

# ANEXO N: COSTOS DE LA REMEDIACIÓN DEL SUELO

Por: Equipo Técnico del Ing. Richard Cabrera  
como parte del  
EXAMEN PERICIAL

24 de marzo del 2008

## 1. CANTIDAD DE SUELO CONTAMINADO QUE REQUIERE SER REMEDIADO

El límite permisible para suelos contaminados por las operaciones hidrocarburíferas en ecosistemas sensibles es de 1.000 ppm de TPH (Hidrocarburos Totales de Petróleo). Aunque los suelos en la Concesión Napo están contaminados por otras sustancias químicas además del petróleo crudo, tales como metales, el TPH es utilizado como indicador de la limpieza del suelo debido a que la mayor cantidad de la contaminación del suelo proviene del petróleo crudo, y porque gran parte de la información disponible sobre la Concesión se obtiene en TPH. Debido a que el muestreo que se ha realizado no ha definido la extensión espacial exacta ni la profundidad de todos los suelos contaminados que se encuentran dentro de la Concesión, se requieren algunas suposiciones para obtener una estimación de la cantidad del suelo que necesita ser remediado. Sin embargo, de acuerdo con lo expuesto en el Anexo G, la información obtenida en los lugares de los cuales se extrajeron las muestras es suficiente para obtener una estimación global de la totalidad de la Concesión.

### 1.1. Superficies de los suelos que requieren ser remediados

La tabla 1 presenta una lista de las superficies estimadas de los suelos que necesitan ser remediados en los sitios de estaciones y de pozos. En las estaciones hay 89 piscinas que ocupan 77.500 m<sup>2</sup> de superficie. Debido a que en las piscinas las estaciones procesaban cantidades tan grandes de petróleo y de agua de producción, se puede suponer que todas estas piscinas requieren ser remediadas.

Tabla 1: Superficies de los suelos de la Concesión que requieren ser remediados (>1.000 ppm TPH)

Superficie del suelo	Pozos	Estaciones	Total
Superficie total de las piscinas	691.000 m <sup>2</sup>	77.500 m <sup>2</sup>	769.000 m <sup>2</sup>
Superficie de piscinas que requieren ser remediadas	553.000 m <sup>2</sup> (80% del suelo de las piscinas)	77.500 m <sup>2</sup> (100% del suelo de las piscinas)	631.000 m <sup>2</sup>
Superficies de los suelos fuera de las piscinas que requieren ser remediados (50% del suelo de las piscinas)			316.000 m <sup>2</sup>
<b>Superficie total de los suelos que necesitan ser remediados.</b>			<b>947.000 m<sup>2</sup></b>

Hay aproximadamente 828 piscinas en los sitios de los pozos de petróleo que ocupan 691.000 m<sup>2</sup> de superficie. De acuerdo con el análisis de datos presentados en el informe

principal, aproximadamente el 80% de estas piscinas contienen suelos con concentraciones de TPH que sobrepasan los 1.000 ppm. Por lo tanto, calculamos que el 80% de las piscinas en los pozos requieren ser remediadas, o 662 piscinas. Si se presupone que las superficies de las piscinas que requieren ser remediadas son representativas de todas las piscinas, entonces la superficie total de las piscinas de pozos que necesita ser remediada es de 553.000m<sup>2</sup>.

Además de las piscinas, hay también otras superficies en las estaciones, pozos y en otras zonas que están contaminadas por petróleo crudo. El petróleo se filtraba por las paredes de las piscinas en los suelos que rodean a éstas. En algunas piscinas el petróleo se desbordó y contaminó el suelo de los alrededores. A algunas piscinas se les han construido tuberías en sus laterales para drenar el petróleo en caso de que el nivel de éste aumentara demasiado. También hubo muchos derrames de petróleo crudo en piscinas y estaciones. Por ejemplo, había centenares de derrames que hacen un total de millares de barriles de petróleo que se registraron en pozos durante los años en lo que Texpet operaba la Concesión. Se informó que algunos de estos derrames habían sido saneados, pero no todos. Además de los derrames en pozos, hubo también otros derrames de petróleo en oleoductos y en otras operaciones en toda la Concesión.

