m² y una altura de 14.5 m (Figura 19). El revestimiento ha sido exitoso, pues cada vez son menos los lixiviados remanentes que se lixivian hacia el cárcamo de neutralización. Se acompañó por un proyecto de reforestación del área, se sembraron especies maderables y de ornato propias de la vegetación circundante del sitio, como roble (*Quercus candicans*), cedro rojo (*Cedrela odorata*), primavera (*Roseodendron donnell-smithii*), caoba (*Swietenia macrophylla*), teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina pentandra*), ceiba (*Ceiba pentandra*) y guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*) (Figura 20).

4.2. Presas de aguas ácidas

Entre las acciones de remediación se retiró parte de la capa de hidrocarburos expuestos una vez que bajó el nivel de las aguas dentro de las presas. Esta tarea se mantendrá en etapas posteriores del proyecto hasta completar la totalidad de la presa Agua de Minas.

A continuación se describe el proceso para retirar los hidrocarburos del fondo de la presa Agua de Minas y también la selección de la tecnología de tratamiento para los sedimentos que así lo requirieron.

4.2.1. Evaluación de técnicas de remediación para sedimentos

Los resultados de los análisis de hidrocarburos en sedimentos demostraron que en algunos puntos había altas concentraciones de estos compuestos, sobre todo en el Playón Suroeste y otras partes de las orillas de la presa Agua de Minas, que eran superiores a 63,000 mg/kg de HFP (Figura 7). Por otra parte, la ERA y los bioensayos con sedimentos, confirmaron la necesidad de remediar los sedimentos de la zona del Playón Suroeste (Figura 11) por lo que se realizaron pruebas de factibilidad en fase sólida y líquida para determinar con mayor precisión el manejo de los parámetros importantes en la remediación, y así optimizar el proceso, reduciendo los tiempos y costos asociados.

Se evaluaron tres técnicas de remediación: bioestimulación con fertilizantes, bioaumentación con microorganismos autóctonos y estabilización químico-biológica, de acuerdo con el diseño experimental que se muestra en la Figura 21. Las técnicas de biorremediación usan a los microorganismos del ambiente para la degradación de contaminantes. Si la biorremediación es *in situ*, pueden aplicarse técnicas de biestimulación que consisten en agregar nutrimentos que estimulen la actividad biológica de los microorganismos nativos y de bioaumentación, que es adicionar microorganismos previamente aclimatados a los contaminantes que se espera degradar.

Para el tratamiento de bioestimulación se agregó el fertilizante comercial Grow-Feed 20-30-10, NPK, al suelo contaminado, aireándose y humedeciéndose diariamente. La bioaumentación consistió en adicionar microorganismos al suelo además de la bioestimulación con fertilizantes, en forma similar al tratamiento 1.

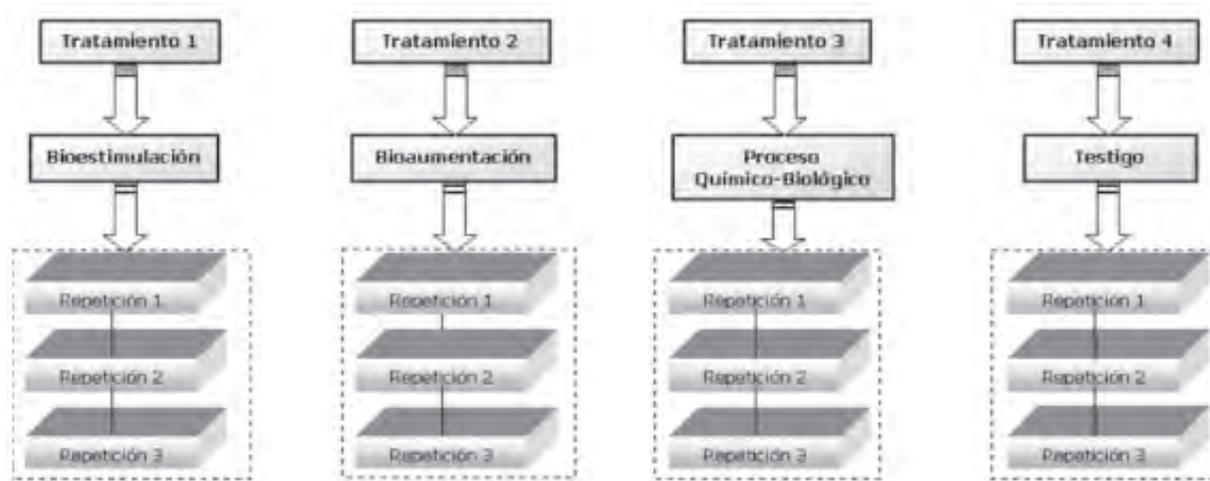


Figura 21. Diseño experimental de las pruebas de factibilidad para la remediación del sedimento (suelo) contaminado de la presa Agua de Minas (Fuente: Instituto Tecnológico de Minatitlán).

En el tratamiento 3 se aplicó la estabilización químico-biológica que consistió en agregar cal y cachaza de caña. El tratamiento 4 consistió en que a una muestra testigo —a la que ningún factor fue modificado— se le hayan simulado condiciones del lugar sin remediar durante el periodo del estudio.

El experimento fue realizado en celdas a la intemperie, donde se colocó el material contaminado con hidrocarburos extraído de la presa Agua de Minas (Figura 22). Para el suelo destinado a la bioaumentación, éste se extrajo de la interfase suelo contaminado – suelo limpio y en la superficie del suelo en este punto, debido a que es aquí donde se pueden encontrar las condiciones óptimas para los microorganismos degradadores de hidrocarburos; esto debido a una toxicidad intermedia y a una mayor concentración de nutrientes, aireación y humedad. La capacidad de degradación de los microorganismos nativos del suelo se evaluó a través de cultivos

suelo: agua desionizada (10:90) a los que se agregó una pequeña concentración de hidrocarburos del sitio. De estos cultivos se obtuvieron cepas de bacterias viables para la bioaumentación.

El proceso de estabilización químico-biológica constó de dos fases. En la primera se realizó la química mediante la adición de 4% de cal hidratada $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ en peso seco del material a tratar, durante tres días. Después se continuó con la fase biológica que consistió en agregar un acondicionador orgánico, en este caso fue cachaza, que es un residuo del procesamiento de la caña de azúcar, a una concentración de 4% en peso seco del suelo y 1% de ácidos húmicos.

