

CRITERIOS Y TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN EN SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

CRITERIA AND REMEDIATION TECHNOLOGIES IN HYDROCARBON CONTAMINATED SOILS

*Carmen Infante**

RESUMEN

El comportamiento de un derrame de petróleo varía, dependiendo de si impacta en aguas o suelos en los cuales la textura es un factor determinante. En suelos arcillosos, los hidrocarburos son adsorbidos por sus partículas constituyentes y por tanto, penetran menos que en sistemas arenosos, y ello dificulta la aplicación de tecnologías de remediación. En áreas arenosas, como las de las sabanas y las regiones costeras venezolanas, la remediación puede ser más fácil de aplicar; sin embargo, el volumen de suelo contaminado es considerablemente mayor a la correspondiente de las matrices arcillosas. Los criterios de remediación en Venezuela, Colombia, Argentina y Ecuador, se basan en el contenido de aceites y grasas en los suelos, mientras en Perú y México se sustentan en “las fracciones más tóxicas y biodisponibles” (C5-C10, C>10-C28, C>28-C40). La selección de la mejor tecnología de remediación y su aplicación correcta depende, en gran medida, del tipo de suelo. En Venezuela se requiere de una revisión basada en la toxicidad y biodisponibilidad para ajustar los criterios de remediación.

ABSTRACT

The behavior of an oil spill varies, depending on whether it impacts water or soil where texture is a determining factor. In clay soils, hydrocarbons penetrate less than sandy systems, because they are adsorbed by their constituent particles, making it difficult to apply remediation technologies. In sandy areas, such as savannahs and Venezuelan coastal regions, remediation may be easier to apply; however, the volume of contaminated soil is considerably higher than that of clay soils. The remediation criteria in Venezuela, Colombia, Argentina and Ecuador are based on the content of oils and fats in soils, while in Peru and Mexico they are based on “the most toxic and bioavailable fractions” (C5-C10, C>10-C28, C>28-C40). The selection of the best remediation technology and its correct application depends to a large extent on the type of soil. In Venezuela, a review based on toxicity and bioavailability is required to adjust the remediation criteria.

Palabras clave: Tecnologías de remediación, derrames de hidrocarburos, textura suelos, toxicidad, criterios de limpieza.

Keywords: Remediation technologies, oil spill, soil texture, toxicity, remediation criteria.

1. Introducción

La industria petrolera genera volúmenes importantes de desechos petrolizados, entre los cuales los suelos y sedimentos contaminados por derrames de hidrocarburos producto de ruptura en los oleoductos y tanqueros en mar representan un gran problema ambiental, particularmente cuando ocurren en ecosistemas sensibles o de difícil acceso o en áreas críticas cercanas a acuíferos.

Inmediatamente después de la ocurrencia de un derrame de hidrocarburo se activa el plan de contingencia acorde al grado de emergencia, y cuanto más rápido y coordinado sea su activación, más efectiva será la recuperación o recolección del crudo derramado y, por ende, la remediación y posterior rehabilitación del ecosistema. El remanente de hidrocarburo que queda en el suelo, las playas, las costa, las riberas de un río, o los sedimentos, y que no puede ser recuperado o recolectado,

* Consultor/Instructor Internacional en remediación de suelos. Postgrado Geoquímica. U.C.V. e-mail carmeninfante66@gmail.com

debe ser tratado con alguna tecnología de remediación con el objetivo de asegurar el cumplimiento de los criterios de limpieza o estándares de calidad que dicte la normativa ambiental del país.

Cada vez hay más necesidad de conocer el nicho de aplicación de las diferentes tecnologías para los desechos con hidrocarburos (los que contienen hidrocarburos y metales o metales solamente no son descritos en este trabajo), los criterios de limpieza o remediación, su aplicabilidad en diferentes crudos, y cómo se ubica en Venezuela con respecto a otros países. Para comprender este tema se abordan los siguientes puntos.