Los datos recopilados durante las Inspecciones Judiciales confirman que hay una contaminación generalizada en los pozos y en las estaciones fuera de las piscinas. El informe principal describe que muchas de las muestras de suelos tomadas fuera de las piscinas están contaminadas con concentraciones de TPH que superan los 1.000 ppm. En la mayoría de los casos, fuera de las piscinas no se han identificado otros focos exactos de contaminación que no sean los derrames de petróleo. Sin embargo, los datos no son suficientes para determinar con exactitud qué cantidad del suelo fuera de las piscinas está contaminado por petróleo en la Concesión. Determinar esto llevaría muchos, muchos años y miles de muestras de suelo. En cambio, se podría realizar un cálculo estimativo basado en los datos de la Inspección Judicial y en la historia de los derrames de petróleo en la Concesión. La superficie estimada de los suelos fuera de las piscinas que requieren ser remediados es aproximadamente del 50% de las zonas de piscinas que requieren remediación. La estimación da un resultado de 316.000 m<sup>2</sup>. La superficie total del suelo que requiere ser remediado (en las piscinas y fuera de ellas) es de 947.000 m<sup>2</sup>.

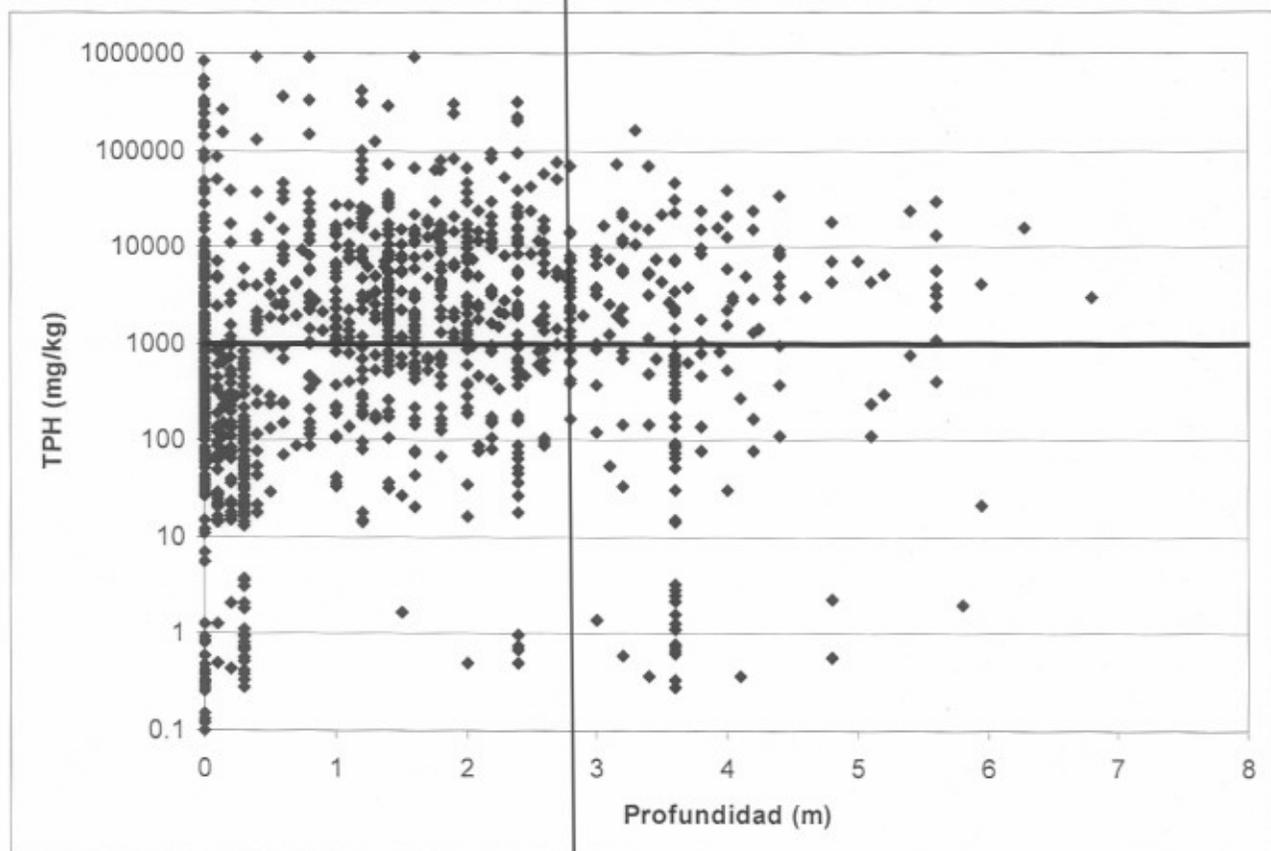
## 1.2. Volumen del suelo que necesita ser remediado