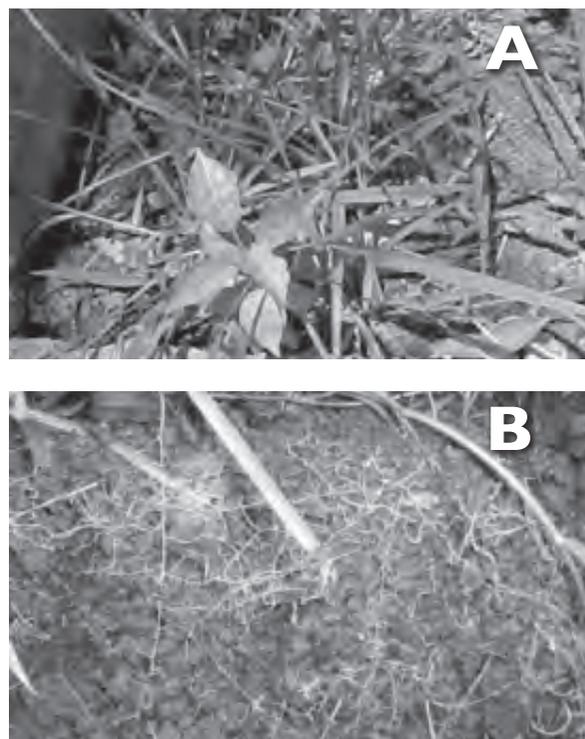
Se tomaron muestras compuestas del suelo de cada tratamiento una vez al mes, los días 0, 25, 55 y 85, para verificar la degradación de los HTP, medidos por el método U.S.EPA 418.1. Al final del experimento también



Figura 22. Experimentos para evaluar las técnicas de remediación de sedimentos: A) Interfase suelo contaminado–suelo limpio. B) Obtención del extracto de suelo contaminado para el cultivo de bioaumentación. (Fuente: Instituto Tecnológico de Minatitlán).

se determinó toxicidad aguda por medio de la bacteria *V. fischeri* (NMX-AA-112-SCFI-1995; DOF, 1996b). Los resultados indicaron, en general, una baja remoción, pero el proceso de estabilización químico-biológica fue el que obtuvo mayor eficiencia (15.6%) y además fue el que presentó los mejores resultados en las pruebas de toxicidad, en este caso se redujo de manera amplia desde un nivel ligeramente tóxico (15.3 UT¹³) a uno no tóxico (<10 UT). Después de la estabilización de los hidrocarburos se sembraron semillas del pasto humidícola (*Brachiaria humidicola*) y en las celdas tratadas con estabilización químico-biológica se observó un crecimiento profuso de la biomasa foliar y el sistema radicular (Figura 23). También crecieron especímenes de malva (*Waltheria americana* L.), Tabebuia rosea (*maculis*), cedro (*Cedrela odorata* L.), sandía de culebra (*Eupatorium capillipes*) y pepino de monte (*Melothria pendula*).

Con los resultados obtenidos de las pruebas de factibilidad se concluyó que la mejor alternativa de tratamiento para los 23,000 m³ de sedimentos de la presa Agua de Minas que requerían remediación —debido a las altas concentraciones de hidrocarburos y bentonita, a los valores de toxicidad en sedimentos y la evaluación del riesgo ecológico— era el tratamiento químico-biológico. Además, esta opción ofrecía el mayor beneficio (Tabla 13), con el factor adicional de que las áreas tratadas que después quedaran expuestas podrían ser usadas para el crecimiento de forraje para el ganado sin que esto represente riesgo para éste y la población que lo consume como alimento (ver sección de Riesgo ambiental).



▲ **Figura 23.** A) Biomasa foliar y B) desarrollo radicular del pasto *Brachiaria humidicola* en las celdas tratadas con la estabilización químico-biológica (Fuente: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco).

FACTOR	TRATAMIENTO		
	BIOESTIMULACIÓN	BIOAUMENTACIÓN	ESTABILIZACIÓN QUÍMICO-BIOLÓGICA
	BENEFICIOS		
Reducción de HTP	14.25 %	14.3 %	15.6 %
Tiempo de Tratamiento	3 meses	3 meses	3 meses
Reducción de toxicidad	Completa	Ligera	Completa/Estimulación
Eliminación de Lixiviados	Completa	Completa	Completa
Crecimiento de especies vegetales	Escaso	Escaso	Abundante

▲ **Tabla 13.** Análisis de las alternativas de tratamiento de los suelos (sedimentos) de la presa Agua de Minas.

13. En las pruebas de toxicidad, basadas en la Concentración Efectiva 50 (CE50) o similares, los valores más bajos de CE50 representan mayor toxicidad, lo que puede causar confusión. Por lo que muchas veces es preferible convertir los valores de toxicidad a Unidades de Toxicidad (UT) en donde hay proporcionalidad entre la toxicidad y el valor numérico de la escala usada. La conversión se hace a través de la fórmula: $UT = 10^6 / [CE50 \text{ (en ppm)}]$.

4.2.2. Eliminación de hidrocarburos de la presa Agua de Minas

Los hidrocarburos acumulados en el fondo de la presa Agua de Minas quedaron al descubierto en algunas zonas cuando los niveles de las aguas bajaron como consecuencia del desfogue controlado. La estrategia seguida por PGPB para atacar este problema en función del espesor de los hidrocarburos, su concentración como lo son los hidrocarburos fracción pesada y su toxicidad, fue retirar esta capa de tal manera que los sedimentos subyacentes pudieran ser usados posteriormente para el crecimiento de vegetación natural, o bien pastizales para la cría de ganado, actividad muy practicada en la región.

La eliminación manual de la capa de hidrocarburos demostró ser el método más eficiente (Figura 24), ya que de esta forma se tiene un mejor control sobre el corte del paquete de material. El uso de maquinaria para esta actividad, aunque reduce el tiempo de trabajo, es poco eficiente al momento de controlar el corte, pues junto con el hidrocarburo también se retira una capa importante de suelo, que como ya se vio, en su mayoría está en buenas condiciones y es adecuado para sustentar a la biota. Por otra parte, la capa de hidrocarburo con las altas temperaturas adquiere una consistencia viscosa que dificulta el desplazamiento de la maquinaria pesada por el área de trabajo. Se eliminó en un 40% del área superficial del fondo de la presa Agua de Minas, aproximadamente 100,000 m³ de material (Figura 7). En algunas épocas del año, con las altas temperaturas, parte de éste aún remanente en el fondo, se desprende y forma manchas en el espejo de agua. Estos hidrocarburos también se eliminaron manualmente mediante la adición de polvos orgánicos y su retención con barreras de contención (Figura 24).

Tanto el material retirado del fondo como el que se colectó en la superficie del espejo de agua fueron



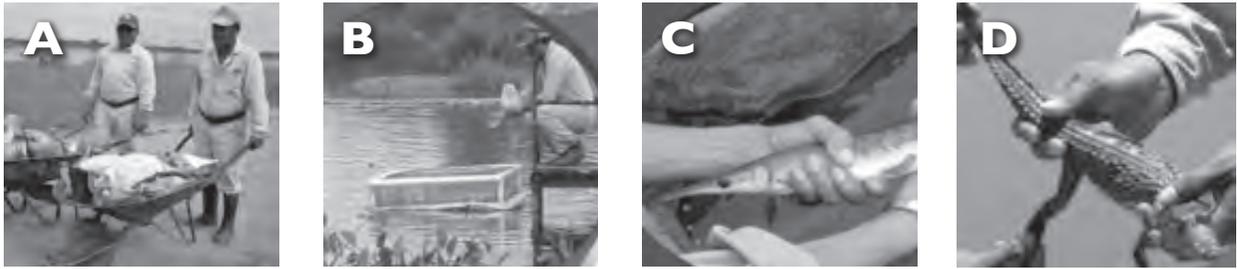
▲ **Figura 25.** Eliminación de la capa de hidrocarburos del fondo de la presa Agua de Minas (Fuente: PGPB).

transportaron en camiones (Figura 25) y depositados en una serie de celdas de almacenamiento temporal ubicadas al noreste del Brazo Noroeste de la presa Agua de Minas (ver ubicación en la Figura 7).

