

DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE BENCENO Y DE HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN LIGERA EN EL SUELO DEL PASIVO AMBIENTAL DE LA EX-REFINERÍA “18 DE MARZO”, CIUDAD DE MÉXICO

Luis Antonio GARCÍA VILLANUEVA* y Georgina FERNÁNDEZ-VILLAGÓMEZ

División de Ingenierías Civil y Geomática, Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México

*Autor responsable; luisiq2000@gmail.com

(Recibido abril 2012, aceptado agosto 2013)

Palabras clave: remediación, suelos contaminados, benceno, hidrocarburos de fracción ligera, análisis de sensibilidad, densidad aparente, arcilla

RESUMEN

Durante los 58 años en los que funcionó la Refinería “18 de marzo” de Petróleos Mexicanos (PEMEX), se realizaron actividades de refinación, almacenamiento y distribución de hidrocarburos que produjeron derrames que impactaron el suelo y el agua, dando como resultado la aparición de un pasivo ambiental al cierre de esas instalaciones. La remediación ha sido una alternativa para dar solución a la presencia de pasivos ambientales. Considerando lo anterior, en esta investigación se propone la determinación de un perfil de masas en suelo de benceno y de hidrocarburos de fracción ligera (HFL), antes y después de un proceso de remediación por profundidades, en el pasivo ambiental de la ex-Refinería “18 de marzo”, con el fin de conocer las masas de contaminantes. Las cargas de masa calculadas antes de la remediación para benceno fueron de 10 139 kg y de 437 090 kg para HFL; después de la remediación fueron de 1092 kg de benceno y de 34 992 kg de HFL, de un total de 642 muestras de 122 perfiles en un volumen de suelo de 680 356 m³. La masa de benceno y de HFL después de la remediación se considera aceptable, ya que las concentraciones de las muestras no rebasan los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. La metodología utilizada permite trabajar en lugares de grandes dimensiones donde existen pasivos ambientales y con ello un riesgo inminente para la salud pública. La determinación del perfil de masa en suelo es una opción para dar seguimiento a la verificación de reportes y a las medidas de mitigación de impacto ambiental ya que es posible aplicarla antes y después de la remediación.

Key words: remediation, polluted soils, benzene, light-fraction hydrocarbons, sensitivity analysis, bulk density, clay

ABSTRACT

During the 58 years the “18 de Marzo” Refinery, owned by Petróleos Mexicanos (PEMEX), was in operation, its activities of refining, storage and distribution of hydrocarbons produced spills that impacted soil and water and resulted in the emergence of an environmental liability by the time the refinery closed. Remediation has been

considered as an alternative to solve the presence of environmental liabilities. Taking into account these factors, the purpose of this research was to measure the mass of contaminants by determining a profile of the mass of soil for benzene and light petroleum fractions (HFL) in the environmental liability of the refinery, prior and after a process of remediation by depths. Mass discharges that were calculated prior to remediation were 10 139 kg for benzene and 437 090 kg for HFL; after remediation, they were 1092 kg for benzene and 34 992 kg for HFL, given a total of 642 samples in 122 profiles and a soil volume of 680 356 m³. The mass of benzene and HFL after remediation is considered at acceptable levels because the sample concentrations do not exceed the maximum permissible limits set by the OMS-138-SEMARNAT/SS-2003 regulation. The applied methodology can be used in large-size sites where environmental liabilities are present and a looming public health risk. The determination of the profile for the mass of soil is an option to follow up verification of the reports and the mitigation measures of the environmental impact, as it is possible to apply profiling prior and after remediation.

INTRODUCCIÓN

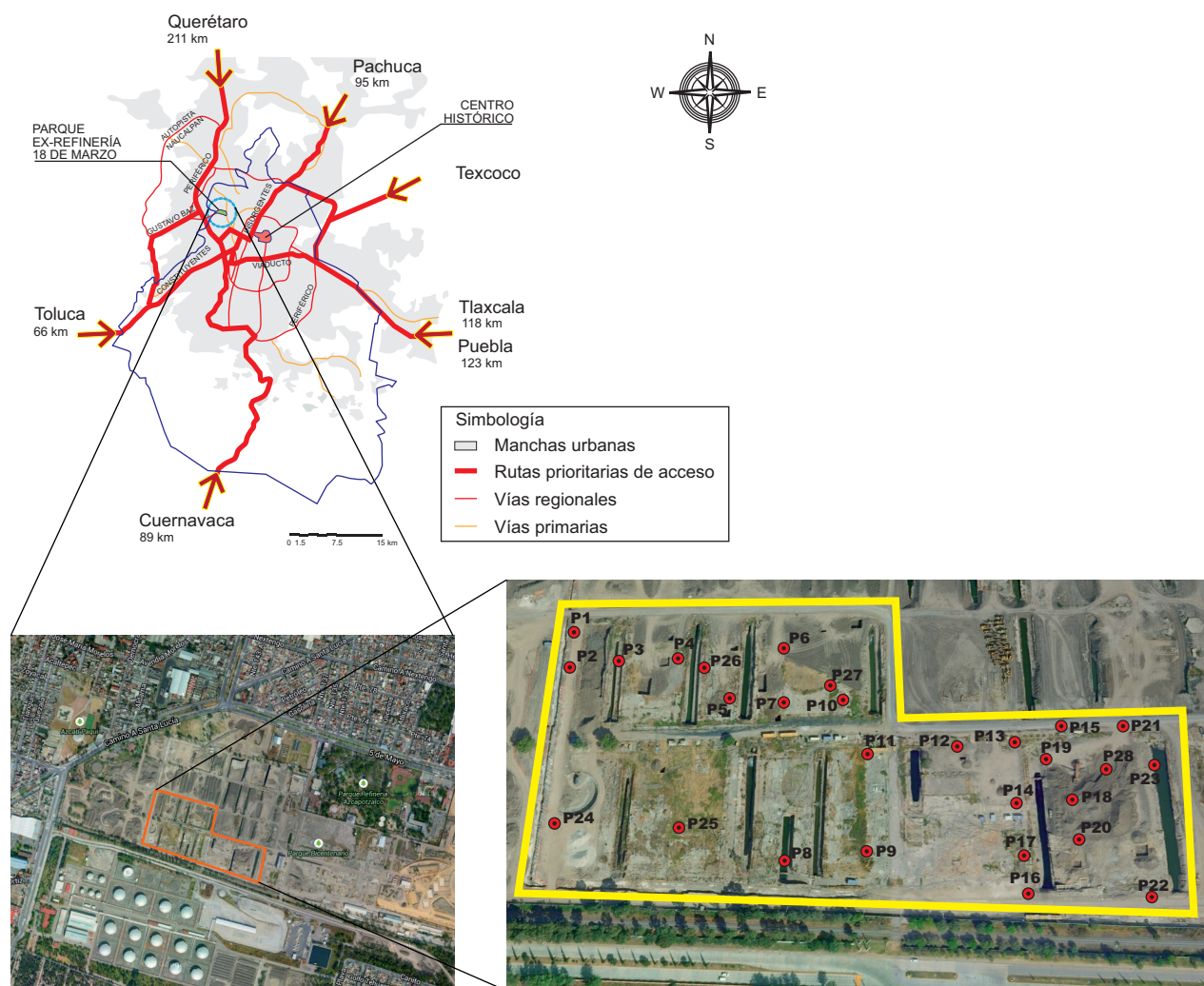
El 29 de octubre de 1930, la Compañía Mexicana de Petróleo “El Águila S. A.” recibió autorización para instalar y explotar una refinería en la Delegación Azcapotzalco, ubicada al noroeste de Ciudad de México (**Fig. 1**). Esta instalación, nombrada “18 de marzo”, inició sus operaciones en 1933 y las concluyó el 18 de marzo de 1991 por decreto del Gobierno Federal. Durante esos 58 años realizó actividades de refinación, almacenamiento y distribución de hidrocarburos que produjeron derrames que impactaron el suelo y el agua, dando como resultado la aparición de un pasivo ambiental al cierre de esas instalaciones (PEMEX 1956, PEMEX 2008).

