

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Evaluación de Medidas de Remediación Aplicadas en Suelos
Contaminados con Hidrocarburos**

Caso de Estudio: Área de Entrenamiento de Extinción de Incendios

María Gabriela Moreno Pozo

Pablo Dávila, PhD., Director de Trabajo de Titulación

Trabajo de Titulación presentado como requisito para la obtención del título de
Ingeniera Ambiental

Quito, julio de 2015

Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**Evaluación de Medidas de Remediación Aplicadas en Suelos Contaminados con
Hidrocarburos**

Caso de Estudio: Área de Simulación de Incendios

María Gabriela Moreno Pozo

Pablo Dávila, PhD.,
Director de Trabajo de Titulación

Ródney Peñafiel, PhD.,
Director de Ingeniería Ambiental

Ximena Córdova, PhD.,
Decana de la Escuela de Ingeniería
Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, julio de 2015

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Nombre: María Gabriela Moreno Pozo

C.I: 1713728267

Fecha: Quito, julio de 2015

DECLARATORIA

Ana Julia, este y todos los esfuerzos son por ti mi amor.

Gracias por darme el título más importante de mi vida.

RESUMEN

Toda actividad humana genera impactos al medio ambiente ya sean estos directos o indirectos, en el caso de las áreas de entrenamiento para extinción de incendios o simuladores de incendios, comúnmente utilizados por los Cuerpos de Bomberos, los impactos debido a ésta actividad son directos e indirectos.

El objeto de esta investigación es el de analizar las medidas de remediación implementadas en un Simulador de Incendios que fue impactado durante años por actividades de entrenamiento de bomberos en las cuales se usaron combustibles; que al ser mal manejados durante los ejercicios contaminaron áreas que se convirtieron en pasivos ambientales que requirieron de la aplicación de medidas de remediación ambiental.

Se realizó un análisis de la información existente y mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica se logró calcular el volumen de suelo impactado así como una estrategia de intervención de las áreas contaminadas por cuadrantes. Finalmente, se comparó las actividades de remediación ambiental realizadas por el antiguo operador del Simulador de Incendios con las actividades propuestas como resultado de este trabajo, con la finalidad de medir la eficiencia de la remediación de suelos contaminados realizada en el sitio.

ABSTRACT

All human activities produce direct or indirect impacts to the environment, in the case of the firefighters training areas or fire simulators, commonly used by the Firefighter's Department, the impacts due to this activity are both direct and indirect.

The purpose of this research is to analyze the remediation measures implemented at a Fire Simulator impacted during years due to training activities in which fuel were used, and that as a consequence of bad fuel management during the training exercise the contaminated areas became environmental liabilities requiring the implementation of environmental remediation measures.

The existing information was analyzed and with the use of Geographic Information Systems the volume of impacted soil was calculated as well as a strategy developed for the intervention of the contaminated areas by quadrants. Finally, the remediation activities conducted by the former operator of the site were compared with the remediation activities proposed as a result of this work, with the purpose of measuring the efficiency of the remediation of contaminated soils conducted at the site.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	.....	6
ABSTRACT	.....	7
1. INTRODUCCIÓN	.....	14
1.1. Hipótesis.....	.....	15
1.2. Objetivo General .....	.....	16
1.3. Objetivos Específicos .....	.....	16
1.4. Área de estudio .....	.....	16
1.4.1. Topografía.....	.....	17
1.4.2. Hidrología superficial. ....	.....	17
1.4.3. Geología. ....	.....	17
1.4.4. Hidrología subterránea.....	.....	18
1.4.5. Pozos de monitoreo de agua subterránea.....	.....	19
1.4.6. Climatología. ....	.....	19
1.5. Descripción del Área de Entrenamiento de Extinción de Incendios.....	.....	20
2. REVISIÓN DE MARCO TEÓRICO	.....	26
2.1. Sitios Contaminados .....	.....	26
2.2. Fundamentos básicos del flujo bajo la superficie .....	.....	27
2.2.1. El Ciclo Hidrológico.....	.....	27
2.2.2. Flujo de Agua Subterránea y la Ley de Darcy. ....	.....	28
2.3. Destino y Transporte de los contaminantes en suelo .....	.....	29
2.3.1. Liberación de contaminantes. ....	.....	30
2.3.2. Transporte y destino de los contaminantes en suelo.....	.....	33
2.4. Métodos de caracterización de sitios contaminados .....	.....	34
2.4.1. Estudios Ambientales de Sitio, Fase I y Fase II.....	.....	34

2.4.2.	Monitoreo de Suelos.....	40
2.4.3.	Sistemas de Información Geográfica.....	42
2.5.	Selección de Medidas de Remediación.....	43
3.	METODOLOGÍA.....	44
3.1.	Revisión y Procesamiento de Información Existente.....	44
3.2.	Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	45
3.3.	Áreas a ser intervenidas.....	46
3.4.	Estimación del volumen de suelo contaminado.....	46
3.5.	Estimación versus Realidad.....	47
4.	RESULTADOS.....	48
4.1.	Ubicación de los sitios de monitoreo de suelos.....	48
4.2.	Resultados de Laboratorio.....	51
4.3.	Estimación de Suelos Contaminados.....	68
4.3.1.	Estimación de las profundidades de intervención en cada punto de monitoreo.....	68
4.3.2.	Estimación del área contaminada y volumen de suelo a remediar.....	69
4.4.	Comparación de medidas de remediación en relación a la actividad ya realizada y el presente estudio.....	77
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

Índice de Tablas

Tabla 1 - Unidades Estratigráficas del Área de Estudio (Komex Environmental Engineering, 2004)	18
Tabla 2 – Registros de Nivel Freático Pozo MW-04 (SYR Geociencia, 2012).....	19
Tabla 3 – Estimación de volumen de suelo a remediar.....	76
Tabla 4 – Áreas intervenidas y volumen de suelo remediado por el antiguo Operador del Simulador	79
Tabla 5 – Comparación de Realidad vs. Estimación.....	80
Tabla 6 – Estimación de áreas de intervención y volumen de suelo que requiere remediación	83

Índice de Figuras

Figura 1- Vista en Corte del Simulador / Vista desde el Oeste.....	25
Figura 2 – Vista en Corte del área del simulador y punto de descarga / Vista desde el Sur (Elaboración Propia)	25
Figura 3 – Esquema de Rutas de Movilización de Contaminantes (Gestión Calidad Consulting, 2009).....	30
Figura 4 – Pluma de contaminación afectada por dispersión y tipo de fuente.....	32
Figura 5 – Diagrama de Flujo Fases de Evaluación Ambiental de Sitio (Thompson, 2002, pág. 175).....	35
Figura 6 – Ubicación de puntos de muestreo de suelos / Imagen Satelital del Área de Estudio	49
Figura 7 – Ubicación de Puntos de Monitoreo y Topografía del Terreno en el Área de Estudio	50
Figura 8 – Visualización del área contaminada en superficie / Visualización de concentraciones de TPH – Límite máximo permisible 200 mg/kg (OM 404)	54
Figura 9 – Visualización del área contaminada a 0.5 mbs / Visualización de concentraciones de TPH – Límite máximo permisible 200 mg/kg (OM 404)	56
Figura 10 – Visualización del área contaminada a 1.0 mbs / Visualización de concentraciones de TPH – Límite máximo permisible 200 mg/kg (OM 404)	59
Figura 11 – Visualización del área contaminada a 2.0 mbs / Visualización de concentraciones de TPH – Límite máximo permisible 200 mg/kg (OM 404)	61
Figura 12 – Visualización del área contaminada a 4.5 mbs / Visualización de concentraciones de TPH – Límite máximo permisible 200 mg/kg (OM 404)	63
Figura 13 – Concentraciones de TPH en todas las profundidades analizadas (Vista desde el Norte)	65
Figura 14 – Concentraciones de TPH en todas las profundidades analizadas (Vista desde el Sur).....	66
Figura 15 – Concentraciones de TPH en todas las profundidades analizadas (Vista desde el Este)	67
Figura 16 – Cuadrantes de intervención para la aplicación de medidas de remediación / Profundidad 0.0 mbs	71
Figura 17 – Cuadrantes de intervención para la aplicación de medidas de remediación / Profundidad 0.5 mbs	72

Figura 18 – Cuadrantes de intervención para la aplicación de medidas de remediación / Profundidad 1.0 mbs	73
Figura 19 – Cuadrantes de intervención para la aplicación de medidas de remediación / Profundidad 2.0 mbs	74
Figura 20 – Cuadrantes de intervención para la aplicación de medidas de remediación / Profundidad 4.5 mbs	75
Figura 21 – Áreas Remediadas por el antiguo Operador del Simulador	78
Figura 22 – Áreas que requieren la aplicación de medidas de remediación.....	82

Índice de Fotografías

Fotografía 1 – Superficie de hormigón reforzado en Simulador (ADC&HAS, 2006).....	21
Fotografía 2– Superficie de hormigón reforzado en Simulador (ADC&HAS, 2006).....	21
Fotografía 3 – Estructura de hormigón reforzado separador agua / aceite del Simulador (ADC&HAS, 2006)	22
Fotografía 4 – Separador agua /aceite del Simulador (ADC&HAS, 2006)	22
Fotografía 5 – Vista sur del Simulador de Incendios (ADC&HAS, 2006).....	23
Fotografía 6 – Vista sur lado este del Simulador de Incendios (ADC&HAS, 2006).....	23
Fotografía 7 – Vista norte lado oeste del Simulador de Incendios (ADC&HAS, 2006).....	24
Fotografía 8 – Canal de recolección de efluentes de la plataforma del Simulador hacia el separador agua / aceite (ADC&HAS, 2006)	24
Fotografía 9 – EAS Fase II (QP – 18) (SYR Geociencia, 2012).....	38
Fotografía 10 - EAS Fase II (QP – 16 y QP – 21).....	39
Fotografía 11 - EAS Fase II (QP – 59).....	39
Fotografía 12 - EAS Fase II (QP – 60).....	40

1. INTRODUCCIÓN

Toda actividad humana genera impactos al medio ambiente ya sean estos directos o indirectos, en el caso de las áreas de entrenamiento para extinción de incendios o simuladores de incendios, comúnmente utilizados por el Cuerpo de Bomberos local, los impactos debido a ésta actividad son directos e indirectos, algunos de los cuales incluye la generación de residuos peligrosos (suelos contaminados, residuos de madera impregnados con hidrocarburos, agua contaminada con hidrocarburos, entre otros), impactos a la calidad del aire debido a gases producto de combustión y la potencial contaminación del subsuelo con residuos de hidrocarburos (Landázuri, 2014).

Las instalaciones de entrenamiento de los bomberos se construyen para realizar ejercicios y simulacros de incendio con la finalidad de capacitar a su personal en diferentes escenarios posibles. Este tipo de instalaciones se construyen siguiendo las normas establecidas por la National Fire Protection Association mediante Reglamento NFPA 1402 – Directrices para la Construcción de Centros de Formación de Servicios Contra Incendios (NFPA, 2012), sin embargo, en caso de estudio estas instalaciones no fueron construidas en cumplimiento con estas directrices, lo cual resultó en la construcción de áreas improvisadas destinadas para este fin y sin tomar en cuenta consideraciones ambientales (Landázuri, 2014).

La última versión publicada de la NFPA 1402 (NFPA, 2012) establece el uso de contenedores metálicos para la adecuación de áreas para entrenamiento de bomberos. Éstas son estructuras fabricadas específicamente para este propósito, que incluye por ejemplo el uso de gas licuado de petróleo (GLP) como fuente de combustible con el fin de asegurar un control adecuado durante el simulacro. Se recomienda el uso de GLP durante estos ejercicios con el fin de asegurar que no hay impactos directos al suelo

resultantes de estas prácticas, como ocurre con derrames de hidrocarburos. Sin embargo, en el presente caso de estudio, los simulacros de incendio incluían el uso de materiales de combustión (fuegos de clase A), tales como pallets de madera y combustibles (fuegos de clase B) como kerosene y gasolina con el fin de iniciar el fuego (Landázuri, 2014).

El presente estudio analiza el impacto ambiental directo como consecuencia de la actividad de entrenamiento de extinción de incendios en este tipo de sitios. Particularmente el impacto causado al suelo debido al uso de hidrocarburos y las medidas de remediación ambiental recomendadas a tomarse. Es importante mencionar que en la actualidad este sitio no está siendo utilizado, sin embargo, por encontrarse en abandono, requiere de procesos de remediación para evitar que se convierta en un potencial riesgo al agua subterránea y a la salud pública.

Vale la pena mencionar que en el área de estudio se han llevado a cabo estudios de identificación de pasivos ambientales y procesos de remediación ambiental durante los años 2012, 2013 y 2014; sin embargo, el objeto de esta tesis es determinar si dichos procesos han sido adecuados o si se requiere de trabajo adicional para garantizar que el área haya sido bien remediada.

1.1. Hipótesis

Se sospecha que la intervención del área de estudio durante la remediación ambiental realizada por el antiguo operador del sitio no fue la más adecuada debido a la falta de análisis al momento de interpretar los estudios de Evaluación Ambiental del Sitio Fase I y Fase II parte 1 y 2, previamente realizados.

1.2. Objetivo General

Evaluar las acciones de remediación de suelos contaminados aplicadas en un área de estudio con la finalidad de verificar que la intervención de áreas contaminadas haya sido adecuada.

1.3. Objetivos Específicos

- En base a información de monitoreo de suelos realizado en el área de estudio previamente, utilizar el software ArcGis 9.3 como herramienta para interpolar los datos y poder visualizar e identificar adecuadamente las áreas de suelo impactadas.
- Definir una metodología adecuada de delimitación e intervención de áreas contaminadas, que maximice el tratamiento del suelo contaminado.
- Determinar el volumen de suelo impactado, tomando en cuenta los resultados de laboratorio y de interpolación.
- Comparar el volumen de suelo que requiere remediación estimado mediante la metodología de definición de áreas contaminadas propuesta con el volumen de suelo efectivamente remediado durante la intervención realizada en el área de estudio así como los costos asociados.

1.4. Área de estudio

El área de estudio está ubicada en Quito a 2803 ± 5 metros sobre el nivel del mar (msnm). La ubicación exacta del área de estudio, así como los responsables del sitio, no pueden ser revelados en la presente investigación debido a acuerdos de confidencialidad firmados con el operador, mediante los cuales se autoriza el uso y publicación de la información contenida en este documento siempre que se mantenga al responsable en el anonimato.

1.4.1. Topografía.

El área de estudio está ubicada dentro de una zona de depresión topográfica norte – sur entre el volcán Pichincha al oeste y una línea de zona norte – sur de las colinas (Batán – La Bota) al este, que fueron elevadas por el Sistema de Fallas de Quito (Komex Environmental Engineering, 2002).

1.4.2. Hidrología superficial.

El área de estudio está influenciada por agua de precipitación que recorre el suelo superficialmente a modo de escorrentía desde el oeste a través de varias quebradas provenientes del volcán Pichincha, y desde el este a través de quebradas provenientes de la Cresta Batán – La Bota (Komex Environmental Engineering, 2002). El agua de escorrentía fluye hacia sistemas que descargan en dirección de la quebrada de Carcelén, posteriormente hacia el río Pusuquí y finalmente hacia el río Las Monjas (Komex Environmental Engineering, 2002). El agua que entra hacia el área en mención fluye en dirección sur hacia colectores de agua lluvia que descargan en la quebrada El Batán y finalmente hacia el Río Machángara (Komex Environmental Engineering, 2002).

1.4.3. Geología.

El área de estudio está ubicada en la porción central del Valle Interandino (por sus siglas: VIA) al norte de Ecuador. El VIA tiene 25 km de ancho y 300 km de largo, orientado en dirección NNE – SSO (Komex Environmental Engineering, 2002). La porción central del VIA está situada a elevaciones de entre 2000 y 2800 msnm, y está rodeada por las sierras orientales y occidentales de los Andes. En las áreas vecinas al sitio de entrenamiento de bomberos se pueden identificar las siguientes unidades estratigráficas:

Tabla 1 - Unidades Estratigráficas del Área de Estudio (Komex Environmental Engineering, 2004)

Unidad Estratigráfica	Grosor aproximado	Edad	Litología
Depósito Lacustres (Formación La Carolina)	15 – 60 metros	Haloceno	Tefra y sedimentos aluviales y coluviales depositados en lagos
Formación Cangahua	60 metros	Cuaternario	Ceniza volcánica, tufo y piedra pómez
Formación Machángara	100 metros	Pleistoceno	Lavas andesíticas y tufo

1.4.4. Hidrología subterránea.

Más allá del valle de Quito existe una cuenca de agua subterránea limitada por la cordillera Real al este, la cordillera Occidental al oeste, por el área de Mojanda y el área de Cayambe, al norte, y por las montañas Iliniza, Santa Cruz, Rumiñahui, volcán Cotopaxi y Quilindaña al sur (Komex Environmental Engineering, 2002). En las inmediaciones del área de estudio, el agua subterránea se produce en la formación Cangagua y Pleistoceno volcán - sedimentos y lavas de la Formación Machángara. Los acuíferos se recargan a través de fracturas en las laderas del volcán Pichincha al oeste y las colinas del mismo al este, y la gestión de los Ríos San Pedro, Machángara, Monjas y Guayllabamba (Komex Environmental Engineering, 2002).

En el área en mención, el nivel freático del Acuífero Norte de Quito está presente a ~ 220 metros bajo la superficie del suelo y la dirección del flujo es hacia el norte (Komex Environmental Engineering, 2004).

1.4.5. Pozos de monitoreo de agua subterránea.

El flujo de agua subterránea en el área de estudio se dirige hacia el norte – noroeste (Komex Environmental Engineering, 2005). El piezómetro más cercano al área de estudio, está identificado con el código MW-04A. A continuación se presentan los registros de nivel freático medidos en el piezómetro mencionado.

Tabla 2 – Registros de Nivel Freático Pozo MW-04 (SYR Geociencia, 2012)

ID Pozo	Fecha de Medición de Nivel Freático	Profundidad de Nivel Freático (MBCP)*	Elevación de Nivel Freático (MSNM)**
MW-04A	06/19/04	51.22	2759.30
	03/17/05	51.03	2759.49
	04/21/05	51.05	2759.47
	05/30/06	51.44	2759.08
	10/23/06	51.67	2758.85
	06/21/07	51.61	2758.84
	01/16/08	51.61	2759.01
	08/04/08	51.21	2759.31
	11/28/08	50.98	2759.54
	06/23/09	50.46	2760.06
	12/15/09	50.48	2760.04
	07/14/10	50.26	2760.26
	23/11/10	50.11	2760.41
	06/06/11	50.10	2760.42
	07/06/12	49.59	2760.93
11/29/12	49.46	2761.06	

*MBCP: Metros Bajo Cabezal del Pozo
 **MSNM: Metros Sobre Nivel del Mar

Es importante conocer el nivel freático del área de estudio con la finalidad de evaluar el riesgo de que la contaminación existente pueda afectar el acuífero, lo cual podría afectar la tecnología de tratamiento escogida.

1.4.6. Climatología.

El área de estudio recibe en promedio, ~aproximadamente 800 mm de lluvia al año (Komex Environmental Engineering, 2002). Los meses en los cuales mayor cantidad de lluvia ha sido registrada en el área de estudio están entre Noviembre y Marzo. Es importante conocer estos datos pues muchas veces las estaciones lluviosas afectan a la

variación del nivel freático (Catalunya, Universidad Politécnica de, 2012). En áreas contaminadas como es el caso del sitio de estudio la variación del nivel freático podría afectar a la calidad del agua subterránea haciendo más difícil la intervención del sitio y la aplicación de medidas de remediación ambiental.

1.5. Descripción del Área de Entrenamiento de Extinción de Incendios

El sitio del simulador de bomberos en estudio fue construido en el año 2006 y ha sido utilizado por el cuerpo de bomberos para llevar a cabo actividades de entrenamiento. Entre las actividades, están el rociar el simulador (una estructura cilíndrica metálica) con combustible (Kerosén y gasolina) para iniciar fuego, para posteriormente realizar el entrenamiento al apagar el mismo. Las actividades de entrenamiento se llevan a cabo tres veces al año y en cada actividad se utiliza aproximadamente de 300 a 400 galones de combustible. El simulador está asentado sobre una superficie de contención de hormigón reforzado, misma que está conectada (con una válvula de cierre) a un separador de agua / aceite que descarga el agua separada a una zona abierta con césped a aproximadamente 30 m en dirección noroeste. Cuando el entrenamiento era llevado a cabo, las aguas residuales eran recogidas desde el Separador de Agua / Aceite mediante el uso de un camión aspirador y eliminadas por una empresa de gestión ambiental (Hazwat CIA. Ltda.), muchas veces dicha actividad no era realizada por lo que las aguas residuales eran descargadas mediante el uso de una válvula hacia el área verde al oeste del simulador (Landázuri, 2014).

En el área aledaña al simulador se pudo observar áreas contaminadas con combustible alrededor del tanque en mención, extendiéndose la zona afectada entre 5 a 10 metros a la redonda, lo cual indica la magnitud de la potencial contaminación presente. Adicionalmente, se pudo observar un color amarillo en la vegetación alrededor del sitio,

así como también en el punto de descarga del separador de agua / aceite. Generalmente, la coloración amarillenta en la vegetación indica muerte de la misma por efectos fitotóxicos (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2011), lo cual nos lleva a suponer que el área ha sido impactada directamente por la presencia de químicos.