Mientras el pasivo ambiental estuvo desatendido, la población se sentía bajo un alto riesgo exacerbado por la escasa información que tenían respecto a los riesgos reales que representaba el sitio, lo que creó un ambiente agresivo y de desconfianza hacia PEMEX. La necesidad de retirar los hidrocarburos se vio como una oportunidad para



▲ **Figura 24.** Eliminación de los hidrocarburos de la superficie de la presa Agua de Minas. A) Aplicación de polvos orgánicos B) Recolección manual de los hidrocarburos (Fuente: PGPB).



▲ **Figura 26.** Participación de los pobladores de Texistepec en actividades de rehabilitación del predio de la UMIT. A) Colecta de basura dentro del predio. B) Acuacultura dentro de las presas. C) Pejelagarto dentro de las presas. D) Un ejemplar de cocodrilo (Fuente: PGPB).

involucrar a la población en la atención del problema y contribuir a activar la economía de la zona. Así, el gobierno municipal de Texistepec y PEMEX establecieron un convenio de colaboración para que personas del poblado, previa capacitación, participaran en la eliminación de la capa de hidrocarburos y recibieran remuneración adecuada.

Esta contribución inicial de los afectados en la remediación del sitio creó conciencia entre ellos y los incentivó a participar en otras acciones de rehabilitación, como el hecho de poblar las presas Anexa y Agua de Minas con especies de la región (nativas e introducidas), como pejelagarto (*Lepisosteus sp.*), tilapia (*Oreochromis sp.*), mojarra pinta (*Cichlasoma friedrichsthalii*), mojarra paleta (*Cichlasoma bifasciatum*), y cocodrilos (*Crocodylus sp.*). Para ello, los pescadores de la zona colectaron especímenes en los arroyos cercanos y los liberaron dentro de las presas, además, instalaron jaulas flotantes de acuacultura, actividad que representa una alternativa de crecimiento económico individual, local y regional (Figura 26). Una vez resuelto el pasivo ambiental, estos cuerpos de agua contribuirían a mejorar la calidad de vida de los pobladores. Cabe destacar que con la remediación del sitio también se ha visto una población

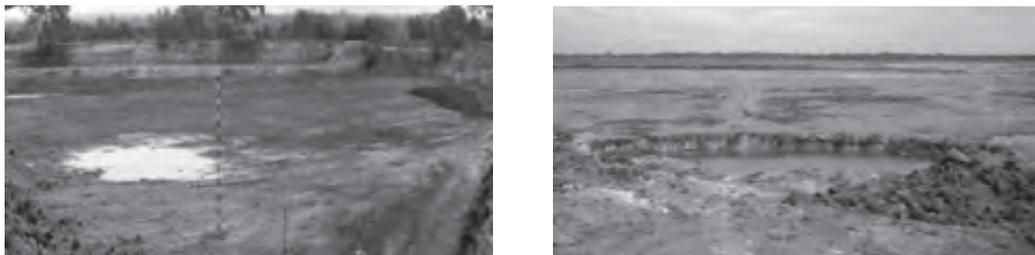
creciente de aves, entre ellas la cigüeña americana (*Mycteria americana*) y el pichiche (*Dendrocygna sp.*).

En la UMIT, los lugareños se involucraron activamente en otras tareas, como el mantenimiento de algunas áreas verdes con especies vegetales de ornato, maderables y frutales, y la recolección de basura que se acumulaba dentro del predio (Figura 28).

Todas estas acciones contribuyeron a cambiar el ambiente de agresividad inicial hacia un ambiente de colaboración y entendimiento que benefició a todos los actores involucrados.

Celdas de almacenamiento temporal

Los hidrocarburos que se retiraron de la presa Agua de Minas, se dispusieron en celdas de almacenamiento temporal autorizadas por la SEMARNAT *in situ*, para ser tratados en el corto plazo, con el tratamiento químico-biológico descrito para los sedimentos (Figura 27). Los HC almacenados y tratados se podrán usar posteriormente como base de mezcla asfáltica¹⁴ para revestir los caminos.



▲ **Figura 27.** Celdas de almacenamiento temporal de hidrocarburos ubicadas en la zona noreste del Brazo Noroeste de la presa Agua de Minas (Fuente: PGPB).

14. Conocida también como "base negra". Es un material que junto con otro producto puede ser aplicado sobre la sub-base o subrasante y formar una capa de apoyo para la carpeta asfáltica o para una carpeta de concreto hidráulico. Al material se le agrega del 4 al 5% en masa de cemento asfáltico (SCT, 2004).

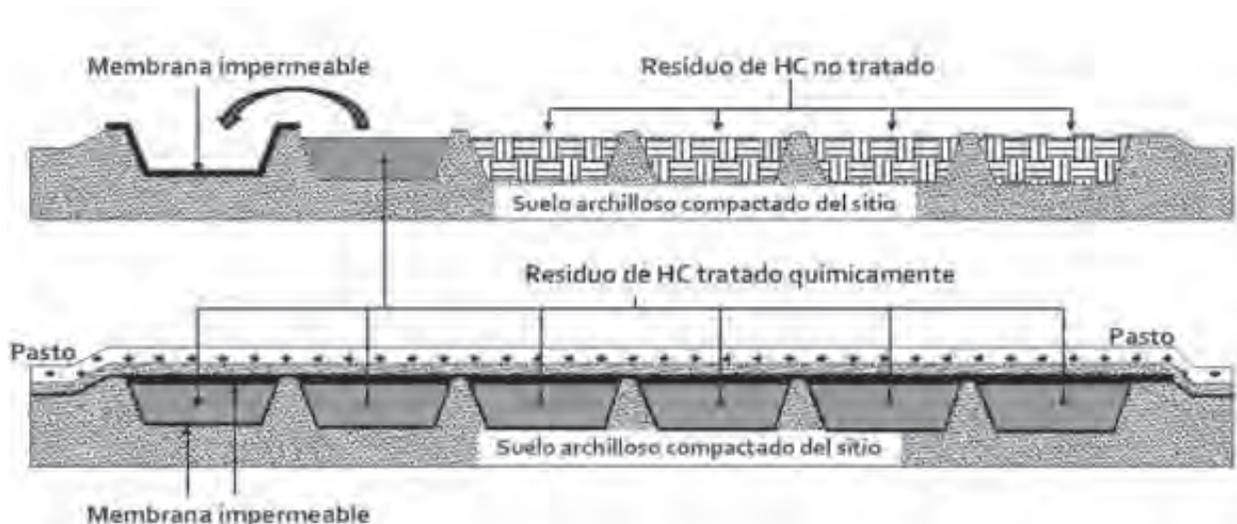


Figura 28. Diagrama del tren de tratamiento in situ a aplicar en las celdas de almacenamiento temporal de hidrocarburos.