La remediación ha sido una alternativa para dar solución a la presencia de pasivos ambientales. En la literatura se han reportado mecanismos de atenuación natural (Nathwani y Phillips 1977, Brady y Weil 1998, Bhupathiraju *et al.* 2002, Schneider *et al.* 2006), tales como la dilución y la transformación (degradación). No obstante, tras ocurrir estos procesos, aún permanece una cantidad remanente que es necesario determinar para su posterior remediación. En estas condiciones, el perfil de masa del suelo por profundidades es muy útil para conocer esa cantidad remanente y su aplicación es tan variada como se desee, tal como lo muestran varios estudios realizados sobre áreas afectadas por benceno e hidrocarburos de la fracción ligera (HFL) del petróleo. Así, los trabajos de Garg y Rixey (1998), Chapelle (1999), Yang *et al.* (1999), Wang *et al.* (2007) y Davis *et al.* (2009) consideran un perfil de masa para la remediación del suelo, lo que incluye medir concentraciones de dióxido de carbono producido por las bacterias utilizadas para la biorremediación inyectando oxígeno, así como el cálculo de la transferencia de masa con respecto al tiempo.

Existen otras investigaciones más específicas que aplican perfiles de masas en suelos. Gocht *et al.* (2006) explican el destino de los contaminantes en el suelo como resultado de su difusión. Para ello, plantean una ecuación para obtener dichas sustancias acumuladas por horizonte. Aunque no se estudia lo que sucede en el interior del suelo, considerado como caja negra, se sabe que tienen lugar una serie de procesos internos tales como la degradación o la acumulación. Utilizando la ecuación propuesta dichos autores brindan resultados experimentales que se reportan a diferentes profundidades y de manera global. Por otra parte, Liu *et al.* (2001) calculan un perfil de masas más completo, ya que muestran tanto la distribución del contaminante en tres fases (suelo, aire y agua) como el destino que siguen. Finalmente, se tiene el trabajo llevado a cabo por Schneider *et al.* (2006) que, a diferencia de los dos anteriores —desarrollados a escala de laboratorio, con conocimiento y control de las variables tales como la concentración inicial, la textura del suelo, la temperatura y la humedad—, consideran un caso de contaminación real en una ex-refinería en la ciudad de São Paulo, Brasil.

Cabe señalar que cualquier perfil de masa, incluido el aplicado a suelos contaminados, se rige bajo el principio de conservación de la materia. En términos más específicos, el sistema cuenta con una serie de entradas y salidas, en su interior existe un conjunto de procesos que se pueden analizar de forma independiente, considerándose cada uno de ellos, una variable del sistema definido en función de la masa (concentración). Es indispensable definir el contaminante que será objeto de estudio, ya que de él dependen los procesos (Himmelblau y Riggs 2002, McCabe *et al.* 2004).

Considerando lo anterior, en esta investigación se propone la determinación de un perfil de masas en suelo de benceno y de HFL, antes y después de



DA_CM: Densidad Aparente_Concentración Media; DA_Cp75: Densidad Aparente_Concentración percentil 75; DA_Cp95: Densidad Aparente_Concentración percentil 95; DM_CM: Densidad Media_Concentración Media; DM_Cp75: Densidad Media_Concentración percentil 75; DM_Cp95: Densidad Media_Concentración percentil 95; DR_CM: Densidad Real_Concentración Media; DR_Cp75: Densidad Real_Concentración percentil 75; DR_Cp95: Densidad Real_Concentración percentil 95

Fig. 1. Mapa de la ubicación del pasivo ambiental de la ex-Refinería “18 de marzo” en la Ciudad de México y puntos de muestreo en la zona siete. Google Earth (2013) Cnes/Spot Image Digital Globe Google Map data - © Google, INEGI (Modificado de Schaffner, Sandro 2005, Google Earth 2013)

un proceso de remediación por profundidades, en el pasivo ambiental de la ex-Refinería “18 de marzo”, con el fin de conocer las masas de contaminantes actuales y determinar si estos valores se encuentran dentro de los límites establecidos por las normas ambientales mexicanas.

