

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Ambiente y Sustentabilidad

Maestría en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

**Revisión crítica de la calidad de suelos remediados de la contaminación
con hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana**

Jeaneth Andrea Urvina Ulloa

Tutor: Orlando Manuel Felicita Nato

Quito, 2025



Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Jeaneth Andrea Urvina Ulloa, autora de la tesis intitulada “Revisión crítica de la calidad de suelos remediados de la contaminación con hidrocarburos en la Amazonía Ecuatoriana”, mediante el presente documento de constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que, en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

28 de enero de 2025

Firma: _____

Resumen

La contaminación de suelo con hidrocarburos es un problema que afecta a la salud humana, biodiversidad y calidad del suelo. A lo largo de la historia hidrocarburífera del Ecuador, se han registrado varios casos de derrames, destacando los pasivos ambientales situados en la Amazonía ecuatoriana, causados por empresas petroleras como Chevron-Texaco. Por esta razón, es importante llevar a cabo procesos de remediación eficaces que aseguren la ausencia de riesgo para la salud humana y restauración de ecosistemas. El objetivo de esta investigación fue discutir la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana y su evaluación de la calidad, empleando como metodología la revisión bibliográfica y análisis de la gestión de pasivos ambientales generados por la contaminación de suelo con hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana. Se identificó que Lago Agrio es el cantón con mayor cantidad de pasivos ambientales, con un total de 1239 fuentes de contaminación. Sin embargo, la provincia de Sucumbíos registra 578 pasivos ambientales remediados hasta el año 2022. A pesar de los esfuerzos de empresas privadas y públicas destinadas a la remediación de suelos en Ecuador, la Amazonía ecuatoriana aún cuenta con 2856 fuentes pendientes por remediar. La técnica de remediación empleada con mayor frecuencia en el sitio de estudio es la biorremediación, pero es necesario el análisis de riesgos, aplicación de herramientas actuales como mapas geoespaciales y diseño de procesos de remediación para cada fuente de contaminación para optimizar la remediación y lograr un enfoque sustentable. Actualmente, la normativa ambiental que rige al proceso de certificación de suelos remediados no evalúa en su totalidad la calidad del suelo, dejando de lado indicadores fisicoquímicos y biológicos que aseguren la calidad del suelo. Por lo tanto, se propone empezar con investigaciones relacionadas a indicadores de la calidad del suelo, que permitan definir límites permisibles de acuerdo con la realidad de los ecosistemas del Ecuador. Garantizar el derecho a una vida digna en la Amazonía ecuatoriana aún sigue siendo un reto para el país.

Palabras clave: suelo contaminado, hidrocarburos, pasivo ambiental, remediación sustentable, calidad del suelo.

Dedicado a mi madre, que siempre apoya mis sueños con su energía celestial.

Agradecimientos

A Dios y mi familia por su apoyo incondicional.

A todas las personas de mi pequeño círculo social, que siempre me motivan en momentos difíciles.

A mi tutor de tesis por su guía y recomendaciones para la elaboración de la tesis presentada.

Tabla de contenidos

Tablas y figuras	14
Abreviaturas.....	16
Introducción.....	18
Capítulo primero. Contaminación del suelo por actividades hidrocarburíferas y su remediación	24
1. El ecosistema suelo y sus servicios	24
2. Derrames de hidrocarburos a nivel mundial.....	25
3. Problemas socioambientales de la contaminación de suelos con hidrocarburos	27
4. Técnicas de remediación de suelo contaminado con hidrocarburos.....	27
5. Evaluación de la calidad de suelo remediado a nivel internacional	30
5.1 Normativa ambiental en Canadá.....	32
5.2 Normativa ambiental en Países Bajos	32
5.3 Normativa ambiental de Australia.....	33
6. Alternativas para una óptima evaluación de calidad de suelos remediados en Ecuador.....	33
6.1 Diseño de planes sustentables de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos	33
6.2 Toma eficiente de muestras	34
6.3 Mapeo representativo de pasivos ambientales	36
6.4 Estrategias de remediación sustentables de hidrocarburos.....	39
6.5 Inclusión de indicadores de calidad de suelo para el seguimiento de procesos de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.....	41
6.6 Evaluación de calidad de suelos remediados basado en nivel de riesgo para la salud humana y ambiente	45
7. Control de uso de suelo remediado certificado reincorporado al ambiente	48
7.1 Reparación integral.....	49
Capítulo segundo. Panorama de suelos contaminados con hidrocarburos y procesos de remediación en la Amazonía ecuatoriana.....	51
1. Actividad hidrocarburífera en Ecuador	51
2. Contaminación del suelo por derrames de hidrocarburos en Ecuador	53
3. Marco legal de Ecuador relacionado a daños ambientales y su restauración.....	54

4. Normativa para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador.....	55
5. Técnicas de remediación aplicadas en la Amazonía ecuatoriana.....	58
Capítulo tercero. Análisis de la gestión de pasivos ambientales por contaminación con hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana	61
1. Estadística gestión de pasivos ambientales en la Amazonía ecuatoriana.....	61
2. Impactos socioambientales de pasivos ambientales en Ecuador.....	67
3. Estudio de la eficiencia de uso de suelos certificados remediados.....	72
3.1. Estudio de caso de remediación en el derrame del sector de Santa Rosa de Quijos, Cantón El Chaco.	73
3.2. Propuesta inclusión de análisis fisicoquímicos y biológicos en la normativa ambiental vigente.....	74
Discusión	78
Conclusiones y recomendaciones.....	82
Obras citadas.....	84

Tablas y figuras

Tabla 1. Niveles de riesgo toxicológico humanos máximos permisibles para las fracciones de TPH Países Bajos	33
Tabla 2. Rangos óptimos de parámetros fisicoquímicos y biológicos para un proceso de biorremediación	44
Tabla 3. Parámetros biológicos y fisicoquímicos para dar seguimiento a los procesos de remediación	44
Tabla 4. Bioindicadores útiles para la evaluación de calidad de suelos en la Amazonía ecuatoriana.....	48
Tabla 5. Normativa legal vigente relacionado a la remediación de suelos en Ecuador .	54
Tabla 6. Criterios de remediación (Valores máximos permisibles)	56
Tabla 7. Pasivos remediados y pendientes por cantón de la Amazonía ecuatoriana.....	63
Tabla 8. Impactos de los derrames de crudo en la Amazonía ecuatoriana	70
Tabla 9. Restauración del suelo por niveles de detección ecológico de acuerdo con el Consejo Nacional de Protección Ambiental (NEPC), Australia	74
Tabla 10. Valores de referencia para la clasificación de la calidad de suelos de acuerdo con el contenido de los nutrientes N, K, Ca y Mg.....	76
Tabla 11. Bioindicadores ambientales para uso en suelo contaminados con hidrocarburos y sus métodos de referencia.....	76
Tabla 12. Rangos óptimos para procesos de biorremediación	77
Figura 1. Métodos de extracción y determinación analítica de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) validados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) EE. UU	31
Figura 2. Flujo de trabajo de evaluación de la contaminación: enfoques actuales y futuros.....	36
Figura 3. Imagen de clasificación del área de estudio. A) Imagen Landsat ETM+ B) Advanced land imager (ALI) C) Estudio de imagen hiperespectral (EO-1, Hyperion) .	37
Figura 4. Distribución espacial de concentraciones simuladas de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en los suelos que rodean los pozos petroleros en el área de estudio	38
Figura 5. Riesgo ecológico espacial de la contaminación del suelo por hidrocarburos totales de petróleo en el área de estudio	39

Figura 6. Ejemplificación del proceso remediación sustentable dentro de la gestión de sitios contaminados	40
Figura 7. Métodos químicos no exhaustivos comúnmente utilizados para detectar la biodisponibilidad de TPH en ambientes contaminados.....	43
Figura 8. Proceso para la autorización de desalojo y/o certificación de suelos remediados.....	58
Figura 9. Área de estudio pasivos ambientales en la Amazonía ecuatoriana	64
Figura 10. Pasivos ambientales en los cantones de la Amazonía ecuatoriana	64
Figura 11. Fuentes remediadas en los cantones de la Amazonía ecuatoriana	65
Figura 12. Fuentes pendientes de remediación en los cantones de la Amazonía ecuatoriana hasta el año 2022.....	65
Figura 13. Fuentes contaminadas con hidrocarburos remediadas en la Amazonía ecuatoriana en el periodo 2013-2022.....	66
Figura 14. Nivel de priorización socioambiental de fuentes de contaminación hidrocarburífera por remediar.....	67
Figura 15. Conservación, población y petróleo en la Amazonía ecuatoriana	68

Abreviaturas

AIHE	Asociación de la Industria Hidrocarburiífera del Ecuador
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
API	Instituto Estadounidense del Petróleo, siglas en inglés
ARCH	Agencia de Regulación y Control Hidrocarburiífero
ASTM	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, siglas en inglés
BDP	Barriles por día
DNCA-MAE	Dirección Nacional de Control Ambiental del Ministerio del Ambiente
EA	Agencia ambiental, siglas en inglés
EC50	Concentración efectiva media
ESL	Niveles de Detección Ecológica, siglas en inglés
EPA	Agencia de Protección Ambiental
EVOS	Derrame de petróleo del Exxon Valdez, siglas en inglés
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
HSL	Detección de Salud Humana, siglas en inglés
IARC	Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer, siglas en inglés
ISO	Organización Internacional de Normalización, siglas en inglés
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
MAATE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica
NEPC	Consejo Nacional de Protección Ambiental
NEPM	Medidas Nacionales de Protección Ambiental
OCP	Oleoducto de Crudos Pesados
pH	Potencial de Hidrógeno
PRAS	Programa de Reparación Ambiental y Social
PRI	Planes de Reparación Integral
RBCA	Acción Correctiva Basada en Riesgos
SIESAP	Subsistema De Inteligencia De Estadísticas Socio Ambientales De Las Actividades Productivas
SIG	Sistema de Información Geográfica
SOTE	Sistema de Oleoducto Transecuatoriano
SRC	Concentración de riesgo grave, siglas en inglés

TPH	Hidrocarburos Totales de Petróleo
TPHCWG	Grupo de Trabajo sobre Criterios de Hidrocarburos Totales de Petróleo, siglas en inglés

Introducción

El ecosistema suelo es un componente clave para la agricultura, purificación del agua y la atmósfera, ya que dentro de sus funciones está el ciclado de nutrientes, regulación hídrica y filtración de contaminantes (Duval et al. 2013; Trujillo-Gonzalez, Mahecha-Pulido, y Torres-Mora 2018). Se puede definir a la calidad del suelo como la capacidad inherente de este recurso para mantener sus funciones y contribuir a los servicios del ecosistema (Bonfante, Basile, y Bouma 2020). Es por esta razón, que mantener la calidad del suelo es fundamental para el desarrollo social, reduciendo los problemas relacionados a la degradación de la tierra, disminución de la fertilidad del suelo y niveles de producción (Hakeem, Akhtar, y Sabir 2016).

La contaminación del suelo a consecuencia de la extracción y transporte de hidrocarburos ha ido en aumento a nivel mundial debido a derrames accidentales de petróleo (Defeo et al. 2009; Hayes, Michel, y Betenbaugh 2010). En estos casos, las afectaciones pueden ser devastadoras no solo para los humanos, sino también para otros componentes biológicos de los ecosistemas (Ahmed et al. 2018). Uno de los derrames de petróleo más graves de las últimas décadas ocurrió en el año 1991, durante la guerra del Golfo, derramando aproximadamente 1,5 millones de toneladas de petróleo al ambiente, funcionarios saudíes y occidentales estiman que la limpieza costó entre \$1 a \$5 billones de dólares (Asghar et al. 2016; Schmitt 1991).

Ecuador cuenta con 91 bloques petroleros distribuidos en la Amazonía y Costa Ecuatoriana (Viceministerio de Hidrocarburos 2022). De acuerdo con el área de estudio investigada por (Codato et al. 2019), las concesiones petroleras cubren aproximadamente 620.679 km² de la Amazonía y el 59,36% de la Amazonía ecuatoriana está intervenida por actividades de petróleo y gas.

Los derrames de petróleo son un problema recurrente de gestión de residuos en la industria petrolera. Texaco actualmente Chevron Corporation, causó graves contaminaciones en Ecuador, declarando la pérdida de 296,821 barriles, causados por 25 derrames importantes entre 1972 y 1989. El Gobierno ecuatoriano registró en 1992 aproximadamente 30 derrames, con una pérdida estimada de 16,8 millones de galones de petróleo crudo. Además, en el año 2002 se estimó que al menos dos derrames

grandes se registraron en los principales campos petroleros de la región Oriente por semana (Peterson et al. 2003; San Sebastián y Karin Hurtig 2004).

Para las poblaciones afectadas, los suelos contaminados a raíz de la extracción y derrames de hidrocarburos, implica graves problemas de salud como carcinogenicidad, genotoxicidad, erupciones en la piel, leucemia infantil, aborto espontáneo en mujeres, trastornos del sistema respiratorio, entre otros (Hakeem, Akhtar, y Sabir 2016). A su vez, los ecosistemas se ven afectados debido a que los productos de refinería deterioran las propiedades bioquímicas y fisicoquímicas del suelo, limitando el crecimiento y desarrollo de las plantas, que desencadenan problemas socioambientales en los sitios de contaminación (Ahmed et al. 2018). En un estudio se examinó la incidencia de cáncer durante el período de 1985 a 1998 en la región amazónica de Ecuador, encontrando un alto registro de personas con cáncer en los cantones donde la explotación petrolera ha ocurrido durante al menos 20 años (San Sebastián y Karin Hurtig 2004).

Frente a estos problemas de contaminación, la remediación de suelos aparece como una vía para aliviar los impactos en las poblaciones y los ecosistemas (Megharaj y Naidu 2017). La remediación de suelos contaminados tiene como objetivo la disminución de la concentración de contaminantes, hasta niveles establecidos por la legislación vigente, que impliquen la ausencia de riesgos para la salud humana (Viñas 2005). Existen métodos físicos, químicos y biológicos para limpiar la tierra y los recursos hídricos contaminados con hidrocarburos de petróleo. Los métodos de recuperación física pueden incluir el uso de barreras y absorbentes inorgánicos. Mientras que, los tratamientos químicos emplean reacciones oxido-reducción, encapsulación, extracción con solventes, entre otros. Los métodos biológicos más utilizados hasta el momento incluyen la biorremediación, fitorremediación y oxidación química combinada con biorremediación, mediante la aplicación de microorganismos, hongos, plantas, entre otros agentes biológicos, técnicas sostenibles que han presentado resultados eficientes (Asghar et al. 2016). Durante la remediación se verifica el cumplimiento de los objetivos de remediación planteados, de acuerdo con la normativa ambiental y por último se planifica la restauración del sitio según su uso final (IMP 2010).

Al finalizar los tratamientos de remediación, se realizan análisis fisicoquímicos del suelo para determinar el cumplimiento con los límites establecidos en la normativa ambiental y así reincorporar el suelo remediado de acuerdo con su uso previsto que puede ser industrial, comercial o agrícola (García-Villacís et al. 2021).

En Ecuador, la entidad encargada de la evaluación de calidad de los suelos remediados es el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica. De acuerdo con el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria vigente (MAATE, 2015), la certificación de suelos remediados se realiza tomando en cuenta únicamente resultados de análisis fisicoquímicos, dejando de lado los análisis de riesgos a la salud y al ambiente que podrían causar los suelos remediados. Tomando en cuenta que la remediación debe plantearse como una reparación integral, que permita restablecer el derecho vulnerado de la manera más adecuada; existe la necesidad de complementar los análisis fisicoquímicos con estudios eco toxicológicos, mismos que permiten evaluar la calidad de los suelos remediados, mediante el análisis de los riesgos para la salud, seguridad y el ambiente, de acuerdo con el uso previsto del suelo (El Mahdi y Aziz 2018; Viñas 2005; Granda Torres y Herrera Abrahan 2020).

El presente trabajo pretende responder a la pregunta de investigación: ¿Cuál es la condición actual de la gestión de suelos remediados de la contaminación de hidrocarburos en la Amazonía Ecuatoriana para asegurar la protección en la salud humana y el ambiente? Por tal motivo, se planteó como objetivo general discutir la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos en la Amazonía Ecuatoriana y su evaluación de la calidad, para esto se analizó la gestión de los pasivos ambientales y sus procesos de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos en la Amazonía Ecuatoriana hasta su reincorporación al ambiente, al menos en los últimos 5 años. Luego, se evaluó los criterios de remediación de suelos contaminación con hidrocarburos en la Amazonía Ecuatoriana frente a normativas internacionales y enfoques de reparación integral. Por último, se propone alternativas para optimizar procesos de remediación sostenible y asegurar la calidad de suelos descontaminados de hidrocarburos en el Ecuador.

Para la metodología de investigación se recopiló y analizó fuentes de información con enfoque en la contaminación de suelo por hidrocarburos, remediación de pasivos ambientales y posterior evaluación de calidad para la reincorporación de suelos remediados al ambiente, de acuerdo con su uso a nivel mundial y centrando el problema de investigación en la Amazonía ecuatoriana. El análisis de los pasivos ambientales en la Amazonía ecuatoriana y su remediación se realizó mediante el estudio estadístico y representación gráfica de la base de datos obtenida en la SIESAP del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. La información recopilada de los impactos socioambientales de los eventos de derrames y pasivos ambientales de las

actividades hidrocarburíferas y procesos de remediación aplicados en el lugar de estudio, se obtuvo de noticias e informes de casos de estudio. Para la evaluación de la calidad de suelo remediados a nivel nacional e internacional se comparó la normativa ambiental vigente en Ecuador y normativas internacionales con enfoques basados en riesgos. De acuerdo a la información obtenida, se consideró los parámetros fisicoquímicos y biológicos con mayor posibilidad de aplicación en Ecuador para la elaboración de la propuesta de reforma a los criterios de remediación de suelos de la normativa ambiental del Ecuador.

Respecto a la estructura de la tesis, se basa en tres capítulos, empezando por el marco conceptual de la contaminación de hidrocarburos, técnicas de remediación y procesos alternativos sustentables de remediación y reparación integral. El segundo capítulo se centra en el problema de contaminación de suelo con hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana e impactos generados y procesos de remediación aplicados. Además, se describe las leyes y normativas del país relacionadas a la protección ambiental y remediación de este tipo de contaminantes. El capítulo tercero orienta a analizar los pasivos ambientales en la Amazonía ecuatoriana y su remediación hasta el año 2022, discutir las técnicas de remediación mediante un caso de estudio y así proponer alternativas para una reparación integral en la descontaminación de suelos con hidrocarburos en el Ecuador.

De acuerdo con la información analizada, se concluye que la contaminación del suelo con hidrocarburos causado por derrames en la actividad petrolera en Ecuador ha generado impactos socioambientales relacionado a enfermedades y afectaciones en el desarrollo económico de la región amazónica, lo que da paso a la necesidad de procesos de remediación efectivos que aumenten la calidad de vida de la Amazonía ecuatoriana.

La biorremediación es una de las técnicas más empleadas en la región amazónica del Ecuador. Sucumbíos registra la mayor cantidad de fuentes remediadas desde 2006 hasta 2022, con 578 pasivos ambientales remediados. Sin embargo, la población de los cantones Lago Agrio, Shushufindi, La Joya de los Sachas y Francisco de Orellana, están expuestos a una gran cantidad de pasivos ambientales, con un total de 2856 fuentes pendientes por remediar en la Amazonía. Para hacer frente a este problema, es importante optimizar los procesos de remediación, lo cual depende de muestreos eficientes, toma de decisiones basadas en mapas geoespaciales y análisis de riesgos.

Además, para garantizar la calidad de los suelos remediados que serán reincorporados al ambiente, es necesario la evaluación de parámetros fisicoquímicos y biológicos, que aseguren la ausencia de riesgos para los seres vivos y ecosistemas. Normativas ambientales internacionales proporcionan una pauta a seguir para reformar la normativa ambiental en Ecuador; de esta manera, se propone fomentar investigaciones relacionadas al análisis de la calidad de suelos contaminados con hidrocarburos.

Capítulo primero

Contaminación del suelo por actividades hidrocarburíferas y su remediación

El suelo se encuentra vinculado a importantes servicios ecosistémicos, necesarios para el desarrollo de los seres vivos, sin embargo, actividades antropogénicas como la explotación petrolera, ha ocasionado la contaminación de un gran volumen de suelo a nivel mundial mediante derrames de hidrocarburos. En el presente capítulo se describe la importancia de los servicios ecosistémicos del suelo, para luego hacer un breve recorrido por los derrames de hidrocarburos a nivel mundial y las técnicas de remediación aplicados frecuentemente para este tipo de contaminación. Luego, se menciona la evaluación de la calidad del suelo mediante normativas ambientales internacionales y sus criterios de remediación de suelos con hidrocarburos basado en estudios de riesgos. Por último, se señalan alternativas para procesos de remediación sustentable y reparación integral.

1. El ecosistema suelo y sus servicios

Los principales componentes del suelo son el agua, aire, minerales, materia orgánica y organismos vivos, gracias a la acción combinada de estos componentes, es posible el crecimiento de toda la vegetación en la Tierra (Sánchez Capa, Mestanza Ramón, y Sánchez Capa 2020). El suelo tiene múltiples funciones, entre ellas, la producción de biomasa, reserva y filtración de agua, almacén y reciclado de nutrientes, provisión de hábitat para otras especies y captura de carbono (Schulte et al. 2014; Vogel et al. 2018).

Se denominan servicios ecosistémicos al uso de las contribuciones directas e indirectas de los ecosistemas para el bienestar humano (Kumar 2012). Existe una serie de servicios ecosistémicos basados en el suelo, como son: producción de alimentos, materiales, energía, crianza de animales, soporte de infraestructura, mitigación de inundaciones, ciclo de nutrientes, regulación climática y control de plagas (Bartkowski et al. 2020). Un suelo saludable, entendido como la capacidad continua del suelo para funcionar como un ecosistema vital, determina la calidad y cantidad de los servicios

ecosistémicos en beneficio de las generaciones actuales y futuras (Retallack 2013; Teague y Kreuter 2020).

Se puede definir a la calidad del suelo como la capacidad inherente de este recurso para mantener sus funciones y contribuir a los servicios del ecosistema (Bonfante, Basile, y Bouma 2020). Es por esta razón, que mantener la calidad del suelo es fundamental para el desarrollo social, reduciendo los problemas relacionados a la degradación de la tierra, disminución de la fertilidad del suelo y niveles de producción (Hakeem, Akhtar, y Sabir 2016).

El concepto de la calidad de los diferentes tipos de suelos debe considerar las propiedades inherentes de los suelos y así definir la calidad del suelo para cada clase de textura (Bonfante, Basile, y Bouma 2020).

Doran (1994) menciona las condiciones que deben abarcar los indicadores de calidad del suelo: Indicar los procesos del ecosistema; analizar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; mostrar los atributos de sostenibilidad; ser sensitivos a variaciones de clima, cambios por acción antropogénica y manejo; fácil aplicación y entendimiento en condiciones de campo; ser reproducibles; ser fáciles de entender.

2. Derrames de hidrocarburos a nivel mundial

Hace algunos siglos, las principales fuentes de energía fueron el carbón, la madera y el aceite de ballena; sin embargo, la demanda de energía fue mayor debido al aumento de la población a nivel mundial y fue necesario recurrir a otras fuentes de extracción a mayor escala (Bisso-Andrade 2022).

La extracción del crudo inició en Rusia Imperial en 1825, con una producción de 500 toneladas de petróleo y la construcción sucesiva de largos oleoductos y refinerías. Luego, en 1878, la compañía Branobel innovó con el primer barco petrolero en el mar Caspio para transporte del crudo y así empezó la fiebre de la extracción del petróleo por todo el mundo (Bisso-Andrade 2022).

Para finales del siglo XX, se consumían más de 65 millones de barriles diarios, con sus mayores productores E.UU., Rusia, Arabia Saudita, Irak y Canadá. De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía, más del 80% de la energía primaria total proviene de los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas), y la mayor parte del petróleo es utilizado en el transporte, electricidad y la industria petroquímica (Bisso-Andrade 2022; Delgado Ramos 2011).

Las falencias en la tubería o conductos del petróleo durante el proceso de explotación/producción/distribución de crudo y sus derivados, ocasionados por desastres naturales (sismos o deslices de tierra), o por la mano del hombre (atentados), causan la rotura de la tubería y como efecto inmediato el derrame del petróleo que genera daños irreparables en el ambiente (Vizueté, Lascano, y Moreno 2019). El Ministerio del Ambiente de Ecuador menciona que los derrames producidos se deben a distintas causas: 28 % por corrosión, 26 % por atentados, 17,8 % por fallas mecánicas, 14,5 % sin dato de causa, 11,8 % por fallas humanas y el 1,5 % por desastres naturales (EC EP PETROECUADOR 2015). Sin embargo Arteaga (2003) , de acuerdo a las dos principales causas de vertidos de crudo de origen antrópico son fallas en el equipo y corrosión, lo cual tiene gran relación con la calidad de mantenimiento de las instalaciones y la vida útil de la infraestructura.

En los últimos años el volumen total de petróleo derramado continúa disminuyendo. Sin embargo, se siguen produciendo grandes derrames debido a la producción y el transporte de petróleo. Se puede mencionar los 3 derrames con mayor impacto a nivel mundial en las últimas tres décadas (Barron et al. 2020):

Derrame de petróleo del Exxon Valdez (EVOS) en Prince William Sound, Alaska (1989): El buque derramó al menos 40,8 millones de litros (35.500 toneladas) de petróleo crudo de Alaska North Slope, contaminando 738 km de costa en Prince William Sound, para luego seguir al Golfo de Alaska, donde contaminó otros 2100 km. Apenas el 14% del petróleo derramado se había recuperado durante las operaciones de limpieza, hasta el año 1991 (Barron et al. 2020; Xia y Boufadel 2010).

