

ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR VOLÚMENES
DE SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS

ADRIANA SERRANO SANTIAGO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2013

ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR VOLÚMENES
DE SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS

ADRIANA SERRANO SANTIAGO

Trabajo de aplicación para optar por el título de
Magíster en Ingeniería Ambiental

Director:

LEONARDO DAVID DONADO GARZON
Ingeniero Civil, Ph. D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2013

*A Dios, mi Madre, al ing. Mauricio y a Fer,
por su apoyo y sus sabias palabras.*

Gracias

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	17
1. CONTAMINACIÓN DE SUELOS	22
1.1 NORMATIVIDAD AMBIENTAL.....	22
1.2 HIDROCARBUROS COMO CONTAMINANTES.....	24
1.3 METODOLOGÍA PARA MANEJO DE SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS	27
1.4 Evaluación ambiental del sitio	29
1.4.1 Caracterización de suelo impactado.	30
1.4.2 Volumen de suelo impactado.	30
1.4.3 Remediación de suelo.....	31
2 MÉTODOS PARA EVALUACIÓN DE SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS.	33
2.1 MONITOREO EXPLORATORIO DEL SUELO	34
2.2 CARACTERIZACIÓN DE SUELOS DE ALTA RESOLUCIÓN	39
3 VOLUMEN DE SUELO IMPACTADO CON HIDROCARBURO EN EL ÁREA DE INTERÉS	46
3.1 METODOLOGÍA DESARROLLADA.....	46
3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA.....	48
3.3 METODOLOGÍAS APLICADAS EN EL AREA DE INTERES	53
3.3.1 Monitoreo exploratorio del suelo	53
3.3.2 Caracterización de suelos de alta resolución	61
4 RESULTADOS	73
5. CONCLUSIONES	76
BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXOS.....	82

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología para el manejo de suelos impactados con hidrocarburo	28
Figura 2 Esquema de los posibles recorridos para la toma de muestra	36
Figura 3. Procedimiento para el análisis de las metodologías de caracterización .	48
Figura 4. Distribución del porcentaje de hidrocarburo a diferentes profundidades	57
Figura 5. Perfiles de Concentraciones de hidrocarburo (%) a diferentes profundidades	58
Figura 6. Comportamiento de la concentración de HC a través de la profundidad del suelo.....	59
Figura 7. Registros arrojados por el equipo LIF: Punto A2 (Izq) y I2 (Der)	64
Figura 8. Distribución espacial de la respuesta (%) del equipo LIF por profundidad	65
Figura 9. Línea de correlación respuesta LIF vs concentración de hidrocarburo...	68
Figura 10. Áreas a remediar	71

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Sondeos ejecutados.....	54
Tabla 2. Resultados de análisis de textura en algunas muestras	56
Tabla 3. Áreas (m ²) según las concentraciones de hidrocarburo.....	60
Tabla 4. Volumen de suelo según la concentración de hidrocarburo.....	60
Tabla 5. Resume de los puntos de LIF más representativos	64
Tabla 6. Áreas según la respuesta del equipo LIF.....	67
Tabla 7. Puntos seleccionados para estimar el área a remediar	70
Tabla 8. Análisis comparativo de los resultados de las dos metodologías	74
Tabla 9 Ventajas y desventajas de las metodologías	75

LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Presentación del hidrocarburo en el agua.	25
Foto 2. Barreno manual	38
Foto 3. Barreno mecánico tipo oruga.....	39
Foto 4. Actividades de análisis del suelo	40
Foto 5. Panel eléctrico de LIF	43
Foto 6. Vista general del área de estudio (año 2002)	49
Foto 7. Vista general del área de estudio (2010)	50
Foto 8. Vista general del área de estudio (año 2012)	50
Foto 9. Ubicación de las perforaciones (en amarillo 1ra etapa, en verde 2da etapa)	55
Foto 10. Ubicación de los sondeos a profundidad de 1.5 m	55
Foto 11. Perforación exploratoria equipo mecánico y manual.	56
Foto 12. Localización de los puntos de investigación	62

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Concentraciones de hidrocarburo (%) muestreo superficial	83
Anexo B Porcentaje de concentración de hidrocarburo del muestreo profundo ...	87
Anexo C Contornos de la concentración de hidrocarburo a cada profundidad	89
Anexo D Respuesta máxima de puntos de investigación LIF	90
Anexo E Registros emitidos por el equipo LIF	98
Anexo F Datos de porcentaje de hidrocarburo según el porcentaje de respuesta LIF	103
Anexo G Presupuesto aproximado para aplicar las metodologías en el área.....	104

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR VOLÚMENES DE SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS

AUTOR: Adriana Serrano Santiago**

PALABRAS CLAVES: Suelo impactado, monitoreo de suelo, LIF, LNAPL, hidrocarburo

DESCRIPCION:

La industria petrolera aporta un evidente desarrollo económico y social a las regiones, tanto que, se ha convertido en unos de los principales motores de la economía nacional. Sin embargo, también genera diversos impactos ambientales a ecosistemas o comunidades, ocasionados por vertimientos de hidrocarburos propios de la operación o accidentales. Las empresas conscientes de su responsabilidad en la conservación y protección del entorno, dan cumplimiento a los requerimientos establecidos por las autoridades ambientales a lo referente en los monitoreos de calidad de recursos impactados, para implementar planes de control, mitigación o remediación.

La estimación del volumen y localización de suelos impactados por hidrocarburos en una zona es un proceso complejo, para el cual se han desarrollado metodologías las cuales facilitan el dimensionamiento de la zona y permiten evaluar y seleccionar tecnologías para manejo de estos suelos.

En este proyecto se realizó un análisis comparativo de dos metodologías aplicadas con el objetivo de delinear vertical y horizontalmente el volumen de suelo impactado con hidrocarburo en el área en donde se llevó a cabo un proceso de tratamiento de residuos aceitosos por un largo período de tiempo.

Las metodologías seleccionadas han obtenido buenos resultados en la delimitación de zonas afectadas con DNAPL y LNAPL. La primera se aplicó en 2010, la cual consistía en la típica metodología de perforaciones, toma de muestras y análisis en laboratorio, teniendo como referencia la observaciones de los suelos hallados durante las perforaciones. La segunda aplicada a principios del 2013, se considera una metodología relativamente nueva: inducción de fluorescencia por láser (LIF), una técnica in situ para la delineación vertical de NAPL, que en particular, puede detectar BTEX y PAHs en los materiales no consolidados.

*Proyecto de grado.

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director. Dr. Leonardo David Donado Garzón.

ABSTRACT

TITLE: COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODOLOGIES FOR ESTIMATING SOIL VOLUMES HYDROCARBON IMPACTED

AUTHORS: Adriana Serrano Santiago**

KEYWORDS: Soil impacted, soil monitoring, LIF, LNAPL, hydrocarbon

SUMMARY:

The oil industry provides an obvious economic and social development of regions, while, it has become one of the main drivers of the national economy. However, it also generates various environmental impacts to ecosystems and communities, Oil spills caused by themselves or accidental operation. Companies aware of their responsibility in the conservation and protection of the environment, are in compliance with the requirements established by environmental authorities regarding quality monitoring in resources impacted, to implement control plans, mitigation or remediation.

The estimate of the volume and location of hydrocarbon impacted soils in an area is a complex process, for which methodologies have been developed which facilitate the design of the area and to evaluate and select technologies for management of these soils.

In this project we conducted a comparative analysis of two methodologies in order to delineate the volume vertically and horizontally hydrocarbon impacted soil in the area where they carried out a process of oily waste treatment for a long period of time.

The selected methodologies have been successful in delineating affected areas with DNAPL and LNAPL. The first was implemented in 2010, which consisted of the typical methodology of drilling, sampling and laboratory analysis, with reference to the observations of the soils encountered during drilling. The second applied in early 2013, is considered a relatively new approach: laser induced fluorescence (LIF), a technique for in situ NAPL vertical delineation, which in particular, can detect BTEX and PAHs in unconsolidated materials.

*Graduation Project.

**Physicochemical Faculty. Chemical Engineering School. Director: Dr. Leonardo David Donado Garzón

GLOSARIO

BTEX: es un acrónimo para algunos de los compuestos orgánicos volátiles (COV) que se encuentran en el petróleo derivados, Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos, los cuales suelen tener efectos dañinos sobre el sistema nervioso central. Los BTEX son notorios debido a la contaminación del suelo y aguas subterráneas con estos compuestos.

CDI: Compuestos químicos contaminantes de interés que puedan afectar la salud humana o el ecosistema cercano

Compuestos Cancerígenos: Aquellos químicos sobre los que existen evidencias científicas suficientes que podrían causar cáncer

Compuestos no Cancerígenos: Aquellos químicos que podrían causar enfermedades diferentes al cáncer tales como efectos al sistema neurológico, al hígado, a los riñones

Concentración de referencia: Es una estimación (con una incertidumbre que abarca posiblemente un orden de magnitud) de una exposición continua a la población humana (incluyendo subgrupos sensitivos) que seguramente no tengan un riesgo apreciable de efectos dañinos durante la vida de exposición.

Contaminación: Es la alteración del medio ambiente por sustancia o forma de energía puestas allí por la actividad humana o de la naturaleza en cantidades, concentraciones o niveles capaces de interferir con el bienestar y la salud de las personas, atentar contra la flora y fauna, degradar la calidad del medio ambiente o afectar los recursos de la Nación o particulares. Ley 23/ 73.

Densidad: Magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo

DNAPL: Líquido no acuoso de alta densidad, más denso que el agua y es inmisible o no se disuelve en agua. Es utilizado para describir contaminantes en aguas subterráneas, aguas superficiales y sedimentos. Los DNAPLs tienden a hundirse por debajo del nivel freático cuando se derraman en cantidades significativas y sólo se detienen cuando alcanzan sustrato impermeable. Ejemplos: disolventes clorados (tricloroetileno, tetracloroetileno), alquitrán de hulla, bifenilos policlorados (PCBs), mercurio, crudo extra pesado)

Fuente: Compuesto(s) de interés en medios tales como suelo, agua subterránea, agua superficial, sedimentos, en una concentración tal que pueda generar contaminación

HC: Hidrocarburo. Compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. La estructura molecular consiste en un armazón de átomos de carbono a los que se unen los átomos de hidrógeno. Los hidrocarburos extraídos directamente de formaciones geológicas en estado líquido se conocen comúnmente con el nombre de petróleo, mientras que los que se encuentran en estado gaseoso se les conoce como gas natural. La explotación comercial de los hidrocarburos constituye una actividad económica de primera importancia, pues forman parte de los principales combustibles fósiles, así como de todo tipo de plásticos, ceras y lubricantes.

Impacto: Efecto de alguna operación en un sitio que altere el medio ambiente en sus distintos aspectos

LGBRs: Límite Genérico Basado en Riesgo. Estos límites se seleccionan teniendo en cuenta los receptores sensibles actuales y futuros del sitio, así como las vías

de exposición más probables. Si las concentraciones de los componentes están por debajo de los LGBRs, se puede concluir que el sitio no representa ningún riesgo para la salud humana.

LIF: Fluorescencia Inducida por Láser. Es un método aplicado en campo que permite en tiempo real proporcionar información muy detallada, cualitativa a semicuantitativa sobre la distribución de la contaminación de petróleo del subsuelo que contiene hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs).

LNAPL: Líquido no acuoso con densidad menor que el agua. Una vez que se infiltra el LNAPL a través del suelo, llegará a la altura del nivel freático, por lo tanto el esfuerzo para localizar y eliminar LNAPL es relativamente más fácil y más barato que DNAPL. Ejemplos: gasolina, benceno, tolueno, xileno, y otros hidrocarburos

Metales Pesados: Se refiere a aquellos metales cuyo peso específico es superior a 5 g/cm^3 o que tienen un número atómico por encima de 20, excluyendo a los metales alcalinos y elementos alcalinotérreos. Sin embargo, hay una serie de elementos que en alguna de sus formas pueden representar un serio problema medioambiental y es común referirse a ellos con el término de "metales pesados". Los metales pesados tóxicos más conocidos son el mercurio, el plomo, el cadmio y el arsénico, en raras ocasiones, algún no metal como el selenio. A veces también se incluye otros elementos tóxicos más ligeros, como el berilio o el aluminio. Los metales pesados se encuentran libres y de forma natural en algunos ecosistemas y pueden variar en su concentración.

Metodología: Hace referencia al conjunto de procedimientos racionales utilizados para cumplir ciertos objetivos que rigen en una investigación científica, alternativamente puede definirse como el estudio o elección de un método pertinente para un determinado objetivo.

PAHs: Hidrocarburos policíclicos aromáticos. Contienen anillos aromáticos fusionados y no contiene carbón, ni hidrogeno, o sustituyentes (que sustituyen el hidrógeno en los anillos de HC).

Puntos Calientes: Cualquier muestra de suelo o sedimentos que registre concentraciones de 10 a 100 veces por encima de los límites genéricos basados en riesgos. Estos puntos deben ser remediados o evaluados en más detalle.

Receptor: Un ecosistema o población humana ubicada cerca o dentro del sitio afectado.

Remediar: Mitigar un riesgo o arreglar un daño.

Riesgo: Potencial de que se materialice un daño. Potencial de que se materialice un daño. Probabilidad de que un contaminante presente en el suelo entre en contacto con algún receptor con consecuencias adversas para la salud de las personas o el medio ambiente.

Suelo: Sistema natural desarrollado o desarrollándose a partir de una mezcla de materiales y restos orgánicos, bajo la influencia del clima y del medio biológico; es un sistema de tres fases (sólida, líquida y gaseosa), que se diferencia en horizontes y sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas.

TPH: Hidrocarburos totales del petróleo.

Vía: Un mecanismo por el cual los seres humanos pueden tener contacto con los CDI. Ejemplo: contacto directo de la piel con el suelo, ingestión de agua subterránea o superficial, inhalación de vapores.

Volatilizar: Transformar espontáneamente en vapor.

INTRODUCCION

Del petróleo se dice que es el energético más importante en la historia de la humanidad; un recurso natural no renovable que aporta el 60% del total de la energía que se consume en el mundo. Aunque se conoce de su existencia y utilización desde épocas milenarias, la historia del petróleo como elemento vital y factor estratégico de desarrollo es relativamente reciente, de menos de 200 años (Zamora y Ramos, 2010).

La industria petroquímica surge de la necesidad de obtener una serie de derivados del petróleo, y básicos para otras empresas. Su importancia deriva de la gran variedad de compañías a las que abastece, entre ellas la de fertilizantes, fibras sintéticas, plásticos, llantas, jabones y detergentes, artículos para el hogar, empaques, entre otras (Ayllon y Chávez, 1994).

En Colombia, desde hace más de 80 años la actividad petrolera aporta un evidente desarrollo económico y social a las regiones en donde se cuenta con instalaciones de producción, extracción, refinación y transporte de petróleo y sus derivados, tanto que se ha convertido en unos de los principales motores de la economía nacional. Sin embargo, la industria petrolera también genera diversos impactos ambientales a ecosistemas o comunidades, ocasionados por vertimientos de hidrocarburos propios de la operación o accidentales, ya sea por deterioro en las tuberías de transporte de productos, fallas en los sistemas de almacenamiento de hidrocarburo, manejo de los residuos aceitosos o bien por ataques a la infraestructura petrolera.

Aunque la mayoría de los eventos de contingencias asociadas a las operaciones de los productos de petróleo y sus derivados han impactado a los suelos, identificado como un problema ambiental importante en varias regiones del

mundo, actualmente existe un creciente interés en la posible contaminación de las aguas subterráneas como resultado de las operaciones de exploración y producción de petróleo y gas.

Las empresas petroleras en su compromiso con el medio ambiente, conscientes de su responsabilidad en la conservación y protección del entorno, dan cumplimiento a los requerimientos establecidos por las autoridades ambientales a lo referente en los monitoreos de calidad de recursos impactados, para implementar planes de control, mitigación o remediación, en caso de ser necesario.

La estimación de la cantidad y localización espacial de suelos impactados por vertimientos de hidrocarburos en una zona es un proceso complejo, para el cual se han desarrollado diferentes metodologías que permiten diagnosticar volúmenes de suelos con distintas concentraciones de compuestos contaminantes. Estas metodologías facilitan el dimensionamiento de la zona impactada y proporcionan información para la evaluación y selección de tecnologías para determinar la estrategia de manejo, que se ajuste tanto al presupuesto como al tiempo disponible para la realización de las actividades de manejo de los suelos impactados.

En este proyecto se realizó un análisis comparativo de dos metodologías aplicadas con el objetivo de delinear vertical y horizontalmente el volumen de suelo impactado con hidrocarburo en el área en donde se llevó a cabo un proceso de tratamiento de residuos aceitosos por un largo período de tiempo.

Para lograr lo anterior, se llevó a cabo el diagnóstico y caracterización de la zona impactada para confirmar o descartar la presencia de compuestos químicos en el suelo que puedan afectar la salud humana o el ecosistema cercano. De igual manera se analizarán las dos metodologías planteadas para cuantificar el volumen

de suelo impactado en el área de interés. Finalmente, se realizó un análisis de correlación de los resultados obtenidos para definir la metodología que permita delimitar con mayor precisión la extensión de las áreas impactadas con determinada concentración de contaminantes, y adicionalmente confirmar los volúmenes de suelo que requieren una acción correctiva.

En los diversos capítulos del presente documento se describe las actividades relevantes para lograr el análisis comparativo de las dos metodologías para estimar el volumen de suelos impactados. En el Capítulo Uno se indica un breve resumen de la normatividad ambiental con respecto a la protección del suelo. En Colombia, no se cuenta con normatividad que regule concentraciones máximas permisibles de diferentes compuestos contaminantes de acuerdo con el uso del suelo, por lo tanto los estudios ambientales tienen como referencia los límites indicados en normas internacionales a la hora de diagnosticar, mitigar y controlar los impactos causados, así como sancionar a los responsables en caso de registrar algún evento de afectación.

De igual manera, se presenta el análisis de riesgos como metodología para el manejo de suelos afectados por hidrocarburo, el cual se puede definir como el conjunto de operaciones realizadas con el objetivo de controlar, mitigar, tratar y remediar los suelos. Esta metodología protege a los seres humanos, constituye un proceso científico para evaluar sitios y soporta técnicamente las decisiones administrativas y judiciales, ya que se basa en un procedimiento de mayor costo-beneficio para el análisis y recuperación de sitios impactados (MAVDT, 2008).

En el Capítulo Dos se describen las dos metodologías seleccionadas para la evaluación de suelos afectados, estas se seleccionaron porque, según la revisión bibliográfica, se han obtenido buenos resultados en la delimitación de zonas afectadas con DNAPL y LNAPL. Una de ellas es la típica metodología de perforaciones, toma de muestras y análisis en laboratorio, que permite obtener

suelo a diferentes profundidades, teniendo como referencia las observaciones de los suelos hallados en el momento de las perforaciones

La otra, se considera una metodología relativamente nueva: inducción de fluorescencia por láser (LIF) (Kram, et al 2001). Una rápida técnica in situ para la delimitación vertical de NAPL, que en particular, puede detectar compuestos aromáticos (BTEX) e Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAHs) en los materiales no consolidados. Es una técnica semicuantitativa que se usa preferentemente para la detección de focos de compuestos de petróleo en fase libre (García, 2005).

El sitio de interés en donde se aplicaron las dos metodologías corresponde a un terreno en el cual se manejó y trató material impregnado con hidrocarburos, en el Capítulo Tres se describe en forma general el sitio; y allí mismo se presenta el procedimiento que se llevó a cabo para realizar el análisis comparativo de las metodologías aplicadas para estimar el volumen de suelo impactado con hidrocarburos.

La primera metodología incluyó perforaciones, toma de muestras de suelo para análisis en laboratorio; y descripción litológica y organoléptica de la columna de suelo, registrando los cambios de perfil y características del suelo. La caracterización se adelantó en dos etapas, en la primera de ellas, en el año 2009, se ejecutaron perforaciones aleatorias para monitorear los parámetros de interés a diferentes profundidades y dimensionar el estado de los suelos en la zona en estudio, y la segunda etapa, en el año 2010 para detallar las concentraciones de hidrocarburos detectadas en la etapa I, la cual incluyó dos fases: una de ellas sondeos manuales para conocer las concentraciones de la zona hasta 1.50 m de profundidad, en tanto que la otra fase involucró sondeos mecánicos para detallar las zonas con concentraciones de hidrocarburos a mayores profundidades.

La segunda metodología se aplicó a principios del año 2013, llamada Caracterización de Alta Resolución (HRSC) con un equipo UVOSTTM involucrando el hincamiento de una sonda con inducción de fluorescencia por láser (LIF), para captar información continua en tiempo real de las condiciones ambientales del suelo presente en el sitio. El resultado se presenta en porcentaje de intensidad de respuesta de la inducción de fluorescencia en los Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAHs) presentes (en concentraciones bajas y moderadas). Para correlacionar el porcentaje de respuesta de la herramienta LIF, se tomaron muestras de suelo para evaluar el contenido de hidrocarburo y poder relacionar cuantitativamente los resultados del LIF.

Finalmente, en el Capítulo Cuatro se presenta los resultados del estudio; en donde se destaca que las metodologías de caracterización logran los lineamientos para la evaluación de las condiciones ambientales del sitio, que sumado a una caracterización cuantitativa de las concentraciones de los compuestos de interés, permitirán delimitar la extensión del área impactada, que requerirá intervención para llevarla a los límites seguros y aceptables por la autoridad ambiental competente. Además, por medio de la aplicación de metodologías específicas y equipos diseñados para tal fin, es posible generar el modelo conceptual del sitio para respaldar la toma de decisiones, dado que reduce los riesgos en la estimación de la localización y volumen de material impactado, costos del ciclo de vida de los proyectos.

1. CONTAMINACIÓN DE SUELOS

1.1 NORMATIVIDAD AMBIENTAL

Contaminación es la alteración del medio ambiente por sustancias puestas allí por la actividad humana o de la naturaleza en cantidades, concentraciones o niveles capaces de interferir con el bienestar y la salud de las personas, atentar contra la flora y fauna, degradar la calidad del medio ambiente o afectar los recursos de la Nación o particulares, según la Ley 23/1973.

En la Constitución Política de Colombia se observa el interés por mantener un ambiente saludable para los ciudadanos y la protección de los recursos naturales, tal como se indica en el Art 79 “todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano”, de igual manera se deja claro en el mismo documento en el Art 95 que es deber del ciudadano “proteger los recursos naturales y velar por la conservación del ambiente”.

Por lo anterior, se reglamenta en el Art. 96 del Decreto 1594/84, que todos aquellos usuarios que exploren, exploten, manufacturen, refinen, transformen, procesen, transporten o almacenen hidrocarburo o sustancias nocivas para la salud y para los recursos hidrobiológicos, deberán estar provistos de un plan de contingencia para la previsión y control de derrames el cual evite contaminar o afectar el bienestar o la salud de las comunidades o el ambiente. De lo contrario, aquellas personas que contaminen ilícitamente el ambiente, incurrirán, sin perjuicio de las sanciones administrativas a que hubiere lugar y siempre que el hecho no constituya otro delito, como se indica el Artículo 247 del Código Penal.