ÁREA DE ESTUDIO

Hasta el momento de su cierre, la refinería – asentada en un área conformada por dos polígonos, norte y sur– contaba con diecisiete plantas, catorce

de refinación y tres petroquímicas. En el polígono norte –dividido en siete zonas– se encontraba la mayor parte de las plantas de procesos y los tanques de almacenamiento de hidrocarburos. El estudio se concentra en una de estas zonas –la número siete–, la cual fue contaminada con benceno y HFL debido a los derrames ya mencionados (Comunicación Personal, DGGIMAR-SEMARNAT). Las propiedades físico-químicas de estas sustancias se presentan en el **cuadro I** (PEMEX 2008).

En los primeros 7 m de profundidad el subsuelo de la ex-refinería está conformado por estratos granulares finos, depositados en un ambiente lacustre

CUADRO I. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL BENCENO Y DE LOS HIDRO-CARBURROS DE FRACCIÓN LIGERA

	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Xileno
Solubilidad en agua (g/100ml) a 25°C	0.18	0.05	0.015	Insoluble
Densidad (g/cm ³) a 15°C	0.88	0.87	0.86	0.88
Punto de Ebullición (°C)	80	111	50	138
Peso Molecular (g/mol)	78.11	92.13	106.2	106.2

Fuente: Potter, T. L. and Simmons, K. E. 1998

marginal donde predominan las arcillas y los limos con algunos lentes de arenas. Presenta una permeabilidad reducida, con conductividades hidráulicas entre 1.79E-6 cm/s y 3.55E-6 cm/s, que hace que funcione como un acuitardo (material que permite el paso del agua pero que limita o impide su salida por retención) cuyo espesor es aproximadamente de 15 m. Allí se pueden identificar cinco capas, la primera compuesta de materiales de relleno de origen diverso y las otras cuatro constituidas por suelo autóctono. La materia orgánica varía entre 0.4% y 8.1%, con densidad aparente que va de 0.65 kg/m³ a 1.55 kg/m³. Aunque existen cambios ligeros tanto en sentido vertical como horizontal, la estructura del subsuelo se mantiene esencialmente uniforme (Lesser 1995, Saval *et al.* 2004, Díaz-Rodríguez 2006).

METODOLOGÍA

Primero se define el área del suelo contaminado (A_{sc}), con el que se inicia el cálculo del perfil de masa del contaminante, el cual involucra las ecuaciones necesarias para determinar la masa total de los contaminantes en el suelo.

A partir del A_{sc} , se determina el volumen de suelo contaminado (V_{sc}) con la ecuación (1) para cada profundidad.

$$V_{SC} = (A_{SC}) * (P) \quad (1)$$

Donde

V_{sc} = volumen de suelo contaminado (m³)

A_{sc} = área de suelo contaminado (m²)

P = profundidad (m)

El volumen total de suelo contaminado (V_{TSC}) se determina con la ecuación (2), en la cual se realiza la suma de los valores de volumen de suelo contaminado para cada profundidad i .

$$V_{TSC} = \sum_{i=1.2}^{7.2} V_{SCi} \quad (2)$$

Se procede a determinar la masa de suelo contaminado a partir del valor de V_{sc} y con la ecuación (3).

$$M_{SC} = (V_{SCi}) * (\rho_{ap}) \quad (3)$$

Donde:

M_{sc} = masa de suelo contaminado (kg)

ρ_{ap} = densidad aparente del suelo (kg/m³)

V_{sc} = volumen de suelo contaminado (m³)

La masa total de suelo contaminado (M_{TSC}) se determina sumando los valores de M_{sc} para todas las profundidades, con la ecuación (4).

$$M_{TSC} = \sum_{i=1.2}^{7.2} M_{SCi} \quad (4)$$

Para obtener la masa del contaminante presente en el suelo (M_{CP}), se necesita el valor de masa de suelo contaminado (M_{SC}) y la ecuación (5).

$$M_{CP} = (M_{SC}) * (C_x) \quad (5)$$

Donde:

M_{CP} = masa del contaminante (kg)

C_x = concentración del contaminante (kg de contaminante/kg de suelo)

M_{SC} = masa de suelo contaminado (kg)

La masa total de contaminante presente (M_{TCP}) en todo el suelo se determina con la ecuación (6), la cual suma los valores de M_{CP} para cada profundidad.

$$M_{TCP} = \sum_{i=1.2}^{7.2} M_{CPi} \quad (6)$$

El objetivo del perfil de masa del suelo es obtener la masa (kg) de contaminante (benceno y HFL) a diferentes profundidades, con el fin de determinar si efectivamente la remediación aplicada cumple con los niveles máximos permisibles de acuerdo con la normativa vigente.

El valor de la concentración de benceno y de HFL (C_x) así como de la densidad aparente (ρ_{ap})

CUADRO II. DATOS ESTADÍSTICOS DE CONCENTRACION DE BENCENO ANTES DE LA REMEDIACIÓN (g/kg)

