

GESTIÓN DE  
RIESGOS EN LOS

EMPLA-  
ZAMIENTOS  
TOS  
CON  
LNAPL





DIESEL  
132 9

GESTIÓN DE  
RIESGOS EN LOS

# EMPLA- ZAMIENTOS CON LNAPL

PREGUNTAS  
FRECUENTES

2.ª EDICIÓN

American Petroleum Institute  
Soil and Groundwater Research  
Boletín n.º 18

Copyright 2018 – American Petroleum Institute, todos  
los derechos reservados.

Tom Sale  
Harley Hopkins  
Andrew Kirkman

Mayo de 2018



## NOTAS ESPECIALES

Las publicaciones de API abarcan, necesariamente, problemas de naturaleza genérica. Para situaciones específicas se deben consultar las normativas y leyes locales, estatales y federales.

Ni API ni ninguno de sus empleados, subcontratistas, consultores, comités u otros cesionarios otorgan ninguna garantía ni realizan ninguna declaración, expresa o implícita, sobre la exactitud, integridad o utilidad de la información aquí incluida, como tampoco asumen ninguna responsabilidad por el uso o los resultados del uso de cualquier información o proceso divulgado en la presente publicación. Ni API ni ninguno de sus empleados, subcontratistas, consultores u otros cesionarios declaran que el uso de estas publicaciones no infringiría derechos de propiedad privada.

Las publicaciones de API las puede utilizar cualquier persona que lo desee. El Instituto ha hecho todo lo posible para garantizar la exactitud y fiabilidad de los datos contenidos en sus publicaciones; no obstante, el Instituto no realiza ninguna declaración ni garantía en relación a estas publicaciones y por el presente renuncia expresamente a cualquier responsabilidad por las pérdidas o daños que se deriven de su uso o por la infracción de cualquier autoridad competente con la que estas publicaciones entren en conflicto. API no otorga ninguna garantía, ni expresa ni implícita, respecto a la fiabilidad u omisiones de la información o las ecuaciones contenidas en estos documentos. Los ejemplos que se ofrecen en estos documentos tienen sólo fines ilustrativos. No deben considerarse exclusivos ni exhaustivos por su naturaleza.

Las publicaciones de API se llevan a cabo para facilitar la diseminación de prácticas demostradas y sólidas de ingeniería y operabilidad. Estas publicaciones no pretenden substituir la aplicación de criterios profesionales sobre ingeniería con respecto a dónde y cuándo se deben utilizar estas publicaciones. La elaboración y diseminación de las publicaciones de API no pretenden impedir de ningún modo que cualquier persona utilice cualquier otra práctica.

Nada de lo incluido en cualquier publicación de API otorga ningún derecho, ni implícito ni de ninguna otra forma, para la fabricación, venta o uso de cualquier método, aparato o producto sujeto a patente o la propiedad intelectual. Tampoco nada de lo incluido en las publicaciones absuelve a ninguna persona de responsabilidad causada por infringir patentes o la propiedad intelectual.

American Petroleum Institute  
Regulatory and Scientific Affairs  
1220 L Street, NW  
Washington, DC 20005  
EE. UU.

[www.API.org](http://www.API.org)



# ÍNDICE

Prólogo	2
Descripción general	4
<b>Introducción</b>	
¿Qué es LNAPL?	5
¿Cuál es la idea más reciente e importante que afectará a la gestión de los LNAPL en el futuro?	7
¿Por qué es importante reconocer que los vertidos de LNAPL evolucionan con el tiempo?	9
¿Estamos haciendo progresos respecto a los vertidos de LNAPL?	13
<b>Conceptos fundamentales</b>	
¿Qué ocurre cuando hay un vertido de LNAPL?	14
¿Cómo se distribuyen los LNAPL bajo la superficie y cuál es su importancia?	16
¿Por qué los cambios en el nivel del agua subterránea lo complican todo?	19
¿Qué podemos aprender gracias al espesor de los LNAPL en pozos de agua subterránea?	20
¿Cuál es la causa del complejo comportamiento de los LNAPL que se observa en pozos de agua subterránea?	24
¿Qué podemos aprender gracias a parámetros de calidad del agua subterránea?	27
¿Qué se puede lograr con la recuperación hidráulica?	29
¿Qué se puede lograr con la extracción de vapores de suelo?	31
¿Cuándo se estabilizan las masas de LNAPL?	33
¿Qué dificulta la retirada de vertidos de LNAPL?	35
<b>Ideas emergentes</b>	
¿Qué fomenta el agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen (NSZD)?	37
¿Cuál es la mejor manera de medir los índices del agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen (NSZD)?	41
¿En qué consisten los límites viables para la recuperación de LNAPL?	48
¿Cuándo se convierte la intrusión de vapores en un problema?	49
¿Por qué las pátinas de LNAPL son un gran problema?	51
¿Qué causa las pátinas de LNAPL?	52
<b>Investigación Vigente</b>	
¿Se pueden mejorar los niveles de agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen?	55
¿Durante cuánto tiempo persistirán los efectos directos e indirectos de los LNAPL en las aguas subterráneas?	56
¿Se puede usar la temperatura para monitorear emplazamientos con LNAPL?	57
¿Existen alternativas viables al dragado de sedimentos contaminados por hidrocarburos?	58
Otras fuentes de información	59
Referencias	61



## PRÓLOGO

En 2003, el American Petroleum Institute elaboró una revisión concisa de los conceptos vigentes sobre los LNAPL (líquidos ligeros en fase no acuosa) en el suelo y las aguas subterráneas titulada *Respuestas a las preguntas frecuentes sobre la gestión de riesgos en emplazamientos con LNAPL (Boletín de API n.º 18)*. Solo durante el primer año circularon miles de copias en todo el mundo. Dentro de la comunidad de profesionales de la descontaminación ambiental, el documento fue un éxito.

Diez años después han surgido nuevos conocimientos fundamentales que ofrecen mejores soluciones para los LNAPL. De forma patente, casi el 80 por ciento de las referencias citadas en esta 2.ª edición se publicaron desde la aparición de la 1.ª edición.

En esta actualización de las “Preguntas frecuentes sobre los LNAPL”, se perfeccionan las ideas fundamentales y se ofrecen nuevos conceptos. El formato es el mismo que para la versión anterior: breves respuestas a preguntas con una guía de conocimientos adicionales para aquellas personas que deseen saber más.

A medida que avance en la lectura de las preguntas y respuestas que se presentan aquí, es importante recordar que la gestión general de los emplazamientos implica la adopción de decisiones no solo sobre los propios hidrocarburos líquidos sino también sobre otros medios afectados y rutas de exposición (p. ej., plumas de hidrocarburos disueltos e intrusión de vapores adentro de espacios cerrados). Presuponemos que el lector cuenta con conocimientos básicos sobre la forma en que los LNAPL, las plumas de hidrocarburos disueltos y los vapores se generan a partir de derrames de hidrocarburos líquidos y la forma en que la atenuación natural y otros procesos de descontaminación (naturales o no) limitan su movilidad y extensión. Los lectores que necesiten conocer estos antecedentes pueden visitar Shell/LORAX Animated Information System—Groundwater Assessment and Remediation en [www.API.org](http://www.API.org).

Instamos a los lectores a aprender, acoger nuevas ideas y desarrollar soluciones sostenibles.



## DESCRIPCIÓN GENERAL

Desde el transporte y los bienes de consumo hasta la producción de alimentos, los hidrocarburos líquidos son fundamentales para nuestras vidas modernas. Una consecuencia lamentable del uso que hacemos de los hidrocarburos líquidos son los vertidos accidentales de estos en el suelo y en las aguas subterráneas. Todos tenemos mucho que ganar empleando los mejores conocimientos disponibles para gestionar los emplazamientos con LNAPL.

A mediados del siglo XIX, los nuevos métodos de perforación (p. ej., herramientas de percusión por cable) facilitaron el auge de los hidrocarburos líquidos como alternativa al uso insostenible del aceite de ballena para la iluminación (aceite para lámparas). Se inició una gran revolución. Posteriormente, los nuevos usos de los hidrocarburos líquidos incluyeron combustible para la calefacción, combustible para motores de combustión interna, materia prima para fibras sintéticas y combustible para motores a reacción (por nombrar tan solo unos pocos).

Los vertidos involuntarios al medio ambiente son el legado del uso que hacemos de los hidrocarburos líquidos. Los vertidos sobre aguas superficiales a menudo reciben una amplia cobertura. Los vertidos sobre el suelo y las aguas subterráneas no son, a menudo, inmediatamente aparentes. Por ejemplo, a finales del siglo XX, se reconoció que numerosos sistemas de almacenamiento de hidrocarburos subterráneos, antiguos y con un mantenimiento indebido utilizados en las gasolineras, vertían petróleo bajo la superficie.

Afortunadamente, casi la totalidad de la infraestructura subterránea de las gasolineras en Estados Unidos ha sido sustituida por sistemas modernos muy mejorados. Al mismo tiempo, la infraestructura y las prácticas en oleoductos, refinerías y terminales de combustible también han sido objeto de mejoras.

El uso de los mejores conocimientos disponibles, que aquí se presentan, ofrece la promesa de mejores subsanaciones medioambientales, ventajas para las comunidades en las que existen instalaciones petrolíferas y menores costes para los consumidores.

# INTRODUCCIÓN

## ¿Qué es LNAPL?

LNAPL (líquidos ligeros en fase no acuosa) es un término técnico práctico empleado para describir los hidrocarburos líquidos que se encuentran generalmente en sistemas de aguas subterráneas y suelos poco profundos. Los LNAPL:

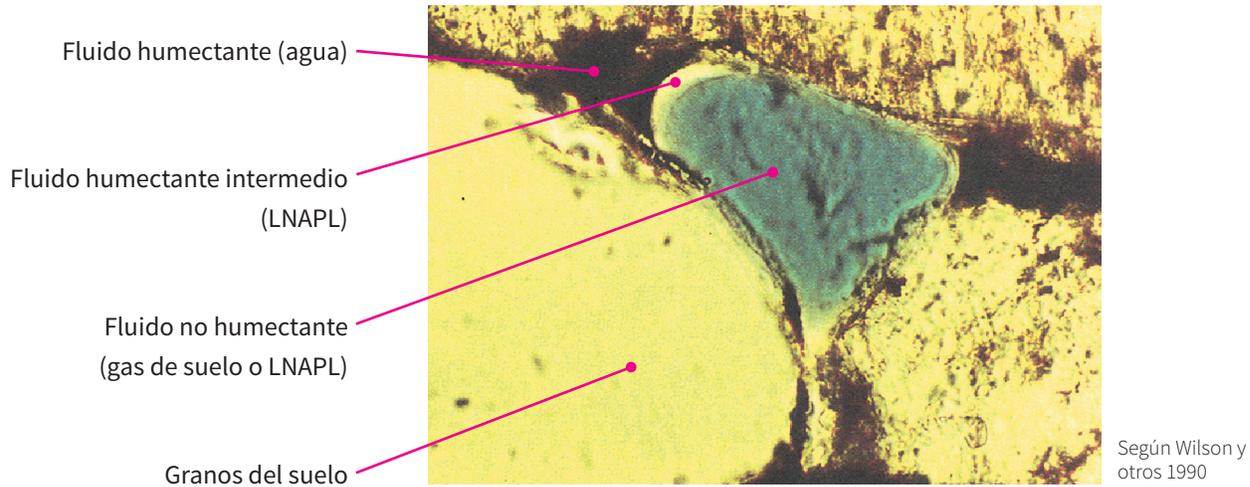
- ▶ Son menos densos que el agua – (flotan en el agua)
- ▶ Son inmiscibles con el agua – (no se mezclan con el agua)
- ▶ A menudo están formados por diferentes compuestos orgánicos
- ▶ Suelen ser una fuente persistente de contaminantes de las aguas subterráneas y el gas de suelo.

En el siglo XXI, la comunidad técnica acordó el uso del término “LNAPL” para describir los hidrocarburos líquidos presentes entre las aguas subterráneas y suelos poco profundos. Sinónimos de este término son “producto”, “líquido en fase libre” y “líquido en fase separada”. La mayoría de los LNAPL se derivan del refinado de petróleo crudo. Los productos refinados que comúnmente forman LNAPL son la gasolina, el diésel, el combustible para aviones, los lubricantes y las materias primas para el sector químico.

Un aspecto fundamental de la gestión de los LNAPL es comprender su comportamiento en materiales geológicos naturales, como las rocas y los sedimentos no consolidados.

1. Los LNAPL se encuentran normalmente cerca de la elevación donde primero aparece el agua subterránea (la capa freática). La flotabilidad de los LNAPL en el agua limita su migración a la zona saturada por aguas subterráneas. Existen unas importantes excepciones a que los LNAPL se limiten a la capa freática, a saber: emplazamientos donde los niveles de agua hayan aumentado o disminuido a lo largo del tiempo; medios fracturados, incluidos estratos de grano fino en los que la dispersión lateral de los LNAPL está limitada; y situaciones en las que los LNAPL acumulados han hecho que estos se sitúen por debajo de la capa freática, de forma similar a un iceberg en el océano.
2. Cuando se combinan, los LNAPL y las fases del agua no se mezclan. Son básicamente inmiscibles. El resultado es que los LNAPL bajo la superficie y el agua comparten el espacio poroso en el suelo y las rocas afectados por estos. Este “uso compartido del espacio poroso” limita la movilidad de los LNAPL y complica su recuperación. Reconocer que los vertidos de LNAPL constituyen un problema que afecta a varias fases de fluidos en el espacio poroso es fundamental para desarrollar soluciones para los LNAPL (esta idea será objeto de más atención posteriormente).

3. Los LNAPL se componen de mezclas de moléculas orgánicas que solo son ligeramente solubles en el agua. Cuando los LNAPL entran en contacto con las aguas subterráneas, aquellos componentes orgánicos presentes como trazas o en concentraciones bajas se disolverán en ellas. Esta mezcla a menudo resulta en que se excedan los estándares de calidad del agua cerca de las zonas de LNAPL. Una ventaja que presenta la baja solubilidad es que las concentraciones disueltas en las aguas subterráneas son normalmente lo suficientemente bajas como para que los procesos naturales atenúen los contaminantes en cortas distancias. Una desventaja de la baja solubilidad es que los LNAPL pueden persistir como fuente de contaminación de las aguas subterráneas y los vapores de suelo durante largos periodos.



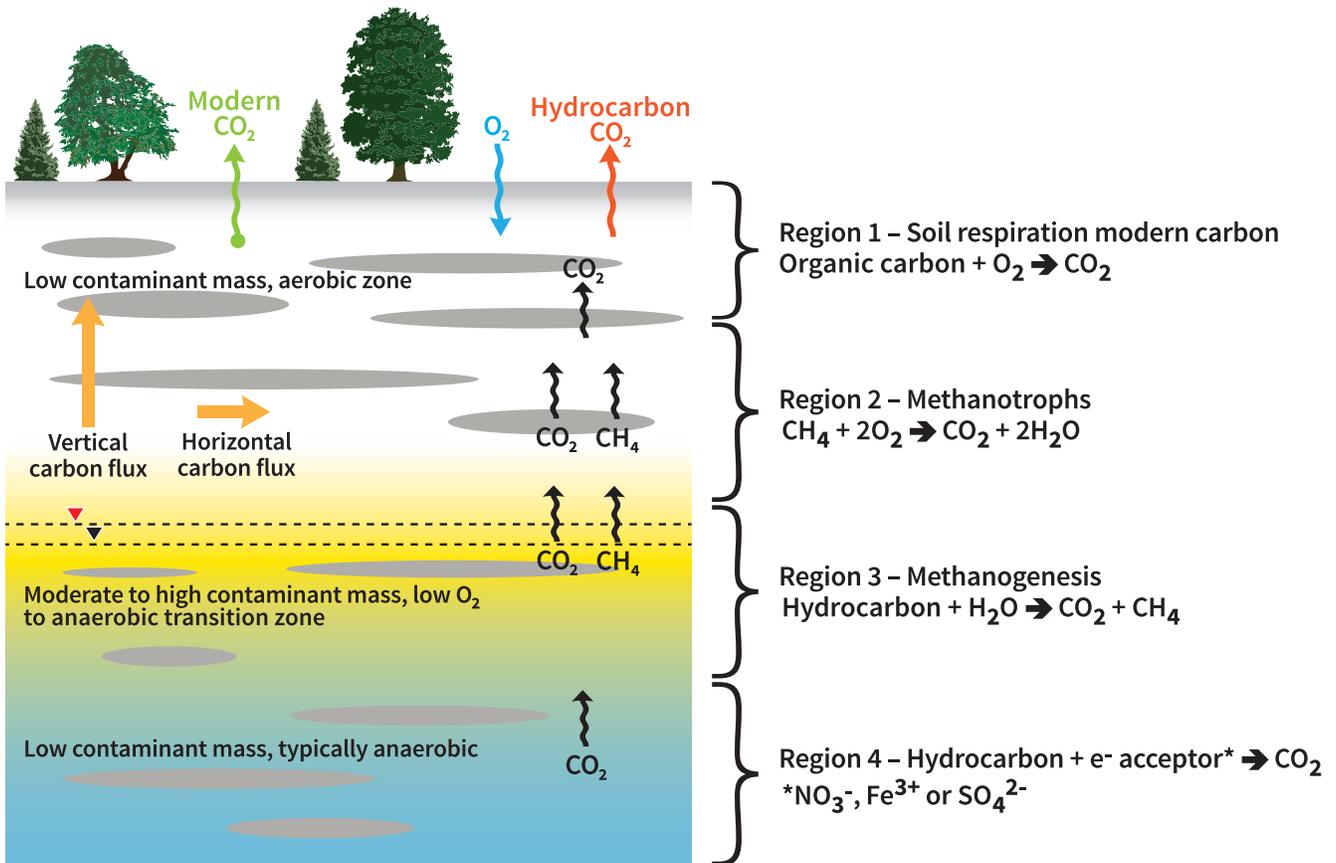
4. Los componentes de los LNAPL también se evaporan y se incorporan a los vapores gas de suelo. En raras ocasiones, los componentes volátiles de los LNAPL pueden afectar a la calidad del aire exterior o de los espacios cerrados. Algunos componentes volátiles de los LNAPL también se dividen de forma apreciable en el agua capilar de zonas insaturadas y se biodegradan.

## ¿Cuál es la idea más reciente e importante que afectará a la gestión de los LNAPL en el futuro?

Con diferencia, la idea más reciente e importante para los LNAPL en la última década es el agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen (NSZD, por sus siglas en inglés).

El agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen reconoce que los hidrocarburos de petróleo en las zonas de LNAPL se degradan fácilmente mediante una combinación de procesos naturales anaeróbicos y aeróbicos (Amos y otros 2005, Johnson y Lundegard 2006 e ITRC 2009b). El petróleo degradado se libera principalmente de forma ascendente a través de la zona insaturada, sobre todo como dióxido de carbono y gas metano. Las tasas de agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen publicadas (McCoy y otros, 2015) y no publicadas sobre masas de LNAPL abarcan desde muchos centenares hasta unos pocos miles de galones por acre y por año. Las implicaciones de las tasas de agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen de esta magnitud incluyen:

1. Normalmente, las masas de LNAPL solo se expanden cuando las tasas de vertidos son superiores a las tasas de pérdidas naturales (Mahler y otros, 2012).
2. Las estrategias de descontaminación para LNAPL basadas en extraer o eliminar los LNAPL a unas tasas menores que las tasas de pérdidas por degradación natural pueden presentar pocas ventajas prácticas.
3. Una vez que cesa el vertido, los LNAPL siguen agotándose de forma natural.
4. Se necesitan herramientas para entender mejor la longevidad de los LNAPL en función del tipo de descontaminación aplicable; sistemas activos y de degradación natural de LNAPL (“la vía de planeo”).

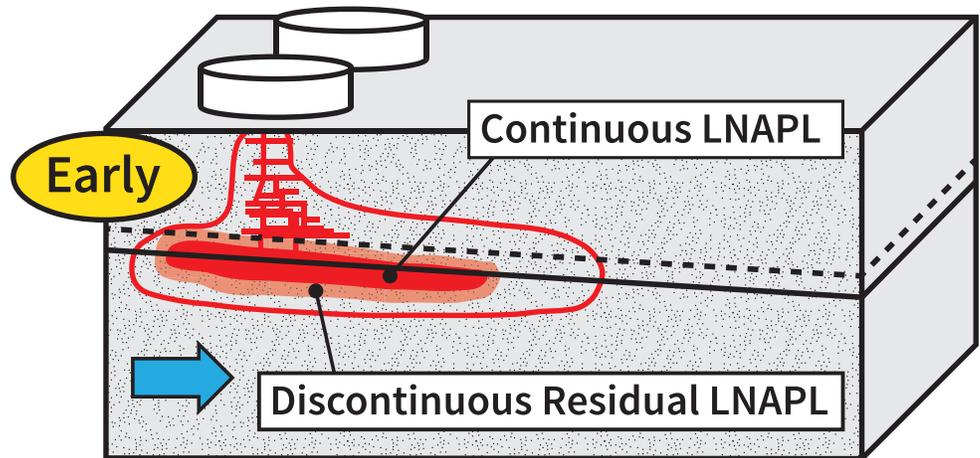


Tracy (2015) según Amos y otros (2005), Irianni-Renno (2015) y Stockwell (2015)

## ¿Por qué es importante reconocer que los vertidos de LNAPL evolucionan con el tiempo?

Dada la reducida frecuencia de los vertidos, las soluciones activas y/o las pérdidas naturales de LNAPL, los problemas a los que nos enfrentamos en los emplazamientos de LNAPL evolucionan con el tiempo. Fundamentalmente, en la mayoría de los emplazamientos de LNAPL, el problema con el que nos enfrentamos actualmente es significativamente diferente al de hace 20 o 30 años. Los indicadores comunes de envejecimiento de emplazamientos con LNAPL son menos pozos de control con espesores mensurables de LNAPL y concentraciones en descenso de hidrocarburos en fase disuelta. Actualmente, un aspecto importante de la gestión de los LNAPL es reconocer si una masa de LNAPL es un **vertido en fase temprana, intermedia o tardía**. Cada fase exige diferentes estrategias para controlar y gestionar los riesgos.