Debido a que el recurso suelo hace parte fundamental de los ecosistemas terrestres, no se cuenta de forma específica con alguna Ley o Decreto a nivel

nacional sobre la contaminación del suelo, sino que existe normatividad de ámbito regional o local (Resoluciones) emitidas por las Corporaciones Regionales respectivas (Tosse, 2003).

La normatividad ambiental a nivel mundial con respecto a la protección del recurso suelo, es relativamente nueva, debido a que a este recurso se le atribuía una capacidad de autodepuración casi infinita, hasta mediados de la década de los 70's en la "Carta europea de suelos", es que se define al suelo como uno de los más preciados activos de la humanidad, sobre el que viven hombres, animales y plantas; calificándolo como fácilmente destructible y por ende, la necesidad urgente de generar acciones tendientes a su conservación (Silva y Correa, 2009). En 1992, en la cumbre de Río de Janeiro se reconoce la importancia de la protección del suelo para alcanzar un desarrollo sostenible, haciendo énfasis en la prevención y control de acciones antrópicas que generan procesos de contaminación y degradación.

Actualmente, en Colombia no se cuenta con normatividad que regule concentraciones máximas permisibles de diferentes compuestos de interés de acuerdo con el uso del suelo, por lo tanto los estudios ambientales tienen como referencia los límites indicados en normatividades tales como, Louisiana Code 29B, norma canadiense (Alberta Environment) y la norma holandesa, por ejemplo.

Adicionalmente, la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) a partir de investigación, ha emitido diversas normativas en donde se establecen los límites máximos permisibles de concentración de contaminantes en el suelo, con el fin de que se tengan en cuenta a la hora de diagnosticar, mitigar y controlar los impactos causados, así como sancionar a los responsables en caso de registrar algún evento de afectación.

1.2 HIDROCARBUROS COMO CONTAMINANTES

La operación de las actividades de exploración, producción, refinación y almacenamiento de crudo, genera frecuentemente impacto ambiental negativo al ambiente, ocasionados por vertimientos de hidrocarburos propios de la operación o en algunos casos accidentales, ya sea por deterioro en las tuberías de transporte de productos, fallas en los sistemas de almacenamiento de hidrocarburo, manejo de residuos aceitosos o bien, por ataques a la infraestructura petrolera; de igual forma por lavado de aglutinantes de caminos asfaltados y riegos con aceites residuales para evitar el polvo en vías no asfaltadas, entre otros. Todos los anteriores tienen potencial riesgo de lixiviación de algunos compuestos de hidrocarburos impactando suelos y cuerpos de aguas superficiales y subterráneas.

Los hidrocarburos son compuestos formados por átomos de carbono e hidrógeno de gran abundancia en la naturaleza, presentes principalmente en el petróleo; se consideran como una mezcla compleja de gases y líquidos, existiendo cantidades combinadas de nitrógeno, oxígeno y azufre, además de contener compuestos metales como hierro, níquel, vanadio, entre otros.

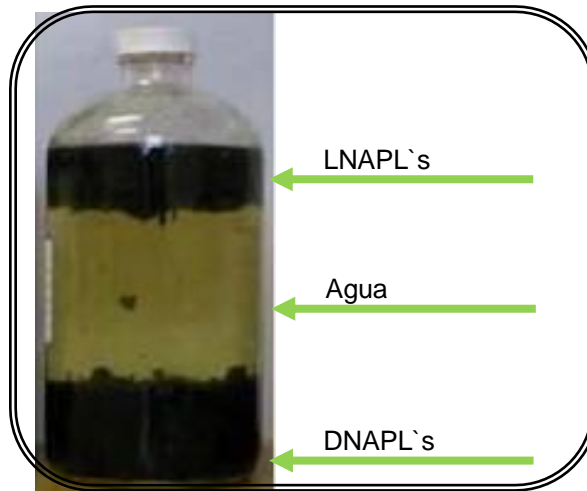
El comportamiento de los hidrocarburos como contaminante en el suelo es muy difícil de prever ya que intervienen una gran variedad de factores tanto del suelo (tipo de suelo, parámetros de adsorción, permeabilidad, tamaño de las partículas, contenido de humedad, contenido de materia orgánica, profundidad del nivel del agua, gradiente hidráulico), como del propio contaminante (características fisicoquímicas, densidad, volatilidad solubilidad y viscosidad).

La característica que determina los procesos de transporte del contaminante en el acuífero y en el suelo es la densidad del hidrocarburo, conocidos por sus siglas en inglés como LNAPLs (líquido no acuoso de baja densidad) o DNALPs (líquido no

acuoso de alta densidad). Ejemplo de ello es que mientras las gasolinas, naftas y aceites que son de baja densidad tienden a formar una capa en forma de nata en el nivel freático y se mueven horizontalmente en la dirección del flujo del agua subterránea moviéndose fácilmente por el subsuelo, el crudo y fueloil, (los cuales son más densos que el agua), lo hacen más lentamente. Éstos tenderán a penetrar por la zona saturada, venciendo las fuerzas de presión de los poros; por lo tanto, a causa de los efectos de capilaridad y de la diferencia de densidades, el desplazamiento es inestable dentro de la zona saturada del acuífero. (Sahuquillo, 1999).

En la Foto 1 se presenta un ejemplo del comportamiento de los LNAPL's y los DNAPL's en el agua, observándose la separación marcada entre ellos.

Foto 1. Presentación del hidrocarburo en el agua.



Los contaminantes del suelo se pueden dividir en dos grandes grupos: orgánicos e inorgánicos. Entre los contaminantes orgánicos se encuentran principalmente compuestos del grupo BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), fenoles, policlorobifenilos (PCBs), hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), entre otros. Mientras que en los contaminantes inorgánicos se estacan los metales

pesados, los cuales se pueden clasificar en dos grupos, en tóxicos a altas concentraciones como lo son el cobre, zinc, manganeso, hierro y cromo; o los tóxicos a bajas concentraciones tal como el cadmio, mercurio, plomo, níquel, selenio y arsénico (Nápoles, 2006)

Los problemas de contaminación del suelo en su mayoría ocurren por descuido, negligencia o falta de conciencia, y el problema aumenta debido a la creciente industrialización y al uso de sustancias químicas y materiales cuya estructura es cada vez más compleja. Para proteger la calidad del agua y los ecosistemas cercanos a un área impactada con hidrocarburo, es importante poder delimitar la zona afectada de la manera más rápida y completa, de esta forma poder implementar rápidamente las acciones de control y/o de remediación adecuadas, ya que al transcurrir el tiempo el hidrocarburo fluye junto con el agua subterránea ampliando el área impactada que requerirá acciones correctivas de manejo, incrementando tiempos y costos para lograrlo.

Con el fin de llevar a cabo una evaluación de los posibles daños ambientales en áreas impactadas con productos derivados del petróleo, se debe realizar la caracterización de sus suelos y aguas superficiales y subterráneas, analizando su estado con las posibles fuentes contaminantes conocidas. Se han publicado muchos estudios sobre identificación de la fuente de la contaminación ambiental en diferentes sitios, entre ellos, la identificación de compuestos de hidrocarburos, el planteamiento de patrones de distribución de hidrocarburos, la determinación de los coeficientes de interés específicos del petróleo y la aplicación de diversos análisis estadísticos y numéricos (Ricardi, 2008).

Sin embargo, el diagnóstico de los potenciales daños ambientales generados en un sitio impactado con hidrocarburo se debe basar en la evaluación del riesgo, la cual ha sido reconocida internacionalmente como la mejor herramienta para hallar la relación costo-beneficio de un método de manejo, (control y/o mitigación y/o

remediación) para sitios impactados. Esta herramienta implica la identificación de los posibles efectos adversos para la salud que es causada por sustancias químicas de interés presentes en un sitio, y con ello determinar la necesidad de medidas correctivas o el desarrollo de los niveles objetivo hasta donde se debe llegar al implementar una acción correctiva (Carlson, et al 2000)

Para implementar una medida de manejo adecuada, se plantean escenarios correctivos para evaluar la viabilidad, los costos, beneficios y los efectos adversos que se puedan presentar. Estas predicciones se pueden hacer usando modelos matemáticos, los cuales varían de acuerdo con el enfoque que han sido propuestos; pueden ser desde simples modelos analíticos a sofisticados modelos de alta resolución en 3D. La selección del que más se ajuste al sitio de interés está dada por las limitaciones en los datos disponibles para alimentar al modelo y el costo operacional del mismo.

Debido a la heterogeneidad significativa del subsuelo, es difícil cuantificar y evaluar el alcance y la distribución de los contaminantes así como los parámetros químicos y biológicos que controlan la migración y la persistencia en el subsuelo del contaminante (Stroo et al, 2003).

1.3 METODOLOGÍA PARA MANEJO DE SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS

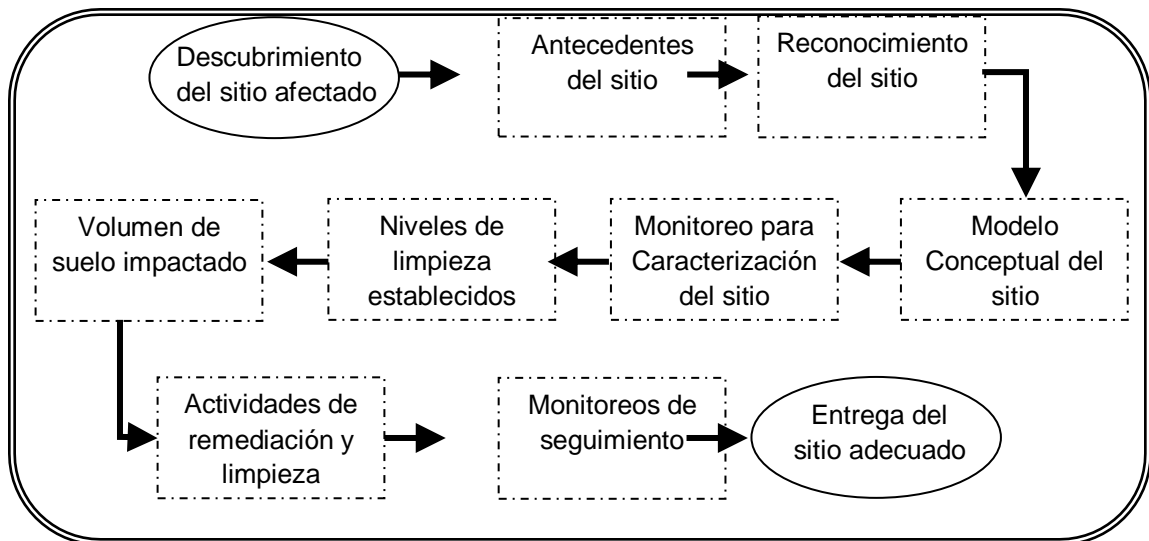
El manejo (control, mitigación, tratamiento y remediación) de suelos contaminados, se puede definir como el conjunto de operaciones realizadas con el objetivo de controlar, disminuir o eliminar los contaminantes presentes (Coria, 2007). Antes de dar inicio a actividades de remediación, es conveniente establecer los niveles de limpieza hasta donde se debe llegar, de acuerdo con los diferentes usos definidos para el terreno (actuales o futuros), la población que esté ubicada o pueda llegar a ubicarse en el sitio, la geología, hidrografía, hidrogeología y la

geografía, para estimar el volumen de suelo que requiere manejo. Este análisis preliminar se basa en un proceso de análisis de riesgos.

El análisis de riesgos es una metodología estandarizada, probada y aprobada en varios países con experiencia en manejo ambiental de sitios impactados y contaminados, que protege a los seres humanos, constituye un proceso científico para evaluar sitios y suministra un sustento técnico para decisiones administrativas y judiciales. Además, constituye un procedimiento de mayor costo-beneficio que los procedimientos tradicionales para el análisis y recuperación de sitios impactados con hidrocarburos (MAVDT, 2008).

En la Figura 1 se presenta un esquema general de la metodología a seguir para el manejo de sitios impactados

Figura 1. Metodología para el manejo de suelos impactados con hidrocarburo



Fuente: Modificado por el Autor del Manual del MAVDT

La integración de las tecnologías para un adecuado manejo, debe reducir al mínimo el costo de alcanzar los valores de concentración finales basados en el

riesgo, mediante la selección de tratamiento o combinaciones de tecnologías que, cuando se acoplen entre sí, trabajen de manera sinérgica (Rao, et al 2002).

1.4 Evaluación ambiental del sitio

En esta etapa de proceso, se realizan las observaciones que permiten caracterizar el suelo afectado, determinar el origen y persistencia de la fuente de los compuestos de interés e identificar los posibles impactos al ambiente y a la salud humana, en terrenos de uso industrial y comercial. Se dejan claro los objetivos, los fundamentos legales e información sobre los usos actuales y futuros del suelo.

Esta fase incluye cuatro (4) componentes:

- Entrevistas a los operadores, propietarios y demás personal que puedan estar afectados, con el objetivo de identificar todos los posibles derrames, vertimientos y operaciones que pudiesen haber generado impacto de los suelos y aguas subterráneas.
- Reconocimiento del sitio, para obtener información que indica la probabilidad de identificar condiciones ambientales reconocidas en relación con la propiedad, y de esta forma, realizar las inspecciones necesarias.
- Revisión de la información con el fin de desarrollar una historia (antecedentes) de los usos anteriores de la propiedad y sus alrededores, identificar la probabilidad de los usos a las condiciones ambientales reconocidas.
- Modelo conceptual del sitio, para describir todas las fuentes de compuestos de interés (hidrocarburos) conocidas o sospechosas, las vías en las que podrían moverse (ingestión, inhalación, contacto dérmico, lixiviación, etc) y los posibles receptores de los contaminantes, tanto humana como biótica. Además, se deberá señalar la posibilidad de que los compuestos de interés hayan migrado afuera de los límites del área de estudio.

1.4.1 Caracterización de suelo impactado.

La caracterización es un componente crítico para establecer el plan de manejo de sitios afectados con hidrocarburos, debido a que esta etapa proporciona información que se requiere para llevar a cabo las evaluaciones de riesgos y para el diseño y la implementación de sistemas de remediación para los volúmenes de suelos que lo requieran (Brusseau, 2004).

Esta fase tiene como objetivo confirmar o no la presencia de compuestos en concentraciones que puedan llegar a ocasionar contaminación, determinar si hay presencia de producto en estado libre o confinado en las diferentes matrices que se encuentran en el sitio (suelo, agua subterránea, agua superficial, sedimento o vegetación). Esto incluye la identificación de los tipos de compuestos de interés presentes, la cantidad y la ubicación de las zonas impactadas, y las fases en las que se está produciendo.

La confirmación se realizará mediante monitoreo y toma de muestras para caracterizar la concentración de hidrocarburo presente en las matrices. Sin embargo existen numerosas metodologías disponibles en la actualidad para la detección y la delimitación de la distribución de los suelos y las aguas impactadas, así como la determinación de la presencia de DNAPLs y/o LNAPLs bajo la superficie, que incluyen la convencional construcción de pozos de monitoreo y registro del suelo del pozo, así como nuevos métodos de investigación como trazadores y métodos de empuje directo.

1.4.2 Volumen de suelo impactado.

Con el fin de definir un plan de manejo y eliminación de suelos impactados es necesario diagnosticar el volumen de suelo impactado (determinar si se encuentra impregnado) y presentar alternativas de manejo y remediación, para acordar con

las autoridades ambientales y rehabilitar la zona para usos futuros. El volumen del suelo afectado se estima mediante la distribución espacial de las concentraciones arrojadas por los análisis de laboratorio realizadas a las muestras de suelo tomadas en la etapa de caracterización, obteniendo un modelo matemático en 2D o 3D del sitio identificando cada uno de los compuestos de interés.

Teniendo en cuenta la información suministrada de diversas metodologías de caracterización se pueden generar modelos conceptuales del sitio y realizar análisis multivariado guiado hacia la distribución de las sustancias o compuestos de interés de manera cualitativa. Hay varios métodos multivariados para la identificación de compuestos naturales y antropogénicos en el suelo, que suelen usarse en la mayoría de veces de forma combinada.

De los numerosos métodos de distribución espacial de variables que se pueden usar para representar una contaminación en especial, kriging ha demostrado ser eficaz para la caracterización de la evaluación del riesgo desde un conjunto de datos relativamente pequeño (Critto, 2003).

1.4.3 Remediación de suelo

Las técnicas más recientes de evaluación de suelos impactados que permitan definir el plan para la recuperación del área se fundamentan en la metodología de análisis de riesgo, presentada en la norma ASTM E1739/95. Esta metodología se basa en el riesgo total que presentan a la salud humana y al medio ambiente la sumatoria de riesgos individuales que generan los agentes químicos presentes en un sitio impactado. Una primera evaluación compara los valores de los compuestos de manera individual hallados en suelo con los valores de referencia permitidos por la autoridad ambiental o los interesados de la zona de influencia, los cuales suelen ser conservadores.

Cada sitio puede analizarse en términos de un juego limitado de características fundamentales y de una solución que sea efectiva en cuanto a los costos de dichas características. Las opciones de remediación para sitios contaminados, dependen de cuatro consideraciones generales (Volke, et al 2002):

- El tipo de compuesto y sus características físicas y químicas determinan si un sitio requiere ser remediado y la manera en la que la sustancia o compuesto de interés debe tratarse. Además, dichas propiedades determinan cómo puede ser el movimiento de la sustancia de interés y si éste es o no es persistente en el ambiente. La estructura química de un compuesto determina su toxicidad y por consiguiente permite fijar ciertos criterios para establecer los límites de limpieza.
- La localización y las características del sitio, así como el uso de suelo (industrial, residencial o agrícola), fundamentalmente afectan la meta de la limpieza y los métodos que pueden emplearse para alcanzarla.
- Las características naturales de los suelos, sedimentos y cuerpos de agua, a menudo determinan las particularidades de los sistemas para manejo de los suelos. Para suelos o lodos, el manejo del material a tratar, es el paso crítico en la mayoría de los procesos de tratamiento. Los pre-tratamientos para modificar las características naturales de un suelo contaminado pueden ser componentes muy costosos en un proceso de remediación.
- Las capacidades de las tecnologías de remediación pueden variar ampliamente en función de las condiciones específicas del sitio. Las tecnologías de remediación pueden actuar de diferentes maneras (conteniendo la contaminación por ejemplo), separando el contaminante o destruyendo el contaminante. El uso de una tecnología en particular depende, además de los factores mencionados, de su disponibilidad, fiabilidad, estado de desarrollo (laboratorio o escala piloto) y de su costo.

2 MÉTODOS PARA EVALUACIÓN DE SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS.

Los productos de petróleo refinado se obtienen por destilación de petróleo crudo, y contienen una amplia gama de componentes tales como hidrocarburos, metales pesados, aditivos colorantes, antioxidantes, inhibidores de corrosión, etc. (Kaplan et al, 1997). Es difícil caracterizar un suelo contaminado con estos productos para localizar y delinear el área impactada, debido a que la heterogeneidad del suelo y el movimiento del agua subterránea alteran las distribuciones espaciales complejas que presentan los LNAPL a medida que migran a través del subsuelo. Tanto así, que aún los métodos geofísicos no han demostrado ser útiles para localizar en resoluciones significativas los LNAPL, a pesar de los avances en esta área del conocimiento, como tampoco han demostrado su efectividad las pruebas con trazadores entre los pozos (Stroo et al., 2003).

Sin embargo, existen numerosas metodologías disponibles en la actualidad que se aproximan a la detección y la delimitación de la distribución de LNAPLs bajo la superficie, que incluyen la construcción de pozos de monitoreo y registro del suelo, así como métodos de investigación que proporcionan información más detallada mediante la emisión de luz ultravioleta (UV LED). Los métodos han sido seleccionados porque han demostrado resultados aceptables en la delimitación de zonas impregnadas, la primera: toma de muestras y análisis en laboratorio es una metodología que se ha probado ampliamente, la segunda se considera una metodología relativamente nueva: inducción de fluorescencia por laser (Kram, et al 2001).

Según la literatura, varios métodos puede ser complementarios en un plan de descripción de un sitio en general, el número de combinaciones de metodologías

de caracterización disponible y opciones posibles es extenso. Un ejemplo de ello, es que el enfoque de caracterización en un sitio de aluviones no consolidados puede comenzar con la descripción de un perfil litológico seguido por la aplicación de un método de laser de fluorescencia inducida (LIF), para confirmar el análisis de muestras.

Los resultados de aplicación de estas metodologías permiten tener información confiable para el proceso de selección de la alternativa adecuada para el manejo y eventual remediación de suelos impactados con hidrocarburo, de tal manera que se conozca los diferentes porcentajes de concentración de los compuestos de interés, debido a que plantea un escenario detallado en términos de concentración, localización y profundidad, estimando de esta manera el volumen de material impactado, minimizando la incertidumbre en la logística, costos de movimiento de tierras y tiempos en el tratamiento del suelo para alcanzar los niveles de limpieza que no generen riesgos para la salud humana y sea la admitida por la autoridad ambiental.

2.1 MONITOREO EXPLORATORIO DEL SUELO

Sobre la base de la esquematización hidrogeológica de un zona de estudio, una estrategia de muestreo se desarrolla con el fin de obtener los datos experimentales necesarios para lograr el objetivo de caracterización, es decir, para determinar el alcance y las rutas de movimiento que impactan los suelos y las aguas subterráneas subyacentes a un evento o liberación de producto libre (Critto, 2003).

El método de caracterización de línea de base consiste en la toma de muestras durante operaciones de perforación directa en los suelos de interés. Las muestras se recogen típicamente usando equipos de perforación convencional, y se

analizan utilizando métodos aprobados por la EPA para la identificación de componentes orgánicos.

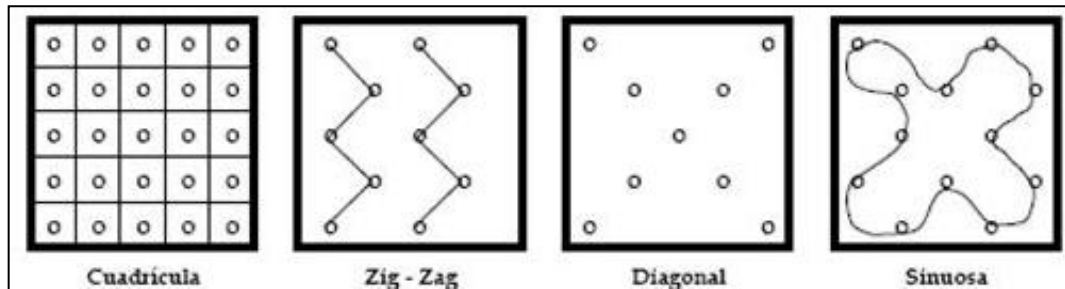
Este método permite obtener muestras de suelo a diferentes profundidades, teniendo como referencia las observaciones a los suelos hallados en el momento de las perforaciones y de acuerdo con las pruebas organolépticas o cualitativas (análisis de vapores orgánicos, por ejemplo). El número y la localización de los puntos de muestreo, así como el tipo de técnicas de investigación para ser aplicada deben ser cuidadosamente elegidos de acuerdo con las condiciones hidrogeológicas específicas del sitio (D'Affonseca, 2008). Como cada sitio es particular, y por lo tanto los criterios de uno no se aplican a otro, es necesario realizar una visita exploratoria antes de adelantar el monitoreo para verificar topografía, tipo de suelo, medio que debe muestrearse y puntos de interés para plantear el monitoreo, el cual puede ser selectivo, sistemático y al azar. No obstante, en todos los casos, es importante obtener muestras basales (o de referencia), las cuales serían colectadas aguas arriba y en contra de la dirección predominante de los vientos del foco contaminante.