Para la estabilización de los residuos se erigió un tren de tratamiento, que tiene una serie de celdas excavadas en la zona noreste del Brazo Noroeste de la presa Agua de Minas. En la Figura 7 se muestra la ubicación de estas celdas y en la Figura 28 se muestra el tren de tratamiento. Los hidrocarburos no tratados contenidos en las celdas de almacenamiento se estabilizaron *in situ*, y luego se transfirieron a la celda contigua con una membrana impermeable. Estas celdas al ser vaciadas ya estaban listas y disponibles, conformándose un tren de tratamiento continuo hasta que se hubieran impermeabilizado y sellado por la parte superior, todas las celdas, conteniendo en su interior los residuos ya estabilizados.

La parte inferior de la Figura 28 muestra el arreglo de las celdas una vez concluido el proceso. Se hicieron pruebas para ver la posibilidad de prescindir de la membrana impermeable, ya que el suelo en el que están excavadas las celdas es muy impermeable debido a sus características arcillosas.

Hasta ahora se tienen almacenados en las celdas cerca de 100,000 m³ de hidrocarburos provenientes del fondo de la presa Agua de Minas, así como de los lodos bentoníticos del mismo cuerpo de agua.

4.3. Taponamiento de pozos abandonados y remediación de los suelos afectados

Durante el diagnóstico del pasivo ambiental se identificaron cinco grandes problemas ambientales (Tabla 1) entre los cuales, la existencia de 2,888 pozos de extracción de azufre que fueron abandonados por la CEDI, algunos de ellos mal obturados.

Cuando PGPB se encargó de la UMIT, algunos de los pozos estaban clausurados pero muchos de ellos aún contenían producto, en algunos casos todavía se derramaba en el terreno, al ser abandonados sin haber sido taponados¹⁵ en forma adecuada (Figura 29). Como se desconocía el número total de pozos existentes y el estado de los mismos, PGPB solicitó al Instituto Tecnológico Superior de Acayucan (ITSA) realizar un estudio para obtener el inventario y el diagnóstico de la situación de esos pozos, a fin de establecer un plan de

15. En el caso de la industria petrolera se entiende por taponamiento de un pozo el aislamiento de las formaciones atravesadas por la perforación para evitar invasiones de fluidos o manifestaciones en la superficie (NMX-L-169-SCFI-2004) (DOF, 2004).



Figura 28. Estado de los pozos de extracción de azufre. A) Vista de un pozo de extracción en condiciones ideales de operación donde se observan las tuberías subterráneas de inyección de agua y de extracción de producto. B y C) Pozos abandonados sin producto. (Fuente: PGPB).

atención, era evidente que para atacar el problema una de las acciones primordiales era taponar los pozos adecuadamente y atender en primer lugar aquellos pozos que aún contenían producto y afloraba. Se revisaron los registros que tenía CEDI, los estudios topográficos y geológicos, así como las normas nacionales e internacionales en la materia. En forma paralela se llevó a cabo un levantamiento.

Se determinó la existencia de 2,888 pozos de diversos tipos, sobre todo de exploración, extracción y desfogue, algunos con problemas de obturación y sellado, y que presentaban emanaciones de hidrocarburos y gases tóxicos. Un gran avance fue la creación de un software denominado Sistema de Gestión de Información de los Pozos de la UMT de PGPB, diseñado por el ITSA, en el cual se registraron y clasificaron todos los pozos,

en función de su profundidad, operación, grado de contaminación y estado mecánico (Tabla 14).

El estudio confirmó la existencia de 999 pozos taponados y 1,889 pozos sin taponar, de los cuales 195 eran prioritarios debido principalmente al grado de contaminación (presencia de hidrocarburos líquidos y/o emanaciones de H₂S) y la ausencia de aparejos.

Ante la ausencia de normatividad y procedimientos estándar para el taponamiento de este tipo de pozos, PGPB realizó gestiones con PEMEX Exploración y Producción (PEP) para realizar el taponamiento de cinco pozos prioritarios. Estos trabajos se ejecutaron del 13 de julio al 10 de agosto del 2006. Sirvieron para fundamentar y elaborar un procedimiento de taponamiento de pozos azufreros, mismo que no existía dentro de las normas mexicanas.

PROFUNDIDAD	OPERACIÓN*	GRADO DE CONTAMINACIÓN	ESTADO MECÁNICO**
<ul style="list-style-type: none"> • Profundos (> 300 m) • Profundidad media (150 m - 300 m) • Someros (75 m - 150 m) • Muy someros (< 75 m) 	<ul style="list-style-type: none"> • Producción • Desfogue • Observación • Exploración 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin contaminación • Con HC semi-líquido • Con HC intem-perizado • Con H₂S • Con Azufre 	<ul style="list-style-type: none"> • Con aparejo • Sin aparejo

▲ **Tabla 14.** Clasificación de los pozos abandonados en la UMIT usados para extraer azufre.

* Los pozos de producción son aquellos usados para la inyección de agua y la extracción del azufre con el proceso Frasch. Los pozos de desfogue se empleaban para la extracción del agua excedente inyectada. Los pozos de exploración son los que se perforaban hasta el domo salino para verificar la capacidad de explotación de una zona del campo de producción. Los pozos de observación tenían la función de servir para el control de la presión en el subsuelo.

** Con aparejo o sin aparejo se refiere a la existencia de tubería de revestimiento o la ausencia de ésta.

HC = Hidrocarburos

Los trabajos consistieron en:

- Preparación de accesos y “peras”¹⁶ a los pozos de producción y a los pozos monitores
- Acondicionamiento de cabezales
- Instalación de tubería de producción y sondeo
- Acondicionamiento de pozos monitores
- Limpieza de tubería de revestimiento en pozos con emanación de hidrocarburos
- Prueba de admisión
- Cementación forzada a pozo
- Colocación de monumento de abandono

Estos trabajos se realizaron con equipos especializados para perforación y mantenimiento de pozos petroleros, como son unidades de aceite caliente, bombas de alta presión para las pruebas de admisión e inyectado del cemento, tolvas especiales, equipos de líneas de acero para sondeo y grúas, entre otros.