A finales de los 70, las prácticas históricas llevaron a condiciones en las que se encontraban normalmente espesores significativos (hasta de treinta centímetros) de LNAPL en los pozos dentro de instalaciones petrolíferas. Los emplazamientos con vertidos continuos significativos y

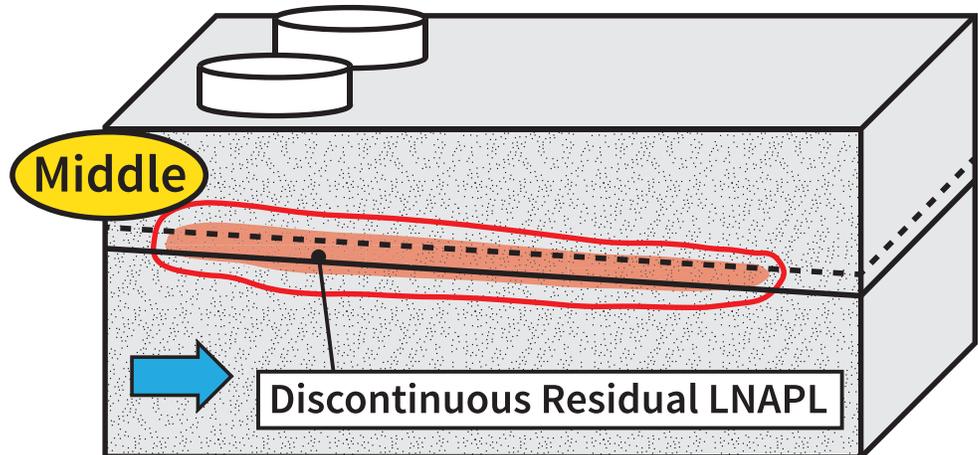


espesores mensurables de LNAPL son, como se definen aquí, **emplazamientos en “fase temprana”**. A modo de ejemplo, a lo largo de los años 80, muchas refinерías se cimentaban en decenas de acres en las que podían encontrarse treinta centímetros o más de LNAPL en los pozos. En muchos de esos emplazamientos, millones de galones de LNAPL se recuperaron en un esfuerzo por restablecer un recurso valioso, agotar los LNAPL y controlar su futura migración.

La principal herramienta de caracterización para los emplazamientos de fase temprana es controlar los pozos. Los parámetros clave incluyen los espesores de LNAPL y las concentraciones de hidrocarburos en fase disuelta en aguas subterráneas en el perímetro de zonas de LNAPL. Entre las estrategias más comunes de reducción de riesgos para los emplazamientos en fase temprana están la recuperación de LNAPL por métodos hidráulicos, la extracción de vapores de suelo (SVE, por sus siglas en inglés) y/o la contención.

Gracias a la aplicación de soluciones activas, reducciones importantes en los vertidos involuntarios, rápidas respuestas frente a los nuevos vertidos y el agotamiento natural y continuo de los LNAPL, existen actualmente menos emplazamientos de fase temprana en los Estados Unidos.

Actualmente, numerosos emplazamientos de LNAPL se pueden definir como emplazamientos de “**fase intermedia**”. Los emplazamientos de fase intermedia se caracterizan por:

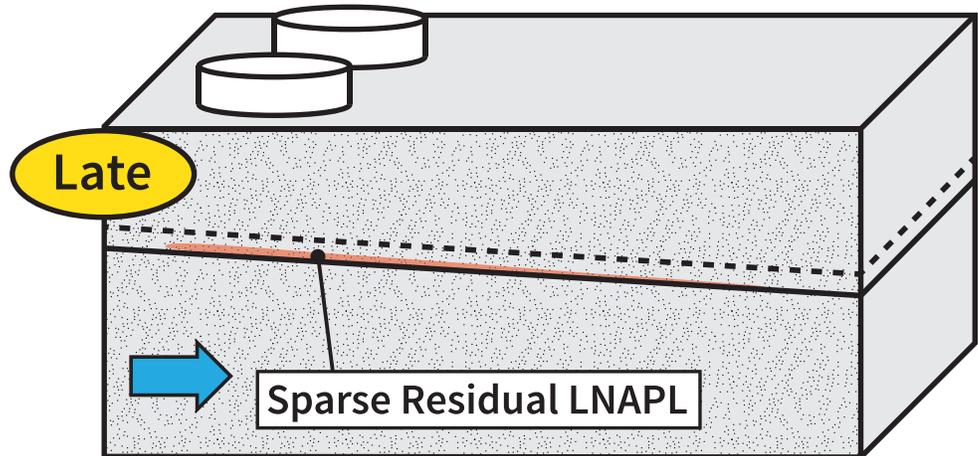


- ▶ espesores de LNAPL en pozos que están mayoritariamente agotados;
- ▶ masas estables de LNAPL que no se expanden ni trasladan lateralmente;
- ▶ saturación de LNAPL en un rango del 1 al 10 % de espacio poroso;
- ▶ bajas tasas de recuperación de LNAPL a través de bombeo (esto es, promedios relativos a todo el emplazamiento de decenas a cientos de galones/acre/año);
- ▶ concentraciones estables o en disminución de componentes de LNAPL en las aguas subterráneas;
- ▶ descarga de CO<sub>2</sub> sobre masas de LNAPL (debido a la degradación biológica de componentes de LNAPL), que arroja unas tasas de pérdida de LNAPL del orden de centenares a miles de galones de LNAPL por año.

Los ensayos de Baildown han surgido como una herramienta de caracterización crítica para los emplazamientos de fase intermedia (Huntley 2000 y Kirkman 2013). Los ensayos de Baildown ofrecen estimaciones de la transmisibilidad de LNAPL y, en consecuencia, la viabilidad de la recuperación de LNAPL hidráulicos y la estabilidad general de los LNAPL (API 2012). Los valores de transmisibilidad de LNAPL comprendidos en un rango de 93 a 743 centímetros cuadrados/día están aceptados por lo general como valores de corte por debajo de los cuales los LNAPL son principalmente inmóviles en condiciones de recuperación naturales o activas (ITRC 2009a).

Otro enfoque emergente de control para los emplazamientos de fase intermedia es medir las tasas de pérdida natural de LNAPL (IRTC 2009). Hasta la fecha, tres métodos están siendo objeto de un uso extendido: el gradiente (Johnson y otros 2006), las cámaras de flujo (Sihota y otros

2011) y los colectores (McCoy y otros 2015). Actualmente se están desarrollando protocolos para determinar las ventajas y limitaciones de los tres métodos (API 2017). Fundamentalmente, las tasas de pérdida natural del orden de centenares a miles de galones por acre



y año ofrecen una base para la estabilidad de las masas de LNAPL y un punto de referencia para determinar las ventajas de las soluciones activas.

Debido al agotamiento de los LNAPL, las soluciones que funcionan para los emplazamientos de fase temprana (p. ej., recuperación hidráulica y SVE) son normalmente menos efectivos en los emplazamientos de fase intermedia. La buena noticia es que las pérdidas naturales de LNAPL pueden ser lo suficientemente elevadas como para agotar los LNAPL restantes en los emplazamientos de fase intermedia en unos años o décadas. El problema de la longevidad de los LNAPL es un aspecto de la investigación activa y se trata en Skinner (2013) y Emerson (2016).

En el caso de zonas con LNAPL y plumas de fase disuelta que son estables o están en disminución, los riesgos para la salud humana y el medio ambiente en estos emplazamientos de fase intermedia son menores que los riesgos asociados a los emplazamientos de fase temprana.

Los emplazamientos de **fase tardía** se caracterizan por el agotamiento prácticamente total de los LNAPL a través de soluciones activas y las pérdidas naturales continuas de los LNAPL. Los riesgos asociados a los emplazamientos de fase tardía se limitan a la exposición directa a las aguas subterráneas o el suelo en las proximidades de los vertidos originales de LNAPL. A día de hoy, entender los riesgos y las soluciones para los emplazamientos de fase tardía es un tema de investigación reciente.

## ¿Estamos haciendo progresos respecto a los vertidos de LNAPL?

Positivamente, a lo largo de los últimos cuarenta años, podemos señalar:

- ▶ Reducciones drásticas del número de casos en los que se encuentran grandes cantidades de LNAPL recuperables bajo la superficie.
- ▶ Plumas de LNAPL y de sus componentes en aguas subterráneas que disminuyen en numerosos emplazamientos, aunque lentamente.
- ▶ Los LNAPL solo se extienden con poca frecuencia más allá de las lindes de la propiedad.
- ▶ Los efectos en el aire en interiores son raros por lo general.

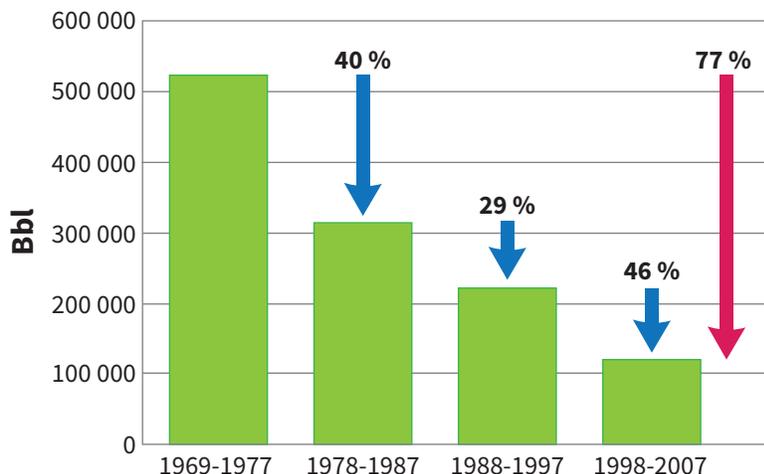
Estas observaciones se pueden atribuir a:

- ▶ Reducciones drásticas de la frecuencia y la magnitud de los vertidos de LNAPL.
- ▶ Agotamiento de LNAPL a través de sistemas activos de descontaminación.
- ▶ Agotamiento de LNAPL a través de procesos naturales.

Aunque continúan gastándose miles de millones de dólares en la investigación y subsanación de emplazamientos, millones de dólares se destinan cada año a la investigación de los LNAPL con el fin de encontrar mejores soluciones. Basándose en estas inversiones, están surgiendo continuamente nuevos conceptos y tecnologías, y el futuro es prometedor.

Negativamente, incluso en instalaciones cerradas el impacto de los vertidos históricos en las aguas subterráneas ha persistido en los emplazamientos durante décadas. Como se muestra en el gráfico adjunto, el volumen de los vertidos se ha reducido últimamente. No obstante, se siguen produciendo nuevos vertidos y es preciso actuar con diligencia para limitar vertidos futuros y poder responder rápidamente cuando se produzcan.

GASTO ANUAL MEDIO DE PETRÓLEO EN EL SECTOR PETROLÍFERO



## CONCEPTOS CRÍTICOS

### ¿Qué ocurre cuando se vierten LNAPL?

Los LNAPL vertidos se filtran hacia abajo (debido a la gravedad) a través de sedimentos húmedos bajo la superficie y llenos de aire (zona insaturada). Con el tiempo, los LNAPL alcanzan a menudo una profundidad donde el gas de suelo o bien está ausente o bien solo está presente en una fase discontinua, que se conoce como la “zona saturada”. En ella, el movimiento descendente de los LNAPL está limitado por la flotabilidad de los LNAPL en el agua. Dadas los continuos vertidos, los LNAPL se expanden horizontalmente en la zona de vertido formando masas de LNAPL que, al igual que los icebergs, están parcialmente por encima y por debajo de la capa freática.

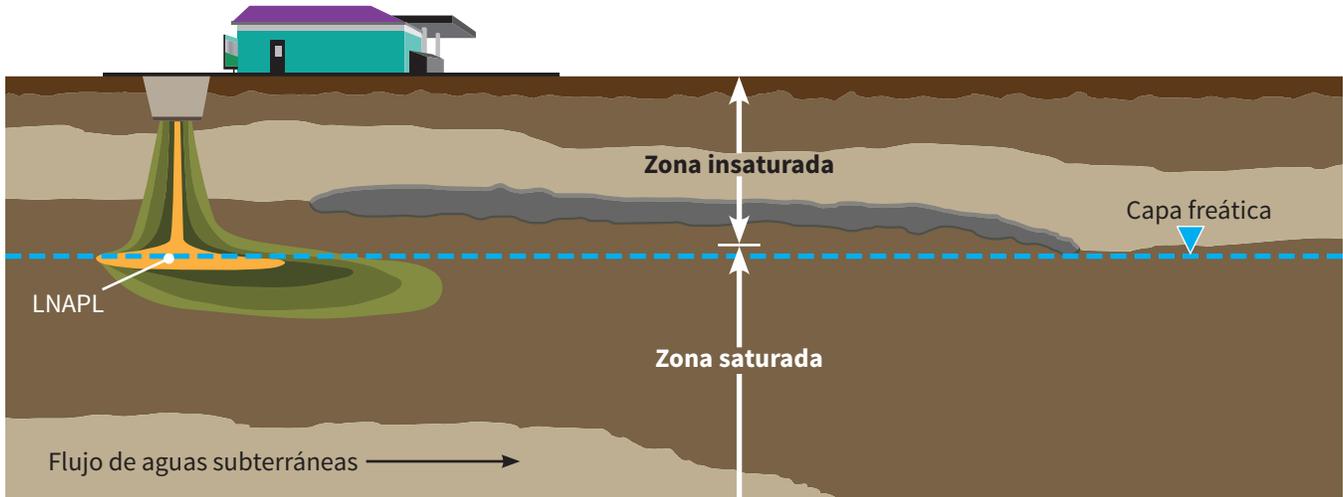


Imagen por cortesía de Shell/Lorax Animated Information System

Los componentes de LNAPL bajo la superficie se disuelven parcialmente en el agua y se evaporan en el gas (vapores) del suelo. La advección y difusión fomentan el transporte de los componentes de LNAPL disueltos y en fase gaseosa, lo que conlleva la formación de plumas de contaminación. Afortunadamente, numerosos componentes de los LNAPL se degradan fácilmente en condiciones naturales, y las plumas se limitan normalmente a su proximidad inmediata (Weidemeier y otros 1999).

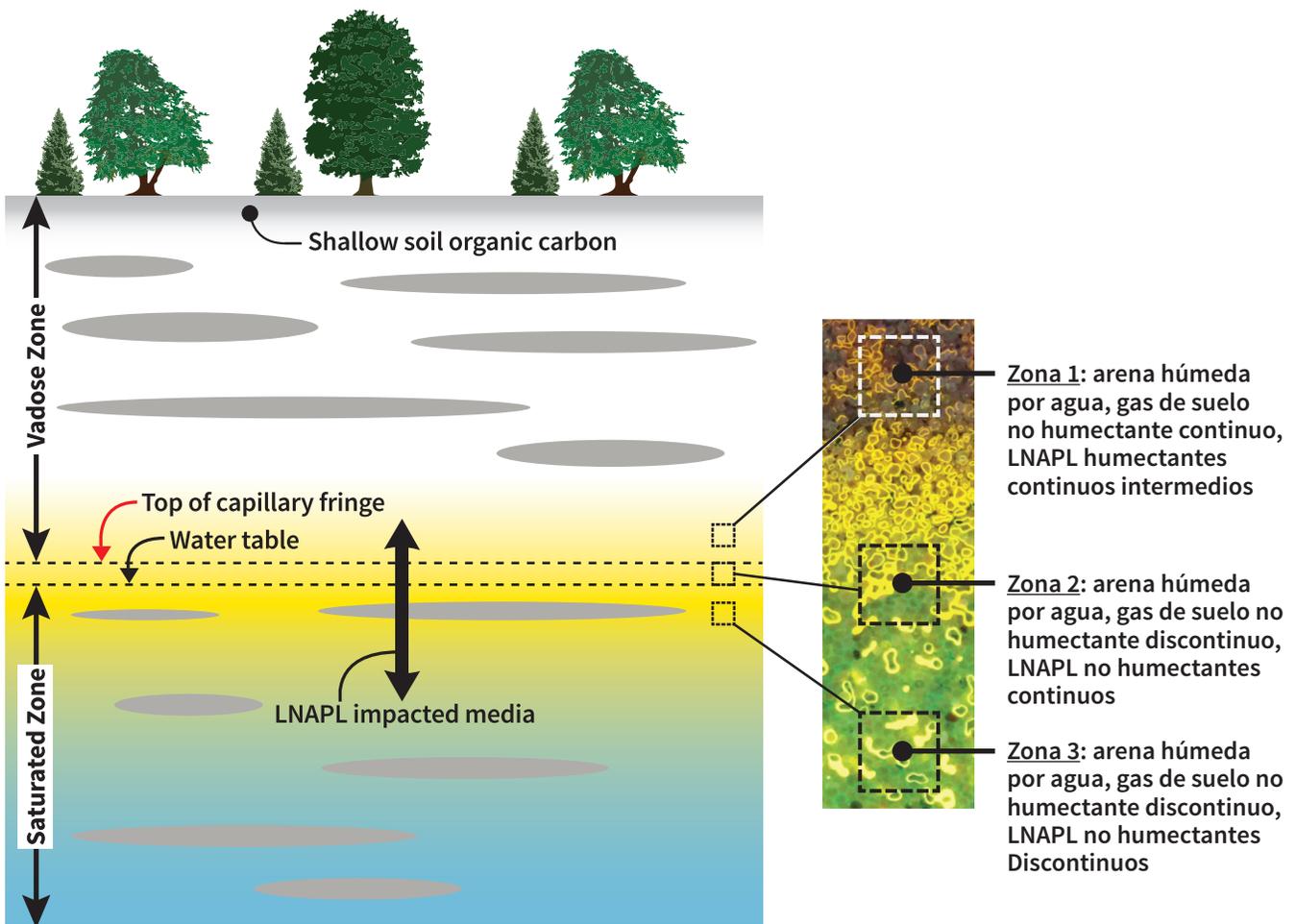
La disolución y evaporación de los componentes de LNAPL fomentan las pérdidas de LNAPL. Cada molécula de petróleo que termina en el agua o en el gas de suelo redundará en menoscabo de las moléculas de petróleo que estaban presentes inicialmente como LNAPL. Las investigaciones y publicaciones recientes indican que las tasas de pérdida natural de LNAPL son del orden de centenares a miles de galones/acre/año (McCoy y otros 2015). Como ya se ha indicado anteriormente, las implicaciones de las pérdidas naturales de esta magnitud son múltiples:

1. Normalmente, las masas de LNAPL solo se expanden cuando las tasas de derrame son superiores a las tasas de pérdida natural (Mahler y otros 2012a).
2. Las soluciones de eliminación de LNAPL que agotan los LNAPL a unas tasas reducidas respecto a las tasas de pérdida natural pueden presentar poca eficacia en la práctica.
3. Una vez que cesan los vertidos originarios, los LNAPL llegarán a agotarse por completo.

## ¿Cómo se distribuyen los LNAPL bajo la superficie y por qué es importante?

Los LNAPL se encuentran normalmente cerca de la capa freática o, de forma más exacta, se distribuyen en la parte superior de la franja capilar. La distribución de los LNAPL es compleja. Como punto de partida, se pueden señalar tres zonas idealizadas distintas:

1. Zona insaturada: LNAPL en fase humectante intermedia
2. Zona saturada: LNAPL en fase no humectante continua
3. Zona saturada: LNAPL en fase no humectante discontinua (residual)



Skinner (2013) y Tracy (2015)

Fundamentalmente, la aparición de LNAPL en cada una de estas zonas es diferente de formas que afectan en consecuencia a la movilidad de los LNAPL y a la efectividad de las soluciones, ya que algunas de ellas se ocupan de la saturación de los LNAPL mientras que otras lo hacen de la composición de los LNAPL. Para entender las diferencias de cada una de estas zonas, es muy importante el hecho de que en los tres intervalos, el agua, los LNAPL y los gases comparten el espacio poroso al mismo tiempo.