2. Toxicidad y comportamiento del hidrocarburo en agua y suelos

La toxicidad de un hidrocarburo es el resultado de una interacción compleja y variable entre las características propias del crudo y del suelo o medio donde se encuentre. Si bien es cierto que los crudos con mayor contenido de aromáticos o de mayor gravedad API resultan más tóxicos [1,2] también es claro que la interacción con el sustrato y sus componentes conlleva a cambios en la toxicidad. Es por ello que la toxicidad de los compuestos individuales no es equivalente, en la mayoría de los casos, a la misma toxicidad de la mezcla de sus componentes. En los crudos pesados y extrapesados, así como en crudos intemperizados (derrames viejos donde factores de fotoxidación, volatilización y biodegradación entre otros han actuado a lo largo del tiempo, **Figura 1**), la toxicidad medida con diferentes bioensayos de la cadena trófica resulta baja o nula [3]. No obstante, existen efectos físicos sobre las propiedades del suelo [4], como disminución de la capacidad de campo e incremento de la repelencia al agua, que merman la fertilidad [5] y, por ende, la rehabilitación del suelo. Las características o tipo de suelo afectan significativamente la toxicidad. Aquellos suelos o sedimentos con mayor capacidad de intercambio de materia orgánica o con mayor contenido de arcilla exhiben mayor adsorción de hidrocarburo, por lo que tendrán menor efecto tóxico sobre el ecosistema [6]. Los suelos con mayor contenido de materia orgánica y de textura arcillosa pueden adsorber los hidrocarburos, reduciendo su solubilidad y presión de vapor efectiva, debido al reparto entre las fases lipofílicas, disminuyendo la biodisponibilidad y movilidad del hidrocarburo, lo cual se traduce en una menor toxicidad [3]. En suelos de textura arenosa, los hidrocarburos no son fácilmente retenidos, aun en presencia de materia orgánica, por lo que el efecto tóxico es más marcado [7].

En el agua, el proceso o ruta determinante del crudo es la dispersión, lo cual es en sí mismo mayor en agua que en suelo o sedimento. Este comportamiento explica por qué existen



Figura 1. A) y B) Derrames de crudo intemperizado en sabanas orientales de Venezuela.

abundantes legislaciones sobre los planes de contingencia contra derrames en mar y grandes ríos a diferencia de derrames en tierra, donde el terreno impide su dispersión. En un derrame de hidrocarburo en tierra ocurren diversos procesos físicos, químicos y biológicos que están relacionados con las características del suelo y las del hidrocarburo. Uno de los procesos es la volatilización de las fracciones más livianas: aquellos crudos con mayor gravedad API tienen una mayor tasa de volatilización.

En suelos, en condiciones no saturadas, en un estudio de volatilización de 15 tipos de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HPA) se registró volatilización de solo dos hidrocarburos: un 30 % para naftaleno y un 20 % para 1-metilnaftaleno. En el caso de los compuestos restantes la volatilización fue insignificante [8]. Este proceso de volatilización en agua puede ser más significativo que en suelos, dado la mayor superficie de exposición a la atmósfera por la dispersión del hidrocarburo, particularmente con crudos livianos y medianos.

Los crudos más pesados y extrapesados se infiltran menos en un suelo o sedimento y pueden quedar retenidos en la

parte superior del suelo o costas de playas actuando como un impedimento físico para el desarrollo de la vida vegetal y animal. En el caso del mar, el crudo pesado derramado se hundirá formando una mezcla crudo-sedimento. Por el contrario, crudos más livianos, de alta gravedad API, flotarán en el agua, mientras que en los suelos y sedimentos se infiltran rápidamente, en particular en aquellos de textura arenosa, donde hay poca o casi nula la retención del hidrocarburo en las partículas del suelo [9].

3. Tecnologías de remediación

Las tecnologías para el tratamiento de suelos, sedimentos y desechos sólidos que contienen hidrocarburos son diversas y varían desde las fisicoquímicas hasta las biológicas, siendo el objetivo principal el de cumplir con los criterios de limpieza o exigencias de la normativa ambiental en el país donde se generen, lo cual en teoría significa que el suelo o desecho está “remediado o limpio al nivel aceptable”. La selección de la tecnología depende de varios factores, entre ellos, conocer si es viable técnicamente, si se puede aplicar *in situ* o si el material contaminado debe ser transportado a un centro de manejo para su tratamiento *ex situ*, si se generan corrientes residuales durante su aplicación, el volumen a tratar y el tipo de ecosistema. Para ello hay que elaborar una matriz de variables técnicas, ambientales y económicas, con criterio de expertos que permitan definir la mejor opción tecnológica [10].