A continuación se incluye un registro fotográfico de la construcción del simulador en mención:



Fotografía 1 – Superficie de hormigón reforzado en Simulador (ADC&HAS, 2006)



Fotografía 2– Superficie de hormigón reforzado en Simulador (ADC&HAS, 2006)



Fotografía 3 – Estructura de hormigón reforzado separador agua / aceite del Simulador (ADC&HAS, 2006)



Fotografía 4 – Separador agua /aceite del Simulador (ADC&HAS, 2006)

Las fotografías No. 1 y 2 indican la construcción de la plataforma de hormigón reforzado sobre la cual se asentaba el simulador de incendios. Las fotografías No. 3 y 4 indican la construcción del separador de agua / aceite localizado debajo de la plataforma sobre la cual se asienta el simulador.



Fotografía 5 – Vista sur del Simulador de Incendios (ADC&HAS, 2006)



Fotografía 6 – Vista sur lado este del Simulador de Incendios (ADC&HAS, 2006)



Fotografía 7 – Vista norte lado oeste del Simulador de Incendios (ADC&HAS, 2006)



Fotografía 8 – Canal de recolección de efluentes de la plataforma del Simulador hacia el separador agua / aceite (ADC&HAS, 2006)

No se cuenta con información específica del diseño del Simulador de Incendios por lo que las figuras presentadas a continuación son esquemas (no a escala) con la finalidad de

ilustrar la configuración del simulador de incendios. Ambos diseños se basan en mi conocimiento del sitio y participación en la construcción de los mismos.

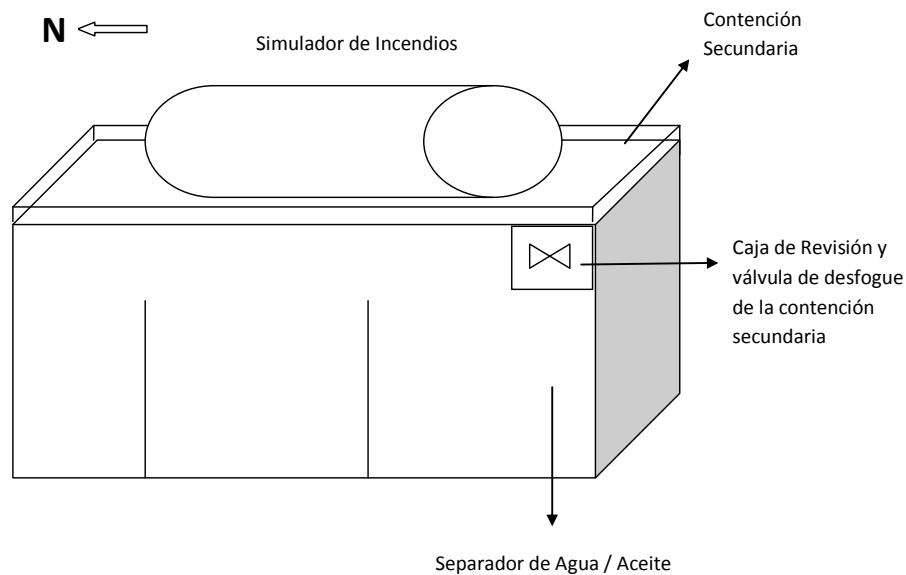


Figura 1- Vista en Corte del Simulador / Vista desde el Oeste

(Elaboración Propia)

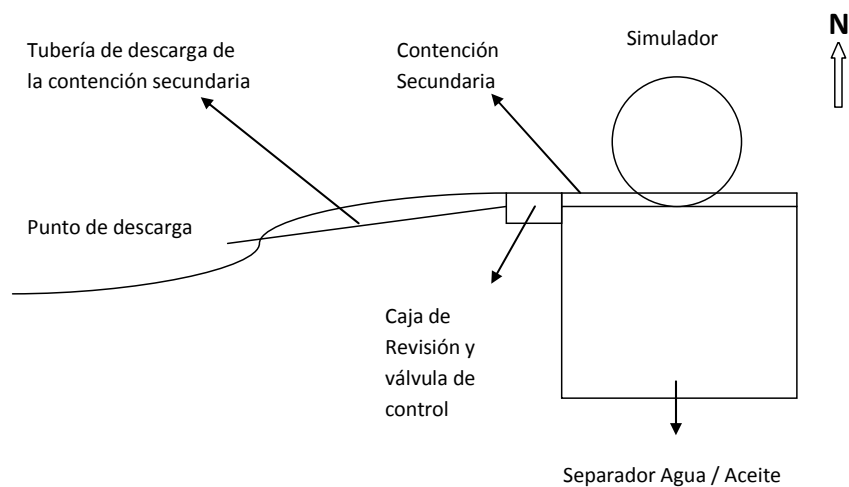


Figura 2 – Vista en Corte del área del simulador y punto de descarga / Vista desde el Sur (Elaboración Propia)¹

¹ Las Figuras 1-1 y 1-2 son de elaboración propia en base al conocimiento del sitio e inspección visual durante la construcción del Simulador y desmantelamiento del mismo. Ambas figuras no han sido hechas a escala en virtud de que no se ha podido consultar los as builts o diseños del sitio.

2. REVISIÓN DE MARCO TEÓRICO

2.1. Sitios Contaminados

La existencia de sitios contaminados abandonados representa un riesgo importante para el medio ambiente y la salud humana. Un escenario típico es la migración de contaminantes desde sitios contaminados a través del suelo hacia el agua superficial y subterránea y que más tarde puede ser utilizada para consumo humano y/o de animales (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 28). Muchos de estos sitios han sido sometidos a años de descargas no controladas y se han visto afectados con sustancias contaminantes. Tratar de definir exactamente el problema de contaminación en estos sitios y de delinear la extensión de la contaminación puede requerir de mucho tiempo y recursos, especialmente considerando que en muchos casos se presentan escenarios ambientales complicados, particularmente por estar afectados por diferentes contaminantes. , razón por la cual es importante implementar medidas de gestión ambiental para evitar que dichos contaminantes sean descargados de manera inadecuada (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 30).

En Ecuador, el Ministerio del Ambiente y las Autoridades Ambientales Competentes a nivel de Gobiernos Autónomos Descentralizados y Municipios, hacen un esfuerzo por intentar regular toda actividad industrial, urbana o artesanal que pueda generar contaminación al medio ambiente y que pueda generar afectación a la salud humana. Se han implementado diferentes mecanismos para identificar a los regulados que requieren de monitoreo ambiental y de la implementación de planes de manejo ambiental o afines. Con la publicación del Acuerdo Ministerial 068 y su posterior reforma a través del Acuerdo Ministerial 006, se establece la obligatoriedad de que toda actividad económica obtenga una Licencia Ambiental a través de diferentes instrumentos dependiendo de la

categorización de la actividad económica. Con la finalidad de mantener en regla todos los permisos que habilitan a dicha actividad económica, se requiere del registro de la misma a través del Sistema Único de Información Ambiental (SUIA) mediante el cual se determina el tipo de estudio que debe ser presentado al Ministerio del Ambiente o Autoridad Ambiental Competente según sea el caso, en el cual se identifican las actividades que pueden causar impacto ambiental y social, y se desarrollan estrategias de control o mitigación del daño ambiental y la implementación de un programa de monitoreo ambiental. Estos mecanismos permiten a la Autoridad Ambiental Competente establecer medidas de control sobre los regulados e identificar posibles pasivos ambientales y eventos de contaminación que ameriten la implementación de procesos de remediación ambiental y subsanamiento (Ministerio del Ambiente, 2014, pág. 103)

2.2. Fundamentos básicos del flujo bajo la superficie

2.2.1. El Ciclo Hidrológico.

En el subsuelo el movimiento de contaminantes depende del flujo de agua subterránea en el acuífero, mismo que está ligado directamente al ciclo hidrológico. El ciclo hidrológico comienza con el agua que cae sobre la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve o granizo, de donde se puede generar escorrentía superficial llegando eventualmente a cuerpos de agua superficiales (Por ejemplo lagos o ríos), o puede infiltrarse a través del suelo y alimentar acuíferos de agua subterránea. El agua subterránea genera flujos a través de la porosidad del suelo desde sitios con mayor potencial hidráulico hacia sitios con menor potencial hidráulico, pudiéndose generar vertientes o descargas hacia ríos y océanos (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 163).

Los suelos, por los cuales se infiltra el agua (y puede acarrear contaminantes), pueden ser homogéneos cuando las propiedades del material no varían dentro de la capa, por lo tanto su permeabilidad es la misma. Puede ser heterogéneo cuando las propiedades del material en el estrato son diferentes (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 163). Por otro lado, se considera un estrato isotrópico como aquel en el cual las propiedades del material no varían con la orientación dentro de la capa, es así que una capa de arena o grava por ejemplo puede tener mayor conductividad hidráulica vertical que horizontal (suelo anisotrópico), mientras que una capa de arcilla va a tener igual permeabilidad en todas las direcciones (suelo isotrópico) (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 163)

2.2.2. Flujo de Agua Subterránea y la Ley de Darcy.

Para definir el flujo de agua subterránea se pueden considerar dos escenarios: flujo a través de un medio poroso y el flujo a través de un medio fracturado (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 180). El acuífero presente en el área de estudio corresponde a un acuífero de flujo por medio poroso (Komex Environmental Engineering, 2004).

El flujo de agua subterránea a través de un medio poroso está determinado por la carga hidráulica, misma que puede ser entendida como la suma de la carga de presión y la carga de elevación. La diferencia de carga hidráulica entre un punto y otro produce el flujo de agua subterránea (Masters & Ela, 2008, pág. 245)

El flujo de agua subterránea se describe a través de la Ley de Darcy para flujos a través de medios porosos. La ley de Darcy es aplicable para flujos laminares; puede producir errores cuando se considera para flujos turbulentos o cuando el agua fluye a través de un material granulado extremadamente fino como la arcilla coloidal, y es posible usarse únicamente en

medios completamente saturados, dependiente de la temperatura (Masters & Ela, 2008). La Ley de Darcy se expresa de la siguiente manera:

$$Q = KA \left(\frac{dh}{dL} \right) \quad 2.2.2-1$$

Donde:

Q = Velocidad de flujo (m³/día).

K = Conductividad hidráulica, o coeficiente de permeabilidad (m/día)

A = Sección del Flujo (m²)

$\left(\frac{dh}{dL} \right)$ = Gradiente hidráulico

La Ley de Darcy muestra que el flujo es directamente proporcional a la conductividad hidráulica del medio (K) y a la sección del flujo (A) (Masters & Ela, 2008).

En un acuífero el gradiente hidráulico se define como la pendiente del nivel freático, medida en la dirección en que ésta es máxima (Masters et al., 2008), tomando en cuenta que el nivel freático es el límite superior de la zona de saturación en un acuífero (Geológica, Ruta, 2015)

2.3. Destino y Transporte de los contaminantes en suelo

Una vez que los contaminantes han sido liberados al medio, su movimiento depende de diferentes factores. La Figura 3-1 ilustra el movimiento de contaminantes en el medio superficial y atmosférico.

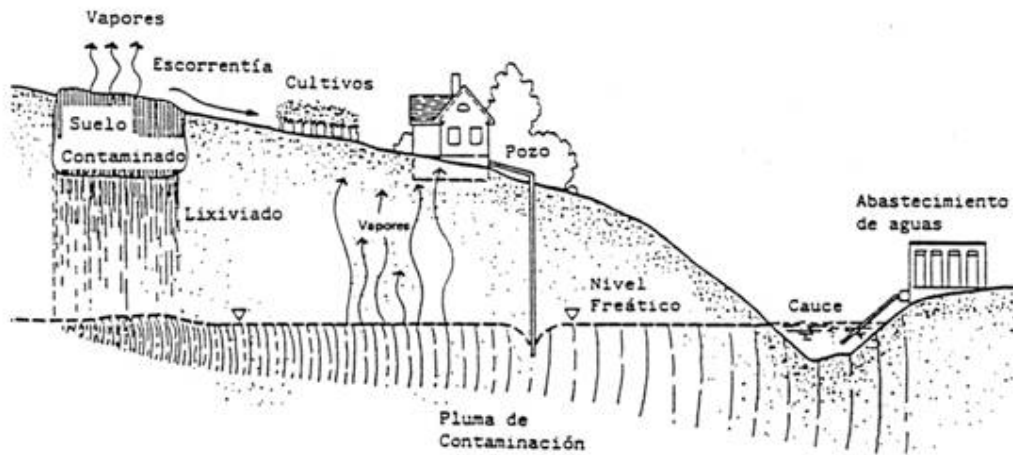


Figura 3 – Esquema de Rutas de Movilización de Contaminantes (Gestión Calidad Consulting, 2009)

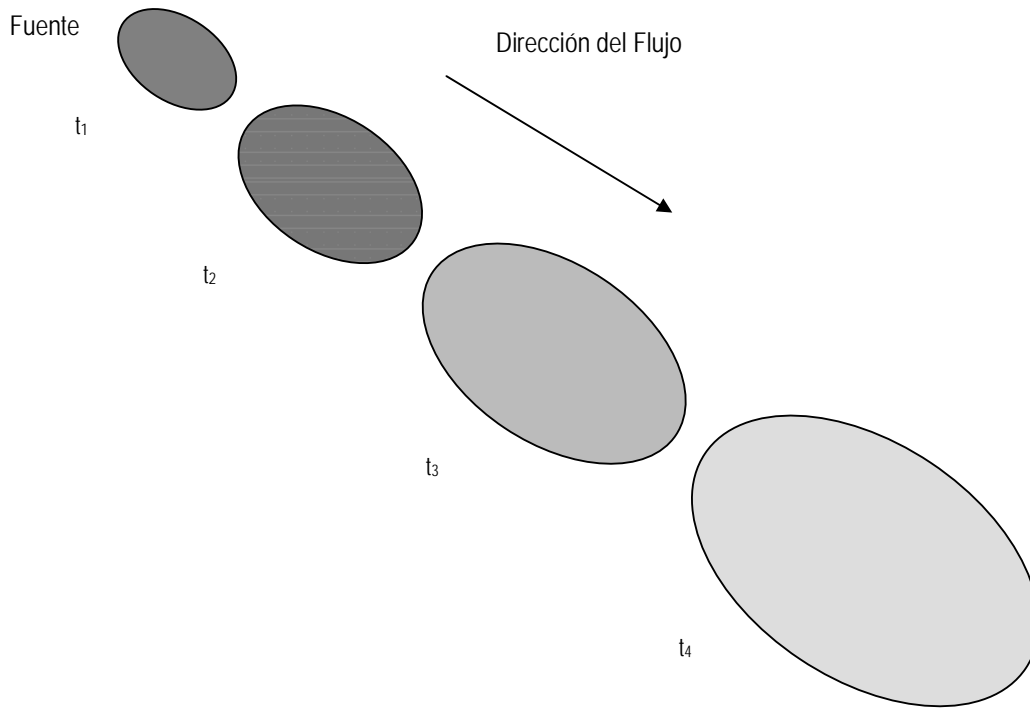
La definición de los patrones de migración de los contaminantes en el medio requiere de la interacción de diferentes disciplinas que podrían incluir geología, mecánica de fluidos, química, física, hidrología, hidrogeología y biología (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 149)

2.3.1. Liberación de contaminantes.

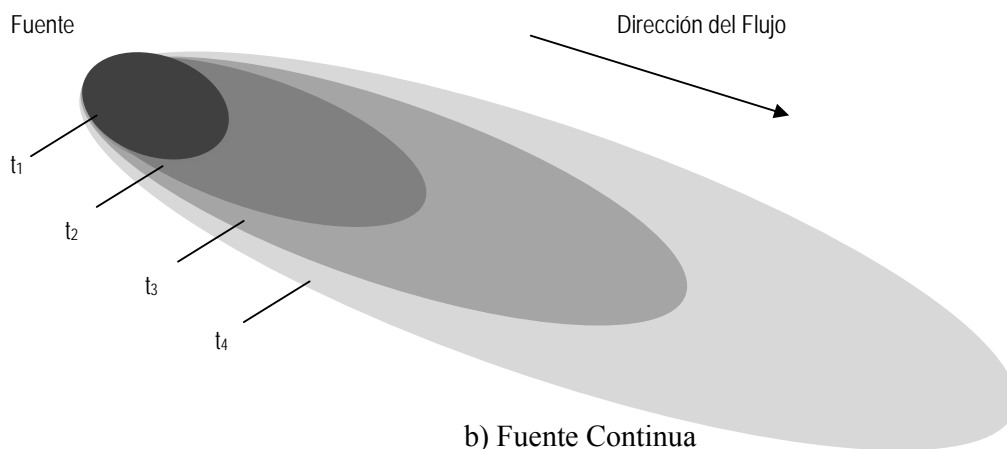
Cuando un contaminante entra en un medio poroso saturado instantáneamente en una sola ubicación y con una concentración conocida, la masa de agua junto con los contaminantes disueltos, se conoce como ‘slug’ y la ubicación de descarga es conocida como ‘fuente puntual’, la concentración de los contaminantes descenderá a medida que el slug migre a través de la formación como resultado de la dispersión, lo cual provocará que los contaminantes se disuelvan en un mayor volumen de agua, logrando así una dilución de la contaminación de los contaminantes (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 176).

También puede existir una liberación de contaminantes constante a un área por ejemplo en el caso de un tanque de combustible subterráneo que presente fugas, lo cual es conocido como fuente continua (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 177).

A continuación se ilustran los dos tipos de liberaciones de contaminantes descritos anteriormente:



a) Fuente Puntual



b) Fuente Continua

Nota: Las áreas más oscuras muestran mayor concentración de contaminantes

Figura 4 – Pluma de contaminación afectada por dispersión y tipo de fuente

Elaboración propia. Fuente: (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 179)

En cualquiera de los dos casos la distribución y extensión de los contaminantes migrando a través de un medio es conocido como **“Pluma de Contaminación”** (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 178).

2.3.2. Transporte y destino de los contaminantes en suelo.

Los contaminantes líquidos liberados en el suelo se moverán a través del mismo, ya sea por acción de arrastre del agua y variación de velocidad de flujo debido a la geometría e interconexión de los poros, conocido como proceso de dispersión (disolución de contaminantes en el agua), y por procesos de advección. En ausencia de movimiento de agua subterránea, los contaminantes en el suelo tenderán a moverse en todas direcciones debido al proceso de difusión debido a una diferencia de concentración (de mayor a menor concentración de contaminantes) (Masters & Ela, 2008, pág. 252)

La pluma de contaminación normalmente sigue trayectorias irregulares a medida que ésta se desplaza por el medio poroso. En algunas partes encuentra espacios vacíos en el medio poroso por lo que logra una velocidad mayor, en otros casos, la pluma de contaminación debe bordear las partículas de suelo produciendo una dispersión de la contaminación en todas las direcciones, teniendo como consecuencia una diferencia de velocidad de flujo de la pluma a través del medio (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 177).

Los procesos de dispersión molecular y difusión están dominados por la Ley de Fick, la misma que establece que el flujo másico difusivo por unidad de área y tiempo es proporcional al gradiente de concentraciones por unidad de área y tiempo (Catalunya, Universidad Politécnica de, 2012) , expresado de la siguiente manera:

$$J_d = -D_d \frac{\partial C}{\partial x} \quad 2.3.2-1$$

En donde:

J_d = Flujo másico por difusión molecular

D_d = Coeficiente de difusión molecular

$-\partial C/\partial x$ = Gradiente de concentraciones

Se debe considerar que a medida que se mueven los contaminantes por un medio poroso, existe una compleja interacción química y microbiológica entre el contaminante y el suelo, que puede afectar el destino de los contaminantes o atenuar su concentración.

2.4. Métodos de caracterización de sitios contaminados

2.4.1. Estudios Ambientales de Sitio, Fase I y Fase II.

Una evaluación ambiental de sitio es un reporte preparado para identificación de potenciales o existentes pasivos ambientales. Este análisis es comúnmente conocido como EAS y típicamente investiga tanto las condiciones del subsuelo como las mejoras físicas realizadas a la propiedad.

Una evaluación ambiental del sitio es una investigación sistemática que permite caracterizar, evaluar y remediar los pasivos ambientales ocurridos por actividades pasadas o actuales en un determinado sitio de estudio.