El muestreo es esencial para determinar el grado de impacto (evaluación cuantitativa de concentración de los compuestos de interés), por lo que es importante establecer fronteras y límites precisos de las áreas presuntamente impactadas. Es de suma importancia que el muestreo se efectúe bajo normas y con criterios de calidad, siguiendo manuales profesionales de muestreo, como los publicados por la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), Agencia de Protección Ambiental (EPA) o el manual del Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud (ECO) (Díaz, 1999).

El muestreo deberá ser completo (todos los medios del ambiente) y representativo (número de muestras estadísticamente suficientes para evaluar de manera adecuada cada medio analizado). Para muestreo de suelos el recorrido sobre el

terreno puede ser en zig-zag, diagonal, cuadrícula, forma sinuosa, etc., (el recorrido escogido es a criterio y análisis del muestreador) tomando muestras puntuales en cada vértice donde se cambie la dirección del recorrido y/o según directriz establecida por el cliente. Ejemplo de los recorridos que se pueden efectuar en la toma de muestra, se presentan los esquemas de la Figura 2:

Figura 2 Esquema de los posibles recorridos para la toma de muestra



Fuente: Manual de Monitoreo de suelo - ICP

- **Muestreo Selectivo**

Los puntos de recolección de muestras se determinan según la experiencia del muestreador y generalmente incluyen factores tales como la visibilidad del área de un derrame de hidrocarburos, los cambios en el color del suelo, las áreas de perturbación física anterior o las áreas sin vegetación o con vegetación muerta. En los estudios ambientales, el muestreo selectivo a menudo constituye la base de una investigación exploratoria.

- **Muestreo Sistemático**

Es útil en los sitios con derrames de químicos líquidos, este método es útil para documentar probables gradientes de concentración y se emplea a menudo en los programas de monitoreo.

- **Muestreo al Azar**

Permite toda combinación posible de unidades de muestras a seleccionarse y el número de combinaciones posibles está sólo limitado por el tamaño de la muestra.

La representatividad de una muestra de sedimentos dependerá del tamaño y de las características geomorfológicas de la cuenca hidrográfica, y además de las corrientes prevaletientes. Las muestras de sedimentos, generalmente, son heterogéneas y la pequeña porción que debe tomarse para los análisis difícilmente se debe corresponder con el promedio de la composición real de los sedimentos.

- **Muestras de Control**

La toma de muestra de sitios de control es importante para entender el valor de la información de muestreo. Los sitios de control se emplean para demostrar si el sitio afectado está contaminado verificando la concentración de compuesto de interés natural del sitio. Siempre es necesario la toma de esta muestra para establecer una comparación científica válida entre los sitios que se sospecha contienen contaminantes ambientales y las muestras que contengan niveles por debajo de los detectables o medibles o niveles de contaminantes aceptablemente bajos.

Los siguientes principios aplican a la selección de los sitios de control:

- ✓ Los sitios de control deben estar, generalmente, contra el viento o río arriba del sitio de muestreo;
- ✓ En lo posible, se debe tomar primero las muestras de sitios de control a fin de evitar la contaminación del sitio de muestreo;
- ✓ Reducir el recorrido entre los sitios de control y las áreas de muestreo, en razón de la contaminación potencial que podrían causar las personas, equipo y/o vehículos.

- **Materiales y Equipos de Muestreo**

A continuación se enlista el material básico requerido para hacer un monitoreo de suelo.

- ✓ GPS: se debe georeferenciar cada punto monitoreado para hacer análisis espacial de los resultados.
- ✓ Recipientes: De acuerdo con el análisis de laboratorio a realizar las muestras de suelo se deben tomar en diferentes recipientes para evitar alteración de las características del suelo. Estos recipientes pueden ser de vidrio ámbar, bolsa de papel aluminio o bolsas plásticas con sello hermético.
- ✓ Barreno manual: Se usa para toma de muestras a profundidad ≤ 4 m. Es un equipo de acero inoxidable al cual se le puede acoplar extensiones que permiten llegar a la profundidad requerida.

Foto 2. Barreno manual



- ✓ Barreno mecánico de oruga: Este barreno está diseñado para la demolición y toma de muestras a profundidades entre 4 m y 6 m; el rompedor a gasolina solo está diseñado para ser utilizado verticalmente.

Foto 3. Barreno mecánico tipo oruga



Fuente: Manual del equipo / Autor

2.2 CARACTERIZACIÓN DE SUELOS DE ALTA RESOLUCIÓN

Una rápida técnica in situ para la delineación vertical de NAPL es la fluorescencia inducida por láser (LIF), que en particular, puede detectar compuestos aromáticos (BTEX) y Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAHs) en los sedimentos sumergidos, materiales no consolidados y la solución acuosa. Es una técnica semicuantitativa que se usa preferentemente para la detección de focos de contaminantes en fase libre, en especial compuestos de petróleo. (Garcia, 2005)

El sistema fue desarrollado en respuesta a la necesidad de medir en tiempo real la contaminación del suelo in situ, en aquellas zonas afectadas con presencia de hidrocarburo, debido a que el sistema realiza la detección rápida sobre el terreno determinando la presencia o ausencia de concentración relativa de contaminantes de hidrocarburos.

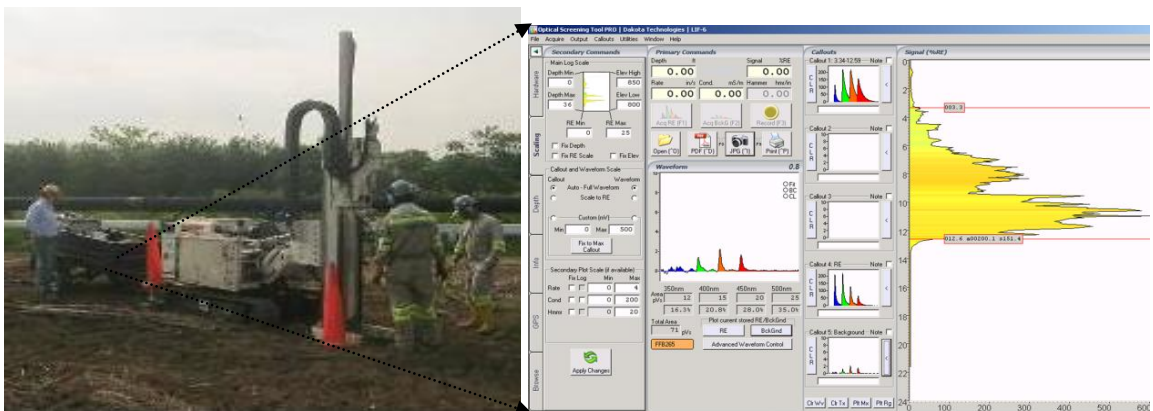
El sensor de LIF proporciona en tiempo real las características físicas del suelo y las características químicas de la contaminación. La configuración actual está diseñada para distinguir de forma rápida y rentable hidrocarburos aromáticos, además es capaz de adquirir información geológica, permite obtener información eficiente (ya que reduce el número de muestras que deben ser remitidos a laboratorios para su análisis). Se ha confirmado que el sistema de detección de fluoruro es capaz de delinear indirectamente a la zona no saturada de solventes

clorados y otros líquidos densos en fase no acuosa, lo cual indica que la aplicación LIF es exitosa para identificar fuentes de DNAPL / LNAPL (Kram, et al 2001)

La caracterización del suelo en alta resolución (HRSC por sus siglas en inglés) con un equipo UVOST™, involucra el hincamiento de una sonda con inducción de fluorescencia por láser para captar información de las condiciones ambientales del suelo. Utiliza una fuente de láser ultravioleta de longitud de onda ajustable junto con un detector óptico para medir la fluorescencia en los PAHs contenidos en diferentes productos como gasolina o diesel. La medición se realiza a través de una ventana de zafiro en una sonda que se introduce en el suelo con un penetrómetro o equipo de perforación.

El método de LIF UVOST proporciona datos sobre la distribución in situ de hidrocarburos de petróleo en un sitio afectado, a partir de la respuesta de fluorescencia inducida en los PAHs, compuestos pertenecientes a los hidrocarburos. En la Foto 4 se observa el desarrollo de un análisis del equipo LIF, utilizando un equipo de perforación tipo Direct Push y la respuesta típica de la respuesta del sensor del equipo, la cual se ha de correlacionar con los PAHs presentes en el suelo.

Foto 4. Actividades de análisis del suelo



Una vez finalizado el hincamiento y la caracterización de un punto, se obtiene un registro que presenta la profundidad de la perforación con relación al porcentaje de respuesta de la herramienta al contacto con el suelo. La respuesta refleja la intensidad de la fluorescencia en relación con un Emisor de Referencia (%RE) el cual consiste en una mezcla de hidrocarburos conocida con la cual se realiza la calibración del equipo antes de cada análisis.

La correlación entre la identificación indirecta del LNAPL con la información registrada por el LIF se da directamente en el sitio mediante los contrastes visibles entre el color del suelo y color de los materiales co-mezclados LNAPL y DNAPL están presentes (Keller, et al).

El equipo LIF UVOST tiene la capacidad de recopilar registros en mediciones de hasta 150 m por debajo de la superficie del terreno, siempre y cuando se cuente con un penetrómetro de aproximadamente 20 ton, con tasas de lectura de datos de cada 1.2 seg, proporcionando una resolución espacial de menos de 0.2 m para una tasa de empuje estándar de 1 m/min. Además, el sistema cuenta con la capacidad de adquirir representaciones de datos multidimensionales, tales como matrices de tiempo de longitud de onda para identificar tipo de combustible.

A continuación se describe las características más importantes del equipo LIF UVOST presentados en el reporte de verificación de la metodología realizado por la EPA.

- **Sensor**

Combustibles a base de petróleo, como la gasolina, diesel y kerosene, contienen compuestos que presentan fluorescencia cuando es excitado por la luz ultravioleta. Una muestra de suelo contaminado con sustancias petrógenicas exhibirá la intensidad de fluorescencia que es proporcional a la concentración de contaminantes. La concentración de la fracción de hidrocarburos en una muestra

desconocida puede determinarse mediante la comparación de su intensidad de fluorescencia con los estándares de calibración.

El sensor LIF UVOST detecta la presencia y cuantifica la cantidad de Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAHs) por la fluorescencia inducida por láser en la muestra. La herramienta de detección óptica rápida es un sistema de fluorescencia inducida por láser sintonizable. El sistema de LIF UVOST utiliza un láser de impulsos acoplado con un detector óptico para hacer mediciones de fluorescencia a través de fibras ópticas. La medición se realiza a través de una ventana de zafiro en una sonda que se introduce en el suelo con un penetrómetro o equipo de perforación.

Las fibras ópticas de excitación y emisión se aíslan del sistema de suelo por una ventana de zafiro diámetro de 6,35 mm situado a 60 cm de la punta de la sonda y montados a ras con la parte exterior de la sonda. El sistema LIF UVOST utiliza fibras de 600 μm de diámetro que son de hasta 100 m de longitud.

- **Fuente de láser**

Utiliza una bomba de neodimio - itrio dopado con granate de aluminio (Nd: YAG), produciendo luz de 532-nm a 50 Hertz (Hz) con un pulso de energía de 50 mJ. La luz de las bombas láser es de doble frecuencia para producir la luz ultravioleta (UV). El sistema láser utilizado en la LIF UVOST es capaz de generar longitudes de onda de luz que varían de 280 nm a 300 nm aproximadamente, dependiendo del colorante que se utilice, pudiéndose ajustar dentro de este rango.

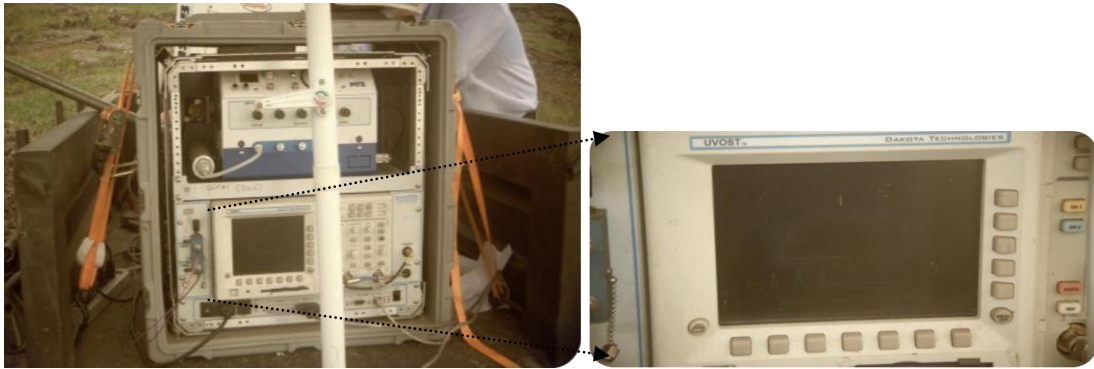
El sistema láser está acoplado a una sílice revestida de un cable de fibra óptica por donde se trasmite la luz ultravioleta / visible, que a su vez está conectado a un Compartimiento Óptico y una sonda que se conecta a un sistema de detección.

- **Componentes del sistema**

La herramienta de detección óptica consiste en un espectrómetro y punto de control. El espectrómetro contiene toda la instrumentación espectroscópica, incluyendo la bomba láser de Nd: YAG, láser de colorante ajustable, monocromador de emisión, tubo fotomultiplicador, y fuentes de alimentación asociadas y controladores de movimiento.

El punto de control contiene un computador y un procesador de la señal del osciloscopio digital. En funcionamiento, el punto de control y el espectrómetro se pueden colocar de forma independiente y separado uno del otro hasta 25 pies.

Foto 5. Panel eléctrico de LIF



- **Espectrómetro**

La generación de la luz de excitación se basa en un láser de colorante de dos etapas bombeada por los 532 nm armónicas de un láser pulsado por Nd: YAG. El láser de Nd: YAG, el láser de colorante, y toda la óptica relacionados están dispuestos en una placa de aluminio de 19" por 23", que está fijado a la parte superior de la rejilla del espectrómetro.

La luz se genera a través de duplicación de la frecuencia de la salida del láser de colorante. Una longitud de onda de 266-nm se emplea para la detección directa de benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX) y otros hidrocarburos aromáticos de un solo anillo. En este caso, el láser de Nd-532 nm: YAG de haz se desvía

alrededor del láser de colorante a la duplicación de la frecuencia de cristal de cuarta generación de armónicos (266 nm) Para cambiar entre el sintonizable y configuraciones de 266-nm se requiere la inserción (o remoción) de dos espejos sobre soportes cinemáticos.

- **Rango Dinámico**

El rango dinámico lineal del detector LIF UVOST depende del hidrocarburo analizado, así como la matriz en particular. En general, para las mediciones in situ, se ha encontrado que la porción lineal de las curvas de respuesta se extiende mucho más allá de tres órdenes de magnitud.

La no-linealidad tiende a ocurrir a concentraciones superiores a 10.000 mg / kg, en suelos arenosos, y en concentraciones más bajas en los suelos ricos en arcilla, posiblemente por la absorción o saturación de ellos mismos. El rango dinámico lineal del sensor de LIF también depende de los parámetros instrumentales controlado por el operador. El rango dinámico lineal puede extenderse a concentraciones más altas mediante el ajuste de la anchura de la rendija del detector, pero esto se traduce en disminución de la sensibilidad a concentraciones más bajas.

- **Límite de detección**

Se necesitan tres cantidades para determinar el límite de detección de fluorescencia y la concentración límite (LOD): el ruido, antecedentes y la sensibilidad. La sensibilidad se determina a través de las muestras de calibración preparadas, en la mayoría de los casos, inmediatamente antes de la visita al sitio usando tierra del sitio y las técnicas analíticas estándar. El ruido se calcula después de las perforaciones que se han realizado y generalmente se calcula en cada perforación con base en la anterior.

- **Calculo de la fluorescencia**

El umbral de fluorescencia puede interpretarse cualitativamente como la amplitud de señal mínima que se asocia con la contaminación por hidrocarburo. El umbral de fluorescencia no se afecta por la fluorescencia base de la matriz del suelo. La base de la determinación del umbral fluorescencia es que las señales de fondo deben ser distribuidas normalmente. El centro de la distribución normal (Gaussiana) da el valor de fondo, y la desviación estándar se puede utilizar para establecer los intervalos de confianza.

3 VOLUMEN DE SUELO IMPACTADO CON HIDROCARBURO EN EL ÁREA DE INTERÉS

Las empresas relacionadas con el sector petrolero, en marco de sus programas estratégicos, incluyen el incremento de las actividades de exploración y producción, razón por la cual deben ampliar su capacidad de transformación de hidrocarburos (refinación) y transporte de los mismos, para cumplir con la demanda y calidad que requiere el consumo nacional de combustibles y petroquímicos.

El área de interés para esta evaluación, es un terreno de aproximadamente 10 ha, en donde se manejó y trató material impregnado con hidrocarburos proveniente de las operaciones de la industria petrolera (tanques y lodos de plantas y equipos), lo cual implicó la presencia de suelos con remantes de compuestos petroquímicos. En el sitio actualmente no se registra ningún tipo de operación.

Con el fin de determinar el volumen de suelo impactado y de evaluar los riesgos que pueda generar la presencia de concentraciones de compuestos asociados a los procesos que se llevaban a cabo en el área, se realizaron dos caracterizaciones que permitieron ajustar las cantidades de material que requiere manejo para lograr concentraciones residuales inferiores a las metas acordadas con las autoridades ambientales dependiendo de los usos del área en el corto, mediano y largo plazo.

3.1 METODOLOGÍA DESARROLLADA

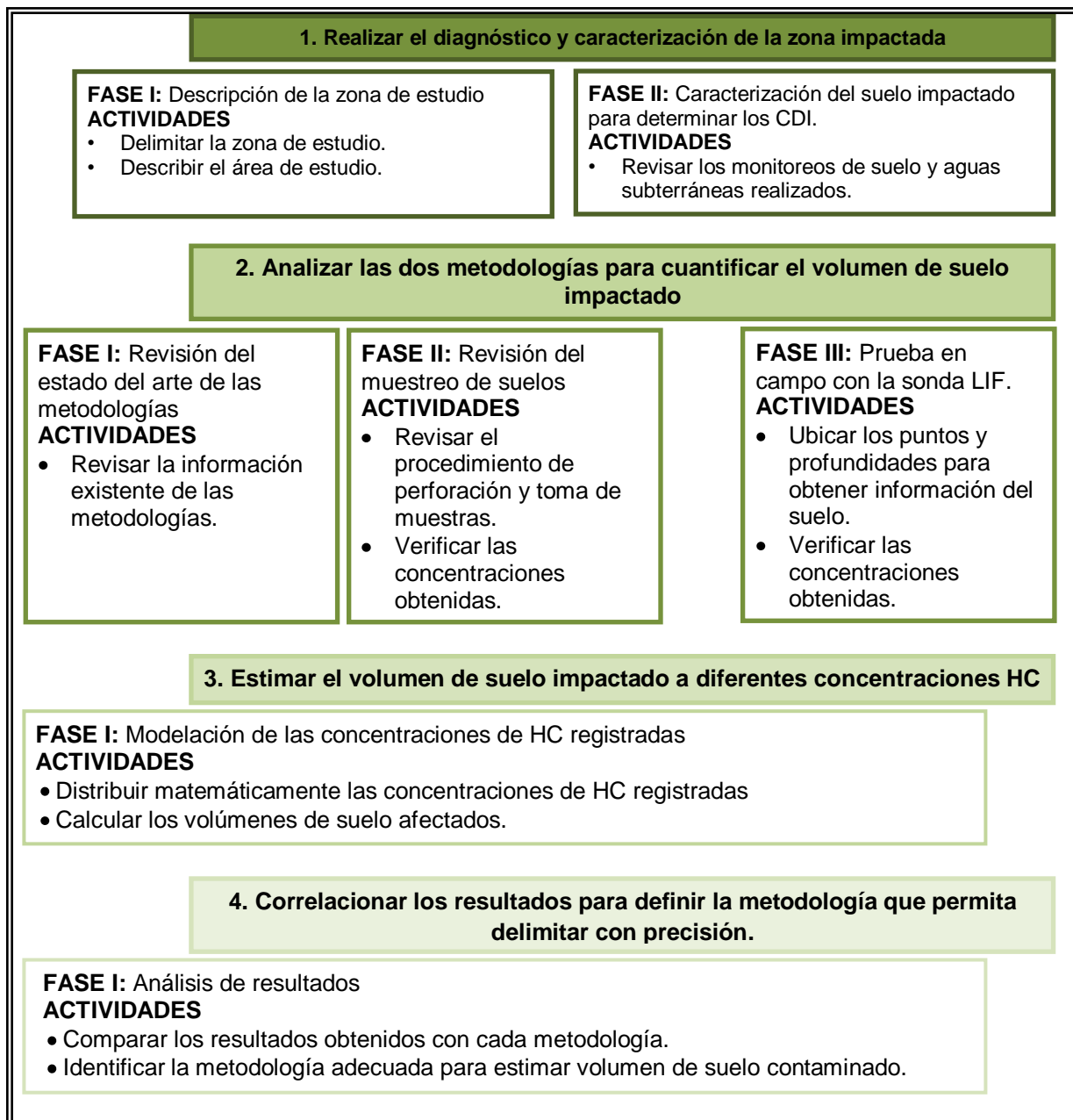
Con miras a definir las actividades necesarias para realizar las gestiones tendientes a dar un manejo apropiado a los suelos que se encuentran en la área a

intervenir, y dada la alta incertidumbre que se tiene para estimar las cantidades de suelo impactado (lo cual repercute en los costos de manejo y los tiempos para alcanzar los suelos en óptimo estado), se hace necesario implementar metodologías que permitan conocer las características de los suelos del sitio, con el fin de dimensionar los volúmenes de suelo con niveles de contaminación que requieren ser remediados o tratados.