Derrame de petróleo del Hebei Spirit (HSOS): ocurrido en diciembre de 2007 frente a la costa occidental de la República de Corea. La colisión provocó tres agujeros en el buque petrolero y se derramaron aproximadamente 10.900 toneladas de tres diferentes tipos de crudo de Oriente Medio. Unos 70 kilómetros de la costa de Taean se vieron afectados por una espesa capa de petróleo, que tuvo una rápida propagación del petróleo derramado, generando impactos en toda la zona de la pesca a lo largo de la costa occidental de Corea, con posibles impactos de mayor escala en el ecosistema marino (Yim et al. 2017).

En marzo 1992, ocurrió uno de los más grandes eventos de derrame bajo tierra en Fergana Valley, Uzbekistan. Un inconveniente en el pozo de producción precipitó una explosión que arrojó 88 millones de galones de petróleo crudo al valle. El fuego

resultante de la explosión ardió durante dos meses. El sitio afectado contaba con una gran actividad agrícola (Read 2011; Tan 2009).

3. Problemas socioambientales de la contaminación de suelos con hidrocarburos

El extractivismo en América Latina ha generado problemas socioambientales como desigualdad, pobreza, distribución de la tierra y degradación ambiental. Los beneficios de la industria extractiva están dirigidos a un grupo reducido mientras los impactos negativos recaen sobre las comunidades vulnerables. Las comunidades indígenas han sido abandonadas por el Estado, lo cual ha conducido a bajos niveles de educación, restricciones en atención a la salud y difícil acceso al agua potable (Amnistía Internacional 2014).

Los derrames de petróleo a lo largo de la historia han causado graves daños y pueden clasificarse básicamente en tres: humanos, al patrimonio, y ecológicos. Los daños humanos se relacionan principalmente con intoxicaciones; mientras que los daños patrimoniales involucran pérdida de casas o reubicación. Por último, los daños ecológicos implican afectaciones al suelo, a los cultivos y al agua. Algunos sitios han contado con procesos de biorremediación, volviendo a ser productivos después de muchos meses; sin embargo, otros quedan olvidados, inhabilitados o fungiendo como basureros (Cavazos Arroyo, Perez Armendariz, y Mauricio Gutierrez 2014).

Los derrames de petróleo contienen hidrocarburos totales de petróleo (HTP), que comprenden diversas fracciones con efectos perjudiciales para la salud, dependiendo del tiempo de exposición y la cantidad en contacto. Compuestos como el benceno, tolueno y xileno, presentes en estas fracciones, pueden afectar el sistema nervioso y resultar letales en concentraciones suficientemente elevadas. La exposición durante un período prolongado puede producir daño permanente del sistema nervioso central. Además, La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) ha determinado que el benceno es carcinogénico en seres humanos (Bisso-Andrade 2022).

4. Técnicas de remediación de suelo contaminado con hidrocarburos

En el sitio contaminado suelen estar hidrocarburos de petróleo en más de una fase: vapor, líquido, disuelto y/o adsorbido. Además, pueden estar en medio terrestre y/o acuático, junto con la heterogeneidad ambiental hacen que cada sitio sea diferente.

Actualmente no existe una tecnología específica para remediar de manera singular los contaminantes presentes en todas las fases y medios (Kuppusamy et al. 2020b).

Las tecnologías para la remediación de suelos, sedimentos y desechos sólidos que contienen hidrocarburos abarcan desde enfoques fisicoquímicos hasta biológicos. Su objetivo es cumplir con los estándares de limpieza y las regulaciones ambientales del país correspondiente, asegurando teóricamente que el suelo se restaure a un nivel aceptable.

Debido a las extensas áreas de suelos contaminados con hidrocarburos que han ocurrido desde la explotación petrolera, se genera una perspectiva de sustentabilidad (Chan-Quijano et al. 2015). Saval (1999) establece algunos criterios para elegir una técnica de remediación:

- Comprender la función que desempeña el suelo afectado en el sitio específico
- Conocer el problema de contaminación con información reciente.
- Identificar las características de una técnica de remediación.
- Conocer las ventajas, desventajas y limitaciones de las técnicas de remediación disponibles.
- Definir con claridad el uso que se le dará al suelo (agrícola, forestal, recreativo, residencial, de conservación, comercial o industrial) después de su remediación.

La técnica de remediación se refiere al método que se utilizará y la tecnología necesaria para llevar a cabo. Las técnicas se clasifican en *in situ* y *ex situ*, el primero realiza las actividades de remediación en el mismo lugar donde se encuentra, mientras que la técnica *ex situ* requiere excavación para ser tratado en otro lugar (Casallas Peña y Gonzalez Lopez 2020).

Técnicas fisicoquímicas: Los contaminantes interactúan mediante reacciones químicas o contacto físico lo cual facilita su eliminación (Roqueta Ibert 2016). Las técnicas más utilizadas son:

- Extracción (Pedersen y Curtis 1991): Esta técnica utiliza pozos de extracción para remover compuestos volátiles por vapor mediante la obtención de un gradiente de presión/concentración. Los gases y líquidos extraídos requieren tratamiento y disposición final (Coria 2007).

- Lavado (Nash, Traver, y Downey 1987): Consiste en lavar el suelo excavado con soluciones acuosas como agua, disoluciones con ácido, bases o disolventes (Yagual Barzola 2020). El fluido que contiene la contaminación se recoge y se envía a la superficie a través de una bomba mecánica para su descarga y eliminación (Fabbricino et al. 2018).
- Electrocinética (Hansen y Timmerman 1991): Se basa en la separación de contaminantes aplicando corriente eléctrica continua de baja densidad mediante electrodos insertados en el suelo, los cationes que se encuentran en la fase del suelo contaminado migran hacia el lado negativo, mientras que los aniones se mueven hacia el lado positivo (L. Liu et al. 2018).

Técnicas térmicas (Pedersen y Curtis 1991): a través del aumento de calor permite la volatilización y descomposición de los contaminantes en los suelos, se emplean en la descontaminación de aceites, hidrocarburos clorados y policlorobifenilos. Se aplican técnicas como desorción térmica e incineración (Martínez y Casallas 2018).

Técnicas biológicas o biorremediación: Se basa en el uso de agentes biológicos como plantas, hongos y microorganismos para eliminar los contaminantes o sustancias tóxicas del ambiente (Castebianco 2018)., favoreciendo las condiciones del ambiente para optimizar el metabolismo de los agentes biológicos.

- Bioventing (Hoeppel, Hinchee, y Arthur 1991): Es una técnica aplicada in situ que consiste en mejorar la aireación (oxigenación) del suelo y así estimular la microbiota autóctona del suelo, mejorando la degradación aeróbica de contaminantes biodegradables (Smarte y Yusuf 2021).
- Bioestimulación (Scovazzo, Good, y Jackson 1992): Se trata de la adición de cualquier material estimulante, como enmiendas de nutrientes, biosurfactantes, biopolímeros y fertilizantes de liberación lenta para mejorar y apoyar la actividad microbiana y actividades enzimáticas de los microorganismos autóctonos del suelo contaminado (Ossai et al. 2020; Wu et al. 2016).
- Bioaugmentación (Sims, Sims, y Matthews 1989): Se añade microorganismos y nutrientes en la tierra que tengan la capacidad de disminuir el contaminante, logrando la remediación sin alterar el equilibrio del ecosistema (Valenzuela et al. 2021).
- Landfarming (Sims, Sims y Matthews 1989): Es una técnica en la que se conforma una capa delgada del suelo contaminado y emplea labranza, arado, de esta manera se mejora y estimula las actividades microbianas aeróbicas con

la adición de nutrientes. Es adecuado para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo de bajo peso molecular, compuestos orgánicos volátiles y otros compuestos orgánicos (Guarino, Spada y Sciarrillo 2017; Ossai et al. 2020).

- Composting (Williams, Ziegenfuss y Marks 1988): Se trata de una degradación bioquímica aeróbica microbiana controlada de desechos orgánicos que se usa como acondicionador del suelo contaminado con compuestos orgánicos que maximiza la biorremediación (Ren et al. 2018). Es una técnica ex situ que se basa en la labranza y remoción periódica del suelo contaminado acopiado y se adiciona agua para lograr una mayor aireación y distribución de nutrientes para mejorar la biodegradación (Azubuiké, Chikere y Okpokwasili 2016).

La biorremediación es una técnica alternativa rentable y provoca un menor daño ecológico debido a una menor intrusión en el sitio contaminado. Además, esta técnica puede degradar los contaminantes sin alterar la flora y fauna autóctona. Por lo tanto, es una técnica sostenible (Garzón, Rodríguez Miranda, y Hernández Gómez 2017).

La aplicación de la biorremediación en diversos sitios contaminados a causa de actividades industriales, permite crear nuevos espacios de intercambio público-privado a nivel productivo, tecnológico y científico (Garzón, Rodríguez Miranda, y Hernández Gómez 2017).

5. Evaluación de la calidad de suelo remediado a nivel internacional

El aumento excesivo y mal uso del suelo ha llevado a una degradación generalizada de este recurso, lo que ha llevado a la necesidad de ampliar el alcance del manejo del suelo para incluir la prevención de la degradación del suelo y la remediación de los suelos degradados con el objetivo de mantener la productividad y fertilidad (Lal 2015). Es cada vez más evidente la importancia del recurso suelo en el mantenimiento del funcionamiento y los servicios de todo el ecosistema (Powlson et al. 2011).

La gestión eficaz del suelo depende de una evaluación sólida de la calidad de este recurso. Desde 1990, se han desarrollado sistemas de evaluación de la calidad del suelo basados en parámetros seleccionados del suelo (indicadores de evaluación) en diferentes países. En los 60 esquemas principales de evaluación de la calidad del suelo, los indicadores empleados con mayor frecuencia son: carbono orgánico total, pH, Fósforo disponible, almacenamiento de agua, densidad aparente, Potasio disponible,

textura del suelo, Nitrógeno total, conductividad eléctrica, y capacidad de intercambio catiónico (Bünemann et al. 2018).

Los contaminantes como pesticidas, hidrocarburos de petróleo, metales pesados no figuraban como indicadores de la calidad del suelo en estos sistemas de evaluación, excepto los metales pesados, que solo tenían una frecuencia de uso ligeramente superior al 20%, esto no permite realizar evaluaciones específicas de la calidad del suelo de gran significancia ambiental (Bünemann et al. 2018).

En la Figura 1 se menciona los métodos de extracción y determinación de hidrocarburos totales de petróleo, principal análisis para la evaluación de un sitio contaminado con hidrocarburos.

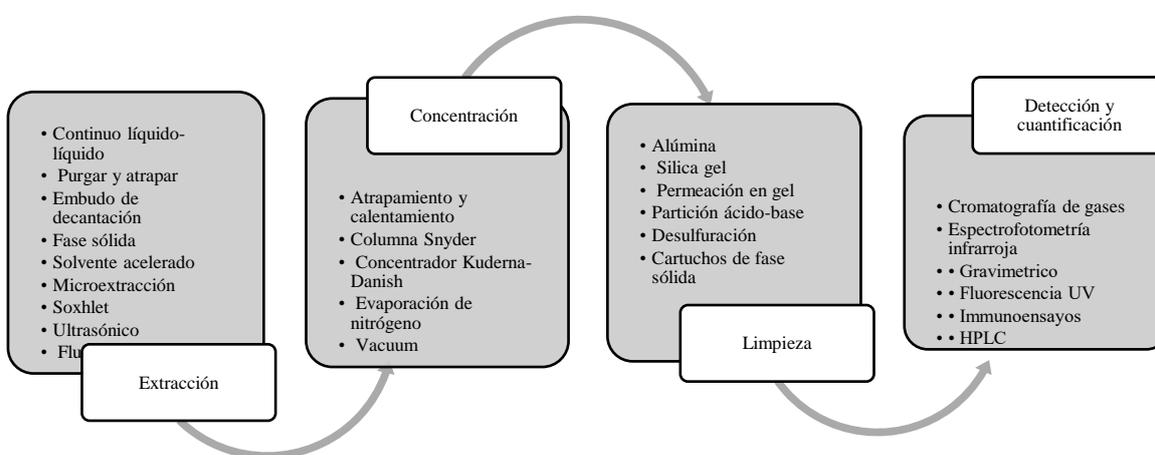


Figura 1. Métodos de extracción y determinación analítica de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) validados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) EE. UU

Fuente: (Kuppusamy et al. 2020)

Elaboración propia.

En los últimos años, se han adoptado enfoques basados en riesgos, que utilizan criterios orientados toxicológicamente. Las primeras pautas de la evaluación basada en riesgos (RBCA) fue desarrollado por la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM, 1995) en los que utilizaron indicadores altamente tóxicos de BTEX y PAH como parámetros principales para evaluar la peligrosidad de los suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo, mientras que el Grupo de Trabajo de Criterios de TPH mantiene un enfoque de fraccionamiento que considera especies aromáticas altamente tóxicas en la evaluación de riesgos (Niu y Lin 2021).

El sistema TPHCWG dividió los hidrocarburos de petróleo en 13 fracciones para derivar criterios de aceptación del suelo para la evaluación de riesgos ambientales (Niu

y Lin 2021). El enfoque del TPHCWG es el preferido en Canadá (CCME 2008), Países Bajos (Baars et al. 2001), Nueva Zelanda (NZL Ministry for the Environment 2011).

La simplificación de los criterios minimiza los costos asociados con la recopilación de datos, pero puede comprometer la calidad de la caracterización del riesgo en la evaluación de suelos contaminados con hidrocarburos (Niu y Lin 2021).

5.1 Normativa ambiental en Canadá

La política ambiental abordar los riesgos de los hidrocarburos de petróleo liberados para la salud humana, la vida acuática, ganado, producción agrícola y fauna. Bajo este marco el CCME gestiona la remediación de suelos contaminados en tres niveles, empezando por lo genérico, para luego implementar condiciones específicas del sitio afectado. Se definen los límites permisibles de acuerdo a 4 fracciones de los rangos de carbono de los hidrocarburos de petróleo del sitio contaminado: $C_6 - C_{10}$ (F1), $> C_{10} - C_{16}$ (F2), $> C_{16} - C_{34}$ (F3), y $> C_{34}$ (F4), definiendo usos genéricos del suelo, específicamente área natural, agricultura, residencial/zonas verdes, comerciales e industriales (CCME 2008).

5.2 Normativa ambiental en Países Bajos

Los valores de la política anterior establecían límites permisibles de TPH con el rango de C_{10-40} para el suelo de $5000 \left[\frac{mg}{kg} \right]$ y para el agua subterránea $600 \left[\frac{\mu g}{L} \right]$. RVIM a partir de estas concentraciones determinó niveles de riesgos, concluyendo que dichas concentraciones son graves desde el punto de vista toxicológico humano y ecológico (Kuppusamy et al. 2020).

Actualmente, las normas holandesas se basan en concentraciones de riesgo graves (SRC por sus siglas en inglés). El marco de decisión general de RVIM evalúa los compuestos indicadores y fracciones en función de la toxicidad del compuesto o producto sustituto. Si no se exceden los SRC específicos de la fracción de petróleo, se calcula el índice de contaminación general del sitio contaminado sumando las concentraciones medias de los SRC, si excede del valor 1, se deben considerar medidas correctivas de remediación, los valores se describen en la tabla 1 (UK Environment Agency 2003).

Tabla 1
Niveles de riesgo toxicológico humanos máximos permisibles para las fracciones de TPH
Países Bajos

Fracción TPH	Total ingesta oral diaria [mg/kg/día]	Concentración tolerable en el aire [mg/m ³]
Alifáticos	----	----
C ₅ -C ₈	2.0	18.4
C ₈ -C ₁₆	0.1	1.0
C ₁₆ -C ₃₅	2.0	NA
>C ₃₅	20	NA
Aromáticos	----	----
C ₅ -C ₈	0.2	0.4
C ₈ -C ₁₆	0.04	0.2
C ₁₆ -C ₃₅	0.03	NA

Fuente: (UK Environment Agency 2003).

Elaboración propia

*Valores de toxicidad basados en sustitutos y propiedades de transporte en fracción completa, según el Grupo de Trabajo sobre Criterios de Hidrocarburos Totales del Petróleo (TPHCWG).

*NA: No disponible

5.3 Normativa ambiental de Australia

Australia mediante la ley del Consejo Nacional de Protección Ambiental (NEPC) formuló Medidas Nacionales de Protección Ambiental (NEPM), los cuales están diseñados para gestionar la contaminación de la tierra por TPH en este país. El NEPM se basa en niveles de investigación de detección de salud humana (HSL) y niveles de detección ecológica (ESL). De esta manera, cuando el nivel de TPH de un suelo contaminado supera los límites HSL o ESL, se entiende que el riesgo persiste y así tomar las acciones necesarias para el desarrollo del plan de remediación que minimice el riesgo que prevalece en el sitio (NEPC 2011).

6. Alternativas para una óptima evaluación de calidad de suelos remediados en Ecuador

6.1 Diseño de planes sustentables de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Es posible la aplicación de tecnologías de remediación físicas, químicas, biológicas y otras equivalentes con un enfoque sustentable para reducir los riesgos de los suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo (Ossai et al. 2020). Es importante tomar en cuenta que los investigadores de técnicas eficientes de remediación

también deben enfocarse en la sostenibilidad con el ambiente (Cuya Flores y Varda Mayer 2022).

Los equipos vinculados a proyectos de remediación sustentables deben incluir ecólogos, sanitaristas, biólogos, químicos, ingenieros, urbanistas, sociólogos y economistas. Además, es necesario incorporar a los actores sociales involucrados mediante sus saberes prácticos (De Cabo y Marconi 2021).

Para considerar una tecnología sustentable debe continuar durante un tiempo infinito siendo factible económicamente, ambientalmente atractiva y socialmente responsable (Al-Majed, Adebayo, y Hossain 2012).

IMP (2010) menciona que los principales requerimientos para la restauración de suelos contaminados son la identificación de las áreas contaminadas, diagnóstico del sitio y evaluación de las alternativas de remediación óptimas. A partir de esta información, se diseña el proceso de remediación, tareas de limpieza y mantenimiento.

6.2 Toma eficiente de muestras

Un plan de muestreo para evaluación de riesgos en un sitio contaminado debe cumplir con requisitos legales o reglamentarios y es recomendable prestar atención a la integridad de la muestra. Las estrategias de muestreo deben ser analizadas por cada sitio específico y pueden ser orientadas a las normas internacionales ISO 10381-5 y la norma ISO 10381-4 (Foght y Aislable 2005). La Norma ISO 10381 establece las estrategias para diseños de programas de muestreo, procedimientos de campo y posterior tratamiento de las muestras. Además, el transporte y almacenaje anterior al pretratamiento de las muestras (AENOR 2007).

De acuerdo al aumento de número de muestras, serán más precisas las estimaciones de la media, lo que hace que las evaluaciones de un suelo contaminado sea costoso, requieran mucho tiempo y, como resultado, a menudo se basen en datos de campo inadecuados (Horta et al. 2015).

En términos de muestreo estadísticamente eficiente, una cuadrícula triangular equilátera regular proporciona la mejor selección de puntos de muestreo (Foght y Aislable 2005).

El muestreo dependiendo del diseño elegido, debe dividirse en dominios/áreas o reservas que representan características similares, como niveles o tipo de contaminación (Horta et al. 2015). De esta manera, el mínimo número de muestras a tomar se puede asignar a un área o volumen conocido. La EPA de EE. UU recomienda que en

volúmenes grandes de suelo ($> 2500 m^3$), la tasa de muestreo mínima no debe ser inferior a 1 muestra por cada $250 m^3$ (EPA 2009).

Las mediciones a tiempo real de las concentraciones de contaminación determinada con métodos espectroscópicos de campo como Vis-IR y PXRF, respaldan una evaluación sobre la marcha y pueden ser parte de un diseño de muestreo adaptativo (Juang et al. 2008).

Las técnicas geoestadísticas en un sistema de información geográfica (SIG) permite obtener información sobre la distribución espacial de la contaminación (Burrough 2001). En la figura 2 se diagrama en resumen un muestreo eficiente, en relación con lo antes expuesto. Se puede observar que el enfoque convencional, de uso común en proceso de remediación en la Amazonía ecuatoriana, puede no representar la verdadera extensión y concentración de la contaminación del sitio afectado. Mientras que, el enfoque propuesto por (Horta et al. 2015), se basa en un plan de muestreo adaptativo, tomando en cuenta que cada sitio contaminado tendrá características específicas. Además, el análisis estadístico espacial permite la representación gráfica de la extensión de la contaminación y de esta manera se puede manejar de forma óptima la toma de decisiones para los procesos de remediación.

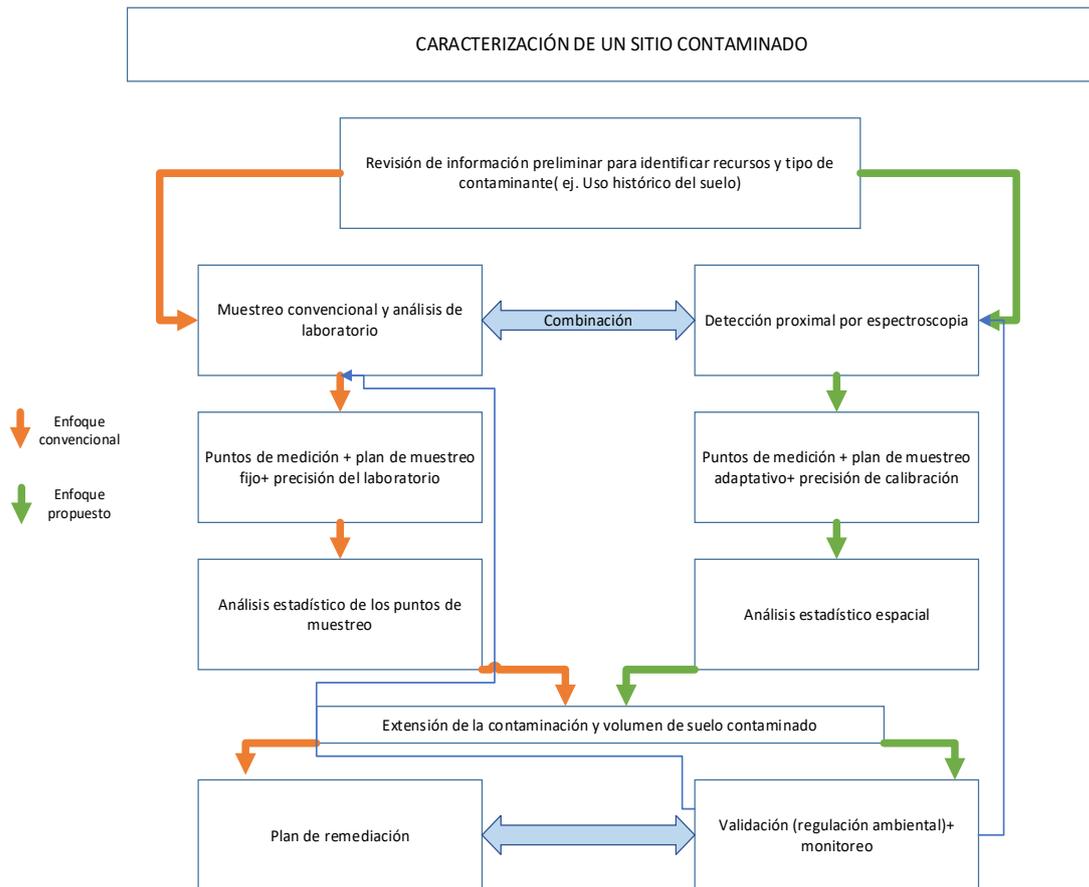


Figura 2. Flujo de trabajo de evaluación de la contaminación: enfoques actuales y futuros
 Fuente: (Horta et al. 2015)
 Elaboración propia

En Ecuador, el Acuerdo Ministerial 097-A, punto 4.5.2.1 MATTE (EC 2015), menciona que la toma de muestras para suelos contaminados se realiza en dos fases, la primera superficial y la segunda basada en un muestreo de perfiles de suelo (muestreo vertical); sin embargo, no refieren a normativas internacionales para el manejo de plan de muestreos.

6.3 Mapeo representativo de pasivos ambientales

Hellawell, Kemp, y Nancarrow (2001) menciona que el desarrollo de la estrategia de remediación se basa en los resultados del sitio investigado, monitoreo de aguas subterráneas y estudios de evaluación de riesgos; logrando la remediación mediante excavación localizada de suelo en las áreas más afectadas, para luego, implementar un sistema activo de remediación de aguas subterráneas, con el objetivo de determinar el nivel óptimo de excavación, teniendo en cuenta la eliminación de la masa contaminante y los costes asociados.

Los mapas permiten determinar la variabilidad espacial del suelo en estudio, siendo un factor clave para la gestión de la tierra tanto para la agricultura y como respuesta a problemas ambientales. En sitios contaminados se toma en cuenta la variabilidad espacial natural de las propiedades del suelo y la variabilidad espacial antropogénica causada por las fuentes de contaminación (Langella et al. 2018).

Es importante mencionar que los métodos geofísicos permiten obtener datos de alta resolución del suelo, no son destructivas y requieren investigaciones rápidas, logrando transformar el análisis del suelo basado en propiedades espaciales (Langella et al. 2018).

Para la implementación de los métodos geofísicos se creó los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que son una herramienta estándar para proyectos en los que vinculan altas cantidades de datos para producir mapas visuales de información (E. Hellowell et al. 2015). En adición a las funciones estándar de los SIG, las herramientas de modelización espacial han permitido ser muy útiles para calcular el volumen de suelo o residuos (E. E. Hellowell, Kemp, y Nancarrow 2001)

Los mapas elaborados por técnicas como: análisis de componentes principales, imágenes hiperespectrales y landsat 7, muestran mapas detallados que detectan la contaminación por alteración litológica a causa de filtraciones de hidrocarburos y estructuras geológicas deformadas que causan el derrame de hidrocarburos, como se representa en la Figura 3 (El-Hadidy et al. 2022).