Las condiciones ambientales y los factores bióticos en un ecosistema ocasionan que las propiedades del crudo cambien después de un derrame y pasen a crudos intemperizados o meteorizados, cuando han pasado muchos años (más de 10 aproximadamente), lo cual conlleva a aplicar técnicas de remediación diferentes a cuando el crudo está recién derramado. En el caso de crudos intemperizados y en determinadas situaciones hay que aplicar técnicas combinadas como acondicionamiento orgánico y biorremediación, tal como se realizó en suelos con hidrocarburos altamente intemperizado de derrames de más de 40 años de antigüedad, en el estado Zulia, Parque Nacional La Solita [11].

Existe una innumerable lista de tecnologías de remediación; sin embargo, entre las más usadas, catalogadas como las mejores, disponibles a nivel mundial (en inglés Best Demonstrated Available Technology, BDTA) para suelos/sedimentos contaminados con hidrocarburos y registradas en el Acta de Recuperación y Conservación de Recursos (RCRA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos [10] se encuentran:

a. Desorción térmica. Consiste en colocar el material contaminado en unidades fijas o portátiles que consisten en alimentación a un equipo secador, separación de compuestos orgánicos volátiles y agua, condensación y recuperación de

compuestos y separación de residuos sólidos remanentes. Se aplica un proceso no oxidativo que utiliza calor (alta y baja temperatura, dependiendo del contaminante) para desorber/volatilizar los hidrocarburos de la matriz sólida. Al final se obtienen tres fases: sólidos limpios “sin hidrocarburos”, agua condensada (efluentes) y aceite, que requieren disposición final, previa caracterización fisicoquímica y biológica. Una de las desventajas de esta tecnología es su consumo energético y el daño a las propiedades del suelo; sin embargo, es muy eficiente para grandes volúmenes de suelos y sedimentos arenosos contaminados con hidrocarburos medianos y livianos.

b. Incineración. Se refiere al tratamiento térmico que utiliza altas temperaturas (730-1200 °C) para oxidar el hidrocarburo, mediante un proceso de combustión, donde los compuestos orgánicos son transformados en CO₂, H₂O y cenizas. Para aplicar esta tecnología se requiere un estricto control y monitoreo de emisiones atmosféricas; las cenizas o material resultante de la combustión deben ser analizadas para determinar el contenido de metales pesados y, de ser necesario, estabilizarlos antes de ser colocados en un relleno de seguridad. La incineración ha sido favorecida mundialmente sobre otras opciones por la alta eficiencia demostrada en la destrucción de compuestos orgánicos y la minimización del volumen del residuo que requiere de la disposición posterior. No obstante, hoy en día se reconoce que no es una de las mejores tecnologías desde el punto de vista ambiental por su consumo energético, el tratamiento de los residuos y sus altos costos.

c. Lavado y/o extracción con solvente. Es un método químico en el cual el sólido contaminado, suelo o sedimento, se mezcla con una solución lixivadora (surfactante, biosurfactantes, microemulsiones y solventes naturales) en un reactor para remover compuestos orgánicos. La corriente líquida debe ser luego tratada para remover y recuperar el hidrocarburo. También es usado el lavado con agua a baja o alta presión a temperatura ambiente o en caliente, en tratamientos *in situ* en costas de playas y ríos, acompañadas con barreras que retienen el hidrocarburo para su posterior recolección.

d. Biorremediación. Esta tecnología nace en la década de los años 60, donde ya se empleaba el término biodegradación de hidrocarburos, dada la cantidad de información sobre las capacidades de una gran diversidad de microorganismos para usar los hidrocarburos como fuente de carbono. El término biorremediación se refiere específicamente a la limpieza de suelos/sedimentos contaminados, acuñado en la década de 1980, por el gran auge y desarrollo de la técnica, a consecuencia del derrame de crudo por el tanquero Exxon Valdez, en las costas de Alaska en 1989 [12]. Se refiere a la transformación parcial o completa (proceso de mineralización) de la estructura molecular de componentes del hidrocarburo llevado a cabo por

diversos microorganismos, como bacterias, hongos y levaduras [13] y se puede aplicar *in situ* (en el mismo lugar donde está el contaminante, sin necesidad de extraerlo) o *ex situ*.