Una EAS típicamente se conduce por etapas, a continuación se describe el flujo normal para las tres fases y los criterios que determinan la continuidad de las mismas:

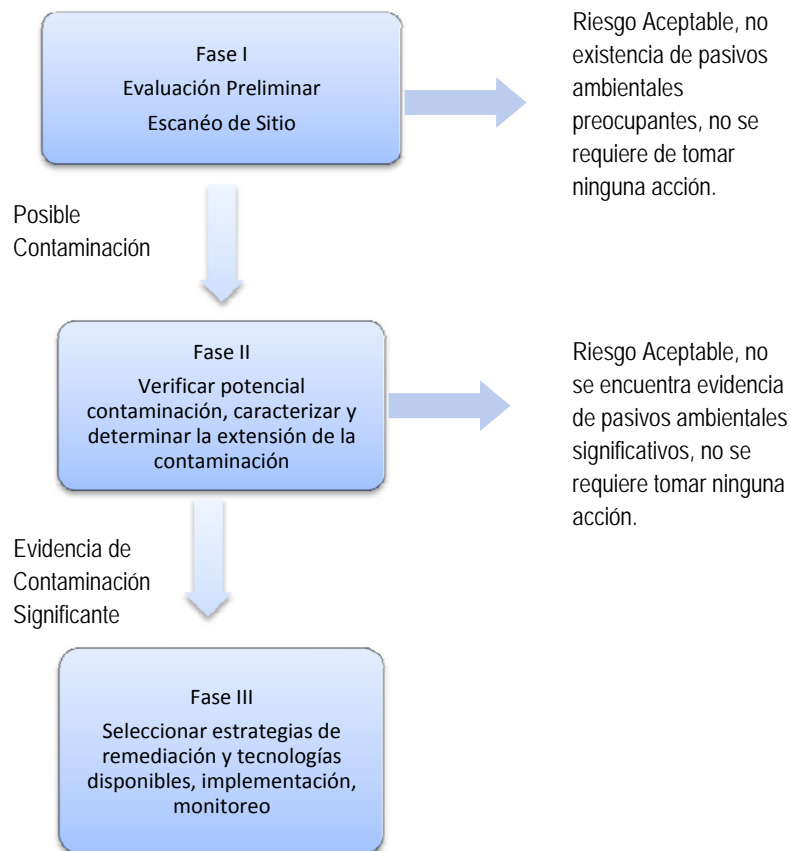


Figura 5 – Diagrama de Flujo Fases de Evaluación Ambiental de Sitio (Thompson, 2002, pág. 175)

La EAS Fase I generalmente considera los primeros pasos del procedimiento de diligencia ambiental. Los estándares para realizar EAS Fase I han sido promulgados por la EPA y son basados en las Normas ASTM E1527-05. La investigación de un sitio puede incluir: revisión de información histórica de actividades realizadas en el sitio y adyacentes a la propiedad, inspección del sitio en busca de condiciones que podrían presentar potencial

contaminación, definición de residuos de químicos y combustibles dentro de las áreas investigadas, identificación de materiales de construcción que contengan asbestos y otros contaminantes, inventario de sustancias peligrosas almacenadas o usadas en el sitio, evaluación de hongos y mohos, fauna y vegetación (Thompson, 2002, pág. 176).

El EAS Fase II por otro lado es una investigación a detalle que incluye la recolección de muestras de suelo, agua subterránea, agua superficial y la recolección de materiales de construcción para realizar un análisis cuantitativo de posibles contaminantes, análisis de riesgo y evaluación de los parámetros de calidad del aire dentro y fuera de las áreas investigadas. Esta investigación se realiza normalmente cuando una Fase I ha mostrado evidencias de potenciales contaminantes en el sitio. Las sustancias más comúnmente analizadas son los hidrocarburos de petróleo, metales pesados, pesticidas, solventes, asbestos y mohos (Thompson, 2002, pág. 181)

El principal objetivo de una Fase II es verificar la presencia de contaminantes en el sitio, caracterizar los contaminantes presentes y delimitar la extensión de la contaminación. La Fase II a su vez se la realiza por etapas, tomando en cuenta que no es posible determinar la extensión de la contaminación con un solo programa de monitoreo. Es así que dependiendo de los resultados obtenidos durante la realización de la Fase I y de la observación directa en el sitio acompañada de la experiencia del investigador, se diseña un programa inicial de monitoreo de suelo, instalación de pozos de agua subterránea y monitoreo de calidad de agua superficial y subterránea.

El monitoreo de suelo es entonces realizado siguiendo procedimientos estándares y con la asistencia de equipos especializados de monitoreo in situ. Un equipo comúnmente utilizado en campo para medir in situ la concentración de compuestos orgánicos volátiles en una

muestra de suelo, es un Detector Fotoionizante (PID por sus siglas en inglés); este equipo permite tener una medida inicial del estado de los contaminantes de hidrocarburos en campo y definir la continuidad de la perforación y selección de las muestras que serán enviadas al laboratorio.

Un detector de fotoionización es un tipo de detector de gases, utilizado especialmente para medir compuestos orgánicos volátiles. Es un detector de iones que utiliza fotones de alta energía, por lo general en la gama del ultravioleta (UV), para romper las moléculas en forma de iones positivamente cargados. Cuando los compuestos llegan al detector son bombardeados por fotones de alta energía y son ionizados cuando las moléculas absorben luz UV de alta energía. La luz UV excita las moléculas, dando como resultado la pérdida temporal de electrones de las moléculas y la formación de iones con carga positiva. El gas adquiere carga eléctrica y los iones producen una corriente eléctrica, que es la señal de salida del detector. Cuanto mayor sea la concentración del componente, más iones se producirán, y mayor será la corriente. La corriente se amplifica y se muestra en un amperímetro. Los iones se recombinan de nuevo con los electrones después de pasar el detector para volver a formar las moléculas originales (Carburos Metálicos Grupo Air Products, 1996)

Durante los últimos 10 años, diferentes estudios han sido realizados en el área de estudio debido a que esta instalación forma parte de una entidad bajo la supervisión de Multilaterales Financieras Internacionales. Las evaluaciones ambientales del sitio, incluyendo las del área de entrenamiento de bomberos comenzaron en el año 2002 y finalizaron el año 2013. Los estudios de Evaluación Ambiental del Sitio fueron realizados en cumplimiento con Normas ASTM. El objetivo de realizar este tipo de estudios era

identificar las Condiciones Ambientales Reconocidas (CAR)² y estimar la extensión de la contaminación en las áreas afectadas con el fin de definir adecuadamente acciones de remediación y recuperación de suelos y agua si fuera necesario (SYR Geociencia, 2012)

En el área del simulador de bomberos, dos actividades de evaluación del impacto ambiental fueron llevadas a cabo: Evaluaciones Ambientales del Sitio Fase I y Fase II, mismas que fueron realizadas durante los años 2012 y 2013. Durante las Evaluaciones Ambientales del Sitio Fase II (Parte 1 y Parte 2), un programa de monitoreo ambiental fue realizado, el cual incluyó muestreo de suelos.



Fotografía 9 – EAS Fase II (QP – 18) (SYR Geociencia, 2012)

² De acuerdo a la Norma ASTM 1527-13 una Condición Ambiental Reconocida es la presencia o posible presencia de sustancias peligrosas o productos de hidrocarburos en una propiedad debido a una liberación al ambiente, bajo condiciones que indiquen liberación al ambiente o bajo condiciones que indiquen riesgo de futura liberación al ambiente.



Fotografía 10 - EAS Fase II (QP – 16 y QP – 21)
(SYR Geociencia, 2012)



Fotografía 11 - EAS Fase II (QP – 59)
(SYR Geociencia, 2013)



Fotografía 12 - EAS Fase II (QP – 60)

(SYR Geociencia, 2013)

Finalmente, la EAS Fase III comprende la aplicación de acciones correctivas, medidas de mitigación y control y acciones de remediación de los pasivos ambientales identificados y caracterizados durante la Fase II. La selección de los métodos de remediación aplicables va a depender de cada caso de estudio por lo que no se han fijado estándares para esta fase. Es importante que se implemente un programa de monitoreo posterior a la implementación de las medidas de remediación que se hayan aplicado con la finalidad de certificar la limpieza realizada y garantizar que los riesgos han sido controlados (Thompson, 2002, pág. 183).

2.4.2. Monitoreo de Suelos.

El método más comúnmente utilizado para la caracterización de sitios contaminados se basa en la perforación, muestreo y monitoreo in situ y análisis de laboratorio de los suelos de los cuales se sospecha que tienen contaminación. Adicionalmente, cuando se sospecha de eventos de contaminación importantes o de fuentes continuas de contaminación en un

sitio, es común la instalación de pozos de monitoreo de agua subterránea para evaluar la migración de contaminantes hacia el acuífero (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 960).

Es necesaria la aplicación de métodos invasivos de caracterización de sitios contaminados pues da una idea clara de los tipos de contaminantes presentes y sus respectivas concentraciones, lo cual permite definir de mejor manera una estrategia tanto de delimitación de la pluma de contaminación como de procesos de remediación posteriores.

El muestreo que se llevo a cabo durante los Estudios de Evaluación Ambiental de Sitio Fase II (Parte 1 y Parte 2) incluyó el uso de un barreno manual hasta una profundidad de 5 metros bajo el nivel de la superficie. Durante cada una de las perforaciones realizadas se registraron características litológicas cada 50 cm, y con la finalidad de detectar la presencia de hidrocarburos de petróleo, se utilizó un detector de fotoionización (PID) en cada una de las muestras colectadas (SYR Geociencia, 2012).

El detector de fotoionización de marca Mini - RAE 2000 utilizado en estas investigaciones fue equipado con una lámpara de 10,6 eV y era capaz de determinar concentraciones de COV de 0 a 10000 partes por millón (ppm). Para asegurar que los datos eran representativos de las condiciones reales de campo, el PID se calibró diariamente con una calibración de aire / isobutileno fresca de dos niveles (SYR Geociencia, 2012). El propósito de utilizar esta herramienta en el campo fue asegurarse de que las muestras de suelos tomadas para análisis de laboratorio proporcionarían la información adecuada para delinear la contaminación en el área de estudio. Como se mencionó anteriormente, el uso de PID en campo es una herramienta útil que permite tener una idea de las concentraciones de COVs in situ y que por lo tanto provee al investigador con elementos para la toma de

decisiones en cuanto a la continuidad de la perforación y la selección de muestras que son enviadas al laboratorio para caracterización cuantitativa (SYR Geociencia, 2012).

En el caso de los Estudios de Evaluación Ambiental del Sitio Fase II Parte 1 y Parte 2, el uso del PID facilitó la selección de las muestras que fueron enviadas al laboratorio, de forma que, de cada sitio monitoreado se escogían las muestras de profundidades que mostraban mayor concentración de COVs y la muestra de la profundidad en donde las concentraciones de COVs se mostraban atenuadas únicamente. Este procedimiento fue adoptado con la finalidad de garantizar información suficiente que permita delinear verticalmente la migración de los contaminantes en cada punto de monitoreo analizado (SYR Geociencia, 2012).

2.4.3. Sistemas de Información Geográfica.

Los sistemas de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés) son utilizados por los investigadores como una herramienta útil para unir los datos obtenidos en campo a los mapas o figuras, con la finalidad de facilitar la visibilidad de área y subterránea de la extensión de la contaminación en suelos y agua subterránea. La concentración en un punto determinado de muestreo de un determinado contaminante es un ejemplo de cómo la información levantada durante la campaña de campo y laboratorio puede ser geográficamente referenciada y relacionada con objetos e infraestructura. Adicionalmente, GIS es utilizado también como una herramienta de modelamiento, por lo tanto permite utilizar la información obtenida en campo mediante monitoreo y análisis de laboratorio, para interpolar los resultados de concentraciones de contaminantes en el área afectada. Una variedad de modelos de contorno que utilizan diferentes algoritmos son utilizados para estimar los valores en una maya de intervalos regulares tomando como referencia los datos obtenidos de puntos de monitoreo en ubicaciones irregulares.

La combinación de los resultados del monitoreo obtenido en campo junto con los modelos que pueden ser obtenidos a través de GIS proveen a los investigadores de una herramienta que facilita la comprensión del sitio, la extensión de la contaminación y la toma de decisiones con respecto a definir alternativas de remediación (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 966).

2.5. Selección de Medidas de Remediación

Los objetivos de remediación en Ecuador están establecidos por el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario, Anexo 2 Tabla 3 y los criterios de remediación establecidos en el mismo dependen del uso posterior que se le vaya a dar al sitio recuperado.

En términos generales los objetivos de remediación deben tender a minimizar o eliminar los riesgos a la salud humana y el medio ambiente, esto hace que la tecnología de tratamiento elegida varíe de un caso a otro, es así que en algunos casos la eliminación de los contaminantes presentes en el suelo es indispensable, mientras que en otros casos la atenuación natural o la aplicación de contención de la contaminación puede ser suficiente (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994, pág. 868).

El sitio donde se ubica el área de estudio ha sido destinado para uso público por lo que los procesos de atenuación natural con monitoreo controlado no son aceptables para el nuevo propietario del sitio; es así que en este caso en particular se requirió de la extracción de suelo contaminado para su tratamiento ex situ por métodos térmicos.

3. METODOLOGÍA

3.1. Revisión y Procesamiento de Información Existente

Los registros relativos a las actividades de entrenamiento contra incendios han sido revisados, limitado a aquellos que son relevantes para los objetivos de esta investigación únicamente e incluye los reportes de construcción del simulador, registros litológicos de la zona y resultados de laboratorio de las muestras de suelo tomadas durante la operación del sitio y durante los estudios de Evaluación Ambiental de Sitio (ver Sección 1.5 y 2.4.1).

Se revisó también el informe de la remediación ambiental aplicada en el área de estudio con la finalidad de evaluar los trabajos de remediación realizados y los costos relacionados. Toda esta información ha sido analizada para comprender los patrones de migración de la contaminación en el suelo, causada por las actividades de entrenamiento de bomberos y evaluar la eficiencia de la remediación realizada en el sitio.

Considerando que el combustible utilizado para los entrenamientos en este caso fue kerosene y gasolina, se analizarán hidrocarburos (hidrocarburos totales de petróleo -TPH) teniendo en cuenta que se tienen datos cuantitativos de muestreos. Los resultados de concentración de TPH en suelos han sido analizados en ArcGis 9.3 con el fin de presentar la distribución de los puntos de muestra y comprender cómo los contaminantes han migrado a través del suelo afectando las áreas alrededor de los puntos de monitoreo.

Los datos de monitoreo analizados en este estudio, corresponden a datos obtenidos en varios años. Los Estudios de Evaluación Ambiental de Sitio (Fase II Parte 1 y Fase II Parte 2) realizados por SYR en el año 2012 y 2013 tenían como objetivo el delimitar la extensión de la contaminación lateral y vertical en sitios en donde en años anteriores se había registrado contaminación. Esta es la razón por la cual en el análisis propuesto como parte

de este trabajo de titulación se comparan resultados de monitoreo de suelos realizados en varios años.

3.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los resultados de concentración de TPH obtenidos a diferentes profundidades en distintos puntos del área estudiada fueron alimentados en ArcGis 9.3 y se utilizó Natural Neighbors como herramienta de interpolación con la finalidad de poder visualizar la migración lateral de la contaminación a las diferentes profundidades analizadas.

Para este estudio, el software ArcGIS 9.3 se utilizó para la interpolación de la extensión de la contaminación en los lugares donde no se tomaron muestras de suelo. Las herramientas de interpolación utilizan los resultados de los análisis de laboratorio y estiman interrelaciones y patrones de movimiento de los contaminantes a través del suelo considerando sus concentraciones.

La interpolación utilizada en este caso fue la llamada ‘Natural Neighbor’, debido a que entrega resultados satisfactorios cuando se utiliza puntos aleatorios (Childs, 2004). Adicionalmente, funciona bastante bien para suelos homogéneos ya que no incluye la variación de conductividad hidráulica en un área de estudio como una variable a tomar en cuenta. De acuerdo a ensayos de permeabilidad realizados en el área de estudio se han obtenido valores de permeabilidad de $1,47 \text{ E-}04 \text{ cm/seg}$ considerando que el área registra una mezcla de limos, arcillas y arenas (Gesambconsult Consultores, 2012). La homogeneidad de la mezcla de tipos de suelo registrados en el área de estudio permite incluir este parámetro como una constante en el modelo.

Debido a que se maneja información de concentraciones de TPH (mg/kg) en cada punto de monitoreo a diferentes profundidades, se trabajó con una base de datos que al momento de

graficar e interpolar, generó perfiles horizontales de rangos de concentración de TPH por capas hacia abajo del suelo. Tomando en cuenta que uno de los objetivos de esta investigación es identificar el área y profundidad de intervención considerada para aplicar procesos de remediación, se ha utilizado la información cuantitativa obtenida mediante análisis de laboratorio para concentraciones de TPH para definir la afectación vertical en el sitio de estudio.

3.3. Áreas a ser intervenidas

La interpolación horizontal realizada en cada capa permitió visualizar la extensión de la contaminación en cada profundidad analizada. Se utilizó esta información y la información obtenida tanto en campo como de resultados de laboratorio para definir cuadrantes de intervención que contengan los puntos de monitoreo analizados. Se definió entonces las áreas a intervenir para cada capa (profundidad) analizada.

3.4. Estimación del volumen de suelo contaminado

Una vez trazados los cuadrantes de intervención para la aplicación de medidas de remediación ambiental, se definió la profundidad de intervención para cada cuadrante mediante la revisión de los resultados de concentraciones de TPH obtenidos a cada profundidad para los puntos de muestreo contenidos dentro de cada cuadrante definido. Se identificó las profundidades máximas a las cuales se registraban concentraciones de TPH que requieren de la aplicación de medidas de remediación en cumplimiento con la normativa aplicable; la Ordenanza Municipal 404 (OM 404), que establece un límite máximo de concentraciones de TPH de 200 mg/kg.

Este procedimiento permitió definir una profundidad de intervención para cada cuadrante para calcular un volumen estimado de suelo contaminado a ser tratado.

3.5. Estimación versus Realidad

Tomando en cuenta que el operador del Simulador de Incendios realizó una remediación del suelo, se ha comparado el volumen de suelo que se requiere tratar una vez realizado el análisis antes descrito (Secciones 3.2, 3.3 y 3.4), con el volumen real de suelo remediado por el operador (datos reales reportados por la empresa responsable de la remediación), así como los costos asociados a dicha remediación, con la finalidad de evaluar las medidas de remediación ambiental aplicadas en el área de estudio y definir si las mismas fueron adecuadas.

4. RESULTADOS

4.1. Ubicación de los sitios de monitoreo de suelos

En vista que el área del simulador fue construida en una zona con una pendiente artificial del 7 % hacia el oeste, todo el drenaje conduce los efluentes y las aguas pluviales hacia el punto de descarga al oeste de la zona del simulador por lo que se espera que la misma haya sido impactada por las actividades de simulación de incendios realizadas. La Figura 6 muestra las áreas donde se tomaron muestras de suelos y la ubicación de los puntos de muestreo:

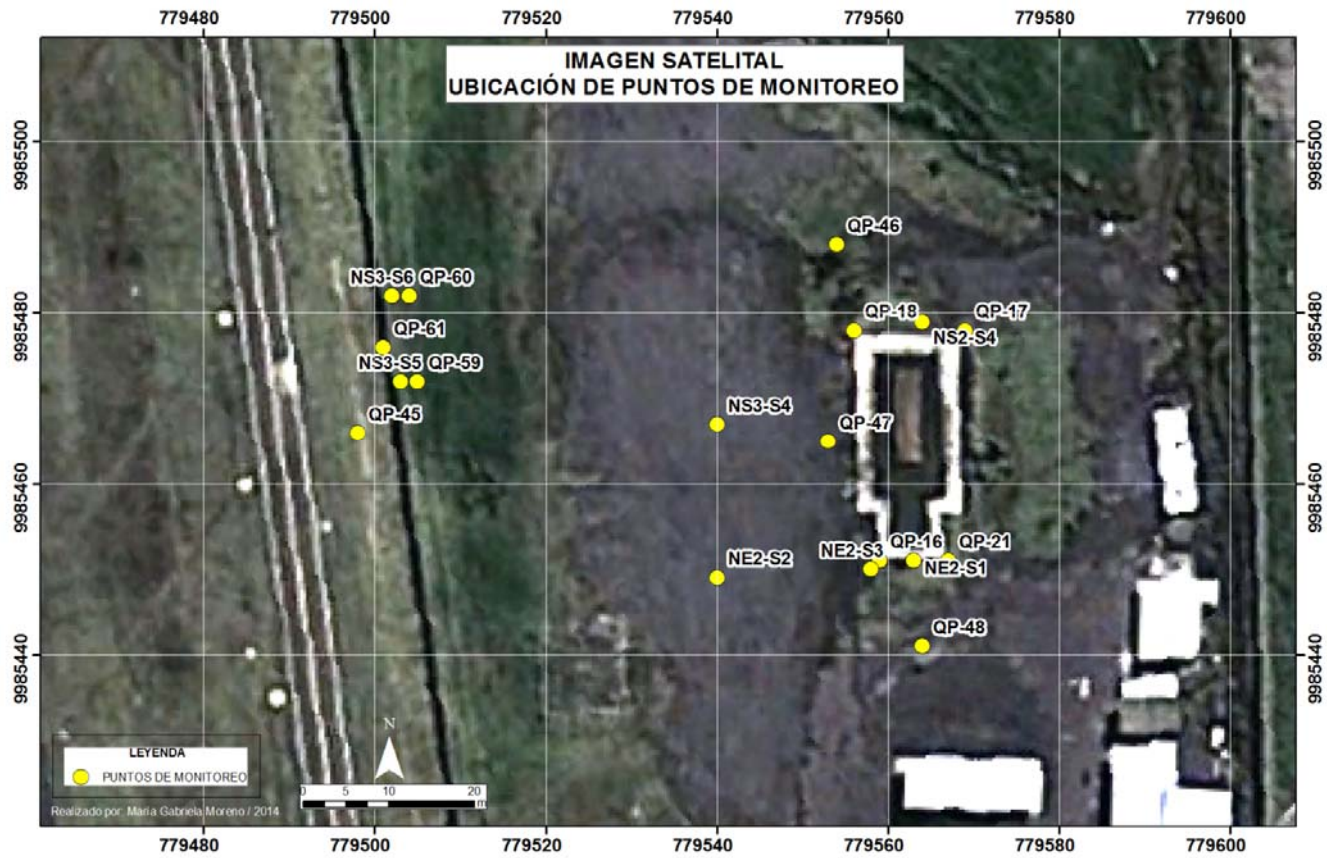


Figura 6 – Ubicación de puntos de muestreo de suelos / Imagen Satelital del Área de Estudio