Profundidad (m)	n	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Percentil 75	Percentil 95	Desviación estándar
1.2	28	0	0.0017	0.0003	0.0002	0.0002	0.0007	0.0003
2.4	28	0.0002	0.0730	0.0031	0.0002	0.0002	0.0051	0.0137
3.6	28	0.0002	0.1510	0.0074	0.0002	0.0005	0.0188	0.0285
4.8	28	0.0002	0.7320	0.0324	0.0002	0.0075	0.0540	0.1380
6.0	28	0	0.0313	0.0046	0.0002	0.0024	0.0287	0.0094
7.2	28	0	0.3630	0.0215	0.0002	0.0002	0.0942	0.0715

y densidad real del suelo (ρ_{real}) se obtuvo de los resultados de estudios de caracterización realizados antes del proceso de remediación, en el año 2007 (Comunicación personal DGGIMAR-SEMARNAT), la densidad promedio del suelo se obtiene entre la densidad aparente y la real por cada profundidad, con la finalidad de conocer cómo influye en la masa de contaminante al realizar el perfil de masas con tres valores distintos de densidad de suelo. Los datos de concentración para benceno se obtuvieron de 28 perforaciones o perfiles de suelo, a cada 1.2 m de profundidad hasta llegar a 7.2 m, generando así 28 muestras de cada profundidad (1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0 y 7.2 m) teniendo un total de 168 datos de concentración de benceno (**Cuadro II**). Se trabaja con un solo valor de concentración que represente el total de los datos por cada profundidad. Para poder trabajar con un valor de concentración por cada profundidad que se define en el cálculo del perfil de masa definida en la ecuación (5), por la variabilidad de los datos se obtuvo la media, el percentil 75 y percentil 95 del total de valores de las muestras –debido a que en ellos se tiene la mayor cantidad de datos–, lo que significa que se tiene el valor medio del total de datos. El percentil 75 considera los valores menores o iguales al 75 % del total de datos ordenados de forma creciente para obtener un sólo valor de concentración de benceno y finalmente el percentil 95 que considera los datos menores o iguales al 95 % del total generando de

igual manera un único valor de concentración. Como se mencionó anteriormente, los valores que se obtuvieron son los que se utilizaron para los cálculos del perfil de masa (**Cuadro III**).

En el caso de los los HFL antes de la remediación, el número de perforaciones o perfiles de suelo fue de 34 para cada profundidad (1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0 y 7.2 m), generando un total de 204 datos de concentración, a los cuales se les hizo el mismo tratamiento de estadístico (media, percentil 75 y percentil 95) para obtener los valores para concentración media, concentración percentil 75 y concentración percentil 95 (**cuadros IV y V**).

Por lo que fueron 28 puntos de muestreo para el benceno y 34 puntos para los HFL antes de la remediación.

Se realizaron nuevamente perforaciones o perfiles de suelo después de la remediación para ambos casos: benceno (30) a las 6 profundidades teniendo un total de 180 muestras e HFL (30) considerando únicamente las profundidades 1.2, 2.4 y 3.6 m dando un total de 90 muestras. Se realizó nuevamente el tratamiento estadístico antes descrito para obtener valores únicos a cada profundidad y para aplicar la metodología al perfil de masa elaborado en el año 2010.

De acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (SEMARNAT 2003), el número de muestras que se recomienda para un área de 7.4 hectáreas es entre 33 y 38.

CUADRO III. PERFIL DE MASA EN SUELO DE BENCENO ANTES DE LA REMEDIACIÓN (kg)

Profundidad (m)	Densidad aparente			Densidad media			Densidad real		
	Conc. media	Conc. per75	Conc. per95	Conc. Media	Conc. per75	Conc. per95	Conc. Media	Conc. per75	Conc. per95
1.2	48	37	128	61	47	164	75	58	200
2.4	404	28	662	425	30	698	804	56	1 319
3.6	1 103	76	2 814	1 513	105	3 859	1 922	133	4 903
4.8	4 554	1 056	7 593	7 256	1 682	12 090	8 634	2 001	14 390
6.0	592	312	3 710	943	496	5 907	1 293	680	8 103
7.2	3 438	45	15 060	4 912	64	21 520	6 387	83	27 990
Masa total	10 139	1 554	29 968	15 110	2 424	44 238	19 115	3 011	56 905

CUADRO IV. DATOS ESTADÍSTICOS DE CONCENTRACIÓN DE HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN LIGERA ANTES DE LA REMEDIACIÓN EN (g/kg)

Profundidad (m)	n	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Percentil 75	Percentil 95	Desviación estándar
1.2	34	0	0.873	0.146	0.027	0.137	0.710	0.238
2.4	34	0	1.793	0.488	0.366	0.737	1.504	0.524
3.6	34	0	2.203	0.645	0.457	0.964	1.717	0.612
4.8	34	0	8.462	0.890	0.538	1.093	1.844	1.447
6.0	34	0	6.835	0.721	0.517	0.857	1.669	1.169
7.2	34	0	1.740	0.213	0.034	0.204	1.013	0.394

CUADRO V. PERFIL DE MASA EN SUELO DE HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN LIGERA ANTES DE LA REMEDIACIÓN (kg)

Profundidad (m)	Densidad aparente			Densidad media			Densidad real		
	Conc. Media	Conc. per75	Conc. per95	Conc. Media	Conc. per75	Conc. per95	Conc. Media	Conc. per75	Conc. per95
1.2	25 660	24 080	124 800	32 860	30 840	159 800	40 060	37 590	194 800
2.4	62 530	94 430	192 700	65 850	99 450	202 900	124 500	188 000	383 700
3.6	96 540	144 300	257 000	132 400	197 900	352 400	168 200	251 400	447 800
4.8	125 100	153 700	259 300	181 200	222 500	375 300	237 200	291 300	491 400
6.0	93 200	110 800	215 700	148 400	176 400	343 500	203 600	242 000	471 200
7.2	34 060	32 620	162 000	48 670	46 610	231 500	63 280	60 610	301 000
Masa Total	437 090	559 930	1 211 500	609 380	773 700	1 665 400	836 840	1 070 900	2 289 900

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Benceno antes de la remediación

Se obtuvo la masa de benceno presente a seis diferentes profundidades entre 1.2 y 7.2 m, con concentraciones estadísticas promedio, percentil 75 y percentil 95, así como las densidades aparente, real y promedio. En los **cuadros II y III** se presentan los resultados del manejo estadístico correspondiente a los análisis de las concentraciones y del perfil de masa del suelo por profundidades y global, los cuales reflejan el comportamiento del benceno en términos de masa (kg). Se considera que la situación de mayor impacto por benceno es aquella con densidad real y concentración percentil 95, debido a que en ésta se presenta la mayor cantidad de masa del contaminante y donde el valor de la densidad real es mayor que la densidad aparente, lo que indica que existe una disminución de porosidad que limita el trayecto del contaminante manteniéndolo en las partículas del suelo.