Dichas metodologías están encaminadas a detectar la presencia de compuestos químicos de interés que puedan afectar la salud humana o a los ecosistemas cercanos, y mediante mapas tridimensionales de concentración de contaminantes semejantes se puede delimitar con mayor precisión la extensión del área impactada, y estimar el volumen de suelo afectado, de tal manera que se ajuste el plan de intervención para llevar estos suelos a los límites aceptables y seguros.

En la Figura 3, se presenta el procedimiento que se adelantó para realizar el análisis comparativo de las dos metodologías para estimar volúmenes de suelos impactados con hidrocarburos en el área de interés.

Figura 3. Procedimiento para el análisis de las metodologías de caracterización



3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA

De acuerdo con la información suministrada por la empresa interesada en la evaluación del sitio, el área a intervenir correspondía a bajos inundables y

ciénagas, en donde también se localizaban algunos pozos de producción, en este terreno se realizó manejo y tratamiento del material impregnado con hidrocarburos. En la Foto 6 se observa una vista satelital del área en el año 2002.

Foto 6. Vista general del área de estudio (año 2002)



Fuente: Google Earth, modificada por el autor

Por las actividades que allí se desarrollaban, los suelos se encuentran impactados con presencia de hidrocarburos totales del petróleo (TPHs), hidrocarburos poliaromáticos (PAHs), fenoles y concentraciones de algunos metales como Cromo, Plomo, Mercurio, Zinc, entre otros. El área está proyectada para albergar infraestructura de los proyectos de ampliación de la empresa, razón por la cual los suelos deben ser manejados, de tal manera que puedan adelantarse los trabajos que sean necesarios sin inconvenientes. La Foto 7 presenta una vista general del área en el año 2010

Foto 7. Vista general del área de estudio (2010)



Fuente: Suministrada por la empresa

Actualmente, el área se encuentra cerrada sin operación alguna, razón que también contribuyó a la restauración de la vegetación herbácea y arbustiva. En la Foto 8, se observa una vista general de la zona de estudio en el año 2012

Foto 8. Vista general del área de estudio (año 2012)



Fuente: Suministrada por la empresa

El área de interés tiene una topografía generalmente plana, altura promedio sobre el nivel del mar de 75 m y abarca 10 ha aproximadamente; actualmente no se adelanta ninguna actividad relacionada con la industria petrolera ni hay presencia de asentamientos humanos en un radio inferior a 1 km, está distante más de 500 m de cuerpos de agua superficial y en la zona hay presencia de algunos pozos petroleros inactivos.

- **Datos climatológicos**

Según reportes de la estación del IDEAM más cercano, la temperatura varía entre los 22 y 42°C en épocas de lluvia y cálidas, respectivamente, y presenta una pluviosidad promedio multianual de 2718 mm; igualmente, registra una humedad relativa promedio de 87% y presión barométrica promedio 99.3kPa. La dirección prevalente del viento es SE, con una velocidad máxima a una altura de 10 m del suelo de 100 km/h; está clasificada como zona de amenaza sísmica intermedia, según la NSR-10.

- **Geología Regional**

Se encuentra situada sobre un valle aluvial compuesto por planicies sobre la cual se localizan ciénagas y pantanos de inundación que sirven como sistema de amortiguación a las crecidas invernales. Estos suelos corresponden mayormente a depósitos aluviales y llanuras aluviales que datan del periodo Cuaternario.

- **Tipo de suelo**

Con base en las descripciones litológicas de las perforaciones realizadas en el perímetro del terreno en años anteriores, se ha encontrado heterogeneidad de los suelos localmente consistente con la historia del sitio, información que ha sido corroborada con las descripciones litológicas desarrolladas durante la construcción de pozos de monitoreo.

De acuerdo con las columnas litológicas en el área se observan en su mayoría arcillas arenosas y arenas arcillosas desde la superficie hasta 1 y 4 m bajo la superficie. Entre los 4 y 5 m de profundidad se encuentran en algunos sectores arcillas consolidadas muy plásticas, seguidas por arenas bien gradadas, hasta 9 m profundidad, (según las máximas perforaciones que se han realizado).

- **Clasificación del Uso del Suelo**

De acuerdo con la clasificación del suelo asignada por el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio más cercano, el área de estudio se encuentra clasificada como suelo de expansión Industrial.

- **Profundidad del Nivel del Agua Subterránea**

Durante la perforación de pozos de monitoreo se encontró el nivel freático a profundidades que varían entre los 4.5 y 5.5 m bajo el nivel de la superficie. Sin embargo, el nivel estático registrado en los pozos de monitoreo oscila entre 1.2 a 3.2 m bajo la superficie del terreno, indicando que se trata muy probablemente de un acuífero confinado superficial.

- **Calidad del Agua Subterránea**

Las muestras de aguas subterráneas tomadas en los pozos de monitoreo en el año 2010 y 2013 se compararon con los límites genéricos basados en riesgos (LGBRs) presentados en el manual técnico para la ejecución de análisis de riesgos para sitios de distribución de derivados de hidrocarburos (MAVDT, 2008).

En los resultados obtenidos en el 2010 se registró concentraciones de Benceno (0.11mg/l) superiores a lo permitido en el manual (0.01mg/l), de igual forma para las concentraciones de algunos metales como Cromo (0.0586 mg/l); Manganeso (3.68 mg/l), Mercurio (0.00073 mg/l), Plomo (0.12 mg/l), y Vanadio (0.157 mg/l) en el PM-2, sobrepasaron los límites genéricos permitidos. En esta ocasión la concentración de TPH totales (38.5 mg/l) se comparó con el límite de TPH DRO por ser el más conservador (0.29 mg/l), dado que el límite de detección del laboratorio de las fracciones de TPH supera el LGBR utilizado.

En las muestras de agua subterránea del monitoreo del 2013 se detectaron concentraciones de Benceno superiores a los LGBRs en los PM-ATB-01 y PM-ATB-02 de 0.0197 mg/L y 0.0169 mg/L respectivamente. Naftaleno se detectó en

concentraciones superiores a los LGBR en PM-ATB-01, PM-ATB-03 y PM-ATB-06 en concentraciones que variaron entre 0.0085 y 0.0341 mg/L.

En los pozos de monitoreo PM-21, PM-ATB-01, PM-ATB-02 y PM-ATB-05 Se detectaron concentraciones de Cromo Hexavalente que variaron entre 0.006 y 0.06 mg/L. Estas concentraciones superaron el LGBR (0.0017mg/l). No se detectaron concentraciones de fracciones de hidrocarburos superiores a los LGBRs

3.3 METODOLOGÍAS APLICADAS EN EL AREA DE INTERES

Las metodologías aplicadas permitirán tener información confiable para el proceso de toma de decisiones para la selección de la alternativa adecuada para la remediación del área, debido a que disponen de un escenario detallado en términos de concentración, localización y volumen de material impactado, minimizando la incertidumbre en la logística, costos de movimiento de tierras y posterior tratamiento del suelo para alcanzar los niveles de limpieza requerida. Así mismo, al establecer la tecnología de tratamiento de los suelos impactados más apropiada, se evitan inconvenientes en un futuro durante el desarrollo de las actividades y reduce los riesgos de limitación en la disponibilidad de recursos para ejecutar las labores.

3.3.1 Monitoreo exploratorio del suelo

Con el propósito de recopilar información que permitiera conocer la distribución y concentración de hidrocarburo y otros componentes en el suelo del área, se realizó una recopilación de información disponible por la empresa para identificar los productos contaminantes que posiblemente se encuentren en los suelos del área; así mismo, se revisó el proceso histórico de manejo y tratamiento de residuos para estimar profundidades hasta las cuales se han encontrado suelos

impactados, y de esta manera definir las condiciones de monitoreo y toma de muestras para análisis

La caracterización de suelos se adelantó en dos etapas, en la primera de ellas, en el año 2009, se ejecutaron una serie de perforaciones para monitorear los parámetros de interés a diferentes profundidades, y detallar las concentraciones de hidrocarburos detectadas.

La segunda etapa, en el año 2010, consistió en dos fases casi simultáneas, en una de ellas se realizó una serie de sondeos manuales ejecutados para conocer las concentraciones de la zona hasta 1.50 m de profundidad, en tanto que la otra fase involucró sondeos mecánicos en algunas ubicaciones para detallar las zonas con altas concentraciones de hidrocarburos, e incluso en algunas de ellas, lograr mayores profundidades toda vez que se observaron concentraciones significativas en estos puntos a profundidad de hasta 5 m en la primera etapa.

La Tabla 1 especifica el número de sondeos, la profundidad alcanzada y el método que se utilizó para realizarlos en cada una de las etapas de caracterización. La ubicación de los sondeos mecánicos y manuales se esquematiza en la Foto 9, en donde se diferencian los puntos de la primera (2009) y segunda etapa (2010).

Tabla 1. Sondeos ejecutados.

Etapas	Manual	Nº	Profundidad de muestreo (m)
Primera	Mecánico	36	1.0 – 2.0 2.5 - 3.5 4.0 – 5.0
Segunda	Manual	197	0.0 - 0.7 1.0 - 1.5
	Mecánico	42	1.0 – 2.0 2.5 - 3.5 4.0 – 5.0
			5.0 - 5.5 5.0 – 6.0 6.0 - 6.5
			6.0 – 7.0

Foto 9. Ubicación de las perforaciones (en amarillo 1ra etapa, en verde 2da etapa)



Fuente: Suministrada por la empresa

La distribución de los sondeos realizados manualmente, en la segunda etapa (2010), se esquematiza en la Foto 10, en la cual se realizó un monitoreo sistemático siguiendo una cuadrícula de 25x25m y en cada vértice se tomó una muestra para obtener luego una muestra compuesta de cada zona indicada.

Foto 10. Ubicación de los sondeos a profundidad de 1.5 m



Fuente: Suministrada por la empresa

Durante el desarrollo de las actividades de perforación se tuvo especial cuidado en la manipulación que se le dio a las muestras por parte del personal a cargo, dada la facilidad con la cual se puede generar contaminación al perforar.

La muestra extraída de cada sondeo fue sometida a un análisis visual para constatar la presencia de trazas y olor de hidrocarburo, además de la respectiva clasificación del suelo para cada una de las profundidades analizadas en el perfil.

Foto 11. Perforación exploratoria equipo mecánico y manual.



Durante las perforaciones se encontró un suelo relativamente homogéneo, con capas bien definidas; posiblemente, las capas arcillosas del suelo, generen un “sello” evitando el transporte del hidrocarburo a las capas inferiores, controlando la lixiviación minimizando el impacto al agua subterránea. En la Tabla 2 se presentan algunos resultados del análisis de textura.

Tabla 2. Resultados de análisis de textura en algunas muestras

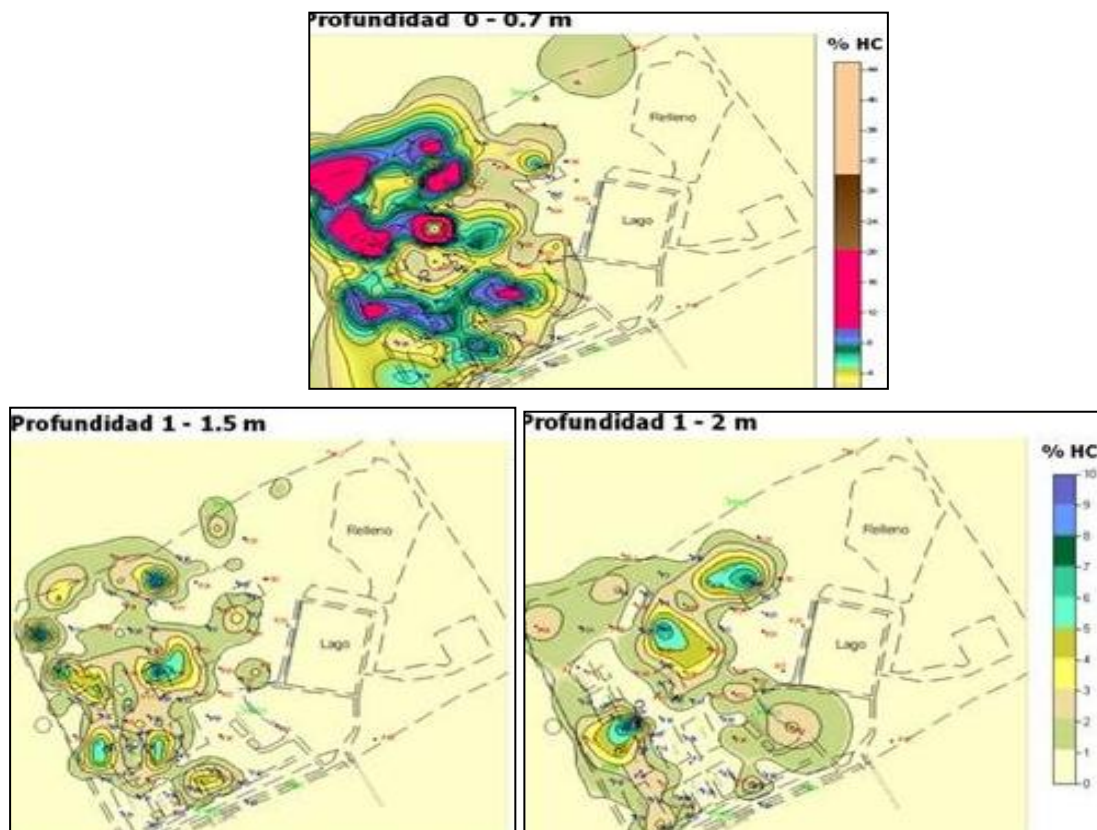
Profundidad	P16	P26	P30	P33	P36
1.0 - 2.0	Arenoso franco	Franco arenoso	Arenoso franco	Franco arcillo	Franco arcillo arenoso
2.5 - 3.5	Franco arcillo arenoso		Franco arcilloso	Franco arcilloso	
4.0 - 5.0	Franco	Arenoso franco	Franco arcillo arenoso		Franco
5.0 - 6.0	Franco arenoso	Franco arenoso		Arenoso franco	
6.0 - 6.5			Arenoso		
6.5 - 7.0				Franco arenoso	

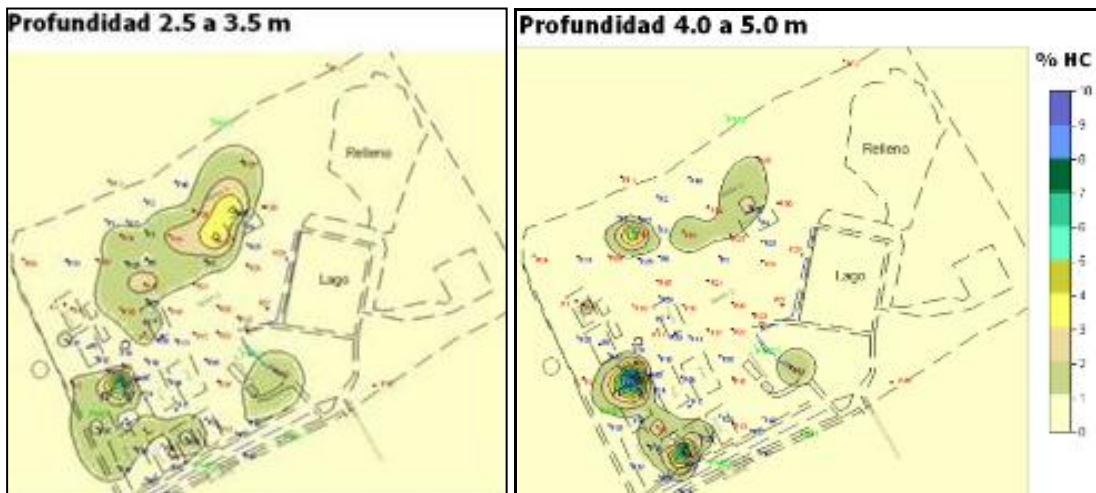
Fuente: Laboratorio ICP

Para enviar al laboratorio se tomó una muestra de suelo realizando un corte longitudinal al perfil (tira de suelo paralela a este corte) con el fin de obtener una muestra representativa de toda la profundidad extraída. Para cada una de las profundidades registradas se tomaron muestras de suelo para detectar el porcentaje de concentración de hidrocarburo, en los Anexos 1 y 2 se consolidan los resultados de laboratorio obtenidos en cada fase de muestreo de suelos.

Con base en los resultados obtenidos se realizó la distribución de las concentraciones de hidrocarburo (% peso) en la zona. Se utilizó el programa Surfer usando con el método de interpolación Kriging para distribuir espacialmente el porcentaje de hidrocarburo registrado. En la Figura 4 se presentan los esquemas de distribución de hidrocarburo determinados en cada uno de los rangos de profundidades muestreados.

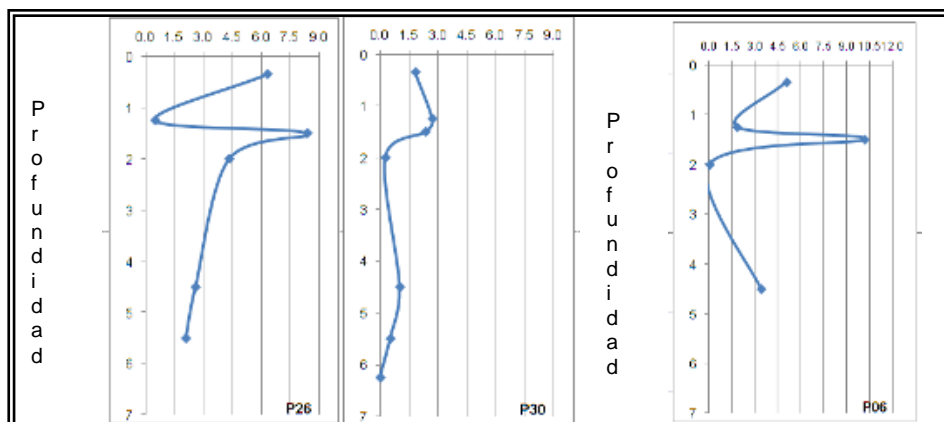
Figura 4. Distribución del porcentaje de hidrocarburo a diferentes profundidades





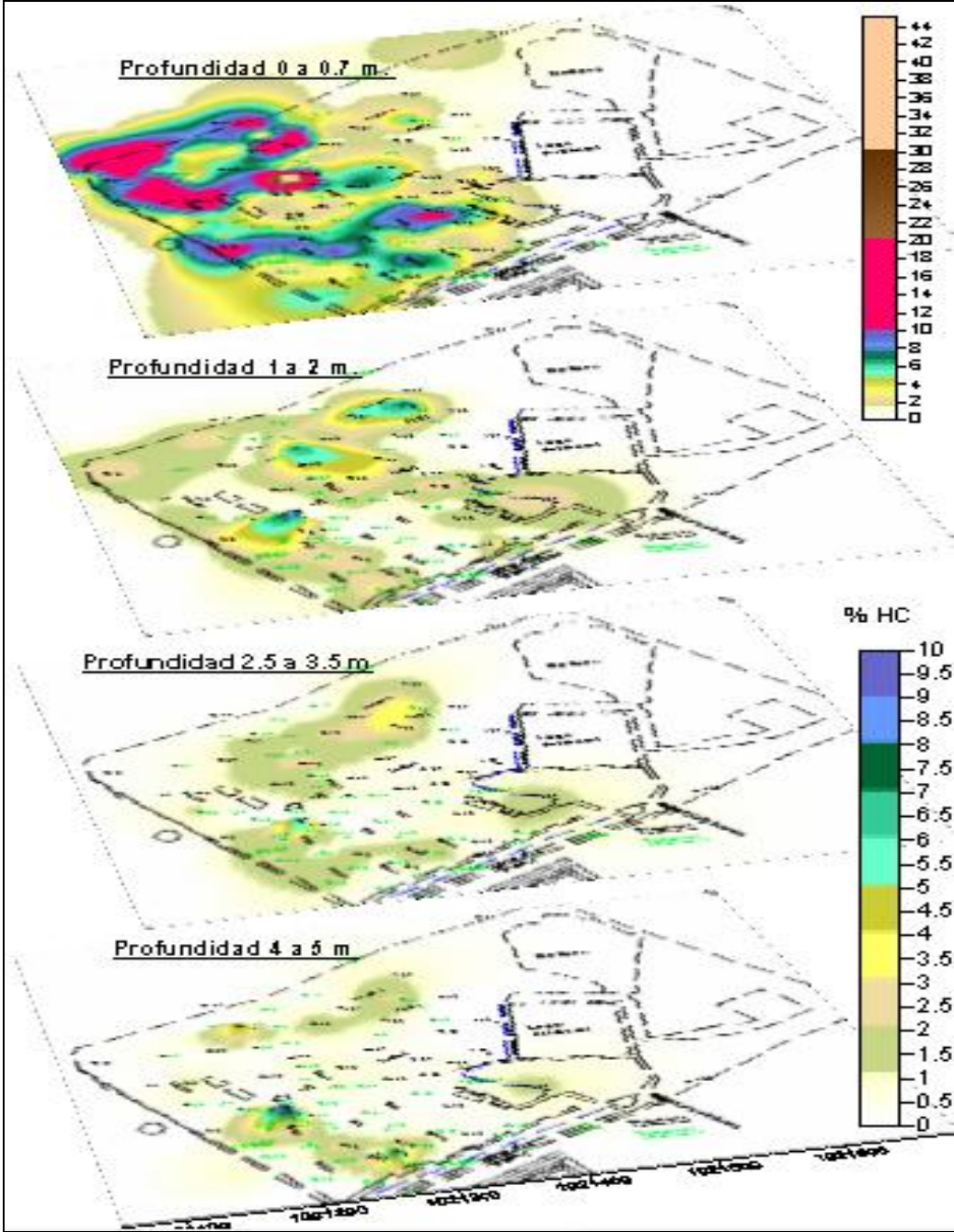
Para verificar el comportamiento de la concentración de hidrocarburo a través del suelo, en la Figura 5 se presentan alguno de los perfiles realizado según las concentraciones de hidrocarburo detectado en un punto en cada muestra de suelo en las diferentes profundidades. Se observa que los porcentajes de hidrocarburo más altos se detectaron en las muestras superficiales (> 2m), con tendencia a disminuir a medida que se está profundizando, con algunas excepciones como el caso del P06 en donde a 4.5m se aprecia un aumento de los compuestos petrogénicos, no se tomó una siguiente muestra en ese punto por lo que se desconoce su continuidad.

Figura 5. Perfiles de Concentraciones de hidrocarburo (%) a diferentes profundidades



La Figura 6 presenta una distribución tridimensional de las concentraciones detectadas.

Figura 6. Comportamiento de la concentración de HC a través de la profundidad del suelo



Con base en la distribución espacial de la concentración de hidrocarburo se estimó el área de suelo impactado en cada profundidad de monitoreo, mediante el uso del software Surfer. Las áreas obtenidas en los diferentes contornos de concentraciones se presentan en la Tabla 3, mientras que los contornos de concentración de hidrocarburo se observa en el Anexo 3.