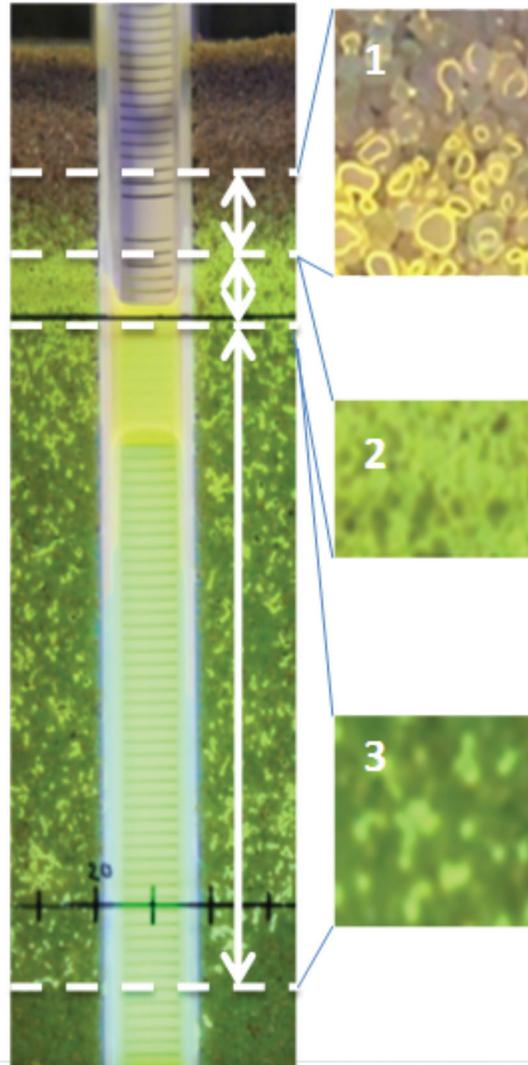
La siguiente explicación y cifras estudian la distribución de los LNAPL y las implicaciones asociadas de forma más detallada.

**1) Zona insaturada – LNAPL en fase humectante intermedia continua** – En la zona insaturada, el gas de suelo forma una fase continua no humectante en medios porosos, el agua está presente en fase humectante continua en medios sólidos, y los LNAPL están presentes en fase humectante intermedia. Los LNAPL de la zona insaturada son como una capa sobre el agua de la superficie; forman una película entre el agua (del suelo) y el gas (en los poros más grandes). Los componentes volátiles de los LNAPL en la zona vadosa se reparten directamente por el gas de suelo y son susceptibles de agotamiento a través de la extracción de vapores de suelo (SVE). Los componentes solubles de los LNAPL de la zona vadosa se dividen directamente en el agua capilar humedeciendo el suelo y son susceptibles de agotamiento natural a través de procesos biológicos.

**2) Zona saturada – LNAPL en fase no humectante continua** – En la zona saturada, los gases solo están presentes en fase no humectante discontinua. Una fuente principal de gases discontinuos es la degradación por medios biológicos de los componentes de LNAPL (Amos y Mayer 2006). Los LNAPL están presentes en fase continua potencialmente móvil y son susceptibles de recuperación hidráulica. Asimismo, según Skinner y otros (2013), el agotamiento de los LNAPL en la zona vadosa a través de la SVE o de pérdidas naturales pueden llevar a los LNAPL continuos desde la zona saturada hasta la zona vadosa a través de procesos capilares (absorción).

### 3) Zona saturada – LNAPL en fase no humectante discontinua –

Por último, los LNAPL se pueden producir en fase discontinua en la zona saturada. A falta de una vía continua, los LNAPL discontinuos están inmóviles. Ni la recuperación hidráulica ni la SVE pueden agotar directamente los LNAPL discontinuos. El proceso principal que agota los LNAPL discontinuos en la zona saturada es la disolución en la fase acuosa, seguida de una degradación mediante procesos biológicos.



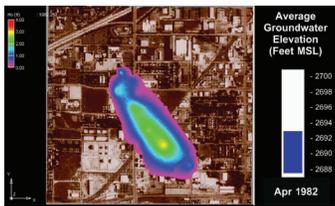
Fotografía de Alison Hawkins

## ¿Por qué los cambios en el nivel del agua complican todo?

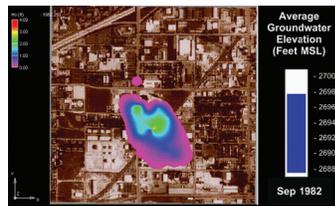
El cambio en los niveles de las aguas subterráneas conlleva cambios en la distribución de los LNAPL a través de las tres zonas descritas anteriormente. Entre los factores comunes que afectan a los niveles de las aguas subterráneas se encuentran las mareas, las corrientes estacionales, las sequías, los periodos de grandes precipitaciones, la irrigación y los bombeos variados de aguas subterráneas.

En el siguiente gráfico se muestran los cambios del espesor de los LNAPL en pozos de control asociados a los cambios en los niveles del agua. Por lo general, en las fases de marea alta, la mayoría de los LNAPL, si no todos, se producen en fase discontinua inmóvil. Con niveles elevados de agua, la eficacia de la recuperación hidráulica y la SVE suele ser baja. En fases de marea baja, la mayoría de los LNAPL se pueden producir en fase no humectante continua en la parte superior de la franja capilar. Con niveles bajos de agua, la eficacia potencial de la recuperación hidráulica y la SVE está normalmente al máximo. El proceso de agotamiento que funciona en las tres zonas, independientemente de los niveles de agua, es el agotamiento natural dentro de su zona de origen.

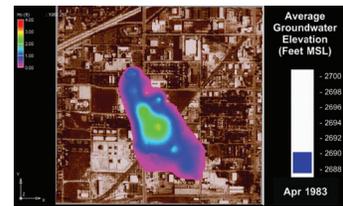
Marea baja – Abril de 1982



Marea alta – Septiembre de 1982



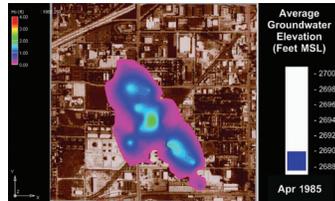
Marea baja – Abril de 1983



Marea alta – Octubre de 1984



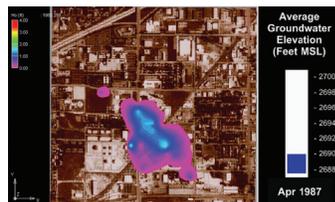
Marea baja – Abril de 1985



Marea alta – Septiembre de 1986



Marea baja – Abril de 1987

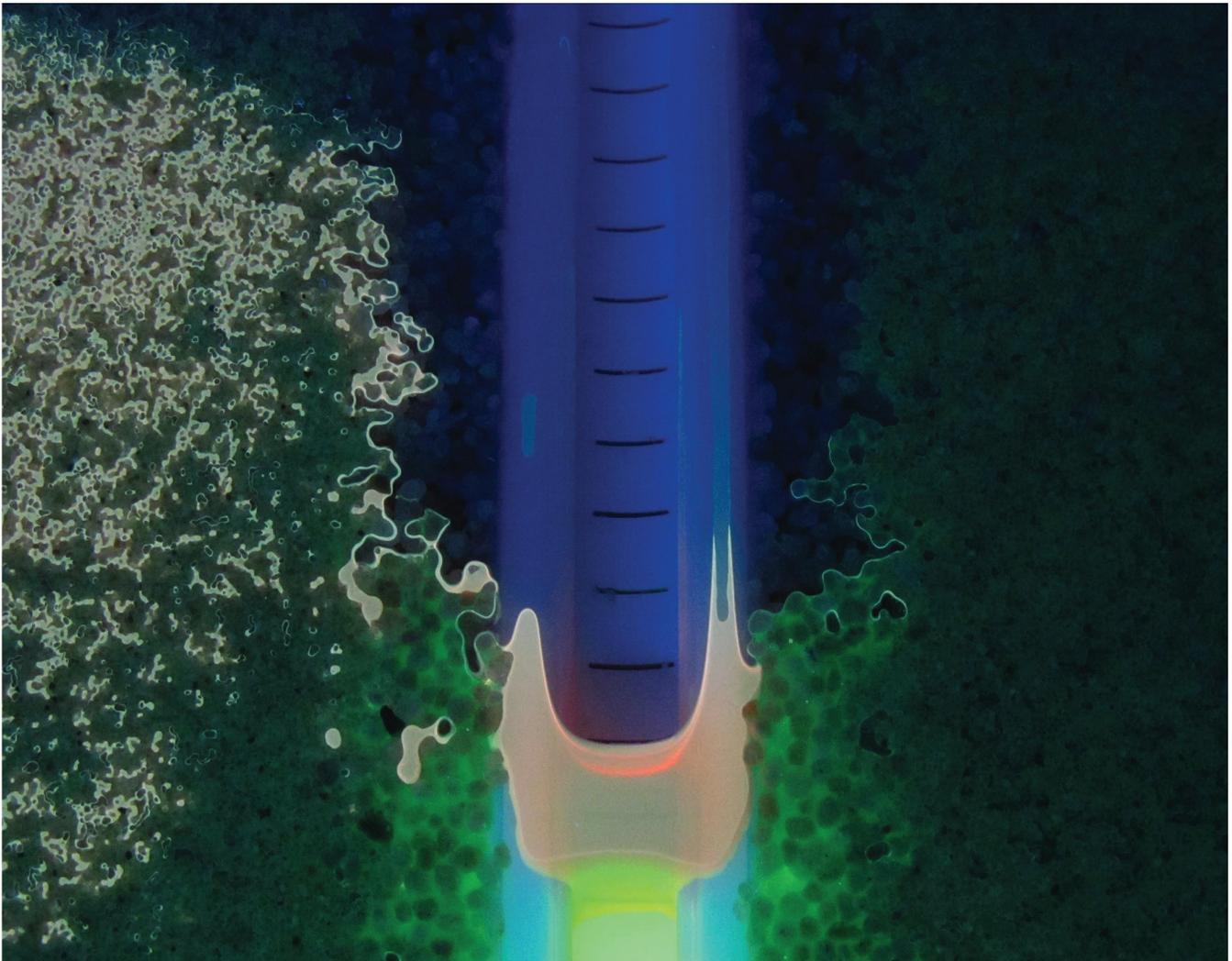


API Interactive NAPL Guide, 2004

## ¿Qué podemos aprender del espesor de los LNAPL en los pozos?

La herramienta más utilizada para caracterizar los LNAPL en los emplazamientos de campo han sido los pozos de control con mallas ranuradas que atraviesan la capa freática. Usos de los pozos de control:

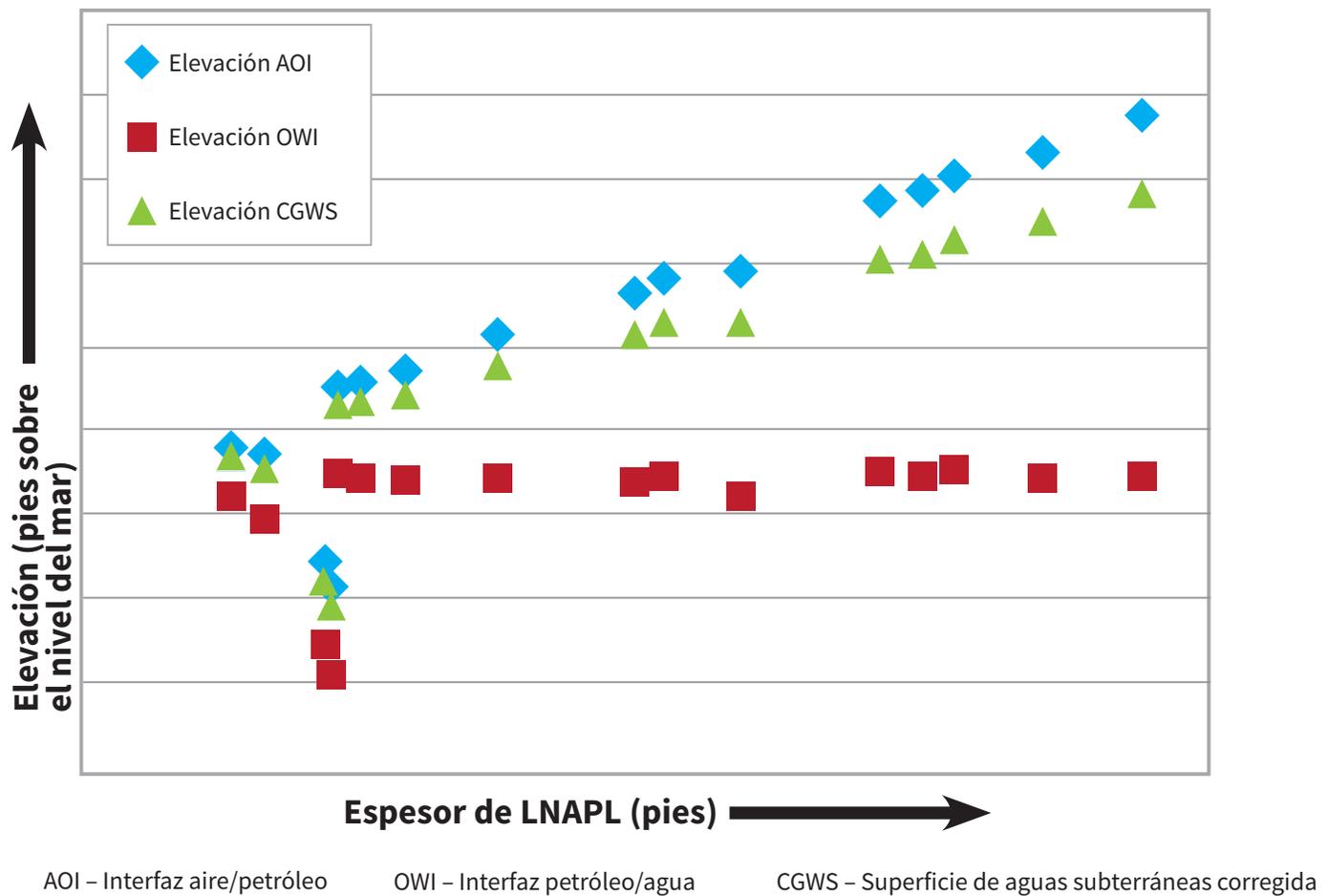
- ▶ Delinear la extensión en superficie de los LNAPL en los pozos (LNAPL continuos en la zona saturada).
- ▶ Calibración periódica de los pozos para realizar un seguimiento de los niveles de fluido de los LNAPL y al agua a lo largo del tiempo.



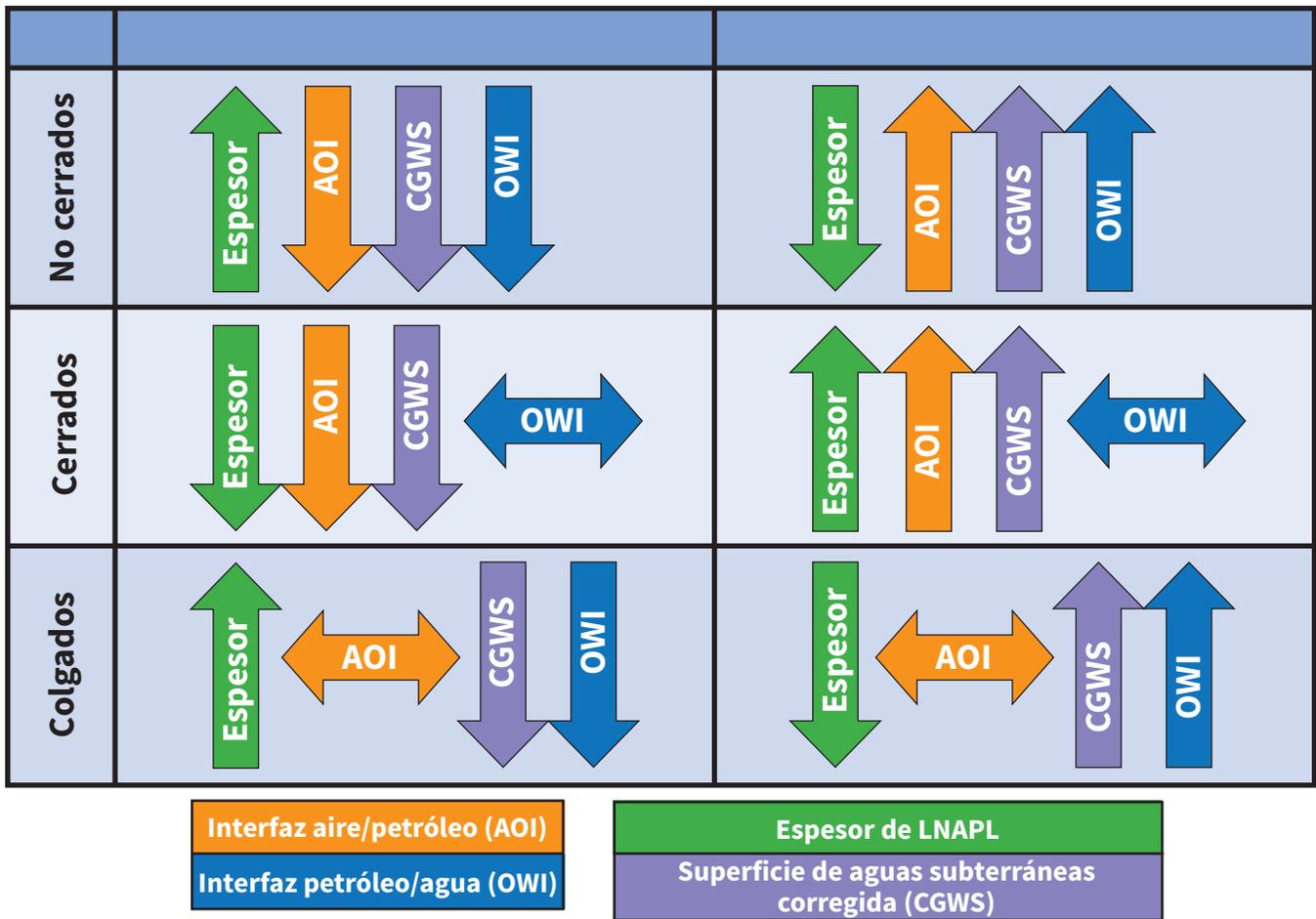
Fotografía de Julio Zimbron

Específicamente, los niveles de fluidos calibrados, cuando se combinan con datos sobre el suelo, ofrecen información útil para entender la distribución vertical de los LNAPL en la formación (Hawthorne, 2011, Kirkman y otros, 2013). Mostrar los datos de los niveles de fluidos en gráficos de diagnóstico y representaciones hidroestratigráficas ofrece un método para comprobar la configuración hidráulica de los LNAPL: no cerrados, cerrados o colgados.