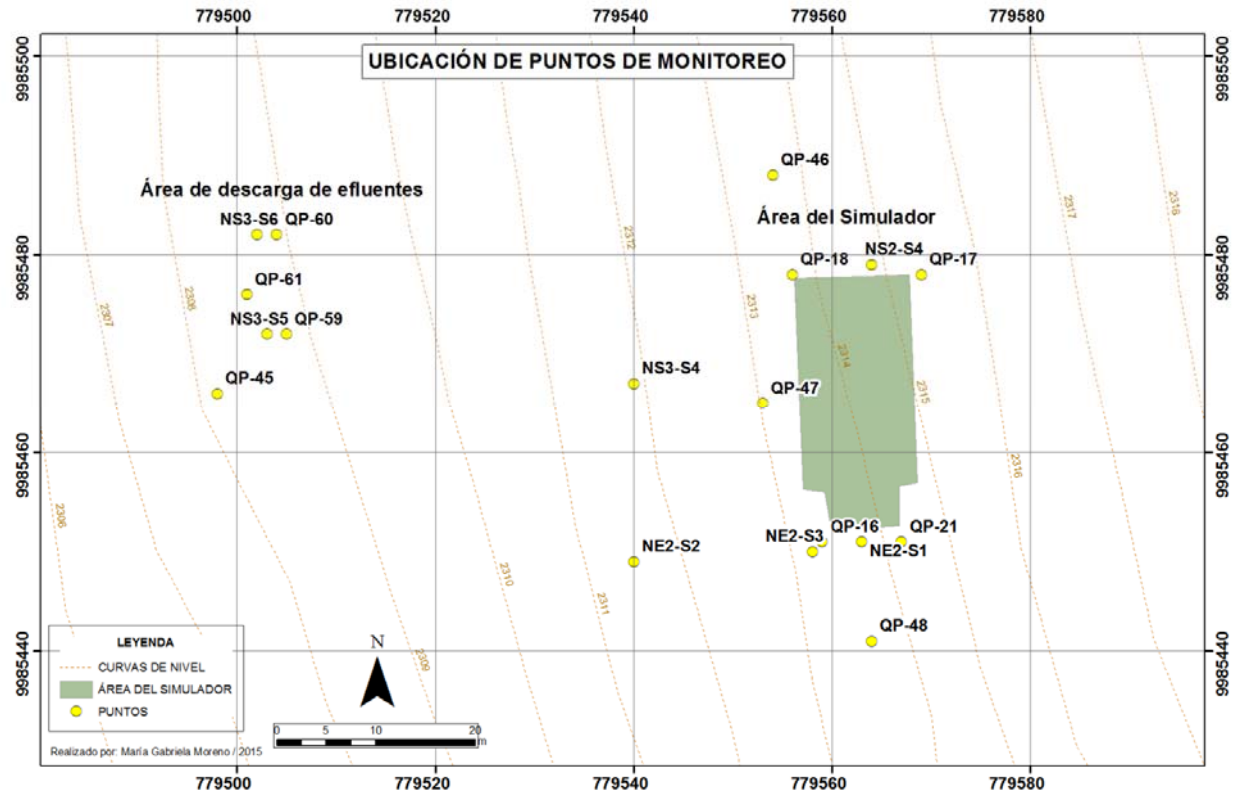


Figura 7 – Ubicación de Puntos de Monitoreo y Topografía del Terreno en el Área de Estudio

Como se describió en la Sección 1.5, el área hacia el noroeste del Simulador corresponde al área donde se producía la descarga desde el separador de agua / aceite. Se debe tomar en consideración también que debido a la pendiente del sitio (ver Figura 7), el área hacia el oeste entre el simulador y el punto de descarga ha sido también afectada; en estas dos áreas se podía observar vegetación de un color amarillento lo cual es un indicador de afectación al área verde por presencia de contaminantes (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2011).

La ubicación de los sitios de monitoreo en el área de estudio durante el año 2010 se basó en las condiciones del suelo (olor, color y presencia evidente de hidrocarburos) observadas directamente en el sitio posterior a cada evento de extinción de incendios (Landázuri, 2014). Por otro lado, durante los estudios de EAS Fase II (Parte 1 y Parte 2), los puntos de monitoreo fueron escogidos en base a la información levantada previamente en el 2010, pues el objetivo principal de estos estudios fue el de delinear la contaminación lateral y vertical en los sitios previamente identificados con presencia de hidrocarburos (SYR Geociencia, 2012). Es esta la razón por la cual la distribución de los puntos de monitoreo tiene un carácter aleatorio pues no se diseñó una malla de monitoreo durante la ejecución de dichos estudios.

4.2. Resultados de Laboratorio

El Anexo 1 muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica de las muestras de suelo tomadas en el área afectada. Las muestras de suelo NE2-S1, NE2-S2, NE2-S3, NE2-S4, NS3-S5 y NS3-S6 fueron tomadas por el antiguo operador del Simulador en el 2010, las demás muestras de suelo fueron tomadas por SYR Geociencia, la firma consultora

responsable de la ejecución de las Evaluaciones Ambientales de Sitio Fase I, Fase II Parte 1 y Fase II Parte 2 realizadas en el área afectada durante el año 2012 y 2013 cómo se describe en la Sección 2.4.1.

Los procedimientos seguidos por SYR Geociencia durante el monitoreo de suelos incluyeron la medición de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) en campo mediante el uso de un PID como se explicó en la Sección 2.4.2. El anterior operador del Simulador no realizó mediciones de COVs en campo mediante el uso de PID mientras tomaron las muestras, por lo tanto, esta información no está disponible.

Tomando en cuenta que las Normas Técnicas de la Ordenanza Municipal 404 tienen los límites más estrictos a nivel de legislación nacional para concentraciones de TPH (200 mg/kg) en cuanto a criterios de remediación de suelos contaminados, se utilizará este criterio para todo el análisis pertinente a la definición del área y volumen de suelo contaminado por lo tanto toda el área que de acuerdo a la interpolación presente concentraciones por encima de 200 mg/kg será considerada para la definición del área que requiere de remediación ambiental.

Los resultados obtenidos del análisis de laboratorio han sido analizados en ArcGIS 9.3 a través de una interpolación que facilita el obtener una superficie de distribución de la contaminación en cada profundidad para así determinar un área y volumen de suelo contaminado a ser tratado de acuerdo a lo explicado en la Sección 3.2.

Es importante tomar en cuenta una consideración para todas las figuras presentadas a continuación; el polígono que indica el área de estudio tiene la forma particular visualizada debido a que la interpolación delimita el área contaminada basándose en los datos de ubicación de los puntos de monitoreo, sin embargo se debe suponer que la extensión de la

contaminación no se verá limitada al polígono identificado en las figuras presentadas a continuación; es así que al momento de definir las áreas de intervención para la aplicación de medidas de remediación se deberá considerar abarcar áreas por afuera del polígono señalado considerando la posibilidad de que la contaminación se haya extendido por afuera de estos límites virtuales.

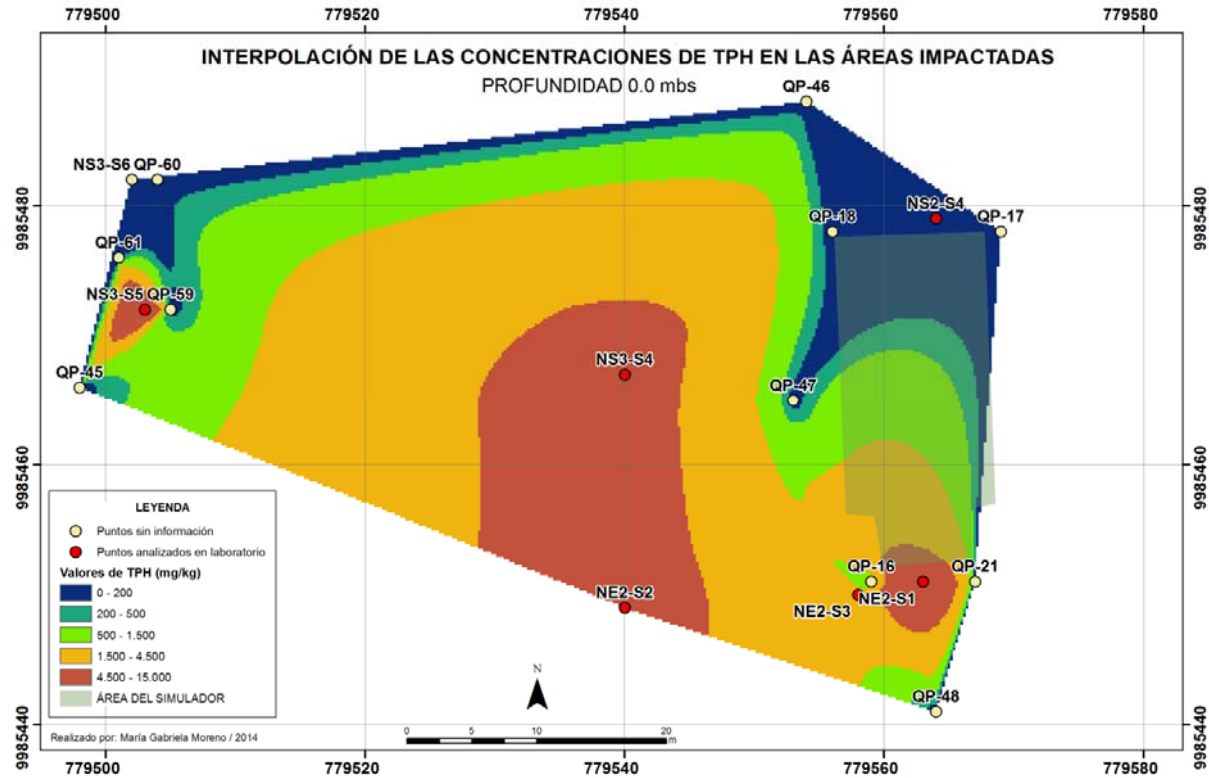


Figura 8 – Visualización del área contaminada en superficie / Visualización de concentraciones de TPH – Límite máximo permisible 200 mg/kg (OM 404)

Las muestras de suelo superficiales mostraron mayores concentraciones de TPH, considerando que las mismas fueron tomadas por el antiguo operador del Simulador inmediatamente después de finalizado cada evento de entrenamiento de extinción de fuego en el sitio durante el año 2010 (Landázuri, 2014). Las muestras tomadas mostraban resultados de concentraciones de TPH muy altos debido a que el área circundante al simulador de incendios había sido directamente afectada por derrames de combustibles o arrastre de los mismos por acción del agua y la espuma usadas para combatir el flagelo.

A nivel superficial (0.0 mbs), las muestras NE2-S1, NE2-S2, NE2-S3, NS3-S4, NS3-S5 y NS3-S6 mostraron valores de TPH mayores a 200 mg/kg, lo cual, de acuerdo a la OM 404 requieren de la aplicación de medidas de remediación (Ordenanza Metropolitana No. 404, 2013).

Durante la ejecución de los estudios de Evaluación Ambiental de Sitio del 2012 y 2013 (SYR Geociencia) no se tomaron muestras a nivel superficial por lo que los registros de concentración de TPH para los puntos de monitoreo analizados durante esos estudios se comenzaron a 0.5 mbs.

Debido a que durante el año 2012 y 2013 no se duplicaron las muestras superficiales tomadas en el 2010 por el antiguo operador del simulador, no se puede concluir que las concentraciones de TPH en el sitio hayan permanecido iguales y de hecho se puede suponer que la pluma de contaminación continuó migrando a través del suelo en todas direcciones como lo explica Mastes et al.,2008, lo cual se puede visualizar en la Figura 9 que muestra la distribución de contaminantes en el suelo a una profundidad de 0.5 mbs.

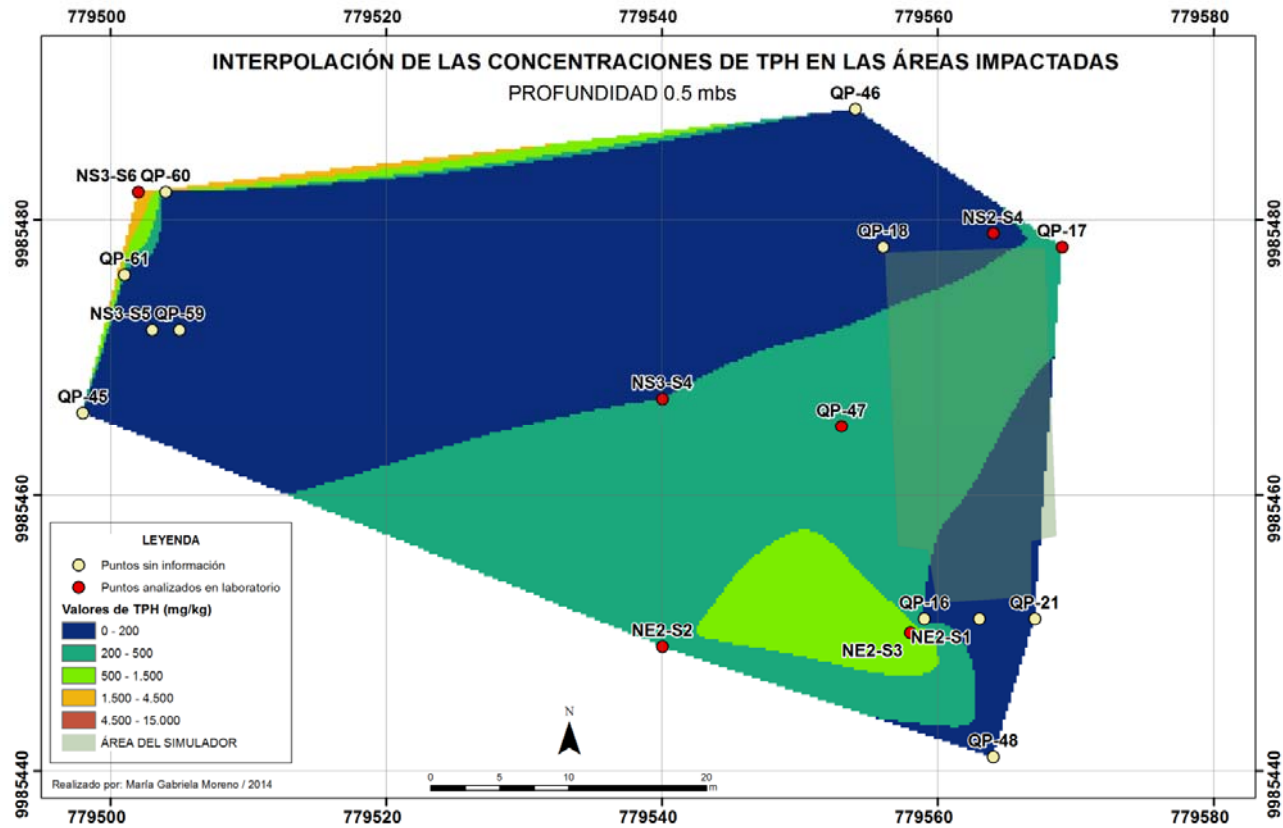


Figura 9 – Visualización del área contaminada a 0.5 mbs / Visualización de concentraciones de TPH – Límite máximo permisible 200 mg/kg (OM 404)

Se debe tomar en cuenta, que la interpolación realizada a 0.5 mbs muestra gráficamente áreas cuyos resultados no indican concentraciones por encima de 200 mg/kg de TPH como se puede visualizar en la Figura 9; esto como se explicó en la Sección 4.1, se le atribuye a la falta de datos debido a la distribución de los puntos de monitoreo y debido a que no se analizó en laboratorio las concentraciones de TPH en cada una de las capas evaluadas como se explicó en la Sección 2.4.2.

Al ingresar la información para cada punto de muestreo en cada una de las capas analizadas en ArcGis 9.3 las profundidades en cada punto de monitoreo que no fueron analizadas son asignadas con un valor de cero mg/kg de concentración de TPH debido a que el sistema no reconoce un valor de No Registrado (NR) por lo tanto durante la interpolación asume que dichos puntos registran concentraciones de TPH que caen en el rango de 0 – 200 mg/kg indicando que no existe contaminación en estos puntos. Para evitar interpretar esto como resultados de sitios no afectados, se ha analizado los resultados de concentraciones de TPH en capas más profundas, con la finalidad de confirmar que la contaminación en cada sitio monitoreado continuó migrando a capas inferiores.

Es así que, tomando en cuenta la información presentada en las Figuras 10, 11 y 12, donde se muestra la interpolación lateral de los diferentes rangos de concentración de TPH en cada una de las capas a diferente profundidad, no se puede concluir que no exista contaminación a 0.5 mbs, especialmente considerando que existen puntos de monitoreo que muestran valores de concentraciones de TPH por encima de los límites máximos permisibles a profundidades mayores de 0.5 mbs como es el caso de NS3-S5 (3272 mg/kg a 2.0 mbs), NSE-S6 (4260 mg/kg a 1.0 mbs) o QP-18 (8718 mg/kg a 1.0 mbs).

En el caso de QP-17, QP-47, NE2-S2, NE2-S3 y NS3-S6 mostraron concentraciones de TPH a 0.5 mbs que en comparación con la OM 404 requieren de la implementación de medidas de remediación pues sobrepasan los criterios de remediación de suelos contaminados de 200 mg/kg.

En el caso de NS3-S5 y NS3-S6 mostraron concentraciones por encima del límite máximo permisible comparado con el RAOH 1215 (2500 mg/kg) y la OM 404 (200 mg/kg) a 2.0 y 1.0 mbs respectivamente. Ambos sitios de monitoreo están ubicados en el área que recibía la descarga de efluentes desde el simulador de incendios. Durante el estudio de evaluación ambiental de sitio realizado en el 2012 y 2013 (SYR Geociencia, 2012 y 2013) se investigó esta área a mayor profundidad con la finalidad de delinear vertical y lateralmente la extensión de la contaminación y proveer al antiguo operador del simulador de información que le permitiera tomar decisiones con respecto a procesos de remediación en las áreas afectadas.

En base a los resultados de laboratorio y análisis de concentraciones de COVs mediante el uso de PID, se puede esperar que al confirmar la presencia de contaminación en niveles más profundos, las capas superficiales también hayan sido impactadas como lo indica la Figura 4 donde se muestra la pluma de contaminación afectada por dispersión dependiendo del tipo de fuente (LaGrega, Buckingham, & Evans, 1994). Los resultados obtenidos por el PID para concentraciones de COVs en campo pueden ser encontrados en el Anexo 1 y los mismos permiten sospechar de la presencia de contaminación en las diferentes capas analizadas a pesar de que no se cuente con resultados de análisis de laboratorio para cada una de dichas capas.

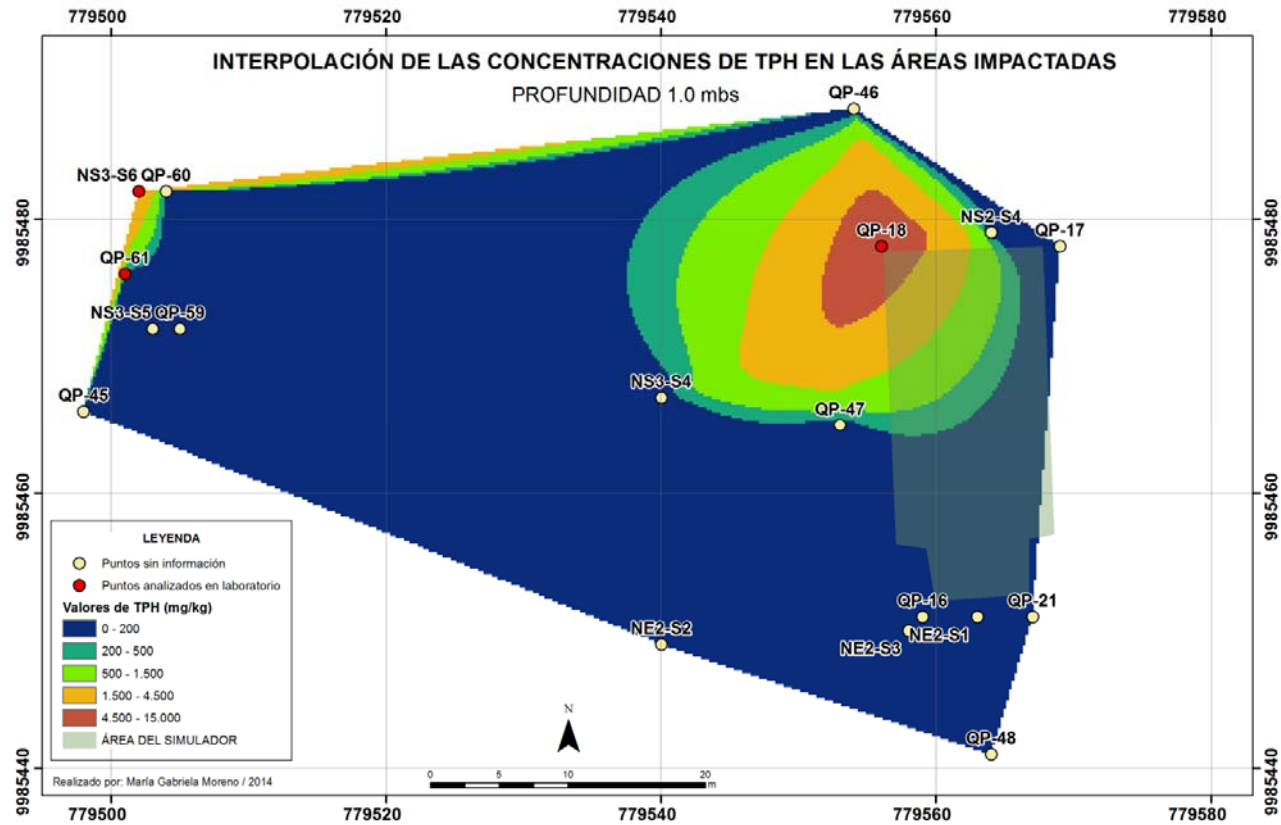


Figura 10 – Visualización del área contaminada a 1.0 mbs / Visualización de concentraciones de TPH – Límite máximo permisible 200 mg/kg (OM 404)

QP-18 es uno de los puntos más críticos a 1.0 mbs debido a que muestra concentraciones de TPH muy altas (8718 mg/kg). La Figura 10 muestra la interpolación lateral de la extensión de la contaminación a esta profundidad alrededor de QP-18 indicando haber afectado un área significativa.