Tabla 3. Áreas (m²) según las concentraciones de hidrocarburo

% TPH	Área (m ²) para cada profundidad					
	0.0 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 4.0	4.0 - 5.0	Total
0% - 1%	1893.1	29357.9	15890.9	53688.3	73233.3	174063.4
1% - 2%	2173.5	4465.5	38398.3	28231.3	15517.0	88785.6
2% - 3%	20751.1	30893.8	22921.1	7713.0	3010.7	85289.7
3% - 4%	14240.3	13016.9	7856.8	3851.6	1404.0	40369.6
4% - 5%	12424.8	8198.3	4457.2	250.4	676.3	26006.9
5% - 6%	11174.5	5804.0	3430.5	739.2	632.4	21780.7
6% - 7%	8930.2	2094.4	1381.1	262.5	262.5	12930.6
7% - 8%	6167.9	816.0	491.3	160.6	160.6	7796.3
8% - 11%	10432.2	353.2	172.9	103.2	103.2	11164.7
11% - 14%	4500.0					4500.0
14% - 17%	1555.9					1555.9
17% - 20%	413.1					413.1
20% - 44%	639.6					639.6

Con los valores obtenidos de las áreas impactadas se calculó el volumen de suelo impactado con hidrocarburo en cada profundidad, los resultados se presentan en la Tabla 4. Para estimar el volumen de suelo a tratar en superficie se tuvo en cuenta un factor de expansión del suelo (FE) del 25%.

Tabla 4. Volumen de suelo según la concentración de hidrocarburo.

% TPH	Volumen (m ³) de suelo impactado en cada profundidad						Total (*FE25%)
	0.0 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 4.0	4.0 - 5.0	Total	
0% - 1%	1893.1	14678.9	15890.9	80532.4	73233.3	186228.6	232785.8
1% - 2%	2173.5	2232.8	38398.3	42347.0	15517.0	100668.5	125835.7
2% - 3%	20751.1	15446.9	22921.1	11569.5	3010.7	73699.4	92124.2
3% - 4%	14240.3	6508.5	7856.8	5777.3	1404.0	35786.9	44733.7
4% - 5%	12424.8	4099.2	4457.2	375.5	676.3	22032.9	27541.2
5% - 6%	11174.5	2902.0	3430.5	1108.9	632.4	19248.3	24060.4
6% - 7%	8930.2	1047.2	1381.1	393.7	262.5	12014.7	15018.4
7% - 8%	6167.9	408.0	491.3	240.9	160.6	7468.6	9335.8
8% - 11%	10432.2	176.6	172.9	154.8	103.2	11039.7	13799.6

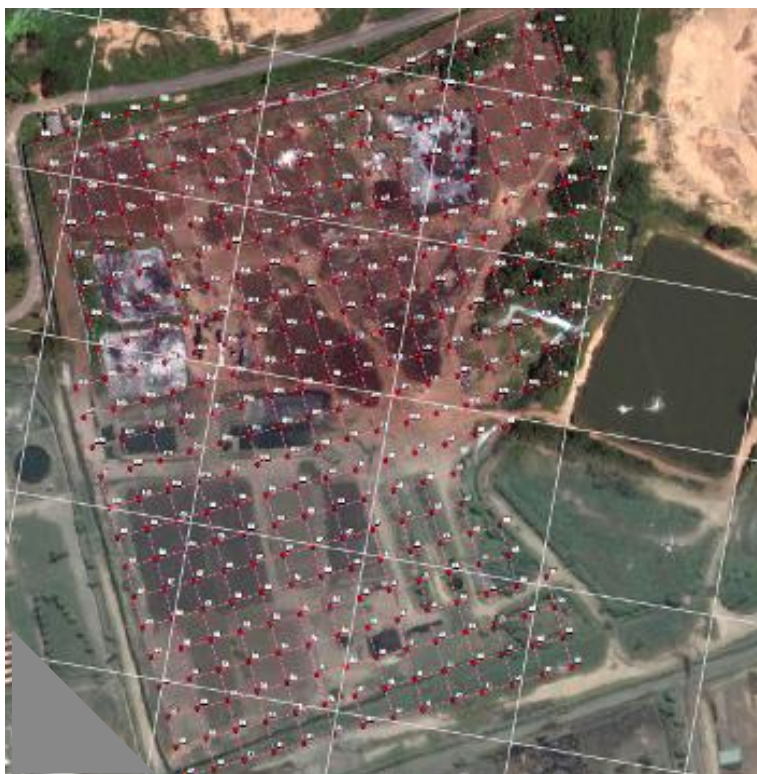
% TPH	Volumen (m³) de suelo impactado en cada profundidad					Total
11% - 14%	4500.0					4500.0
14% - 17%	1555.9					1555.9
17% - 20%	413.1					413.1
20% - 44%	639.6					639.6
					TOTAL	475296.2
						594120.2

De acuerdo con información suministrada por la empresa, se acordó una concentración preliminar límite para concentración de hidrocarburo en los suelos del área de interés del 1%, siguiendo los parámetros presentados en la normatividad holandesa para suelos industriales. Teniendo en cuenta lo anterior, se debería realizar tratamiento de suelo a un volumen aproximado de 290.000m³ distribuidos a diferentes profundidades. Sin embargo, este volumen a tratar disminuye debido a un análisis de riesgo realizado en el área, y a los resultados del segundo método de caracterización.

3.3.2 Caracterización de suelos de alta resolución

Para la Caracterización detallada con alta resolución en el área adelantada en el año 2013, se empleó la tecnología LIF, la cual es una herramienta que genera información en tiempo real que permite definir la extensión lateral y vertical de los suelos impactados con hidrocarburos. Para caracterizar el área, se utilizó el sistema UVOST™ LIF, el cual utiliza un láser ultravioleta (UV) para inducir la fluorescencia en los Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAHs) presentes en concentraciones bajas y moderadas contenidos en diferentes productos como gasolina, diesel, crudo, etc. En total se realizaron 302 puntos de LIF, los cuales se ubican en la Foto 12.

Foto 12. Localización de los puntos de investigación



Fuente: Suministrado por la empresa

A medida que se avanza durante el hincamiento de la herramienta en el suelo, el láser UV viaja continuamente a través de un cable de Fibra Óptica, que a su vez está conectado a un compartimiento óptico protegido contra golpes (SPOC). El SPOC, tiene una ventana a través de la cual es emitido el Láser UV, y al mismo tiempo captura la fluorescencia de los PAHs. El hincamiento se desarrolló mediante la técnica Direct Push o empuje directo, usando un equipo Geoprobe®.

Una vez finalizado el hincamiento, se obtiene la caracterización de un punto mediante el registro que presenta la profundidad de la perforación (eje vertical) contra el porcentaje de respuesta de la herramienta al contacto con el suelo (eje horizontal). Este último parámetro refleja la intensidad de la fluorescencia en relación con un Emisor de Referencia (%RE) el cual consiste en una mezcla de hidrocarburos conocida con la cual se realizó la calibración del equipo.

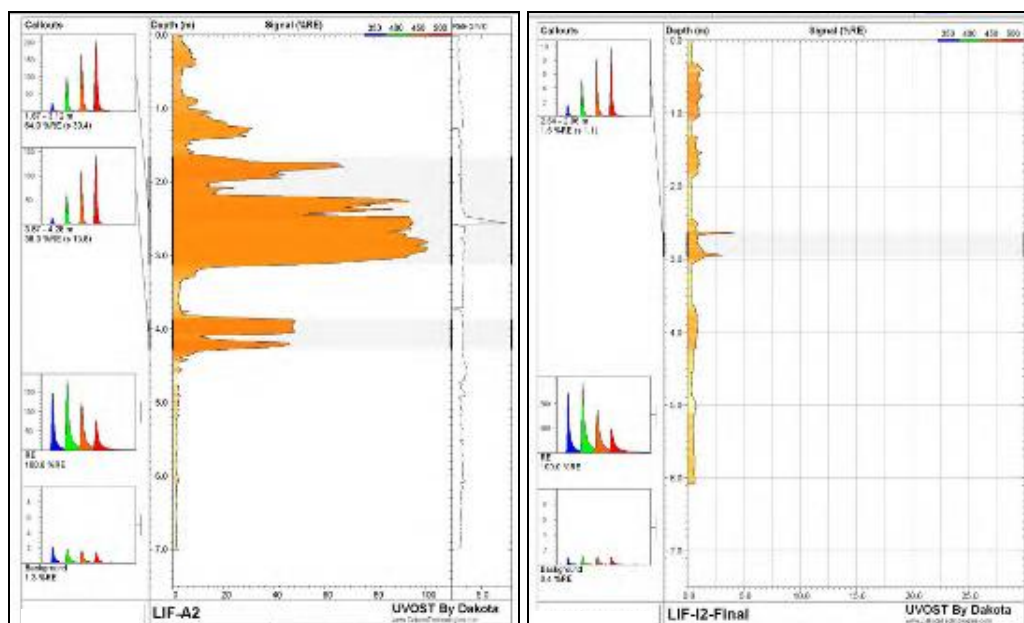
En el registro se observan también distintos recuadros o callouts, en donde se muestran las longitudes de onda de la fluorescencia emitida por los compuestos que están presentes en el suelo que entraron en contacto con la herramienta bajo la superficie, dado que cada compuesto tiene longitudes de onda específicas definidas por la amplitud relativa de los picos individuales,

De acuerdo con los recuadros de longitud de onda mostrados en el registro de cada perforación obtenida, se observa un patrón característico correspondiente a una longitud de onda azul, seguida por tres longitudes de onda verde, naranja y rojo. Este patrón es representativo del crudo pesado, ligeramente refinado, o crudo que ha sido degradado por exposición a microorganismos, agua o aire. Para esta investigación se relacionó las respuesta con los resultados de un estudio de longitudes de onda de diferentes compuestos determinadas en laboratorio realizado por Dakota Technologies, Inc., en el año 2008, empresa que desarrolló y tiene la patente del equipo UVOSTTM.

En la Figura 7, se presenta perfiles de respuesta arrojados por el equipo LIF en dos puntos de perforación, el punto A2 registró la mayor respuesta (101%) a 2.83 m de profundidad, y la perforación I2 con una respuesta menor (4.3%) a una profundidad de 2.63m, sin embargo en el punto se detectó presencia de hidrocarburo libre; nótese la diferencia de la amplitud de la onda en la profundidad en donde el suelo presenta un cambio litológico o una anomalía.

El equipo LIF arroja en tiempo real la respuesta máxima de la fluorescencia en los PAHs presentes en el suelo, así como la profundidad en la cual se detectó. En el Anexo 4, se presentan las concentraciones máximas reportadas por la herramienta en cada uno de los puntos analizados así como la profundidad máxima alcanzada.

Figura 7. Registros arrojados por el equipo LIF: Punto A2 (Izq) y I2 (Der)



Fuente: Suministrado por la empresa

En el Anexo 5 se presentan seis (6) de los perfiles más representativos de las excavaciones, mientras que en la Tabla 5 se indican las respuestas obtenidas y su respectiva profundidad. Se observa que las respuestas máximas se registraron entre los 1.7m a 4.6 m de profundidad, en este mismo rango se incluye las respuestas registradas en los dos puntos presentados en la Figura 7.

Tabla 5. Resume de los puntos de LIF más representativos

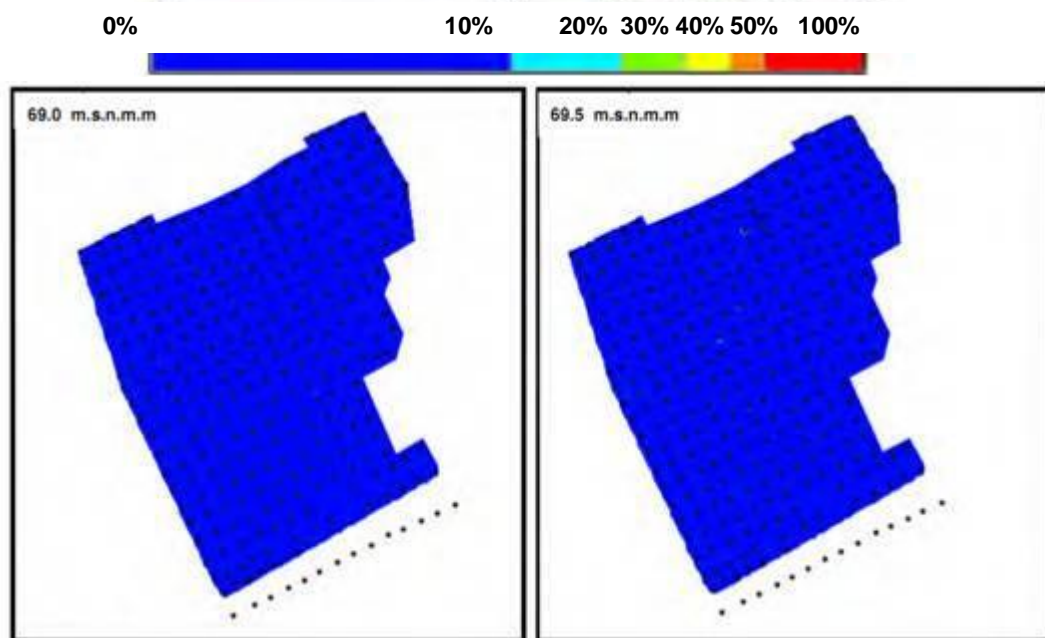
ID del Punto	Prof. Total (m)	Respuesta Máxima	Prof. Detectada (m)
LIF-B15	7.02	10,3%	2.60
LIF-C8	7.02	28,5%	4.64
LIF-C14	6.99	10,8%	3.53
LIF-D1	7.06	33,2%	3.05
LIF-D8	7.03	17,8%	2.26
LIF-F21	6.99	25,4%	1.70
LIF-K18	7.00	63,8%	1.93
LIF-O16	7.00	25,8%	4.00

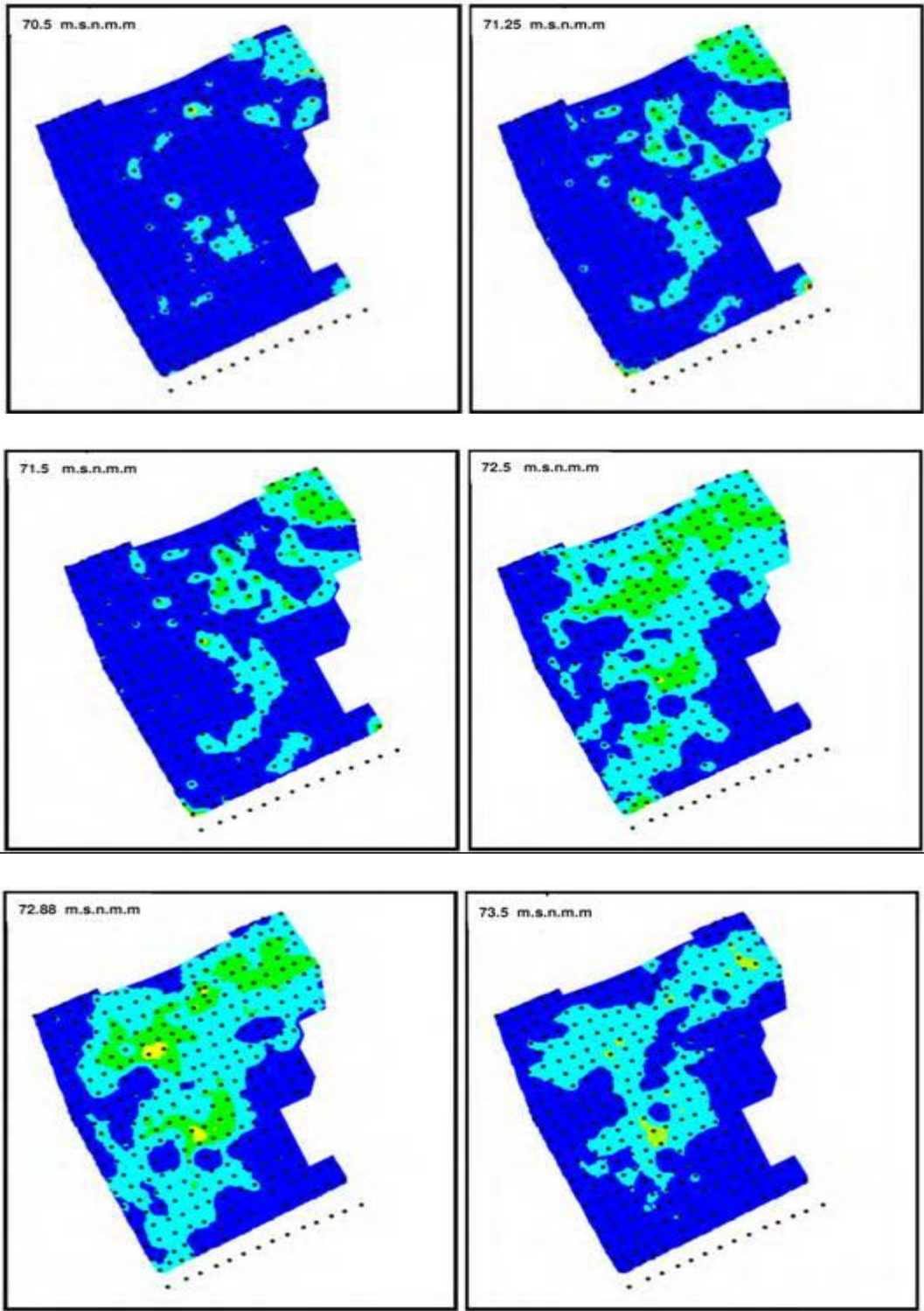
En la Figura 8, se presentan las proyecciones de los porcentajes de respuesta de la herramienta LIF por rango de intensidad, en dos dimensiones. En la leyenda de

las figuras se muestra la barra de colores de acuerdo con los rangos de respuesta. Al no existir un nivel superficial constante en el área de estudio, se decidió tomar como referencia para la generación de las figuras la cota sobre el nivel del mar, por esta razón la capa está asociada a un nivel de superficie medida en metros sobre el nivel del mar (msnm). El nivel de la cota promedio del área es de 74.7 msnm.

Se observa que la respuesta predominante se encuentra entre 0% a 10% representado por el color azul. Este porcentaje de respuesta se localiza principalmente en los estratos bajos del área de estudio, en la cota de los 69 a los 69,5 msnm. La respuesta de 10% a 20% es la segunda con mayor representación en las proyecciones realizadas, esta respuesta está representada por un color azul claro. La cota más profunda en donde se encuentra este rango de respuesta es 69.5 msnm (aproximadamente a 5.0 m bajo el nivel de la superficie), cota a partir de la cual inicia la capa de arcilla observada durante la toma de muestras de suelo.

Figura 8. Distribución espacial de la respuesta (%) del equipo LIF por profundidad





Fuente: Suministrado por la empresa

Finalmente, las respuestas más altas asociadas al rango entre 50% a 100%, se observaron en la cotas entre 71.25 y 72.5 msnm (2.3 y 3.6 m bajo el nivel de la superficie, respectivamente). A esta profundidad se encontraron principalmente estratos de limos y arcillas limosas.

Teniendo en cuenta la distribución espacial de cada una de las respuestas en las diferentes profundidades, se cuantificaron de manera aproximada las áreas asociadas a los rangos de porcentaje de respuesta de la herramienta UVOST™ LIF, en la Tabla 6 se indican los valores arrojados.

Tabla 6. Áreas según la respuesta del equipo LIF

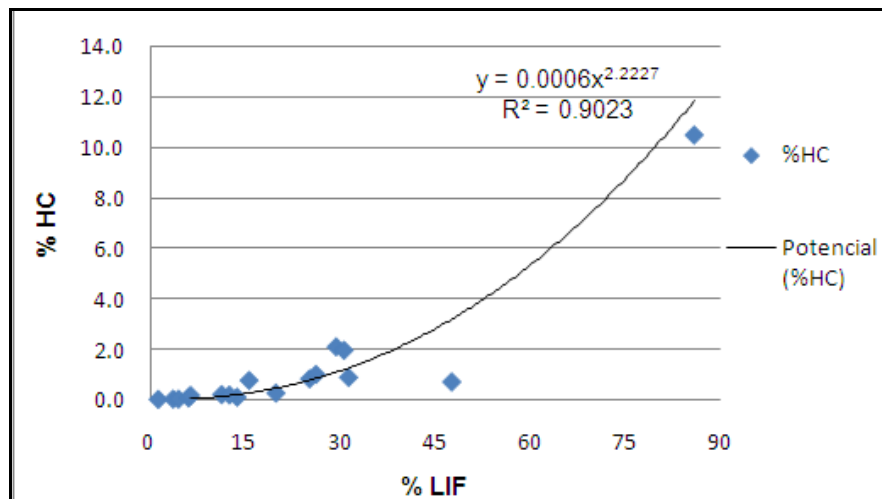
% de respuesta	Área (m ²)
0% - 10%	98900
10% - 20%	64000
20% - 30%	21500
30% - 40%	1500
40% - 50%	99
50% - 100%	40

Con el objeto de hallar y explicar la relación existente del porcentaje de respuesta de la herramienta LIF con la información cuantitativa entregada por el laboratorio de concentración de hidrocarburo total, se realizó una modelización matemática empírica, lo cual permitió interpolar y extrapolar datos a partir de la fórmula determinada. Para realizar la correlación se utilizó el modelo estadístico disponible en Microsoft Excel, el cual utiliza los promedios de dos variables para verificar el nivel de correlación lineal entre los dos.

Para este caso se realizó un análisis efectuando depuración de las mediciones y resultados de laboratorio obtenidas, de manera que se lograra una adecuada correlación. Los datos empleados para hallar la tendencia fueron los resultados de porcentaje de hidrocarburo detectado en 17 muestras de suelo.

Empleando las herramientas de Excel se graficó el espectro de puntos y se identificó la línea de tendencia con más alto valor del coeficiente de determinación, siendo éste quien indica la mejor tendencia para el modelo matemático. Corriendo varios tipos de formulaciones se obtuvo una ecuación de potencia con un coeficiente de determinación de 90.23%, en la Figura 9 se presenta la gráfica de correlación, y la ecuación de Potencia que define el comportamiento de la tendencia del % LIF y el porcentaje de hidrocarburo:

Figura 9. Línea de correlación respuesta LIF vs concentración de hidrocarburo



De acuerdo con la correlación gráfica que se realizó con columnas de respuesta de la herramienta LIF y los resultados de laboratorio de las muestras tomadas captadas de esos puntos, se observó una correlación positiva entre los porcentajes de respuesta de la herramienta LIF y las concentraciones de TPH Total.

Aplicando la ecuación obtenida $\%HC = 0.0006 (\% LIF)^{2.2227}$ se halló el porcentaje de respuesta de la herramienta LIF para cada porcentaje de hidrocarburo total presente en el suelo. En el Anexo 6 se presenta la tabla de los valores hallados.

Paralelo a esta investigación, la empresa dueña del terreno realizó un Análisis de Riesgos siguiendo la metodología de Acciones Correctivas Basadas en Riesgo (RBCA) para ajustar el plan de manejo de suelos del área.