Para calcular el volumen del suelo que requiere remediación es necesario tener una estimación del grado de profundidad que alcanza la contaminación. Muchas de la muestras tomadas por los peritos insinuados por las partes del litigio fueron extraídas de suelo subterráneo y es por esto que existen datos a cerca del grado de profundidad que alcanza la contaminación. Las muestras de suelo subterráneo fueron tomadas utilizando dispositivos de corte núcleos que toman una muestra de suelo con forma alargada en un tubo hueco. Luego, se extrae suelo de las diferentes profundidades y se lo envía al laboratorio para ser analizado. La Figura 1 muestra la contaminación de TPH en todas las muestras de suelo tomadas en profundidad durante las Inspecciones Judiciales.

La figura muestra que gran cantidad del suelo en todos los niveles de profundidad contiene valores de TPH que sobrepasan los 1.000 ppm. La figura muestra también que la contaminación que supera los 1.000 ppm de TPH se extiende a niveles muy profundos

debajo de la superficie. La mayoría de las muestras tomadas en una profundidad de 5 a 6 m debajo de la superficie contienen concentraciones de TPH que sobrepasan los 1.000 ppm. De hecho, muchas de las muestras contaminadas que presenta la figura son tomadas del núcleo del segmento del suelo más profundo. Esto significa que la profundidad real de la contaminación se extiende mucho más de lo que muestra la figura, ya que las muestras más profundas que se tomaron contenían normalmente valores de TPH que sobrepasaban los 1.000 ppm. La figura muestra cierta tendencia a que las concentraciones de TPH disminuyan a niveles menores que 1.000 ppm TPH con la profundidad. Lo cierto es que la contaminación se da en los suelos de todas las profundidades, aunque parece tener tendencia a disminuir en suelos de mayor profundidad.

Figura 1: Concentraciones de TPH en todas las muestras de suelos, según la profundidad. Los datos están graficados en una escala logarítmica, lo cual significa que la concentración en cada línea horizontal es 10 veces mayor que la línea que está debajo de ésta.



Los datos presentados en la figura demuestran que deberá realizarse una remediación muy profunda para llegar a todo el suelo contaminado con valores de TPH que superan los 1.000 ppm. La profundidad va a variar de un sitio a otro y, probablemente, de piscina a piscina en cada sitio. De acuerdo con las cifras, se puede estimar con confianza que la remediación de la piscina tendrá que ser realizada a una profundidad aproximada de 4 m, en promedio, para remediar todo el suelo contaminado. Por lo tanto, se toma una profundidad de 4 m (en promedio) para calcular el volumen total de suelo que requiere ser remediado. La Tabla 2 muestra el cálculo del volumen total de suelo que requiere ser remediado.

Tabla 2: Volumen total del suelo que requiere ser remediado

Superficie total de los suelos que requieren ser remediados.	Profundidad promedio de remediación	Volumen total del suelo a ser remediado
947.000 m <sup>2</sup>	4 m	3.788.000 m <sup>3</sup>