## GRÁFICO DE DIAGNÓSTICO

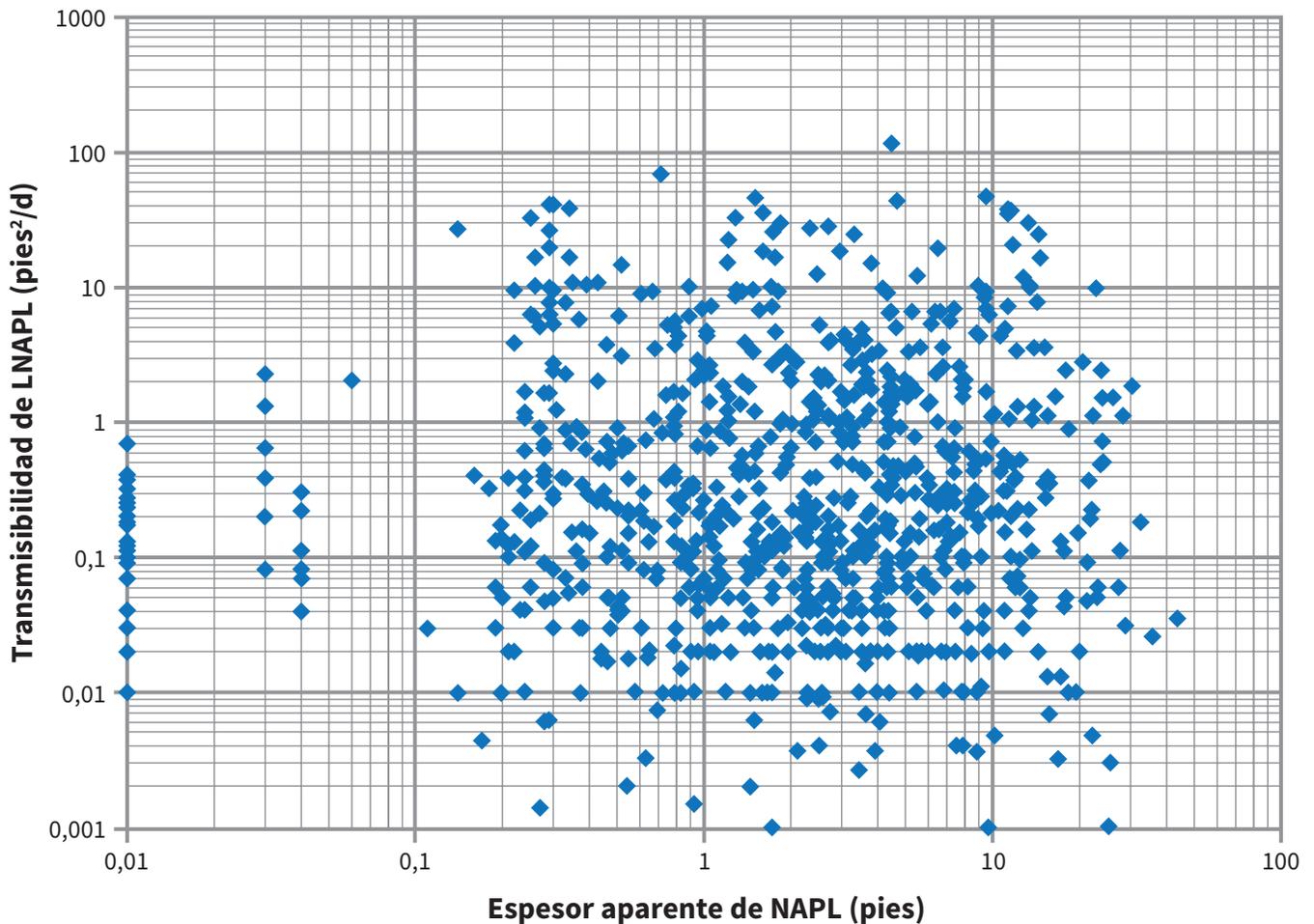


BASE TEÓRICA PARA  
TENDENCIAS DEL GRÁFICO DE DIAGNÓSTICO



Históricamente, los profesionales han intentado utilizar los espesores de LNAPL calibrados en pozos como un indicador de la capacidad de recuperación de LNAPL. En los casos donde hay sedimentos granulares gruesos y uniformes, niveles de agua estables y las condiciones de la fase temprana, los espesores de LNAPL en los pozos ofrecen una información valiosa para gestionar los emplazamientos con LNAPL (Farr y otros 1990 y Lenhard y Parker 1990). Para estas condiciones idóneas, los espesores de LNAPL calibrados se pueden relacionar directamente con la recuperación en un emplazamiento determinado, aunque la relación no es lineal. Actualmente se ha reconocido que estas condiciones idóneas son prácticamente imposibles de encontrar. Todos los emplazamientos presentan una heterogeneidad tal como para que los espesores de LNAPL calibrados sean una métrica insuficiente para la capacidad de recuperación (ITRC, 2009a y Hawthorne y otros, 2015). Esto se muestra en el gráfico que indica los espesores de los LNAPL calibrados en los pozos en comparación con la transmisibilidad de los LNAPL.

### LA TRANSMISIBILIDAD DE LOS LNAPL EN FUNCIÓN DEL ESPESOR APARENTE DE LOS NAPL

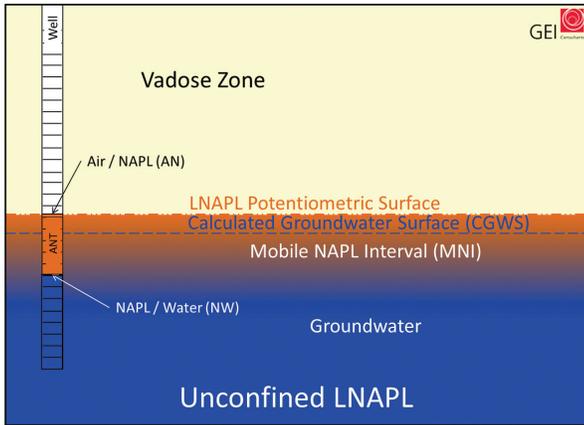


## ¿Cómo puede la configuración física del subsuelo afectar al espesor de los LNAPL en los pozos?

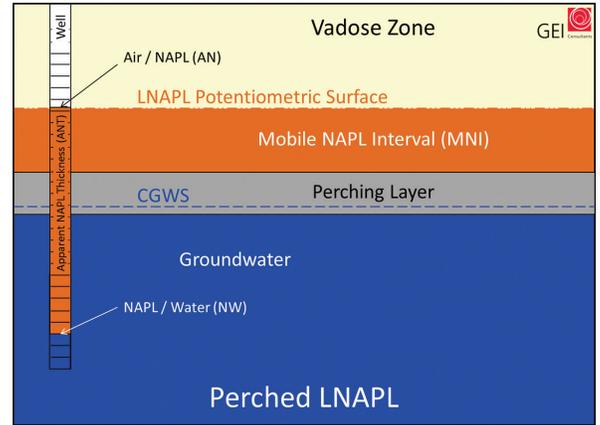
La configuración física del subsuelo puede crear espesores erróneos de LNAPL en los pozos respecto a la cantidad de LNAPL en la formación o la configuración del intervalo de LNAPL móviles. Según Farr y otros (1990), los LNAPL están sobre todo presentes en materiales con poros más grandes y están excluidos de materiales con poros reducidos. Esto se debe a la presión de desplazamiento (presión necesaria para empujar a los LNAPL en medios húmedos por agua), que está en función del tamaño de los poros (Cory 1994).

Las figuras adyacentes muestran la configuración idónea de los LNAPL de grano grueso no cerrados (sin exageración del espesor de los LNAPL) y cuatro configuraciones generalizadas donde el espesor de los LNAPL en los pozos se ve afectado por la configuración física. De forma más detallada:

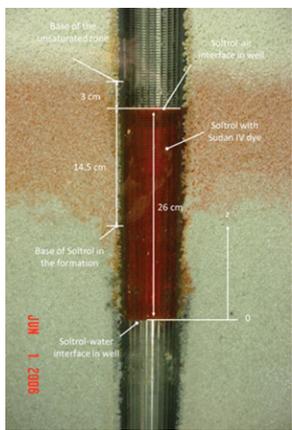
- 1) El primer contexto es la configuración no confinada o libre (a). Los LNAPL se muestran en equilibrio estático y su espesor aparente en el pozo es básicamente similar al intervalo de los LNAPL móviles en la formación adyacente.
- 2) El segundo contexto (b) son LNAPL no confinados en suelo uniforme de grano fino. En esta situación, se necesita una gran altura de los LNAPL en el pozo para crear una diferencia suficiente en los LNAPL y la presión del agua (presión capilar) para llevar los LNAPL a la formación. La fotografía adyacente muestra la exageración vertical asociada a la presión de desplazamiento. A medida que se reducen los poros del suelo, la exageración vertical de los LNAPL aumenta.
- 3) En el tercer contexto, cerrado (c) los LNAPL están sobrecubiertos por una capa de grano fino totalmente saturada (p. ej., lodo o arcilla). Los LNAPL del pozo aumentan hasta el intervalo en el que está presente la capa de grano fino. Al mismo tiempo, los LNAPL no están presentes en la capa de grano fino porque no hay presión suficiente para llevar los LNAPL al medio de grano fino.
- 4) El cuarto contexto, colgado (d) se produce cuando los LNAPL que se han acumulado sobre una capa de menor permeabilidad se drenan hacia un pozo que la penetra. El espesor de los LNAPL está exagerado en comparación con el intervalo de los LNAPL móviles de la formación adyacente.
- 5) El quinto contexto (e) es un medio fracturado (p. ej., lodo, arcilla o roca). En este caso, los LNAPL solo están presentes en las fracturas. Los LNAPL quedan excluidos de la matriz por la elevada presión de desplazamiento asociada a los poros reducidos en ella.



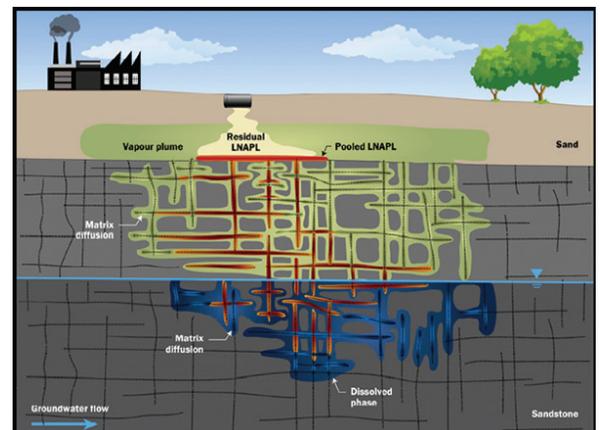
CONTEXTO A



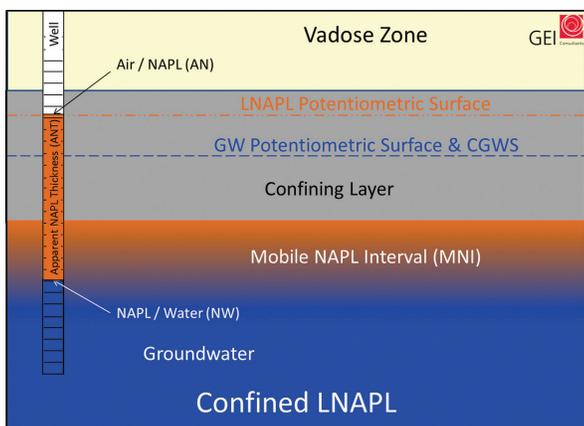
CONTEXTO D



CONTEXTO B

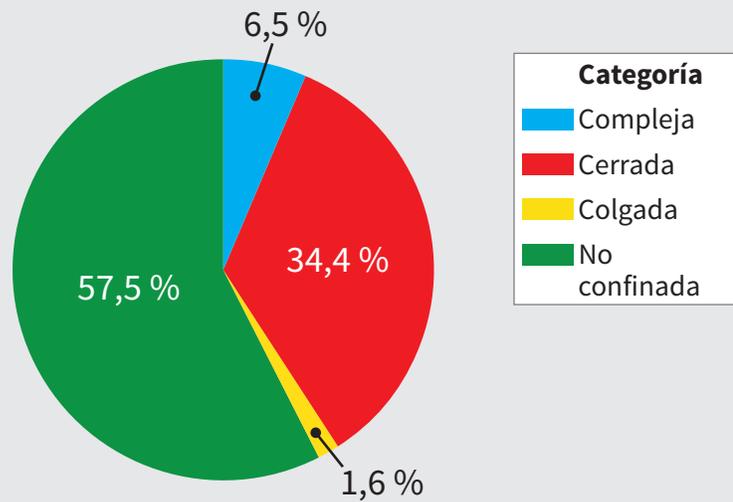


CONTEXTO E



CONTEXTO C

**Gráfico circular de HG-Specific (489 pozos únicos)**



Otras condiciones físicas que conllevan unos espesores de LNAPL exagerados en los pozos son LNAPL con densidades próximas a la densidad del agua (p. ej., aceites combustibles) y fuertes pendientes hidráulicas verticales descendentes.

La configuración de LNAPL que tiene como resultado espesores de LNAPL exagerados en los pozos puede ser más común que lo que se ha reconocido anteriormente. Hawthorne (2015) examinó 489 pozos de varios emplazamientos y concluyó que el 42,5 % de los pozos con LNAPL presentaban espesores calibrados exagerados debido a condiciones hidrogeológicas confinadas, colgadas, o complejamente intercaladas.

## ¿Qué podemos aprender gracias a parámetros de calidad del agua de los pozos??

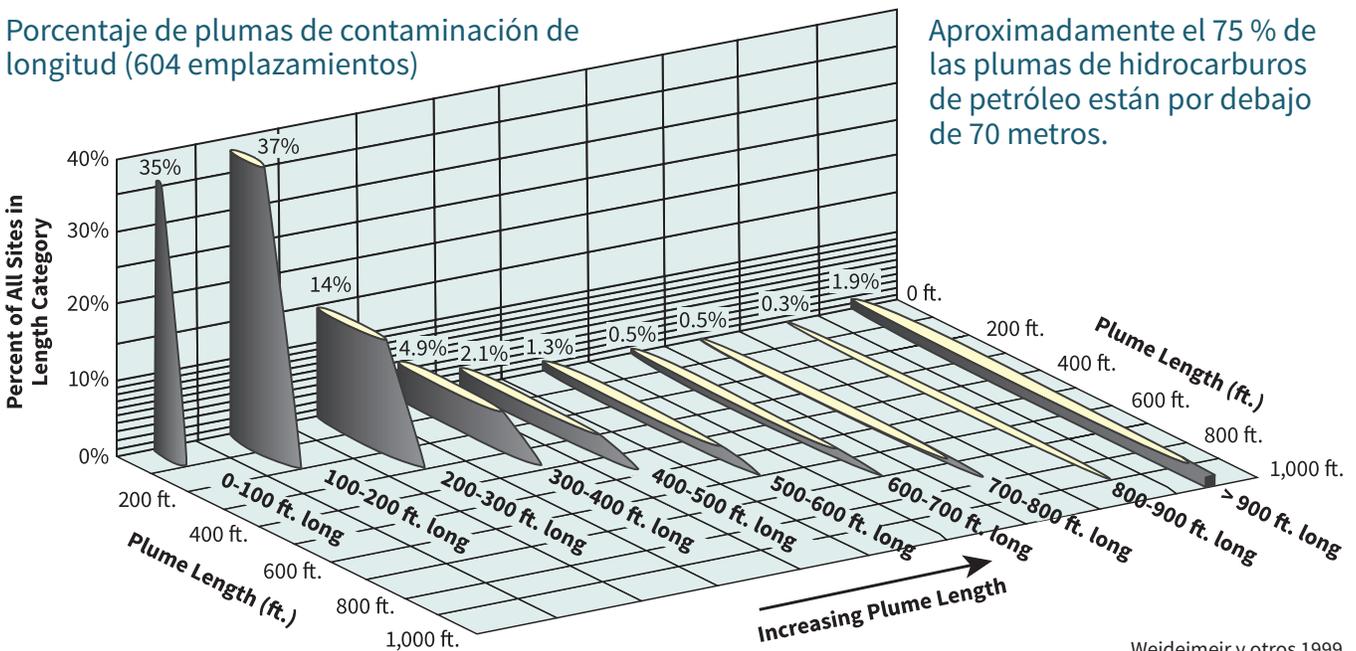
Por lo general, en los pozos con LNAPL mensurables no se controla la calidad del agua cuando hay presentes LNAPL. Estos pozos a menudo se convierten en pozos de recuperación o simplemente se utilizan para controlar los niveles de LNAPL a lo largo del tiempo. No obstante, midiendo la calidad del agua en otros pozos, se puede obtener mucha información sobre el comportamiento y el agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen.

Los pozos sin hidrocarburos mensurables pueden residir en zonas con LNAPL residuales (inmóviles), hidrocarburos solo en fase acuosa o aguas subterráneas limpias. Normalmente se debe usar la magnitud de la concentración de contaminantes para distinguir entre las zonas con LNAPL residuales y los hidrocarburos en fase acuosa. Si no hay LNAPL en un pozo, normalmente se recogen muestras periódicamente que se analizan en busca de hidrocarburos de petróleo, incluyendo compuestos de riesgo como el benceno e indicadores de atenuación natural, como aceptadores de electrones y productos derivados reactivos. Los datos sobre la calidad del agua a lo largo de varias décadas han conducido a varias observaciones críticas:

- Los hidrocarburos de petróleo en fase acuosa normalmente se atenúan a través de procesos naturales en distancias de centenares de pies desde el final del cuerpo de LNAPL (Wiedemeier y otros 1999) (Newell y Connor 1998).

### RESULTADOS COMBINADOS DE NUESTROS ESTUDIOS: RESUMEN:

Porcentaje de plumas de contaminación de longitud (604 emplazamientos)



Aproximadamente el 75 % de las plumas de hidrocarburos de petróleo están por debajo de 70 metros.

Wiedemeier y otros 1999

- ▶ Basándose en prácticas mejoradas de gestión del petróleo y en una reducción de las posibles situaciones que podrían dar lugar a un vertido, la mayoría de los impactos de las aguas subterráneas con BTEX en emplazamientos menores son estables o disminuyen (Newell y Connor, 1998).
- ▶ De una pluma estable o en disminución se deduce que la masa de LNAPL (incluidos los LNAPL residuales y móviles) es estable o está en disminución. (ITRC, 2009, Hawthorne y otros 2013).
- ▶ Los emplazamientos con plumas de fase disuelta persistentes pero sin LNAPL mensurable sugieren que hay una fuente de LNAPL residual. Las concentraciones de aguas subterráneas y registros de perforación admiten la identificación de fuentes de LNAPL residuales y ayudan a diseñar tecnologías de subsanación que se centran en los cambios de composición para eliminar los compuestos pertinentes (ITRC 2009a).
- ▶ Después de eliminarse la fuente principal de vertido bajo la superficie y de que los emplazamientos pasen a la fase tardía, las plumas de fase disuelta normalmente se reducen y la concentración de plumas de BTEX en emplazamientos de venta y distribución de combustibles al por menor suelen reducirse en un 90 por ciento durante entre 2,7 y 7 años (Newell y Connor, 1998).
- ▶ Los emplazamientos complejos o más grandes de venta y distribución de combustibles al por menor pueden tener fuentes de LNAPL residuales más extensas que impiden alcanzar niveles de agua potable como MCL durante los siguientes 50 a 100 años utilizando las tecnologías de subsanación disponibles actualmente (NRC, 2013).
- ▶ Las tendencias temporales en las concentraciones disueltas son difíciles de analizar en varias recogidas de muestras al año. En un estudio de 315 emplazamientos de venta y distribución de combustibles al por menor, McHugh y otros (2011) concluyeron que no se observaba que la variabilidad de las concentraciones de benceno estuviera correlacionada con las estaciones o los cambios de elevación de las aguas subterráneas. Las muestras recogidas en un intervalo de unos días o de 2 años se asocian a variables que no dependen del tiempo. Al comparar pozos con una definida tendencia de concentración a la baja en un período de tiempo, la diferencia de concentración pasaba a ser aparente transcurrido un periodo de entre 2 y 3 años.

## ¿Qué se puede lograr con la recuperación hidráulica?

El enfoque más común de los emplazamientos de LNAPL de fase temprana ha sido la recuperación hidráulica. La recuperación hidráulica implica eliminar los LNAPL achicando, desbastando continuamente y/o mediante la depresión de la capa freática con desbastado. La recuperación se puede lograr usando pozos o líneas de drenaje horizontales. La recuperación de LNAPL en emplazamientos individuales puede abarcar desde decenas hasta millones de galones. Una característica principal de los sistemas de recuperación hidráulica es que las tasas de recuperación normalmente se reducen con el tiempo.

Según Sale (2001):

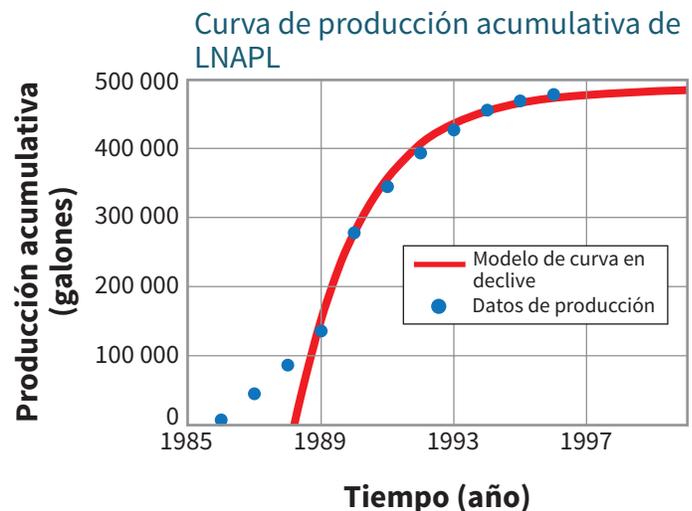
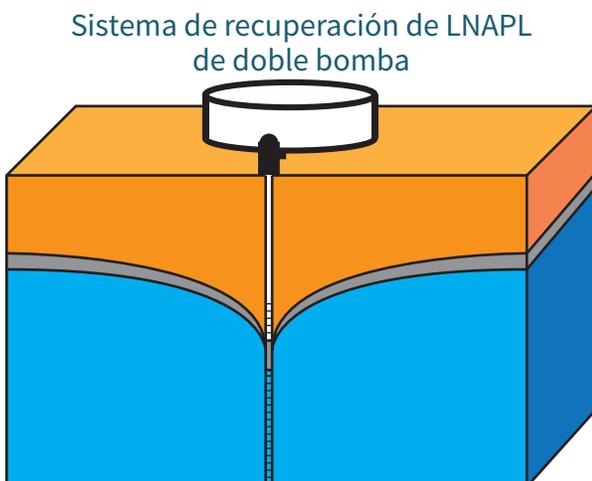
- ▶ La reducción de las tasas de recuperación siguen una ecuación de primer orden con una vida media que describe el tiempo necesario para recuperar la mitad de los LNAPL continuos (zona 2) que quedan.
- ▶ La recuperación total se aproxima asintóticamente a la fracción de LNAPL continuos presentes.
- ▶ La recuperación hidráulica tiene pocos efectos sobre los LNAPL continuos de la zona insaturada (zona 1) o los LNAPL discontinuos de la zona saturada (zona 3).