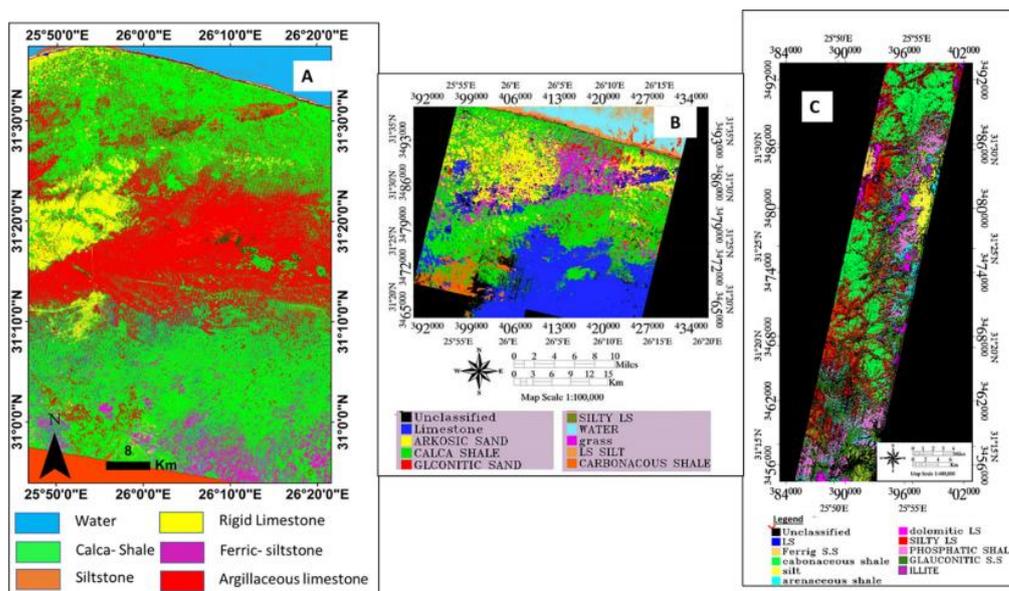


Figura 3. Imagen de clasificación del área de estudio. A) Imagen Landsat ETM+ B) Advanced land imager (ALI) C) Estudio de imagen hiperespectral (EO-1, Hyperion)
Fuente: (El-Hadidy et al. 2022)

Okparanma, Azuazu, y Ayotamuno (2017) utilizó el índice de calidad del suelo (SoQI) para evaluar el riesgo ecológico de un suelo contaminado con hidrocarburos totales de petróleo (TPH). Los valores de los índices de calidad de suelo (SoQI) varían y representan desde un riesgo bajo hasta riesgo muy alto (CCME 2007).

B. Wu, Guo, y Wang (2021) representa la distribución espacial de la contaminación de hidrocarburos totales de petróleo de un sitio contaminado y el riesgo ecológico espacial que representa esta contaminación en mapas que se puede diferenciar claramente (Figura 4 y 5).

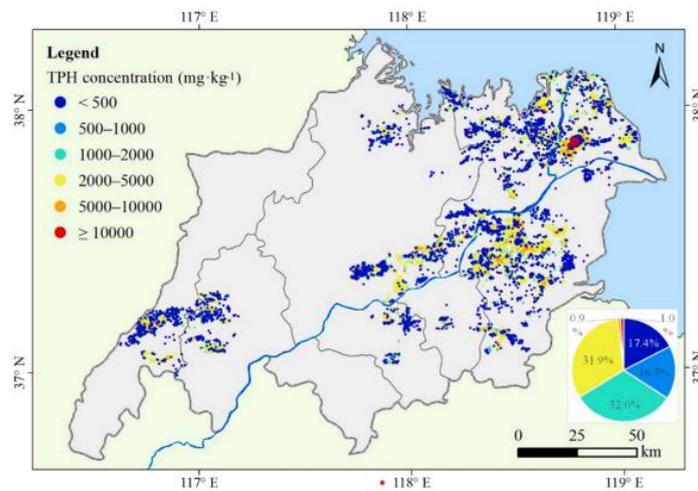


Figura 4. Distribución espacial de concentraciones simuladas de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en los suelos que rodean los pozos petroleros en el área de estudio
Fuente: (B. Wu, Guo, y Wang 2021)

Como se observa en la figura 10, el mapa geoespacial desarrollado para el sitio contaminado permite identificar rápidamente la zona con mayor concentración de TPH y de esta manera definir un proceso de remediación específico de acuerdo con el nivel de contaminación

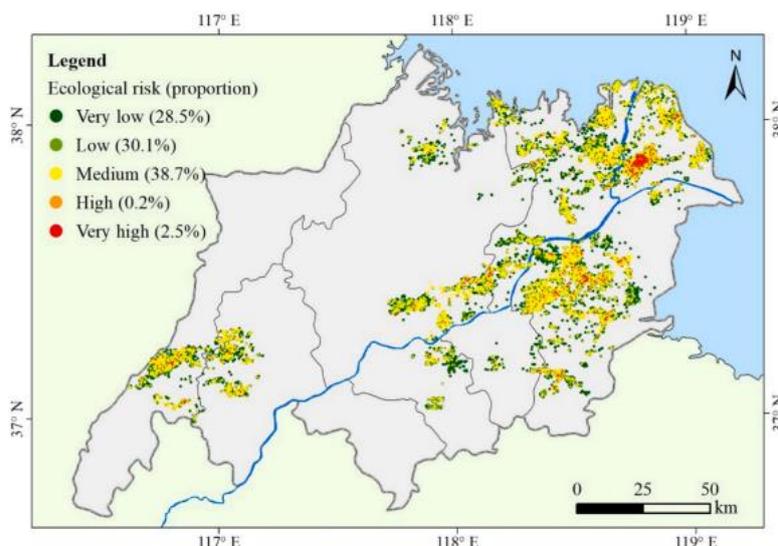


Figura 5. Riesgo ecológico espacial de la contaminación del suelo por hidrocarburos totales de petróleo en el área de estudio

Fuente: (B. Wu, Guo, y Wang 2021)

La distribución geoespacial en la Figura 5 se basa en la proporción de riesgo ecológico que establece magnitudes y probabilidades a los efectos adversos de la contaminación de suelos, en este caso. De esta manera, se puede asignar actividades específicas para disminuir o evitar la ocurrencia de dichos efectos adversos.

6.4 Estrategias de remediación sustentables de hidrocarburos

Mediante la remediación sustentable se busca maximizar los beneficios y reducir los daños ambientales, sociales y económicos, así como también disminuir los impactos de las acciones de remediación (Braun et al. 2020).

Es importante reducir el riesgo para la salud humana y el ambiente en todas las etapas de la remediación. Un ejemplo es en la gestión de sedimentos contaminados y se debe determinar los riesgos en el degrado, eliminación y posible reutilización de sedimentos remediados. Para garantizar que la remediación se realice de manera sustentable, es necesario desarrollar prácticas de gestión integradas e innovadoras (Mulligan 2021).

El proceso de remediación puede introducir nuevos impactos en el ambiente, la sociedad y la economía a causa del alto consumo de energía y materiales, así como a las emisiones de contaminantes (Amponsah, Wang, y Zhao 2018; Søndergaard et al. 2018). También, algunos impactos pueden ocurrir en la etapa de cierre del sitio del proceso de

remediación, relacionados con el uso futuro del área, incluido el riesgo residual para los futuros usuarios del sitio (Hou et al. 2018). Estos impactos suelen dominarse primarios, secundarios y terciarios, tal como se detalla en la figura 6.

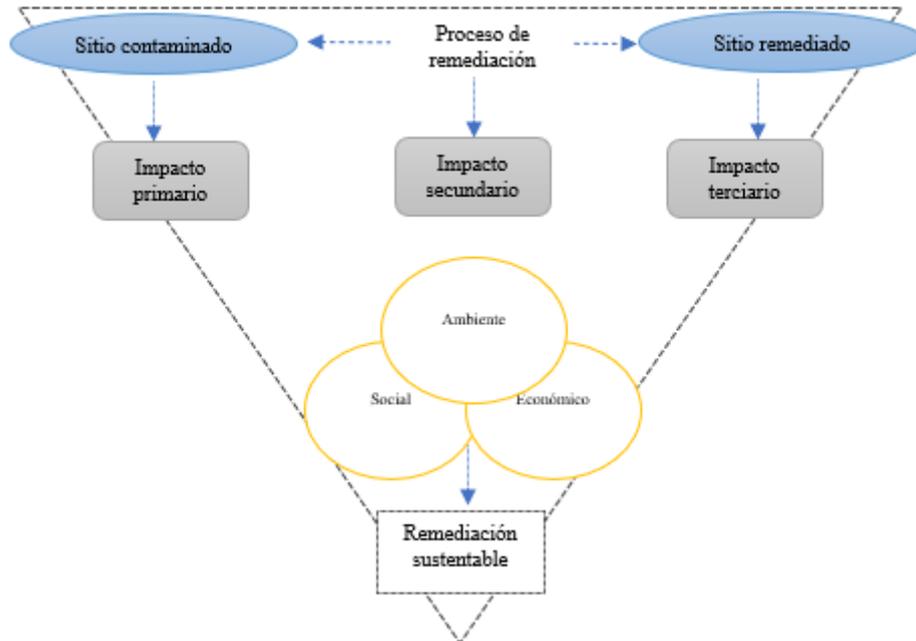


Figura 6. Ejemplificación del proceso remediación sustentable dentro de la gestión de sitios contaminados

Fuente: (Braun et al. 2020)

Elaboración propia

Para definir el alcance y optimizar opciones de tratamiento para la remediación del suelo, aguas superficiales y aguas subterráneas contaminadas con hidrocarburos de petróleo, es necesario comprender (Artiola, Pepper, y Brusseau 2004; Vicent et al. 2013):

- La naturaleza, composición y propiedades de los contaminantes,
- Tipo de ambiente,
- Transporte y distribución de los contaminantes en el ambiente afectado,
- Mecanismo de degradación de los contaminantes,
- Interacciones y relaciones con los hidrocarburos.
- Los factores intrínsecos y extrínsecos que afectan a la degradación.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología flexible con varias opciones de modelización, que puede utilizarse para cuantificar una variedad de impactos ambientales, como es la ecotoxicidad y el agotamiento del agua (Terlouw et al. 2021).

6.5 Inclusión de indicadores de calidad de suelo para el seguimiento de procesos de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Se puede definir a indicador como una variable con información relevante simplificada relacionada a un fenómeno o condición de interés y que de esta manera sea perceptible y cuantificable para una fácil comprensión (Cantú et al. 2007). A partir de este concepto, se ha construido indicadores de calidad, que en el caso del suelo es el resultado de cuantificar las características fisicoquímicas del suelo en un periodo de tiempo y lugar específico (Calderón-Medina, Bautista-Mantilla, y Rojas-González 2018).

- Biodisponibilidad

Conocer acerca de la biodisponibilidad es importante para optimizar la evaluación de riesgos y la remediación de ambientes contaminados con TPH, ya que la biodisponibilidad es uno de los factores que limitan el alcance de la biorremediación por parte de microorganismos (Ortega-Calvo et al. 2007).

Existen varias definiciones sobre biodisponibilidad; sin embargo, se puede definir de manera general como la fracción de una sustancia química que está disponible para atravesar la membrana celular de un organismo que habita en ese medio en un momento dado. Después de la transferencia a través de la membrana, dentro del organismo puede ocurrir el almacenamiento, la asimilación, la transformación o la degradación de la sustancia química. Para determinar la cantidad de una sustancia química biodisponible se puede mencionar dos factores: la tasa de transferencia de la sustancia química desde el ambiente a la célula viva (transferencia de masa) y la tasa de su absorción y metabolismo de la biota (Semple et al. 2004).

Valdes (2011) menciona tres situaciones que la biodisponibilidad de los contaminantes difiere en los procesos de remediación:

- No habrá biorremediación cuando la cantidad de contaminante biodisponible sea insuficiente para justificar el gasto de energía que induzca a la biodegradación.
- En concentraciones biodisponibles bajas, las células microbianas pueden biodegradar los contaminantes mientras se encuentran en la fase estacionario de la curva de crecimiento. Por lo tanto, la biodegradación será limitada ya que no se producen nuevas células.

- Se obtendrá tasas óptimas de biorremediación cuando exista suficiente contaminante biodisponible para inducir la biodegradación en la etapa de crecimiento.

Los biosurfactantes permiten aumentar la biodisponibilidad de compuestos hidrofóbicos como los TPH a través de la solubilización, y así mejorar la tasa de degradación. También los tensioactivos sintéticos mejoran la biodisponibilidad de los TPH (Cheng et al. 2018; H. Liu et al. 2014).

La mejor forma de evaluar la biodisponibilidad de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) es mediante bioensayos o mediciones biológicas. Sin embargo, una rápida evaluación de la fracción biodisponible de TPH en el ambiente, se puede realizar mediante procesos de extracción química no exhaustivos (Cachada et al. 2014; Stokes, Paton, y Semple 2005).

En la figura 7 se indica los procesos de extracción no exhaustivos más comunes utilizados para detectar la fracción biodisponible de TPH en sitios contaminados. (Reid et al. 2000) mencionan que la extracción utilizando una solución de hidroxipropil- β -ciclodextrina (HPCD) puede estimar con precisión la cantidad de TPH disponibles para la biodegradación bacteriana, en suelos con contaminación reciente o antigua. Además, indican que al utilizar soluciones de diclorometano y butanol se sobreestima las fracciones de TPH disponibles.

De acuerdo con lo mencionando, la estimación de la fracción biodisponible de TPH en los suelos contaminados es un parámetro esencial para determinar el tipo de remediación y el proceso a llevar a cabo, y así lograr las metas de remediación planificadas. Ecuador no cuenta con laboratorios acreditados en el parámetro de biodisponibilidad en suelos, la biodisponibilidad hasta el momento ha sido analizada en proyectos de investigación, pero aún no se establece la metodología correcta a aplicar para suelos arcillosos con características especiales presentes en la Amazonía ecuatoriana.

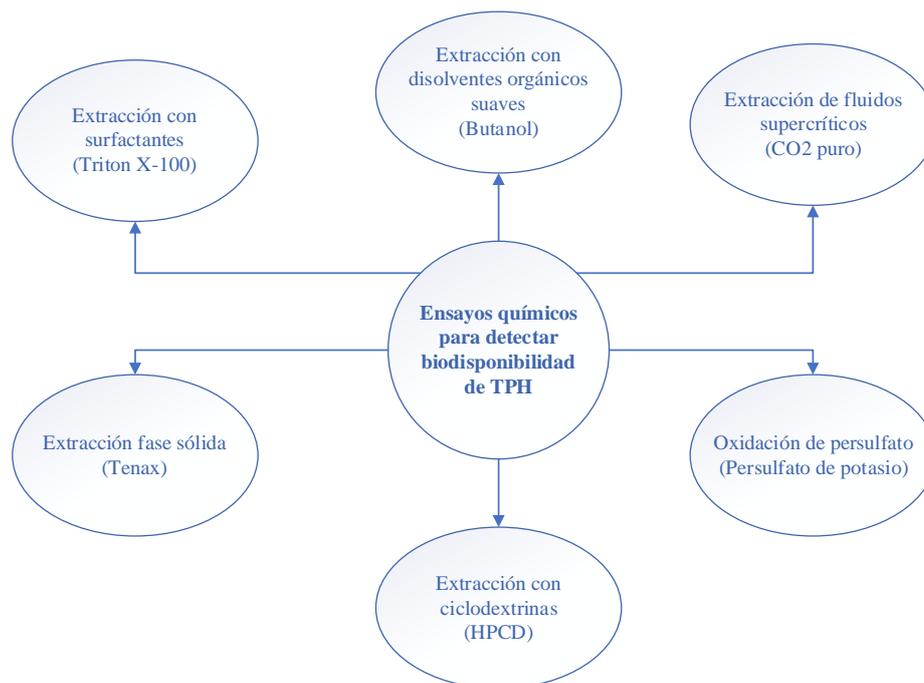


Figura 7. Métodos químicos no exhaustivos comúnmente utilizados para detectar la biodisponibilidad de TPH en ambientes contaminados

Fuente: (Kuppusamy et al. 2020a).

Elaboración propia

- Otros indicadores biológicos y fisicoquímicos

Los ensayos biológicos permiten medir la respuesta de biodegradación de las muestras contaminadas por acción del microbiota. Por lo tanto, este enfoque da una relación directa de la biodisponibilidad de la muestra contaminada (Kuppusamy et al. 2020a).

La técnica de remediación de suelo utilizando fertilizantes que adicionan elementos como el fósforo, nitrógeno y potasio, está relacionado a la actividad de las bacterias heterótrofas y bacterias hidrocarburo-degradantes, que utilizan estos nutrientes para degradar el hidrocarburo dispersado en el suelo (Chorom, Sharifi, y Motamedi 2010).

Mediante la caracterización del suelo contaminado se puede plantear el muestreo y determinar qué tecnología puede aplicarse. Entre los principales parámetros se puede nombrar la permeabilidad y porosidad del suelo, tipo de suelo y propiedades físicas y químicas de los contaminantes, que permiten el análisis de la toxicidad para los receptores como son seres humanos, flora o fauna (Chan-Quijano et al. 2015)

(Ñústez Cuartas, Paredes Cuervo, y Cubillos Vargas 2014) indica los rangos óptimos para lograr la degradación óptima mediante procesos de biorremediación, detallado en la Tabla 2.

Tabla 2
Rangos óptimos de parámetros fisicoquímicos y biológicos para un proceso de biorremediación

Propiedad	Rango
Temperatura (°C)	18-30°
pH (unidades)	6-8
Humedad (% capacidad de campo)	20-75%
Nutrientes N:P:K	20:20:1
Microorganismos degradadores (UFC)	10 ⁶ – 10 ⁸

Fuente: (Ñúñez Cuartas, Paredes Cuervo, y Cubillos Vargas 2014).
 Elaboración propia

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, en la Tabla 3 se detallan los parámetros más útiles para iniciar y dar seguimiento a los procesos de biorremediación, está dividido en parámetros biológicos y fisicoquímicos, señalando el objetivo que cumple cada uno de estos parámetros en el proceso de remediación. El parámetro más comúnmente empleado para dar seguimiento a un proceso de remediación es la concentración de TPH; sin embargo, otros parámetros como recuentos microbianos, concentración de nutrientes y textura de suelo, es de vital importancia para alcanzar niveles altos de degradación de hidrocarburos.

Tabla 3
Parámetros biológicos y fisicoquímicos para dar seguimiento a los procesos de remediación

Parámetro	Unidades	Método	Objetivo en la remediación	Fuente
BIOLÓGICOS				
Población microbiana heterótrofa y degradadora de hidrocarburos	UFC/g	Dilución en placa	Verificar la actividad de los microorganismos autóctonos o añadidos y así propiciar la biodegradación de los contaminantes.	(Ponce Contreras 2014)
Respirometría	mg C-CO ₂ /g	Técnica de incubación del suelo en jarras, el CO ₂ es absorbido en una solución de NaOH y cuantificado por titulación con HCl.	Es un índice de la actividad microbiana al medir el consumo de oxígeno por parte de los microorganismos que degradan y oxidan un sustrato orgánico convirtiéndolo en CO ₂ .	(Balba, Al-Awadhi, y Al-Daher 1998; Namkoong et al. 2002; Ponce Contreras 2014)
Toxicidad mediante bioluminiscencia	EC50	Test de Microtox, concentración de la muestra en la que se observa una disminución del 50% de la emisión de luz original de <i>Vibrio fischeri</i> .	Se considera como una medida del metabolismo de actividad de la célula. Por lo tanto, una disminución de la actividad metabólica en presencia de TPH tiene relación a una disminución proporcional de la bioluminiscencia. Evalúa la biodisponibilidad de los TPH	(Jiang et al. 2017; Kuppusamy et al. 2020a).
FISICOQUÍMICOS				

Textura del suelo	%	Técnica de la sedimentación según Gee y Bauder (1986).	Permite conocer la cantidad relativa de arenas, limos y arcillas. La estructura del suelo afecta directamente la capacidad de campo, ingreso de aire, movilidad de nutrientes y del contaminante durante la biodegradación.	(Ponce Contreras 2014)
Humedad y la capacidad de campo	(% p/p)	ASTMD2216	Al conocer la cantidad de agua que existe en un suelo y la cantidad máxima para alcanzar el estado de saturación, se definen programas de riego para mantener viables a los microorganismos	(Ponce Contreras 2014)
Carbono orgánico total (COT)	%	Mediante un analizador de carbono con una cámara de combustión y un detector de infrarrojo.	Los valores de COT cercanos a cero garantizan que no hay acumulación de contaminantes recalcitrantes, capacidad de acumulación o toxicidad a comparación de los resultados iniciales.	(Ponce Contreras 2014; García-Martínez 2005)
Nitrógeno total (NT)	mg/g	Método Micro-Kjeldahl (Modificado por Bremner, 1965).	Elemento para estimular el crecimiento de los microorganismos.	(Ponce Contreras 2014)
Fosfatos		Método de Bray (desarrollado por Bray y Kurtz, 1945) por colorimetría	Sirve como índice del P aprovechable en suelos con pH neutro y ácido	(Ponce Contreras 2014)
Ph	UpH	EPA 9045D	Permite determinar el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando la solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo.	(Ponce Contreras 2014)

Fuente: Varias
Elaboración propia

6.6 Evaluación de calidad de suelos remediados basado en nivel de riesgo para la salud humana y ambiente

La remediación sustentable viene de la mano de la evaluación de la eficiencia del proceso realizado mediante el monitoreo de los cambios en los contaminantes, metabolitos y monitoreando los cambios en las funciones del suelo antes y después de la remediación. Por este motivo, es necesario desarrollar indicadores que permitan monitorear adecuadamente la reducción de contaminantes y la recuperación de la calidad del suelo.

- Indicadores fisicoquímicos

Desde 1990 se han desarrollado sistemas de evaluación de la calidad del suelo en diferentes jurisdicciones alrededor del mundo, basados en parámetros seleccionados. Dentro de más de 60 esquemas importantes de evaluación de la calidad del suelo, los parámetros fisicoquímicos utilizados con mayor frecuencia son: carbono orgánico total,

pH, P disponible, almacenamiento de agua, densidad aparente, K disponible, textura del suelo, N total, conductividad eléctrica, y capacidad de intercambio catiónico (Bünemann et al. 2018).

La normativa ambiental vigente en Ecuador, de acuerdo a la tabla 2 del AM 097 (EC 2015), establece la calidad del suelo mediante el análisis de los parámetros inorgánicos como metales pesados, parámetros orgánicos como TPH e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) y pesticidas. No se detalla en dicha tabla parámetros de los nutrientes del suelo como N, P y K, elementos importantes para el uso del suelo remediado con fines agrícolas.

A nivel mundial, (Kuppusamy et al. 2020b) menciona que las mezclas de hidrocarburos en una muestra contaminada con TPH se determinan ampliamente mediante GC × GC (Cromatografía de gases). Las metodologías utilizadas con mayor frecuencia para determinar los niveles de TPH en el ambiente son espectroscopia de fluorescencia ultravioleta, la gravimetría y la GC. La cromatografía de gases (GC) Esto detectan una amplia gama de hidrocarburos de petróleo (entre C6 y C36). Además, proporcionan selectividad y sensibilidad en la identificación y cuantificación de TPH (Wang y Fingas 1997).

Los métodos para determinación de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) no se detallan en la Reforma Libro VI Del Texto Unificado De Legislación Secundaria Del Ministerio Del Ambiente (EC 2015). Por lo mencionado, existe variación en los resultados finales de TPH al aplicar distintas metodologías y es necesario establecer la metodología que reporte resultados con menor incertidumbre, con mayor sensibilidad como lo es Cromatografía de Gases (GC).

Generalmente, los componentes de bajo peso molecular, hidrocarburos volátiles más ligeros (C5-C10), tienen un mayor efecto toxicológico debido a la mayor solubilidad y biodisponibilidad, causando un alto riesgo humanos y ecotoxicológico. Por esta razón, determinar TPH no es un indicador útil para la evaluación de riesgos ambientales potenciales; mientras que los fraccionamientos de los TPH son más confiables y ampliamente considerados para determinar cuantitativamente los efectos de los hidrocarburos de petróleo en el ecosistema (Kuppusamy et al. 2020b).

También los indicadores físicos del suelo están relacionados a su estructura, como son los parámetros de la porosidad, densidad aparente, resistencia a la penetración, capacidad de retención de agua, conductividad hidráulica, tamaño de los agregados, profundidad y la textura. Estos análisis físicos están relacionadas a las

limitaciones del crecimiento de las raíces, la brotación de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil del suelo, la transferencia y el ciclo de nutrientes (Calderón-Medina, Bautista-Mantilla y Rojas-González 2018).

- **Bioindicadores**

Un contaminante biodisponible es altamente accesible y absorbido/adsorbido por un organismo, causando efectos subletales o letales al interactuar con sitios/receptores específicos. Para el caso de los hidrocarburos de petróleo, generalmente alteran la membrana celular, lo que resulta en fluctuaciones en la fluidez, integridad y funcionamiento de la membrana en los organismos (Kuppusamy et al. 2020b).

Stankovic y Stankovic (2013) describen a un bioindicador como, “un organismo o una parte de un organismo o una comunidad de organismos, que contiene información sobre los aspectos cuantitativos de la calidad del ambiente; La exposición de los organismos se puede medir por niveles o efectos”.

A continuación, se mencionan los bioindicadores que pueden ser utilizados para evaluar la calidad de suelos remediados en la Amazonía ecuatoriana (ver Tabla 4).