El análisis de riesgo dio como resultado que para el suelo superficial (entre 0 a 2.5 m) las concentraciones de los diferentes compuestos de interés detectadas en muestras de suelo tomadas, no exceden los valores calculados específicamente para el área, de acuerdo con el uso futuro de la misma y por lo tanto las concentraciones presentes en el suelo superficial no representan riesgo para un trabajador comercial o industrial por contacto directo. A excepción de un punto que presentó hidrocarburo libre, por lo tanto el análisis de riesgo recomienda acciones correctivas en las inmediaciones de este punto.

Según lo anterior, el suelo entre 0 y 2.5 m no presentó ningún riesgo para realizar actividades en la zona, y al analizar las concentraciones de LIF detectadas a profundidades mayores a este rango; se observó que las respuesta de LIF son menores al 62% (es decir, 5% de hidrocarburo), a diferencia de un par de muestras que registraron respuestas de 82.5% y 92.5 % a profundidades de 2.8 m y 3.5 m respectivamente. Por lo tanto es recomendable realizar acciones correctivas para todos aquellos puntos que obtuvieron respuestas de LIF mayores a 62%, y en los puntos en donde se observó producto libre durante las actividades de campo.

Para estimar la extensión de suelo impactado que se debe tratar se seleccionaron puntos adicionales cercanos a los que registraron respuestas mayores a 62% y producto libre, para delimitar mejor las áreas impactadas.

La Tabla 7 presenta las áreas calculadas de acuerdo con los puntos seleccionados, de igual manera se estima un volumen considerando que las máximas respuestas de LIF presentaron espesores aproximados de 1m. En total

se calculó un volumen aproximado de suelo a tratar de 9700m³, alcanzando una profundidad de 4.9 m en el Área 8, al centro de la zona de estudio. En color rojo se indica los puntos en donde se detectó respuestas mayores al 62% con el equipo.

Tabla 7. Puntos seleccionados para estimar el área a remediar

ÁREA (m ²)		PROFUNDIDAD A INTERVENIR	PUNTOS	% LIF	EVIDENCIAS
AREA 13	694 m ²	2.5 a 3.5	K18	63.8	Producto en muestra de suelo
			J18	28.9	
AREA 12	924 m ²	2.1 a 3.1	E17	63.2	Producto en LIF
			E16	47.0	
			F16	32.0	
AREA 11	621 m ²	2.8 a 3.8	C16	26.0	Producto en LIF
			D16	38.0	
AREA 10	293 m ²	2.8 a 3.8	A15	71.5	
			B15	10.0	
AREA 9	2403 m ²	3.8 a 4.8	H15	38.9	Producto en LIF
			I14	48.8	
			G14	56.0	Producto en LIF
			F14	44.0	Producto en LIF
			E14	36.0	Producto en LIF
			G13	58.0	Producto en muestra de suelo
			F13	39.0	
AREA 8	492 m ²	3.9 a 4.9	F12	37.0	Producto en muestra de suelo
			E12	51.6	
AREA 7	645 m ²	1.2 a 2.2	D11	37.9	Producto en muestra de suelo
			C11	31.0	
AREA 6	341 m ²	2.0 a 3.0	A9	82.5	Producto en muestra de suelo
AREA 5	603 m ²	3.6 a 4.6	F9	62.8	
			F8	27.0	
AREA 4	606 m ²	2.0 a 3.0	G7	77.4	
AREA 3	395 m ²	2.7 a 3.7	A2	101.0	Producto en LIF
			B2	74.4	
			A3	74.7	
AREA 2	833 m ²	1.8 a 2.8	I2	4.2	Producto libre
			I1	50.4	
AREA 1	865 m ²	2.5 a 3.5	N3	94.5	Producto libre
			M3	20.4	

En la Figura 10 se indica la ubicación de las áreas seleccionadas a tratar, se observa que está distribuida en toda la zona de estudio, la mayoría ubicadas específicamente donde estaban construidas algunas piscinas de almacenamiento.

Figura 10. Áreas a remediar



Fuente: Suministrado por la empresa

Durante las actividades con la herramienta LIF para la caracterización detallada se encontró evidencia de producto en fase libre en seis (6) puntos localizados

aproximadamente al centro y nororiente del área, zona en la que se estima se localizaban piscinas de tratamiento, y en cinco (5) puntos localizados al sur del área, posiblemente proveniente de la misma fuente que generó el impacto evidenciado en un pozo de monitoreo existente, en donde se encontró producto libre adherido a las tuberías de perforación. En general, el impacto se encontró en las capas arcillosas del suelo, lo que puede indicar que la capa de arcilla que se encuentra anterior al nivel freático está controlando la lixiviación y atenuando el impacto al agua subterránea del acuífero más somero del área.

4 RESULTADOS

Después de aplicar las dos metodologías de caracterización en la zona de interés se tiene que el método de monitoreo exploratorio del suelo arrojó un área impactada con hidrocarburo de 475.296 m² (0.48 ha), mientras que la caracterización de suelo de alta resolución calculó un área de 186.039 m² (0.19 ha). La diferencia de casi el 40% se puede atribuir al estado del suelo cuando se aplicaron las dos metodologías, debido a que cuando se realizó la primera caracterización, en el año 2009, el área tenía poco tiempo de ser desmantelada y aun no se había realizado las actividades de homogenización y nivelación del suelo.

Tomando una concentración de hidrocarburo máxima permitida del 1%, el monitoreo exploratorio calculó un volumen de suelo a remediar de 289.000m³, sin embargo si se tiene en cuenta el análisis de riesgo realizado en el área, en el cual se indica que el suelo superficial no presenta riesgo a la salud de los trabajadores, entonces para estimar el volumen del suelo se seleccionan las concentraciones de hidrocarburo superiores de 5% a profundidades mayores de 1.5m, arrojando un volumen de suelo de 65400m³.

El volumen estimado con la caracterización de alta resolución asumiendo los puntos que dieron respuestas mayores a 62%, es decir el 5% de hidrocarburo y aquellos donde se detectó hidrocarburo libre se calculó en 9.700m³, a profundidades mayores de 1.5 m.

Los costos y el tiempo de entrega de resultados para plantear alternativas de remediación, influye a la hora de seleccionar una metodología para caracterización de suelos y estimación de volumen de suelo a remediar, en la Tabla 8, se presentan los resultados obtenidos con las metodologías aplicadas.

Tabla 8. Análisis comparativo de los resultados de las dos metodologías

Metodología	Monitoreo exploratorio de suelos	Caracterización de suelo de alta resolución
Puntos Muestreados	275 perforaciones 634 muestras de suelo.	302 perforaciones 17 muestras de suelo
Costo de la actividad*	\$541.400.000	\$792.950.000
Entrega de resultados	8 meses	4 meses
Área impactada	475.296 m ²	186.039 m ²
Volumen a remediar	65.400 m ³ HC >5%, profundidad >1.5 m	9.700 m ³ HC >5%, profundidad >1.5m

**El desglose de las actividades para estimar el valor total se presenta en el Anexo 7.*

Se observa que existe gran diferencia entre los datos del área y volumen de suelos impactados con hidrocarburos que requieren ser remediados, obteniéndose puntos más definidos con la metodología LIF. Así mismo, los costos presentan una diferencia del 20%, siendo más costosa la metodología del equipo LIF, sin embargo, el tiempo en que se obtiene resultados es menor que con el monitoreo exploratorio de suelos.

Debido a que cada metodología tiene sus ventajas y desventajas, estas pueden ser complementarias en un plan de caracterización riguroso, dado que un buen programa de remediación, incluyendo costos y tiempo, depende de una verdadera evaluación del sitio. En la Tabla 8 se presenta una comparación de las dos metodologías aplicadas.

Tabla 9 Ventajas y desventajas de las metodologías

Metodología	Monitoreo exploratorio de suelos y agua	Fluorescencia Inducida por Láser, LIF
Ventaja	<ul style="list-style-type: none"> • La evidencia directa; muestras verticalmente los perfiles continuos del suelo • Puede conducir a la identificación fiable; 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición rápida en tiempo real; • Las señales discretas de profundidad; • Se puede acoplar con sensores litológicas de correlación; • Puede utilizar varias fuentes de energía.
Desventaja	<ul style="list-style-type: none"> • Selección sub-muestra para el análisis puede estar sesgado; • Potencial de pérdida de volátiles; • Métodos de recolección inadecuados pueden conducir a la migración de los contaminantes. • En áreas extensas el número de muestras analizadas pueden ser altos 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitado por la litología; • Falsos negativos y positivos posibles; • Requieren Fluoróforos co-mezclados; • Semicuantitativo requiere muestras de confirmación • Alto costo en los equipos para su aplicación, hace que en áreas pequeñas no sea rentable la caracterización

Las metodologías de caracterización logran los lineamientos para el desarrollo de una evaluación detallada de las condiciones ambientales del sitio, que sumado a una caracterización cuantitativa de las concentraciones de los compuestos de interés presentes en el área, permitirán delimitar con mayor precisión la extensión del área impactada, que requerirá intervención para llevarla a los límites seguros y aceptables por la autoridad ambiental competente.

Por medio de la aplicación de metodologías específicas y equipos diseñados para tal fin, es posible generar el modelo conceptual del sitio en 2 y 3 dimensiones de manera detallada para respaldar una toma de decisiones, dado que reduce los riesgos en la estimación de la localización y volumen de material impactado, costos del ciclo de vida de los proyectos, y también mejora procesos de salud y seguridad, así como aspectos de sostenibilidad comparado con la utilización de tecnologías convencionales (métodos tradicionales).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se describen y comparan dos metodologías utilizadas en la actualidad para detectar y delimitar las áreas con presencia de contaminación por hidrocarburo. Las metodologías fueron aplicadas a zona en donde se ha de ampliar infraestructura petrolera, con un área aproximada de 10 ha.

La aplicación de metodologías para realizar mapas de distribución espacial de concentración de hidrocarburos en suelos impactados, se constituyen como herramientas útiles para caracterizar el sitio y determinar volúmenes de suelo que requieran remediación.

La metodología de caracterización del suelo de alta resolución presenta ventajas sobre el monitoreo exploratorio del suelo en cuanto a su velocidad de respuesta y cantidad de información obtenida, implicando beneficios de largo plazo para el desarrollo de una estrategia de manejo del área; aunque con un costo mayor. Sin embargo, para sitios con un área menor a 5ha el monitoreo exploratorio permite conocer mejor el tipo de suelo del área de interés, y los diferentes cambios de perfil litológico, sin causar altos costos

Con la metodología de alta resolución se observó concentraciones de hidrocarburo de hasta 16% a una profundidad de 3 m, mientras que el monitoreo exploratorio permitió detectar muestras de suelo con concentraciones de hidrocarburo del 44% a 1m de profundidad.

Con el monitoreo exploratorio se calculó un volumen de suelo a remediar de 289.000m³, tomando el límite de concentración de hidrocarburo de 1%. Se recalculó el valor teniendo en cuenta el análisis de riesgo realizado, seleccionando las concentraciones de hidrocarburo superiores de 5% a profundidades mayores

de 1.5m dando un valor de 65.400m³. El volumen estimado con la caracterización de alta resolución seleccionando los puntos con respuestas mayores al 62%, (5% de hidrocarburo) y aquellos donde se detectó hidrocarburo libre es de 9.700m³, a profundidades mayores de 1.5 m.

Se obtuvo áreas más definidas de suelo impactado mediante la caracterización de alta resolución, la cual requiere para su calibración la toma de muestras para análisis de laboratorio, permitiendo realizar un mejor modelo conceptual del sitio lo que conlleva a plantear un buen programa de remediación.

BIBLIOGRAFÍA

Ayllon, T. y Chávez, J. México: sus recursos naturales y su población. ed., Mexico: Noriega Editores. 1994. 286 p.

Brusseau, M y Maier, R. Soil and groundwater remediation. En Environmental monitoring and characterization. 2004. PP 335 - 356.

Bujewski, G. y Rutherford, B. The Rapid Optical Screening Tool (ROST) Laser-induced Fluorescence System for Screening of Petroleum Hydrocarbons in Subsurface Soil. Environmental Protection Agency. 1997

Carlson, C, Critto, A; Marcomini, A y Nathanail, P. Risk based characterisation of contaminated industrial site using multivariate and geostatistical tools. En: Environmental Pollution. 2001. Vol 111. pp 417- 427.

Carrera, J. Methodological Conceptualization of Mathematical Modelling. En Mathematical and Computer Modelling. 1992. Vol 16. PP 19-28.

COLOMBIA. Constitución política de Colombia. 1991

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 23. Por la cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y protección al medio ambiente y se dictan otras disposiciones. 1973. 3 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA, Y DESARROLLO TERRITORIAL. Manual técnico para la ejecución de análisis de riesgos para sitios de distribución de derivados de hidrocarburos. 2008. 108 p.

Coria, I. Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Universidad Abierta interamericana. 2007. Disponible en la web: <http://www.ceiucaweb.com.ar/documentos/ucaforum/Ingambiental/3%20A%D0%B50%20%201%20CUATRIMESTRE/Ciencias%20de%20la%20Tierra/Geologia/Teoria/Extra/Remediacion%20FLNA.pdf>

Critto, A., Carlon, C., Marcomini, A. Characterization of contaminated soil and groundwater surrounding an illegal landfill (S. Giuliano, Venice, Italy) by principal component analysis and kriging. En: Environmental Pollution. 2003. Vol 122. pp 235 - 244

Custodio, E. y Llamas, M. 1976. Hidrología Subterránea, Tomo I y II, Ediciones Omega.

D'Affonseca, F., Bluma, P., Finkel, M., Melzer, R., Grathwohl, P. Field scale characterization and modeling of contaminant release from a coal tar source zone. En: Journal of Contaminant Hydrology. 2008. Vol 102. pp 120–139

Desaules, A. Critical evaluation of soil contamination assessment methods for trace metals. En: Science of the Total Environment. 2012. Vol 426. pp 120–131

Diaz, F. Metodología de identificación y valuación de riesgos para la salud en sitios contaminados. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. 1999. Perú

García, Á. y Martínez, C. Análisis de metodologías para la caracterización y remediación de acuíferos contaminados por líquidos en fase no acuosa (NAPLs). En: Boletín Geológico y Minero. 2005. Vol 116. pp 65-78

Kaplan IR, Galperin Y, Lu S, Lee R. Forensic environmental geochemistry: differentiation of fuel-types, their sources and release time. Org Geochem. 1997

Kram, M, Keller, A., Rossabi, J. y Everett, L. Dnopl characterization methods and approaches Part 1: performance comparisons. 2001.

Kram, M.L., Lieberman, S.H., Fee, J., Keller, A.A. Use of LIF for real-time in-situ mixed NAPL source zone detection. En: Ground Water Monitoring and Remediation. 2001.

Napoles, J y Abalos, A. Biorremediación de ecosistemas contaminados con xenobioticos. 2006. Universidad de Oriente

Rao, P.S.C., Jawitz, J.W., Enfield, C.G., Falta, R.W., Annable, M.D., Wood, A.L., 2002. Technology integration for contaminated site remediation: clean-up goals and performance criteria. Disponible en la web: http://iahs.info/redbooks/a275/iahs_275_571.pdf

Redman, J. Contaminant Mapping. En Ground penetrating radar: Theory and applications. 2009. PP 247 – 269

Reimann C, y de Caritat P. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. En: Science of the Total Environment. 2005 Vol 337. pp 91 - 107.

Riccardi, Carmela; Di Filippo, Patrizia; Pomata, Donatella; Incoronato, Federica; Di Basilio, Marco; Petrangeli, Marco y Spicagliaa, Sergio. Characterization and distribution of petroleum hydrocarbons and heavy metals in groundwater from

three Italian tank farms. En: Science of the total environment. 2008. Vol 393. pp 50 – 63.

Sahuquillo,A. La calidad y la contaminación de las aguas subterráneas. En: Boletín Geológico y Minero. 1999. Vol. 110-4

Salas, H. Criterios para seleccionar modelos matemáticos de calidad de agua. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. 1984

Silva, S. y Correa, F. Análisis de La contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. En Semestre Económico. 2009. Vol 12, No. 23, pp. 13-34 - ISSN 0120-6346. Colombia

Stroo, H., Unger, M., Ward, C.H., Kavanaugh, M., Vogel, C., Leeson, A., Marqusee, J., Smith, B. Remediating chlorinated solvent source zones. En: Environmental Science and Technology. 2003. Vol 37. pp 224A-230A

Tosse, O. Legislación ambiental relacionada con contaminación del recurso suelo en Colombia. Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial - Dirección de ecosistemas. 2003

Volke, T. y Velasco, J. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. México: INE-SEMARNAT, 2002. 64 p.

Zamora, A. y Ramos, J. Las actividades de la industria petrolera y el marco ambiental legal en Venezuela. Una visión crítica de su efectividad. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 51(1) 2010, 115-144

ANEXOS

Anexo A. Concentraciones de hidrocarburo (%) muestreo superficial

SECTOR 1			
Cuadrante	Punto	Prof. 0 a 0.7m	Prof. 1.0 a 1.5m
A	1	5.6	1.4
	2	8.5	0.4
	3	2.6	0.3
	4	8.6	2.3
	5	9.9	0.7
	6	12.4	0.4
	7	3.9	2.5
	8	7.7	0.6
	9	3.2	0.1
B	1	5.0	0.8
	2	8.7	1.2
	3	6.3	4.5
	4	5.3	0.0
	5	5.1	1.0
	6	5.7	2.6
	7	4.2	1.3
	8	1.9	0.5
	9	0.1	0.1
C	1	5.1	1.9
	2	3.9	3.5
	3	6.2	1.7
	4	9.8	1.9
	5	5.6	0.6
	6	7.2	6.1
	7	6.2	2.5
	8	10.0	1.0
	9	7.1	5.8
D	1	1.1	1.2
	2	3.1	0.0
	3	0.4	0.0
	4	2.3	4.5
	5	2.2	1.8
	6	0.7	0.2
	7	1.7	0.8
	8	0.6	0.0
E	1	2.0	0.4
	2	2.2	1.7
	3	2.9	3.3
	4	4.1	0.4
	5	3.7	0.4
	6	3.2	1.1
	7	5.0	0.5
	8	5.4	0.1
L1	1	3.2	0.3
	2	0.3	1.0
L2	1	13.1	0.1
	2	9.7	6.3
	3	2.4	6.2

SECTOR 2			
Cuadrante	Punto	Prof. 0 a 0.7m	Prof. 1.0 a 1.5m
A	1	8.2	1.9
	2	0.8	0.3
	3	2.0	0.1
	4	2.7	1.1
	5	3.6	3.0
	6	3.4	3.0
	7	44.0	2.9
	8	5.1	0.5
	9	5.8	5.9
B	1	6.1	1.9
	2	3.9	1.2
	3	0.4	0.5
	4	5.8	3.5
	5	0.8	0.5
	6	1.5	1.1
	7	1.9	2.9
	8	1.9	0.9
	9	2.1	0.4
C	1	3.4	0.8
	2	4.9	3.8
	3	3.5	5.6
	4	3.3	1.8
	5	5.8	0.1
	6	3.8	3.4
	7	9.8	0.6
	8	3.9	0.8
D	1	3.7	3.4
	2	5.3	8.3
	3	7.5	5.5
	4	3.3	2.4
	5	1.8	2.7
	6	2.9	3.0
	7	1.6	2.2
	8	2.4	2.8
E	1	2.8	1.2
	2	7.0	2.0
	3	7.7	0.8
	4	7.9	0.4
	5	10.2	1.8
	6	10.2	2.2
	7	22.0	3.4
	8	5.5	3.7
	9	2.7	1.3
F	1	15.3	0.2
	2	12.9	2.2
	3	17.6	4.4
	4	4.2	0.7
	5	13.5	1.6
	6	4.8	0.2
	7	7.2	0.2

	8	7.2	10.7
	9	12.1	1.6
G	1	9.9	3.1
	2	6.7	0.6
	3	9.4	3.3
	4	3.0	0.9
	5	3.4	0.8
	6	1.7	0.3
	7	4.1	0.2
	8	5.0	0.5
	9	6.9	1.1
H	1	13.1	2.8
	2	4.2	2.7
	3	3.8	1.3
	4	0.8	2.8
	5	11.8	10.5
	6	1.8	1.4
	7	16.6	1.6
	8	12.9	0.3
	9	1.0	1.3
I	1	11.7	0.0
	2	14.0	0.3
	3	5.9	0.3
	4	12.6	8.0
L1	1	0.2	0.5
	2	3.4	2.5
L2	1	1.2	0.4
	2	2.1	1.5
SECTOR 3			
Cuadrante	Punto	Prof. 0 a 0.7m	Prof. 1.0 a 1.5m
A	1	1.5	0.8
	2	0.9	1.0
	3	0.4	1.3
	4	1.7	0.3
	5	1.4	1.3
	6	0.9	3.9
	7	3.3	2.1
	8	2.4	4.2
	9	0.3	0.6
B	1	0.3	1.3
	2	1.1	0.5
	3	1.2	1.0
	4	0.3	0.1
	5	0.1	0.5
	6	0.0	0.3
C	1	0.3	0.1
	2	1.8	1.0
	3	1.6	0.4
	4	2.8	1.3
	5	2.0	0.9
	6	2.5	1.3
	7	1.7	0.8

	8	2.6	0.9
	9	6.3	0.5
D	1	1.1	0.5
	2	0.4	0.0
	3	1.6	0.4
	4	0.5	0.2
	5	0.2	0.2
	6	0.5	0.1
E	1	1.0	0.2
	2	2.1	1.3
	3	1.1	0.8
	4	0.3	0.7
	5	0.6	0.1
	6	0.2	0.5
	7	0.9	0.2
	8	0.5	0.1
L1	1	0.2	0.2
	2	0.4	3.7
1C	1	2.5	0.4