El proceso de biodegradación de hidrocarburos es 99 % aeróbico, por lo que se requiere: *i*) aireación en la aplicación de la tecnología, *ii*) nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, *iii*) humedad adecuada, *iv*) control del pH, y *v*) uno de los factores más importante en un suelo o sedimento es la estructura que se logra con el uso de acondicionadores o agentes estructurantes [14]. Es por eso que, tanto en un suelo arcilloso o arenoso hay que mejorar la estructura para que ocurra la biorremediación eficientemente, ya que dependiendo de la textura y de la estructura de un suelo, la tasa de biorremediación será diferente [15, 16].

Otros aspectos importantes a considerar en esta tecnología, son la bioestimulación (no se adicionan microorganismos, solo se estimulan los presentes o autóctonos en el suelo) y la bioaumentación (adición de consorcios microbianos de bacterias y hongos). En Venezuela y a nivel internacional a escala de campo, se usa la bioestimulación para suelos contaminados por derrames de hidrocarburos, sea que se remedien *in situ* o *ex situ*, ya que no existen resultados exitosos con el uso de preparaciones biológicas o inóculos (bioaumentación) a nivel de campo o escala industrial. Por el contrario, solo a nivel de laboratorio ha funcionado la bioaumentación. Este último ha sido exitoso con el uso de reactores de gran escala y con compuestos orgánicos específicos (por ejemplo, benceno y tolueno). Las razones del por qué no son eficientes a nivel de campo han sido discutidas ampliamente por muchos autores [4, 14, 17, 18].

Dado que la biodegradación es un proceso aeróbico, la tecnología se puede aplicar bajo diferentes modalidades según cómo se airee y se use el terreno donde se aplica. El *landfarming* o biolabranza se realiza aireando con maquinaria agrícola de arado en los primeros 30 cm del suelo con el hidrocarburo, compostaje o “biopila dinámica”, que involucra apilar el suelo entre 40 cm y hasta 3 o 4 m de altura, con un largo y ancho que lo permita el diseño de las pilas según el volumen del suelo contaminado y donde la aireación es suministrada por volteo mecánico con retroexcavadora o una maquinaria afín. En la “biopila estática”, a diferencia de la biopila dinámica, se airea la pila con un compresor de aire suministrando el oxígeno necesario mediante tuberías con porosidades específicas.

Otra modalidad de la biorremediación, donde no se suministra aireación, es la fitorremediación, en la cual se emplean determinadas especies vegetales con las cuales ocurre la rizobiodegradación (que se refiere a la biodegradación a nivel de la rizosfera de las plantas). Los otros mecanismos de la fitorremediación, como la fitovolatilización y fitoextracción,

son poco exitosos con los hidrocarburos y atañen más bien a otros compuestos orgánicos y metales respectivamente. La fitorremediación se emplea más como pulimento, solo funciona a muy bajas concentraciones de hidrocarburos en el suelo y es muchísimo menos usada que en las otras modalidades sin plantas. Actúa más como rehabilitación de un suelo, control de erosión y restablecimiento de sus propiedades biológicas [14, 19].

4. Criterios de remediación

Los criterios de remediación o niveles permitidos varían según la normativa ambiental del país. En Venezuela [20], en el artículo 50 del Decreto 2635 se exige que la mezcla suelo/desecho debe contener menos del 1 % peso/peso en aceites y grasas o hidrocarburos totales de petróleo (10.000 mg/kg), independientemente del uso de la tierra; caso similar ocurre en Colombia y Argentina. En Ecuador, aunque están en función de los hidrocarburos totales, los valores del contenido son de 2500 mg/kg, 4000 mg/kg y 1000 mg/kg según uso del suelo, sea agrícola, industrial y ecosistema sensible, respectivamente [21]. En Perú y México, por el contrario, los valores están en función de las fracciones del hidrocarburos y no del total, empleándose la remediación para las fracciones más tóxicas como: F1= C5-C10, F2= C>10-C28 y, F3= C>28-C40 según el uso del suelo. Los valores del Perú son iguales a los empleados por México, donde la F1 es igual a 200 mg/kg para suelo agrícola y residencial, y 500 mg/kg para suelo industrial; la F2 es igual a 1200 mg/kg para agrícola y residencial, y 5000 mg/kg para industrial y, la fracción F3 es de 3000 mg/kg para suelos de uso agrícola y residencial, y 6000 mg/kg para industrial [22, 23]. En México, denominan a estos valores límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo y en Perú se definen como estándares de calidad ambiental para suelos contaminados [23].