Tabla 4

Bioindicadores útiles para la evaluación de calidad de suelos en la Amazonía ecuatoriana

Bioindicador	Descripción	Especies/metodología	Referencia
Biomasa microbiana del suelo	Se considera como un indicador del índice de calidad de fertilidad del suelo, que depende principalmente sobre la tasa de transformación de nutrientes y su disponibilidad, también de la calidad y cantidad de insumos orgánicos. Los actinomicetos de los suelos tropicales son uno de los grupos bacterianos más importantes.	Recuento microorganismos heterótrofos	(Moreira, Huising, y Bignell 2012; Pfenning y Magalhães 2000).
Bioensayos con Lombrices	Utilizados como indicadores de degradación del suelo, presentan sensibilidad a la perturbación antropogénica.	Los géneros comunes son <i>Martiodrilus</i> y <i>Aptodrilus</i> <i>Andiodrilus</i> , <i>Glossodrilus</i> , <i>Onoreodrilus</i> , <i>Aptodrilus</i> , <i>Periscolex</i> y el dominio de la familia <i>Glossoscolecidae</i> .	(Feijoo et al. 2004; Moreira, Huising, y Bignell 2012; Huera-Lucero et al. 2020)
Bioensayos con Escarabajos	Son considerados como indicadores de conservación del ecosistema, ya que participan en los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica.	Pozo-Rivera et al. (2023) determinó las especies de escarabajos <i>Canthon aequinoctialis</i> Harold, 1868 y <i>Ontherus sulcator</i> Fabricius, 1775, como las especies más abundantes en bosques naturales y ecosistemas sensibles en la Amazonía ecuatoriana.	(Tapia-Báez 2015; Pozo-Rivera et al. 2023)
biota criptogámica (líquenes y briofitas)	Han sido utilizados para evaluar el cambio climático, estabilización del suelo, fragmentación de bosques, riqueza y distribución y contaminación atmosférica.	Los géneros con mayor número de especies en un estudio en Orellana fueron <i>Lejeunea</i> , <i>Plagiochilla</i> , <i>Coenogonium</i> , <i>Ocellularia</i>	(Salavarría Loor 2017)
Toxicidad mediante bioluminiscencia	El test estandarizado Microtox, combinado con pruebas físicoquímicas y ensayos biológicos se ha aplicado para evaluar los efectos de los hidrocarburos. (HC) en un suelo arcilloso contaminado	<i>Vibrio fischeri</i>	(Chaîneau et al. 2003; Girotti et al. 2008)
Bioensayos con Anfibios	Los anfibios son altamente sensibles a la contaminación y cambios ambientales, la presencia de hidrocarburos provoca en los anfibios alteraciones en la respiración cutánea y procesos de transpiración.	Rana arbórea de Alfaro (<i>Boana alfaroi</i>) y la Rana de casco del Napo (<i>Osteocephalus fuscifacies</i>).	(Flores Andrade et al. 2022; Sanabria, Quiroga, y Martino 2012)

Fuente: varios
Elaboración propia

7. Control de uso de suelo remediado certificado reincorporado al ambiente

Cada suelo contaminado en cierto sitio se comporta de manera diferente ante un mismo contaminante y es el tratamiento aplicado el que define las condiciones finales. Es importante mencionar que los contaminantes residuales presentan un comportamiento diferente cuando se intemperizan y es necesario evaluar el área

restaurada durante un lapso de tiempo que permita definir el uso de suelo y el tipo de plantas que mejor se adapta para la producción agrícola (Morales-Bautista et al. 2016).

Morales-Bautista et al. (2019) concluye que el análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo remediado e intemperizado indica que, aunque el tratamiento de remediación y la exposición al ambiente durante un año llevaron el suelo a cumplir con los valores establecidos en la normativa ambiental, estos procedimientos no fueron suficientes para equiparlo con los parámetros del suelo testigo. Se observaron cambios en la textura y pH del suelo remediado después del proceso de remediación, los cuales no se recuperaron con el tiempo. Además, se vio afectado el contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, factores vinculados con la fertilidad del suelo. La evaluación posterior a la restauración permitió identificar actividades efectivas para restablecer la fertilidad del suelo, como la adición de nutrientes y materiales que mejoran su capacidad de retención de agua.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es la comunicación ambiental, de acuerdo a Kaplún (2010), este elemento tiene como objetivo alterar el estado de conocimiento del receptor, ya sea solo buscando informar o en algunos casos transformar su pensamiento y acción, relacionado el concepto de comunicación ambiental con el de educación ambiental.

El manejo sustentable de los ecosistemas forestales debe mantener un enfoque en la participación organizada, elaboración de acuerdos colectivos, construcción democrática de decisiones, sin dejar de lado la significación y la comprensión social respecto de la problemática ambiental (Cid 2016).

7.1 Reparación integral

La reparación integral es un derecho cuyo objetivo es disminuir el alcance de los daños y perjuicios ocasionados a las víctimas y necesidades individuales y colectivas de los afectados, con especial consideración a los grupos vulnerables (EC Corte Constitucional del Ecuador 2013).

La reparación integral es reconocida internacionalmente en los principios relativos por la Corte Penal Internacional y principios básicos de la ONU, quien define a la reparación integral como “Una reparación adecuada, efectiva y rápida tiene por finalidad promover la justicia, remediando las violaciones manifiestas de las normas internacionales de derechos humanos o las violaciones graves del derecho internacional humanitario” (ONU Asamblea General 2005).

La reparación integral comprende modalidades individuales y colectivas para la reparación, entre las individuales se encuentra indemnizaciones monetarias, rehabilitación y restitución y modalidades de reparación colectiva como medidas de satisfacción y garantías de no repetición, entre otras (Granda Torres y Herrera Abrahan 2020).

La reparación por un daño material incluye la compensación por la pérdida de ingresos de las personas afectadas, gastos efectuados relacionados a la afectación y otras consecuencias. Mientras que la reparación por el daño inmaterial comprende la compensación por aflicciones o sufrimientos causados a las personas afectadas, también incluye las alteraciones de carácter no pecuniario (Granda Torres y Herrera Abrahan 2020).

Capítulo segundo

Panorama de suelos contaminados con hidrocarburos y procesos de remediación en la Amazonía ecuatoriana

Los accidentes de la explotación petrolera más frecuentes en Ecuador, durante el periodo 1964 a 1990, fueron los derrames de piscinas y oleoductos, que generaron contaminación directa en las áreas afectadas y drenajes hacia esteros o ríos (Martín Beristain, Fernández, y Páez Rovira 2009), desencadenando graves impactos negativos para la sociedad y el ambiente. La Constitución del Ecuador y Código Orgánico del Ambiente está comprometida con la reparación integral de los daños ambientales. El organismo que regula la reparación ambiental es el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) y para el caso de suelos contaminados con hidrocarburos, la remediación se verifica con el cumplimiento de los límites permisibles de la normativa establecidos en la tabla 1 y 2 del anexo 2 del Acuerdo Ministerial 097-A.

En el presente capítulo se describe brevemente la actividad hidrocarburífera y los principales derrames a lo largo de la historia petrolera en Ecuador. Continúa con la revisión del marco legal relacionado a los daños ambientales y reparación integral en Ecuador, luego se especifica la normativa que rige la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Para finalizar, se menciona ciertas técnicas de remediación para suelos contaminados con hidrocarburos, aplicadas en Ecuador.

1. Actividad hidrocarburífera en Ecuador

De acuerdo con registros de la extracción petrolera en Ecuador, se menciona que el primer pozo petrolero fue perforado en la península de Santa Elena en 1911 (Estrada Ruíz 2001). La primera empresa que llegó al país para la explotación, comercialización y refinación del denominado “oro negro” fue Anglo, iniciando sus actividades desde 1922 y durante 67 años específicamente en la península de Santa Elena (Estrada Ruíz 2001).

El primer pozo comercial perforado en la Amazonía fue llevado a cabo por la empresa Texaco en el año 1967. Luego, las mayores obras de infraestructura fueron el Sistema de Oleoducto Trans Ecuatoriano SOTE y la Vía Coca. Las operaciones de la

empresa Texaco alcanzó hasta 1990, la extracción del 88% del total de la producción nacional de petróleo, mediante la construcción de 22 estaciones y perforación de 399 pozos (Solórzano et al. 2016).

En el sector de hidrocarburos, en 1993 se promulga la ley 26221, Ley Orgánica de Hidrocarburos, para promover y regular las actividades de hidrocarburos sobre la libre competencia y el acceso a la actividad económica con la finalidad de lograr el bienestar de la persona humana y el desarrollo nacional (Villalobos y Sánchez 2022). En el año 2010 se reformó la Ley de Hidrocarburos y la Ley de Régimen Tributario Interno, con lo que se abrió la puerta para la introducción del contrato de prestación de servicios, que permitió la renegociación de los contratos con las empresas petroleras (Acosta Espinoza 2011).

La economía ecuatoriana está vinculada a los ingresos petroleros. El nivel más alto de producción se alcanzó en el año 2014, con una producción de 203,142.17 barriles por día (bpd). Luego, para el año 2020 y 2021, la producción disminuyó notablemente, alcanzando 172,598.58 bpd. En 2022, la producción se recuperó ligeramente, llegando a los 175,548.98 bpd (Nuñez et al. 2023).

Actualmente, EP PETROECUADOR se encarga de la exploración y explotación de petróleo crudo y gas natural en 23 bloques, distribuidos en el Litoral y Amazonía ecuatoriana, aportando con más del 80% de la producción petrolera ecuatoriana de 30° API (EC EP PETROECUADOR 2023).

De acuerdo a la Asociación de la Industria Hidrocarbúfera del Ecuador (AIHE), el bloque Auca registró la mayor producción total de Petroamazonas durante el período de 2016-2022, con un total de 499,777.45 barriles de petróleo, seguido por el Bloque Shushufindi, con una producción de 478,651.09 barriles de petróleo (Nuñez et al. 2023).

Para el año 2007, el precio del barril del petróleo incrementó, elevando la inversión pública en la generación de plazas de trabajo para la investigación y extracción de hidrocarburos. Luego, entre 2014 y 2015, las inversiones empezaron a decaer, generando desbalances financieros que perjudicaron la economía nacional (Solórzano et al. 2016).

Las reservas petroleras probadas del Ecuador tuvieron un crecimiento promedio anual del 10.90% desde 1980 hasta 2002. Luego de ese período, las reservas probadas han disminuido a una tasa interanual promedio de -4.62% (Nuñez et al. 2023). Mateo & García, (2014) mencionan que esta caída podría deberse a que “Ecuador ha alcanzado la

cúpula de la campana de Hubbert, lo que significa que se ha explotado la mitad o más de sus reservas”.

2. Contaminación del suelo por derrames de hidrocarburos en Ecuador

Durante las operaciones de Texaco en Ecuador, los derrames de petróleo fueron un problema recurrente de gestión de residuos y como resultado, la empresa petrolera declaró la pérdida de 296 821 barriles en total, a lo largo del SOTE, entre 1972 y 1989. Texaco afirma que esta cantidad representa el 0,02 % de la cantidad total de petróleo crudo transportado a través del oleoducto; sin embargo, la cantidad derramada a lo largo del SOTE supera al derrame de Exxon Valdez en 1989 (Peterson et al. 2003). Las operaciones de limpieza que realizó Texaco fue la recuperación de cierta cantidad del crudo derramado, pero no se llegó a una remediación efectiva (Fritz 2020).

A lo largo de casi tres décadas de operación, Texaco realizó aproximadamente 880 piscinas sin revestimiento para el manejo regular de desechos en la región amazónica. Esto desencadenó una fuente importante de contaminación de los ecosistemas sensibles del bosque tropical (2020). La gestión de residuos realizada por la empresa Texaco provocó una grave degradación de suelos, aguas subterráneas y vías fluviales en la región a través de la contaminación temporal y crónica (Kimerling 2006). El Tribunal Constitucional de Ecuador en 2018, condenó a Chevron, como el sucesor legal de Texaco, por daños al ambiente. Sin embargo, la corte del Distrito de la Haya falló a favor de la corporación de Chevron (Fritz 2020).

EP PETROECUADOR menciona que durante el periodo 2000-2014, se han registrado un total de 539 derrames de petróleo en la Amazonia ecuatoriana. El Ministerio del Ambiente de Ecuador menciona que los derrames producidos se deben a distintas causas: 28 % por corrosión, 26 % por atentados, 17,8 % por fallas mecánicas, 14,5 % sin dato de causa, 11,8 % por fallas humanas y el 1,5 % por desastres naturales (EC EP PETROECUADOR 2015).

Uno de los mayores derrames registrados ocurrió en el año 2013 por desastres naturales, donde se vio afectado el Rio Coca ubicado en la Amazonía ecuatoriana. El evento produjo el derrame de 11.400 barriles de crudo. En el año 2014, debido a un deslizamiento de tierra donde se vio afectado el Rio Parahuaico, se derramó 2000 barriles crudo, afectando a 200 familias del sector (Sepúlveda Aguirre et al. 2018).

En abril 2020, durante la pandemia COVID-19 se produjo el derrame de petróleo más grande de las últimas décadas, más de 105 comunidades kichwa ribereñas al río Coca y Napo en la Provincia de Orellana, tuvieron que sobrellevar el derrame, donde se

vertieron 15 800 barriles de crudo sobre sus ríos. La caída de la Cascada de San Rafael, ocasionada por deficiencias en la gestión de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, provocó la ruptura de una tubería del Sistema de Oleoductos Transecuatoriano (SOTE), el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) y el poliducto Shushufindi-Quito. Este incidente puso en riesgo la vida de más de 27.000 personas debido a la contaminación de sus fuentes de agua y alimentos (Céspedes Melo 2023).

3. Marco legal de Ecuador relacionado a daños ambientales y su restauración

La Constitución de la República del Ecuador en su artículo 396 menciona:

“El Estado adoptará las políticas y medidas oportunas que eviten los impactos ambientales negativos, cuando exista certidumbre de daño... La responsabilidad por daños ambientales es objetiva. Todo daño al ambiente, además de las sanciones correspondientes, implicará también la obligación de restaurar integralmente los ecosistemas e indemnizar a las personas y comunidades afectadas” (EC 2008).

Por lo tanto, Ecuador está comprometido con la restauración integral e indemnización por los daños ambientales, esto se enfatiza en el Código Orgánico del Ambiente del Ecuador (CODA). que describe los principios ambientales, entre ellos la reparación integral y lo define en su Art. 9 como:

“conjunto de acciones, procesos y medidas, incluidas las de carácter provisional, que aplicados tienden fundamentalmente a revertir impactos y daños ambientales; evitar su recurrencia; y facilitar la restitución de los derechos de las personas, comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades afectadas” (EC 2017).

Además, el CODA detalla las medidas a tomar cuando los daños ambientales ocurren, siguiendo el orden señalado en su Art. 292:

“...Cuando los daños ambientales hayan ocurrido, el operador responsable deberá adoptar sin demora y sin necesidad de advertencia, requerimiento o de acto administrativo previo, las siguientes medidas en este orden: 1. Contingencia, mitigación y corrección; 2. Remediación y restauración; 3. Compensación e indemnización; y 4. Seguimiento y evaluación. Los operadores estarán obligados a cumplir con la reparación, en atención a la presente jerarquía, con el fin de garantizar la eliminación de riesgos para la salud humana y la protección de los derechos de la naturaleza. Cuando se realice la reparación ambiental, se procurará llegar al estado anterior a la afectación del proyecto, obra o actividad. Si por la magnitud del daño y después de la aplicación de las medidas, eso no fuera posible, se procederá con las medidas compensatorias e indemnizatorias” (EC 2017).

En resumen, el marco legal relacionado al control de la contaminación con hidrocarburos, medidas de prevención y remediación, se basa en lo siguiente:

Tabla 5

Normativa legal vigente relacionado a la remediación de suelos en Ecuador

Normativa	Objetivo
-----------	----------

Constitución de la República del Ecuador (EC 2008).	Norma y regula deberes, derechos y obligaciones de todos los elementos, entes y sujetos que conforman el estado; así en lo que corresponde a los derechos de la naturaleza.
Ley de Hidrocarburos (EC 2018).	Marco legal para las actividades petroleras en el Ecuador, establece principios y obligaciones para los contratos en el sector hidrocarburífero.
Ley de gestión Ambiental. Título I: ámbito y principios de la gestión ambiental. Art. 1 (EC 2004).	Establece los principios y directrices de política ambiental; determina las obligaciones, responsabilidades, niveles de participación de los sectores público y privado en la gestión ambiental y señala los límites permisibles, controles y sanciones
Anexo 2 del Libro VI del Texto Unificado De Legislación Secundaria Del Ministerio Del Ambiente: Norma De Calidad Ambiental Del Recurso Suelo Y Criterios De Remediación Para Suelos Contaminados (MAATE, 2015).	La normativa determina los objetivos y parámetros de calidad ambiental del suelo a ser considerados para diferentes usos de este recurso, el procedimiento para determinar los valores iniciales de referencia respecto a la calidad ambiental del suelo. Los límites permisibles de contaminantes en función del uso del suelo, los métodos y procedimientos para la determinación de los parámetros de calidad ambiental del suelo y procedimientos para la Remediación de suelos contaminados
NTE INEN 2266:2013 Transporte, Almacenamiento y Manejo de Materiales Peligrosos (INEN 2013).	Establecer los requisitos y precauciones que se deben tener en cuenta para el transporte, almacenamiento y manejo de productos químicos peligrosos
Reglamento para la prevención y control de la contaminación por sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos y especiales. Corresponde al Título V del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente – TULSMA (EC 2011).	Establecer los métodos y procedimientos para la determinación de las características de los desechos peligrosos y especiales y los lineamientos para su adecuada gestión

Fuente: Varios
Elaboración propia

4. Normativa para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador

En el Código Orgánico Ambiental, en su artículo 201 indica: “El control y seguimiento ambiental puede efectuarse por medio de los siguientes mecanismos: 1. Monitoreos; 2. Muestreos; 3. Inspecciones; 4. Informes ambientales de cumplimiento; 5. Auditorías Ambientales; 6. Vigilancia ciudadana o comunitaria; y, 7. Otros que establezca la Autoridad Ambiental Competente. En las normas secundarias que emita la Autoridad Ambiental Nacional se establecerá el mecanismo de control que aplique según el impacto generado conforme lo previsto en este Código”. (EC 2017)

La gestión para la reparación integral por parte del Ministerio del Ambiente del Ecuador, inició en el año 2005, basado en el marco de la ley de Cuenta Especial de Reactivación Productiva y Social (CEREPS) y a partir del año 2008, surge el Programa de Reparación Ambiental y Social (PRAS) y ha generado herramientas técnico jurídicas como metodologías de reparación, sistema de Información, metodología para la valoración económica de pasivos ambientales y social, entre otras (EC MAATE 2017).

Por lo tanto, el Programa de Reparación Ambiental y Social (PRAS) del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) elabora herramientas y metodologías para implementar la Política Pública de Reparación Integral, sobre territorios que han sido afectados por la presencia de pasivos ambientales, que devienen en el desarrollo de problemáticas socioambientales (EC MAATE 2015).

Los Planes de Reparación Integral (PRI) son herramientas diseñadas para restituir los derechos vulnerados, tanto de la naturaleza como de las comunidades, que han sido afectadas por daños ambientales no abordados o pasivos ambientales. Son elaborados de acuerdo a los resultados de la investigación de los componentes biofísicos y socioeconómicos de las zonas de estudio y se ejecutan a través de un plan de acción (EC MAATE 2015).

El monitoreo y evaluación dentro de los PRI sirve para describir las variaciones en la concentración de los elementos que componen la calidad del ambiente biofísico, una vez que se inicie el proceso de control y eliminación de las fuentes de contaminación, como evidencia de cumplimiento de los objetivos de la restauración (EC MAATE 2015).

La emisión del pronunciamiento sobre desalojo de suelos y taponamientos de fuentes de contaminación es un procedimiento dirigido a solicitar la autorización para el desalojo y/o la certificación de suelos remediados con el fin de taponar fuentes contaminadas u otros sitios de disposición final. Esta solicitud se realiza una vez que los suelos cumplan con los límites máximos permisibles establecidos en la tabla 1 y 2 del anexo 2 del Acuerdo Ministerial 097-A o la normativa correspondiente. Este proceso se lleva a cabo dentro de un periodo determinado, que abarca desde el inicio hasta la finalización del proceso de remediación. Los criterios de remediación de la normativa ambiental vigente se describen en la tabla 6.

Tabla 6
Criterios de remediación (Valores máximos permisibles)

Parámetro	Unidades*	USO DEL SUELO			
		Residencial	Comercial	Industrial	Agrícola
Parámetros Generales					
Conductividad	uS/cm	200	400	400	200
pH	-	6 a 8	6 a 8	6 a 8	6 a 8
Relación de adsorción de Sodio (Índice SAR)	-	5	12	12	5
Parámetros inorgánicos					
Arsénico	mg/kg	12	12	12	12
Sulfuro	mg/kg	-	-	-	500
Bario	mg/kg	500	2000	2000	750
Boro (soluble en agua caliente)	mg/kg	-	-	-	2
Cadmio	mg/kg	4	10	10	2
Cobalto	mg/kg	50	300	300	40

Cobre	mg/kg	63	91	91	63
Cromo Total	mg/kg	64	87	87	65
Cromo VI	mg/kg	0.4	1.4	1.4	0.4
Cianuro	mg/kg	0.9	8	8	0.9
Estaño	mg/kg	50	300	300	5
Fluoruros	mg/kg	400	2000	2000	200
Mercurio	mg/kg	1	10	10	0.8
Molibdeno	mg/kg	5	40	40	5
Níquel	mg/kg	100	100	50	50
Plomo	mg/kg	140	150	150	60
Selenio	mg/kg	5	10	10	2
Talio	mg/kg	1	1	1	1
Vanadio	mg/kg	130	130	130	130
Zinc	mg/kg	200	380	360	200
Parámetros orgánicos					
Aceites y grasas	mg/kg	500	<2500	<4000	<4000
Benceno	mg/kg	0.08	5	5	0.03
Etilbenceno	mg/kg	0.1	20	20	0.1
Estireno	mg/kg	5	50	50	0.1
Tolueno	mg/kg	0.37	0.8	0.8	0.08
Xileno	mg/kg	2.4	11	20	0.1
PCBs	mg/kg	1.3	33	33	0.5
Clorofenoles (cada tipo)	mg/kg	0.5	5	5	0.05
Fenoles (total)	mg/kg	3.8	3.8	5	3.8
Clorinados alifáticos (cada tipo)	mg/kg	5	50	50	0.1
Hidrocarburos totales (TPH)	mg/kg	230	620	620	150
Clorobenzenos (cada tipo)	mg/kg	2	10	10	0.05
Tetracloroetilenos	mg/kg	0.2	0.5	0.6	0.1
Tricloroetileno	mg/kg	3	30	30	0.1
Atrazina	mg/kg	0.005	0.005	0.005	0.005
Carbofuran	mg/kg	0.01	0.01	0.01	0.01
Alifáticos no clorinados (cada tipo)	mg/kg	-	-	-	0.3
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs)					
Antraceno	mg/kg	-	-	100	0.1
Benzo(a)antraceno	mg/kg	1	1	10	0.1
Benzo(a)pireno	mg/kg	0.7	10	0.7	0.1
Benzo(b)fluoranteno	mg/kg	1	0.7	10	0.1
Benzo(k)fluoranteno	mg/kg	1	10	10	0.1
Dibenzo(a,h)antraceno	mg/kg	1	10	10	0.1
Indeno(1,2,3-cd)pireno	mg/kg	1	10	10	0.1
Fluoranteno;	mg/kg	-	10	100	0.1
Naftaleno;	mg/kg	0.6	-	22	0.1
Pireno;	mg/kg	10	22	100	0.1
Criseno;	mg/kg	-	-	100	0.1
Fenantreno;	mg/kg	5	50	50	0.1
Pesticidas					
Alfa BCH	mg/Kg	0.01	0.01	0.01	0.01
Beta BCH	mg/Kg	0.01	0.01	0.01	0.01
*Gamma BCH	mg/Kg	0.01	0.01	0.01	0.01
Delta BCH	mg/Kg	0.01	0.01	0.01	NA
Heptacloro	mg/Kg	0.01	0.01	0.01	0.01
Aldrin	mg/Kg	0.1	0.1	0.1	0.1
Heptacloro epoxido isomero B	mg/Kg	0.1	0.01	1	0.01
Endosulfan I	mg/Kg	0.1	0.1	0.1	0.1
4,4 DDE	mg/Kg	0.1	0.1	0.1	0.1
4,4 DDD	mg/Kg	0.1	0.1	0.1	0.1
4,4 DDT	mg/Kg	0.1	0.1	0.1	0.1
Dieldrin	mg/Kg	0.1	0.1	0.1	0.1
Endrin	mg/Kg	0.01	0.01	0.01	0.01
Endosulfan II	mg/Kg	0.1	0.1	0.1	0.1
Endrin aldehído	mg/Kg	0.01	0.01	0.01	0.01
Endosulfan sulfato	mg/Kg	0.1	0.1	0.1	0.1

Fuente: (EC 2015).

*Concentración en peso seco de suelo

El proceso para obtener la autorización de desalojo y/o certificación de suelos remediados para el taponamiento de fuentes contaminadas u otros sitios de disposición final, se detalla en la figura 8 (EC 2023):

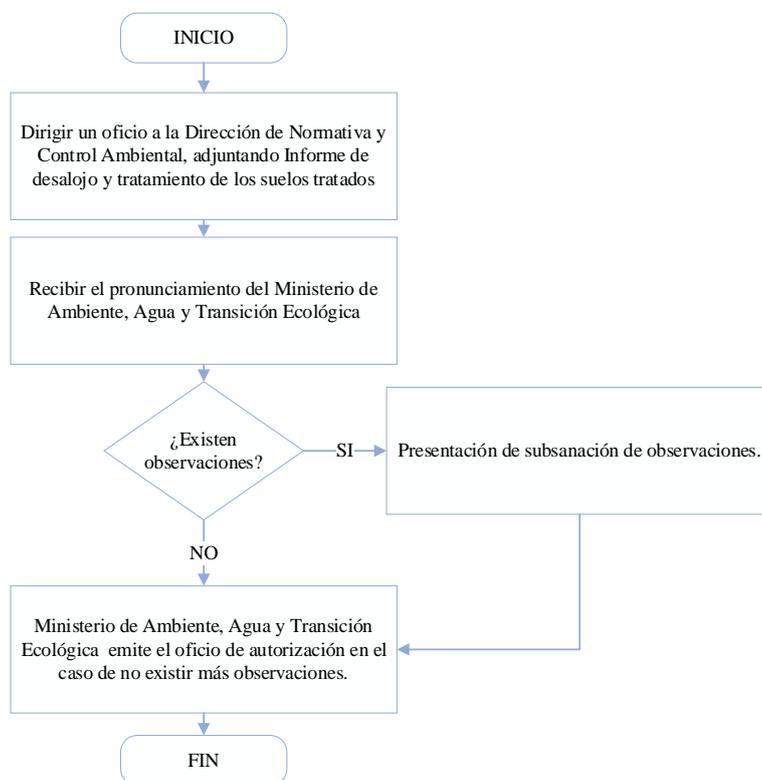


Figura 8. Proceso para la autorización de desalojo y/o certificación de suelos remediados

Fuente: (EC 2023)

Elaboración propia

Según lo indicado, la normativa ambiental vigente en Ecuador establece criterios de remediación basados en concentraciones de compuestos químicos investigados en otros países para asegurar el bajo riesgos para los seres vivos ante la exposición de suelos remediados. Sin embargo, normativas internacionales como Australia, cuentan con amplias investigaciones toxicológicas tanto para la salud humana como para los ecosistemas, que pueden utilizarse como pauta para iniciar estudios específicos para sitios contaminados en Ecuador.