En lo que respecta a NS3-S6, las concentraciones de TPH también son consideradas altas a 1.0 mbs, sin embargo, la Figura 10 no muestra toda el área afectada, debido a que en el área alrededor de este punto ArcGis 9.3 interpola entre los puntos para los cuales se cuenta con información por lo que se puede entender que el área afectada alrededor de este punto no puede ser visualizada completamente. Esto deberá ser tomado en cuenta al momento de definir el área que requiere remediación para evitar excluir un área contaminada.

Consistente con lo explicado anteriormente, el encontrar contaminación en este nivel nos lleva a concluir que las capas superficiales también se encuentran contaminadas. Por otro lado en virtud de las altas concentraciones de TPH detectadas a 1.0 mbs en QP-18 y NS3-S6, especialmente en comparación con el límite máximo permisible (200 mg/kg – OM 404), tan solo con tener información a esta profundidad podríamos suponer que en capas más profundas detectaremos concentraciones de TPH que indiquen la necesidad de la implementación de medidas de remediación ambiental en estos sitios, esta suposición se respalda nuevamente con los valores de concentraciones de COVs detectados por el PID en el caso de QP-18 en capas más profundas (Anexo 1).

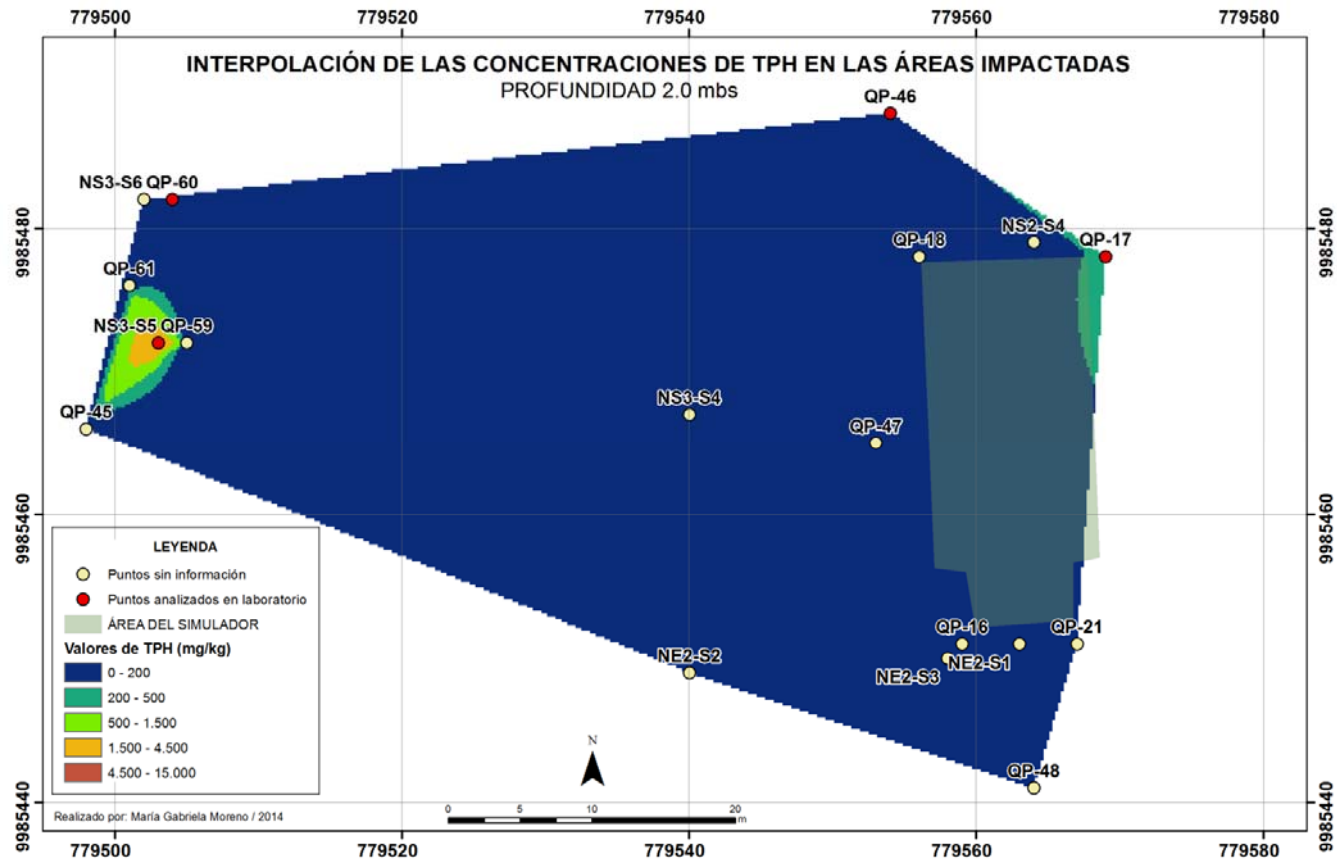


Figura 11 – Visualización del área contaminada a 2.0 mbs / Visualización de concentraciones de TPH – Límite máximo permisible 200 mg/kg (OM 404)

A 2.0 mbs se registran visualmente dos sitios contaminados en particular, el área alrededor de NS3-S5 y QP-17. En el caso de QP-17 registra concentraciones de TPH de 277 mg/kg a 2.0 mbs, que está ligeramente por encima del límite máximo permisible. Sin embargo, en el caso de NS3-S5 las concentraciones de TPH en esta profundidad son de 3272 mg/kg por lo que podemos suponer que es muy probable que en capas más profundas continuemos detectando concentraciones altas de TPH y que se requiera de una excavación profunda alrededor de este punto.

Al igual que en el caso de los resultados mostrados por la interpolación hecha en ArcGis 9.3 a 0.5 mbs, los resultados mostrados en la Figura 11 a 2.0 mbs registran áreas cuyas concentraciones de TPH no superan los 200 mg/kg, sin embargo en algunos puntos de monitoreo estos resultados visuales se deben a que no se tomaron muestras de suelo para análisis de laboratorio a esta profundidad por lo que en esos puntos el sistema le asigna una concentración de TPH de 0 mg/kg. Es consistente entonces suponer que habrá cierto grado de contaminación a 2.0 mbs en puntos de monitoreo que hayan registrado concentraciones más altas de TPH a profundidades mayores como es el caso de QP-18 (321 mg/kg a 4.5 mbs) como se indica a continuación en la Figura 12.

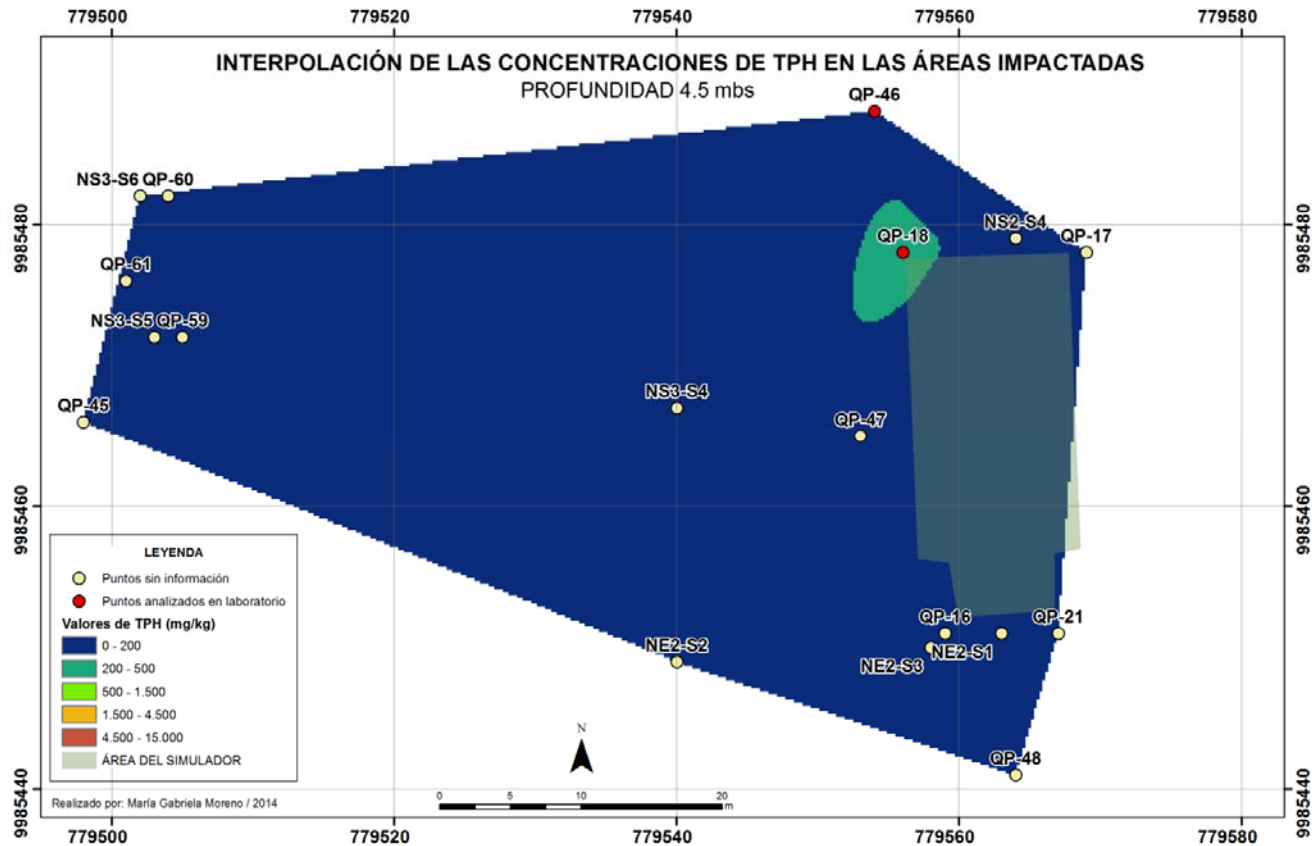


Figura 12 – Visualización del área contaminada a 4.5 mbs / Visualización de concentraciones de TPH – Límite máximo permisible 200 mg/kg (OM 404)

La capa de profundidad de monitoreo de 4.5 mbs muestra que el único punto que todavía registra concentraciones de TPH que requieren de la implementación de medidas de remediación ambiental en el área de estudio está ubicada alrededor de QP-18 (321 mg/kg) por lo que durante la remediación ambiental se deberá realizar una excavación profunda alrededor de este punto, mientras que las áreas alrededor de los demás puntos de monitoreo analizados deberán ser intervenidas a menor profundidad, a excepción del área alrededor de NS3-S5 como se explicó anteriormente en la Figura 11.

A continuación se presenta una vista combinada de todas las capas antes analizadas por separado:

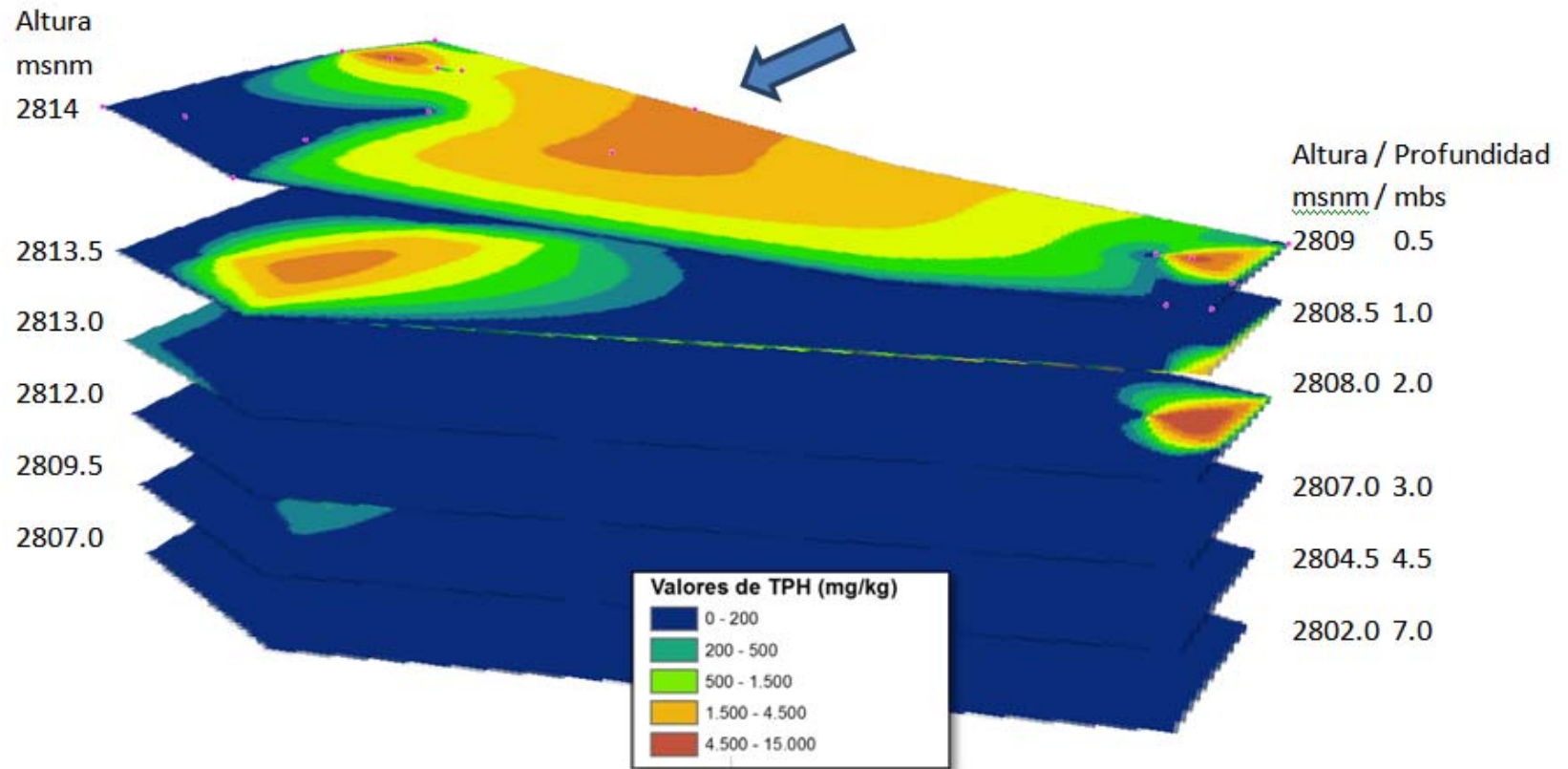


Figura 13 – Concentraciones de TPH en todas las profundidades analizadas (Vista desde el Norte)

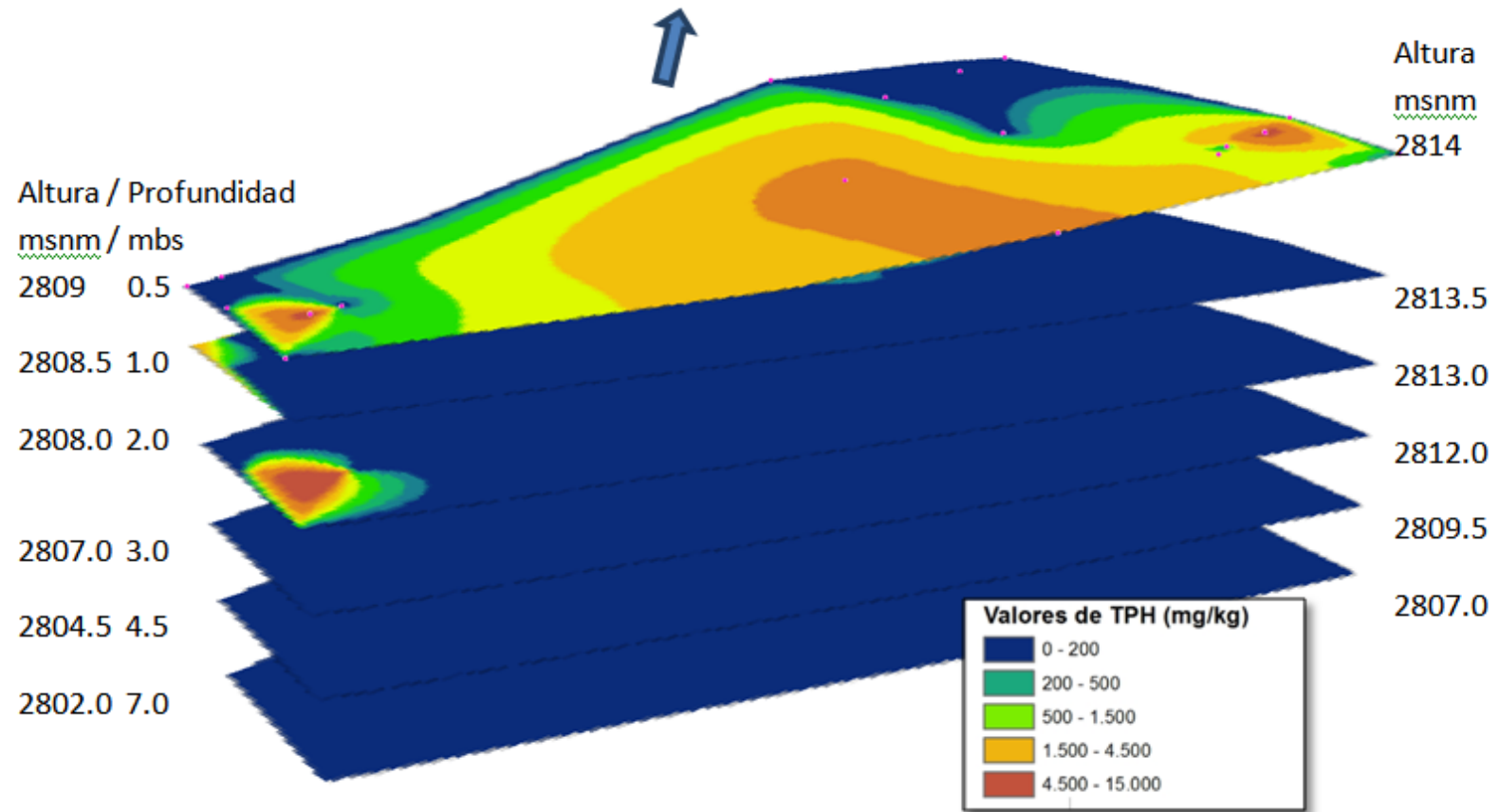


Figura 14 – Concentraciones de TPH en todas las profundidades analizadas (Vista desde el Sur)

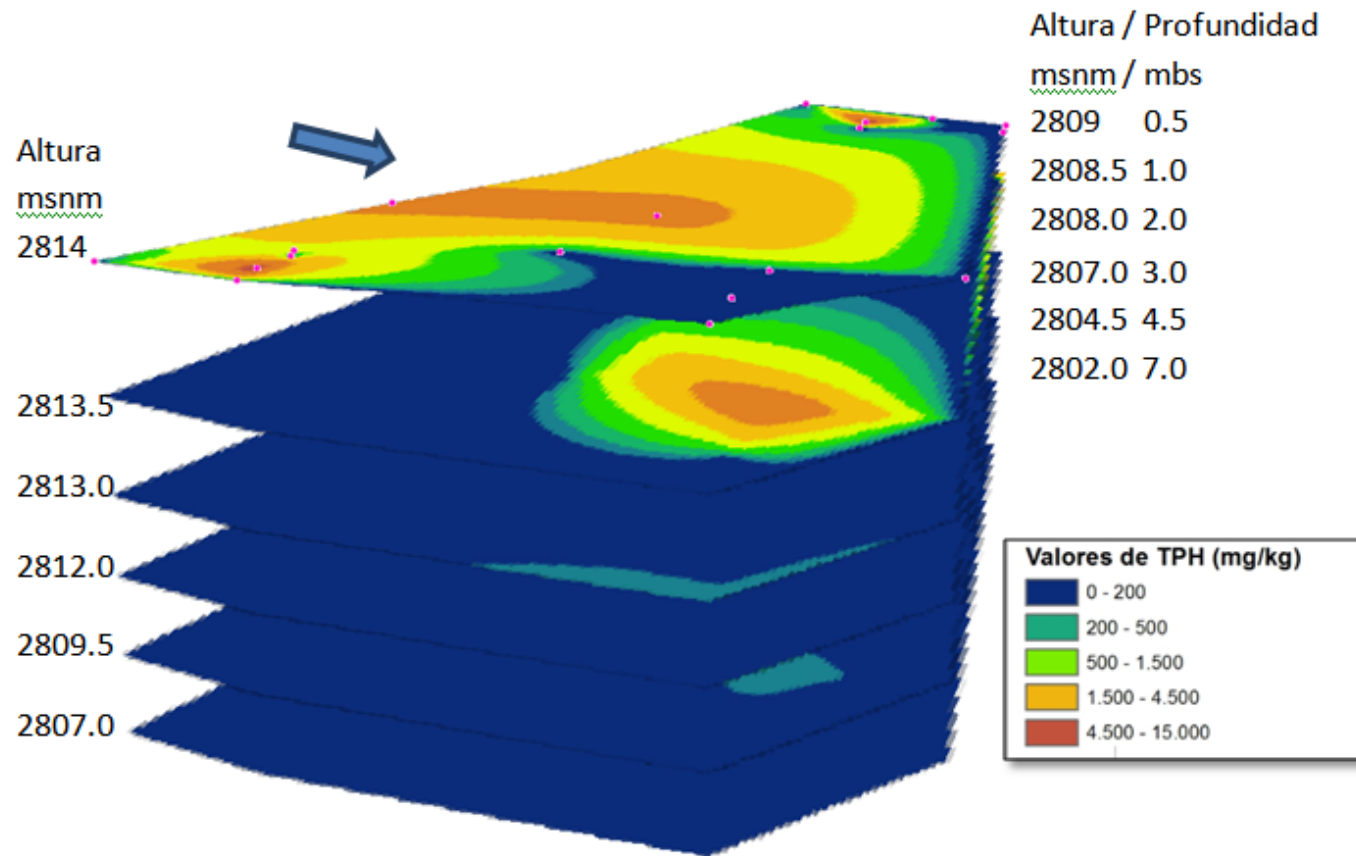


Figura 15 – Concentraciones de TPH en todas las profundidades analizadas (Vista desde el Este)

4.3. Estimación de Suelos Contaminados

El sitio puede ser demarcado en tres áreas, la primera corresponde al área donde se encontraba instalada la infraestructura del simulador, que incluye la contención secundaria, el simulador y el separador de agua / aceite. Esta área ha recibido un impacto directo debido al uso de combustibles durante los simulacros. La segunda área corresponde al área verde hacia el oeste del simulador, misma que ha recibido impactos indirectos debido al arrastre de contaminantes por medio de la escorrentía. La contaminación en esta área es superficial como se muestra en la Figura 8. La tercera área se encuentra ubicada 50 m al oeste del simulador y ha sido impactada debido a las descargas de aguas contaminadas con hidrocarburos provenientes del separador de agua / aceite a través de una tubería.