No solo es variable la terminología empleada en los países de Latinoamérica, sino también las cantidades y tipos de componentes, como el total de hidrocarburo versus fracciones de hidrocarburos. Las preguntas que hay que atender en este sentido son: ¿Cuáles son los criterios que se deben usar? ¿Cuáles son los mejores y por qué? ¿Se deben tener valores diferentes para suelos y sedimentos? ¿Se deben tener valores por uso del suelo en Venezuela? ¿Se deben definir criterios de remediación diferentes en derrames de crudo frescos en suelos y en derrames de crudos intemperizados? ¿Cuáles son valores representativos de la limpieza del suelo o sedimento o sólo se debe reflejar el cumplimiento de una normativa sin conocer si hay toxicidad? Estas y muchas interrogantes surgen.

En Venezuela particularmente hay que reflexionar sobre la conveniencia o no de ajustar los niveles de hidrocarburos

por fracciones en un suelo: ¿continuar con el 1 % o se deben complementar con análisis de toxicidad? y ¿qué hacer con un derrame de crudo intemperizado donde difícilmente se puede cumplir con el 1 % peso/peso en aceites y grasas? Sin embargo, se cumplen los análisis de ecotoxicidad. Hoy en día se usa la metodología de Acciones Correctivas Basadas en el Análisis de Riesgo [24], para la gestión de áreas contaminadas a nivel mundial, que se enfoca explícitamente en la protección de la salud humana y el ambiente y permite calcular los niveles de riesgo de línea de base y/o los niveles de limpieza para suelos y recuperación de aguas subterráneas, lo cual es necesario explorar y evaluar factibilidad de aplicar en Venezuela.

5. Conclusiones

Existen diferentes tecnologías de remediación para suelos contaminados con hidrocarburos. La selección depende de una matriz de criterios técnicos, ambientales y económicos, siendo la biorremediación con bioestimulación una de las tecnologías más usada tanto en Venezuela como a nivel internacional.

Los criterios de limpieza de suelos/sedimentos contaminados con hidrocarburos varían en los diferentes países de Latinoamérica, no solo en las cantidades, sino también en los componentes o fracciones de hidrocarburos exigidos en las normativas. En Venezuela es indispensable una revisión sobre la necesidad de ajustar o no el valor actual del 1 % de aceites y grasas, tomando en consideración que dependiendo el tipo de crudo, las características del suelo y la intemperización de un crudo después de un derrame, se producen cambios en la toxicidad.