## 2. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE REMEDIACIÓN

### 2.1. Tecnologías aplicables

Existen muchas tecnologías de remediación disponibles para sanear los suelos contaminados con petróleo crudo. La tecnología de saneamiento seleccionada debe cumplir con los objetivos de remediación de evitar toda migración o movimientos de las sustancias tóxicas fuera de las zonas contaminadas, y reducir los valores TPH a menos de 1.000 ppm. El Proyecto de Eliminación de Piscinas Contaminadas en el Distrito Amazónico (PEDPA) está actualmente dedicado al saneamiento de los suelos contaminados dentro y en los alrededores de algunas de las piscinas de desechos en la Concesión. Principalmente se utiliza la técnica de lavado de suelo como tecnología de remediación, a un costo mínimo aproximado de \$60 por metro cúbico (m<sup>3</sup>) de suelo tratado. TexPet también realizó actividades de remediación a mediados de la década de 1990, y el lavado del suelo también era un elemento importante de su trabajo. El Anexo PISCINAS describe que aún existen concentraciones de TPH que sobrepasan por mucho los 1.000 ppm en las piscinas en donde TexPet realizó actividades de saneamiento, y demuestra que los métodos que se utilizaron no eran adecuados para lograr el nivel objetivo de TPH de 1.000 ppm.

El lavado del suelo depende del hecho de que los hidrocarburos livianos flotan sobre el agua y, por lo tanto, para poder aplicar esta tecnología, las piscinas se deben llenar con agua. En caso de que las piscinas no tengan agua naturalmente, se las llena de forma mecánica antes de realizar el lavado de suelo. Los técnicos que realizan la remediación insertan manualmente mangueras de aire dentro de las piscinas con agua para revolver el agua, y de ese modo hacen que la fase libre de petróleo ascienda hasta la superficie, en donde puede ser desescoriada del agua físicamente. En algunos casos, se agregan detergentes al agua/suelo para facilitar la extracción de hidrocarburos. Esta tecnología de remediación es efectiva para extraer del suelo parte de la contaminación de las fases libres de petróleo. La Figura 2 ilustra la contaminación de fase libre de petróleo que es recuperable utilizando el lavado del suelo como tecnología de remediación.

Figura 2: Fotografía de la contaminación por petróleo recuperada en una piscina utilizando el lavado de suelo.



Aunque la eliminación de algo de contaminación de fase libre de petróleo de los suelos residuales contribuye al saneamiento general, el lavado de suelo no es efectivo para eliminar toda la contaminación de fase libre de petróleo ni tampoco la contaminación de hidrocarburos absorbidos por el suelo. Esto deja suelo contaminado en el lugar. De acuerdo con lo ilustrado en la Figura 3, los suelos manchados en la piscina de desecho evidencian que el lavado de suelo no recupera la contaminación por hidrocarburos. La mayoría de los datos obtenidos por las Inspecciones Judiciales demuestran que las piscinas remediadas por TexPet en la década de 1990 a través del lavado de suelo contienen concentraciones de TPH que exceden por mucho los 1.000 ppm, de acuerdo con lo que describe el Anexo H. Lo que nos hace concluir que el lavado de suelo como único mecanismo no resulta adecuado para que la remediación de los suelos contaminados logre un nivel de TPH menor a 1.000 ppm.

Figura 3: Operación de lavado de suelo en una piscina contaminada realizada por el PEDPA



Existen otras tecnologías disponibles para el tratamiento de los suelos, tales como la extracción física, la fijación química, el tratamiento químico o descontaminación in-situ o ex-situ, la biorremediación in-situ o ex-situ, incineración o destrucción térmica, y otros procesos similares. La tecnología de saneamiento seleccionada debe cumplir con los objetivos de remediación de evitar toda migración o movimientos de las sustancias tóxicas fuera de las zonas contaminadas, y reducir los valores de TPH a menos de 1.000 ppm. Los méritos relativos de cada tecnología se mencionan más abajo.

Todas las tecnologías de limpieza están destinadas a controlar, reducir, o eliminar la exposición de los seres humanos receptores y de los ecosistemas sensibles a sustancias tóxicas o a otras sustancias químicas. En general, la selección de la tecnología que se prefiere debe realizarse de acuerdo con los siguientes criterios.