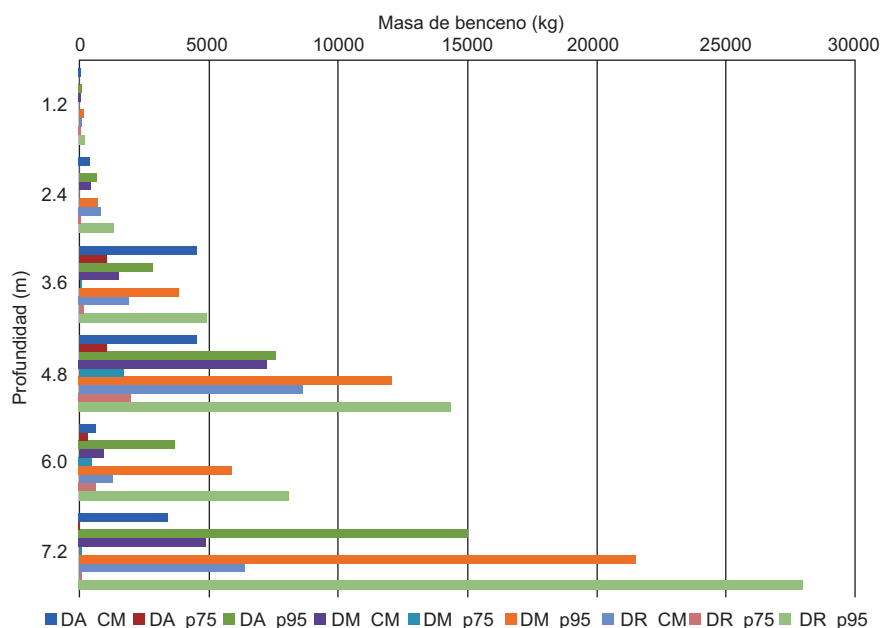
En la **figura 2** se presenta la distribución de benceno en el perfil del suelo. Se observa una mayor masa del contaminante a 4.8 y 7.2 m. De acuerdo con Díaz-Rodríguez (2006), la estratigrafía del suelo y el nivel freático del acuitardo que inicia entre 4.0 y 5.0 m –donde la textura del suelo es arcillo-limosa–,

son factores importantes en la retención de benceno limitando la migración del contaminante.

Por otra parte, existe una zona de fluctuación del nivel freático por temporada de lluvias y sequías, el cual influye en el arrastre del benceno (Dobson *et al.* 2007), considerando además la gran movilidad de esta sustancia en el suelo. Así, por la miscibilidad del benceno en el agua se puede encontrar la mayor concentración en forma líquida como una capa que flota en el nivel freático (Saval *et al.* 2004).

Puede apreciarse un valor menor en la masa de benceno a una profundidad de 6.0 m en comparación con la zona saturada (a una profundidad de 7.2 m). Lessser (1995), menciona que debido a la fuerza de la gravedad y las características geológicas del suelo –la existencia de fisuras y/o agrietamientos característicos de la tipología predominante en el sitio o por actividades antrópicas, como el caso de las excavaciones que se hicieron en su momento para la red de tuberías y para la remediación–, la migración del contaminante alcanza profundidades mayores.

Finalmente, la carga de contaminante en los estratos superiores (zona no saturada) es la más reducida comparada con las otras profundidades. Dada la textura limoso-arenosa de su suelo, se puede inferir que haya tenido lugar una liberación por volatilización a la atmósfera durante los 11 años siguientes a partir



DA_Cm: Densidad Aparente_Concentración media; DA_Cp75: Densidad Aparente_Concentración percentil 75; DA_Cp95: Densidad Aparente_Concentración percentil95; DM_Cm: Densidad Media_Concentración media; DM_Cp75: Densidad Media_Concentración percentil 75; DM_Cp95: Densidad Media_Concentración percentil95; DR_Cm: Densidad Real_Concentración media; DR_Cp75: Densidad Real_Concentración percentil 75; DR_Cp95: Densidad Real_Concentración percentil95

Fig. 2. Masa de benceno presente antes de la remediación

del cierre de la refinería, reteniéndose así una menor cantidad de benceno.

HFL antes de la remediación

La **figura 3** indica los resultados para los hidrocarburos de fracción ligera presentes en el suelo antes de la remediación. Asimismo, los **cuadros IV y V** muestran los datos obtenidos para el perfil de masa en suelo; puede apreciarse que la mayor cantidad de masa corresponde a la densidad real con concentración percentil 95.

Los resultados para los HFL muestran algunos comportamientos similares a los del benceno. La mayor masa de HFL tiende a presentarse en la zona de oscilación del nivel freático del acuitardo, aunque también existe una cantidad considerable por debajo de éste; la menor carga se presenta en los estratos más superficiales. Las explicaciones para estos resultados también son similares: la insolubilidad química en el agua de los HFL, la aparición de fisuras por razones geológicas naturales y/o actividades antrópicas como son la excavación de zanjas para remediación (zonas de oscilación y saturada) y la alta volatilidad de estas sustancias (zona no saturada).