Cuando se lleva a cabo la recuperación hidráulica, es importante reconocer que la importancia del volumen de los LNAPL hidráulicamente recuperados en un periodo de tiempo determinado depende del porcentaje de reducción de saturación que se consigue durante ese periodo.

Existen actualmente técnicas para cuantificar mejor la eficacia de la reducción de saturación de LNAPL de los sistemas de recuperación hidráulica. Por ejemplo, medir la reducción de la transmisibilidad de los LNAPL a lo largo del tiempo cuando funcionan los sistemas de recuperación, usando datos de rendimiento de recuperación (ASTM, 2013).

Herramientas desarrolladas por API para ayudar a analizar la eficacia de la recuperación hidráulica:

- ▶ **Modelo de recuperación y distribución de LNAPL (LDRM, por sus siglas en inglés)** – Publicación de API 4760, 28 de mayo de 2008. Charbeneau, R.J. (2007) describe el LDRM. Emplea un modelo conceptual de distribución vertical de los LNAPL bien desarrollado junto con parámetros de entrada cuantificados para suelo y los LNAPL a fin de determinar la capacidad de recuperación de los LNAPL. Los datos de entrada se pueden variar para calibrar el modelo a las métricas de capacidad de recuperación como la transmisibilidad de los LNAPL de eventos de campo para su validación. El modelo y la guía del usuario están disponibles en [www.API.org/lnapl](http://www.API.org/lnapl).
- ▶ **Manual de transmisibilidad de LNAPL de API: Cálculo de la transmisibilidad de LNAPL a partir de los datos de ensayos de Baildown** – Publicación de API 4762, abril de 2016. Elaborado por R.J. Charbeneau, A. Kirkman y R. Muthu (2012), incluye una herramienta de hojas de cálculo de Microsoft Excel™ que se puede usar para analizar los resultados de los ensayos de Baildown. Hay disponibles varios métodos analíticos para estimar la transmisibilidad de los LNAPL, a saber: Bouwer y Rice, Cooper y Jacob, y Cooper, Bredehoeft y Papadopoulos.
- ▶ **Guía del usuario para la hoja de cálculo de transmisibilidad de LNAPL de API: Una herramienta para el análisis de ensayos de desbastado manual.** Muthu R. y J. Michael Hawthorne (en publicación, 2018).



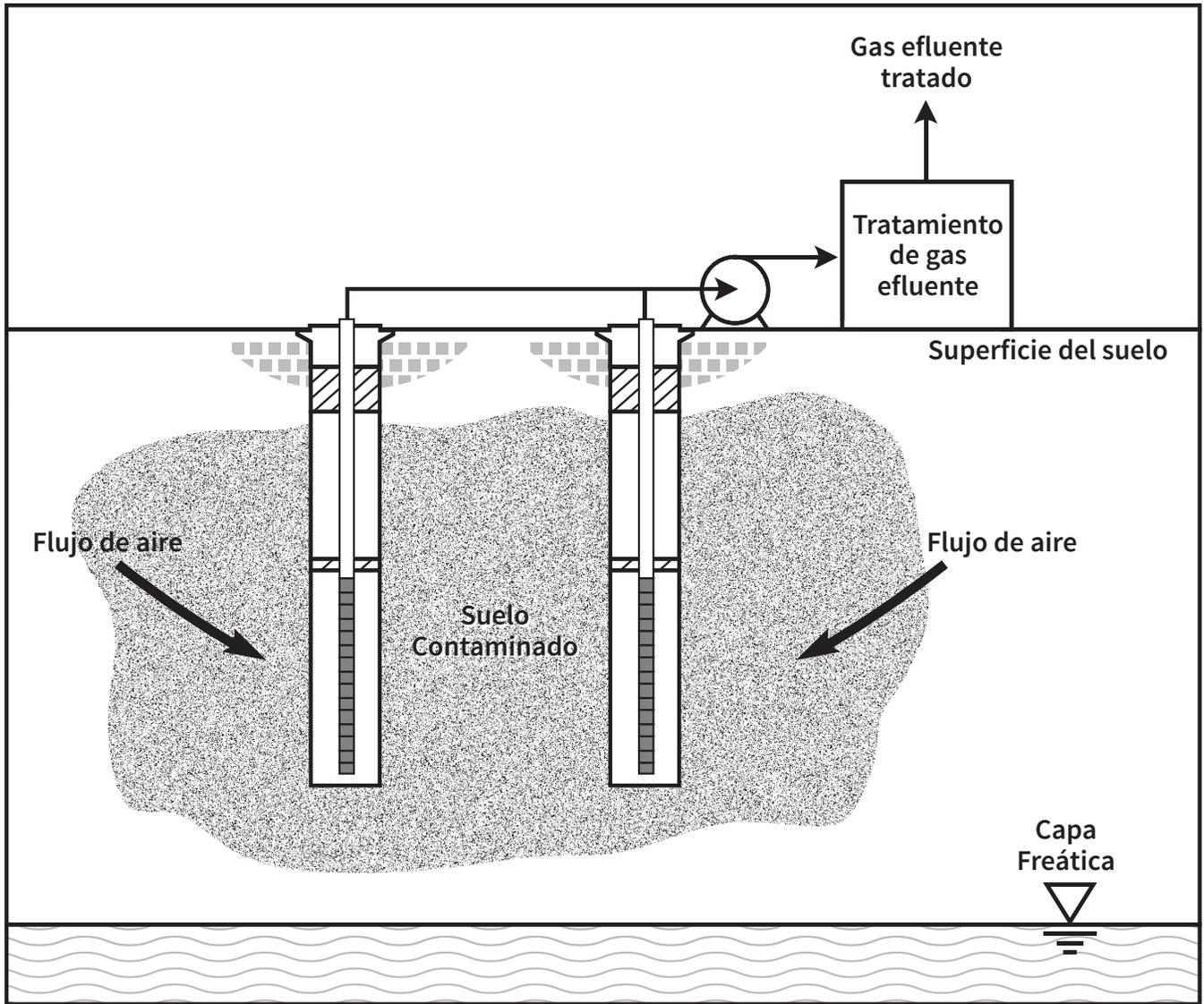
## ¿Qué se puede lograr con la extracción de vapores de suelo?

Una alternativa común a la recuperación hidráulica es la extracción de vapores de suelo (SVE). La SVE implica la extracción de gas de suelo por encima de una masa de LNAPL. El gas extraído normalmente se trata por encima del suelo antes de descargarlo a la atmósfera. Se pueden aplicar ventilación a la zona insaturada y/o pozos de aspersión a la zona saturada para mejorar el barrido de aire a través de la zona de tratamiento de LNAPL. El agotamiento de los LNAPL se produce mediante la volatilización de los hidrocarburos de bajo peso molecular y la degradación aeróbica de los hidrocarburos.

Una característica clave de la SVE es que las tasas de recuperación de hidrocarburos volátiles normalmente disminuyen con el tiempo. Según API 4711 (Sale 2001):

- ▶ La reducción de las tasas de recuperación siguen una ecuación de primer orden con una vida media que describe el tiempo necesario para recuperar la mitad de los LNAPL continuos (zonas 1 y 2) que quedan.
- ▶ La recuperación total se aproxima asintóticamente a la fracción de LNAPL volátiles de las zonas insaturadas (zona 1) y la fracción de los LNAPL que se puede extraer de las zonas saturadas a través de la acción capilar (zona 2).
- ▶ La SVE puede tener efectos limitados en los LNAPL discontinuos de la zona saturada (zona 3).

De forma crítica, la SVE puede inyectar oxígeno en los suelos afectados por LNAPL, lo que conllevaría un agotamiento adicional de los hidrocarburos de petróleo a través de la atenuación biológica con oxígeno. La SVE centrada en el agotamiento biológico de los hidrocarburos de petróleo se conoce como bioventilación (Leeson y Hinchee 1997). Los métodos directos para cuantificar las pérdidas de LNAPL debidas a la degradación aeróbica de LNAPL (p. ej., producción acumulativa de CO<sub>2</sub> derivado de petróleo) no están debidamente documentados. Un aspecto nuevo de la investigación es que la bioventilación pasiva puede ser una estrategia prometedora para mejorar las tasas de agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen.



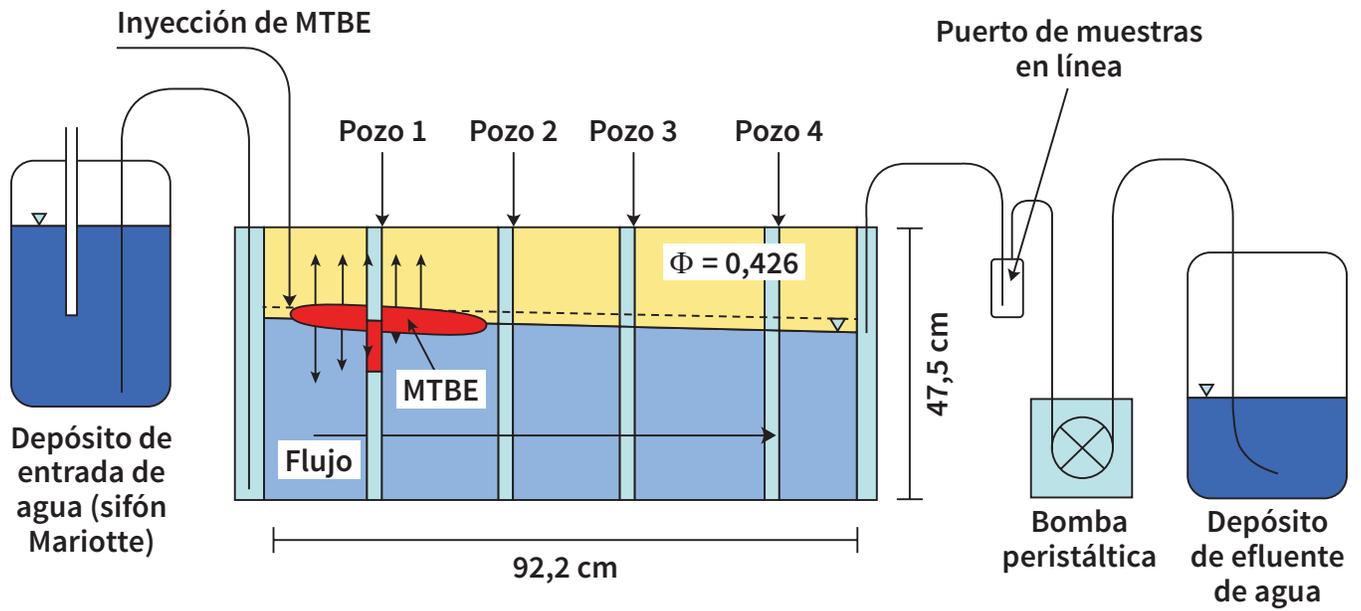
## ¿Cuándo se estabilizan las masas de LNAPL?

Una preocupación principal en los emplazamientos con LNAPL ha sido el potencial de expansión lateral o traslado de masas de LNAPL. Afortunadamente, la supervisión a largo plazo sugiere que la extensión de las masas de LNAPL en vertidos antiguos tienden a estabilizarse, incluso cuando existen LNAPL potencialmente móviles en la masa de LNAPL (Mahler y otros 2012b). Una importante excepción a las masas estables de LNAPL son los vertidos nuevos.

Históricamente, la principal explicación de la estabilidad de los vertidos antiguos de LNAPL ha sido la baja saturación de LNAPL (fracciones de espacio poroso que contienen LNAPL) y en consecuencia formaciones con bajas conductividades de LNAPL. Más recientemente, Mahler y otros (2012a) añadieron el argumento de que las pérdidas naturales de LNAPL desempeñan un papel fundamental a la hora de controlar la expansión lateral o el traslado de masas de LNAPL. En general, la condición del umbral para la expansión de masas de LNAPL, en emplazamientos con vertidos antiguos, son unas tasas de vertido de LNAPL superiores a las de agotamiento natural dentro de su zona de origen. Al igual que las plumas de hidrocarburos de petróleo en fase disuelta, la extensión de las masas de LNAPL se puede limitar en gran medida mediante procesos naturales.

De forma más detallada, Mahler y otros (2012a) describen un experimento conceptual en el que un LNAPL, el metil tert-butil éter (MTBE), se vertió en depósitos de arena con paredes de vidrio de manera secuencial con etapas de vertido incrementalmente superiores. En cada etapa de vertido, la longitud de la masa de LNAPL aumentaba al principio y después se estabilizaba. Incluso en condiciones de vertido continuo de LNAPL en el sistema y con la migración de LNAPL dentro de la masa de LNAPL general, su extensión pasó a ser estable cuando las pérdidas de LNAPL por disolución y volatilización fueron iguales a las tasas de vertido.

Asimismo, Mahler y otros (2012a) desarrollan soluciones analíticas para calcular la extensión de LNAPL en función de su vertido y de las tasas de agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen. La aplicación de las tasas comunes de vertido y agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen indica que las pérdidas naturales de LNAPL pueden ser el principal factor para controlar la estabilidad de los LNAPL en vertidos antiguos de LNAPL.



**Demostración conceptual; estudio de laboratorio de la estabilidad de los LNAPL – Mahler y otros 2012a**

## ¿Qué dificulta la retirada de vertidos de LNAPL?

La experiencia de las últimas décadas nos ha enseñado lo siguiente:

- 1) nuestros mejores esfuerzos a menudo dejan algunos LNAPL en el lugar,
- y 2) los LNAPL restantes a menudo causan excedencias de los niveles de agua potable en zonas de vertido durante extensos periodos de tiempo.

El atrapamiento de LNAPL a niveles residuales es un factor principal que limita nuestro éxito. Otras dificultades son la baja solubilidad de los LNAPL, la complejidad del entorno geológico bajo la superficie, las limitaciones de acceso asociadas a estructuras de la superficie y objetivos finales de calidad de agua que suelen ser de tres a cinco órdenes de magnitud inferiores a las concentraciones iniciales típicas en las zonas de LNAPL.

De forma más específica, las dificultades incluyen:

**Atrapamiento de los LNAPL en saturaciones residuales** – La eliminación de los LNAPL tiene como resultado la invasión del agua en el espacio poroso. Cuando se produce esta invasión, las vías de flujo de los LNAPL se reducen y son más tortuosas, lo que disminuye la capacidad del medio poroso para transportar los LNAPL. A la larga, se eliminan LNAPL suficientes como para que ya no exista una red continua de flujo de LNAPL. La saturación en la que los LNAPL pasan a ser discontinuos (y por tanto inmóviles) se conoce como “saturación residual”. El resultado es que el bombeo directo de los LNAPL genera tasas de recuperación en disminución con el tiempo (lo que dificulta la recuperación a lo largo del tiempo) y, en el mejor de los casos, el agotamiento fraccional de los LNAPL (p. ej.,  $< \frac{1}{2}$ ).

**Tasas lentas de disolución** – Los LNAPL se agotan disolviéndose en las aguas subterráneas y el gas de suelo. La disolución en las aguas subterráneas es lenta debido a la baja solubilidad de los LNAPL en el agua y el lento flujo de las aguas subterráneas. La eliminación a través del gas de suelo está restringida por el contacto limitado entre los LNAPL y el gas de suelo (gran parte de los LNAPL están sumergidos) y la circulación limitada del aire en los medios porosos bajo la superficie.

**Complejidad de configuración** – El entorno geológico natural es a menudo complejo, tanto que dos orificios perforados a unas pocas decenas de pies de distancia entre sí puede indicar condiciones sustancialmente diferentes. La complejidad del emplazamiento aumenta además por las estructuras de la superficie. Los edificios, depósitos, unidades de tratamiento, instalaciones y/o carreteras a menudo limitan el acceso para la investigación y construcción de sistemas de recuperación.

**Objetivos exigentes** – En numerosas ubicaciones, el objetivo final es devolver la calidad de las aguas subterráneas en la zona de emisión a niveles de agua potable. En el caso del benceno, es posible que sea necesario reducir las concentraciones acuosas de tres a cinco órdenes de magnitud. La consecución de este objetivo a corto plazo exige a menudo la recuperación de básicamente todos los LNAPL (p. ej., Sale y McWhorter 2001 y Huntley y Beckett 2002).

Por todos los motivos señalados anteriormente, la consecución de los objetivos de subsanación típicos (p. ej., niveles de agua potable) no es fácil. Actualmente, en numerosos emplazamientos, nuestro activo más sólido para restablecer los medios afectados por LNAPL antiguos parece ser el agotamiento de las zonas de fuentes naturales para los LNAPL y la atenuación natural para las plumas en fase disuelta.

### ¿Qué fomenta el agotamiento natural dentro de su zona de origen?

La investigación del siglo XXI ha llevado a la conclusión de que varias comunidades microbianas de las zonas de LNAPL están causando pérdidas naturales significativas de LNAPL en numerosos emplazamientos (ITRC 2009b, Ortega-Calvo y Alexander 1994, Zeman y otros 2014, Irianni-Renno y otros 2016). En muchos casos, el proceso más importante de las zonas de LNAPL es la metanogénesis.

La metanogénesis refleja escenarios en los que están ausentes los aceptadores de electrones normalmente considerados en las plumas de fase disuelta (oxígeno, nitrato, hierro y sulfato). Los principales productos de la metanogénesis son el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CO}_4$ .

Mientras que la metanogénesis suele ser por lo general un proceso lento (no favorecido termodinámicamente), presenta una ventaja notable: no está limitado por la disponibilidad de los aceptadores de electrones. Las últimas investigaciones (explicadas a continuación) indican que las pérdidas de LNAPL en zonas con metanogénesis continua pueden ser del orden de centenares a miles de galones por acre y por año. Además, las variaciones estacionales en las temperaturas bajo la superficie pueden llevar a variaciones estacionales en la actividad de los metanógenos y las tasas de pérdidas naturales de LNAPL (Zeman y otros 2014).

En la fotografía adyacente de un núcleo de suelo se muestran gases producidos en una zona de LNAPL ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}_4$ ). El núcleo se recogió de forma que se evitara el drenaje de fluidos porosos. Los procesos de los gases que se producen en las zonas de LNAPL y la descarga subsiguiente en la zona insaturada se conoce como “ebullición” y está documentada en Amos y Mayer (2006).

Burbujas de dióxido de carbono-metano en núcleo afectado por LNAPL saturados



Fotografía de Julio Zimbron

De forma más detallada, la imagen adyacente se realizó recogiendo testigos de suelo continuos a través de una masa de LNAPL en 18 sondeos en una zona de estudio de 30 pies por 30 pies. En cada testigo se analizaron hidrocarburos de petróleo totales (TPH) cada 0,5 pies. En el testigo del sondeo central (C-3) se analizó el ADN usando una reacción en cadena de polimerasa cuantitativa (qPCR) a intervalos de 1 pie (Irianni Renno y otros 2016). El terreno está situado en una zona de tratamiento de una antigua refinería donde las operaciones finalizaron 34 años antes de la campaña de sondeos y toma de testigos.

La imagen de la izquierda presenta concentraciones de hidrocarburos de petróleo totales en el suelo en 540 análisis de muestras de suelo. Las saturaciones de LNAPL observadas en el gráfico del estudio abarcan desde el 1 hasta el 10 % de espacio poroso. En función de las bajas saturaciones de LNAPL, el emplazamiento es de fase intermedia. Sorprendentemente, casi la mitad de los LNAPL totales observados se producen en la zona insaturada en un volumen en el que el metano se observa en el gas de suelo. La hipótesis es que el flujo ascendente de metano desde los suelos afectados por los hidrocarburos consume oxígeno y limita la degradación aeróbica de los hidrocarburos en las partes inferiores de la zona insaturada.

La imagen de la derecha presenta las secuencias de genes R21S basadas en la comunidad microbiana Arcaicoica. Estos gráficos muestran la presencia de bacterias metanogénicas en todo el volumen del estudio excepto la parte más superior. Las mediciones estacionales de las tasas de pérdida natural usando colectores de CO<sub>2</sub> (descritos a continuación) indican valores que abarcan desde 500 galones/acre/año a principios de primavera hasta 5000 galones/acre/año a principios de otoño, tras las cálidas temperaturas del verano.



## ¿Cuál es la mejor forma de medir las tasas de agotamiento natural dentro de su zona de origen?

Citando a McCoy (2014), “El paso más reciente y potencialmente más evolutivo para los LNAPL ha sido la conclusión de que las tasas de atenuación de LNAPL estimadas de los flujos de gases observados en la zona insaturada pueden ser importantes respecto a las tasas de producciones de LNAPL de los sistemas de recuperación y/o las pérdidas de LNAPL expresadas mediante los procesos de atenuación observados en las aguas subterráneas”. Actualmente se están empleando en gran medida tres métodos para resolver las pérdidas naturales de LNAPL: gradiente, cámara de flujo y colectores.

Según Tracy (2015) y API (2016), a continuación se presentan los métodos y se describen las posibles ventajas e inconvenientes.