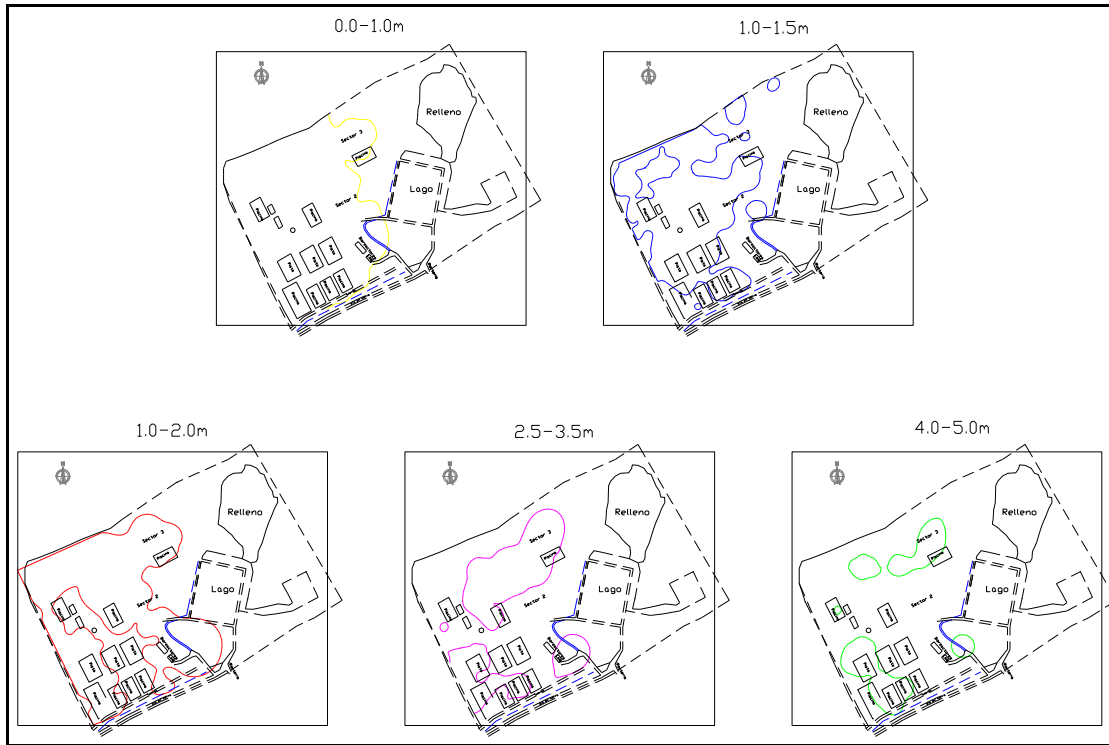
Anexo B Porcentaje de concentración de hidrocarburo del muestreo profundo

PRIMERA ETAPA					
Perforación	Prof. 1 a 2	Prof.2.5 a 3.5	Prof. 4 a 5	Prof. 5 a 6	Prof. 6 a 6.5
PF1	0.7	0.1	0.0		
PF2	0.0	0.1	0.0		
P01	0.9	0.2	0.1		
P02	3.5	1.0	0.0		
P03	4.0	7.9	10.9		
P04	3.0	0.1	0.0		
P05	0.5	0.8	1.4		
P06	10.2	0.1	3.4		
P07	3.1	2.1	3.0		
P08	2.2	1.2	8.5		
P09	1.1	0.8	0.2		
P10	1.1	1.4	0.1		
P11	1.3	1.9	0.8		
P12	0.3	0.1	0.1		
P13	0.2	0.1	0.2		
P14	0.0	1.9	6.1		
P15	5.1	3.2	0.2		
P16	3.9	0.3	0.9		
P17	0.9	0.4	0.7		
P18	1.6	0.9	0.1		
P19	0.9	2.3	1.8		
P20	0.3	0.1	0.1		
P21	4.6	1.0	0.3		
P22	3.0	0.6	0.2		
P23	1.8	0.7	0.4		
P24	5.6	1.3	0.5		
P25	0.8	4.4	1.1		
P26	0.2	0.1	0.0		
P27	0.1	0.0	0.0		
P28	0.3	1.4	1.0		
P29	0.0	0.0	0.0		
P30	1.1	0.2	0.0		
P31	3.3	1.5	1.5		
P32	0.0	0.1	0.0		
P33	0.1	0.0	0.0		
P34	0.1	0.0	0.0		

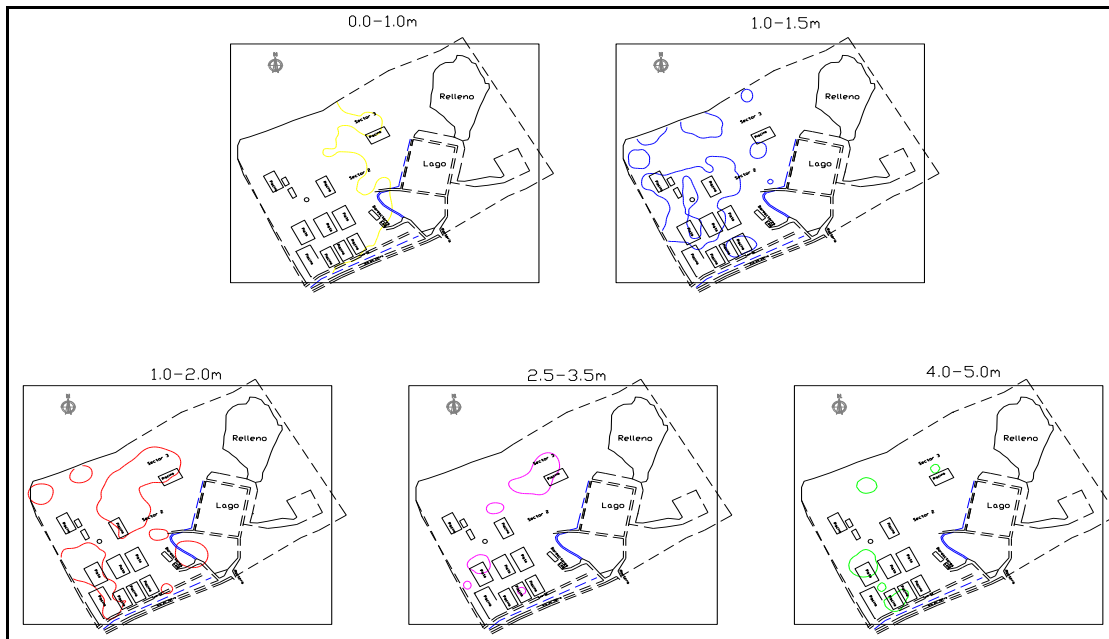
SEGUNDA ETAPA					
Perforación	Prof. 1 a 2	Prof.2.5 a 3.5	Prof. 4 a 5	Prof. 5 a 6	Prof. 6 a 6.5
P1	3.4	0.3	0.0		
P2	1.8	0.6	0.7		
P3	3.1	1.1	0.1		
P4	1.6	0.8	0.4		
P5	0.8	1.4	0.6		
P6	7.3	0.9	0.4		
P7	1.7	1.7	0.3		
P8	0.3	0.1	0.1		
P9	6.6	0.6	1.9		
P10	0.5	0.5	0.3		
P11	1.3	0.6	0.3		
P12	4.6	1.9	3.6		
P13	0.7	0.3	0.4		
P14	0.6	0.3	0.2		
P15	1.3	2.4	0.1		
P16	2.2	0.1	0.5	0.2	
P17	0.7	0.5	0.3		
P18	0.5	0.1	0.5		
P19	0.7	1.4	0.0		
P20	0.2	2.4	0.1		
P21	1.9	0.5	0.1		
P22	3.5	0.1	0.3		
P23	0.3	0.2	0.1		
P24	0.0	0.1	0.0		
P25	0.2	0.4	0.1		
P26	8.4	4.4	2.6	2.1	
P27	0.2	0.6	0.1		
P28	1.3	1.4	0.3		
P29	2.6	0.9	1.0	0.1	
P30	2.4	0.3	1.0	0.5	0.0
P31	1.4	0.3	1.0		
P32			0.3		
P33	0.7	0.2	0.6	0.3	0.2
P34	0.2	0.1	0.5		
P35	1.9	1.2	0.6		
P36	0.4	0.1	0.1		
P37	3.8	0.3	0.1		
P38	0.5	0.3	0.1		
P39	0.6	0.1	<0.010	0.1	
P40	0.2	0.1	0.0		
P41	0.1	0.1	0.1		
P42	0.3	1.1	0.1		

Anexo C Contornos de la concentración de hidrocarburo a cada profundidad

Anexo3a. Concentración de hidrocarburo mayor a 1%



Anexo3a. Concentración de hidrocarburo mayor a 2%



Anexo D Respuesta máxima de puntos de investigación LIF

ID del Punto	Prof. Total (m)	Respuesta Máxima	Comentarios
LIF-H3	6.45	18,0% @ 3,70 m	
LIF-J3	5.65	33,4% @ 3,31 m	Se observó producto libre
LIF-K3	4.36	18,0% @ 3,23 m	
LIF-L3	7.00	10,8% @ 3,20 m	
LIF-A3	6.02	74,7% @ 3,12 m	
LIF-A4	5.59	20,0% @ 2,57 m	
LIF-B3	5.09	25,9% @ 2,14 m	
LIF-B4	5.96	21,9% @ 2,67 m	
LIF-C3	5.60	27,4% @ 2,18 m	
LIF-C4	5.55	18,5% @ 3,04 m	
LIF-D3	4.95	37,2% @ 4,06 m	
LIF-D4	6.86	25,2% @ 3,85 m	
LIF-E3	6.44	11,1% @ 1,74 m	
LIF-E4	7.00	18,5% @ 1,69 m	
LIF-F3	6.30	17,4% @ 4,18 m	
LIF-F4	7.03	14,7% @ 1,26 m	
LIF-G3	6.10	19,8% @ 2,68 m	
LIF-G4	0.71	6,5% @ 0,07 m	Placa de concreto o similar @ 0,71 m
LIF-G4-2	1.54	5,2% @ 0,51 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 1,54 m
LIF-K4	7.03	9,2% @ 3,84 m	
LIF-E5	6.76	17,9% @ 2,90 m	
LIF-F5	6.89	15,9% @ 2,17 m	
LIF-G5	0.65	2,6% @ 0,65 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 0,65 m
LIF-H5	1.54	16,6% @ 1,48 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 1,54 m
LIF-I5	2.14	15,5% @ 1,33 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 2,14 m
LIF-J4	6.98	14,0% @ 2,09 m	
LIF-J5	6.90	11,8% @ 1,96 m	
LIF-K5	7.03	7,3% @ 1,88 m	
LIF-L5	1.18	1,3% @ 0,15 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 1,18 m
LIF-A5	7.02	21,9% @ 2,80 m	
LIF-A6	7.06	13,0% @ 2,15 m	
LIF-B5	7.01	18,6% @ 3,29 m	
LIF-B6	7.03	30,6% @ 4,25 m	
LIF-C5	7.01	18,0% @ 3,35 m	
LIF-C6	6.27	23,4% @ 4,69 m	
LIF-D5	7.01	20,6% @ 3,07 m	
LIF-G6	7.02	15,3% @ 2,63 m	
LIF-H6	6.79	15,7% @ 2,16 m	
LIF-I6	7.03	14,1% @ 3,75 m	
LIF-J6	7.03	11,1% @ 2,76 m	
LIF-K6	7.01	13,7% @ 1,85 m	
LIF-L6	7.01	9,3% @ 2,17 m	

ID del Punto	Prof. Total (m)	Respuesta Máxima	Comentarios
LIF-E6	7.02	26,0% @ 4,50 m	
LIF-E7	6.82	23,7% @ 2,83 m	
LIF-F6	7.03	21,1% @ 2,75 m	
LIF-F7	7.07	24,0% @ 2,78 m	
LIF-F8	7.05	27,1% @ 4,03 m	
LIF-G7	7.05	77,4% @ 0,00 m	
LIF-H7	7.04	16,3% @ 2,91 m	
LIF-I7	7.02	13,0% @ 2,08 m	
LIF-J7	7.01	45,2% @ 4,30 m	
LIF-K7	7.01	11,4% @ 1,32 m	
LIF-L7	7.01	16,6% @ 4,34 m	
LIF-A7	7.02	20,4% @ 3,15 m	
LIF-A8	7.02	18,1% @ 1,89 m	
LIF-A8'	2.03	14,6% @ 1,32 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 2,03 m
LIF-A8' #2	5.03	13,1% @ 1,06 m	
LIF-A9	7.04	82,5% @ 2,52 m	
LIF-A9'	7.07	7,6% @ 3,01 m	
LIF-B7	7.02	36,2% @ 4,42 m	
LIF-C7	7.02	25,2% @ 4,61 m	
LIF-D6	7.08	20,4% @ 3,81 m	
LIF-D7	6.87	33,9% @ 4,57 m	
LIF-A10	7.01	9,7% @ 0,81 m	
LIF-B10	7.02	30,5% @ 3,25 m	
LIF-B8	6.87	23,1% @ 4,12 m	
LIF-B9	7.01	23,7% @ 1,53 m	
LIF-C10	7.02	23,7% @ 1,66 m	
LIF-C8	7.02	28,5% @ 4,64 m	
LIF-C9	7.01	24,1% @ 1,92 m	
LIF-D10	7.04	56,7% @ 3,24 m	
LIF-D8	7.03	17,8% @ 2,26 m	
LIF-D9	7.00	11,9% @ 1,83 m	
LIF-E8	7.03	30,2% @ 4,35 m	
LIF-E9	7.02	37,2% @ 3,82 m	
LIF-F9	7.00	62,8% @ 4,17 m	
LIF-G8	7.01	6,0% @ 0,01 m	
LIF-G9	7.00	38,5% @ 1,20 m	
LIF-H8	7.01	18,3% @ 1,21 m	
LIF-H9	7.00	30,1% @ 1,84 m	
LIF-I8	7.06	14,7% @ 3,51 m	
LIF-I9	6.87	32,6% @ 2,32 m	
LIF-J8	7.03	14,1% @ 3,43 m	
LIF-J9	7.00	22,7% @ 1,57 m	
LIF-K8	7.01	15,1% @ 3,80 m	
LIF-L8	7.00	12,1% @ 0,93 m	
LIF-E10	7.01	36,6% @ 1,50 m	

ID del Punto	Prof. Total (m)	Respuesta Máxima	Comentarios
LIF-F10	7.00	33,9% @ 1,73 m	
LIF-G10	7.03	38,9% @ 2,15 m	
LIF-H10	7.00	32,9% @ 2,07 m	
LIF-I10	7.00	50,4% @ 2,46 m	
LIF-J10	7.00	30,0% @ 3,55 m	
LIF-K10	7.00	17,6% @ 0,99 m	
LIF-K9	1.04	18,0% @ 1,01 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 1,04 m
LIF-K9-2	7.01	18,0% @ 0,75 m	
LIF-L10	7.02	7,8% @ 1,33 m	
LIF-L9	7.00	21,7% @ 4,37 m	
LIF-M10	6.99	18,8% @ 1,43 m	
LIF-N10	7.00	10,3% @ 1,09 m	
LIF-M3	7.03	20,4% @ 3,06 m	
LIF-N11	7.01	19,5% @ 1,77 m	
LIF-N12	2.77	20,1% @ 2,34 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 2,77 m
LIF-N3	6.99	94,5% @ 3,01 m	
LIF-O10	7.03	4,5% @ 1,07 m	
LIF-O11	0.76	6,5% @ 0,76 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 0,76 m
LIF-O11-2	1.40	8,4% @ 1,08 m	
LIF-O12	7.00	9,5% @ 1,78 m	
LIF-G11	1.99	23,0% @ 1,47 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 1,99 m
LIF-H11	7.01	41,1% @ 4,65 m	
LIF-I11	7.00	29,3% @ 2,32 m	
LIF-J11	7.01	38,6% @ 1,56 m	
LIF-K11	7.00	22,5% @ 1,54 m	
LIF-L11	7.00	10,1% @ 1,87 m	
LIF-M11	7.01	17,9% @ 0,84 m	Se observó producto libre. La máxima respuesta es ocasionada, probablemente, por la raíz de un árbol u otro tipo de materia orgánica.
LIF-A11	7.01	17,3% @ 4,17 m	
LIF-A12	7.01	40,1% @ 2,74 m	
LIF-B11	7.00	30,8% @ 1,43 m	
LIF-B12	7.01	34,9% @ 1,95 m	
LIF-C11	7.00	31,3% @ 1,32 m	
LIF-C12	7.01	19,3% @ 3,27 m	
LIF-D11	7.01	37,9% @ 1,67 m	
LIF-D12	7.00	43,5% @ 3,48 m	
LIF-E11	7.00	30,4% @ 1,70 m	
LIF-E12	7.00	51,6% @ 1,86 m	
LIF-F11	7.00	43,2% @ 1,71 m	
LIF-F12	7.00	37,9% @ 2,23 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-G11-2	7.02	45,9% @ 4,47 m	
LIF-G12	1.98	24,6% @ 1,97 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 1,98m
LIF-G12-2	7.02	37,1% @ 1,98 m	
LIF-H12	7.03	32,9% @ 3,34 m	

ID del Punto	Prof. Total (m)	Respuesta Máxima	Comentarios
LIF-I12	7.01	37,4% @ 2,60 m	
LIF-J12	7.01	24,7% @ 3,21 m	
LIF-K12	7.02	22,6% @ 1,59 m	
LIF-L12	7.01	45,5% @ 3,09 m	
LIF-M12	7.01	13,5% @ 1,15 m	
LIF-M13	6.98	34,5% @ 3,49 m	
LIF-N13	7.01	18,8% @ 4,03 m	
LIF-O13	7.00	29,7% @ 2,96 m	
LIF-B13	7.01	29,1% @ 2,33 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-C13	7.00	29,0% @ 2,15 m	
LIF-D13	7.02	15,6% @ 1,70 m	
LIF-E13	7.01	26,9% @ 3,60 m	
LIF-F13	7.00	39,0% @ 4,24 m	
LIF-G13	7.02	58,6% @ 4,31 m	
LIF-H13	7.02	37,9% @ 3,51 m	
LIF-I13	7.04	24,0% @ 2,96 m	
LIF-J13	7.01	49,5% @ 3,28 m	
LIF-K13	7.01	18,8% @ 2,58 m	
LIF-L13	7.02	30,0% @ 4,13 m	
LIF-A13	7.00	32,8% @ 2,57 m	
LIF-A14	7.01	14,7% @ 0,02 m	
LIF-B14	7.01	18,4% @ 2,01 m	
LIF-C14	6.99	10,8% @ 3,53 m	
LIF-D14	7.03	19,0% @ 1,77 m	
LIF-E14	7.01	36,1% @ 3,97 m	Se observó producto libre
LIF-F14	7.01	44,2% @ 5,32 m	Se observó producto libre
LIF-G14	7.00	56,0% @ 3,65 m	Se observó producto libre
LIF-H14	7.00	31,4% @ 2,23 m	
LIF-I14	7.01	48,8% @ 3,23 m	
LIF-J14	7.01	21,3% @ 2,54 m	
LIF-K14	7.00	16,2% @ 1,31 m	
LIF-L14	6.99	15,9% @ 2,18 m	
LIF-M14	7.00	30,0% @ 3,48 m	Se percibió olor a hidrocarburo o
LIF-N14	0.75	4,1% @ 0,75 m	
LIF-N14-2	7.00	14,0% @ 1,19 m	Se observó iridiscencia
LIF-O14	7.01	17,7% @ 1,48 m	Se observó iridiscencia
LIF-P14	7.00	17,3% @ 3,01 m	
LIF-R15	7.00	16,7% @ 3,95 m	
LIF-Q15	7.00	22,5% @ 3,79 m	
LIF-P15	6.19	39,6% @ 5,94 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 6,19 m
LIF-O15	7.00	16,3% @ 2,06 m	
LIF-B15	7.02	10,3% @ 2,60 m	
LIF-C15	7.00	32,8% @ 2,54 m	
LIF-D15	7.00	31,1% @ 1,52 m	
LIF-E15	7.00	47,4% @ 4,39 m	

ID del Punto	Prof. Total (m)	Respuesta Máxima	Comentarios
LIF-F15	7.01	42,2% @ 3,73 m	
LIF-G15	7.01	27,9% @ 1,96 m	
LIF-H15	7.02	38,9% @ 4,68 m	Se percibió olor a hidrocarburo y se observó producto libre
LIF-I15	7.01	28,4% @ 3,29 m	
LIF-J15	6.99	25,7% @ 2,73 m	
LIF-K15	6.99	33,0% @ 3,78 m	
LIF-L15	7.00	16,6% @ 2,57 m	
LIF-M15	7.00	18,8% @ 3,85 m	
LIF-N15	7.01	24,3% @ 0,00 m	
LIF-A15	7.00	71,5% @ 3,34 m	
LIF-B16	7.00	13,2% @ 1,68 m	
LIF-B17	6.99	33,8% @ 2,81 m	
LIF-B18	7.00	19,6% @ 1,29 m	
LIF-B19	7.01	17,1% @ 1,62 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-B20	7.01	17,4% @ 2,60 m	
LIF-B21	7.02	13,0% @ 3,29 m	
LIF-B22	7.01	14,7% @ 1,56 m	
LIF-C21	7.01	17,4% @ 4,21 m	
LIF-C22	7.02	25,0% @ 0,41 m	
LIF-C16	7.00	26,6% @ 2,49 m	Se observaron lodos de hidrocarburo
LIF-C17	1.91	0,3% @ 0,00 m	Problemas con lecturas de sonda.
LIF-C17-2	7.01	19,6% @ 2,37 m	
LIF-C18	6.79	22,5% @ 3,39 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-C19	7.00	18,9% @ 1,57 m	
LIF-C20	7.00	18,7% @ 1,75 m	
LIF-D16	7.00	38,1% @ 2,82 m	
LIF-D17	7.00	30,2% @ 2,61 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-D18	7.01	39,5% @ 1,96 m	
LIF-D19	7.00	21,5% @ 1,61 m	
LIF-D20	7.00	21,2% @ 1,42 m	
LIF-D21	7.00	17,6% @ 1,90 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-D22	7.01	16,2% @ 1,10 m	
LIF-E17	7.02	63,2% @ 2,65 m	
LIF-E18	7.00	34,7% @ 2,23 m	
LIF-E19	7.00	23,4% @ 2,00 m	
LIF-E20	7.00	24,6% @ 1,43 m	
LIF-E21	7.02	15,9% @ 1,66 m	
LIF-E22	7.00	21,7% @ 1,63 m	
LIF-E16	7.00	47,0% @ 2,59 m	Se observaron lodos de hidrocarburo
LIF-F16	7.00	32,5% @ 2,49 m	
LIF-F17	1.07	10,1% @ 0,83 m	Problemas con 'String Pot'
LIF-F17-2	0.98	26,7% @ 0,98 m	Problemas con 'String Pot'
LIF-F17-3	0.99	8,6% @ 0,32 m	Problemas con 'String Pot'
LIF-F17-4	7.00	30,3% @ 3,82 m	