Cada una de las áreas mencionadas registra impactos causados por las actividades de entrenamiento de incendios realizadas en el sitio, mismos que se demuestran a través de los datos de TPH indicados en el Anexo 1. En cada punto de monitoreo analizado se registran diferentes concentraciones, lo cual implica una variación del impacto de la contaminación en el suelo.

4.3.1. Estimación de las profundidades de intervención en cada punto de monitoreo.

Se ha realizado un análisis de migración vertical de la contaminación de cada punto de monitoreo con la finalidad de definir la profundidad de intervención en las áreas impactadas alrededor de los puntos que registran contaminación. El análisis de la extensión vertical de la contaminación realizado en cada punto de monitoreo, para determinar el volumen necesario de tratamiento del suelo se ha llevado a cabo considerando únicamente las áreas altamente afectadas.

Adicionalmente, en muchos de los puntos de monitoreo durante la Fase II Parte 1 y Parte 2 se tomaron muestras para análisis de laboratorio únicamente en las profundidades que de acuerdo a los datos de concentraciones de COVs (medidas en campo mediante PID), mostraban altas concentraciones de COVs y concentraciones atenuadas de COVs y por lo tanto se cuenta con datos de TPH (resultados de laboratorio) en estos puntos para estas dos profundidades únicamente; es así que, con la finalidad de definir de forma adecuada la columna de suelo contaminado se han utilizado datos referenciales basados tanto en los valores observados de reducción de la concentración de COVs a lo largo de la columna vertical en cada punto de monitoreo como en los valores de TPH medidos en laboratorio.

El Anexo 2 presenta los datos usados para estimar la profundidad de intervención en cada punto de monitoreo independientemente. Esta información posteriormente nos servirá de guía para identificar las acciones a tomarse en cada una de las áreas en las que se deberá dividir el sitio de estudio.

4.3.2. Estimación del área contaminada y volumen de suelo a remediar.

Se usó ArcGIS 9.3 para definir un área contaminada alrededor de cada punto de monitoreo y en cada profundidad analizada con la finalidad de que esta información sirva para definir el cuerpo volumétrico de suelo que se debe tratar.

Como se pudo observar en la Figura 13, Figura 14 y Figura 15 las capas superficiales requieren de una intervención en casi todo el sitio de estudio, mientras que a medida que aumenta la profundidad, los sitios que continúan registrando concentraciones de TPH que requieren de intervención comienzan a ser más puntuales, por lo que no es recomendable

intervenir todo el sitio a una sola profundidad pues los costos de remediación se incrementarían.

Se dividió el área de estudio por cuadrantes, para agrupar los puntos de monitoreo cercanos que requieren de intervención a profundidades similares alrededor de estos puntos de monitoreo; el análisis de profundidad de afectación realizado para cada punto de monitoreo sirvió como referencia para definir la profundidad de intervención de cada cuadrante, tomando en cuenta los puntos de monitoreo contenidos en cada uno (Anexo 2). La Figura 16 presenta la información de los cuadrantes superficiales en los cuales se ha dividido el área de estudio. Como se explicó anteriormente, las áreas que requieren de la implementación de medidas de remediación son más puntuales a medida que aumenta la profundidad, lo que puede ser visualizado en la Figura 10, Figura 11 y Figura 12.

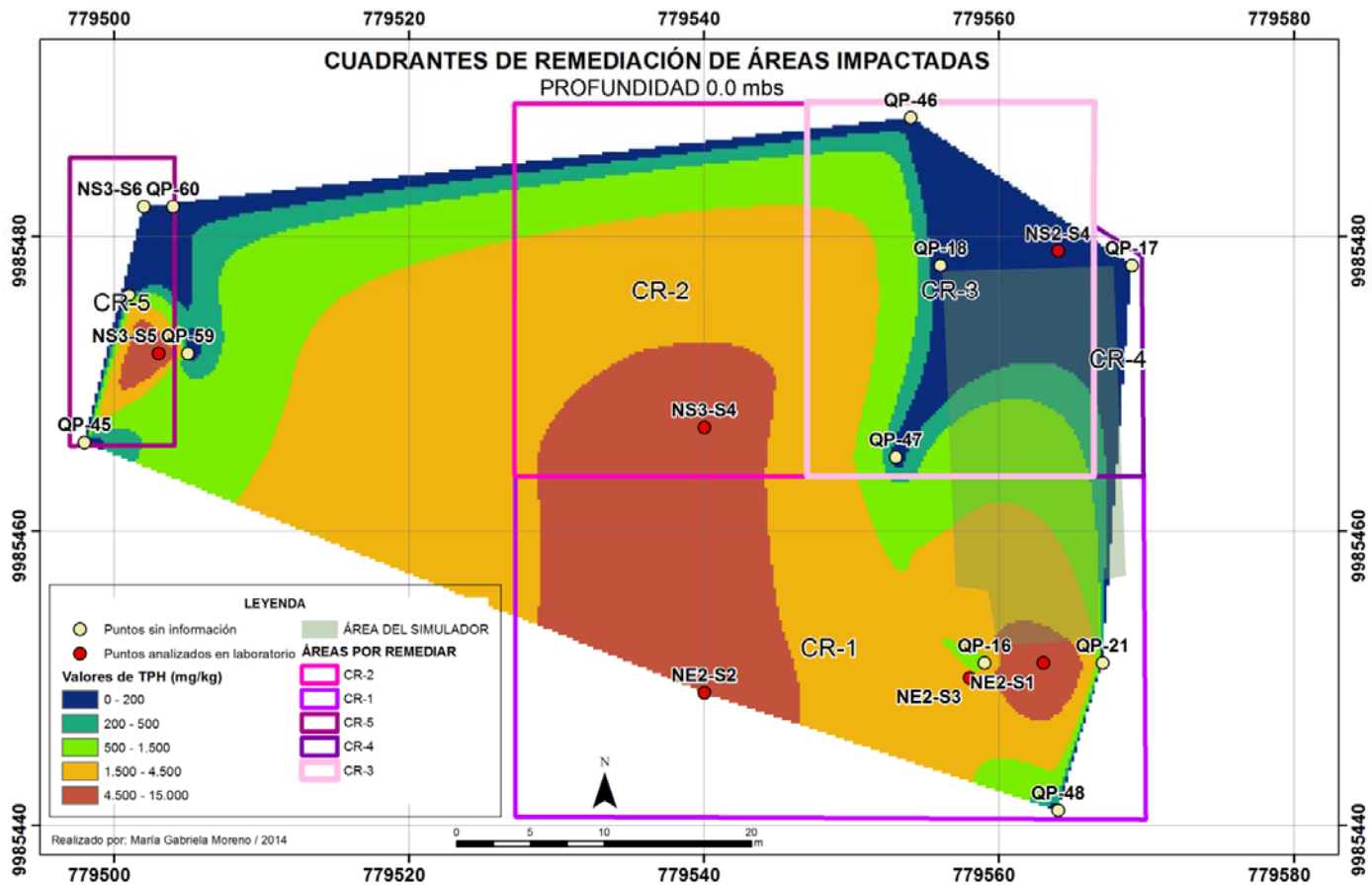


Figura 16 – Cuadrantes de intervención para la aplicación de medidas de remediación / Profundidad 0.0 mbs

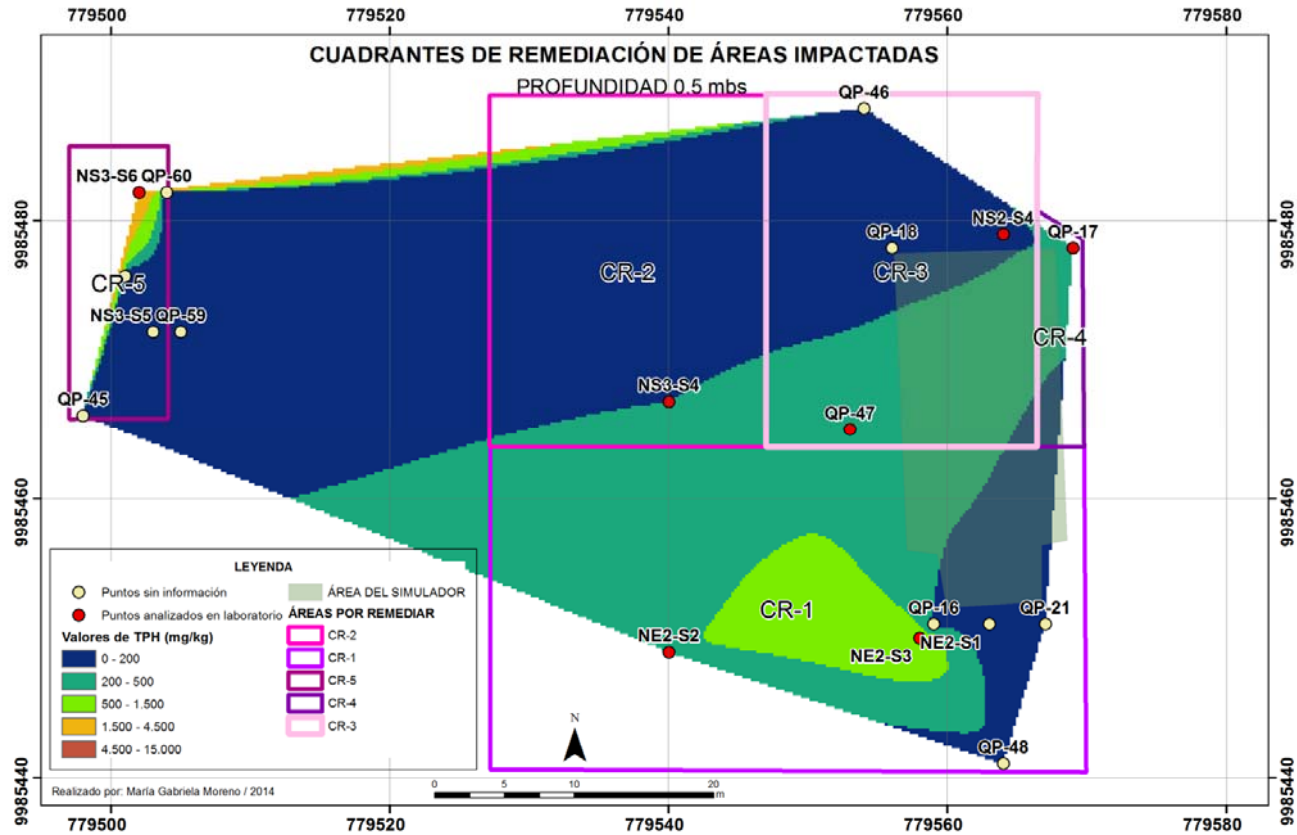


Figura 17 – Cuadrantes de intervención para la aplicación de medidas de remediación / Profundidad 0.5 mbs

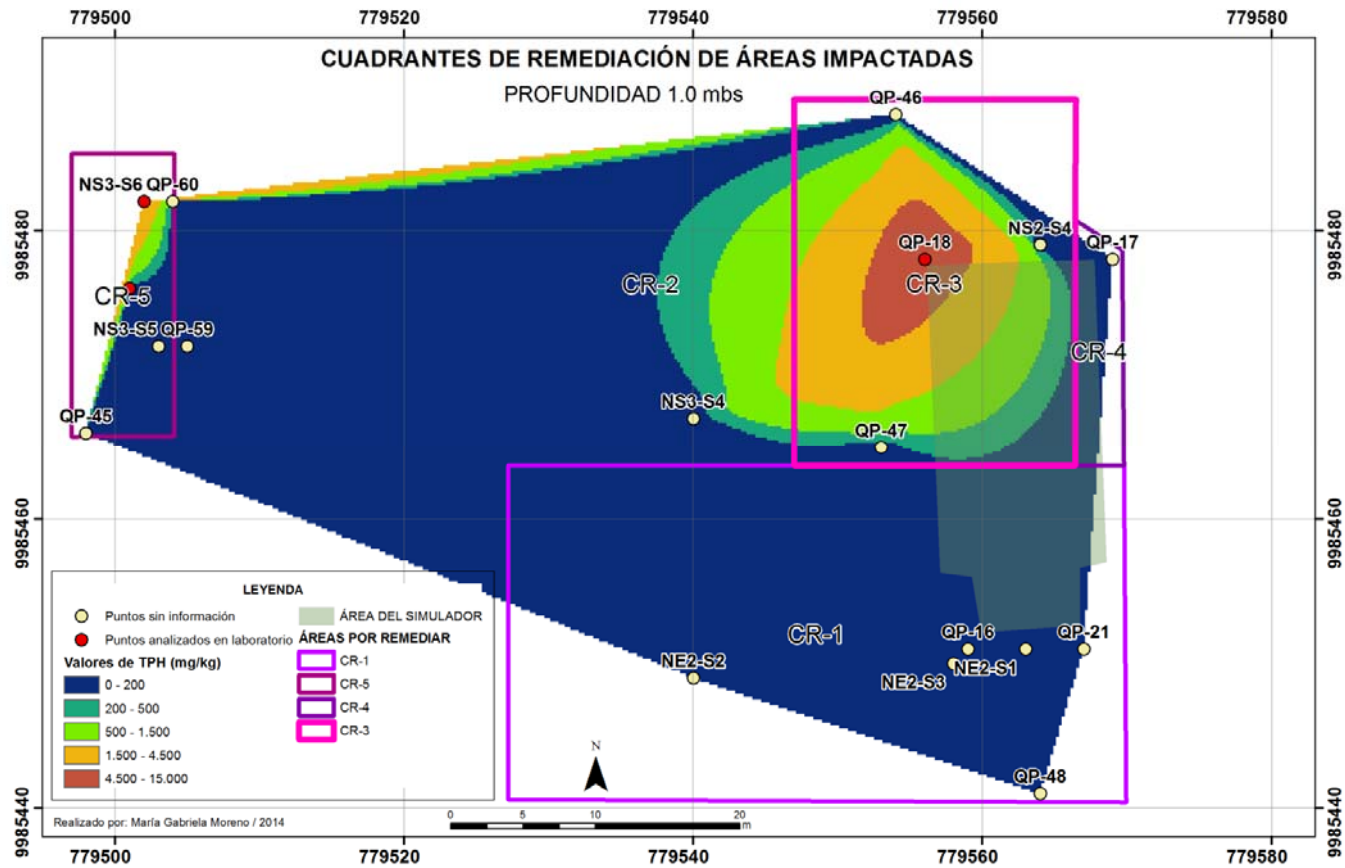


Figura 18 – Cuadrantes de intervención para la aplicación de medidas de remediación / Profundidad 1.0 mbs

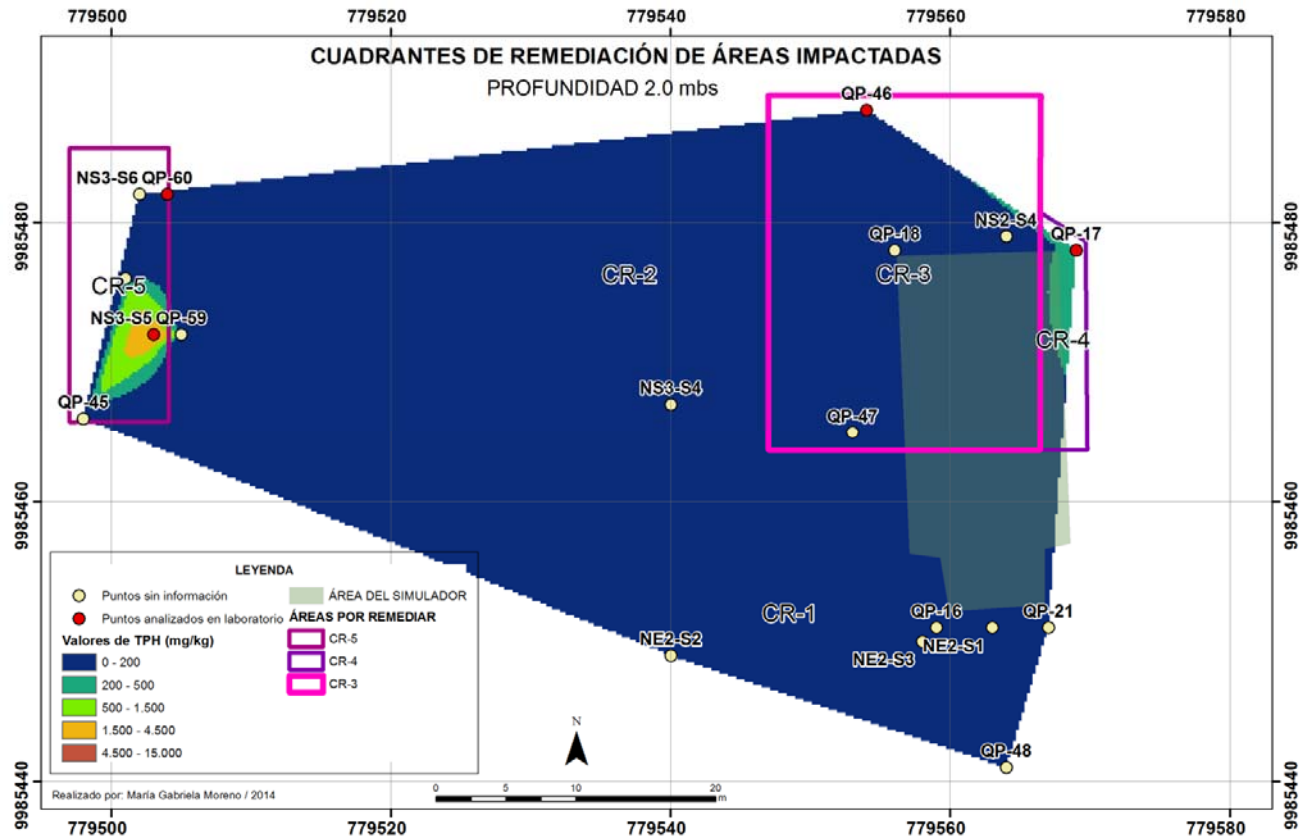


Figura 19 – Cuadrantes de intervención para la aplicación de medidas de remediación / Profundidad 2.0 mbs