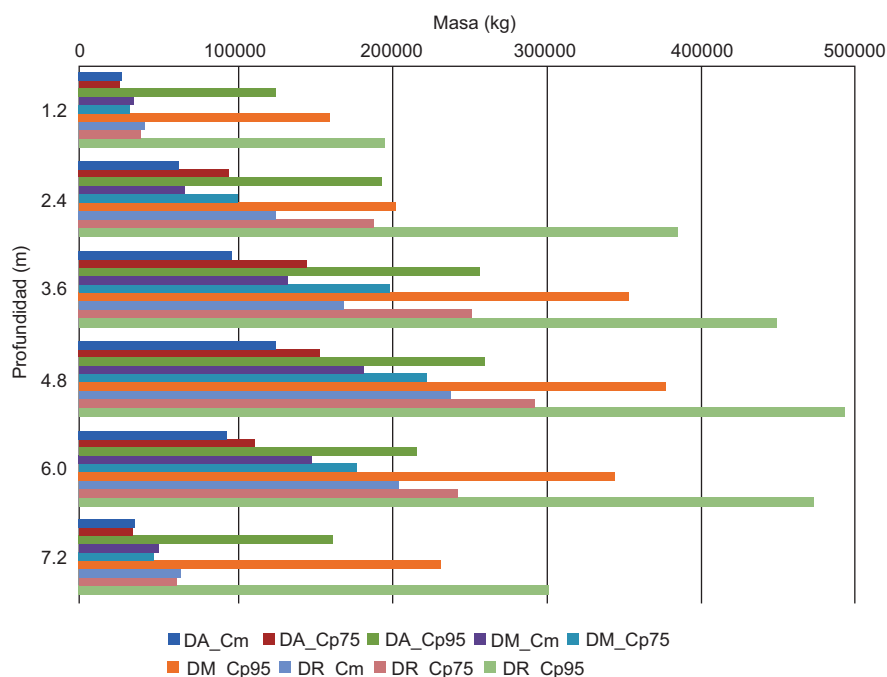
Remediación

Los métodos de remediación utilizados en la zona

consistieron en una combinación de bioaspersión, es decir, inyección de aire atmosférico por debajo de las zonas contaminadas incluyendo la zona saturada, que genera una cortina de microburbujas, las cuales remueven los contaminantes que se encuentran tanto disueltos como adsorbidos en 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 bacteriana autóctona. El segundo método fue la extracción de vapores que consiste en el proceso inverso al bioventeo, es decir, se utilizan pozos de extracción de vapores, de tal manera que es posible remover la fracción volátil y semivolátil de los hidrocarburos adsorbidos y absorbidos en la porción no saturada del suelo, a la par que se induce mediante este método la infiltración de oxígeno atmosférico al subsuelo, lográndose por este medio estimular la actividad microbiológica. Esta combinación de procesos tuvo una duración aproximada de un año (Comunicación Personal DGGIMAR_SEMARNAT).

Benceno después de la remediación

Una vez aplicada la remediación, se realizó nuevamente el perfil de masa en suelo aplicando la ecuación (5) que se utilizó para obtener la masa de benceno antes de la remediación. Se pudo observar



DA_CM: Densidad Aparente_Concentración Media; DA_Cp75: Densidad Aparente_Concentración percentil 75; DA_Cp95: Densidad Aparente_Concentración percentil95; DM_CM: Densidad Media_Concentración Media; DM_Cp75: Densidad Media_Concentración percentil 75; DM_Cp95: Densidad Media_Concentración percentil95; DR_CM: Densidad Real_Concentración Media; DR_Cp75: Densidad Real_Concentración percentil 75; DR_Cp95: Densidad Real_Concentración percentil95

Fig. 3. Masa de hidrocarburos de fracción ligera presente antes de la remediación

que la masa contaminante disminuyó considerablemente. El porcentaje de remoción de masa de benceno osciló entre 89 y 95 %, alcanzando el punto máximo en las zonas de mayor retención (**cuadros VI y VII**). La **figura 4** muestra una distribución más homogénea de masa retenida, sin presentar variabilidad significativa.

HFL después de la remediación

Se observó que la masa de HFL también disminuyó como lo muestran los **cuadros VIII y IX** en los que se presentan los datos estadísticos de las concentraciones de HFL, con los cuales se realizó la determinación de la masa remanente (**Fig. 5**).

CONCLUSIONES

Se llevó a cabo la determinación del perfil de masa del suelo por profundidades para un caso real de un pasivo ambiental, permitiendo observar la disminución de las concentraciones de benceno y de HFL después de los métodos de remediación utilizados.

Las cargas de masa calculadas antes de la re-

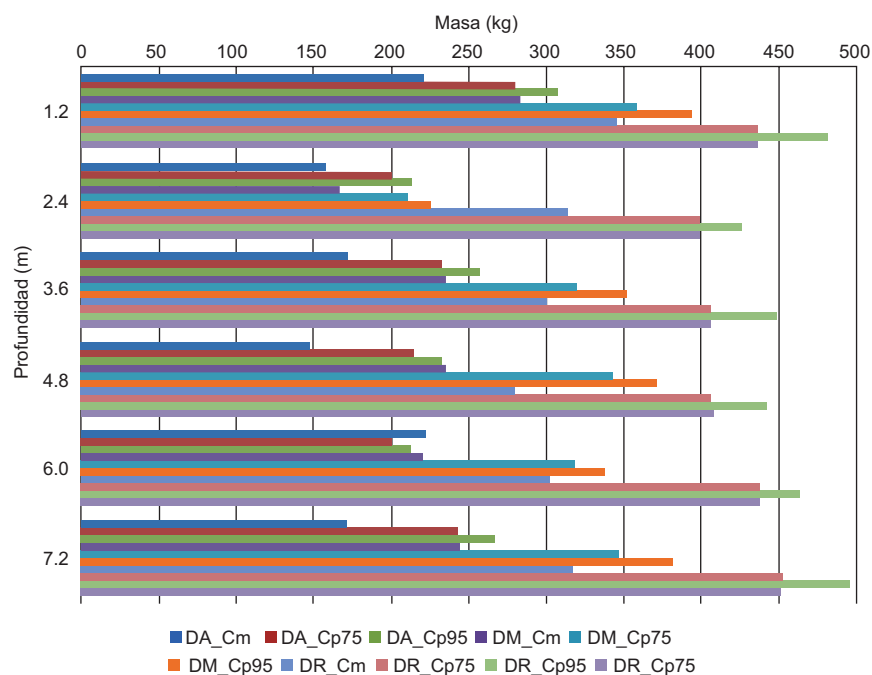
mediación para benceno fueron de 10 139 kg y de 437 090 kg de HFL; después de la remediación fueron de 1092 kg de benceno y de 34 992 kg de HFL, en un volumen de suelo de 680 356 m³ de un total de 642 muestras de 122 perfiles.