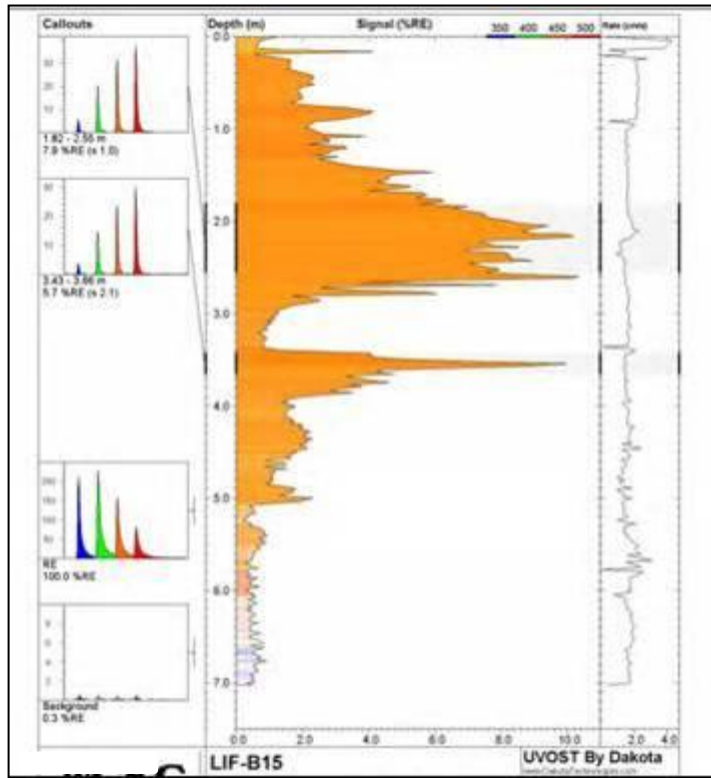
ID del Punto	Prof. Total (m)	Respuesta Máxima	Comentarios
LIF-F18	6.97	30,1% @ 2,38 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-F19	7.00	35,0% @ 4,02 m	
LIF-F20	7.00	25,2% @ 1,84 m	
LIF-F21	6.99	24,4% @ 1,70 m	
LIF-F22	6.98	21,6% @ 1,10 m	
LIF-G16	6.97	44,0% @ 2,35 m	
LIF-G17	7.07	54,0 % @ 4,42 m	
LIF-G18	6.97	28,6% @ 2,76 m	
LIF-G19	7.00	25,5% @ 2,36 m	
LIF-G20	7.01	27,7% @ 4,05 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-G21	6.98	25,6% @ 2,41 m	
LIF-H16	6.98	32,6% @ 2,31 m	
LIF-H17	7.00	42,9% @ 4,35 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-H18	6.99	32,1% @ 2,08 m	
LIF-H19	7.00	25,4% @ 1,73 m	
LIF-H20	6.99	39,1% @ 3,83 m	
LIF-H21	7.00	25,8% @ 2,27 m	
LIF-I17	6.98	33,7% @ 2,41 m	
LIF-I18	6.98	38,8% @ 4,29 m	
LIF-I19	6.99	32,9% @ 2,24 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-I20	7.00	44,8% @ 3,92 m	
LIF-I21	7.00	18,8% @ 1,96 m	
LIF-I16	6.97	31,6% @ 3,25 m	
LIF-J16	1.30	13,6% @ 1,30 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 1,3 m
LIF-J16-2	6.98	34,3% @ 2,13 m	
LIF-J17	1.50	11,7% @ 1,32 m	Problemas con 'String Pot', que no registra profundidad.
LIF-J17-2	7.00	38,7% @ 3,39 m	
LIF-J18	6.99	28,9% @ 2,18 m	
LIF-J19	7.00	61,5% @ 1,08 m	
LIF-J20	6.98	26,8% @ 2,61 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-J21	6.98	21,8% @ 2,32 m	
LIF-K18	7.00	63,8% @ 1,93 m	Fuerte olor a hidrocarburo e iridiscencia
LIF-K19	7.00	45,8% @ 4,60 m	
LIF-K20	6.99	41,6% @ 3,98 m	
LIF-K21	6.98	22,3% @ 2,35 m	
LIF-K16	3.75	36,1% @ 2,93 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-K17	6.99	30,7% @ 2,39 m	
LIF-L16	7.00	39,3% @ 3,32 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-M16	7.00	18,9% @ 1,18 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-N16	7.00	41,9% @ 3,83 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-O16	7.00	25,8% @ 4,00 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-M17	6.99	19,4% @ 1,55 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-N17	7.01	36,4% @ 4,00 m	
LIF-O17	6.48	24,5% @ 3,71 m	

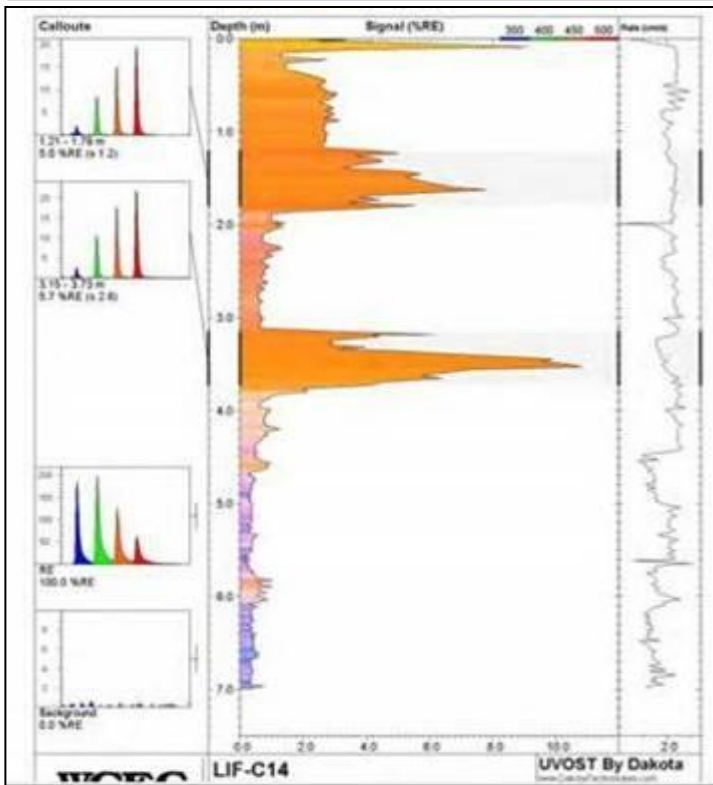
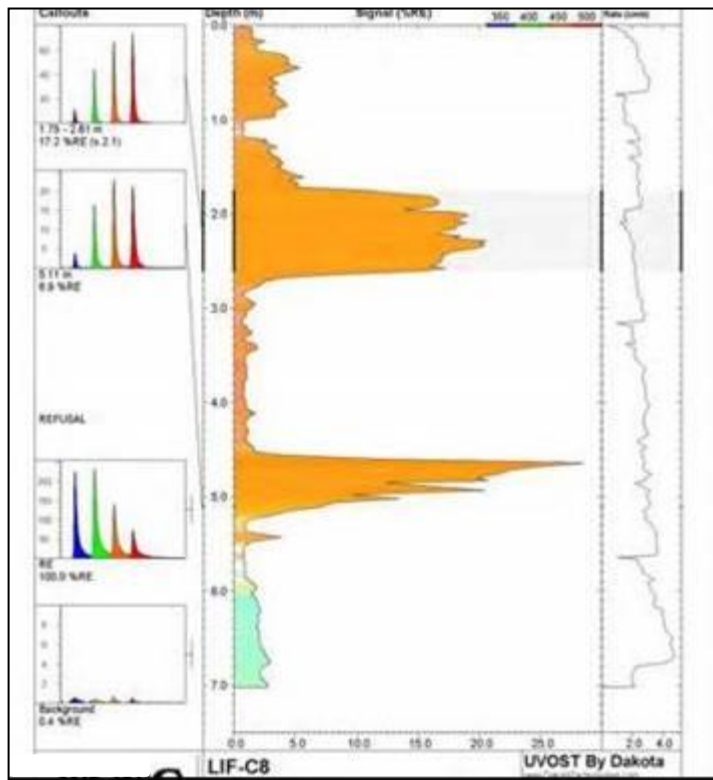
ID del Punto	Prof. Total (m)	Respuesta Máxima	Comentarios
LIF-P16	0.92	2,6% @ 0,17 m	Se encontró placa de concreto o similar @ 0,92 m
LIF-P16-2	7.06	22,7% @ 3,57 m	
LIF-P17	6.99	24,2% @ 2,96 m	Se percibió un leve olor a hidrocarburo
LIF-Q16	6.99	29,2% @ 4,51 m	
LIF-Q17	6.99	21,1% @ 3,61 m	
LIF-R16	6.99	49,0% @ 5,48 m	
LIF-R17	6.99	21,1% @ 4,05 m	
LIF-S16	7.01	21,5% @ 4,22 m	
LIF-S17	6.99	28,0% @ 1,10 m	
LIF-L17	6.99	26,9% @ 3,32 m	
LIF-L18	7.00	36,8% @ 2,86 m	
LIF-L18-5	6.99	28,5% @ 2,80 m	Punto de delineación de impacto en L19
LIF-L19	7.00	102,0% @ 2,58 m	
LIF-L19-5	7.01	44,0% @ 2,56 m	Punto de delineación de impacto en L19
LIF-L20	7.01	40,3% @ 2,60 m	
LIF-L21	7.05	49,6% @ 2,06 m	
LIF-LM19	6.98	35,6% @ 1,89 m	Punto de delineación de impacto en L19
LIF-M20	6.99	31,8% @ 1,90 m	
LIF-M21	7.02	30,9% @ 0,99 m	
LIF-N21	7.01	23,6% @ 2,02 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-N18	7.01	26,2% @ 2,12 m	
LIF-N19	7.00	32,0% @ 2,25 m	
LIF-N20	7.00	29,5% @ 2,69 m	
LIF-O18	7.00	32,6% @ 2,31 m	
LIF-O19	6.99	26,7% @ 2,86 m	
LIF-O20	7.00	27,3% @ 2,56 m	
LIF-O21	6.98	29,6% @ 2,37 m	Se percibió olor a hidrocarburo
LIF-P18	6.99	27,5% @ 2,19 m	
LIF-P19	6.99	23,4% @ 2,42 m	
LIF-P20	7.01	21,5% @ 2,67 m	
LIF-P21	7.01	26,9% @ 2,42 m	
LIF-P22	6.98	32,4% @ 2,54 m	
LIF-Q18	6.99	36,8% @ 5,07 m	
LIF-Q19	7.00	32,9% @ 3,51 m	
LIF-Q20	7.00	37,7% @ 1,36 m	
LIF-Q21	7.00	21,7% @ 2,56 m	
LIF-Q22	7.00	25,4% @ 2,50 m	
LIF-R18	6.98	31,1% @ 3,23 m	
LIF-R19	7.04	27,3% @ 3,88 m	
LIF-R20	6.99	28,9% @ 4,12 m	
LIF-R21	6.99	25,4% @ 4,73 m	
LIF-R22	7.00	24,7% @ 3,21 m	
LIF-A2	7.01	101,0% @ 2,83 m	Se observó producto libre
LIF-B2	6.99	74,4% @ 3,33 m	
LIF-C2	6.99	43,0% @ 1,63 m	

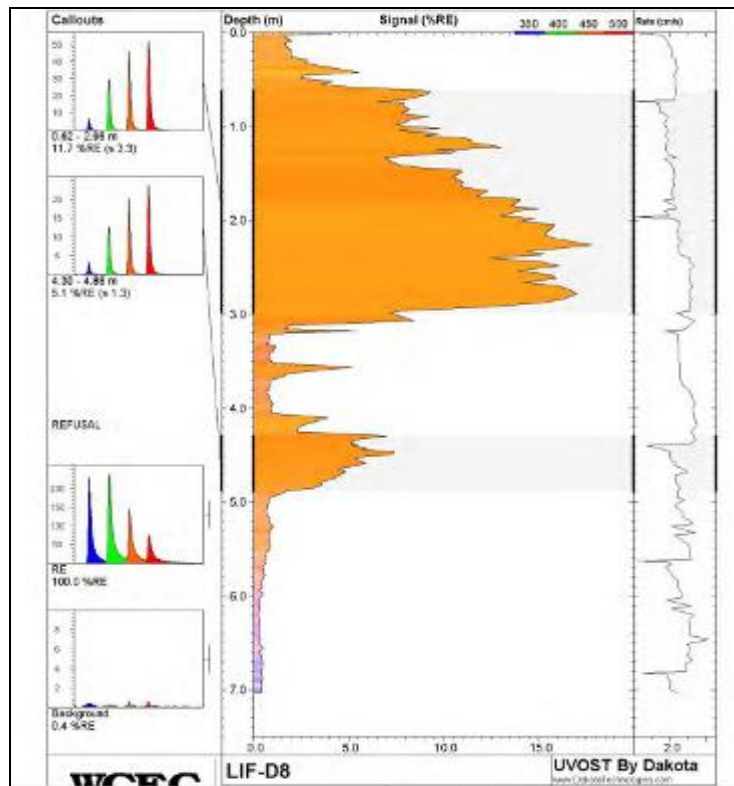
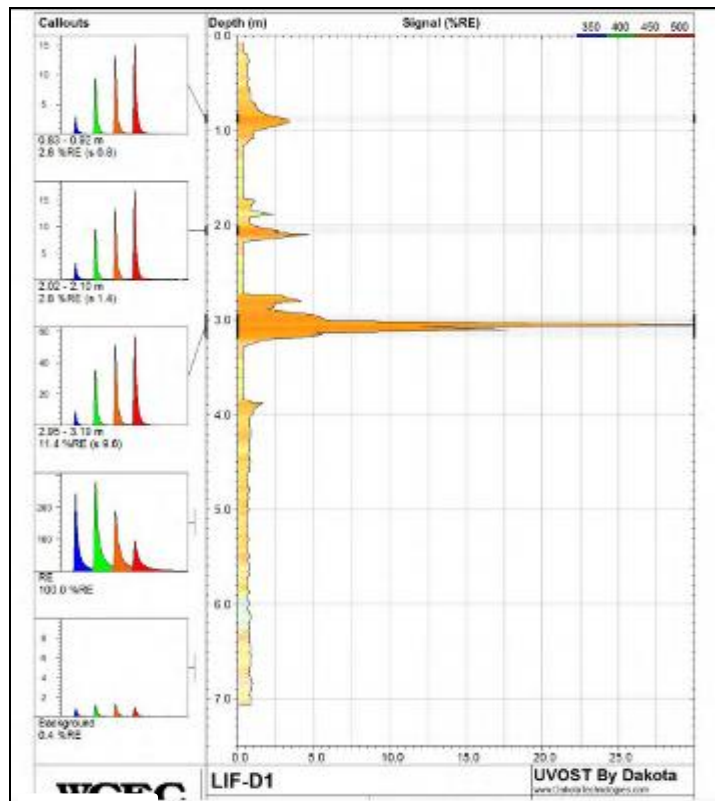
ID del Punto	Prof. Total (m)	Respuesta Máxima	Comentarios
LIF-D2	6.99	20,1% @ 1,45 m	
LIF-E2	7.02	12,2% @ 3,50 m	
LIF-F2	7.01	11,4% @ 0,54 m	
LIF-S18	6.98	46,6% @ 1,10 m	
LIF-S19	7.00	20,6% @ 5,03 m	
LIF-S20	7.00	25,9% @ 5,55 m	
LIF-S21	7.00	23,7% @ 4,03 m	
LIF-S22	6.99	53,8% @ 0,34 m	

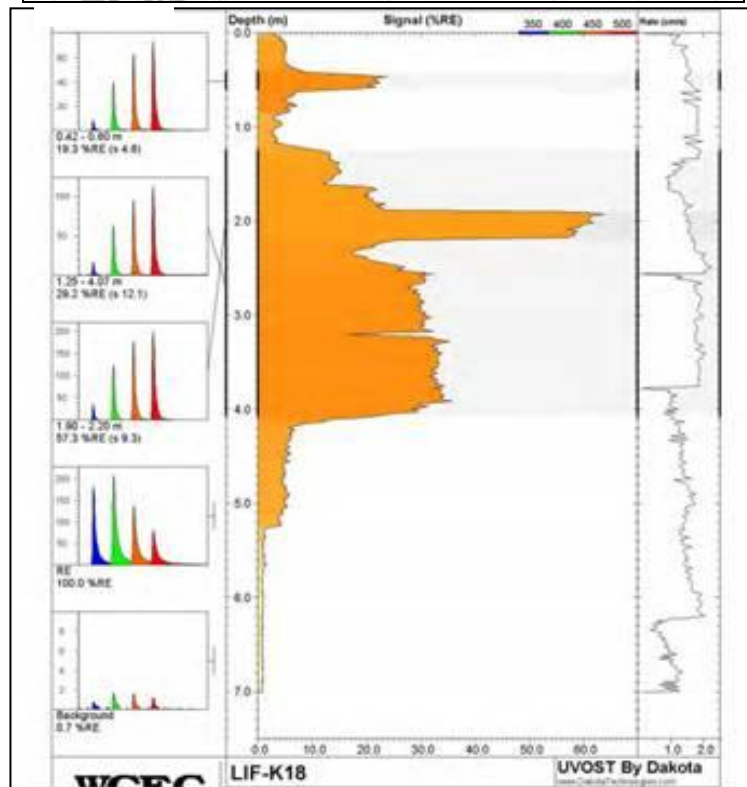
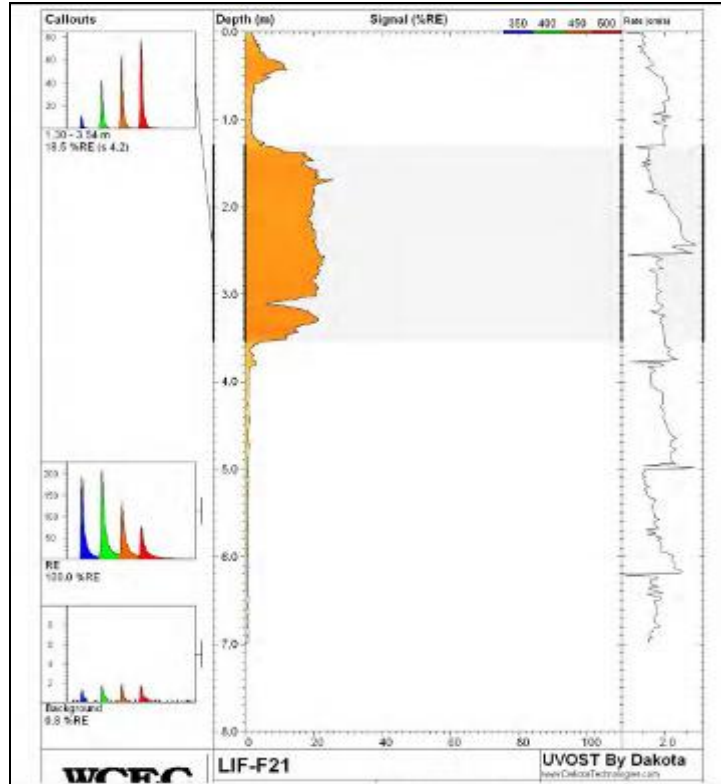
Fuente: Suministrado por la empresa

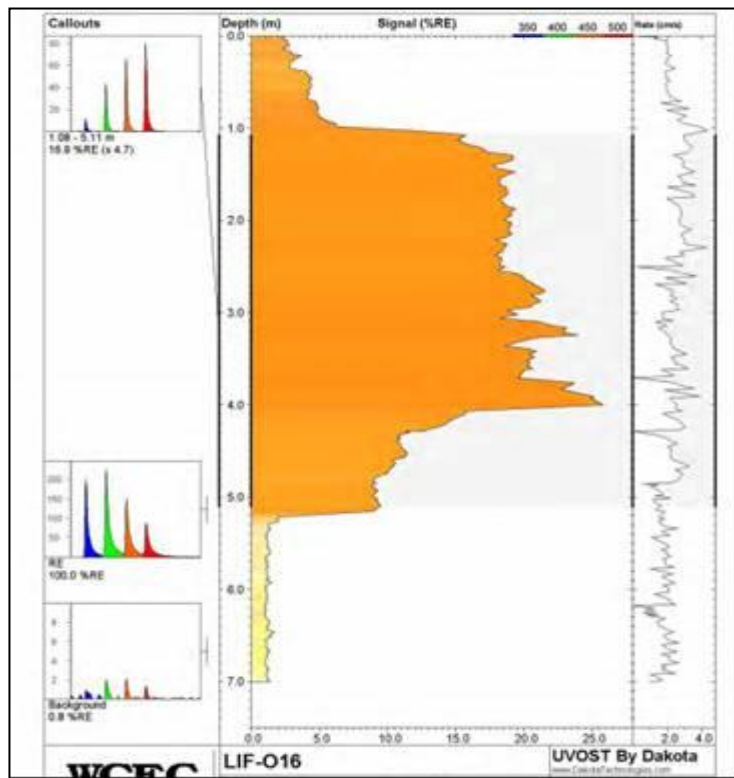
Anexo E Registros emitidos por el equipo LIF











Fuente: Suministrado por la empresa

Anexo F Datos de porcentaje de hidrocarburo según el porcentaje de respuesta LIF

% LIF	% HC	% LIF	% HC	% LIF	% HC	% LIF	% HC
1	0.001	26	0.838	51	3.746	76	9.092
2	0.003	27	0.911	52	3.911	77	9.360
3	0.007	28	0.988	53	4.080	78	9.632
4	0.013	29	1.068	54	4.253	79	9.908
5	0.021	30	1.152	55	4.431	80	10.189
6	0.032	31	1.239	56	4.612	81	10.475
7	0.045	32	1.329	57	4.797	82	10.764
8	0.061	33	1.423	58	4.986	83	11.058
9	0.079	34	1.521	59	5.179	84	11.357
10	0.100	35	1.622	60	5.376	85	11.659
11	0.124	36	1.727	61	5.577	86	11.966
12	0.150	37	1.836	62	5.782	87	12.278
13	0.180	38	1.948	63	5.992	88	12.594
14	0.212	39	2.064	64	6.205	89	12.914
15	0.247	40	2.183	65	6.423	90	13.239
16	0.285	41	2.306	66	6.644	91	13.568
17	0.326	42	2.433	67	6.870	92	13.902
18	0.370	43	2.564	68	7.100	93	14.240
19	0.417	44	2.698	69	7.334	94	14.582
20	0.468	45	2.836	70	7.573	95	14.929
21	0.521	46	2.978	71	7.815	96	15.281
22	0.578	47	3.124	72	8.062	97	15.637
23	0.638	48	3.274	73	8.313	98	15.997
24	0.701	49	3.427	74	8.568	99	16.362
25	0.768	50	3.585	75	8.828	100	16.732

Anexo G Presupuesto aproximado para aplicar las metodologías en el área.

Monitoreo exploratorio de suelo

Actividad	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
Análisis de suelo	un	634	\$ 200,000	\$ 126,800,000
Perforación mecánica y manual	ml	770	\$ 480,000	\$ 369,600,000
Reporte	Gl	1	\$ 45,000,000	\$ 45,000,000
				\$ 541,400,000

Caracterización de suelo de alta resolución

Actividad	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
Despeje y escaneo del área	Gl	1	\$ 46.600.000	\$ 46.600.000
Caracterización LIF	ml	2114	\$ 300,000	\$ 634.200.000
Muestreo y análisis de suelo	un	17	\$ 2,200,000	\$ 37.400.000
Perforación mecánica	ml	119	\$ 250,000	\$ 29.750.000
Reporte	Gl	1	\$ 45,000,000	\$ 45.000.000
				\$ 792.950,000