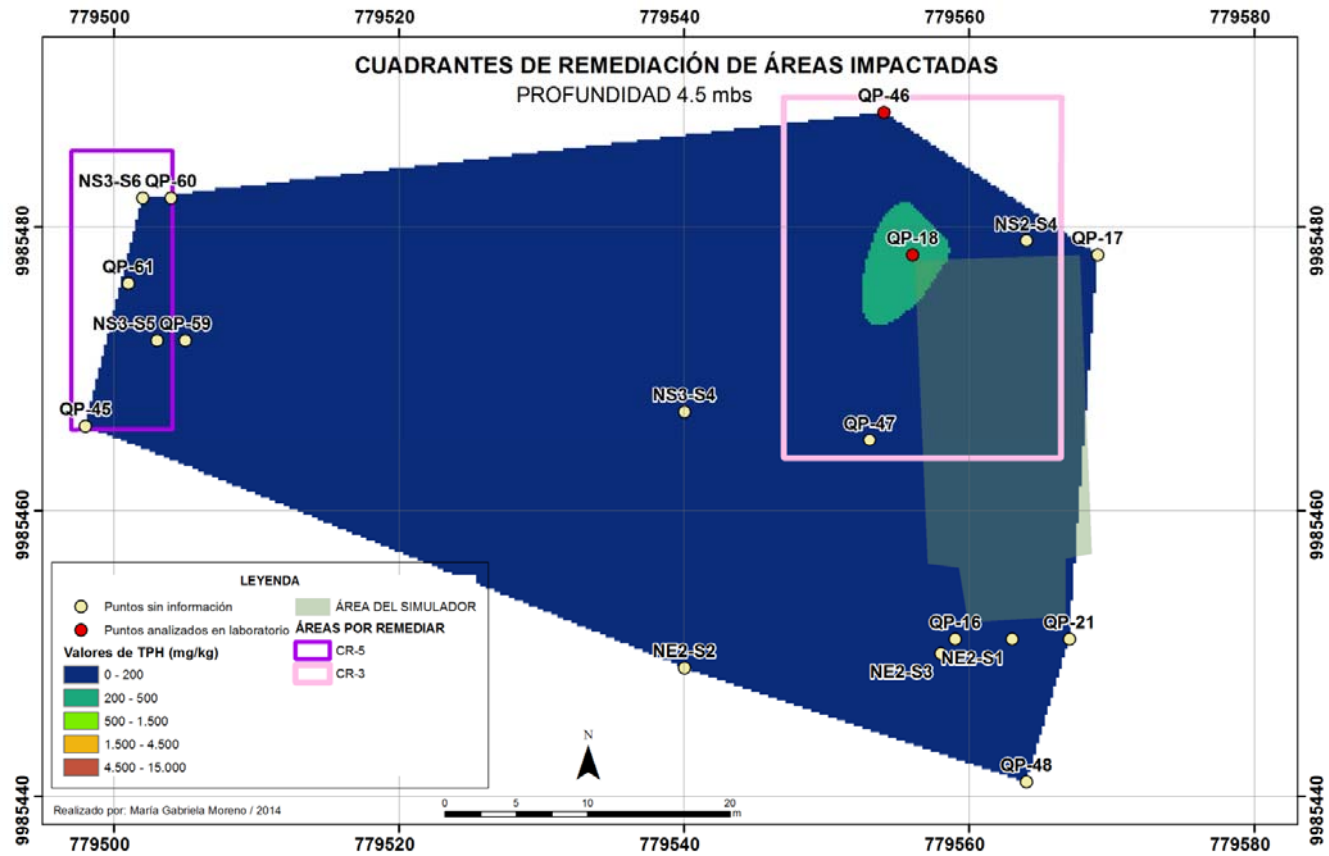


Figura 20 – Cuadrantes de intervención para la aplicación de medidas de remediación / Profundidad 4.5 mbs

La Tabla 3 presenta un resumen de la profundidad de intervención de cada cuadrante y la estimación del volumen de suelo a remediar en cada cuadrante en función de los resultados analizados en el Anexo 2.

Tabla 3 – Estimación de volumen de suelo a remediar

Cuadrante	Puntos de Monitoreo Involucrados	Área a intervenir (estimado)	Profundidad a intervenir (estimado)	Volumen de suelo a Remediar (estimado)
CR1	NE2-S1 NE2-S2 NE2-S3 QP-16 QP-21 QP-48	991 m ²	1.0 mbs	991 m ³
CR2	NS3-S4	501 m ²	0.5 mbs	250 m ³
CR3	QP-18 QP-47 NS2-S4	492 m ²	5.0 mbs	2460 m ³
CR4	QP-17	53 m ²	2.0 mbs	106 m ³

Cuadrante	Puntos de Monitoreo Involucrados	Área a intervenir (estimado)	Profundidad a intervenir (estimado)	Volumen de suelo a Remediar (estimado)
CR5	NS3-S5	138 m ²	4.5 mbs	621 m ³
	NS3-S6			
	QP-45			
	QP-59			
	QP-60			
	QP-61			
TOTAL		1873 m²	NA	4428 m³

Nota: Las áreas de cada cuadrante han sido calculadas en ArcGis 9.3 mediante el uso de la herramienta de análisis (Herramienta de Análisis / Atributos de Tabla / Calcular Geometría)

4.4. Comparación de medidas de remediación en relación a la actividad ya realizada y el presente estudio.

Tomando en cuenta que el antiguo Operador del Simulador realizó actividades de remediación durante el año 2013 y 2014 (Petrocheck, 2014), el presente trabajo compara dichas medidas en relación a las áreas y volúmenes de suelo que de acuerdo a la metodología antes descrita requerirían de remediación, para así evaluar si es posible incrementar el nivel de eficiencia en el proceso de descontaminación.

La Figura 21 presenta las áreas intervenidas por el antiguo Operador del Simulador.

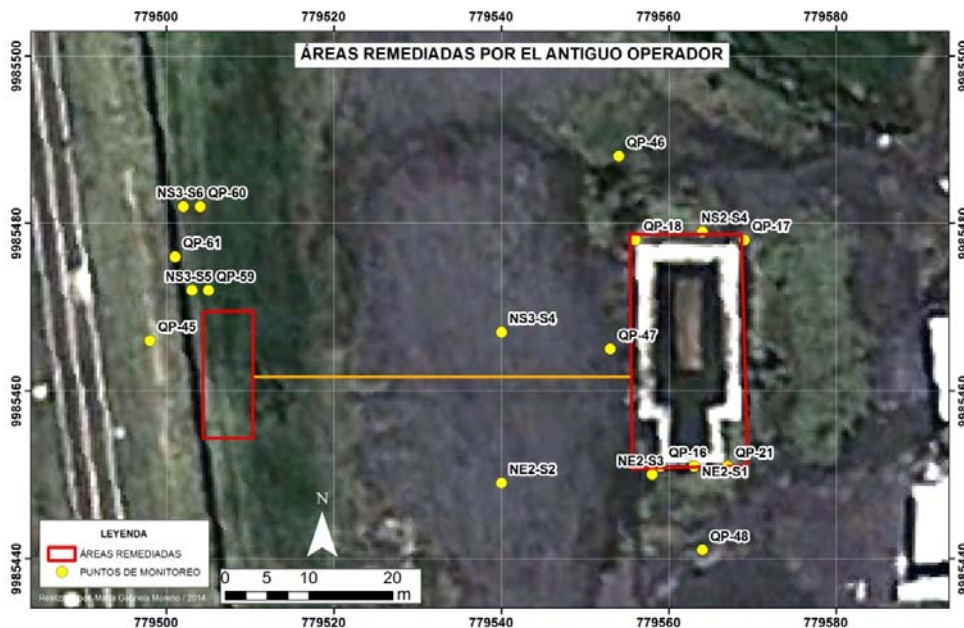


Figura 21 – Áreas Remediadas por el antiguo Operador del Simulador

Fuente: (Petrocheck, 2014)

La remediación del área contaminada fue realizada por el antiguo Operador del Simulador, interviniendo las dos áreas previamente identificadas en la Figura 21 exclusivamente. El área fue excavada y el material enviado a dos Gestores Ambientales Certificados (Hazwat e Incinerox) para proceder a la incineración de dichos residuos.

De acuerdo al Reporte de Remediación en el área del Simulador de Incendios (Petrocheck, 2014) se delimitó un área de excavación específica y la remoción de suelo se lo realizó a diferentes profundidades en base a observaciones directas (visuales y de olor). En el extremo noroeste del simulador se excavó a una profundidad de 1.90 mbs, mientras que en los extremos suroeste y noreste se excavó a una profundidad de 40 centímetros bajo la superficie del suelo para extraer suelo contaminado (Petrocheck, 2014). El informe de Petrocheck no georeferencia los límites de cada excavación por lo que no es posible ubicar exactamente las áreas intervenidas a las profundidades antes mencionadas. En el área

identificada a 42.30 metros al oeste del simulador se realizó una excavación profunda a 2.40 mbs (Petrocheck, 2014).

Es importante tomar en cuenta que el área al oeste del simulador intervenida por la empresa a cargo de la remediación ambiental del sitio, no corresponde al área investigada previamente y sobre la cual se confirmó la contaminación existente en el sitio. Adicionalmente, de acuerdo al Reporte de Remediación de Petrocheck, durante la identificación de las áreas contaminadas previo al inicio de los trabajos de excavación, se dificultó la ubicación del área de descarga de la contención secundaria del simulador (Petrocheck, 2014). Es así que la remediación fue realizada en un área diferente al área previamente identificada como área contaminada (descarga de contención secundaria)

Las dos áreas intervenidas mostradas en la Figura 21 y los volúmenes de suelo remediado reportados en el Informe de Remediación de Petrocheck se describen en la Tabla 4.

Tabla 4 – Áreas intervenidas y volumen de suelo remediado por el antiguo Operador del Simulador

Identificación del área	Área intervenida	Volumen de suelo remediado
Simulador de Incendios	397.6 m ²	286 m ³
Trampa de Simulador	52 m ²	153 m ³
TOTAL	449.6 m²	439 m³

Fuente: Petrocheck, 2014

A continuación se presenta una comparación de la estimación de áreas para remediación realizada por medio de los cuadrantes mostrados en las Figuras 16 a 20 y del volumen de suelo para remediar calculado y mostrado en la Tabla 3 versus los resultados presentados por Petrocheck de áreas remediadas en este sitio (Tabla 4). Petrocheck reportó costos de

remediación de \$490 por metro cúbico remediado en este sitio³. La Tabla 5 compara los costos reales incurridos para la remediación de este sitio con los costos estimados para el volumen de suelo que se considera que requiere remediación de acuerdo al método de cuadrantes propuesto.

Tabla 5 – Comparación de Realidad vs. Estimación

	Valores reportados por Petrocheck	Valores calculados Figuras 16 a 20 y Tabla 3
Área de intervención	449.6 m ²	1873 m ²
Volumen de suelo	439 m ³	3362 m ³
Costos de remediación	\$215,110	\$1'647,870

Las diferencias presentadas en la Tabla 5 entre la estimación del área y volumen de suelo que requiere remediación y el suelo contaminado remediado por Petrocheck, se debe principalmente a que el antiguo Operador del Simulador no consideró la aplicación de medidas de remediación en el área inmediatamente al oeste del Simulador (área entre el simulador y el punto de descarga de la contención secundaria), la misma que ha sido afectada debido al arrastre de contaminantes por medio de escorrentía facilitada por la pendiente del sitio. Adicionalmente, las profundidades de excavación asumidas no han considerado los resultados del monitoreo previamente realizado en el sitio por lo que no se ha excavado las áreas afectadas hasta las profundidades que han registrado concentraciones de TPH que requieran de la aplicación de medidas de remediación como es el caso de QP-18 en donde se registran concentraciones de 321 mg/kg a 4.5 mbs por lo que alrededor de este punto se requiere de una excavación profunda; sin embargo, Petrocheck reporta que el

³ El dato de costos de remediación del sitio fue obtenido directamente de la factura de Petrocheck de los servicios prestados. Estos costos consideran los costos de maquinaria para la excavación, mano de obra, tiempo de los técnicos en campo, transporte y tratamiento del suelo contaminado.

sector Noroeste del Simulador fue excavado hasta 1.90 mbs únicamente. Finalmente se debe tomar en cuenta que la remediación realizada por el antiguo Operador del Simulador realizó la remediación de un área que no requería de remediación puesto que el sitio a ser intervenido no fue bien identificado.

El área donde antiguamente se ubicaba el Simulador será destinada para adecuación de áreas de uso público por lo tanto la limpieza del sitio garantizando su inocuidad al contacto con el ser humano y animales se considera de alta prioridad. Adicionalmente, tomando en cuenta que parte del área del Simulador ya fue intervenida y se reemplazo el suelo excavado con suelo importado, se considera que la aplicación de medidas de remediación ambiental deberían ser aplicadas únicamente a las áreas no intervenidas (área de descarga de la contención secundaria del simulador y área intermedia entre el punto de descarga y el simulador) mismas que han sido identificadas en la Figura 22.

Utilizando ArcGis 9.3 se ha procedido a identificar las áreas que aún requieren de la aplicación de medidas de remediación, la información se presenta en la Figura 22.

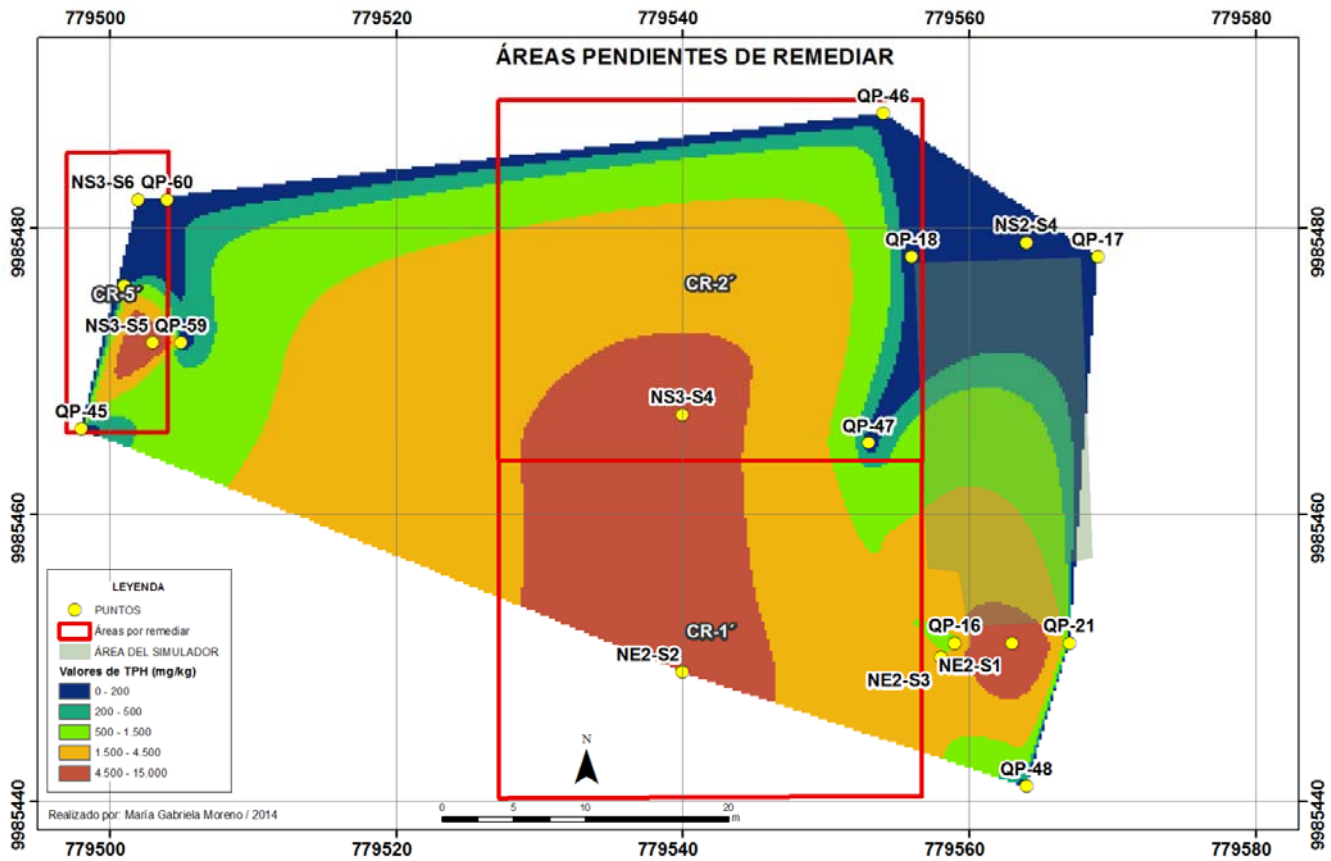


Figura 22 – Áreas que requieren la aplicación de medidas de remediación

La Tabla 6 presenta la estimación de las nuevas áreas que se recomienda sean intervenidas en cada cuadrante (Figura 22), profundidades de excavación y estimación de volumen de suelo a ser remediado. Las profundidades de excavación estimadas han sido definidas en base a la información incluida en el Anexo 2.

Tabla 6 – Estimación de áreas de intervención y volumen de suelo que requiere remediación

Identificación de Cuadrante	Puntos de Monitoreo Contenidos en el cuadrante	Estimación de área a intervenir	Estimación de profundidad a intervenir	Estimación de Suelo a Remediar
CR1'	NE2-S2	696 m ²	1.0 mbs	696 m ³
CR2'	NS3-S4 QP-47	705 m ²	0.5 mbs	352.5 m ³
CR5	NS3-S5 NS3-S6 QP-45 QP-59 QP-60 QP-61	138 m ²	4.5 mbs	621 m ³
TOTAL		1539 m²	NA	1669.5 m³

Nota: Las áreas de cada cuadrante han sido calculadas en ArcGis 9.3 mediante el uso de la herramienta de análisis (Herramienta de Análisis / Atributos de Tabla / Calcular Geometría)

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La falta de revisión y análisis de la información existente levantada para el área de estudio condujo a que la remediación ejecutada por parte del Antiguo Operador del sitio no considerara la aplicación de medidas de remediación en el área inmediatamente al oeste del Simulador (área entre el simulador y el punto de descarga de la contención secundaria). Los resultados de monitoreo realizados evidencian que la misma ha sido afectada por las actividades de simulación de incendios realizadas y que por lo tanto requieren de una intervención ambiental.
- Las profundidades de excavación asumidas por el Antiguo Operador del Simulador durante la remediación ejecutada no han considerado los resultados del monitoreo previamente realizado en el sitio por lo que no se ha excavado las áreas afectadas hasta las profundidades que han registrado concentraciones de TPH que requieran de la aplicación de medidas de remediación.
- La remediación realizada por el antiguo Operador del Simulador intervino un área que no requería de remediación puesto que el sitio a ser intervenido no fue bien identificado; por lo tanto, el área donde se realizaba la descarga desde la contención secundaria del simulador, misma en donde se confirmó la existencia de contaminación, todavía requiere de acciones de remediación.
- Se considera necesaria la aplicación de medidas de remediación en los sitios que no han sido intervenidos durante las actividades realizadas por Petrocheck (área de descarga de la contención secundaria del simulador y área intermedia entre el punto de descarga y el simulador).
- Cuando se interviene un sitio contaminado es importante que se intente determinar la extensión de la contaminación tomando en consideración los diferentes resultados obtenidos después de análisis de laboratorio con la finalidad de optimizar los recursos

económicos y evitar excavar toda el área a una sola profundidad; esto permitirá reducir los costos asociados, sin embargo se debe tomar en cuenta que el método propuesto puede ser considerado como un método de intervención de Fase I pues una vez que se ha excavado cada uno de los cuadrantes propuestos se deberá realizar monitoreo confirmatorio para garantizar que todo el suelo contaminado ha sido removido. En caso de detectar concentraciones de TPH (en este caso) que indiquen la presencia de contaminación todavía en el sitio se deberá considerar las concentraciones detectadas para continuar con la excavación hasta que se garantice cumplimiento con la normativa nacional aplicable.

- El uso de ArcGis 9.3 permitió visualizar la extensión lateral de la contaminación en cada una de las capas analizadas a través del uso de una herramienta de interpolación; sin embargo, esta herramienta es muy limitada tomando en cuenta que no permite interpolar verticalmente entre capas y obtener un cuerpo volumétrico de suelo contaminado.
- Debido a que no se cuenta con datos de concentraciones de TPH para cada una de las profundidades analizadas en todos los puntos de monitoreo evaluados en algunos casos se presentó la dificultad de definir la profundidad de intervención puesto que la concentración de TPH registrada en la capa más profunda para la cual se cuenta con información cuantitativa registraba concentraciones que sobrepasaban los 200 mg/kg de concentraciones de TPH (límite máximo permisible de acuerdo a OM 404), es así que en muchos casos se tuvo que definir una profundidad de intervención basado en los valores de COVs registrados mediante el uso del PID como guía.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADC&HAS. (2006). *Informe de Construcción del Simulador de Incendios*. Quito.
- Arboleda Jácome, V. G., & Bravo Basantes, V. M. (2008). Bioremediación del Suelo Contaminado con Hidrocarburos de la Central Hidroeléctrica del Campamento Secoya Mediante Landfarming. Riobamba, Ecuador.
- Carburos Metálicos Grupo Air Products. (1996). *Carburos Metálicos Grupo Air Products*. Retrieved Enero 15, 2015, from Carburos Metálicos Grupo Air Products: <http://www.carburos.com/industries/Analytical-Laboratories/analytical-lab-applications/product-list/gc-with-photoionization-detector-gc-pid-analytical-laboratories.aspx?itemId=9E5E4328C1EC479FA0E0515845C161CE>
- Catalunya, Universidad Politécnica de. (4 de Mayo de 2012). *Grupo de Hidrología Subterránea - UPC*. Recuperado el Febrero de 2015, de Grupo de Hidrología Subterránea - UPC: http://www.h2ogeo.upc.edu/Docencia/Flujo%20y%20Transporte%20Multifase/6_Transporte.pdf
- Childs, C. (2004). *ESRI Educational Services*. Retrieved Agosto 2014, from ESRI: <http://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf>
- Geológica, Ruta. (2015). *Explorando y Conociendo Nuestra Tierra - Ruta Geológica*. Retrieved Marzo 2015, from http://www.rutageologica.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=393&Itemid=95&limitstart=3
- Gesambconsult Consultores. (2012). *Estudio de Impacto Ambiental de la Primera Línea de Metro de Quito*. Quito.
- Gestión Calidad Consulting. (2009). *Gestión Calidad*. Retrieved Febrero 2, 2015, from <http://www.gestion-calidad.com/suelos-contaminados.html>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2011). *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*. Retrieved Febrero 3, 2015, from Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria: <http://inta.gob.ar/documentos/saneamiento-de-derrames-de-hidrocarburos-por-la-tecnica-de-biodegradacion-in-situ-en-patagonia-argentina/>
- Komex Environmental Engineering. (2002). *Phase I and Phase II Environmental Site Assessment*. Environmental Site Assessment, Mariscal Sucre International Airport, Quito.
- Komex Environmental Engineering. (2004). *Phase II (Part 2) Environmental Site Assessment, Quito, Ecuador*. Quito.