5. Técnicas de remediación aplicadas en la Amazonía ecuatoriana

La biorremediación para tratar suelos contaminados con hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana es aplicada desde la década de 1990, de derrames que se han presentado desde 1970 hasta la actualidad. Gran parte del suelo contaminado con crudo

no puede ser recuperado en una estación y reinyectarlo a la producción. Por lo tanto, el suelo es recogido en volquetas para transportarlo a explanadas para su remediación (Cuvi y Bejarano 2015).

Varias empresas nacionales aplicaron tecnologías de biorremediación con el fin de realizar, de forma más eficiente, la limpieza de los numerosos derrames de petróleo ocurridos en el país. Por ejemplo, en la limpieza de los derrames en Sacha, Orellana y de la Laguna de Papallacta, en la provincia de Pichincha, realizados por el Proyecto de Eliminación de Piscinas Contaminadas en el Distrito Amazónico (PEPDA) y Ecuavital (Vizúete-García et al. 2020). Fabelo (2017) menciona que muchas compañías que realizan técnicas de biorremediación importan microorganismos desde Europa y Estados Unidos sin realizar sin un estudio previo antes de su uso, limitando la actividad de bacterias nativas y escaso conocimiento sobre su capacidad biodegradadora y diversidad de bacterias aisladas de sitios contaminados con hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana.

Las técnicas de biorremediación más comúnmente empleadas son el compostaje y el *landfarming*. La selección de la técnica adecuada depende principalmente de factores como la cantidad de lluvia, el tipo de suelo y la disponibilidad de maquinaria. En ambos casos se agrega a los suelos contaminados microorganismos e insumos para que aceleren la degradación de los hidrocarburos. En el compostaje los acopios de suelos son grandes y se utiliza maquinaria para la oxigenación del suelo. Mientras que, en *landfarming* los acopios de suelo son más pequeños (Cuvi y Bejarano 2015). En la técnica *landfarming* la ventaja es que se puede manipular fácilmente y su mayor desventaja es que la operación requiere mucho espacio físico, y el tiempo de degradación es muy largo (Aldás 2014).

En el año 2009, en el sector de Santa Rosa de Quijos, Cantón El Chaco, se produjo la rotura de la tubería que alcanzó el derrame de 14000 barriles de crudo y afectó aproximadamente 180 kilómetros desde el sitio de la ruptura hasta la Planta de Agua Potable Los Álamos, ubicada en la ciudad Francisco de Orellana. En total, se remedió 36,89 hectáreas, recuperándose el 80% del crudo, la metodología de remediación aplicada para 4.996,26 m³ de suelo contaminado fue *Landfarming* (Galeas Bolaños 2013a).

Mediante oficio No. 1059-PI-OTE-2000 de Petroecuador con fecha 15 de diciembre de 2000, se menciona los trabajos realizados en el derrame por ruptura del OCP en la vía Lago Agrio-Lumbaquí, el 9 y 12 de diciembre del 2000. Petroecuador

indica que realizó el retiro manual y biorremediación de material impregnado con crudo, lavado superficial de material impregnado con productos que provoquen la separación del crudo y recolección en diques, continuando con un proceso de biorremediación (Albán Soria 2009). De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, se refleja la necesidad de la publicación de los métodos ejecutados por las empresas encargadas de la remediación de suelos en Ecuador.

Capítulo tercero

Análisis de la gestión de pasivos ambientales por contaminación con hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana

El Código Orgánico del Ambiente del Ecuador define a un pasivo ambiental como “aquel daño generado que no se ha reparado o restaurado o que a pesar de haber sido intervenido continúa presente en el ambiente convirtiéndose en un riesgo para cualquiera de sus componentes” (EC 2017). Los pasivos ambientales generan impactos al ambiente y afectan al bienestar y desarrollo sustentable de la población. Los países en desarrollo cuentan con un alto porcentaje de pasivos ambientales (Amanzholova et al. 2021).

En Ecuador, empresas petroleras como TEXACO han dejado una huella de su trabajo en forma de pasivos ambientales, los que han causado enfermedades, pobreza, corrupción, afectación al ambiente, entre otras (Oña Rocha y Gualoto Oñate 2022). Por esta razón, la remediación de pasivos ambientales es de gran importancia. Mediante la tecnología de remediación se aplica operaciones unitarias que modifique la composición de una sustancia contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas, con el objetivo de reducir la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA 1996).

En este capítulo se analiza la gestión de pasivos ambientales en la Amazonía ecuatoriana hasta el año 2022, de acuerdo a la base de datos del SIESAP. Luego, se menciona los impactos socioambientales identificados mediante revisión bibliográfica en los principales eventos de contaminación con hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana. En el siguiente tema se discute la eficiencia de remediación de los suelos contaminados mediante el estudio de caso del derrame del sector de Santa Rosa de Quijo (2009). Por último, se propone alternativas para asegurar la ausencia de riesgos para la salud humana y medio ambiente con la inclusión de análisis fisicoquímicos y biológicos a la normativa vigente.

1. Estadística gestión de pasivos ambientales en la Amazonía ecuatoriana

EC Petroamazonas EP (2011) menciona que un pasivo ambiental es un sitio contaminado por la liberación o presencia de residuos extraños o aleatorios, que no

fueron remediados a tiempo y causan efectos negativos al ambiente y su condición está relacionada con la pérdida de un activo ambiental.

En las actividades hidrocarburíferas se clasifican en fosas, piscinas y derrames. Las fosas son excavaciones que se realizan junto a los taladros para depositar los residuos generados de la actividad hidrocarburífera (petróleo, agua y otros desechos identificados como “ripios”) (Rojas V 2006). Las piscinas alojan los desechos de perforación además de lodos, agua de formación y crudo obtenido en los ensayos de rendimiento de los pozos, estos desechos expuestos al ambiente se convierte en crudo asfáltico (Rivera Morochz 1998). Un derrame se entiende como el vertido de productos petrolíferos sobre el ambiente, accidentalmente o por prácticas comunes (Marzialetti 2012).

El Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, mediante el Programa de Reparación Ambiental y Social creó el proyecto “Subsistema De Inteligencia De Estadísticas Socio Ambientales De Las Actividades Productivas (SIESAP)”. El proyecto busca informar acerca de las intervenciones dirigidas a reparar pasivos ambientales y sociales generados por diferentes actividades económicas y así promover procesos de gestión de información pública para sustentar la formulación de políticas y normativas (PRAS, 2022).

A través del SIESAP se obtuvo la base de datos de los pasivos ambientales relacionados a la explotación hidrocarburífera del Ecuador. La base de datos incorpora información de inspecciones y auditorías enviadas por la Dirección Nacional de Control Ambiental del Ministerio del Ambiente (DNCA-MAE), así como también con la información sistematizada en bases de datos remitidas por la ARCH: Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (EC MAATE 2022).

El análisis de la base de datos del SIESAP permitió representar mediante tablas, mapas y gráficos, datos relevantes acerca de los pasivos ambientales en la Amazonía ecuatoriana.

En la tabla 5 se puede observar de manera simplificada el total de pasivos ambientales por cantón de la Amazonía ecuatoriana, fuentes remediadas y pendientes con la tasa de remediación calculada para cada cantón, donde Lago agrio y Putumayo son los únicos cantones que alcanzan una tasa de remediación mayor a 10%. Mediante esta información se elaboró los mapas de la figura 7, donde se diferencia a los cantones por escala de coloración de acuerdo a pasivos totales, fuentes remediadas y fuentes pendientes de remediación.

Tabla 7
Pasivos remediados y pendientes por cantón de la Amazonía ecuatoriana

CANTON	TOTAL PASIVOS	FUENTES REMEDIADAS	FUENTES PENDIENTES	TASA DE REMEDIACIÓN
AGUARICO	51	5	46	0,11%
FRANCISCO DE ORELLANA	837	242	595	5,47%
LA JOYA DE LOS SACHAS	742	151	591	3,41%
ARAJUNO	32	0	32	0,00%
PASTAZA	1	0	1	0,00%
CASCALES	156	92	64	2,08%
CUYABENO	31		31	0,00%
GONZALO PIZARRO	28	10	18	0,23%
LAGO AGRIO	1239	578	661	13,07%
PUTUMAYO	648	448	200	10,13%
SHUSHUFINDI	620	121	499	2,74%
EL CHACO	16	9	7	0,20%
QUIJOS	7	0	7	0,00%
TENA	15	0	15	0,00%

Fuente: (EC MAATE 2022)

Elaboración propia.

En la figura 9 se sitúa el área de estudio y en la figura 10 se diferencia por intensidad de color a los cantones de la Amazonía ecuatoriana, de acuerdo con el número total de pasivos ambientales registrados hasta el año 2022. Sucumbíos con su cantón Lago agrío encabeza la lista con 1239 pasivos ambientales, seguido de Orellana, Francisco de Orellana con 837 pasivos ambientales; siendo Pastaza y Quijos los cantones con menor fuentes de contaminación. De los 14 cantones ilustrados en la figura 4, seis cantones registran una cantidad igual o mayor a 156 pasivos ambientales. Las provincias de Orellana, Sucumbíos, Napo y Pastaza cuentan con un total de 20 cantones, lo que representa que el 30 % de los cantones de estas provincias mantienen un foco de contaminación a causa de la extracción por hidrocarburos.

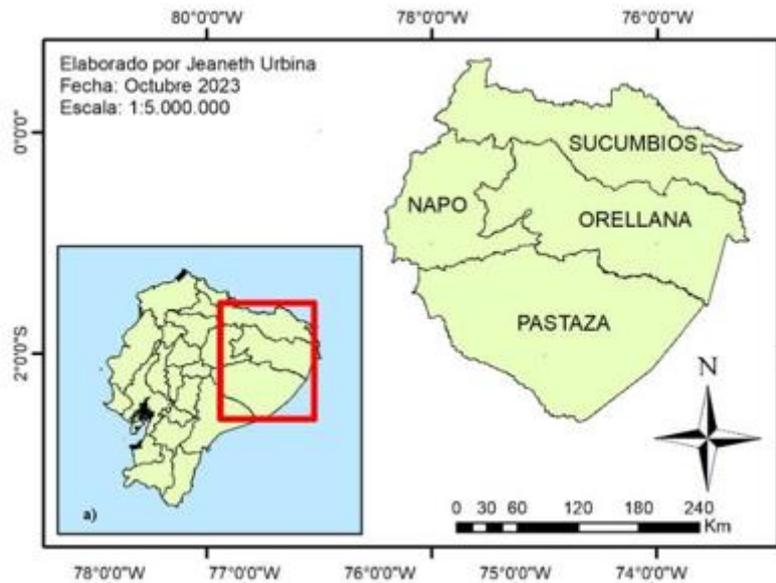


Figura 9. Área de estudio pasivos ambientales en la Amazonía ecuatoriana
Fuente: (EC MAATE 2022)
Elaboración propia.

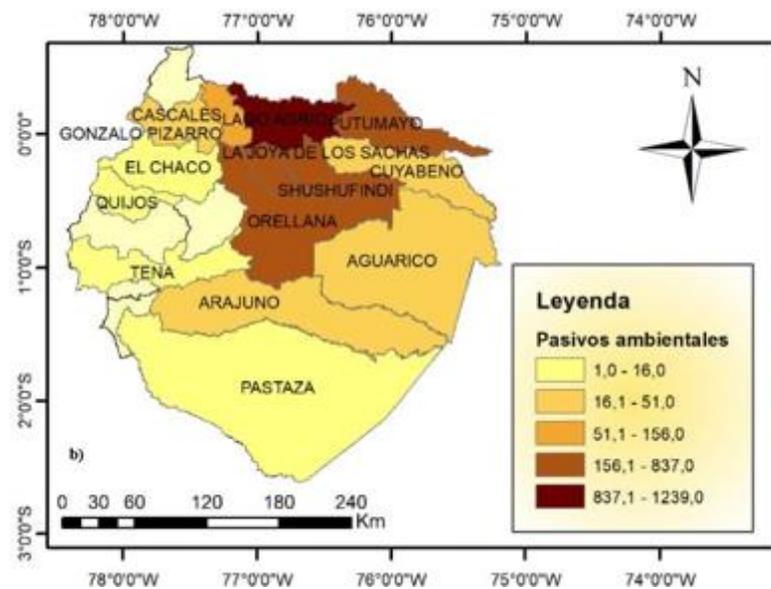


Figura 10. Pasivos ambientales en los cantones de la Amazonía ecuatoriana
Fuente: (EC MAATE 2022)
Elaboración propia.

Se representa en la figura 11 un resumen de las fuentes remediadas desde 2006 hasta 2022, la provincia con mayor cantidad de fuentes de remediadas es Sucumbíos con 578 pasivos ambientales remediados de la contaminación con hidrocarburos, seguida de Putumayo con 448 fuentes remediadas. Las provincias Pastaza y Napo registran el menor número de fuentes remediadas hasta el año 2022. Por otro lado, en la figura 12 se puede diferenciar por la escala de color los cantones de acuerdo con la

cantidad de fuentes pendientes por remediar. Los cantones con mayor número de pasivos ambientales por remediar son Lago Agrio, Shushufindi, La Joya de los Sachas y Francisco de Orellana.

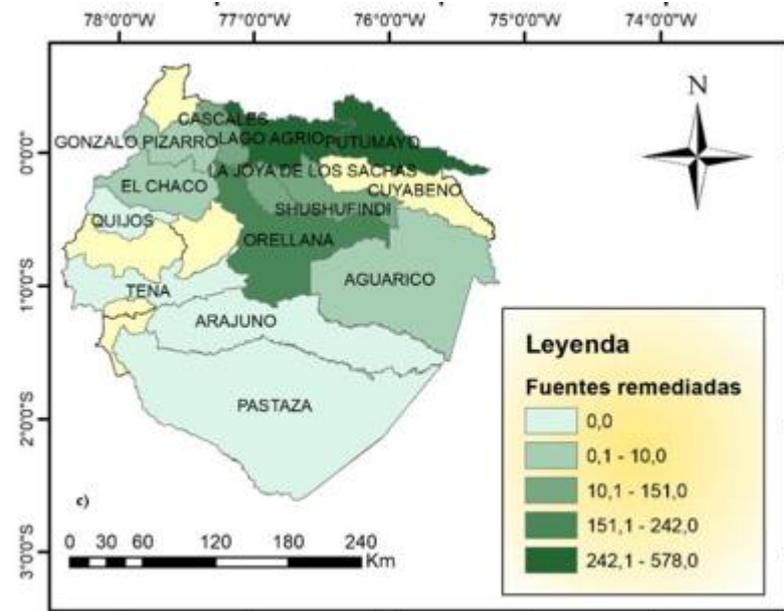


Figura 11. Fuentes remediadas en los cantones de la Amazonía ecuatoriana

Fuente: (EC MAATE 2022)

Elaboración propia.

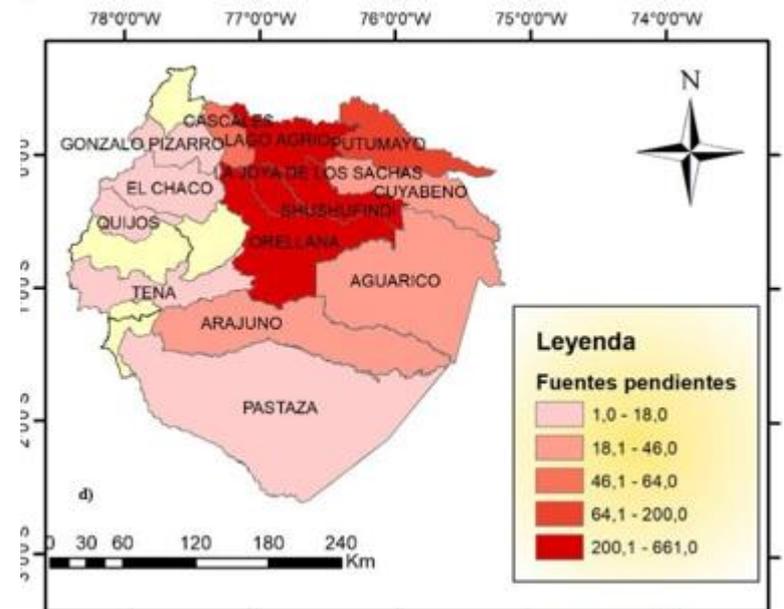


Figura 12. Fuentes pendientes de remediación en los cantones de la Amazonía ecuatoriana hasta el año 2022.

Fuente: (EC MAATE 2022)

Elaboración propia.

En la Figura 13 se grafica a los cantones de la Amazonía ecuatoriana con las fuentes remediadas registradas durante el periodo 2013 al año 2022. Se observa que los cantones con mayor gestión ambiental en los últimos 10 años han sido Lago Agrio, seguido de Putumayo y Francisco de Orellana. Sin embargo, Joya de los Sachas y Shushufindi no registran alta cantidad de pasivos ambientales remediados en los últimos años. A pesar de la gestión realizada por empresas públicas y privadas. Hasta el año 2023, Ecuador registra 2856 fuentes pendientes por remediar.

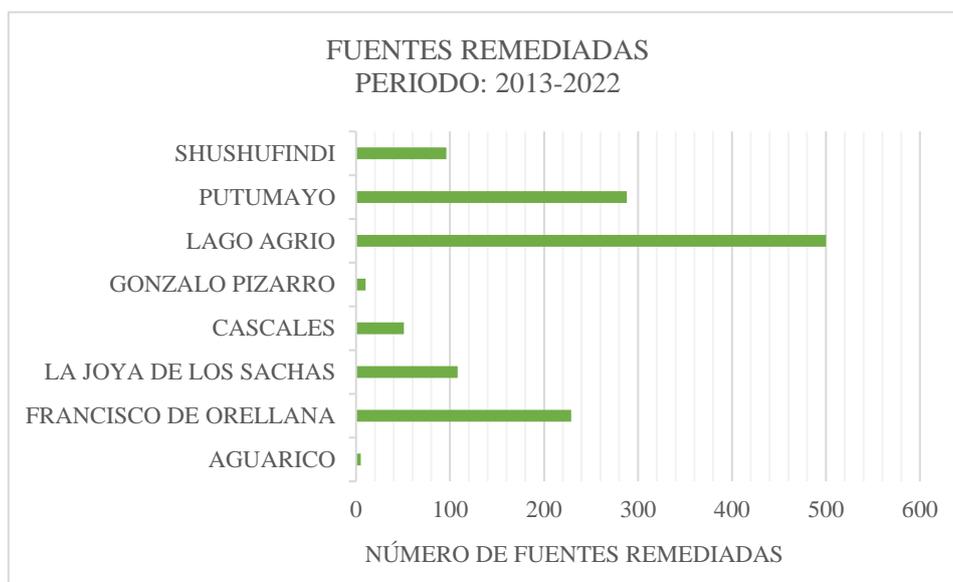


Figura 13. Fuentes contaminadas con hidrocarburos remediadas en la Amazonía ecuatoriana en el periodo 2013-2022

Fuente: (EC MAATE 2022)

Elaboración propia.

En la Figura 14 se observa el nivel de priorización socioambiental de fuentes de contaminación hidrocarburífera por remediar en el año 2022, siendo la principal fuente las Piscinas contaminadas y por lo tanto, mantienen un mayor porcentaje de priorización para la remediación de este tipo de pasivo ambiental.

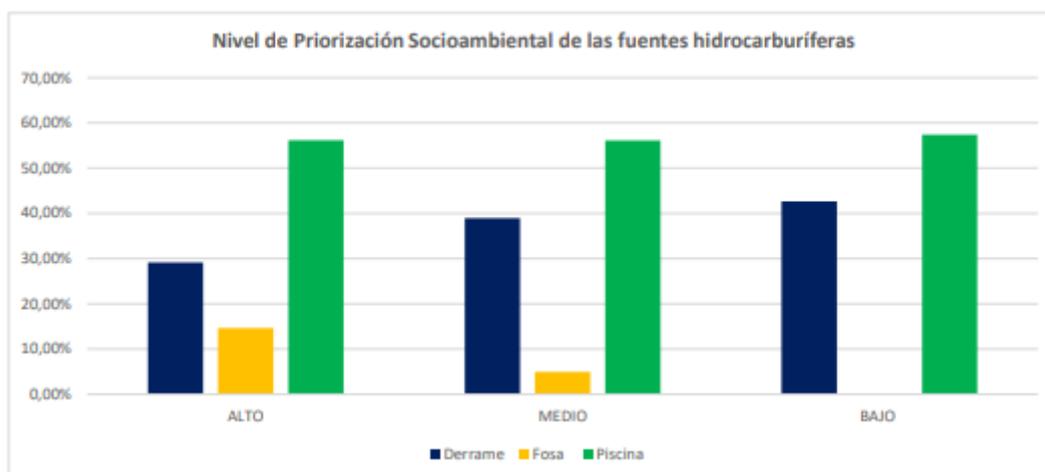


Figura 14. Nivel de priorización socioambiental de fuentes de contaminación hidrocarburífera por remediar

Fuente: (EC MAATE 2022)

2. Impactos socioambientales de pasivos ambientales en Ecuador

Desde 1972, mediante compañías petroleras nacionales e internacionales, han extraído más de dos billones de barriles de petróleo principalmente de la región amazónica, generando una gran cantidad de petróleo y desechos tóxicos eliminados al ambiente. (San Sebastián 2000). Al ser la explotación petrolera un negocio rentable, siempre se debe incluir el valor de las externalidades positivas o negativas que la actividad produce como la afectación en los servicios ecosistémicos e impactos en las poblaciones involucradas. Los derrames, piscinas y otras fuentes de contaminación de la actividad petrolera afectan sustancialmente la calidad del suelo, aire y agua en las poblaciones aledañas, generando impactos negativos en los sistemas productivos familiares, destrucción de patrimonio arqueológico, afecciones a la salud y contribuyen al cambio climático (Carvajal Benavides y Paredes Rodríguez 2020).

En las provincias petroleras amazónicas del Ecuador se registran graves afectaciones ambientales, además de la mayor pobreza, siendo los lugares donde nace el gran financiamiento de las exportaciones desde agosto de 1972 con Texaco (Gudynas 2019). El médico Adolfo Maldonado, director de la Clínica Ambiental e investigador de Acción Ecológica, en su estudio realizado entre abril y agosto de 2016 en Sucumbíos y Orellana, mencionó lo siguiente: “en los poblados en los que Chevron-Texaco operó [...] una de cada cuatro familias tiene al menos un enfermo de cáncer, mientras que en las poblaciones menos cercanas la frecuencia de cáncer es tres veces menor” (Morán 2019).

Los efectos socioeconómicos más notables son el impacto colectivo en el empeoramiento de las condiciones de vida, consecuencias psicosociales, destrucción de chacras, desplazamiento forzado, entre otros (Martín Beristain, Fernández, y Páez Rovira 2009).

Con la extracción de petróleo se dio paso a una aceleración de la migración interna a la región, generando expansión de la frontera agrícola, deforestación y otros impactos ambientales y en la figura 15 se puede observar como el autor representa la distribución de las poblaciones de la Amazonía ecuatoriana y las plataformas y bloques petroleros. Las zonas petroleras urbanas y rurales tienen condiciones de vida inferiores al comparar con las zonas sin explotación. En un estudio reciente se concluye que las zonas con similar mercado, área cultivada y fertilidad de suelo presentan condiciones de vida menores en relación con las zonas sin petróleo (Larrea Maldonado et al. 2018).

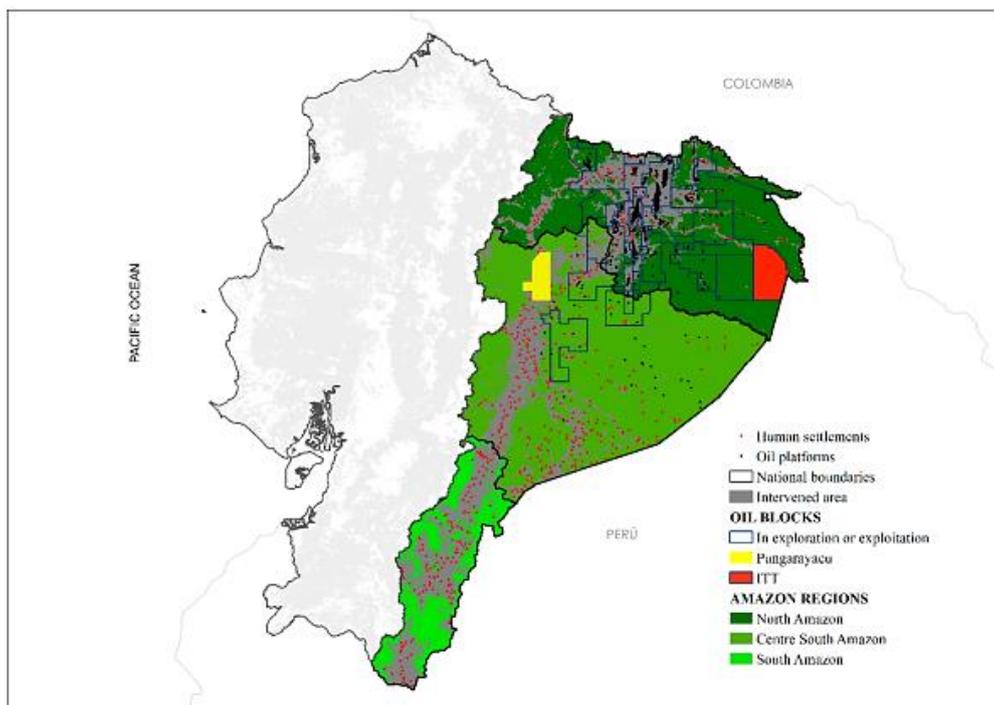


Figura 15. Conservación, población y petróleo en la Amazonía ecuatoriana
Fuente: (Larrea Maldonado et al. 2018)

En la Tabla 8 se mencionan los impactos a la salud humana y socioambientales de los principales eventos de contaminación con hidrocarburos registrados en la Amazonía ecuatoriana desde el año 1964 a 2022. Estos eventos tienen repercusiones significativas sobre la salud humana, incluyendo dificultades respiratorias, afecciones dermatológicas, riesgos de abortos espontáneos y la posibilidad de desarrollar varios

tipos de cáncer. Además, estos derrames también generan impactos socioambientales como la pérdida de cultivos y ganado, la deforestación y el daño a reservas ecológicas.