El procedimiento para el taponamiento definitivo de los pozos se registró en un documento llamado “Procedimiento del diseño para realizar el taponamiento definitivo de los pozos azufreros de la UMT de PGPB”, con clave PGPB-UMT-P01-00. Este consistió en colocar dos tapones

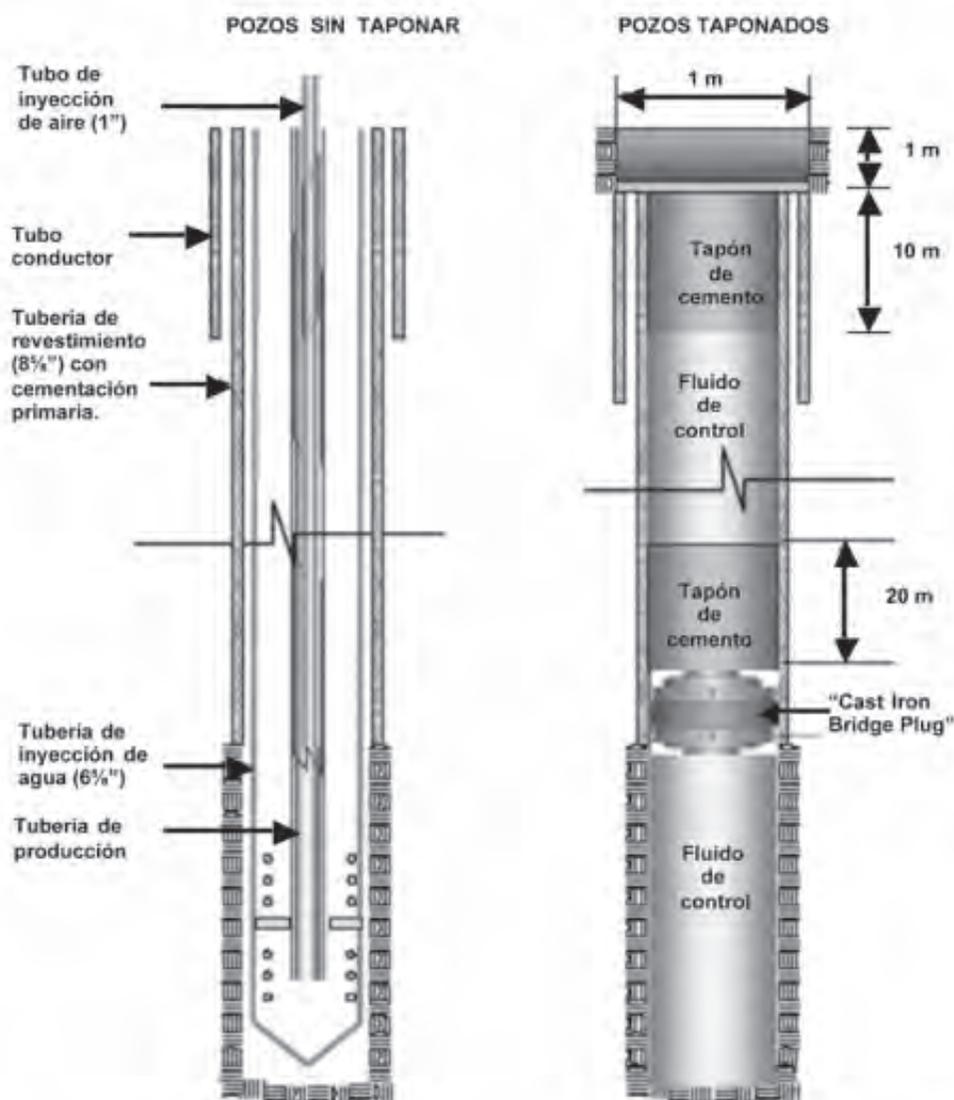


Figura 30. Esquema del taponamiento de los pozos abandonados de la UMIT (Fuente: Instituto Tecnológico Superior de Acayucan).

16. En el argot petrolero se conoce como área o pera de perforación de un pozo a la superficie de terreno no mayor a una hectárea en donde se ubica la plataforma de perforación, las presas de lodo, el equipo de bombeo, el almacén de materiales y la zona para maniobra de vehículos.



Figura 31. Esquema que indica el rescate propuesto para las vías de acceso de la UMIT.

de cemento, uno de 20 m de longitud en el fondo de la tubería de revestimiento y el otro superficial, de 10 m de longitud (Figura 30). Este método se aplicó tanto a pozos no equipados, sin aparejo de operación, como equipados. En el primer caso no se requirió el uso del equipo de perforación, mientras que en el segundo sí fue necesario.

Los hidrocarburos emanados de los pozos mal obturados, así como los suelos impactados por éstos, serán dispuestos en las celdas de almacenamiento temporal ubicadas en el Brazo Noroeste de la presa Agua de Minas para su tratamiento posterior, o bien, se analizaría la posibilidad de hacerlo en celdas de tratamiento a ubicarse dentro del campo de extracción. En total serán dispuestos 12,474 m³, de residuos (hidrocarburos ácidos, azufre sólido, hidrocarburos líquidos e hidrocarburos intemperizados), así como 7,197 m³ de suelos con HFP y suelos ácidos con azufre y ácido sulfhídrico.

4.4. Hidrocarburos ácidos en caminos de acceso a la UMIT

De los cinco problemas ambientales identificados en el estudio de diagnóstico de la UMIT, el último fue las vías de acceso a pozos e instalaciones, aproximadamente 21.5 km, que se construyeron utilizando residuos provenientes del proceso de filtración del azufre, similares a los que se encontraban dispuestos en La Carbonera. Los

residuos producen lixiviados ácidos con pH < 1.0, lo cual afecta de manera importante al suelo de la zona. Como alternativa de tratamiento a estos residuos, PGPB se puso en contacto con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), para elaborar el estudio denominado "Tratamiento físico-químico de los hidrocarburos y su aprovechamiento en la estabilización del material utilizado en las vías de acceso." Con base en este estudio se propuso aplicar a los hidrocarburos el proceso de "solidificación-estabilización" para después reusar el hidrocarburo tratado para normalizar los residuos ácidos de carbón y azufre de los caminos (Figura 31). Esta etapa del proyecto está programada para los años 2010-2011. Para llevar a cabo esta obra se reutilizaron 55,000 m³ de hidrocarburos que se encontraban en el sitio.

4.5. Actividades complementarias a la remediación

Durante el desarrollo del proyecto se identificaron problemas no directamente relacionados con la contaminación, pero cuya atención sí tendría un impacto en la revitalización del sitio:

- Desincorporación de bienes improductivos.
- Desmantelamiento de la planta de filtros.
- Mantenimiento a la línea de 30 pulgadas de suministro de agua de servicio.
- Normalización de líneas de conducción eléctrica.

- Limpieza y desazolve a canales de conducción de agua ácida.
- Construcción de la barda perimetral de la celda de estabilización de residuos.
- Normalización de casetas de vigilancia.
- Mantenimiento a la línea de agua de servicio y contra incendio de 8 pulgadas.
- Reforestación dentro y fuera del predio.

De las actividades de la revitalización del sitio la de mayor impacto fue la desincorporación de bienes improductivos. Puesto que el cierre de la CEDI fue intempestivo, sin seguir protocolo alguno, en el predio quedaron dispersas toneladas de chatarra, principalmente de tubería usada por la CEDI en los pozos, tanques metálicos para almacenamiento y estructuras metálicas de diversos tipos. Fueron abandonados también equipos de oficina y de tipo industrial a los que no se podía dar ningún otro uso después de tantos años de abandono, que dado su deterioro era necesario destruir.