La metodología utilizada permite trabajar en lugares de grandes dimensiones donde existen pasivos ambientales y con ello un riesgo inminente para la salud pública. La determinación del perfil de masa en suelo es una opción para dar seguimiento a la verificación de reportes y a las medidas de mitigación de impacto ambiental, ya que es posible aplicarla antes y después de la remediación.

La masa de benceno y de HFL después de la remediación se considera aceptable, ya que las concentraciones de las muestras no rebasan los límites máximos permisibles establecidas por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (SEMARNAT 2003).

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales por proporcionar la información técnica.



DA_Cm: Densidad Aparente_Concentración media; DA_Cp75: Densidad Aparente_Concentración percentil 75; DA_Cp95: Densidad Aparente_Concentración percentil95; DM_Cm: Densidad Media_Concentración media; DM_Cp75: Densidad Media_Concentración percentil 75; DM_Cp95: Densidad Media_Concentración percentil95; DR_Cm: Densidad Real_Concentración media; DR_Cp75: Densidad Real_Concentración percentil 75; DR_Cp95: Densidad Real_Concentración percentil95

Fig. 4. Masa de benceno presente después de la remediación

CUADRO VII. PERFIL DE MASA EN SUELO DE BENCENO DESPUÉS DE LA REMEDIACIÓN (kg)

Profundidad (m)	Densidad aparente			Densidad media			Densidad real		
	Conc. Media	Conc. per 75	Conc. per95	Conc. Media	Conc. per 75	Conc. per95	Conc. Media	Conc. per 75	Conc. per95
1.2	222	279	308	284	358	394	346	436	480
2.4	158	200	214	166	211	225	314	398	426
3.6	172	234	257	236	320	353	300	407	449
4.8	148	215	233	235	343	372	280	408	442
6.0	222	200	212	220	319	338	302	438	463
7.2	171	243	267	244	347	382	318	452	496
Masa Total	1092	1371	1491	1385	1898	2063	1859	2538	2756

CUADRO VIII. DATOS ESTADÍSTICOS DE CONCENTRACIÓN DE HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN LIGERA DESPUÉS DE LA REMEDIACIÓN EN (g/kg)

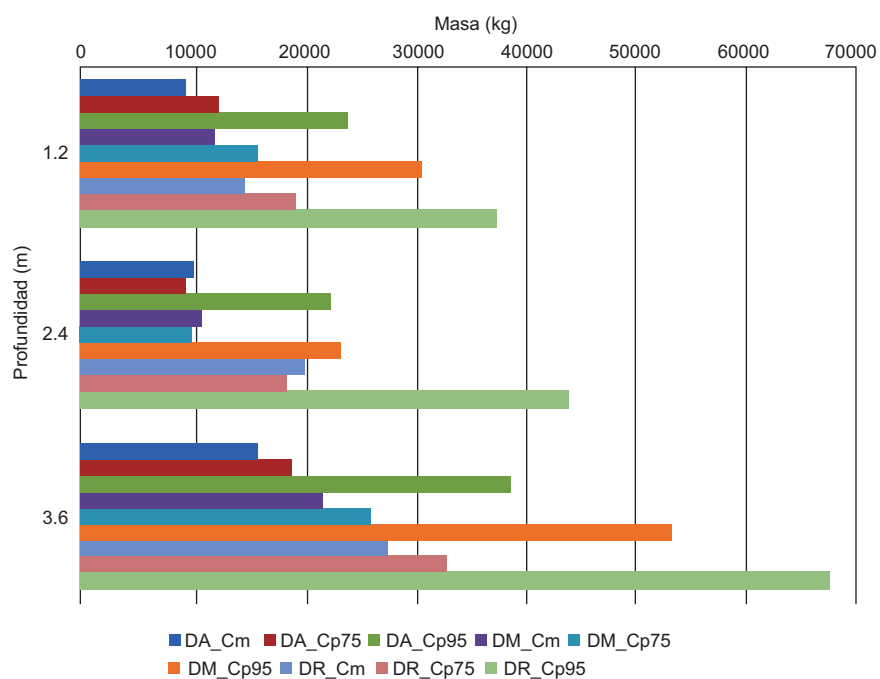
Profundidad (m)	n	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Percentil 75	Percentil 95	Desviación estándar
1.2	30	0.011	0.181	0.053	0.041	0.070	0.136	0.043
2.4	30	0.011	0.689	0.078	0.060	0.071	0.172	0.123
3.6	30	0.016	0.478	0.105	0.075	0.126	0.258	0.094

CUADRO VI. DATOS ESTADÍSTICOS DE CONCENTRACIÓN DE BENCENO DESPUÉS DE LA REMEDIACIÓN EN (g/kg)

Profundidad (m)	n	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Percentil 75	Percentil 95	Desviación estándar
1.2	30	0.0007	0.0026	0.0013	0.0015	0.0016	0.0018	0.0005
2.4	30	0.0007	0.0024	0.0012	0.0013	0.0016	0.0017	0.0004
3.6	30	0.0008	0.0029	0.0012	0.0008	0.0016	0.0017	0.0005
4.8	30	0.0008	0.0017	0.0011	0.0008	0.0015	0.0017	0.0004
6.0	30	0.0007	0.0017	0.0011	0.0008	0.0015	0.0016	0.0004
7.2	30	0.0008	0.0017	0.0011	0.0009	0.0015	0.0017	0.0004

CUADRO IX. PERFIL DE MASA EN SUELO DE HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN LIGERA DESPUÉS DE LA REMEDIACIÓN (kg)