Tabla 8
Impactos de los derrames de crudo en la Amazonía ecuatoriana

Año	Caso de contaminación	Contaminación recursos naturales	Impactos a la salud humana	Impactos socio-ambientales
1964-1992	Explotación de petróleo por la compañía Chevron-Texaco	Los 30 derrames más graves del SOTE ocasionaron la pérdida de 403.200 barriles, a los que se suman 456.000 barriles de crudo y 450 millones de barriles de aguas de formación vertidos al ambiente (Kimerling 1993).	<p>En áreas de Texaco se determinó concentraciones de 46.423 a 405.634 $\left[\frac{ng}{L}\right]$ hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP) y de 96 a 2.500 $\left[\frac{\mu g}{L}\right]$ de benceno, lo que multiplica los riesgos de cáncer por 100 (Jochnick, Normand, y Zaidi 1994).</p> <p>La tasa de abortos espontáneos a menos de 28 semanas, es superior en la zona contaminada por Texaco, con una tasa de 9,8% en comparación con el 4,4% en zonas no afectadas (San Sebastián 2000).</p> <p>Donald Moncayo, coordinador de La Unión de Afectados y Afectadas por las Operaciones Petroleras de Texaco Donald Moncayo (2023), menciona que es evidente el exceso de cáncer en las poblaciones afectadas que mantienen contacto con agua contaminada, reportando el 73% de casos de cáncer en mujeres, principalmente cáncer al útero.</p> <p>UDAPT, (2023) también señala la desaparición de dos pueblos ancestrales: Tetetes y Sansahuari, a causa de la actividad de Texaco.</p>	<p>Se entrevistaron a 1520 personas de 80 comunidades diferentes, el 94% de las familias encuestadas sufrieron pérdidas de ganado y el 73% de la población asegura que sus cultivos (café, yuca, maíz, etc) se vieron afectados negativamente (Maldonado y Narváez 2003).</p> <p>UDAPT, (2023) indica que la contaminación producida por la compañía Texaco se expande a lo largo de 5.000 kilómetros, afectando a aguas superficiales, subterráneas y tierras.</p>
2009	Ruptura Oleoducto OCP	se derramaron 14000 barriles de crudo en el sector de Santa Rosa, provincia de Napo (El Universo 2009).	La contaminación de los cuerpos de agua dejó a 30.000 habitantes sin suministro de agua, comunidades indígenas se vieron afectadas por la contaminación en los afluentes del río Napo (Corresponsal de Paz 2009).	<p>Según un informe del Ministerio de Ambiente de Ecuador se afectó gravemente la Reserva Ecológica Cayambe-Coca (Ecoportal, 2009).</p> <p>3.000 animales de las 150 fincas pecuarias afectados por la contaminación del agua y el suelo (El Universo 2009).</p> <p>160 familias afectadas económicamente por daños en sus cultivos de tomate y naranjilla (El Universo 2009).</p>

				273 familias fueron perjudicadas por el cierre de tres operadoras turísticas que usaban los ríos Santa Rosa y Quijos para la práctica de deportes extremos (El Universo 2009).
2011	Derrames en la parroquia San Carlos, Orellana	Se reportaron durante el año 2011, 60 derrames de petróleo y 63 piscinas de ripio de perforación en las compañías petroleras (Torres Ordóñez 2019).	Las personas presentan en la actualidad con mayor frecuencia problemas respiratorios, dermatológicos y varios tipos de cáncer (Torres Ordóñez 2019).	El suelo de la parroquia San Carlos se encuentra contaminado por un 66.10% por hidrocarburo de petróleo, lo cual equivale a un nivel alto de contaminación. Pérdida de cultivos y ganado.(Torres Ordóñez 2019).
1967-2009	Pasivos ambientales y derrames en la parroquia Dayuma, campo Auca	El PRAS identificó un promedio aproximado de 19 piscinas y 20 derrames de petróleo por cada mil habitantes en situación de pobreza (Becerra et al. 2013).	Existe mayor frecuencia de síntomas relacionados a la exposición de petróleo y mayor riesgo de abortos espontáneos en las mujeres que viven en la proximidad de los pozos y estaciones de petróleo en comparación con las mujeres que viven lejos de sitios de contaminación (San Sebastián 2000).	La deforestación alcanza un 90,8%, lo que crea una gran vulnerabilidad frente a la contaminación de los suelos y de las aguas subterráneas y superficiales (Becerra et al. 2013)
2022	Rotura OCP en el sector del río Piedra Fina	6.300 bdp vertidos (Ruiz Agila 2022).	Afectación a 118,617 personas sin acceso a agua descontaminada, pertenecientes a 22 parroquias rurales de 8 cantones que lindan con las riberas de los ríos Coca y Napo (Ruiz Agila 2022).	2,1 hectáreas del Parque Nacional Cayambe-Coca afectadas por la contaminación con hidrocarburos (Ruiz Agila 2022).

Fuente: Varias
Elaboración propia

3. Estudio de la eficiencia de uso de suelos certificados remediados

Según una evaluación llevada a cabo por Contraloría General del Estado (2015), se concluye que la reparación ambiental desarrollado por la empresa Texpet- Texaco, no se cumplió o el plan se ejecutó parcialmente, debido a que los sitios cercanos a los pozos Aguarico 4, Sacha 99, 85, 53-1, Guanta 5, Auca Sur 1, Shushufindi 44 y Lago 31 presentaron concentraciones de TPH y HAP's superiores a la normativa.

De acuerdo a Fontaine (2003) el distrito amazónico representado por Sacha, Shushufindi y otros campos presentó un alto índice de piscinas mal remediadas de la era de Texaco, registrando 6,7% en Sacha y un 17% en Shushufindi, contra el 14,7% en los otros campos, estas piscinas aún presentan contaminación. Las piscinas que simplemente fueron taponadas representan el 10,7 % en Sacha y el 13,8 % en Shushufindi, contra el 37 % en los otros campos.

En el estudio realizado por (Beristaín, Páez, y Fernández, 2009), en relación a las experiencias de remediación realizadas por la empresa Texaco entre 1995 y 1998, indica que el 67,6 % de los encuestados opina que la empresa no realizó tareas de limpieza en sus comunidades, mientras que en un 31,8 % menciona lo contrario. Tan solo el 5,04 % (17 casos) valora como efectiva a la remediación realizada. A pesar de los impactos causado por Texaco, solo un 20,2 % de las personas encuestadas presentaron quejas o demandas por los daños ocasionados y su principal razón, la falta de información y la indefensión de las comunidades afectadas.

Torres Ordóñez (2019) menciona que la población encuestada de la parroquia San Carlos en La Joya de los Sachas, considera que la remediación es positiva para la zona, ya que ha permitido dar solución a los problemas socio ambientales, sin embargo, desconocen de las fases de esta actividad y el costo de los procesos de remediación de sus predios.

En el año 2020, se registró el derrame en el sector San Rafael, debido al rompimiento del SOTE, OCP y poliducto Shushufindi-Quito. La remediación de ese evento fue llevada a cabo por las empresas responsables del derrame y consistió en la limpieza de las orillas de los ríos involucrados con dispersantes, detergentes y floculantes. Después de 5 meses, dieron por terminado el proceso de remediación y difundieron los resultados a las comunidades. Sin embargo, las comunidades afectadas denunciaron públicamente que existía aun contaminación y lo ratificaron con una inspección realizada en noviembre 2021, verificando la presencia de Vanadio sobre el límite de la norma establecida (Almeida 2022).

3.1. Estudio de caso de remediación en el derrame del sector de Santa Rosa de Quijos, Cantón El Chaco.

Descripción del evento de derrame: El 25 de febrero de 2009 se produjo la rotura de un tramo del Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), a causa de un movimiento de tierra. La emergencia provocó el derrame de aproximadamente 14.000 barriles de crudo vertidos en el río Santa Rosa, provincia de Napo, desplazándose 185 km aguas abajo hacia los ríos Quijos y Coca. El derrame afectó a 9 parroquias pertenecientes a las provincias de Napo, Sucumbíos y Orellana (Alemán et al. 2010; Mendizábal, Samaniego, y Aleman 2012; Galeas Bolaños 2013).

Plan de contingencia: Consistió en la colocación de barreras naturales, barreras de contención y piscinas de contención. A pesar que OCP contaba en ese momento con un plan de contingencias, los contratistas tenían limitado conocimiento sobre el plan, causando un mayor impacto del derrame aguas abajo (Galeas Bolaños 2013).

Impactos: Al ubicarse el derrame en las áreas protegidas de Cayambe, Coca y Sumaco, afectó a la fauna acuática y varias especies silvestres que encontraron muertas en las riberas del río Santa Rosa. Otros impactos fueron la afectación al sector ganadero, pérdida de cultivos, construcción de pozos en propiedades agrícolas, afectación al turismo de la cascada San Rafael (Galeas Bolaños 2013).

Limpieza y recuperación del crudo: En las áreas afectadas se recuperaron los desechos especiales como: material vegetal y suelo contaminado, barreras de contención contaminadas, entre otros. Los desechos fueron almacenados temporalmente. Mediante las actividades de las empresas PECS, ARCOIL y CORENA se recuperó el 80% del crudo vertido (Galeas Bolaños 2013).

Proceso de remediación: un volumen total de 4.996,26 m³ de suelo contaminado evacuado del área de ruptura fue remediado por ECUAMBIENTE, aplicando la técnica de landfarming en su Centro Integral de Ingeniería Ecológica, en Orellana (Galeas Bolaños 2013).

De acuerdo a la investigación realizada por Galeas Bolaños (2013) concluye que los resultados de los parámetros analizados cumplen con la normativa RAOHE, con una concentración de 817.45 mg/kg de TPH y 0.0024 mg/kg de HAPs.

Discusión: De acuerdo al director del medio ambiente del Municipio de Orellana, indicó que se observaba contaminación de hidrocarburos en el río cuando crecía y suspendían el servicio de agua a la ciudad, por esta razón el Municipio de

Orellana interpuso una demanda legal contra la empresa OCP por daños y perjuicios ocasionados por el derrame (OPSur 2010). Además, Marina Soto et al. (2018) en su investigación menciona que la comunidad de macroinvertebrados de los ríos Santa Rosa, Quijos, y Coca, no se ha recuperado completamente luego de 31 meses del evento de derrame en el sitio afectado. Por lo tanto, la remediación no aseguró la ausencia de riesgos para los seres vivos y el medio ambiente, a pesar de cumplir con la normativa RAOHE.

En este proceso de remediación también existieron conflictos sociales, como fue con el propietario de la finca donde se produjo el derrame, la confrontación con la empresa OCP duró 5 meses y al final se firmó un Acta de Compromiso para que el dueño de la finca ejecute actividades monitoreo y control durante 18 meses, desde agosto del 2009 (OPSur 2010). Dejando claro la necesidad de una reparación integral que incluya la restauración del sitio afectado, indemnizaciones, rehabilitación con las comunidades afectadas y medidas de satisfacción.

3.2. Propuesta inclusión de análisis fisicoquímicos y biológicos en la normativa ambiental vigente

La comprensión de políticas y regulaciones ambientales para la evaluación y gestión de sitios contaminados con TPH, establecidas en otros países como EE. UU., Reino Unido, Canadá, Nueva Zelanda, los Países Bajos y Australia, son de gran ayuda en el desarrollo e implementación de reformas en normativas ambientales en los países en desarrollo (Kuppusamy et al. 2020b).

De acuerdo con lo mencionado en el capítulo 3 y 4, para lograr una remediación efectiva es necesario la inclusión de parámetros fisicoquímicos y biológicos al Anexo 2, tabla 2 “Criterios de remediación” del Acuerdo Ministerial 097-A.

Para la caracterización del sitio contaminado y certificación del suelo restaurado se propone incluir los siguientes análisis mencionados en la normativa ambiental de Australia, de acuerdo con los descrito en la tabla 9.

Tabla 9
Restauración del suelo por niveles de detección ecológico de acuerdo con el Consejo Nacional de Protección Ambiental (NEPC), Australia

Parámetro	Restauración de suelo por nivel de detección ecológico $\left[\frac{mg}{kg}\right]$		
	Comercial/ Industrial	Residencial	Recreacional
Benceno	75-95	50-65	10

Tolueno	135	85-105	10-65
Etilbenceno	165-185	70-125	1,5-40
Xileno	95-180	45-105	1,6-10
Benzopireno	0,7-1,4	0,7-1,4	0,7-1,4
Fracciones de TPH			
> C6-C10	170	120	25
> C10-C16	215	180	125
> C16-C34	1700-2500	300-1300	N/D
> C34	3300-6600	2800-5600	N/D

Fuente:(NEPC 2011)

Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 10, se propone incluir los análisis de fracciones de TPH, con el objetivo de contar con precisión los contaminantes de los hidrocarburos de petróleo. El método EPA para determinar sustancias orgánicas no halogenadas usando GC-FID (EPA 8015D) fue desarrollado de manera única para detectar y cuantificar los compuestos TPH presentes en una muestra ambiental (Cortes et al. 2012).

Actualmente, Ecuador cuenta con laboratorios que ofrecen el servicio de análisis por cromatografía de gases (GC-FID) enfocados en determinar la concentración de ingredientes activos de plaguicidas regulado por la Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario e investigaciones relacionadas a contaminación con hidrocarburos. Por lo tanto, sería factible la implementación de estos análisis en la normativa ambiental vigente.

Para evaluar la calidad del suelo en proceso de remediación y recuperado, es importante tomar en cuenta los nutrientes característicos para el desarrollo agrícola. La tabla 11 menciona los principales elementos y concentraciones de los indicadores nutricionales del suelo.

El aporte de la disponibilidad de Nitrógeno, Potasio, Calcio y Magnesio en los cultivos agrícolas es el siguiente (Rodríguez S y Flórez R 2004) :

- Nitrógeno (N): favorece el desarrollo del tallo y follaje. Además, contribuye en la formación de frutos y granos.
- Potasio (K): participa en el metabolismo de los carbohidratos y las proteínas, importante para la absorción de CO_2 y el control de la transpiración.
- Calcio (Ca): juega un papel en la estabilidad de la membrana plasmática y regula la permeabilidad, protegiendo a los tejidos de hongos fitopatógenos.

- Magnesio (Mg): interviene en la respiración, síntesis de proteínas y metabolismo del fósforo. Además, en la activación de varios sistemas enzimáticos en las plantas.

Tabla 10
Valores de referencia para la clasificación de la calidad de suelos de acuerdo con el contenido de los nutrientes N, K, Ca y Mg

Clase	Elemento			
	N[%]	K $\left[\frac{\text{Cmol}}{\text{kg}}\right]$	Ca $\left[\frac{\text{Cmol}}{\text{kg}}\right]$	Mg $\left[\frac{\text{Cmol}}{\text{kg}}\right]$
Muy bajo	<0,05	<0,2	<2	<0,5
Bajo	0,05-0,10	0,2-0,3	2-5	0,5-1,3
Medio	0,10-0,15	0,3-0,6	5-10	1,3-3,0
Alto	0,15-0,25	>0,6	>10	>3,0
Muy alto	>0,25			

Fuente: (MX NOM 2000)

Elaboración propia

Por otro lado, una manera eficaz para determinar la calidad del suelo, asegurando la ausencia de riesgo para los organismos vivos, es mediante el uso de bioindicadores que se encuentran resumidos en la tabla 11, El primer paso que seguir para la ejecución de análisis con bioindicadores es la realización de investigaciones con suelos contaminados con hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana, determinando los bioindicadores óptimos para la realidad del país. Como base en estas investigaciones, se propone solicitar la inclusión de bioensayos para calidad de suelo en la normativa ambiental vigente.

De esta manera, los laboratorios que ofrecen el servicio de análisis de calidad del suelo podrán iniciar el proceso de acreditación de ensayos con bioindicadores bajo normas de referencia y así cubrir la demanda de dichos análisis.

Tabla 11
Bioindicadores ambientales para uso en suelo contaminados con hidrocarburos y sus métodos de referencia

Bioindicador	Método de referencia
Biomasa microbiana del suelo	ISO 4833-1: Microbiología de la cadena alimentaria. Método horizontal para el recuento de microorganismos. Parte 1: Recuento de colonias a 30 °C mediante la técnica de siembra en profundidad (ISO 2013)
Bioensayos con Lombrices	ISO 17512-1: Calidad del suelo. Ensayo de evasión para determinar la calidad de los suelos y los efectos de los productos químicos en el comportamiento. Parte 1: Ensayo con lombrices de tierra (<i>Eisenia fetida</i> y <i>Eisenia andrei</i>) (ISO 2008).
Biota criptogámica (líquenes y briofitas)	ISO 16198: Calidad del suelo. Bioensayos vegetales para la evaluación de la biodisponibilidad ambiental de elementos traça en plantas (ISO 2015).
Toxicidad mediante bioluminiscencia	ISO 11348-2: Calidad del agua. Determinación del efecto inhibitorio de muestras de agua sobre la luminiscencia de <i>Vibrio fischeri</i>

	(Ensayo de bacterias luminiscentes). Parte 2: Método utilizando bacterias deshidratadas (ISO 2007).
--	---

Fuente: varios
Elaboración propia

Además, es importante tomar en cuenta los siguientes parámetros y rangos de trabajo para ejecutar de manera óptima los procesos de biorremediación, mencionados en el capítulo 4 y se detalla en la Tabla 12.

Tabla 12
Rangos óptimos para procesos de biorremediación

Propiedad	Rango
Temperatura (°C)	18-30°
pH (unidades)	6-8
Humedad (% capacidad de campo)	20-75%
Nutrientes N:P:K	20:20:1
Microorganismos degradadores (UFC)	10 ⁶ – 10 ⁸

Fuente: (Ñústez Cuartas, Paredes Cuervo, y Cubillos Vargas 2014).
Elaboración propia

La propuesta mencionada abarca puntos posibles de implementación en el país, de la mano de la academia, que permitirá realizar investigaciones enfocadas al estudio de límites permisibles fisicoquímicos y biológicos para los recursos naturales en proceso de remediación y cuyos valores aseguren la ausencia de riesgos para los humanos y ecosistemas restaurados.

Discusión

El suelo es la base para el desarrollo de funciones ecológicas y humanas como producción de biomasa, transformador de materia para proteger el ambiente, hábitat biológico y reserva genética, medio físico y fuente de recursos (Blum y Santelises 1994). La Amazonía ocupa el 45,09 % de la superficie del Ecuador y presenta varios pisos climáticos, lo cual genera una mega diversidad en el país (García Valarezo et al. 2016), de aquí la importancia de conservar los recursos naturales de esta región.

La actividad petrolera en la Amazonía ecuatoriana ha generado impactos positivos y negativos en sus comunidades. Uno de los aspectos negativos es la contaminación de suelos con hidrocarburos, que de acuerdo a Rovira, Beristain, y Fernández (2009) la mayor incidencia de derrames de piscinas y oleoductos fue durante el periodo 1964 a 1990. Entre los mayores eventos de contaminación con hidrocarburos en Ecuador se encuentra el caso Chevron-Texaco, declarando una pérdida de 296,821 barriles en total, a lo largo del SOTE (Peterson et al. 2003). La contaminación por hidrocarburos en la región amazónica ha sido relacionada con severas afectaciones al ambiente, desencadenando impactos socioeconómicos como cáncer, aborto espontáneo, pérdidas de cultivo y ganado en su población. A pesar de tantos años de explotación petrolera, la población de la Amazonía ecuatoriana sigue representando uno de los lugares con más pobreza en el país.

El Programa de Reparación Ambiental y Social (PRAS) del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), está encargado de la implementación de los Planes de Reparación Integral (PRI) que permitan restituir los derechos vulnerados a las comunidades afectadas por los pasivos ambientales. Mediante los datos obtenidos en PRAS (2022) se determina que el 30 % de los cantones de las provincias de Orellana, Sucumbíos, Napo y Pastaza representan un foco de contaminación. Lago Agrio es el cantón que encabeza la lista, contando con la mayor cantidad de pasivos ambientales, con un total de 1239 fuentes de contaminación.

Frente a la contaminación, instituciones públicas y privadas han invertido recursos para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Es así como la provincia de Sucumbíos registra la mayor cantidad de fuentes remediadas, con 578 pasivos remediados hasta el año 2022. Sin embargo, Ecuador aún registra 2856 fuentes pendientes por remediar en la Amazonía ecuatoriana, cuyos planes dan prioridad a las

piscinas contaminadas, al ser la principal fuente de contaminación entre fosas y derrames.

Núñez et al. (2023) menciona que es preocupante contar con 38 % fuentes contaminadas con hidrocarburos por remediar a nivel nacional, destacando la necesidad de tomar acciones efectivas. Una de las causas es el estancamiento en la remediación de pasivos ambientales causados por Texaco-Chevron. Tras una serie de impugnaciones fallidas, en febrero 2019 se anunció que el Estado ecuatoriano asumiría la remediación de dichos pasivos ambientales, dejando impune la violación a los derechos humanos y de la naturaleza causada por Chevron en Ecuador (Guamán Hernández y Aparicio 2019).

De acuerdo a Ossai et al. (2020), la reducción de riesgos de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo es posible mediante la aplicación de las tecnologías de remediación físicas, químicas y biológica con un enfoque sustentable; lo cual se basa en la recolección de información preliminar, selección de proceso de remediación óptimo, seguimiento y evaluación de calidad del suelo restaurado.

En Ecuador, se aplica con mayor frecuencia la biorremediación con sus técnicas como composting y Landfarming (Cuvi y Bejarano 2015), técnicas sustentables ex situ que ofrecen ventajas en comparación con la remediación fisicoquímica. Kalia et al. (2022) indica que las técnicas de biorremediación ofrecen un mecanismo económico y ecológico para eliminar residuos petroquímicos y de hidrocarburos de los sitios afectados, a través de la transformación de contaminantes orgánicos complejos en los compuestos más simples por agentes biológicos como bacterias, hongos, etc. Espinosa, Moreno, y Bernal (2017) menciona que el tipo de suelos que predomina en la Amazonía ecuatoriana son los inceptisoles arcillosos. Por lo tanto, la aplicación de tecnologías de remediación desarrolladas internacionalmente no garantiza lograr los objetivos de restauración propuestos y necesario adaptar dichas tecnologías a la realidad de cada sitio contaminado.

Para garantizar resultados eficaces en la técnica de remediación aplicada, es necesario tomar decisiones basadas en estrategias de muestreo adaptativo a la fuente de contaminación, acompañado de análisis geoespaciales, los cuales determinen el nivel y extensión de la contaminación, niveles óptimos de excavación y costos asociados (E. Hellawell et al. 2015). Al utilizar mapas geoespaciales de los sitios contaminados categorizado por nivel de riesgo ecológico, se podrá priorizar la remediación de pasivos

ambientales con técnicas apropiadas y así disminuir los impactos emergentes a la salud, socioeconómicos y a la biodiversidad.

Braun et al. (2020) menciona que un enfoque sustentable de la remediación aplicada se logra mediante la identificación y valoración de los riesgos durante la caracterización del sitio contaminado, en el desarrollo del proceso de remediación y en la restauración del suelo remediado de acuerdo con su uso previsto. Entre los principales impactos positivos en el proceso de remediación de suelos en la Amazonía ecuatoriana, podemos señalar la recuperación de flora y fauna, mejorar la calidad de aire, suelo y agua; y de esta manera aumentar la calidad de vida de las personas afectadas. Mientras que, los impactos negativos son generación de residuos y gases efecto invernadero.

Es importante contar con indicadores fisicoquímicos y biológicos para la evaluación de riesgos y seguimiento del proceso de remediación. Uno de los indicadores fisicoquímicos estratégicos es la estimación de biodisponibilidad, ya que no será aplicable una técnica de biorremediación si la cantidad biodisponible del contaminante es insuficiente (Valdes 2011). Otros indicadores que tomar en cuenta son: caracterización del suelo (textura, permeabilidad, porosidad), elementos como fósforo, nitrógeno y potasio, recuentos microbianos, respirometría y ecotoxicidad. Con mucha frecuencia se determina la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) como único parámetro para la caracterización de la fuente de contaminación y control del proceso de remediación. Sin embargo, no ofrece suficiente información para la evaluación de riesgos de la fuente de contaminación y factibilidad del desarrollo de un proceso de biorremediación, lo cual puede generar más impactos ambientales y económicos.

El Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) autoriza el desalojo y/o certificación de suelos remediados para el taponamiento de fuentes contaminadas u otros sitios de disposición final, una vez finalizada la remediación del pasivo ambiental. Este proceso se basa en el cumplimiento de los límites permisibles mencionados en la tabla 1 y 2 del anexo 2 del Acuerdo Ministerial 097-A (MAATE, 2015). Sin embargo, los parámetros establecidos en la normativa no garantizan la calidad del suelo restaurado y la ausencia de riesgo a la salud y ambiente. Bünemann et al. (2018) menciona algunos indicadores fisicoquímicos indispensables para evaluar la calidad del suelo como carbono orgánico total, pH, P disponible, almacenamiento de agua, densidad aparente, entre otros; lo cual permitirá el desarrollo de cultivos en los suelos restaurados. Una de las principales actividades económicas de la región

amazónica es la producción agrícola, por esta razón, es esencial asegurar la calidad nutricional del suelo para el cultivo de cacao, café, palma, entre otros.