El proceso de enajenación de activos improductivos inició desde 1999 y seguirá en operación hasta que el proyecto sea concluido. Como parte de este proceso PGPB, mediante licitación pública, concertó el contrato para el desmantelamiento, recolección de tierras contaminadas y materiales de desecho, y la normalización de áreas de la UMIT, a través del cual se recolectaron diversos materiales concentrados y objetos de reubicación y/o enajenación. La primera acción realizada por parte de PGPB fue la recolección de la chatarra (Figura 32), para lo cual fue necesario establecer un contrato marco de desecho ferroso que permitiera disponer este material fuera de las instalaciones; en total se recolectaron cerca de 5,000 ton de metal. Posteriormente se realizó la limpieza general de los terrenos. Esta acción permitió recuperar la vegetación natural y, para

acelerar el proceso, se sembraron especies de la región que fueron procuradas por el mismo personal de PGPB en un vivero creado para este propósito.

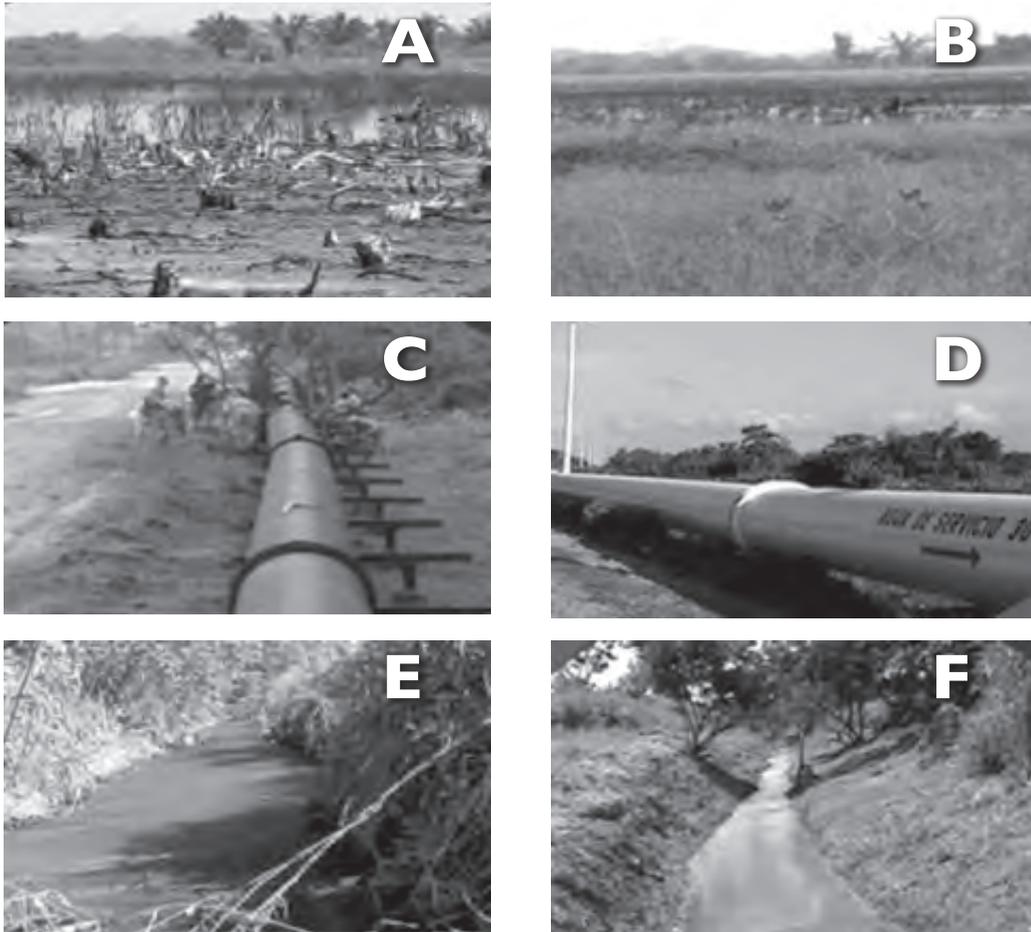
Asimismo, con el gobierno municipal de Texistepec, se concertaron convenios para recolectar y acarrear chatarra y materiales de desecho dispersos en diferentes sitios del predio; conservar y mantener áreas remediadas y áreas generales; limpiar y desazolvar canales a cielo abierto de la UMIT. Estos convenios permitieron a los habitantes de Texistepec participar en las diferentes actividades de remediación.

Para la reforestación de las zonas remediadas, en algunos casos con el sólo hecho de retirar la chatarra o equipos que se encontraban dispersos en el terreno fue suficiente para que la vegetación se recuperara de forma natural. En otros fue necesario reforestar, como en las áreas recuperadas de las presas de aguas ácidas y la zona donde se ubica la celda de estabilización de La Carbonera (Figura 33). Para ello fue necesario crear un vivero que tuviera la capacidad de proveer la cantidad de plantas y las especies requeridas para estas áreas y otras aledañas, pues PEMEX, como parte de sus políticas de responsabilidad social, siempre ha colaborado con acciones similares en aquellas zonas donde están sus instalaciones.

En la UMIT y sus alrededores se han reforestado cerca de 960 hectáreas, y en total, incluyendo a otros municipios como el de Cofre de Perote, se han reforestado 2,600 hectáreas. En estas actividades se ha trabajado de manera conjunta con instituciones como Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesca del Estado de Veracruz (SEDARPA) (Figura 34).



Figura 32. Recolección de chatarra dentro de la UMIT (Fuente: PGPB).



▲
Figura 33. Acciones complementarias a la remediación. A y B) Reforestación de las áreas recuperadas de la presa Agua de Minas. C y D) Mantenimiento de la línea de 30 para suministro de agua. E y F) Desazolve y mantenimiento de los canales de agua ácida (Fuente: PGPB).



▲
Figura 34. Actividades de reforestación. A) Vivero Texistepec de PGPB. B) Reforestación en una localidad del municipio con plantas del vivero Texistepec.

5. Avances del proyecto

En el año 2012 se terminaron al 100 % los trabajos correspondientes a la primera etapa: a) trabajos iniciales de atención de la emergencia ambiental, mantenimiento de los bordos de las presas ácidas, implementación de accesos y medidas de seguridad en La Carbonera; b) neutralización del agua de las presas ácidas e inicio del desfogue controlado de las mismas, y c) construcción de la celda de estabilización para contener los residuos ácidos de La Carbonera.

Las actividades correspondientes a la segunda etapa: a) concluir el taponamiento de 1,8884 pozos usados por CEDI en los procesos de extracción del azufre; b) estabilización de los suelos contaminados provenientes del campo de pozos de producción de azufre; c) concluir los trabajos para la extracción de la capa de hidrocarburos de las presas Agua de Minas y Anexa y su transporte a las celdas de almacenamiento temporal; d) tratamiento *in situ* de los residuos extraídos del fondo de las presas antes mencionadas y sellado de las celdas de almacenamiento y e) el tratamiento de los residuos usados para revestir 21.5 km de caminos de acceso de la UMIT (en proceso de aprobación y firma de acuerdos).