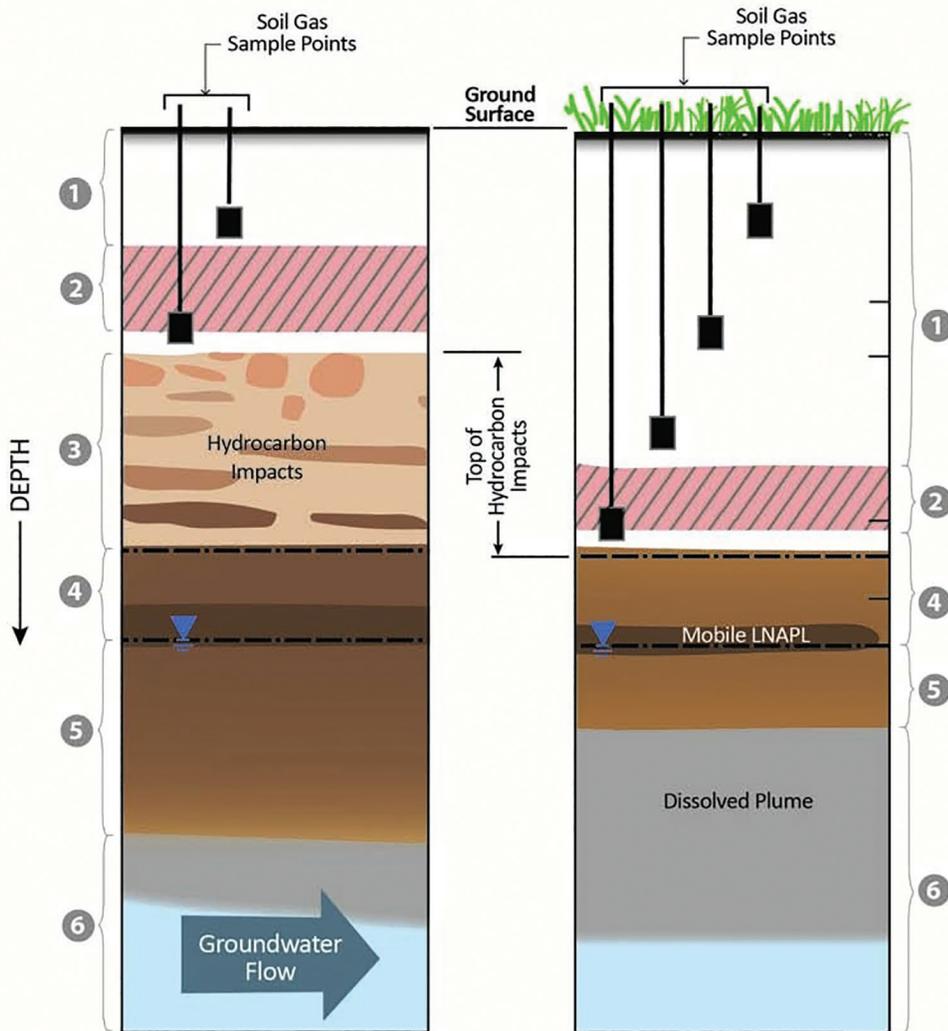
### **Método de gradiente**

El método de gradiente implica:

- ▶ Instalación de puertos de muestras de gas de suelo de varios niveles.
- ▶ Recogida de muestras de gas.
- ▶ Pruebas de rastreo de gas conductor para estimar los coeficientes de difusión en fase de gas.
- ▶ Análisis de muestras de gas para CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> e hidrocarburos volátiles.
- ▶ Aplicación de la primera ley de Fick para estimar los flujos de gas basados en difusión.
- ▶ Conversión de los flujos de gas en pérdidas equivalentes de LNAPL.

Las principales referencias son Lundegard y Johnson (2006), Johnson y otros (2006) e ITRC (2009a). Una ventaja clave de este método es que no es tan sensible a las condiciones de la superficie que puedan limitar el flujo del gas de suelo (p. ej., máximos) como otros métodos. Los inconvenientes son los siguientes:

- ▶ Los valores medidos son instantáneos en sistemas que pueden ser dinámicos debido al bombeo barométrico.
- ▶ Las diferencias en los resultados obtenidos a partir de distintas elevaciones verticales en una única ubicación pueden ser muy grandes.
- ▶ Los problemas de geologías complejas y/o de consecución de varios niveles de sistemas de muestreo de gas pueden limitar la precisión de los coeficientes de difusión estimados.
- ▶ El método solo tiene en cuenta el transporte difusor de gases.
- ▶ El nivel de esfuerzo es elevado en comparación con las alternativas.
- ▶ Los valores medidos pueden verse afectados por las precipitaciones recientes.
- ▶ El método puede verse afectado por la contaminación de suelos poco profundos.



Schematic of Gradient Method Monitoring Setup with Hydrocarbon Impacts in the Vadose Zone

Schematic of Gradient Method Monitoring Setup without Hydrocarbon Impacts in the Vadose Zone

**NOTE**  
Soil borings and monitoring wells are typically existing and useful for NSZD evaluation. However, it is not necessary to install them for this purpose.

**Zone Identification Key**

- ① Aerobic Vadose
- ② Hydrocarbon Oxidation
- ③ Anaerobic Vadose
- ④ Anaerobic Capillary
- ⑤ Anaerobic Saturated
- ⑥ Mixed Redox Saturated

### **Método de cámara de flujo**

El método de la cámara de flujo implica colocar una cámara a ras de una ubicación de interés. Se emplean una fuente de luz UV y un detector de UV para supervisar la acumulación de CO<sub>2</sub> en la cámara a lo largo del tiempo. Normalmente, las cámaras cuentan con una pequeña ventilación que permite el transporte advectivo de los gases hacia la cámara. El flujo de CO<sub>2</sub> se puede transformar en pérdidas de LNAPL considerando que todos los LNAPL perdidos se convierten en CO<sub>2</sub>; todas las pérdidas significativas de LNAPL tienen como resultado la descarga de CO<sub>2</sub> justo por encima de la zona de interés y la estequiometría de reacción para convertir los componentes de LNAPL en CO<sub>2</sub>.

Las mediciones se pueden realizar en minutos, por lo que se pueden obtener resultados en tiempo real en la ubicación. Las pérdidas continuas de LNAPL se pueden obtener colocando una cámara en una ubicación durante el periodo de interés. La funcionalidad de las mediciones continuas de la cámara está limitada por el coste de los equipos.

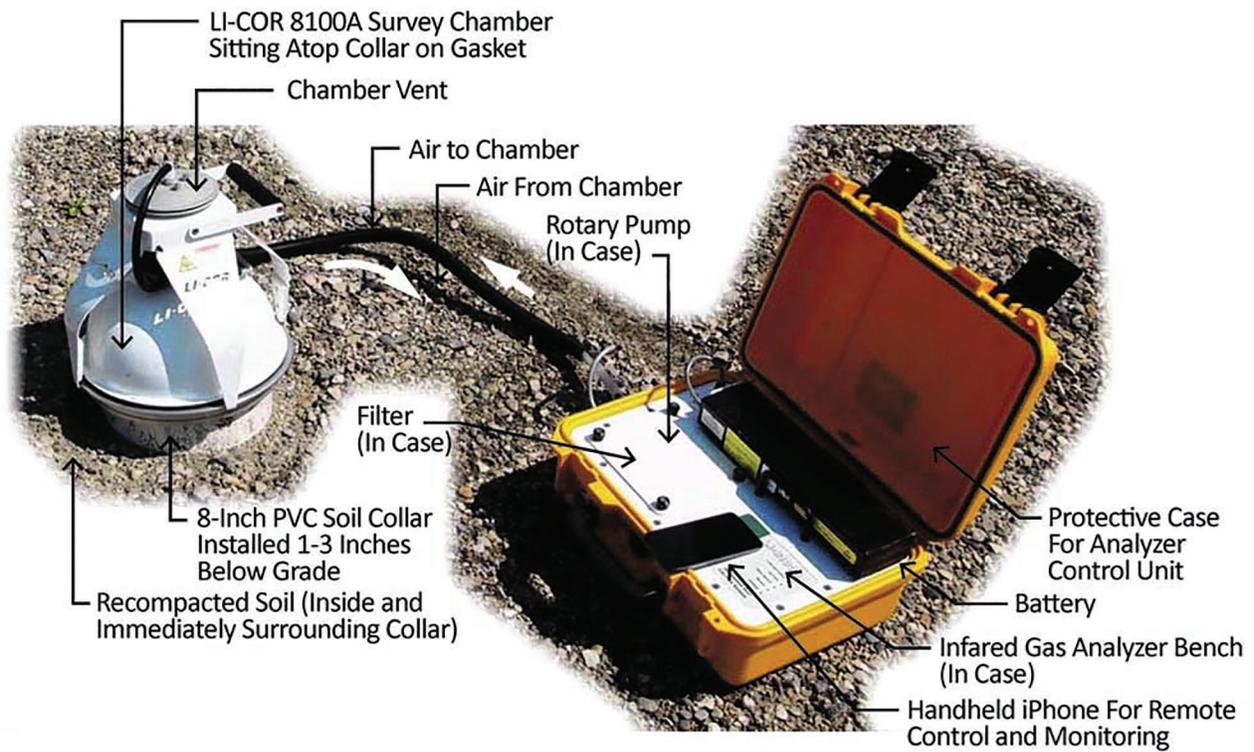
Las referencias principales son Sihota y otros (2011) y Sihota y otros (2012).

Ventajas del método de cámara:

- ▶ Bien adaptado para realizar encuestas rápidamente en todos los emplazamientos.
- ▶ El método trata el transporte del gas a través de la difusión y la advección.
- ▶ El método es no intrusivo.

Los inconvenientes son los siguientes:

- ▶ Los resultados típicos son valores instantáneos de los sistemas que pueden ser dinámicos.
- ▶ El método exige corregir los valores medidos para la respiración natural del suelo de CO<sub>2</sub>.
- ▶ Las condiciones anómalas de la superficie (topes, restos enterrados, grietas en el suelo...) pueden influir en los resultados.
- ▶ Los valores medidos pueden verse afectados por el bombeo barométrico, la temperatura, viento fuerte y precipitaciones recientes.



Guía API PUBL 4784, primera edición, STAN-  
DARD de American Petroleum Institute, mayo  
de 2017

### **Método del colector**

El método del colector emplea sólidos alcalinos para convertir el  $\text{CO}_2(\text{g})$  en  $\text{CaCO}_3(\text{s})$ . Se colocan dos capas de adsorbente en un tubo que se instala a ras durante unas semanas. El sorbente superior evita que el  $\text{CO}_2$  atmosférico llegue al adsorbente inferior (de trabajo). Los colectores de  $\text{CO}_2$  ofrecen una descarga íntegra de  $\text{CO}_2$  durante unas semanas.

El  $\text{CO}_2$  absorbido se determina usando métodos analíticos gravimétricos. Al igual que con el método de la cámara, el flujo de  $\text{CO}_2$  se transforma en pérdidas de LNAPL considerando que todos los LNAPL perdidos se convierten en  $\text{CO}_2$ ; todas las pérdidas significativas de LNAPL tienen como resultado la descarga de  $\text{CO}_2$  en un grado por encima de la zona de interés y la estequiometría de reacción para convertir los componentes de LNAPL en  $\text{CO}_2$ . Las referencias principales son Zimbron y otros (2014) y McCoy y otros (2015).

Ventajas principales de los colectores:

- ▶ Sencillez general.
- ▶ Mediciones íntegras de promedio de tiempo.
- ▶ Un método directo para medir el flujo total gracias a los procesos de transporte advectivos y difusivos.
- ▶ Captura directa de  $\text{CO}_2$  que se puede usar para análisis de isótopos con el fin de determinar la fracción de  $\text{CO}_2$  recogido que se generó por las fuentes de carbono modernas.

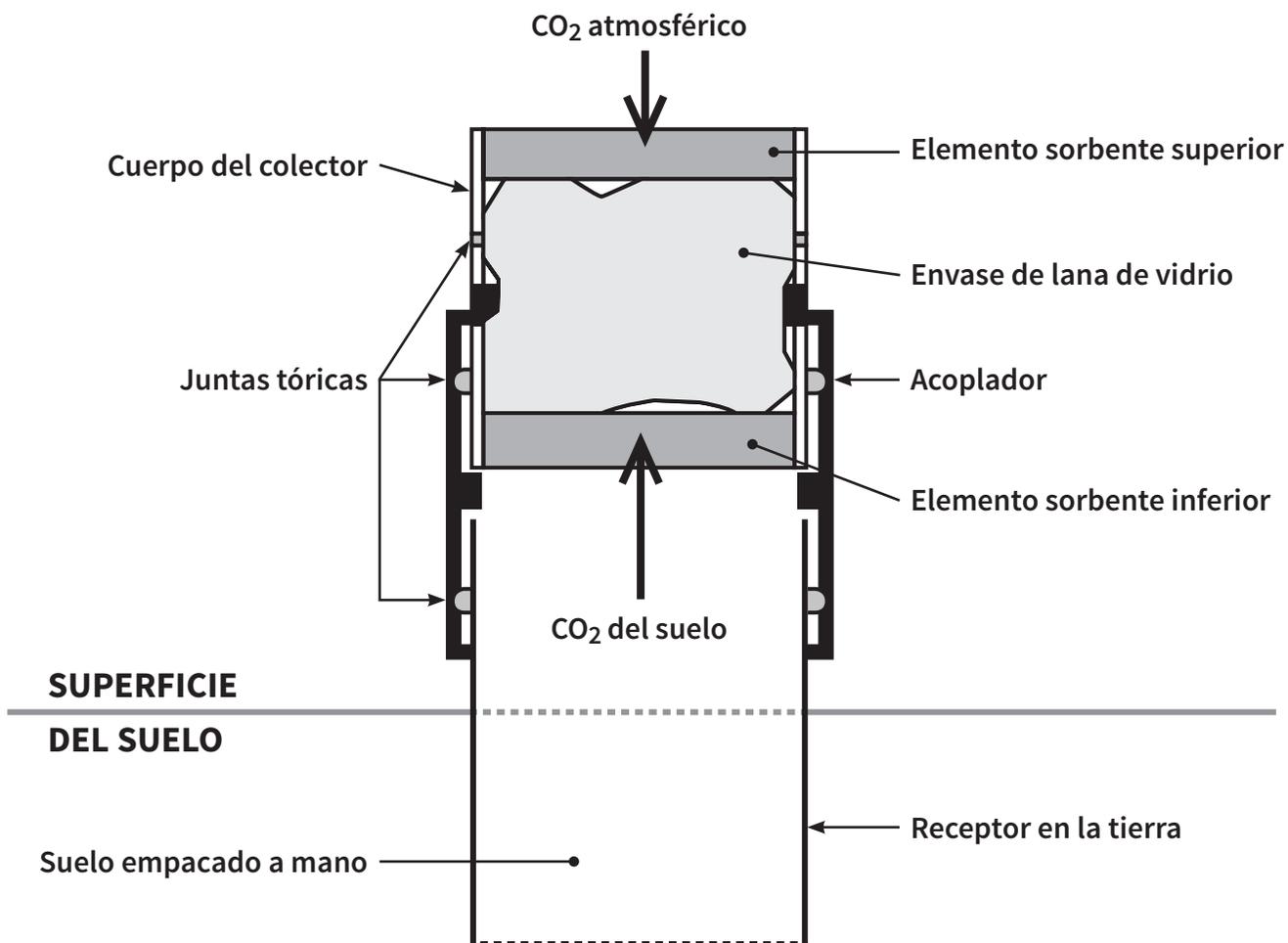
Los inconvenientes son los siguientes:

- ▶ El método exige corregir los valores medidos para la respiración natural del suelo de  $\text{CO}_2$ .
- ▶ Las condiciones anómalas de la superficie (topes, restos enterrados, grietas en el suelo...) pueden influir en los resultados.
- ▶ Los valores medidos pueden verse afectados por el viento fuerte y las precipitaciones recientes.

Aunque existen diferencias entre los métodos, merece la pena señalar que, desde la perspectiva de un orden de magnitud, los tres métodos ofrecen resultados similares.



Fotografía de Gabriel Rodriguez (E-Flux)



**Resumen de los métodos para medir las pérdidas de LNAPL**

<b>Gradiente</b>	<b>Cámara</b>	<b>Colector</b>
<b>Intrusivo</b>		
Sí – Instalación obligatoria de sistemas de muestras de varios niveles bajo la superficie	No – Sistemas instalados en la superficie	No – Sistemas instalados en la superficie
<b>Periodo de medición</b>		
Instantáneo	Instantáneo – Se puede instalar durante periodos prolongados en una ubicación con dedicación a largo plazo de equipos costosos	Valores integrales de tiempo medio – Generalmente semanas, que pueden ser meses
<b>Tiempo hasta resultados</b>		
Semanas – Tiempo necesario para completar los análisis de las muestras y reducir datos	Valores de campo en tiempo real – Bien adaptado para realizar encuestas en el emplazamiento	Semanas – Tiempo necesario para completar los análisis de las muestras y reducir datos
<b>Correcciones para la respiración natural del suelo</b>		
No	Sí – Correcciones de isótopos de carbono o antecedentes	Sí – Correcciones de isótopos de carbono o antecedentes
<b>Nivel de esfuerzo relativo</b>		
Alto – Requiere la instalación de sistemas de muestras, recogida de muestras de gas, determinación de los coeficientes de difusión y reducción de datos	Moderado – Requiere experiencia con equipos de campo moderadamente complejos	Bajo – Colocación y recuperación de colectores seguidos de la determinación de CO <sub>2</sub> absorbido por métodos gravimétricos
<b>Posibles desviaciones relativas a la climatología (bombeo barométrico, viento, precipitaciones)</b>		
Sí – Bombeo barométrico y precipitaciones	Sí – Bombeo barométrico, precipitaciones y viento	Sí – Precipitaciones y viento

## ¿ Qué es la recuperación de LNAPL a límites viables?

Un requisito normativo común para los emplazamientos de LNAPL es la “recuperación de LNAPL a los máximos límites viables”, lo que se conoce como MEP (por sus siglas en inglés). Históricamente, la falta de métricas cuantitativas para la recuperación de LNAPL a límites viables ha sido problemática. Si el objetivo de saneamiento es recuperar los LNAPL a los máximos límites viables, el objetivo es entonces reducir la saturación de LNAPL cuando estos se encuentren por encima del intervalo residual. Existen varias métricas de rendimiento y umbrales mensurables que permiten determinar si la cuestión de MEP es válida o si se ha alcanzado un punto final en la tecnología de subsanación. Estas métricas incluyen: transmisibilidad de los LNAPL, espesores de pozo limitados/poco frecuentes, análisis de la curva en declive y rendimiento asintótico de la tecnología.

Surge una simple respuesta a la disyuntiva de qué es la recuperación de LNAPL en la mayor medida posible. La recuperación de LNAPL en tasas reducidas respecto a las tasas de pérdidas naturales de cientos a miles de galones por acre y por año presenta probablemente pocas ventajas y en consecuencia no es viable. Supongamos un emplazamiento con una zona de muestras de 10 pies (3 metros) y una zona de 1 pie (33 centímetros) de LNAPL móviles a baja transmisibilidad. En la siguiente tabla se ofrece una comparación de lo que se puede lograr con una recuperación agresiva, el agotamiento de las zonas de fuentes naturales y una zona vadosa de grano grueso.