Stankovic y Stankovic, AR (2013) señalan que los bioindicadores contienen información sobre los aspectos cuantitativos de la calidad del ambiente. Algunos bioindicadores de gran importancia de aplicación en la Amazonía ecuatoriana son: biomasa microbiana, ensayos con lombrices, plantas como líquenes y briofitas, macrofauna como escarabajos y anfibios; y entre las técnicas directas y a corto tiempo, toxicidad mediante bioluminiscencia. El estudio de bioindicadores para evaluación de calidad de suelos no se ha desarrollado en el país a nivel de campo, recalcando la necesidad de apoyo en la investigación en gestión ambiental.

La restauración integral tiene como objetivo promover la justicia mediante una reparación efectiva y está definida en la Constitución de la República de Ecuador y Código Orgánico del Ambiente, sin embargo, el país cuenta con pasivos ambientales pendientes por remediar que han causado impactos negativos a las personas afectadas y al ambiente por varios años. Además, los indicadores de la normativa ambiental vigente para suelos remediados de la contaminación de hidrocarburos no aseguran en su totalidad la ausencia de riesgos una vez rehabilitado el sitio contaminado. Benalcazar Oña (2020) menciona que Ecuador no establece los daños socioambientales causados en la reparación y la indemnización, lo que constituye un obstáculo para lograr la reparación integral ambiental. Es así que se recalca la importancia de reformar el marco legal referente a la reparación integral de daños ambientales, que aseguren la reparación ambiental efectiva, determine indemnizaciones correctas y mantenga medidas de satisfacción de los procesos de remediación ejecutados.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La contaminación del suelo con hidrocarburos causado por derrames en la actividad petrolera ocasiona impactos socioambientales en Ecuador y sobre todo en la región amazónica, impactos como afectaciones dermatológicas, aborto espontáneo, varios tipos de cáncer y con mayor incidencia cáncer al útero. Además, la contaminación ha frenado el desarrollo económico de la población vinculada a negocios del sector ganadero y agrícola. Lo que desencadena la necesidad de la gestión efectiva de las fuentes de contaminación mediante procesos de remediación sustentables, generando impactos positivos al aumentar la calidad de vida de la Amazonía ecuatoriana.

Para disminuir los niveles de contaminación, empresas públicas y privadas aplican frecuentemente la biorremediación con sus técnicas Landfarmig y compostaje en la región amazónica del Ecuador. Sucumbios registra la mayor cantidad de fuentes remediadas desde 2006 hasta 2022, con 578 pasivos ambientales remediados. Sin embargo, la población de los cantones Lago Agrio, Shushufindi, La Joya de los Sachas y Francisco de Orellana, están expuestos a una gran cantidad de pasivos ambientales, con un total de 2856 fuentes pendientes por remediar en la Amazonía.

La optimización de los procesos de remediación es la principal estrategia para hacer frente a este problema, lo cual depende de muestreos eficientes, toma de decisiones basadas en mapas geospaciales y análisis de riesgos e impactos del sitio contaminado, proceso de remediación y reincorporación del suelo remediado, lo cual permita adaptar tecnologías de remediación desarrolladas internacionalmente a las características específicas de las fuentes de contaminación en Ecuador.

Para garantizar la reparación integral del daño ambiental es necesario la evaluación de parámetros fisicoquímicos y biológicos que garantice la calidad del suelo remediado. Además, reforzar el marco legal para la determinación de daños ambientales y efectiva remediación con una correcta indemnización a las personas afectadas. Por lo tanto, es importante considerar la reforma a la normativa ambiental como paso principal para devolver los derechos vulnerados en la Amazonía ecuatoriana.

Normativas ambientales internacionales como la de Australia establece los límites permisibles basado en niveles de investigación de detección de salud humana y ecológica, proporcionando una pauta a seguir para reformar la normativa ambiental en Ecuador.

Recomendaciones

Se propone fomentar investigaciones que permitan establecer bioensayos de toxicidad de suelos contaminados. Además, es importante la inclusión de parámetros fisicoquímicos que garanticen la fertilidad del suelo mediante análisis de textura de suelo y elementos nutricionales como N, P, Ca y Mg.

Se recomienda que los procesos de remediación y reformas planteadas a la normativa ambiental se realicen de manera conjunta con la academia. Apoyar el desarrollo de investigaciones enfocadas en procesos de remediación y evaluación de calidad de sitios descontaminados, proporcionará información valiosa para establecer límites permisibles de acuerdo con las características de las fuentes de contaminación del Ecuador.

Obras citadas

- Acosta Espinoza, Alberto. 2011. “La reforma a la ley de hidrocarburos y la renegociación de los contratos petroleros (Política pública)”. *Revista de Análisis Político. Balance político*, nº 11 (marzo): 95–102.
- AENOR. 2007. “Calidad del suelo. Muestreo. Parte 4: Guía de procedimiento para la investigación de sitios naturales, casi naturales y cultivados (UNE-ISO 10381-4)”. Norma Española. Madrid , España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0039875>.
- Albán Soria, Galo Fernando. 2009. “Propuesta de intervención en derrames de hidrocarburos en base a estudios de caso del sote desde Lago Agrio a Papallacta”. Tesis de postgrado, Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/1205>.
- Aldás, Andrea Belén. 2014. “Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a escala de laboratorio”. Tesis pregrado, Quito, Ecuador: USFQ. https://usfq.primo.exlibrisgroup.com/permalink/593USFQ_INST/1ce83a1/alma990001094090206366.
- Alemán, Miguel Ángel, Ramiro Bermeo, Andre´s Mendiza´bal, y Wong Loon. 2010. “Successful Social Environmental Management Model, Implemented in Ecuador to Overcome Impacts From a Heavy Crude Oil Spill”. En *2010 8th International Pipeline Conference, Volume 3*, 149–58. Calgary, Alberta, Canada: ASMEDC. doi:10.1115/IPC2010-31179.
- Al-Majed, Abdul Aziz, Abdulrauf Rasheed Adebayo, y M. Enamul Hossain. 2012. “A Sustainable Approach to Controlling Oil Spills”. *Journal of Environmental Management* 113 (diciembre): 213–27. doi:10.1016/j.jenvman.2012.07.034.
- Almeida, Alexandra. 2022. “Informe de la inspección realizada a las comunidades San José, san pablo, y Toyuca, afectadas por el derrame de petróleo y combustibles del 7 de abril del 2020”. Acción ecológica. <https://ddhhecuador.org/2022/03/16/documento/informe-de-la-inspeccion-realizada-las-comunidades-san-jose-san-pablo-y-toyuca>.
- Amanzholova, Bibigul, Tatyana Zhukova, Natalia Ovchinnikova, Natalia Fribus, y Viktoria Karakchieva. 2021. “Metallurgical companies’ environmental

- liabilities: a study of disclosure in reporting”. Editado por M. Tsoy. *E3S Web of Conferences* 296: 06015. doi:10.1051/e3sconf/202129606015.
- Amnistía Internacional. 2014. “La larga lucha de los pueblos indígenas de América en defensa de sus derechos”. *Amnesty International Publications*, agosto 8. <https://www.amnesty.org/es/documents/amr01/002/2014/es/>.
- Amponsah, Nana Y., Junye Wang, y Lian Zhao. 2018. “A Review of Life Cycle Greenhouse Gas (GHG) Emissions of Commonly Used Ex-Situ Soil Treatment Technologies”. *Journal of Cleaner Production* 186 (junio): 514–25. doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.164.
- Arteaga, Aida. 2003. “Indicadores de Gestión e Impactos de la Actividad Petrolera en la Región Amazónica Ecuatoriana”. En *Petróleo y Desarrollo Sostenible en Ecuador*, in Fontaine et al. FLACSO. Rispergraf, QUITO. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/58306.pdf>.
- Artiola, Janick F, Ian L Pepper, y Mark L Brusseau. 2004. *Environmental monitoring and characterization*. Academic Press.
- Azubuike, Christopher Chibueze, Chioma Blaise Chikere, y Gideon Chijioke Okpokwasili. 2016. “Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects”. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 32. Springer: 1–18.
- Baars, AJ, RMC Theelen, PJCM Janssen, JM Hesse, ME van van Apeldoorn, MCM van Meijerink, L Verdam, y MJ Zeilmaker. 2001. “Re-evaluation of human-toxicological maximum permissible risk levels”. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/711701025.html>.
- Balba, M.T, N Al-Awadhi, y R Al-Daher. 1998. “Bioremediation of Oil-Contaminated Soil: Microbiological Methods for Feasibility Assessment and Field Evaluation”. *Journal of Microbiological Methods* 32 (2): 155–64. doi:10.1016/S0167-7012(98)00020-7.
- Barron, Mace G., Deborah N. Vivian, Ron A. Heintz, y Un Hyuk Yim. 2020. “Long-Term Ecological Impacts from Oil Spills: Comparison of Exxon Valdez, Hebei Spirit , and Deepwater Horizon”. *Environmental Science & Technology* 54 (11): 6456–67. doi:10.1021/acs.est.9b05020.
- Bartkowski, Bartosz, Stephan Bartke, Katharina Helming, Paul Carsten, Anja-Kristina Techen, y Bernd Hansjürgens. 2020. “Potential of the economic valuation of

- soil-based ecosystem services to inform sustainable soil management and policy”. *PeerJ* 8 (marzo). doi:10.7717/peerj.8749.
- Becerra, Sylvia, Elise Paichard, Maurice Laurence, y Aude Sturma. 2013. “Vivir con la contaminación petrolera en el Ecuador: percepciones sociales del riesgo sanitario y capacidad de respuesta”. *Revista Líder* 15 (23): 102–20.
- Benalcazar Oña, Cristhian G. 2020. “La reparación integral ambiental en el ámbito constitucional ecuatoriano”. Tesis de pregrado, Quito, Ecuador: Universidad Metropolitana.
- Beristáin, Carlos Martín, Darío Páez, y Itziar Fernández,. 2009. *Las palabras de la selva: Estudio psicosocial del impacto de las explotaciones petroleras de TEXACO en las comunidades amazónicas de Ecuador*. Hegoa. Bilbao. <https://libros.metabiblioteca.org/server/api/core/bitstreams/f6bf1e98-abf1-40f9-8c7f-3a396ddae5f6/content>.
- Bisso-Andrade, Aland. 2022. “Petróleo: daño medioambiental y un peligro para la salud pública”. *Revista de la Sociedad Peruana de Medicina Interna* 35 (1): 5–7. doi:10.36393/spmi.v35i1.648.
- Blum, W.E.H, y A Santelises. 1994. “A concept of sustainability and resilience based on soil functions: the role of the ISSS in promoting sustainable land use.” *Soil Resilience and Sustainable Land Use*, 535–42.
- Bonfante, Antonello, Angelo Basile, y Johan Bouma. 2020. “Targeting the Soil Quality and Soil Health Concepts When Aiming for the United Nations Sustainable Development Goals and the EU Green Deal”. *SOIL* 6 (2): 453–66. doi:10.5194/soil-6-453-2020.
- Braun, Adeli Beatriz, Adan William da Silva Trentin, Caroline Visentin, y Antônio Thomé. 2020. “Relevance of sustainable remediation to contaminated sites manage in developed and developing countries: Case of Brazil”. *Land Use Policy* 94 (mayo): 104533. doi:10.1016/j.landusepol.2020.104533.
- Bünemann, Else K., Giulia Bongiorno, Zhanguo Bai, Rachel E. Creamer, Gerlinde De Deyn, Ron de Goede, Luuk Fleskens, et al. 2018. “Soil Quality – A Critical Review”. *Soil Biology and Biochemistry* 120 (mayo): 105–25. doi:10.1016/j.soilbio.2018.01.030.
- Burrough, P.A. 2001. “GIS and geostatistics: Essential partners for spatial analysis”. *Environmental and Ecological Statistics* 8 (4): 361–77. doi:10.1023/A:1012734519752.

- Cachada, A, R Pereira, E Ferreira da Silva, y AC Duarte. 2014. "The prediction of PAHs bioavailability in soils using chemical methods: state of the art and future challenges". *Science of the Total Environment* 472. Elsevier: 463–80. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.11.038.
- Calderón-Medina, Claudia L., Gina P. Bautista-Mantilla, y Salvador Rojas-González. 2018. "Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta". *Orinoquia* 22 (2): 141–57. doi:10.22579/20112629.524.
- Cantú, Mario Pablo, Analía Becker, José Camilo Bedano, y Hugo Francisco Schiavo. 2007. "Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices". *Ciencia del suelo* 25 (2): 173–78.
- Carvajal Benavides, José, y Hugo Paredes Rodríguez. 2020. "Caracterización Físico Ambiental, Amazonía Ecuatoriana". https://www.researchgate.net/publication/341276828_AMAZONIA_ECUATORIANA_-_CARACTERIZACION_FISICO_AMBIENTAL.
- Casallas Peña, Sara Milena, y María Camila Gonzalez Lopez. 2020. "Evaluación técnica de la recuperación ambiental del suelo por derrame de petróleo crudo mediante la aplicación de la tecnología Oil Spill Eater II en un pozo de un bloque en el Casanare". Tesis Pregrado, Fundación Universidad de América. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3610688>.
- Castebianco, Javier Andrés. 2018. "Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao". *La Granja* 27 (1): 21–35. doi:10.17163/lgr.n27.2018.02.
- Cavazos Arroyo, Judith, Beatriz Perez Armendariz, y Amparo Mauricio Gutierrez. 2014. "Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo". *Agricultura, sociedad y desarrollo* 11 (4): 539–50.
- CCME. 2007. "Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health". *Canadian Council of Ministers of the Environment, National Guidelines and Standards Office*. <https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines>.
- . 2008. "Canada-Wide Standards (CWS) for petroleum hydrocarbons in soil". *Canadian Council of Ministers of the Environment*. https://www.nwb-oen.ca/sites/default/files/cms_uploads/techguides/phc_standard_1.0_e.pdf.

- Chaîneau, C. H., C. Yepremian, J. F. Vidalie, J. Ducreux, y D. Ballerini. 2003. “Bioremediation of a Crude Oil-Polluted Soil: Biodegradation, Leaching and Toxicity Assessments”. *Water, Air, and Soil Pollution* 144 (1/4): 419–40. doi:10.1023/A:1022935600698.
- Chan-Quijano, José Guadalupe, Aarón Jarquín-Sánchez, Susana Ochoa-Gaona, Pablo Martínez-Zurimendi, Leonardo Noriel López-Jiménez, y Alejandra Lázaro-Vázquez. 2015. “Directrices para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos”. *Teoría y Praxis*, nº 17. Universidad de Quintana Roo: 123–44.
- Cheng, Min, Guangming Zeng, Danlian Huang, Chunping Yang, Cui Lai, Chen Zhang, y Yang Liu. 2018. “Tween 80 surfactant-enhanced bioremediation: toward a solution to the soil contamination by hydrophobic organic compounds”. *Critical reviews in biotechnology* 38 (1). Taylor & Francis: 17–30. doi:10.1080/07388551.2017.1311296.
- Chorom, Mostafa, H Sharifi, y Hossein Motamedi. 2010. “Bioremediation of a crude oil - polluted soil by application of fertilizers”. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering* 7 (4): 319–26.
- Cid, Raquel Aparicio. 2016. “Comunicación ambiental: aproximaciones conceptuales para un campo emergente”. *Comunicación y sociedad*, nº 25: 209–35.
- Coria, Ignacio Daniel. 2007. “Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos”. UAIS. Universidad Abierta Interamericana. <http://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/ing/UAIS-IGA-600-001>.
- Corresponsal de Paz. 2009. “Nuevo derrame de Repsol en la Amazonia ecuatoriana”. *La visión mediática de un mundo en positivo*. marzo 20. <https://archivo.corresponsaldepaz.org/news/es/2009/03/20/0004/nuevo-derrame-de-repsol-en-la-amazonia-ecuatoriana>.
- Cortes, JE, A Suspes, S Roa, C González, y HE Castro. 2012. “Total petroleum hydrocarbons by gas chromatography in Colombian waters and soils”. *American Journal of Environmental Sciences* 8 (4): 396–402. doi:10.3844/ajessp.2012.396.402.
- Cuvi, Nicolás, y Monserrathe Bejarano. 2015. “Los halos de inhibición en la remediación de suelos amazónicos contaminados con petróleo”. *História, Ciências, Saúde-Manguinhos* 22 (suppl 0): 1693–1714. doi:10.1590/S0104-59702015000500009.

- Cuya Flores, Jhoset Junior, y Carlos Alexander Varda Mayer. 2022. “Tecnologías físicas y biológica en la remediación de suelos contaminados de PHs con un enfoque ecológico y sostenible: Revisión sistemática”. Tesis Pregrado, Perú: Universidad César Vallejo.
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/91990/Cuya_FJJ-Varda_MCA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- De Cabo, Laura, y Patricia Marconi. 2021. *Estrategias de remediación para las cuencas de dos ríos urbanos de llanura: Matanza-Riachuelo y Reconquista*. 1ra ed. Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
<https://www.fundacionazara.org.ar/img/libros/estrategias-de-remediacion.pdf>.
- Delgado Ramos, Gian Carlo. 2011. “Petróleo, medio ambiente, cambio climático y seguridad: Macondo, otra advertencia más”. *Nómadas. Critical Journal of Social and Juridical Sciences*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=18120143001>.
- Donald Moncayo. 2023. 30 años de lucha y resistencia contra Chevron-Texaco, UDAPTMajestad TV.
<https://www.facebook.com/share/v/VQdSxu8yPWYvV7Dm/?mibextid=w8EBqM>.
- Doran, John Walsh. 1994. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment: Proceedings of a Symposium Sponsored by Divisions S-3, S-6, and S-2 of the Soil Science Society of America, Division A-5 of the American Society of Agronomy, and the North Central Region Committee on Soil Organic Matter (NCR-59) in Minneapolis, MN, 4-5 November 1992*. Madison, Wis.: SSSA : American Society of Agronomy.
- EC. 2004. “Ley de Gestión Ambiental”. Codificación 19. Registro Oficial Suplemento 418. Quito, Ecuador. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEY-DE-GESTION-AMBIENTAL.pdf>.
- . 2008. “Constitución de la República del Ecuador”. Registro Oficial 449. Montecristi. https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf.
- . 2011. “Reglamento para la prevención y control de la contaminación por sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos y especiales”. Acuerdo No. 161. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica.

- . 2015. “Acuerdo 097-A: Reforma Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria”. Año 3, No. 387. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015_0.pdf.
- . 2017. “Código Orgánico del Ambiente”. Registro Oficial Suplemento 983.
- . 2018. “Ley de Hidrocarburos”. Registro Oficial 711. Decreto Supremo 2967. Quito, Ecuador. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Ley-de-Hidrocarburos-1978.pdf>.
- . 2023. “Emisión de pronunciamiento sobre desalojo de suelos y taponamientos de fuentes de contaminación”. *Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. febrero 14. <https://www.gob.ec/maae/tramites/emision-pronunciamiento-desalojo-suelos-taponamientos-fuentes-contaminacion>.
- EC Contraloría General del Estado. 2015. “Examen especial de control ambiental a los pasivos ambientales en la región Amazónica, como resultado de la operación y manejo de la compañía TEXPET-TEXACO, actual CHEVRON, luego de la ejecución del plan de remediación ambiental, a cargo de entidades relacionadas, EP PETROECUADOE Y PETROAMAZONAS EP”. <https://www.contraloria.gob.ec/WFDescarga.aspx?id=25621&tipo=inf>.
- EC Corte Constitucional del Ecuador. 2013. *Manual de Justicia Constitucional Ecuatoriana*. J. Benavidez-Ordoñez y J. Escudero-Soliz. http://bivice.corteconstitucional.gob.ec/bases/biblo/texto/Manual_de_justicia_constitucional/Manual_de_justicia_constitucional.pdf.
- EC EP PETROECUADOR. 2015. “Informe Cifras Petroleras. Período: enero-diciembre 2014”. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/Gerencial-DICIEMBRE-2014.pdf>.
- . 2023. “Informe estadístico Enero-Marzo 2023”. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/04/INFORME-ESTADISTICO-MARZO-2023.pdf>.
- EC INEN. 2010. “Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos”. NTE INEN 2 266:2010. Primera revisión. Instituto Ecuatoriano de Normalización. <http://www.competencias.gob.ec/wp-content/uploads/2021/03/05-03NOR2000-INEN05.pdf>.

- EC MAATE. 2015. “Programa de reparación Ambiental y Social: Guía Metodológica para la Construcción de Planes de Reparación Integral (PRI)”. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. Quito, Ecuador. <http://pras.ambiente.gob.ec/documents/228536/3134884/Gu%C3%ADa+Metodo+Metodologica+para+la+construcci%C3%B3n+de+PRIs.pdf/8f876aea-57d9-4786-b2ca-cb72d42b8e4c;jsessionid=3a3wPxp9EP564FvEMAYiKjy1>.
- . 2017. “Programa de Reparación Ambiental y Social (PRAS)”. Subsecretaría de Calidad Ambiental. Dirección Nacional de Control Ambiental.
- . 2022. “Base de Datos Hidrocarburífera”. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. <http://pras.ambiente.gob.ec/web/siesap/informacion-eh>.
- EC Petroamazonas EP. 2011. “Estudio de Impacto y Plan de Manejo Ambiental del Proyecto Desarrollo y Producción de los Campos: Tiputini y Tambococha”. <https://geografiacriticaecuador.org/minkayasuni/wp-content/uploads/2020/02/Cap%C3%ADtulo-II-L%C3%8DNEA-BASE-PASIVOS-AMBIENTALES-PARTE-2.pdf>.
- El Mahdí, Abdullah M., y Hamidí A. Aziz. 2018. “A Review on Biodegradation and Toxicity Methods: Risk Assessment, Standards, and Analyses”. En *Toxicity and Biodegradation Testing*, editado por Ederio Dino Bidoia y Renato Nallin Montagnolli, 349–88. *Methods in Pharmacology and Toxicology*. New York, NY: Springer New York. doi:10.1007/978-1-4939-7425-2_18.
- El Universo. 2009. “Derrame de crudo deja muerte y temor en ríos amazónicos”, marzo 8. <https://www.eluniverso.com/2009/03/08/1/1430/1FD9E8985D5F4F368F561EE4C6DB25CA.html/>.
- El-Hadidy, Shaimaa M., Fahad Alshehri, Hossein Sahour, y Karim W. Abdelmalik. 2022. “Detecting Hydrocarbon Micro-Seepage and Related Contamination, Probable Prospect Areas, Deduced from a Comparative Analysis of Multispectral and Hyperspectral Satellite Images”. *Journal of King Saud University - Science* 34 (6): 102192. doi:10.1016/j.jksus.2022.102192.
- EPA. 1996. “Guía del ciudadano: Técnicas de tratamiento innovadoras. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente”. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/10002PKE.PDF?Dockey=10002PKE.PDF>.
- . 2009. “Industrial Waste Resource Guidelines — Soil sampling”. . <http://www.epa.vic.gov.au/our-work/publications/publication/2009/july/iwrg621>.

- Espinosa, José, Julio Moreno, y Gustavo Bernal. 2018. *The soils of Ecuador*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg. 10.1007/978-3-319-25319-0.
- Estrada Ruíz, Jenny María. 2001. *Ancón: 100 años en la historia petrolera del Ecuador*. <https://isbn.cloud/9789942036797/ancon-100-anos-en-la-historia-petrolera-del-ecuador/>.
- Fabbricino, Massimiliano, Alberto Ferraro, Vincenzo Luongo, Ludovico Pontoni, y Marco Race. 2018. "Soil washing optimization, recycling of the solution, and ecotoxicity assessment for the remediation of Pb-contaminated sites using EDDS". *Sustainability* 10 (3). MDPI: 636. doi:<https://doi.org/10.3390/su10030636>.
- Fabelo Falcón, José Antonio. 2017. "Propuesta de metodología para la recuperación de suelos contaminados". *Centro Azúcar* 44 (1). Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas: 53–60.
- Feijoo, Alexander, Heimar Quintero, Carlos Fragoso, y Ana G Moreno. 2004. "Patrón de distribución y listado de especies de las lombrices de tierra (Annelida, Oligochaeta) en Colombia". *Acta Zoológica Mexicana* 20 (2). Instituto de Ecología AC: 197–220.
- Flores Andrade, Belén, Miguel Verdezoto Carvajal, Jefferson Simbaña Punina, y Isabel Domínguez Gaibor. 2022. "Posibles efectos del Cambio Climático en los anfibios de la Amazonía Ecuatoriana". *Green World Journal* 5 (1): 006. doi:<https://doi.org/10.53313/gwj51006>.
- Foght, Julia, y Jackie Aislabie. 2005. "Enumeration of Soil Microorganisms". En *Monitoring and Assessing Soil Bioremediation*, de Rosa Margesin y Franz Schinner, 5:261–80. Soil Biology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/3-540-28904-6_13.
- Fontaine, Guillaume. 2003. "Estudio sobre los conflictos socio ambientales en los campos Sacha y Shushufindi (1994-2002)". Quito: Flacso. <https://www.flacsoandes.edu.ec/agora/estudio-sobre-los-conflictos-socio-ambientales-en-los-campos-sacha-y-shushufindi>.
- Fritz, Maximilian. 2020. "Toxic Ghost Acres, o la dinámica de la eliminación de desechos de producción de petróleo en la Amazonía ecuatoriana, de los años setenta a noventa". *Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC) revista de la Solcha* 10 (1): 23–51. doi:<https://doi.org/10.32991/2237-2717.2020v10i1>.