Profundidad (m)	Densidad aparente			Densidad media			Densidad real		
	Conc. Media	Conc. per75	Conc. per95	Conc. Media	Conc. per75	Conc. per95	Conc. Media	Conc. per75	Conc. per95
1.2	9 262	12 270	23 900	11 860	15 710	30 610	14 460	19 150	37 320
2.4	10 010	9 136	22 400	10 540	9 621	23 210	19 930	18 190	43 880
3.6	15 720	18 860	38 620	21 550	25 860	52 950	27 380	32 860	67 290
Masa Total	34 992	40 266	84 920	43 950	51 191	106 770	61 770	70 200	148 490

**Fig. 5.** Masa de hidrocarburos fracción ligera presente después de la remediación

REFERENCIAS

- Bhupathiraju V.K., Krauter P., Holman H.N., Conrad M.E., Daley P.F. y Templeto A.S. (2002). Assessment of in-situ Bioremediation at a Refinery Waste-Contaminated Site and an Aviation Gasoline Contaminated Site. *Biodegradation* 13, 79-90.
- Boulding J. (1994). Description and Sampling of Contaminated Soils. 2nd. Ed. Lewis Publishers, Bloomington, USA, 240 pp.
- Brady N.C. y Weil R.R. (1998). The Nature and Properties of Soil. 11th Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, USA, 881pp.
- Chapelle F.H. (1999). Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Ground Water: The Perspectives of History and Hydrology. *Ground Water* 37, 122-132.
- Davis G.B., Patterson B.M. y Trefry M.G. (2009). Evidence for Instantaneous Oxygen-Limited Biodegradation of Petroleum Hydrocarbon Vapors in the Subsurface. *Ground Water Monit.R.* 29, 126-137.
- Díaz-Rodríguez A. (2006). Los suelos lacustres de la Ciudad de México. *RIDNAIC*. Vol. 6, 111-129.
- Dobson R., Schroth M.H. y Zeyer J. (2007). Effect of Water-table fluctuation on dissolution and biodegradation of a multi-component, light nonaqueous-phase liquid. *J. Contam. Hydrol.* 94, 235-248.
- Garg S. y Rixey W.G. (1998). Dissolution of Benzene, Toluene, m-Xylene and Naphthalene from a Residually Trapped Non-Aqueous Phase Liquid under Mass Transfer Limited Conditions. *Journal of Contaminant Hydrology* 36, 313-331.
- Genovese M., Denaro R., Capello S., Di Marco G., La Spada G. y Guiliano L. (2008). Bioremediation of Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes-Contaminated Soil: A Biopile Pilot Experiment. *J. Appl. Microbiol.* 105, 1694-1702.
- Gocht T., Ligouis B., Hinderer T.M. y Grathwohl P. (2007). Accumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Rural Soils Based on Mass Balances at the Catchment Scale. *Environ. Toxicol. Chem.* 26, 591-600.
- Himmelblau D.M. y Riggs J.B. (2003). Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering. 7th Ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, USA, 945 pp.
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. IGES. Geneva, Switzerland, 632 pp.
- LaGrega M., Buckingham P.L. y Evans J.C. (2001). Hazardous Waste Management, 2nd. Ed. McGraw Hill. New York, USA, 1202 pp.
- Lesser J.M. (1995). Prospección de Contaminación de Acuíferos por Hidrocarburos. *Revista del Colegio de Ingenieros Geólogos de México* Vol. 1, Núm. 6, 5-8.
- Liu B., Banks M.K. y Schwab P. (2001). Effects of Soil Water Content on Biodegradation of Phenanthrene in a Mixture of Organic Contaminants, Soil Sediment. *Contam.* 10, 633-658.
- Lyman W.J., Reidy P.J. y Levy B. (1992). Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environmental, C.K. SMOLEY, ICN. Michigan, USA, 416 pp.
- McCabe W., Smith J. y Harriot P. (2005). Unit Operations Chemical Engineering. 7th. Ed. McGraw-Hill, Inc. New York, USA, 1139 pp.
- Nathwani J.S. y Phillips C.R. (1977). Adsorption-Desorption of Selected Hydrocarbons in Crude Oil on Soils. *Chemosphere* 6, 157-162.
- PEMEX Petróleos Mexicanos (1956). Refinerías de México. A. Mijares y Hno. México D. F., México, 87 pp.
- PEMEX Petróleos Mexicanos (2008). Pemex 70 años. Relato iconográfico. Landucci. México D. F., México, 267pp.
- Potter T.L. y Simmons K.E. (1998). Composition of chemical mixtures. Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series Volumen 2. Amherst Scientific Publishers. Amherst, USA, 102 pp.
- Sandoval Bohórquez S., Lara Guerrero F., Lesser Illades J.M. y Nieto Calleja J.M. (2004). Contaminación de acuíferos con hidrocarburos: causas, efectos, riesgos asociados y medidas de prevención. En: *El Agua en México vista desde la Academia*. Academia Mexicana de Ciencias. México D.F., México, 403 pp.
- Schaffner S. (2005). Grupo de Diseño Urbano: Parque Ex – Refinería Azcapotzalco. Disponible en: http://www.sandro-schaffner.de/bilder/plaene/pdf/beruf_ex-refineria/ex-refineria_1.pdf Consultada en (09/05/13).
- Schneider R.P., Morano S.C., Gigena M.A., Missawa S.K., Rocha R.C. y Da Silva L.R. (2006). Contamination Levels and Preliminary Assessment of the Technical Feasibility of Employing Natural Attenuation in 5 Priority Areas of Presidente Bernardes Refinery in Cubatão, São Paulo, Brazil. *Environ. Monit. Assess.* 116, 21-52.
- Wang M.S., Wu S.C., Chen W.J. y Hsu H.L. (2007). Modeling Nonequilibrium Solute Transport in Heterogeneous Soils with Considerations of Mass-Transfer Processes and the Effects of Vadose Zone Properties. *Environ. Eng. Sci.* 24, 535-549.
- Yang Y.J., Gates T.M. y Edwards S. (1999). SVE Design: Mass Transfer Limitation Due to Molecular Diffusion. *J. Environ. Eng.* 125, 852-860.