El proyecto que concluyó en agosto del 2012, incluía la obturación de 248 pozos azufreros prioritarios, limpieza y acarreo de los hidrocarburos y lodos contaminados en las áreas periféricas de los pozos, los trabajos de estabilización y tratamiento de hidrocarburos y su aprovechamiento en el confinamiento de los residuos sólidos existentes en los caminos de la Unidad Minera Texistepec

(UMT). Se concertó un nuevo convenio con el Instituto de Ingeniería de la UNAM para la realización del "Diagnóstico Integral para la rehabilitación y conservación de la Celda de Estabilización de Residuos en Texistepec, Veracruz", que concluyó con la elaboración de las bases técnicas para la licitación de las obras y actividades conforme a las necesidades de mantenimiento y reparación detectadas. Se autorizó la formalización del contrato con la presidencia municipal de Texistepec. Para el retiro de los volúmenes finales de hidrocarburos existentes en la presa Agua de Minas y la remediación de 40 ha de suelos. A su vez, se presentó ante la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, DGGIMAR, de la SEMARNAT, para su autorización el informe pormenorizado sobre el cumplimiento de los Acuerdos y condicionantes relacionados con el Plan de Remediación de la Presa Agua de Minas y la Obturación de los Pozos Azufreros, además de la propuesta de adecuación a la estructura de los accesos del proyecto denominado Tratamiento de estabilización y solidificación de hidrocarburos y su aprovechamiento en la construcción de 21.5 km de accesos de la Unidad Minera Texistepec, Ver. Se ejecutan actividades de mantenimiento como son la neutralización de lixiviados ácidos, se vigila el comportamiento de los tres pozos de monitoreo, limpieza general en áreas reforestadas, mantenimiento a redes y sistemas eléctricos de comunicación, reparación de caminos y puentes dañados, instalación y mantenimiento de bombas en los cárcamos construidos en la presa Agua de Minas. El proyecto se encuentra en su tercera fase de realización.

6. Lecciones aprendidas

La remediación de este gran pasivo ambiental dejó tres experiencias trascendentales para PEMEX. La primera se refiere a la formación de un grupo de expertos dentro de la misma paraestatal. Petróleos Mexicanos organizó un grupo de expertos procedentes de las diferentes subsidiarias que la conforman, a fin de que ellos hicieran un diagnóstico inicial, una estrategia general de atención al problema. Pertenecían a diversas disciplinas (geólogos, biólogos, ingenieros petroleros, ingenieros químicos, ingenieros ambientales, ingenieros industriales, ingenieros mecánicos e ingenieros eléctricos, entre otros) con el propósito de atender integralmente el problema. Estos expertos fueron transferidos a Texistepec para obtener la mayor información posible en campo.

Una vez conocido el problema se contactaron a diversas instituciones educativas y de investigación para realizar las acciones más detalladas de caracterización y las propuestas de remediación. En total participaron junto con PGPB cuatro instituciones educativas del país: la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Instituto de Ingeniería (II-UNAM), la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), el Instituto Tecnológico de Minatitlán (ITM) y el Instituto Tecnológico Superior de Acayucan (ITSA). Asimismo, participó un organismo público descentralizado: el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) sectorizado a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México.

La segunda experiencia se refiere al trabajo conjunto con la autoridad ambiental. Desde que SEMARNAT identificó al predio de la UMIT como pasivo ambiental, el grupo de expertos de PGPB asignado para su atención entró en contacto con el personal de la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR), dependencia de la Secretaría encargada de la gestión de sitios contaminados, así como de la Comisión Nacional del Agua, para que ellos estuvieran al tanto de las condiciones del predio y las acciones que pretendían emprender para su atención inmediata y de largo plazo.

En experiencias previas de remediación de sitios contaminados pertenecientes a PEMEX, se había procedido siguiendo la normatividad ambiental pero dando cuenta, a las dependencias involucradas, de las acciones correctivas y de compensación realizadas hasta la culminación de las mismas. En algunas ocasiones esto trajo como consecuencia la inversión adicional de

tiempo y dinero, pues a veces era necesario corregir las obras realizadas ya que los resultados obtenidos no habían cumplido a cabalidad con los requisitos ambientales o bien las acciones de mitigación no habían sido suficientes. Debido a la envergadura de este proyecto y a la necesidad de realizar acciones de remediación *sui generis*, PGPB decidió en este caso acompañarse desde un principio por la entidad gubernamental.

Cada estrategia planeada, estudio realizado y decisión tomada fue presentada a la DGGIMAR, quien aprobó o en su caso propuso cambios a los mismos, antes de llevarse a la práctica. Este proceder fue una parte muy importante en el éxito de esta empresa, pues evitó atrasos y le permitió a PGPB avanzar de manera más rápida y con el conocimiento de que no se requeriría en el futuro de gastos complementarios para corregir acciones.

La tercera lección aprendida durante este ejercicio fue la experiencia de involucrar directamente a la población afectada en la atención del problema ambiental. Las dimensiones del problema social que se afrontaba en el momento que PGPB tomó posesión del predio dejado por CEDI eran de tal magnitud que la población, mediante manifestaciones locales y regionales, exigían la reparación de daños por pérdidas en la pesca y el sector agropecuario. Ese ambiente agresivo fue alentado por la información distorsionada o magnificada que los habitantes recibían de otras fuentes sobre la problemática ambiental prevaleciente.

Cuando se propusieron alternativas de remediación que por su naturaleza requerían de gran cantidad de mano de obra, se tuvo la oportunidad de involucrar a los afectados en estas actividades, de tal manera que se les instruyó a cerca de la situación existente, cómo se iba a resolver y cómo ellos podían ser parte de la solución. Este acercamiento entre afectados y contaminadores —que si bien PEMEX no era responsable de la contaminación aunque la población lo identificaba como tal— cumplió de manera exitosa con las expectativas de un proceso de comunicación de riesgos: los afectados se convirtieron en el “socio”, en la solución del problema y cooperaron activamente en los trabajos de restauración, con la seguridad de que trabajaban a favor del ambiente y de su comunidad.

Además de los beneficios ambientales y sociales, también se obtuvieron beneficios económicos para el municipio

y sus pobladores, pues para lograr la participación de los pobladores de Texistepec en los trabajos de remediación dentro de las instalaciones de la UMIT y sin perjudicar a los trabajadores de base de PEMEX, se firmaron varios convenios de colaboración entre PGPB y el municipio. Este es el primer proyecto en el que PEMEX pone en práctica este tipo de colaboraciones conjuntas con la población, y dados los buenos resultados se replicó en otros estudios que PEMEX realiza a lo largo del país. Este arreglo de trabajo también fue provechoso para PEMEX, ya que si se hubiera ocupado mano de obra de fuera de la región, los costos se hubieran incrementado considerablemente.

Se observó que al ser la población parte activa de los cambios positivos que derivaban de las acciones de remediación, se volvían incentivos para que ellos mismos propusieran acciones adicionales de rehabilitación del lugar, por ejemplo, la repoblación con peces de la zona, de las presas que habían sido neutralizadas. Los pobladores que se dedicaban a la pesca se encargaron de recolectar los peces y depositarlos en ellas. Una vez que se concluyera la remediación del sitio, se reincorporaría este terreno al sector productivo de la región: los suelos podrán ser usados para la cría de ganado vacuno y en las presas se espera activar a mayor escala la acuicultura. Con esto, se beneficiaría la economía de esta zona lo cual tendría a su vez, un impacto positivo en el entorno social.