- Cumplimiento de las normas, u otras metas y objetivos del proyecto
- Factibilidad de ingeniería en términos de implementación
- Historial y aplicabilidad de la tecnología
- Economía asociada con la implementación
- Consideraciones lógicas
- Consideraciones sociales y de infraestructura

#### Sólo restauración estética

La restauración estética se aplicaría en aquellos sitios donde la contaminación tiene un impacto muy bajo en términos de su naturaleza o su alcance, o donde probablemente no causa un impacto significativo en los seres humanos receptores o en los ecosistemas sensibles. En dichos casos, equipos livianos de construcción tales como retroexcavadoras y niveladoras podrían ser utilizados para extraer el material de desecho y agregar suelo de relleno saneado. La provisión de nueva vegetación puede ser necesaria para minimizar el potencial de erosión. Sin embargo, la restauración estética no puede evitar el escape

continuo de sustancias tóxicas de las piscinas y suelos contaminados, y no logrará ningún progreso significativo en la reducción de concentraciones de TPH por debajo de los 1.000 ppm.

#### **Aislamiento del material de desecho**

El aislamiento del material de desecho hace referencia a las acciones que evitarán la continuidad de la migración o propagación de la contaminación, pero no reducirán activamente la contaminación presente. El aislamiento podría incluir acciones tales como la construcción de barreras de cemento alrededor de las piscinas para aislar el material de desecho de los suelos limpios adyacentes, minimizando así el potencial de contaminación lateral. Las barreras de cemento deben ser lo suficientemente profundas para que sean efectivas. Dichas barreras pueden aislar las aguas subterráneas contaminadas de las aguas subterráneas sin contaminar, pero estas prácticas son muy específicas de cada sitio. Tapar y cubrir las zonas de desechos puede ayudar a aislar el material de desecho de precipitaciones y en casos de desagües y escurrimientos, y de los residentes cercanos y la fauna, minimizando así la exposición. Sin embargo, si la piscina no es geotécnicamente estable, primero se debe estabilizar el material de desecho para luego poder tapar y cubrir con efectividad. La restauración por aislamiento puede ayudar a evitar la liberación constante de contaminantes de piscinas a aguas superficiales y subterráneas en casos de precipitaciones, por lixiviación del suelo, etc. Sin embargo, no elimina la amenaza a largo plazo ni reduce la contaminación del lugar. Es por esta razón que en esta evaluación no se toma en cuenta la restauración por aislamiento.

#### **Estabilización física y fijación química**

La remediación por estabilización física (algunas veces conocida como solidificación) podría ser utilizada en muchos sitios de piscinas. La solidificación implica el agregado de reactivos químicos que solidifican físicamente al material, minimizando así el movimiento y generando la estabilidad. Por lo general, la solidificación no elimina la lixiviación del material de desecho con el tiempo, a menos que se utilice una capa impermeable para aislar el material estabilizado de las precipitaciones, los desagües, etc. Por otro lado, la fijación química genera un monolito más impermeable que disminuye la lixiviación, aunque generalmente a un costo muy elevado. La estabilización física y/o la fijación química no extraen el suelo contaminado y, por lo tanto, no pueden garantizar que se evite el escape constante de contaminantes, ni pueden reducir significativamente las concentraciones tóxicas. Es por estas razones que en esta evaluación no se toma en cuenta la estabilización física ni la fijación química.

#### **Tratamiento químico in-situ y ex-situ**

La remediación de los suelos de las piscinas ya sea utilizando el tratamiento químico in-situ (en el lugar) o ex-situ (luego de extraer el suelo contaminado de las piscinas) puede ser viable en muchos sitios. Esta tecnología comprende el uso de oxidantes u otros reactivos para tratar los hidrocarburos de petróleo. Existen otros reactivos disponibles para tratar los metales tóxicos y la salinidad, aunque ningún reactivo individual puede tratar las tres clasificaciones de desechos. El tratamiento in-situ implica la inyección o la mezcla de reactivos directamente dentro del material de desecho. El tratamiento ex-situ implica la extracción del material de desecho, el tratamiento, y la recolocación subsiguiente en la

excavación original del material de desecho tratado. De acuerdo con la evaluación de las piscinas, el tratamiento químico in-situ o ex-situ no son tecnologías viables. El costo relativo tratamientos químicos in-situ o ex-situ es elevado comparado con otras tecnologías. Sin embargo, dicha tecnología puede ser utilizada en conjunción con la biorremediación para un programa de tratamiento general más efectivo. Por ejemplo, los oxidantes pueden determinar mejores condiciones aeróbicas para la biorremediación.