Referencias

- [1] Dorn, P.H. y Salanitro, J. Temporal ecological assessment of oil contaminated soils before and after bioremediation. *Chemosphere* **40**, 419-426 (2000).
- [2] Infante, C. y Morales, F. Evaluación de la toxicidad en desechos y suelos petrolizados empleando semillas de *Lactuca sativa* L. *Interciencia* **37** (10), 1-7 (2012).
- [3] Muhammad, A., Biswas, I., Smith, E., *et al.* Toxicity assessment of fresh and weathered petroleum hydrocarbons in contaminated soil. A review. *Chemosphere* **212**, 755-767 (2018). doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.094 (2018).
- [4] Infante, C., Morales, F., Ehrmann, U., *et al.* Hydrocarbon bioremediation and phytoremediation in tropical soils: Venezuelan study case. En *Trends in bioremediation and phytoremediation*. Series Chemosphere. (Ed.) Grazyn Plaza (Research Signpost, India, 2010), pp 429-451. ISBN. 978-81-308-04248.
- [5] Adams, R., Zavala-Cruz, J. y Morales, F. Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. II. Afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia* **33** (7), 483-489 (2008).
- [6] Dorn, P., Vipond, T., Salanitro, J. y Wisniewski, H. Assessment of the acute toxicity of crude oils in soils using earthworms, microtox®, and plants. *Chemosphere* **37** (4), 845-860 (1998).
- [7] Labud, V., García, C. y Hernández, T. Effect of hydrocarbon pollution on the microbial properties of a sandy and clay soil. *Chemosphere* **66** (10), 1863-1871 (2007).
- [8] Kap, S., Park, R. C., Sims, R., Ryan, D., *et al.* Fate of PAH compounds in two soil types: Influence of volatilization, abiotic loss and biological activity. *Environmental toxicology and chemistry* **9** (2), 187-195 (1990). doi: 10.1002/etc.5620090208.
- [9] Oudot, J., Ambles, A., Bourgeois, S., *et al.* Hydrocarbon infiltration and biodegradation in a landfarming experiment, *Environmental pollution* **59** (1), 17-40 (1989).
- [10] U.S. Environmental Protection Agency. Remediation technologies for cleaning up contaminated sites Disponible en <https://www.epa.gov/remedytech/remediation-technologies-cleaning-contaminated-sites> (2020).
- [11] Infante, C. Biorrestauración de áreas impactadas por crudo por medio de INTEBIOS® y BIORIZE®, *Interciencia* **26** (10), 504-507 (2001).
- [12] Bragg, J., Prince, R., Harner, E. y Atlas, R. Effectiveness of bioremediation for the Exxon Valdez oil spill. *Nature* **368**, 413-418 (1994). doi : 10.1038/368413a0.
- [13] Atlas, R. y Cerniglia, C. Bioremediation of petroleum pollutants. Diversity and environmental aspects of hydrocarbon biodegradation. *BioScience* **45** (5), 332-338 (1995).
- [14] Infante, C., Hernández-Valencia, I., López, L. y Toro, M. Phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soils in Venezuela. En *Phytotechnologies: Remediation of Environmental Contaminants*. (Eds.) N.A. Anjum, M.E. Pereira, I. Ahmad, A. C. Duarte, S. Umar y N. A. Khan. (CRC Press, Boca Raton, 2012), pp. 99-109.
- [15] Haghollahi, A., Hassan Fazelipour, M. y Schaffie, M. The effect of soil type on the bioremediation of petroleum contaminated soils. *Journal of Environmental Management* **180**, 197-201 (2016).
- [16] García, G., Infante, C., y López., L. Biodegradación de un crudo mediano en suelos de diferente textura con y sin agente estructurante. *Biagro* **24** (2), 93-102 (2012).
- [17] Infante, C., Romero, M., Arocha, A., *et al.* In situ bioremediation of pits from Puerto La Cruz refinery. Series: *Fifth International in Situ and On-Site Bioremediation Symposium Proceeding* (Eds.) Alleman, B.C. y Leeson, A.

(Battelle Press, USA, 1999) pp. 215-219.

[18] Lee, K., Trembay, G.H., Gauthier, J., Cobanli, S. y Griffin, M. Bioaugmentation and biostimulation. A paradox between laboratory and field results. *International Oil Spill Conference*, **1**, 697-705 (1997).

[19] Hernández-Valencia, I., Navas, G. e Infante, C. Fitorremediación de un suelo contaminados con petróleo extra pesado con *Megathyrus maximus*. *Rev. Int. Contam. Ambient.* **33** (4), 495-503 (2017).

[20] República de Venezuela, 1998. Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de desechos peligrosos. Decreto 2635, Gaceta N° 5245, Caracas (1998).

[21] Decreto 1215. Reglamento sustitutivo del reglamento ambiental para las operaciones hidrocarburíferas en el Ecuador (2001).

[22] NOM-053-SEMARNAT-1993: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Norma Oficial Mexicana que Establece el Procedimiento para Llevar a Cabo la Prueba de Extracción para Determinar los Constituyentes que Hacen a un Residuo Peligroso por su Toxicidad al Ambiente, 1-22 (1993).

[23] Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo, Perú (2017).

[24] Astm-e 1739-95(2015). Standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites (2015).