### La comparación de la recuperación de LNAPL con el agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen y el agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen mejorado

Pozos/acre	16	1	16	1	16	1
ROC efectivo (pies)	29	118	29	118	29	118
Transmisibilidad de LNAPL (pies cuadrados/día)	0,1	0,1	0,8	0,8	5	5
Disminución (pies)	0,1	2	0,1	2	0,1	2
Tasa de reducción de fuentes a través de la recuperación de LNAPL (gal/acre/año)	599	575	4 791	4 599	29 944	28 742
Reducción de saturación de intervalo móvil de 1 pie (%PV/año)	0,53 %	0,50 %	4,20 %	4,03 %	26,26 %	25,20 %
Tasa de agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen (gal/acre/año)	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
Reducción de saturación media en zona de muestras de 10 pies						
Sin recuperación de LNAPL [solo agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen ] (%PV/año)	0,18 %	0,18 %	0,18 %	0,18 %	0,18 %	0,18 %
Con recuperación de LNAPL (%PV/año)	0,23 %	0,23 %	0,6 %	0,58 %	2,8 %	2,7 %
Agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen mejorado						
Bioventilación (gal/acre/año)	11 000	11 000	11 000	11 000	11 000	11 000
Reducción de saturación media en zona de muestras de 10 pies						
Sin recuperación de LNAPL [solo agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen ] (%PV/año)	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %
Sin recuperación de LNAPL (%PV/año)	1,0 %	1,0 %	1,4 %	1,4 %	3,6 %	3,5 %

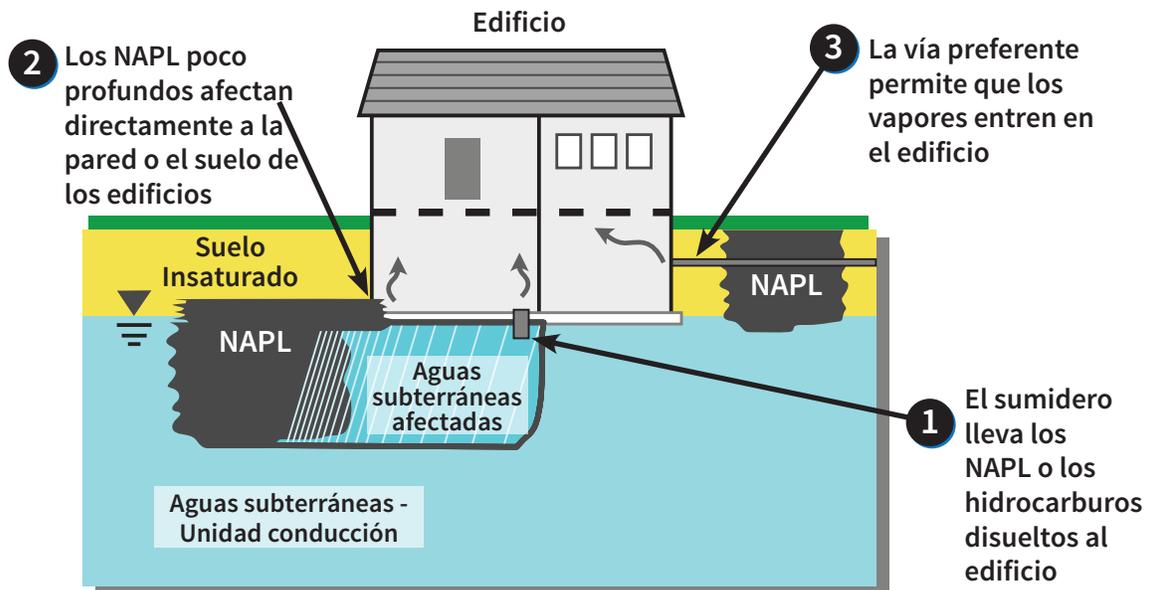
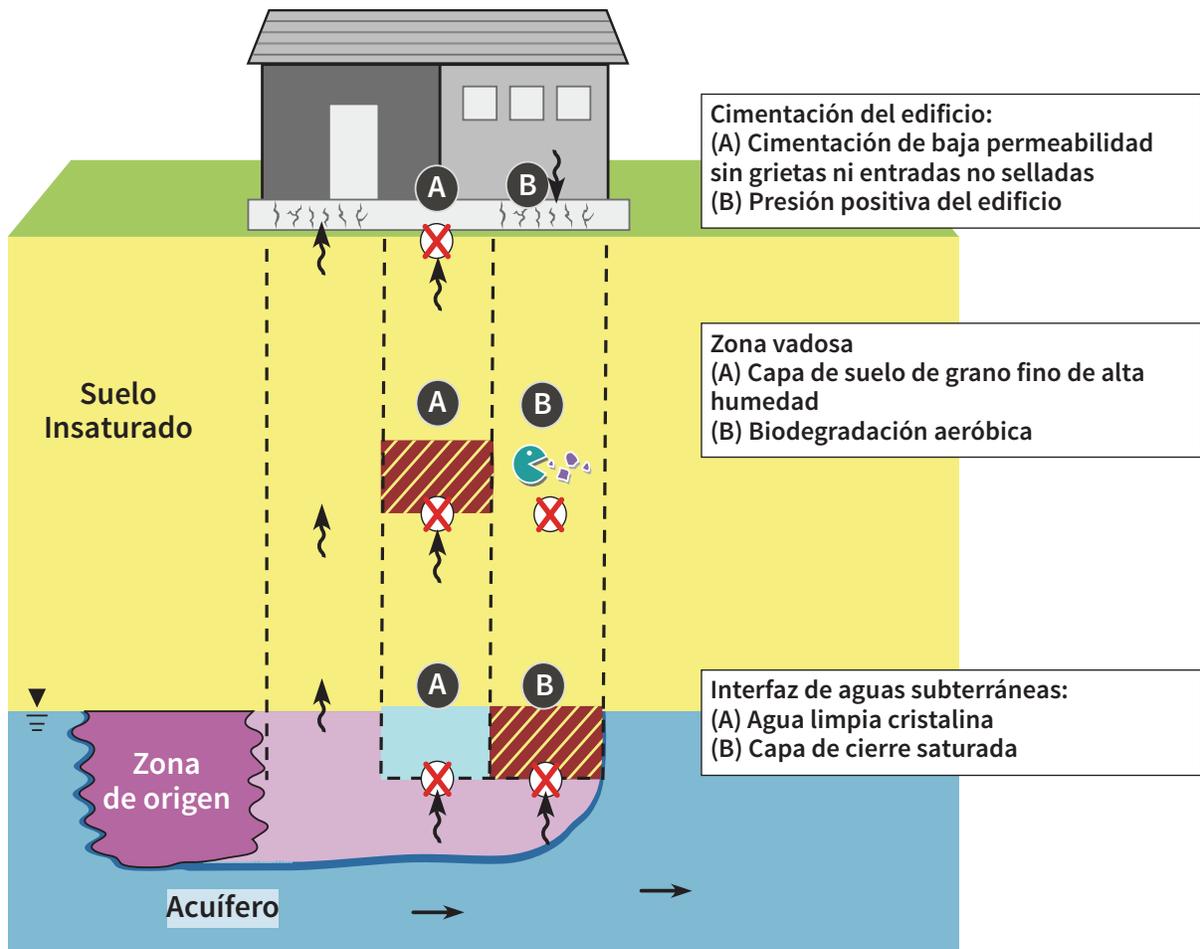
## ¿Cuándo se convierte en un problema la intrusión de vapor?

En general, la entrada de vapores de petróleo en los edificios por los vertidos de LNAPL es poco común debido a la biodegradación de los vapores en la zona vadosa antes de que alcancen el interior del edificio. No obstante, hay algunas situaciones en las que la entrada de vapor plantea un riesgo y, en tales casos, es necesario investigar más para estudiar la exposición potencial o las medidas de respuesta de emergencia.

Los componentes volátiles de un LNAPL vertido bajo la superficie se volatilizan en el gas de suelo de la zona vadosa a partir del propio LNAPL o de un penacho disuelto. Normalmente, los compuestos volátiles se difunden ascendentemente hacia la superficie al tiempo que se dividen en la humedad del suelo donde se biodegradan (ITRC 2014). El gráfico superior muestra cómo los vapores de petróleo pueden atenuarse bajo la superficie.

En EPA (2015) se recomienda usar una distancia de control lateral de 30 pies (10 metros) para el impacto del petróleo. No se necesitan más evaluaciones de la entrada de vapor en los emplazamientos en los que la distancia entre el borde de los impactos bajo la superficie y el edificio objeto de evaluación sea superior a esta distancia de control lateral. Para los edificios que se encuentren más cerca que la distancia de control lateral, no se recomienda realizar más evaluaciones para los emplazamientos UST si la distancia vertical entre la fuente de vapor bajo la superficie y la cimentación del edificio es superior a 6 pies (2 metros) para las fuentes de penachos disueltos y superior a 15 pies (5 metros) para las fuentes de LNAPL (EPA 2015). Para los emplazamientos de emisión de petróleo no UST, ITRC (2014) recomienda una distancia de control vertical superior a 18 pies (6 metros).

En los casos en los que la distancia entre la fuente y el edificio sea inferior a las distancias de control o existan algunas vías preferenciales, normalmente se garantiza más investigación de la exposición a la entrada de vapor. El gráfico inferior muestra situaciones que presentan el potencial de generar entrada de vapor de petróleo.



## ¿Por qué constituyen las pátinas un gran problema?

Una gran cantidad de instalaciones petrolíferas están situadas junto a aguas superficiales. De estas instalaciones, muchas de ellas tienen problemas con apariciones infrecuentes de películas de hidrocarburos de petróleo iridiscentes (pátinas) en el agua. Las pátinas son tan finas que una pátina de 7 galones/ milla cuadrada equivale a un espesor de 0,00001 mm. Las pátinas se asocian normalmente a vertidos de materias orgánicas o hidrocarburos líquidos relativos a los procesos biológicos naturales. La coloración iridiscente de las pátinas se debe a la refracción de la luz a través de las capas de NAPL de varios espesores. Las pátinas de petróleo en la superficie del agua pueden conllevar la infracción de la Ley de Aguas Limpias (Clean Water Act, 1972) y la necesidad de soluciones costosas.

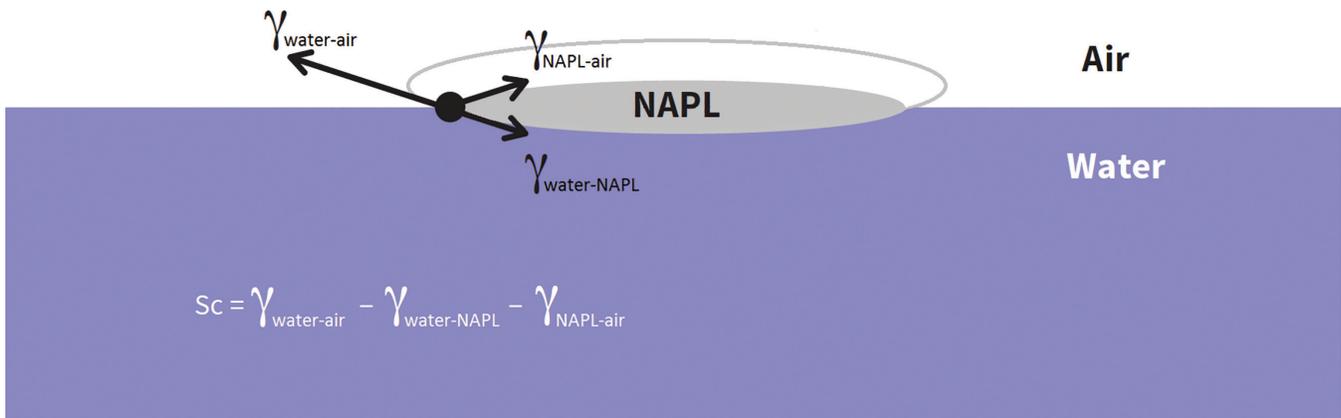


## ¿Qué causa las pátinas?

Las pátinas de petróleo se producen cuando la suma de la fuerza hacia afuera en el borde de los LNAPL de la superficie del agua es superior a la suma de las fuerzas hacia adentro (coeficiente de dispersión positivo,  $Sc$ ). Los LNAPL se dispersan por las interconexiones aire-agua hasta que las fuerzas interconectoras ( $\gamma$ ) del primer borde de la pátina se equilibran o los procesos naturales agotan los LNAPL.

Las pátinas se pueden clasificar en crónicas o periódicas. Antes de la Ley de Aguas Limpias (1972), las pátinas crónicas se producían por la descarga directa de aguas residuales con LNAPL en el agua de la superficie. En condiciones extremas, las descargas de LNAPL en el agua superficial hacen que los ríos ardan (Hartig, 2010). Gracias a las prácticas modernas, las pátinas crónicas son cada vez menos frecuentes.

Las pátinas periódicas a menudo se correlacionan con las fases de marea baja, fases de marea alta o condiciones estacionales. La duración de las pátinas periódicas depende del mecanismo de los vertidos y de los factores que controlan la asimilación de los LNAPL y las interconexiones del agua de la superficie-aguas subterráneas (GSI, por sus siglas en inglés). Los mecanismos comunes de emisión de pátinas son las filtraciones, la ebullición y la erosión. Entender el mecanismo de emisión y los factores que controlan la asimilación de los LNAPL es fundamental para desarrollar soluciones.



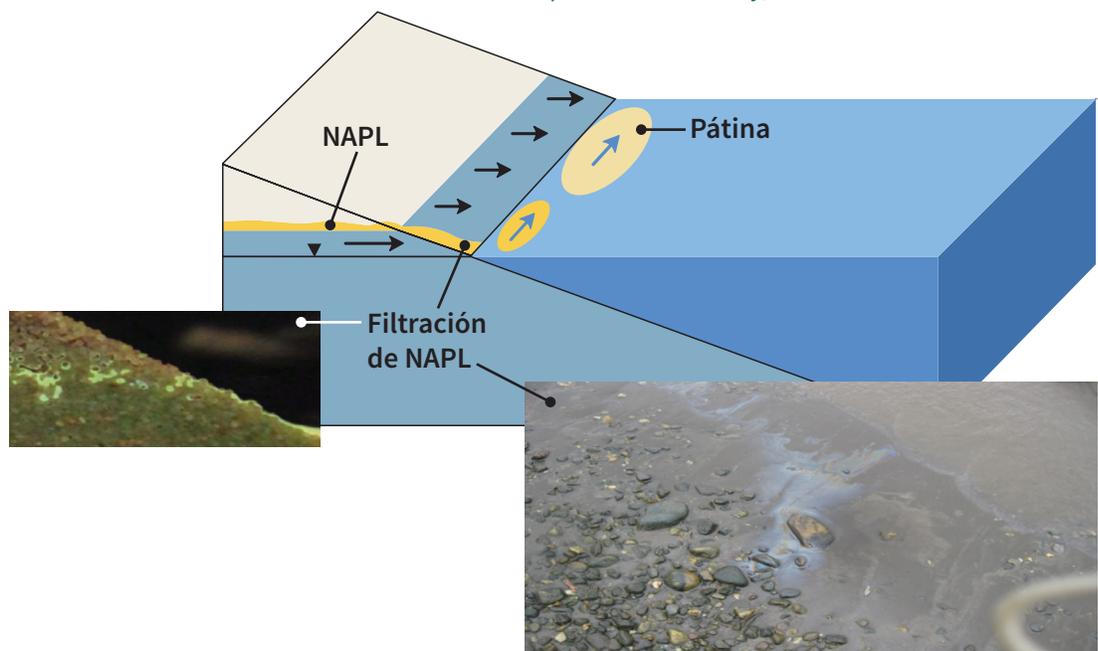
De forma más detallada, los mecanismos para la generación de pátinas incluyen:

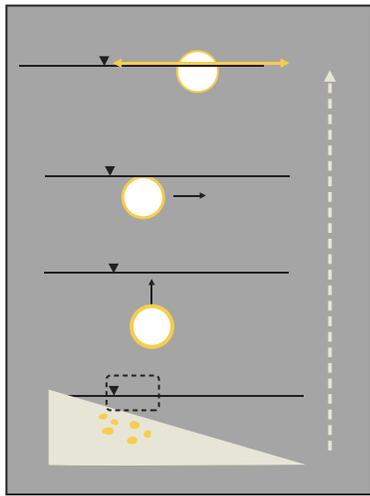
**Filtraciones:** cuando baja el nivel del agua de la superficie, las aguas subterráneas normalmente se descargan del banco al agua de la superficie. Puesto que los LNAPL se encuentran cerca de la GSI, la descarga de aguas subterráneas del banco puede llevar a los LNAPL al agua de la superficie. A menudo, las filtraciones aparecen hacia el extremo inferior de la fase del agua de la superficie.

**Ebullición:** los gases emitidos de las zonas de LNAPL a menudo contienen una fina película de LNAPL entre el gas y el agua, básicamente, una pátina dentro de una burbuja. Las burbujas de gas en las zonas de LNAPL pueden provenir del aire atrapado en el suelo durante la subida de los niveles del agua y/o de los gases liberados por la degradación biológica de hidrocarburos o materiales orgánicos naturales.

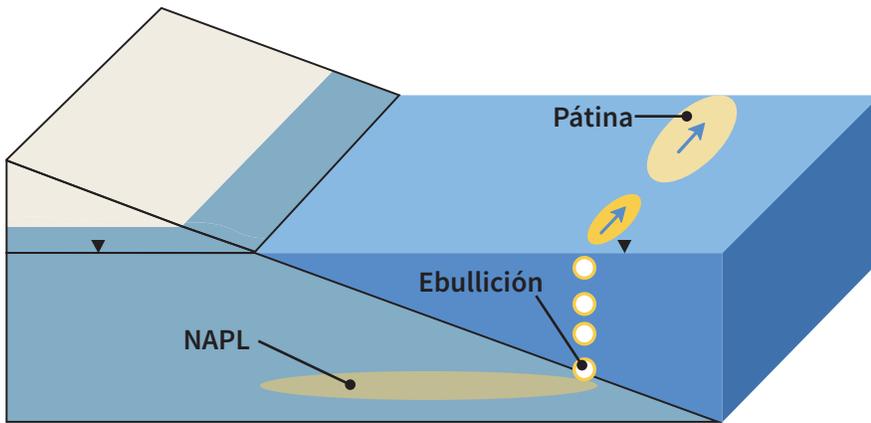
La emisión de burbujas de gas afectadas por LNAPL se conoce como “ebullición”. La ebullición se puede producir con el aumento de los niveles del agua, lo que conlleva que se compriman los gases atrapados hasta un punto en el que son lo suficientemente pequeños como para liberarse del suelo. A menudo, la emisión de una burbuja lleva a la fusión de varias burbujas y a vertidos esporádicos. La ebullición en sedimentos de río también se puede producir cuando los sedimentos se ven afectados por el tráfico marítimo u otros procesos.

**Erosión:** otro de los mecanismos que genera las pátinas es la erosión de los suelos. La erosión se puede producir con flujos elevados a lo largo de los ríos, debido a la acción de las olas por las tormentas y/o la socavación del hielo.

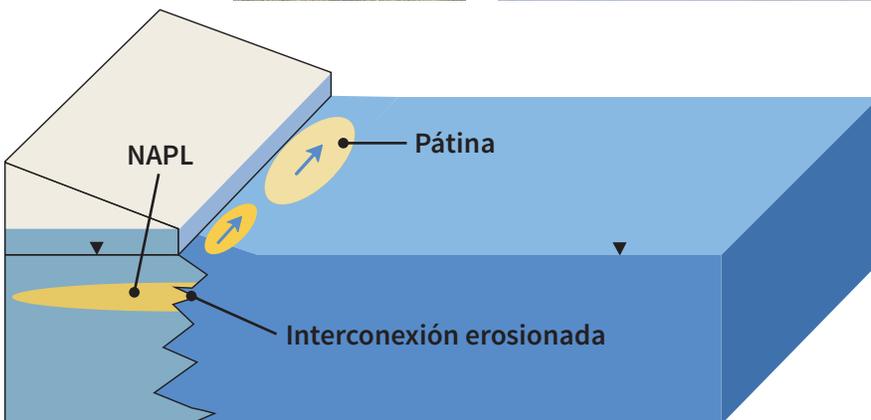
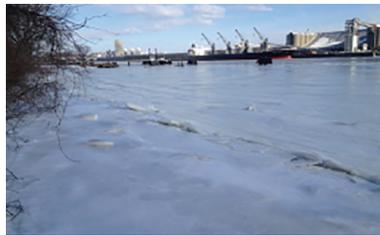




Fotografía de HartCrowser, EPA Superfund Project McCormick and Baxter



Fotografía de Julio Zimbron



## INVESTIGACIÓN ACTUAL

A lo largo de la última década (2006-2016), las empresas petrolíferas han invertido anualmente decenas de millones de dólares en la investigación relativa a los LNAPL. El valor de esta inversión se refleja en el hecho de que casi el 80 por ciento de los conocimientos mencionados en esta segunda edición se publicaron después de la primera edición de 2003. Asimismo, casi la mitad de los conocimientos de estas Preguntas frecuentes se publicaron en los cinco últimos años. Sorprendentemente, hemos recorrido un largo camino con respecto a las mejores prácticas para los LNAPL, y basándonos en las inversiones continuas, parece que nuestro viaje está lejos de haber terminado. A continuación se indica una muestra de los temas de investigación actuales de los LNAPL.

### **¿Se pueden mejorar los niveles de agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen**

El trabajo hasta la fecha sugiere que la temperatura y el agotamiento de los productos derivados reactivos del agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen son dos factores importantes para controlar las tasas de agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen. La calefacción modesta y la ventilación pasiva se están evaluando actualmente como herramienta para mejorar las tasas de agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen mediante estudios de laboratorio y de campo.