#### **Biorremediación in-situ o ex-situ**

La biorremediación in-situ o ex-situ podría ser utilizada para restaurar los sitios contaminados por hidrocarburos de petróleo, suponiendo que otros contaminantes, tales como los metales tóxicos o la salinidad no limiten la degradación microbiana del material de desecho. La bioaumentación implicaría agregar microbios nutrientes, mientras que la bioestimulación implicaría agregar sólo nutrientes al sitio contaminado que ya posee una población microbiana autóctona. La biorremediación podría ser implementada en la modalidad in-situ en los sitios con contaminación superficial o con una mínima carga de hidrocarburos. Puede ser preferible la utilización de la modalidad ex-situ en los sitios con una contaminación de hidrocarburos profunda o elevadamente concentrada, tales como los que se tienen en cuenta en esta evaluación. El tratamiento ex-situ implica la extracción del material de desecho, el biotratamiento, y la recolocación subsiguiente en la excavación original del material de desecho tratado. Sin embargo, la biorremediación tarda años en lograrse, y requiere monitoreo activo y mantenimiento. De acuerdo con la evaluación de las piscinas, la biorremediación es una tecnología viable, y se prefiere la aplicación de la biorremediación ex-situ. El costo relativo de la biorremediación es bajo comparado con otras tecnologías.

#### **Incineración o tratamiento térmico**

La remediación por incineración o tratamiento térmico podría aplicarse potencialmente en todos los sitios que fundamentalmente sufren el impacto de los hidrocarburos de petróleo. La presencia de salinidad, metales tóxicos y otras sustancias puede limitar la tecnología o aumentar el costo relativo. Esta tecnología comprende la excavación del material de desecho utilizando desde pequeñas a grandes maquinarias de excavación, la carga del material de desecho en camiones, el transporte hasta una instalación comercial de incineración o tratamiento térmico. Alternativamente, las unidades móviles podrían ser utilizadas para viajar de un sitio a otro para tratar desechos. La zona de excavación es luego rellenada con material saneado de relleno de suelo, provista de nueva vegetación y restaurada. Esta práctica es normal en países tales como Estados Unidos, donde las unidades portátiles o las instalaciones fijas de incineración y tratamiento térmico están fácilmente disponibles. De acuerdo con la evaluación de las piscinas, la incineración y el tratamiento térmico no es una tecnología viable. El costo relativo de incineración y tratamiento térmico es generalmente elevado comparado con otras tecnologías.

En resumen, el aislamiento y/o la remediación institucional y estética no extraen los suelos contaminados y, por lo tanto, no alcanzan las metas de saneamiento de la remediación de los suelos contaminados para lograr concentraciones de TPH por debajo de los 1.000 ppm. Por consiguiente, se debe utilizar una tecnología que logre una activa reducción de las concentraciones tóxicas. De acuerdo con la evaluación de las piscinas de desechos y la consideración de la efectividad relativa y el costo de las tecnologías de remediación, la

extracción física del material del suelo contaminado en combinación con tratamientos adicionales, tales como la biorremediación es la tecnología de remediación preferida para lograr los objetivos de saneamiento.

## 2.2. Costos de unidades de remediación

Esta evaluación calcula los costos de remediación utilizando datos de proyectos análogos de remediación. En sus informes de la Inspección Judicial, ChevronTexaco se basa en los datos disponibles a través de Las mesas redondas federales sobre tecnologías de remediación de los Estados Unidos (U.S. Federal Remediation Technologies Roundtable, (FRTR) para obtener los costos de remediación estimados. Esta evaluación se basa en los mismos datos, y tiene en cuenta los proyectos de remediación que utilizaron una combinación de extracción de suelo y un tratamiento adicional para alcanzar las metas de saneamiento (Tabla 3). Todos los sitios del proyecto poseen fuentes de contaminación provenientes de productos del petróleo, y todos los proyectos seleccionados utilizaron la extracción física y el tratamiento adicional como tecnología de remediación para limpiar la contaminación de hidrocarburos en los suelos.