Cabe mencionar que por los resultados de este proyecto, en el año 2008 el Gobierno del Estado de Veracruz otorgó a PGPB la mención honorífica en categoría "trabajo comunitario" del Premio Estatal de Medio Ambiente por el proyecto de remediación ambiental realizado en Texistepec, y en 2009 el Centro Mexicano para la Filantropía (CEMEFI) le otorgó a Petróleos Mexicanos a través de PGPB, el reconocimiento como empresa finalista en las Mejores Prácticas de Responsabilidad Social Empresarial.

En proyectos a futuro es de vital importancia considerar los posibles acontecimientos que puedan afectar los sitios ya remediados, en este caso, por ejemplo, debido a la consecuente mejora del ambiente y los terrenos, grandes áreas de la región cercanas a Texistepec han sido invadidas a fin de asentar viviendas, deforestar, cercar y ocupar los terrenos para la siembra. Se debe mejorar y reforzar la comunicación con las comunidades a fin de aclarar que el hecho de que dichos terrenos no tengan actividades productivas no significa que sea conveniente su ocupación.

La parte más ardua de esta labor ya ha sido completada y, con las experiencias adquiridas a través del trabajo conjunto con el municipio de Texistepec y sus pobladores, se asegura el cumplimiento del plazo y las metas establecidas.

7. Agradecimientos

Grupo de Trabajo Texistepec, reconocimiento y participación en la Remediación de Texistepec de PEMEX Gas y Petroquímica Básica, PGPB.

Ing. Constantino Fernández Cabrera, Coordinador de asesores de la Dirección General de PGPB.

Ing Armando Arenas Briones, Subdirector de Producción de PGPB.

Ing. Héctor M. López Guerrero, Coordinador General del Grupo de Trabajo Texistepec.

Ing. Vidal López Velásquez Saynes, Coordinador Operativo del Grupo de Trabajo Texistepec (QEPD).

Ing. Rodolfo Quiroz Cruz, Coordinador de Mantenimiento del Grupo de Trabajo Texistepec.

Ing. Abelardo Placeres Besares, Coordinador Administrativo del Grupo de Trabajo Texistepec.

Ing. Joel M. Bejarano Granados, Coordinador de la Obra del Grupo de Trabajo Texistepec.

Ing. Javier Álvarez Gutiérrez, Coordinador Químico de Neutralización del Grupo de Trabajo Texistepec.

Ing. José Luis Escobedo Castro, Coordinador de Pozos del Grupo de Trabajo Texistepec.

Biol. Juan Ávila González, Coordinador de Seguridad, Salud y Protección Ambiental del Grupo de Trabajo Texistepec.

Sr. Félix Rosas González, Coordinador de Administración del Proyecto.

Sr. Ignacio Juan Ramírez, especialista en procesos de negociación y administración del Proyecto.

Guillermina Pérez Casimiro y Minerva Hernández Puentes, por la elaboración de imágenes para el libro.

Fuentes de información

Briggs, G., Bromilow, R., & Evans, A. (1982). *Relationships between lipophilicity and root uptake and translocation of nonionized chemicals*. *Barley Pesticide Science*, 495-504.

DOF – **Diario Oficial de la Federación** (1989), “CE-CCA-001/89, *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua*”, *Diario Oficial de la Federación*, 13 de diciembre de 1989, México D.F.

DOF – **Diario Oficial de la Federación** (1993), “Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-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*”, *Diario Oficial de la Federación*, 2 de octubre de 1993, México D.F.

DOF – **Diario Oficial de la Federación** (1996a), “NMX-AA-087-SCFI-1995, *Análisis de agua – Evaluación de toxicidad aguda con Daphnia magna Status (Crustacea – Cladocera) – Método de prueba*”, *Diario Oficial de la Federación*, 11 de enero de 1996, México D.F.

DOF – **Diario Oficial de la Federación** (1996b), “Análisis de agua y sedimentos – *Evaluación de toxicidad aguda con Photobacterium phosphoreum – Método de prueba*”, *Diario Oficial de la Federación*, 26 de abril de 1996, México D.F.

DOF – **Diario Oficial de la Federación** (1997), “NOM-001-ECOL-1996, *Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*”, *Diario Oficial de la Federación*, 6 de enero de 1997, México D.F.

DOF – **Diario Oficial de la Federación** (2001), “NMX-AA-117-SCFI-2001, *Análisis de agua - determinación de Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTPs) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas -método de prueba*”, *Diario Oficial de la Federación*, 21 de septiembre de 2001, México D.F.

DOF – **Diario Oficial de la Federación** (2004), “Norma Mexicana NMX-L-169-SCFI-2004, *Exploración del petróleo-Taponamiento de pozos petroleros terrestres, lacustres y marinos*”, *Diario Oficial de la Federación*, 24 de agosto de 2004, México D.F.

DOF – **Diario Oficial de la Federación** (2005), “Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/ISS-2003, *Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación*”, *Diario Oficial de la Federación*, 29 de marzo de 2005, México D.F.

DOF – Diario Oficial de la Federación (2006), *Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos*. Diario Oficial de la Federación, 26 de junio de 2006, México D.F.

FQ-UNAM – Facultad de Química-UNAM (2010), *Hoja de Seguridad XVIII. Amoniaco*, URL: <http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/18amoniaco.pdf> (consultado en marzo de 2010).

Knie, Joachim (2004). *Informe GTZ. Pruebas de ecotoxicología para evaluar la calidad del agua del acuífero del Valle del Mezquital*.

González, M (2010), *Pecosa alcanzó récord en producción de amoniaco, Imagen y Política*, URL: <http://www.imagenypolitica.com/content/view/full/12154/23/> (consultado en marzo de 2010).

IAEA (1994). *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments. Technical Report*. Vienna: International Atomic Energy Agency.

Integrated Risk Information System (IRIS), URL: <http://www.epa.gov/iris/>

Munch G., Guido. (1994), *Etnología del istmo veracruzano*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Pattanayek, M., & DeSheilds, B. (2003). *Characterizing risks to livestock from petroleum hydrocarbons*. International Petroleum Environmental Conference (IPEC). Houston.

Peñoles (2010), *Metales-Químicos*, URL: http://www.penoles.com.mx/penoles/sobre_penoles/perfil/divisiones/metales_quim.php (consultado en marzo de 2010).

SCT – Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2004), *N-CMT-4-02-003/04, Libro CMT: Características de los materiales*. Parte 4: Materiales para pavimentos. Título 02: Materiales para subbases y bases. Capítulo: 003: Materiales para bases tratadas, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México D.F.

TPHCWG – Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group (1997), *Development of Fraction Specific Reference Doses (RfDs) and Reference Concentrations (RfCs) for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH)*, Volume 4, Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Amherst Scientific Publishers, Amherst.

Travis, C., & Arms, A. (1988). *Bioconcentration of Organics in Beef, Milk and Vegetation*. Environmental Science Technology, 22: 271-274.

Zach, R., & Mayoh, K. (1984). *Soil ingestion by cattle. A neglected pathway*. Health Physics, 426 -431.