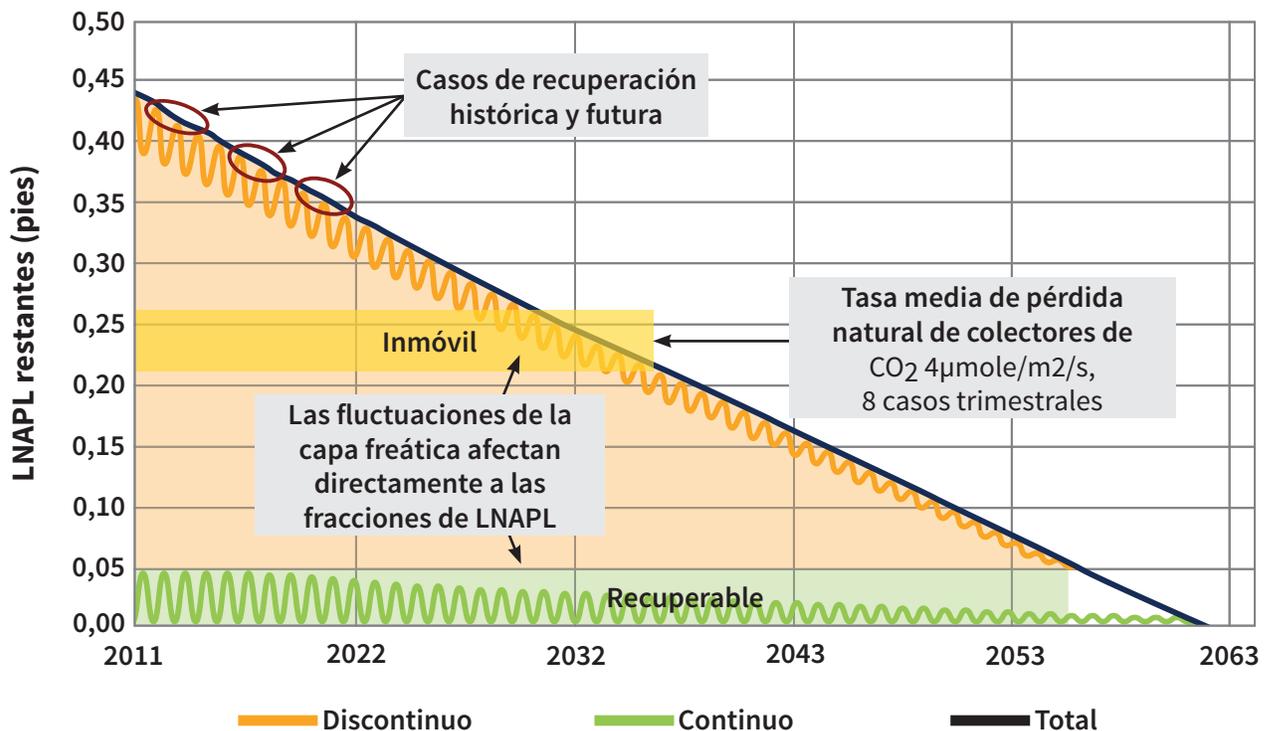
De forma más detallada, las obras anteriores sobre bioventilación de Leeson y Hinchee (1995) en 178 emplazamientos demostraron que las tasas de eliminación medias eran de 11 000 galones por acre y año al principio de cada ensayo anual, y que disminuían hasta 3000 galones por acre y por año después de un año de bioventilación. Kirkman (2016) reconsideró recientemente dos emplazamientos que realizaban bioventilación a finales de los 90 y mediados de los 2000, y ambos lograron una degradación, bien por el soplado, bien por la extracción del aire bajo la superficie.

Las tasas de biodegradación máximas eran del orden de 11000 galones/acre/año en los dos emplazamientos. Uno de los emplazamientos utilizó el sistema de bioventilación durante tres años en los que las tasas medias, considerando unas tasas de degradación uniformes para este periodo, se aproximaron a entre 2500 y 5600 galones por acre y año. Se observó que el promedio de las concentraciones del suelo en la zona vadosa disminuyeron de un factor de 40 para las sustancias orgánicas del rango de diésel y de 4500 para el rango de gasolina. Se estimó que el 97 por ciento de los COV se habían degradado en lugar de extraerse. La idea es que se podrían emplear soluciones mejoradas de agotamiento natural de LNAPL dentro de su zona de origen en partes de los emplazamientos de LNAPL con la mayor longevidad.



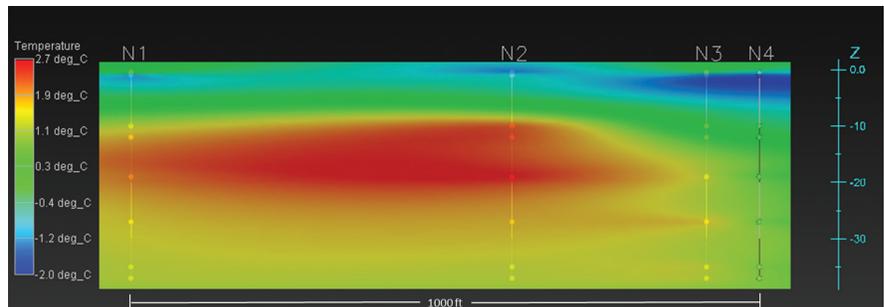
## ¿Durante cuánto tiempo persistirán los efectos de los LNAPL y los relacionados con los LNAPL en las aguas subterráneas?

Necesitamos mejores herramientas que puedan resolver la longevidad de los LNAPL y las aguas subterráneas afectadas asociadas en función de las condiciones del emplazamiento y las estrategias de gestión del mismo. Los datos esenciales son las estimaciones de los LNAPL restantes, las tasas de pérdida natural a lo largo del tiempo y los procesos que controlan la calidad de las aguas subterráneas en los emplazamientos de fase tardía. Basándonos en la analogía del aterrizaje de un avión, los modelos de longevidad se conocen como “modelos de vía de planeo”. Se están realizando estudios de laboratorio y de campo para crear y probar modelos de vía de planeo que traten la longevidad de los LNAPL y del impacto relativo a los LNAPL en las aguas subterráneas.

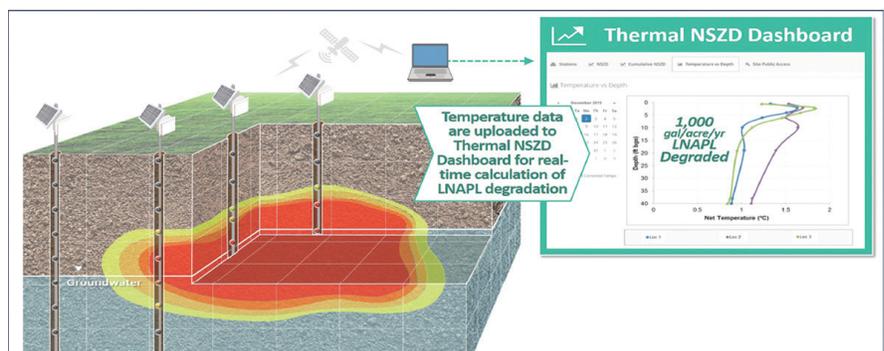


## ¿Se puede usar la temperatura para controlar los emplazamientos de LNAPL?

Las últimas investigaciones han demostrado que las temperaturas de las aguas subterráneas y el suelo son elevadas dentro y por encima de la zona de LNAPL debido al calor de la reacción asociado a los procesos de agotamiento de las zonas de fuentes naturales (Stockwell, 2015 y Warren y Bekins, 2015). Una visión nueva es que la supervisión de la temperatura automatizada en tres dimensiones (3D) se puede usar para ofrecer una supervisión en tiempo real de la extensión de los LNAPL y sus tasas de pérdida. Se están realizando demostraciones de campo.



Créditos: Emily Stockwell



Créditos: GSI Environmental, Inc. y Colorado State University

## ¿Existen alternativas viables al dragado de sedimentos afectados por los hidrocarburos?

Numerosas instalaciones petrolíferas están situadas cerca del agua superficial. Históricamente, el dragado se ha utilizado como una presunta solución. Actualmente, numerosos investigadores consideran que el dragado es menos sostenible que otras opciones desde el punto de vista de la subsanación ecológica y sostenible (GSR, por sus siglas en inglés). Localmente, algunas instalaciones tienen medios afectados por LNAPL en las interconexiones de las aguas subterráneas/agua de la superficie (GSI). Las soluciones comunes para los hidrocarburos de petróleo en las GSI incluyen el taponado y la contención. Desafortunadamente, el taponado y/o la contención pueden limitar la atención natural con medios aeróbicos de los hidrocarburos de petróleo. Basándonos en la importancia potencial de la atención natural de los medios aeróbicos en las GSI, se están realizando investigaciones para desarrollar barreras reactivas aeróbicas que se puedan colocar en las GSI. También se están estudiando modificaciones del carbono in situ para reducir la biodisponibilidad de los compuestos de petróleo en los sedimentos. Las demostraciones de laboratorio y de campo están conllevando aplicaciones a escala completa por los primeros adoptadores.

## OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN



### Consejo Interestatal Regulatorio y de Tecnología

[www.itrcweb.org/](http://www.itrcweb.org/)

El Consejo Interestatal Regulatorio y de Tecnología es una asociación estatal público-privada que trabaja para fomentar la aplicación de tecnologías innovadoras que “reducen los costes de cumplimiento de la normativa y aumentan la eficacia de la subsanación”. Un documento clave de ITRC sobre los LNAPL es ***Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Site Management: LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies (Gestión de emplazamientos de líquidos ligeros en fase no acuosa: evolución de LCSM, proceso de adopción de decisiones y tecnologías de subsanación)***. Visite el sitio web de ITRC para acceder a materiales de presentación y formación en Internet grabados en sesiones de formación en aulas.



### American Petroleum Institute

[www.api.org/LNAPL](http://www.api.org/LNAPL)

El Centro de recursos de líquidos ligeros en fase no acuosa (LNAPL) de API ofrece acceso a herramientas, modelos e informes producidos por API, incluido el ***Manual de transmisibilidad de LNAPL de API, modelo de LDRM y evaluación de la eliminación de hidrocarburos de las zonas de origen y su efecto en la concentración y la longevidad de plumas disueltas.***



## Applied NAPL Science Review

[www.h2altd.com/ansr](http://www.h2altd.com/ansr)

**Applied NAPL Science Review (ANSR)** es una publicación en línea con artículos breves y centrados en una amplia gama de temas relacionados con los LNAPL, incluido el desarrollo de modelos conceptuales, la transmisibilidad de los LNAPL y el agotamiento natural dentro de las zonas de origen.



## Shell/Lorax AIS

[www.lorax.biz/AIS](http://www.lorax.biz/AIS)

El **Shell/Lorax Animated Information System** es una colección descargable de animaciones interactivas que ofrece una visión básica y conceptual de la migración de contaminantes, la evaluación de emplazamientos y la subsanación.

# CL:AIRE

## CL:AIRE

[www.claire.co.uk/](http://www.claire.co.uk/)

**An Illustrated Handbook of LNAPL Transport and Fate in the Subsurface** de CL:AIRE es una completa guía sobre el comportamiento de los LNAPL bajo la superficie, la evaluación de emplazamientos y la subsanación.

## REFERENCIAS

Amos, R.T., K.U. Mayer, B.A. Bekins, G.N. Delin y R.L. Williams (2005). Use of dissolved and vapor-phase gases to investigate methanogenic degradation of petroleum hydrocarbon contamination in the subsurface. *Water Resources Research* 41, n.º 2: W02001.

Amos, R. T. y K. U. Mayer (2006). Investigating ebullition in a sand column using dissolved gas analysis and reactive transport modelling, *Environmental Science & Technology*, 40:5361-5367.

American Petroleum Institute (2004). API Interactive LNAPL Guide Version 2.0.4. API Regulatory and Scientific Affairs Department.

American Petroleum Institute (2012). User Guide for the API LNAPL Transmissivity Workbook: A Tool for Baildown Test Analysis. API Publication 46xx (borrador previo a la publicación) API Regulatory and Scientific Affairs Department.

American Petroleum Institute, (2017) Quantification of Vapor Phase-Related NSZD Processes. API Publication 4784, API Regulatory and Scientific Affairs Department.

ASTM (2013) Standard Guide for Estimation of LNAPL Transmissivity. E2856 – 13. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Chalfant, M. (2015). Oleophilic Bio Barriers (OBBs) for Control of Hydrocarbon Sheens at Groundwater-Surface Water Interconexiones. MS Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Charbeneau, R.J. (2007), LNAPL Distribution and Recovery Model (LDRM). Volume 1: Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media, API Publication 4760, American Petroleum Institute, enero.

CL:AIRE (2014) An Illustrated Handbook of LNAPL Transport and Fate in the Subsurface. Published by Contaminated Land: Applications in Real Environments. London WC1B 3QJL.

Emerson, E. (2016). Biotic Control of LNAPL Longevity—Laboratory and Field-Scale Studies. MS Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.

EPA (2015) Technical Guide For Addressing Petroleum Vapor Intrusion At Leaking Underground Storage Tank Sites. 510-R-15-001. U.S. Environmental Protection Agency Office of Underground Storage Tanks Washington, D.C. Junio de 2015.

Etkin, D.S. (2009). Analysis of U.S. Oil Spillage. Publication 356. Regulatory and Scientific Affairs, American Petroleum Institute, Washington, D.C.

Farr, A.M., R.J. Houghtilan y D.B. McWhorter (1990), Volume Estimation of Light Nonaqueous Phase Liquids in Porous Media, *Groundwater*, Vol. 28, n.º 1, enero-febrero, pp. 48-56.

Hartig, John (2010). Burning Rivers—Revival of Four Urban Industrial Rivers that Caught Fire, Multiple-Science Publishing Co. Ltd., Essex, United Kingdom.

Hawkins, Allison (2012). Processes controlling the behavior of LNAPLs at groundwater surface water interconexiones, MS Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Hawthorne, J.M. (2011). Diagnostic Gauge Plots—Simple Yet Powerful Tools. *Applied NAPL Science Review (ANSR)* Vol 1, Issue 2 - Febrero de 2011

Hawthorne, J.M., C.D. Stone, D. Helsel (2013) LNAPL Body Stability Part 2: Daughter Plume Stability via Spatial Moments Analysis. *Applied NAPL Science Review (ANSR)* Vol 3, Issue 5 – Septiembre de 2013.

Amos, R.T., K.U. Mayer, B.A. Bekins, G.N. Delin y R.L. Williams (2005). Use of dissolved and vapor-phase gases to investigate methanogenic degradation of petroleum hydrocarbon contamination in the subsurface. *Water Resources Research* 41, n.º 2: W02001.

Huntley, D. (2000). Analytic Determination of Hydrocarbon Transmissivity from Buildup Tests. *Ground Water* 38, n.º 1 (2000): 46–52. doi:10.1111/j.1745-6584.2000.tb00201.x.

Huntley, D., and G.D. Beckett, (2002), Evaluating Hydrocarbon Removal from Source Zones and its Effect on Dissolved Plume Longevity and Concentration, American Petroleum Institute, API. Publication 4715, Septiembre.

Irianni Renno, M., Akhbari, D., Olson, M.R., Byrne, A.P., Lefèvre, E., Zimbron, J., Lyverse, M., Sale, T.C. y S.K. De Long (2016). Comparison of bacterial and archaeal communities in depth-resolved zones in an LNAPL body. *Applied Microbiology and Biotechnology*, DOI 10.1007/s00253-015-7106-z.

ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council) (2009a) Evaluating LNAPL remedial technologies for achieving project goals. LNAPL-1033 2. Interstate Technology & Regulatory Council, LNAPLs Team, Washington, D.C. www.itrcweb.org.

ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council) (2009b) Evaluating natural source zone depletion at sites with LNAPL. LNAPL-1. Interstate Technology & Regulatory Council, LNAPLs Team, Washington, D.C. www.itrcweb.org.

Johnson, P., P. Lundegard y Z. Liu (2006). Source zone natural attenuation at petroleum hydrocarbon spill sites—I: Site-specific assessment approach. *Ground Water Monitoring & Remediation* 26, n.º 4: 82-92.

Kirkman, Andrew J. (2013). Refinement of Bouwer-Rice Buildup Test Analysis. *Groundwater Monitoring & Remediation* 33, n.º 1: 105–10. doi:10.1111/j.1745-6592.2012.01411.x.

Leeson, A. y Hincee, R.E., (1995). Principles and Practices of Bioventing, Volume I: Bioventing Principles and Volume II: Bioventing Design. US EPA documents EPA/540/R-95/534a and EPA/540/R-95/534b; US Air Force document AL/EQ-TR-1995-0037.

Leeson, Andrea and Robert Hincee (1997) Soil Bioventing Principles and Practice, CRC Press LLC, Boca Raton, FL.

Lenhard, R.J. y J.C. Parker (1990). Estimation of free hydrocarbon volume from fluid levels in monitoring wells. *Ground Water*, 28 (1), pp. 57-67.

Lundegard, P.D. y P.C. Johnson (2006). Source Zone Natural Attenuation at Petroleum Spill Sites—II Application to a Former Oil Field. *Groundwater Monitoring & Remediation*. 26, Issue 4: 93-106.

McHugh, T.E., L.M. Beckley, C.Y. Liu y C.J. Newell. (2011). Factors influencing variability in groundwater monitoring data sets. *Groundwater Monitoring & Remediation* 31, n.º 2: 92–101.

Mahler, N., T. Sale y M. Lyverse (2012a). A Mass Balance Approach to Resolving LNAPL Stability. *Journal of Ground Water*, Vol 50, n.º 6, pp 861-871.

Mahler, N., T. Sale, T. Smith y M. Lyverse (2012b). Use of Single-Well Tracer Dilution Tests to Evaluate LNAPL Flux at Seven Field Sites, *Journal of Ground Water*, Vol. 50, n.º 6, pp 851-860.

McCoy, K., Zimbron, J., Sale, T. y Lyverse, M. (2015). Measurement of Natural Losses of LNAPL Using CO<sub>2</sub> Traps. *Groundwater*, 53: 658–667. doi:10.1111/gwat.12240.

National Research Council. (2013). Alternatives for managing the nation's complex contaminated groundwater sites, The National Academies Press, Washington, D.C.

Ortega-Calvo, J.J. y M. Alexander (1994). Roles of bacterial attachment and spontaneous partitioning in the biodegradation of naphthalene initially present in nonaqueous-phase liquids. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Julio de 1994 vol. 60 n.º 7 2643-2646

Sale, T. (2001). Methods for Determining Inputs to Environmental Petroleum Hydrocarbon Mobility and Recovery Models, American Petroleum Institute Publication No. 4711.

Sale, T. y McWhorter, D.B., (2001), Steady-State Mass Transfer from Single Component DNAPLs in Uniform Flow Fields, *Water Resources Research*, Vol. 37, n.º 2, pp. 393-404, febrero.

Sihota, N.J., O. Singurindy y K.U. Mayer (2011). CO<sub>2</sub>-efflux measurements for evaluating source zone natural attenuation rates in a petroleum hydrocarbon contaminated aquifer. *Environmental Science and Technology* 45, n.º 2: 482-488.

Sihota, N.J. y K.U. Mayer (2012). Characterizing vadose zone hydrocarbon biodegradation using CO<sub>2</sub>-effluxes, isotopes, and reactive transport modeling. *Vadose Zone Journal* 11. DOI:10.2136/vzj2011.0204

Skinner, A.M. (2013) LNAPL Longevity as a Function of Remedial Actions: Tools for Evaluating LNAPL Remedies. MS Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Stockwell, E. (2015). Continuous NAPL Loss Rates Using Subsurface Temperatures. MS Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Tracy, M. (2015). Method Comparison for Analysis of LNAPL Natural Source Zone Depletion Using CO<sub>2</sub> Fluxes. MS Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Warren, E. y Bekins, B.A., (2015). Relating subsurface temperature changes to microbial activity at a crude oil-contaminated site: *Journal of Contaminant Hydrology*, doi:10.1016/j.jconhyd.2015.09.007.

Wilson, J.L., S. H. Conrad, W.R. Mason, W. Peplinski y E. Hafgan (1990), Laboratory Investigations of Residual Liquid Organics from Spills, Leaks, and the Disposal of Hazardous Wastes in Groundwater. EPA/600/6-90/004. Abril.

Wiedemeier, T.H., H.S. Rifai, C.J. Newell y J.T. Wilson (1999). Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface, John Wiley and Sons, Inc.

Zeman, Natalie Rae (2012). Thermally Enhanced Bioremediation of LNAPL. MS Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Zeman NR, Renno MI, Olson MR, Wilson LP, Sale TC, De Long SK 1128 (2014) Temperature impacts on anaerobic biotransformation of 1129 LNAPL and concurrent shifts in microbial community structure. *1130 Biodegradation* 25(4):569–85. doi:10.1007/s10532-014-9682-5.

Zimbron, J., T. Sale y M. Lyverse (2014). Gas Flux Measurement Using Traps, U.S. Patent 8,714,034.





American Petroleum Institute  
Regulatory and Scientific Affairs  
1220 L Street, NW  
Washington, DC 20005  
EE. UU.

[www.API.org](http://www.API.org)

Copyright 2018 – American Petroleum Institute, reservados todos los derechos. API y el logotipo de API son marcas comerciales o marcas registradas de API en Estados Unidos u otros países. Microsoft y Excel son marcas comerciales o marcas registradas de Microsoft Corporation. ITRC, Interstate Technology Regulatory Council y el logotipo de ITRC son marcas comerciales o marcas registradas del Consejo Interestatal Regulatorio y de Tecnología. ANSR, Applied NAPL Science Review y el logotipo de ANSR son marcas comerciales o marcas registradas de H<sub>2</sub>A Environmental, LTD. Shell y el logotipo de Shell son marcas comerciales o marcas registradas de Royal Dutch Shell. CL:AIRE y el logotipo de CL:AIRE son marcas comerciales o marcas registradas de CL:AIRE.