Tabla 3: Costos de proyectos de remediación similares a la remediación requerida en la Concesión

Nombre del proyecto	Año	Contaminante	Tecnología	Costo por unidad (2007 \$/m <sup>3</sup> )
Producción de abono en el sitio de la empresa Dabase Oil Products Co, Sitio Superfund, Cantonment, Florida	1994	BTEX, TPH	Biorremediación ex-situ	1078
Tratamiento de la tierra (soil pile) en UST en Fort Greely, Alaska	1997	BTEX	Biorremediación ex-situ	98
Tratamiento de la tierra en depósitos subterráneos de almacenamiento (UST) en la base de la fuerza aérea (AFB) de Lowry, Denver, Colorado.	1993	BTEX, TPH	Biorremediación ex-situ	55
Tratamiento de la tierra realizado por la agencia Bonneville Power Administration Ross Complex, Unidad operativa A, zona de almacenamiento de postes de madera, Vancouver, Washington	1996	HPAH	Biorremediación ex-situ	812
Tratamiento de la tierra en el sitio de la empresa Brown Wood Preserving Superfund Site, Live Oak, Florida	1990	PAH	Biorremediación ex-situ	162
Tratamiento de la tierra en el sitio de la empresa Scott Lumber Company Superfund Site, Alton, Missouri	1991	PAH	Biorremediación ex-situ	757
Biorremediación de la fase de lodo en el sitio French Limited Superfund Site, Crosby, Texas	1993	PAH	Biorremediación ex-situ	460

El costo para remediar los suelos contaminados de estos proyectos análogos varía entre \$55 y \$1078/m<sup>3</sup> de suelo contaminado, con un costo promedio de \$489 dólares estadounidenses/m<sup>3</sup> de suelo.

## 2.3. Limitaciones de la estimación de costo por unidad

La estimación del costo por unidad arriba presentada se basa en algunas premisas que pueden influir en la precisión del costo real una vez implementado. Algunas premisas pueden generar una sobrestimación del costo verdadero, y otras pueden generar una subestimación. Por ejemplo, la estimación del costo por unidad podría ser muy elevada debido a que se basa en proyectos realizados en Estados Unidos, en donde los costos de

mano de obra son superiores a las de Ecuador. La estimación de costos también podría ser muy alta debido a que ésta no considera específicamente el potencial ahorro en los costos de la realización de saneamiento en grandes escalas. Por otro lado, la estimación de costos podría ser muy baja debido a que ciertos costos de remediación podrían exacerbarse como resultado del tratamiento a gran escala que se requiere. Esto incluiría costos de construcción y mantenimiento de rutas, viviendas, asistencia médica, provisiones para los trabajadores, otra infraestructura, etc. El costo también podría ser muy bajo debido a que la estimación de costos no incluye los costos de tareas adicionales tales como el monitoreo postsaneamiento. Una detallada evaluación cuantitativa de éstas y otras consideraciones sería requerida para limitar más los errores en la estimación de costos. Independientemente de esto, la estimación de costos que aquí se muestra puede ser utilizada para calcular qué se necesita para realizar la remediación requerida en la Concesión.

### 3. COSTOS TOTALES DE LA REMEDIACIÓN

El costo total estimado para remediar el volumen de los suelos contaminados en todo el sitio se calcula multiplicando el volumen del suelo que requiere ser remediado (de la Sección 1.2) por el costo de remediación por unidad (Tabla 4). El costo total estimado de remediación del suelo contaminado es de \$1.852.000.000.

Tabla 4: Costo total estimado para la remediación del suelo

Volumen total del suelo que requiere ser remediado	Costo promedio para remediar los suelos contaminados	Costo total para remediar los suelos contaminados
3.788.000 m <sup>3</sup>	\$489 dólares estadounidenses/m <sup>3</sup>	\$1.852.000.000 dólares estadounidenses