- Komex Environmental Engineering. (2005). *Phase II (Part 3) Environmental Site Assessment*. Environmental Site Assessment, Mariscal Sucre International Airport, Quito.
- LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., & Evans, J. C. (1994). *Hazardous Waste Management*. New York: McGraw Hill Higher Education.
- Landázuri, G. (2014, Agosto 01). Impactos de Actividades de Simulación de Incendios. (G. Moreno, Interviewer)
- Masters, G. M., & Ela, W. P. (2008). *Introducción a la Ingeniería Medio Ambiental*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Ministerio del Ambiente. (2014, Febrero). Acuerdo Ministerial No. 006. *Acuerdo Ministerial No. 006*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- NFPA. (2012). *National Fire Protection Association*. Retrieved Noviembre 01, 2014, from NFPA 1402 Guide to Building Fire Service Training Centers 2012 Edition: <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/document-information-pages?mode=code&code=1402>
- Ordenanza Metropolitana No. 404. (2013, Junio 25). *Ordenanza Metropolitana Reformatoria de la Ordenanza Metropolitana No. 213, Sustitutiva del Título V, "Del Medio Ambiente" del Libro Segundo del Código Municipal*, Norma Técnica de Suelos, Tabla 3. Quito, Pichincha, Ecuador: Registro Oficial Órgano del Gobierno del Ecuador.
- Petrocheck. (2014). *AIMS Fase III Parte 2 Remediación Ambiental de Suelos 2014*. Quito.
- SYR Geociencia. (2012). *Phase I Environmental Site Assessment*. Quito.
- SYR Geociencia. (2012). *Phase II Part 1 Environmental Site Assessment*. Quito.
- SYR Geociencia. (2013). *Phase II Part 2 Environmental Site Assessment*. Quito.
- Thompson, D. (2002). Tools for Environmental Management. In D. Thompson, *Tools for Environmental Management* (pp. 174-189). Calgary: University of Calgary Press.

ANEXO 1 – ANÁLISIS DE MUESTRAS DE SUELO

Análisis de Campo y Laboratorio – Muestras de Suelo / Mediciones de COVs con PID y Análisis de Laboratorio (TPH)						
Fecha	Identificación del punto de muestreo	Profundidad de la muestra de suelos para medición de COVs con PID (mbs)	Resultado de Mediciones de COVs con PID (ppm)	Profundidad de muestreo para análisis de TPH (mbs)	Resultados de Concentraciones de TPH (mg/kg)	Límite Máximo Permissible de Concentraciones de TPH / OM 404 (200 mg/kg) Estatus de cumplimiento
21/06/10	NE2-S1	NA	NA	0.0	14200	NC
27/07/10	NE2-S2	NA	NA	0.0	6150	NC
		NA	NA	0.5	474	NC
24/08/10	NE2-S3	NA	NA	0.0	2040	NC
		NA	NA	0.5	800	NC
20/09/10	NE2-S4	NA	NA	0.0	105	C
		NA	NA	0.5	115	C

Notas:

1) PID = Detector Fotoionizante 2) TPH = Hidrocarburos Totales de Petróleo 3) COVs = Compuestos Orgánicos Volátiles 4) mbs = Metros bajo superficie
 5) ppm = Partes por millón 6) <50 = No detectado sobre el valor reportado específico 7) mg/kg = miligramos por kilogramo
 8) C = Cumple NC = No Cumple NR = No Registrado 9) Legislación Aplicable: Ordenanza Municipal 404 nivel de acción para remediación y recuperación para TPH 200 mg/kg. **Fuente:** SYR Geociencia, 2013

Análisis de Campo y Laboratorio – Muestras de Suelo / Mediciones de COVs con PID y Análisis de Laboratorio (TPH)						
Fecha	Identificación del punto de muestreo	Profundidad de la muestra de suelos para medición de COVs con PID (mbs)	Resultado de Mediciones de COVs con PID (ppm)	Profundidad de muestreo para análisis de TPH (mbs)	Resultados de Concentraciones de TPH (mg/kg)	Límite Máximo Permissible de Concentraciones de TPH / OM 404 (200 mg/kg) Estatus de cumplimiento
20/09/10	NS3-S4	NA	NA	0.0	6740	NC
		NA	NA	0.5	200	C
20/09/10	NS3-S5	NA	NA	0.0	14020	NC
		NA	NA	2.0	3272	NC
20/09/10	NS3-S6	NA	NA	0.5	3728	NC
		NA	NA	1.0	4260	NC
04/12/12	QP-16	0.5	7.2	0.5	<50	C
		1.0	5.1	NR	NR	NR

Notas:

1) PID = Detector Fotoionizante 2) TPH = Hidrocarburos Totales de Petróleo 3) COVs = Compuestos Orgánicos Volátiles 4) mbs = Metros bajo superficie
5) ppm = Partes por millón 6) <50 = No detectado sobre el valor reportado específico 7) mg/kg = miligramos por kilogramo
8) C = Cumple NC = No Cumple NR = No Registrado 9) Legislación Aplicable: Ordenanza Municipal 404 nivel de acción para remediación y recuperación para TPH 200 mg/kg. **Fuente:** SYR Geociencia, 2013

Análisis de Campo y Laboratorio – Muestras de Suelo / Mediciones de COVs con PID y Análisis de Laboratorio (TPH)						
Fecha	Identificación del punto de muestreo	Profundidad de la muestra de suelos para medición de COVs con PID (mbs)	Resultado de Mediciones de COVs con PID (ppm)	Profundidad de muestreo para análisis de TPH (mbs)	Resultados de Concentraciones de TPH (mg/kg)	Límite Máximo Permissible de Concentraciones de TPH / OM 404 (200 mg/kg) Estatus de cumplimiento
		1.5	5.0	NR	NR	NR
		2.0	4.8	2.0	<50	C
04/12/12	QP-17	0.5	3.1	0.5	281	NC
		1.0	2.1	NR	NR	NR
		1.5	2.5	NR	NR	NR
		2.0	2.0	2.0	277	NC
04/12/12	QP-18	0.5	4.1	NR	NR	NR
		1.0	49.3	1.0	8718	NC
		1.5	7.0	NR	NR	NR

Notas:

1) PID = Detector Fotoionizante 2) TPH = Hidrocarburos Totales de Petróleo 3) COVs = Compuestos Orgánicos Volátiles 4) mbs = Metros bajo superficie
5) ppm = Partes por millón 6) <50 = No detectado sobre el valor reportado específico 7) mg/kg = miligramos por kilogramo
8) C = Cumple NC = No Cumple NR = No Registrado 9) Legislación Aplicable: Ordenanza Municipal 404 nivel de acción para remediación y recuperación para TPH 200 mg/kg. **Fuente:** SYR Geociencia, 2013

Análisis de Campo y Laboratorio – Muestras de Suelo / Mediciones de COVs con PID y Análisis de Laboratorio (TPH)						
Fecha	Identificación del punto de muestreo	Profundidad de la muestra de suelos para medición de COVs con PID (mbs)	Resultado de Mediciones de COVs con PID (ppm)	Profundidad de muestreo para análisis de TPH (mbs)	Resultados de Concentraciones de TPH (mg/kg)	Límite Máximo Permissible de Concentraciones de TPH / OM 404 (200 mg/kg) Estatus de cumplimiento
		2.0	47.4	NR	NR	NR
		2.5	38.4	NR	NR	NR
		3.0	17.5	NR	NR	NR
		3.5	10.7	NR	NR	NR
		4.0	4.8	NR	NR	NR
		4.5	12.4	4.5	321	NC
04/12/12	QP-21	0.5	2.1	NR	NR	NR
		1.0	4.0	1	<50	C
		1.5	3.6	NR	NR	NR

Notas:

1) PID = Detector Fotoionizante 2) TPH = Hidrocarburos Totales de Petróleo 3) COVs = Compuestos Orgánicos Volátiles 4) mbs = Metros bajo superficie
5) ppm = Partes por millón 6) <50 = No detectado sobre el valor reportado específico 7) mg/kg = miligramos por kilogramo
8) C = Cumple NC = No Cumple NR = No Registrado 9) Legislación Aplicable: Ordenanza Municipal 404 nivel de acción para remediación y recuperación para TPH 200 mg/kg. **Fuente:** SYR Geociencia, 2013

Análisis de Campo y Laboratorio – Muestras de Suelo / Mediciones de COVs con PID y Análisis de Laboratorio (TPH)						
Fecha	Identificación del punto de muestreo	Profundidad de la muestra de suelos para medición de COVs con PID (mbs)	Resultado de Mediciones de COVs con PID (ppm)	Profundidad de muestreo para análisis de TPH (mbs)	Resultados de Concentraciones de TPH (mg/kg)	Límite Máximo Permissible de Concentraciones de TPH / OM 404 (200 mg/kg) Estatus de cumplimiento
		2.0	1.8	2.0	<50	C
05/12/12	QP-45	0.5	14.1	0.5	<50	C
		1.0	7.4	NR	NR	NR
		1.5	2.8	NR	NR	NR
		2.0	2.1	2.0	<50	C
05/12/12	QP-46	0.5	6.1	NR	NR	NR
		1.0	15.9	NR	NR	NR
		1.5	5.7	NR	NR	NR

Notas:

1) PID = Detector Fotoionizante 2) TPH = Hidrocarburos Totales de Petróleo 3) COVs = Compuestos Orgánicos Volátiles 4) mbs = Metros bajo superficie
5) ppm = Partes por millón 6) <50 = No detectado sobre el valor reportado específico 7) mg/kg = miligramos por kilogramo
8) C = Cumple NC = No Cumple NR = No Registrado 9) Legislación Aplicable: Ordenanza Municipal 404 nivel de acción para remediación y recuperación para TPH 200 mg/kg. **Fuente:** SYR Geociencia, 2013

Análisis de Campo y Laboratorio – Muestras de Suelo / Mediciones de COVs con PID y Análisis de Laboratorio (TPH)						
Fecha	Identificación del punto de muestreo	Profundidad de la muestra de suelos para medición de COVs con PID (mbs)	Resultado de Mediciones de COVs con PID (ppm)	Profundidad de muestreo para análisis de TPH (mbs)	Resultados de Concentraciones de TPH (mg/kg)	Límite Máximo Permissible de Concentraciones de TPH / OM 404 (200 mg/kg) Estatus de cumplimiento
		2.0	55.0	2.0	129	C
		2.5	18.6	NR	NR	NR
		3.0	4.7	NR	NR	NR
		4.5	3.6	3.0	54	C
06/12/12	QP-47	0.5	849.0	0.5	503	NC
		1.0	19.8	NR	NR	NR
		1.5	73.4	NR	NR	NR
		2.0	20.7	NR	NR	NR
		2.5	21.0	NR	NR	NR
		3.0	14.4	NR	NR	NR

Notas:

1) PID = Detector Fotoionizante 2) TPH = Hidrocarburos Totales de Petróleo 3) COVs = Compuestos Orgánicos Volátiles 4) mbs = Metros bajo superficie
5) ppm = Partes por millón 6) <50 = No detectado sobre el valor reportado específico 7) mg/kg = miligramos por kilogramo
8) C = Cumple NC = No Cumple NR = No Registrado 9) Legislación Aplicable: Ordenanza Municipal 404 nivel de acción para remediación y recuperación para TPH 200 mg/kg. **Fuente:** SYR Geociencia, 2013

Análisis de Campo y Laboratorio – Muestras de Suelo / Mediciones de COVs con PID y Análisis de Laboratorio (TPH)						
Fecha	Identificación del punto de muestreo	Profundidad de la muestra de suelos para medición de COVs con PID (mbs)	Resultado de Mediciones de COVs con PID (ppm)	Profundidad de muestreo para análisis de TPH (mbs)	Resultados de Concentraciones de TPH (mg/kg)	Límite Máximo Permissible de Concentraciones de TPH / OM 404 (200 mg/kg) Estatus de cumplimiento
		3.5	5.3	NR	NR	NR
		4.5	3.9	4.5	<50	C
06/12/12	QP-48	0.5	28.6	0.5	<50	C
		1.0	5.8	NR	NR	NR
		1.5	7.0	NR	NR	NR
20/06/13	QP-59	0.5	11.0	NR	NR	NR
		1.0	350	NR	NR	NR
		1.5	29.6	NR	NR	NR
		2.0	36.3	NR	NR	NR
		2.5	20.2	NR	NR	NR
		3.0	25.2	NR	NR	NR
		3.5	18.9	NR	NR	NR
4.0	10.1	NR	NR	NR		

Notas:

1) PID = Detector Fotoionizante 2) TPH = Hidrocarburos Totales de Petróleo 3) COVs = Compuestos Orgánicos Volátiles 4) mbs = Metros bajo superficie
5) ppm = Partes por millón 6) <50 = No detectado sobre el valor reportado específico 7) mg/kg = miligramos por kilogramo
8) C = Cumple NC = No Cumple NR = No Registrado 9) Legislación Aplicable: Ordenanza Municipal 404 nivel de acción para remediación y recuperación para TPH 200 mg/kg. **Fuente:** SYR Geociencia, 2013

Análisis de Campo y Laboratorio – Muestras de Suelo / Mediciones de COVs con PID y Análisis de Laboratorio (TPH)						
Fecha	Identificación del punto de muestreo	Profundidad de la muestra de suelos para medición de COVs con PID (mbs)	Resultado de Mediciones de COVs con PID (ppm)	Profundidad de muestreo para análisis de TPH (mbs)	Resultados de Concentraciones de TPH (mg/kg)	Límite Máximo Permissible de Concentraciones de TPH / OM 404 (200 mg/kg) Estatus de cumplimiento
		4.5	13.7	4.5	<50	C
20/06/13	QP-60	0.5	2.0	NR	NR	NR
		1.0	1.5	NR	NR	NR
		2.0	1.9	2.0	93	C
20/06/13	QP-61	0.5	12.9	NR	NR	NR
		1.0	5.1	1.0	86	C
		1.5	4.0	NR	NR	NR
		2.0	2.1	2.0	<50	C

Notas:

1) PID = Detector Fotoionizante 2) TPH = Hidrocarburos Totales de Petróleo 3) COVs = Compuestos Orgánicos Volátiles 4) mbs = Metros bajo superficie
5) ppm = Partes por millón 6) <50 = No detectado sobre el valor reportado específico 7) mg/kg = miligramos por kilogramo
8) C = Cumple NC = No Cumple NR = No Registrado 9) Legislación Aplicable: Ordenanza Municipal 404 nivel de acción para remediación y recuperación para TPH 200 mg/kg. **Fuente:** SYR Geociencia, 2013

ANEXO 2 – ESTIMACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE INTERVENCIÓN PARA REMOCIÓN DE SUELO CONTAMINADO EN CADA PUNTO DE MONITOREO

Punto de monitoreo	Profundidad de la muestra de suelo para análisis de TPH (mbs)	TPH (mg/kg)	Ubicación de puntos de monitoreo laterales	Profundidad estimada de migración de los contaminantes en cada punto de monitoreo
NE2-S1	0.0	14200	<p>QP -16 se encuentra a 3.5 m al oeste de NE2-S1 y no registró concentraciones de TPH que requieran de medidas de remediación en ninguna de las profundidades analizadas</p> <p>QP-21 se encuentra a 3.8 m al este de NE2-S1 y no registró concentraciones de TPH que requieran de medidas de remediación en ninguna de las profundidades analizadas.</p>	<p>La contaminación en este punto es superficial y puntual como lo demuestran los resultados de las muestras laterales. La profundidad estimada para remediación de suelos alrededor de este punto será considerada de 1.0 mbs.</p>
NE2-S2	0.0	6150	<p>No se tomaron muestras laterales a este punto de monitoreo que facilite la delimitación del área contaminada alrededor de este punto sin embargo la muestra a 0.5 mbs se muestra atenuada por lo tanto no se espera una migración vertical de contaminantes hacia capas mucho más profundas</p>	<p>La contaminación en este punto es superficial sin embargo a 0.5 mbs se registran concentraciones de TPH que aunque se muestren atenuadas en comparación con las concentraciones de TPH registradas a nivel superficial, requieren de la aplicación de medidas de remediación en cumplimiento con la OM 404. Por lo tanto la profundidad estimada para remediación de suelos</p>
	0.5	474		

Punto de monitoreo	Profundidad de la muestra de suelo para análisis de TPH (mbs)	TPH (mg/kg)	Ubicación de puntos de monitoreo laterales	Profundidad estimada de migración de los contaminantes en cada punto de monitoreo
				será considerada de 1.0 mbs.
NE2-S3	0.0	2040	QP-16 fue tomado como un punto de monitoreo lateral de NE2-S3 y estuvo ubicado a aproximadamente a 1 metro al nor-este de NE2-S3.	La contaminación en este punto es superficial sin embargo a 0.5 mbs se registran concentraciones de TPH que aunque se muestren atenuadas en comparación con las concentraciones de TPH registradas a nivel superficial, requieren de la aplicación de medidas de remediación en cumplimiento con la OM 404. Por lo tanto la profundidad estimada para remediación de suelos será considerada de 1.0 mbs.
	0.5	800	QP-16 no mostró concentraciones de TPH que requieran de la aplicación de medidas de remediación a ninguna de las profundidades analizadas.	
NS3-S4	0.0	6740	No se tomaron muestras de suelo laterales en este punto de monitoreo debido a que se considera que en el mismo la contaminación es puntual y superficial.	La profundidad para remediación de suelo contaminado en esta área se asumirá a 0.5 mbs debido a que las concentraciones de TPH a 0.5 mbs muestran cumplimiento con la OM 404.
	0.5	200		
NS3-S5	0.0	14020	El punto de monitoreo QP-59 fue perforado como un punto lateral al punto de monitoreo NS3-S5. Este punto se localiza 2 metros al este de NS3-S5	Las concentraciones de TPH en este punto son altas hasta 2.0 mbs. La extensión vertical de la contaminación en este punto será considerada hasta 4-5 mbs debido a las altas concentraciones de TPH

Punto de monitoreo	Profundidad de la muestra de suelo para análisis de TPH (mbs)	TPH (mg/kg)	Ubicación de puntos de monitoreo laterales	Profundidad estimada de migración de los contaminantes en cada punto de monitoreo
	2.0	3272		todavía registradas a 2.0 mbs.
NS3-S6	0.5	3728	El punto de monitoreo QP-60 es un punto de monitoreo lateral ubicado a 2.4 m al este de NS3-S6.	Las concentraciones de TPH en este punto son altas hasta una profundidad de 1.0 mbs. La extensión vertical de la contaminación en este punto se estimará hasta 4.5 mbs debido a que la concentración de TPH todavía es alta a 1.0 mbs.
	1.0	4260		
QP-17	0.5	281	El punto de monitoreo QP-17 fue perforado como un punto lateral al punto de monitoreo NS2-S4. Este punto se localiza 5 metros al este de NS2-S4	Las concentraciones de TPH en este punto de monitoreo se encuentran ligeramente por encima del límite máximo permisible establecido en la OM 404, por lo tanto se considerará una profundidad de intervención de 2.0 mbs en este punto de monitoreo.
	2.0	277		
QP-18	1.0	8718	No se tomaron muestras laterales de este punto.	La extensión vertical de la contaminación en este punto se estimará ser de hasta 5.0 metros bajo superficie tomando en cuenta que los resultados de concentraciones de TPH a 4.5 muestran valores que requieren de la implementación de medidas de remediación en cumplimiento con la OM 404.
	4.5	321		

Punto de monitoreo	Profundidad de la muestra de suelo para análisis de TPH (mbs)	TPH (mg/kg)	Ubicación de puntos de monitoreo laterales	Profundidad estimada de migración de los contaminantes en cada punto de monitoreo
QP-47	0.5	503	No se tomaron muestras laterales para este punto. Este punto fue tomado a 4 metros desde el borde de la contención secundaria en el centro de la infraestructura del simulador.	Este punto de monitoreo estará incluido en el área de intervención de QP-18 por lo que se extraerá el suelo contaminado hasta 5 mbs en este punto.
	4.5	<50		

Fuente: SyR, 2012 y SyR, 2013.