- Galeas Bolaños, Paúl Esteban. 2013a. “Diagnóstico del proceso de remediación de suelos realizado en el sector de Santa Rosa, cantón el Chaco, provincia de Napo, debido a un derrame del OCP 25-02-2009”. Tesis Pregrado, Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/918d3b1d-c656-4c92-a72b-e4305b17250f>.
- . 2013b. “Diagnóstico del proceso de remediación de suelos realizado en el sector de Santa Rosa, cantón el Chaco, provincia de Napo, debido a un derrame del OCP (25-02-2009)”. Tesis de pregrado, Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/4376>.
- García Valarezo, Carlos, David Jaramillo Abril, Pablo Djibeyan Djibeyan, Patricio Vásquez Andrade, y Félix Falconí Ontaneda. 2016. “La amazonia ecuatoriana y sus saberes ancestrales; el uso del extracto de corteza del árbol de Piwi (*Pictocoma discolor*) un saber singular en el accidente ofídico.” *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas* 47 (4). Asociación Farmacéutica Mexicana, AC: 26–34.
- García-Martínez, M^a Jesús. 2005. “Los hidrocarburos policíclicos aromáticos asociados a combustibles fósiles : caracterización, análisis y remediación”. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. doi:10.20868/UPM.thesis.400.
- Garzón, Jennyfer M., Juan Pablo Rodríguez Miranda, y Catalina Hernández Gómez. 2017. “Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible”. *Universidad y Salud* 19 (2): 309. doi:10.22267/rus.171902.93.
- Girotti, Stefano, Elida Nora Ferri, Maria Grazia Fumo, y Elisabetta Maiolini. 2008. “Monitoring of Environmental Pollutants by Bioluminescent Bacteria”. *Analytica Chimica Acta* 608 (1): 2–29. doi:10.1016/j.aca.2007.12.008.
- Granda Torres, Glenda, y Carmen Del Cisne Herrera Abrahan. 2020. “Reparación integral: principios aplicables y modalidades de reparación”. *Ius Humani. Law Journal* 9 (1): 251–68. doi:10.31207/ih.v9i1.209.
- Guamán Hernández, A, y M Aparicio. 2019. “Los derechos de la naturaleza y la lucha frente al poder corporativo en Ecuador. El caso Texaco-Chevron, los alcances del ecoconstitucionalismo y las deficiencias de los mecanismos de garantía y reparación”. *La naturaleza como sujeto de derechos en el constitucionalismo democrático*. Bogotá, Colombia: Universidad Libre.

- Guarino, C, Valentina Spada, y R Sciarrillo. 2017. “Assessment of three approaches of bioremediation (Natural Attenuation, Landfarming and Bioaugmentation–Assistited Landfarming) for a petroleum hydrocarbons contaminated soil”. *Chemosphere* 170. Elsevier: 10–16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.165>.
- Gudynas, Eduardo. 2019. “Cambio climático, extractivismos y género: crisis entrelazadas dentro del desarrollo”. En . *Mujeres Indígenas frente al Cambio Climático*. Lima, Perú: Rocío Silva Santisteban. <https://gudynas.com/wp-content/uploads/GudynasCambioClimaticoExtractivismosGenero19.pdf>.
- Hansen, James E, y Craig L Timmerman. 1991. “In Situ Vitrification Applications”. En *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*, 1st ed., 387–402. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780203742198-15/situ-vitrification-applications-james-hansen-craig-timmerman>.
- Hellawell, E, J Lamont-Black, A Kemp, y S Hughes. 2015. “The impact of GIS in geotechnical engineering. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering”, 149 (2): 85–93. doi:10.1680/geng.2001.149.2.85.
- Hellawell, E.E, A.C Kemp, y D.J Nancarrow. 2001. “A GIS Raster Technique to Optimise Contaminated Soil Removal”. *Engineering Geology* 60 (1–4): 107–16. doi:10.1680/geng.2001.149.2.85.
- Hoepfel, Ronald E, Robert E Hinchee, y Mick F Arthur. 1991. “Bioventing soils contaminated with petroleum hydrocarbons”. *Journal of industrial microbiology and biotechnology* 8 (3). Oxford University Press: 141–46. doi:10.1007/BF01575846.
- Horta, A., B. Malone, U. Stockmann, B. Minasny, T.F.A. Bishop, A.B. McBratney, R. Pallasser, y L. Pozza. 2015. “Potential of Integrated Field Spectroscopy and Spatial Analysis for Enhanced Assessment of Soil Contamination: A Prospective Review”. *Geoderma* 241–242 (marzo): 180–209. doi:10.1016/j.geoderma.2014.11.024.
- Hou, Deyi, Zhenyu Ding, Guanghe Li, Longhua Wu, Pengjie Hu, Guanlin Guo, Xingrun Wang, Yan Ma, David O’Connor, y Xianghui Wang. 2018. “A Sustainability Assessment Framework for Agricultural Land Remediation in China”. *Land Degradation & Development* 29 (4): 1005–18. doi:10.1002/ldr.2748.

- Huera-Lucero, Thony, Juana Labrador-Moreno, José Blanco-Salas, y Trinidad Ruiz-Téllez. 2020. “A Framework to Incorporate Biological Soil Quality Indicators into Assessing the Sustainability of Territories in the Ecuadorian Amazon”. *Sustainability* 12 (7): 3007. doi:10.3390/su12073007.
- IMP. 2010. “Dirección de seguridad y medio ambiente”. México.
- ISO. 2007. “Calidad del agua. Determinación del efecto inhibidor de muestras de agua sobre la luminiscencia de *Vibrio fischeri* (Ensayo de bacterias luminiscentes). Parte 2: Método utilizando bacterias deshidratadas”. ISO 11348-2:2007. <https://www.iso.org/standard/40517.html>.
- . 2008. “Calidad del suelo. Ensayo de evasión para determinar la calidad de los suelos y los efectos de los productos químicos en el comportamiento. Parte 1: Ensayo con lombrices de tierra (*Eisenia fetida* y *Eisenia andrei*)”. ISO 17512-1:2008. <https://www.iso.org/standard/38402.html>.
- . 2013. “Microbiología de la cadena alimentaria. Método horizontal para el recuento de microorganismos. Parte 1: Recuento de colonias a 30 ° C mediante la técnica de siembra en profundidad”. ISO 4833-1:2013. <https://www.iso.org/standard/53728.html>.
- . 2015. “Calidad del suelo. Bioensayos vegetales para la evaluación de la biodisponibilidad ambiental de elementos traza en plantas”. ISO 16198:2015. <https://www.iso.org/standard/55834.html>.
- Jiang, Bo, Guanghe Li, Yi Xing, Dayi Zhang, Jianli Jia, Zhisong Cui, Xiao Luan, y Hui Tang. 2017. “A whole-cell bioreporter assay for quantitative genotoxicity evaluation of environmental samples”. *Chemosphere* 184. Elsevier: 384–92. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.05.159.
- Jochnick, Chris, Roger Normand, y Sarah Zaidi. 1994. *Violaciones de derechos en la Amazonía Ecuatoriana*. Abya-Yala. <http://repositoriointerculturalidad.ec/jspui/handle/123456789/37398>.
- Juang, Kai-Wei, Wan-Jiun Liao, Ten-Lin Liu, L. Tsui, y Dar-Yuan Lee. 2008. “Additional Sampling Based on Regulation Threshold and Kriging Variance to Reduce the Probability of False Delineation in a Contaminated Site”. *Science of The Total Environment* 389 (1): 20–28. doi:10.1016/j.scitotenv.2007.08.025.
- Kalia, Arun, Samriti Sharma, Nisha Semor, Piyoosh Kumar Babele, Shweta Sagar, Ravi Kant Bhatia, y Abhishek Walia. 2022. “Recent Advancements in Hydrocarbon

- Bioremediation and Future Challenges: A Review”. *3 Biotech* 12 (6): 135. doi:10.1007/s13205-022-03199-y.
- Kaplún, Mario. 2010. *Una pedagogía de la comunicación*. Ediciones de la Torre. España.
https://www.google.com.ec/books/edition/Una_pedagog%C3%ADa_de_la_comunicaci%C3%B3n/8t_xO12cSOgC?hl=es-419&gbpv=0.
- Kimerling, Judith. 1993. *Crudo amazónico*. Abya Yala.
https://books.google.com.ec/books/about/Crudo_amaz%C3%B3nico.html?id=Z8e5AAAIAAJ&redir_esc=y.
- . 2006. “Indigenous peoples and the oil frontier in Amazonia: The case of Ecuador, ChevronTexaco, and Aguinda v. Texaco”. *New York University journal of international law and politics* 38. HeinOnline: 413–664.
- Kumar, Pushpam, ed. 2012. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. 0 ed. Routledge. doi:10.4324/9781849775489.
- Kuppusamy, Saranya, Naga Raju Maddela, Mallavarapu Megharaj, y Kadiyala Venkateswarlu. 2020a. “Bioavailability of Total Petroleum Hydrocarbons”. En *Total Petroleum Hydrocarbons*, de Saranya Kuppusamy, Naga Raju Maddela, Mallavarapu Megharaj, y Kadiyala Venkateswarlu, 79–94. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-24035-6_4.
- . 2020b. *Total Petroleum Hydrocarbons: Environmental Fate, Toxicity, and Remediation*. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-24035-6.
- Lal, Rattan. 2015. “Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation”. *Sustainability* 7 (5): 5875–95. doi:10.3390/su7055875.
- Langella, Giuliano, A. Agrillo, Angelo Basile, Roberto De Mascellis, Piero Manna, Pierpaolo Moretti, Florindo Mileti, Fabio Terribile, y Simona Vingiani. 2018. “Geography of soil contamination for characterization and precision remediation of potentially contaminated sites”. *Italian Journal of Agronomy* 13 (1): 6–15.
- Larrea Maldonado, Carlos Alberto, Camilo Baroja Rojas, Juan Sebastián Durango Cordero, Mary Menton, Mika Peck, y Malki Sáenz García. 2018. “Oil Extraction and Local Social Development in Ecuadorian Amazon”. workingPaper. <http://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/8946>.
- Liu, Hong, Hang Wang, Xuehua Chen, Na Liu, y Suriguge Bao. 2014. “Biosurfactant-producing strains in enhancing solubilization and biodegradation of petroleum

- hydrocarbons in groundwater”. *Environmental monitoring and assessment* 186 (7). Springer: 4581–89. doi:10.1007/s10661-014-3721-x.
- Liu, Lianwen, Wei Li, Weiping Song, y Mingxin Guo. 2018. “Remediation Techniques for Heavy Metal-Contaminated Soils: Principles and Applicability”. *Science of The Total Environment* 633 (agosto): 206–19. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.161.
- Maldonado, Adolfo, y Alberto Narváez. 2003. *Ecuador ni es, ni será ya país amazónico: inventario de impactos petroleros, 1: recorrido por familias campesinas e indígenas afectadas por pozos y estaciones, octubre 2001*. Acción Ecológica.
https://books.google.com.ec/books/about/Ecuador_ni_es_ni_ser%C3%A1_ya_p_a%C3%ADs_amaz%C3%B3ni.html?id=fiMavgAACAAJ&redir_esc=y.
- Marina Soto, Luz, Wilson Lafuente, Luis Domínguez-Granda, y Carlos López. 2018. “Efectos de un derrame de petróleo crudo en la comunidad de macroinvertebrados bentónicos de un río amazónico ecuatoriano”. *Revista de Ciencias Ambientales* 53 (1): 1. doi:10.15359/rca.53-1.1.
- Martín Beristain, Carlos Martín, Itziar Fernández, y Dario Páez Rovira. 2009. *Las palabras de la selva: estudio psicosocial del impacto de las explotaciones petroleras de Texaco en las comunidades amazónicas de Ecuador*. Hegoa. <https://publicaciones.hegoa.ehu.eus/publications/200>.
- Martínez, José Alejandro, y Miguel Reinaldo Casallas. 2018. *Contaminación y remediación de suelos en Colombia: aplicación a la minería de oro*. Ediciones EAN. 10.21158/9789587565836.
- Marzialetti, Pablo Adrián. 2012. “Monitoreo de derrames de hidrocarburos en cuerpos de agua mediante técnicas de sensado remoto”. Tesis de postgrado, Universidad Nacional de Cordova. <http://hdl.handle.net/11086/11542>.
- Mateo, Juan Pablo, y Santiago García. 2014. “El sector petrolero en Ecuador: 2000-2010.” *Revista Latinoamericana de Economía* 45 (177): 113–39.
- Mendizábal, Andrés, Raúl Samaniego, y Miguel Angel Aleman. 2012. “Three Years Later: Conclusion of a Successful Social-Environmental Management Model to Overcome the Impacts of a Heavy Crude Oil Spill”. En *Volume 1: Upstream Pipelines; Project Management; Design and Construction; Environment; Facilities Integrity Management; Operations and Maintenance; Pipeline*

- Automation and Measurement*, 263–74. Calgary, Alberta, Canada: American Society of Mechanical Engineers. doi:10.1115/IPC2012-90009.
- Morales-Bautista, C, C García, C Méndez-Olán, y M Alor. 2016. “Evaluación del tratamiento del intercambio catiónico en dos suelos aluviales contaminados con aguas congénitas”. *Interciencia [en línea]* 1(10):696-702. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33947690008>.
- Morán, Susana. 2019. “Los mecheros de la muerte en la Amazonía”. *Plan V*, mayo 20. <https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/mecheros-la-muerte-la-amazonia>.
- Moreira, Fátima M. S., E. Jeroen Huising, y David E. Bignell. 2012. *Manual de Biología de Suelos Tropicales: Muestreo y Caracterización de La Biodiversidad Bajo Suelo*. México: Instituto Nacional de Ecología: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Mulligan, Catherine N. 2021. “Sustainable Remediation of Contaminated Soil Using Biosurfactants”. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 9 (marzo): 635196. doi:10.3389/fbioe.2021.635196.
- MX NOM. 2000. “Metodologías de análisis de suelo en México.” En *Norma Oficial Mexicana*. Segunda sección. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, NOM-021-RECNAT-2000. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280.pdf>.
- Namkoong, Wan, Eui-Young Hwang, Joon-Seok Park, y Jung-Young Choi. 2002. “Bioremediation of Diesel-Contaminated Soil with Composting”. *Environmental Pollution* 119 (1): 23–31. doi:10.1016/S0269-7491(01)00328-1.
- Nash, J, RP Traver, y DC Downey. 1987. “Surfactant enhanced in situ soil washing”. *US. EPA HWERL: Edilsin, NJ, USA*.
- NEPC. 2011. “Guideline on investigation levels for soil and groundwater”. The National Environment Protection Council. Canberra. <https://www.nepc.gov.au/sites/default/files/2022-09/schedule-b1-guideline-investigation-levels-soil-and-groundwater-sep10.pdf>.
- Niu, Anyi, y Chuxia Lin. 2021. “Managing Soils of Environmental Significance: A Critical Review”. *Journal of Hazardous Materials* 417 (abril). doi:10.1016/j.jhazmat.2021.125990.
- Nuñez, Fernanda, Alejandra Aguirre, Carolina Sánchez, y Jerónimo Ibarra. 2023. “Las paradojas de la explotación petrolera en la amazonía: pobreza y desigualdad,

- datos para el debate en torno a la consulta sobre el Bloque ITT”. *Friedrich-Ebert-Stiftung (FES) Ecuador*, agosto. <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/quito/20527.pdf>.
- NZL Ministry for the Environment. 2011. “Guidelines for Assessing and Managing Petroleum Hydrocarbon Contaminated Sites in New Zealand (Revised 2011)”. <https://environment.govt.nz/assets/publications/Files/modules-final-jun99.pdf>.
- Ñústez Cuartas, Diana Cristina, Diego Paredes Cuervo, y Janneth Cubillos Vargas. 2014. “Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible” 37 (1). 2002 *Revista Técnica. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*: 20–28.
- Okparanma, Reuben N., Ikeabiana Azuazu, y Josiah M. Ayotamuno. 2017. “Assessment of the Effectiveness of Onsite Exsitu Remediation by Enhanced Natural Attenuation in the Niger Delta Region, Nigeria”. *Journal of Environmental Management* 204 (diciembre): 291–99. doi:10.1016/j.jenvman.2017.09.005.
- ONU Asamblea General. 2005. “Principios y directrices básicos sobre el derecho de las víctimas de violaciones manifiestas de las normas internacionales de derechos humanos y de violaciones graves del derecho internacional humanitario a interponer recursos y obtener reparaciones”. 16 de diciembre.
- Oña Rocha, Tania, y Miguel Gualoto Oñate. 2022. *Biorremediación ambiental: La Biodiversidad al Servicio del Ambiente*. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12831>.
- OPSur. 2010. “Ecuador: Se cumple un año del derrame del OCP”, marzo 5. <https://opsur.org.ar/2010/03/05/ecuador-se-cumple-un-ano-del-derrame-del-ocp/>.
- Ortega-Calvo, J, William P Ball, Rainer Schulin, Kirk T Semple, y Lukas Y Wick. 2007. “Bioavailability of pollutants and soil remediation”. *Journal of environmental quality* 36 (5). American Society of Agronomy: 1383–84. doi:10.2134/jeq2007.0001.
- Ossai, Innocent Chukwunonso, Aziz Ahmed, Auwalu Hassan, y Fauziah Shahul Hamid. 2020. “Remediation of Soil and Water Contaminated with Petroleum Hydrocarbon: A Review”. *Environmental Technology & Innovation* 17 (febrero): 100526. doi:10.1016/j.eti.2019.100526.

- Pedersen, Tom A, y James T Curtis. 1991. "Soil vapor-extraction technology: Reference handbook. Final report, Jun 89-Mar 90". EEUU: Camp Dresser and McKee, Inc., Cambridge, MA (USA). <https://www.osti.gov/biblio/5527989>.
- Peterson, Charles H., Stanley D. Rice, Jeffrey W. Short, Daniel Esler, James L. Bodkin, Brenda E. Ballachey, y David B. Irons. 2003. "Long-Term Ecosystem Response to the Exxon Valdez Oil Spill". *Science* 302 (5653): 2082–86. doi:10.1126/science.1084282.
- Pfenning, Ludwig H, y Lucas Magalhães. 2000. "Hongos del suelo saprófitos y patógenos de plantas". En *Manual de Biología de Suelos Tropicales; Instituto Nacional de Ecología: México city, Mexico*, 243–80. Instituto Nacional de Ecología: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.google.com.ec/books/edition/Manual_de_biolog%C3%ADa_de_suelos_tropicales/m-QMZAiP0YC?hl=es-419&gbpv=1&dq=Hongos+del+suelo+sapr%C3%B3fitos+y+pat%C3%B3genos+de+plantas+PFENNIG+Manual+de+Biolog%C3%ADa+de+Suelos+Tropicales%3B+Instituto+Nacional+de+Ecologi%C3%ADa:+M%C3%A9xico+city,+Mexico&printsec=frontcover.
- Ponce Contreras, Daniela Soledad. 2014. "Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos". Tesis Pregrado, Chile: Universidad del Bio-Bio. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/135/3/Ponce%20Contreras%20Daniela.pdf>.
- Powlson, D.S., P.J. Gregory, W.R. Whalley, J.N. Quinton, D.W. Hopkins, A.P. Whitmore, P.R. Hirsch, y K.W.T. Goulding. 2011. "Soil Management in Relation to Sustainable Agriculture and Ecosystem Services". *Food Policy* 36 (enero): S72–87. doi:10.1016/j.foodpol.2010.11.025.
- Pozo-Rivera, Wilmer E., Carlos Quiloango-Chimarro, Xavier Paredes, Mario Landívar, Carlos Chiriboga, Daniel Hidalgo, Karina García, y Jaime Villacís. 2023. "Response of Dung Beetle Diversity to Remediation of Soil Ecosystems in the Ecuadorian Amazon". *PeerJ* 11 (marzo): e14975. doi:10.7717/peerj.14975.
- Rao, M.A., R. Scelza, F. Acevedo, M.C. Diez, y L. Gianfreda. 2014. "Enzymes as Useful Tools for Environmental Purposes". *Chemosphere* 107 (julio): 145–62. doi:10.1016/j.chemosphere.2013.12.059.

- Read, Colin. 2011. "The Dirty Dozen before the Deepwater Horizon". En *BP and the Macondo Spill*, de Colin Read, 47–63. London: Palgrave Macmillan UK. doi:10.1057/9780230305083_8.
- Reid, Brian J, Joanna D Stokes, Kevin C Jones, y Kirk T Semple. 2000. "Nonexhaustive cyclodextrin-based extraction technique for the evaluation of PAH bioavailability". *Environmental Science & Technology* 34 (15). ACS Publications: 3174–79. doi:10.1021/es990946c.
- Ren, Xiaoya, Guangming Zeng, Lin Tang, Jingjing Wang, Jia Wan, Jiajia Wang, Yaocheng Deng, Yani Liu, y Bo Peng. 2018. "The potential impact on the biodegradation of organic pollutants from composting technology for soil remediation". *Waste management* 72. Elsevier: 138–49. doi:10.1016/j.wasman.2017.11.032.
- Retallack, Gregory J. 2013. "Global Cooling by Grassland Soils of the Geological Past and Near Future". *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 41 (1): 69–86. doi:10.1146/annurev-earth-050212-124001.
- Rivera Morochz, Jose Javier. 1998. "Remediación de desechos hidrocarburíferos en la región amazónica ecuatoriana: piscinas". Tesis de pregrado, Universidad Internacional SEK. <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2406>.
- Rodríguez S, Mariela, y Víctor Flórez R. 2004. "Elementos esenciales y beneficiosos". *CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*. 25-36, 25–36.
- Rojas V, Sohira J. 2006. "Tratamiento de crudo proveniente de fosas de desecho haciendo uso de tecnologías aplicadas para el mejoramiento de crudos pesados". Tesis de pregrado, Caracas: Universidad Central de Venezuela. <http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/1420/1/T.E.G.%20Tratamiento%20de%20crudo%20proveniente%20de%20fosas%20de%20desecho.pdf>.
- Roqueta Ibert, Diego José. 2016. "Estudio bibliográfico de los criterios base para la selección del método de recuperación de un suelo contaminado". Tesis de pregrado, Gandia: Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/72603>.
- Ruiz Agila, Gabriela. 2022. "Un ambiente tóxico: son continuos los derrames petroleros sin remedio en Ecuador". *Democracia abierta*, julio 17. <https://www.opendemocracy.net/es/ambiente-toxico-scontinuos-derrames-petroleros-secuador/>.

- Salavarría Loor, Edison Bienvenido. 2017. “Diversidad de líquenes y briófitos epífitos en bosques Amazónicos de la provincia de Orellana, con diferentes tipos de manejo”. Tesis de pregrado, Loja, Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/21075>.
- San Sebastián, Miguel. 2000. *Informe Yana Curi: impacto de la actividad petrolera en la salud de poblaciones rurales de la Amazonía ecuatoriana*. Icaria Editorial.
- Sanabria, Eduardo Alfredo, Lorena Beatriz Quiroga, y Adolfo Ludovico Martino. 2012. “Variation in the Thermal Parameters of *Odontophrynus Occidentalis* in the Monte Desert, Argentina: Response to the Environmental Constraints”. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology* 317 (3): 185–93. doi:10.1002/jez.1712.
- Sánchez Capa, Maritza, Carlos Mestanza Ramón, y Itaty Sánchez Capa. 2020. “Perspectiva de conservación del suelo en la Amazonía ecuatoriana”. *Green World Journal* 3 (2): 009.
- Saval, S. 1999. *Éxitos y fracasos de la remediación de suelos en sitios contaminados con hidrocarburos*. C. Siebe et al. Conservación y restauración de suelos. México: PUMA-UNAM.
- Schulte, Rogier P.O., Rachel E. Creamer, Trevor Donnellan, Niall Farrelly, Reamonn Fealy, Cathal O’Donoghue, y Daire O’hUallachain. 2014. “Functional Land Management: A Framework for Managing Soil-Based Ecosystem Services for the Sustainable Intensification of Agriculture”. *Environmental Science & Policy* 38 (abril): 45–58. doi:10.1016/j.envsci.2013.10.002.
- Scovazzo, P.E, D Good, y D.S. Jackson. 1992. “Soil Attenuation: In Situ Remediation of Inorganics”. *Proceedings of the HMC/Superfund*, HMCRI, .
- Semple, Kirk T, Kieron J Doick, Kevin C Jones, Peter Burauel, Andrew Craven, y Hauke Harms. 2004. “Defining bioavailability and bioaccessibility of contaminated soil and sediment is complicated”. American Chemical Society, Environmental Science and Technology. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es040548w>.
- Sepúlveda Aguirre, Jovany, Uvenny Quirama, Carlos Augusto Arboleda Jaramillo, y Elkin Olaguer Pérez Sánchez. 2018. “Análisis de los factores críticos de vigilancia para la competitividad de una empresa de base tecnológica”. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, n° 55 (noviembre): 2–21. doi:10.35575/rvucn.n55a1.

- Sims, Judith L, Ron C Sims, y John E Matthews. 1989. "Bioremediation of contaminated surface soils". USA: Environmental Protection Agency, Ada, OK (USA). Robert S. Kerr Environmental <https://www.osti.gov/biblio/7189241>.
- Smarte, A, y I Yusuf. 2021. "Comparative Evaluation of Wastewater and Bioventing System for the Treatment of Acid Mine Drainage Contaminated Soils". *Water-Energy Nexus* 4: 134–40. doi:10.1016/j.wen.2021.08.001.
- Solórzano, Victor, César Saltos, Mónica Céleri, Nancy Castillo, y Otto Vera. 2016. "El petróleo en el Ecuador: Un análisis del costo de agotamiento, aplicación del modelo hotelling". *Revista Científica y Tecnológica UPSE* 3 (3): 48–58. doi:10.26423/rctu.v3i3.198.
- Søndergaard, Gitte Lemming, Philip John Binning, Morten Bondgaard, y Poul Løgstrup Bjerg. 2018. "Multi-Criteria Assessment Tool for Sustainability Appraisal of Remediation Alternatives for a Contaminated Site". *Journal of Soils and Sediments* 18 (11): 3334–48. doi:10.1007/s11368-017-1805-2.
- Stankovic, Slavka, y Ana R. Stankovic. 2013. "Bioindicators of Toxic Metals". En *Green Materials for Energy, Products and Depollution*, editado por Eric Lichtfouse, Jan Schwarzbauer, y Didier Robert, 3:151–228. Environmental Chemistry for a Sustainable World. Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-007-6836-9_5.
- Stokes, Joanna D, GI Paton, y Kirk T Semple. 2005. "Behaviour and assessment of bioavailability of organic contaminants in soil: relevance for risk assessment and remediation". *Soil Use and Management* 21. Wiley Online Library: 475–86. doi:10.1079/SUM2005347.
- Tan, Wilson. 2009. "Responding to an Inland Oil Spill in Remote Areas". En *All Days*, SPE-122547-MS. Jakarta, Indonesia: SPE. doi:10.2118/122547-MS.
- Tapia-Báez, Raul Guillermo. 2015. "Diversidad de Escarabajos Copronecrófagos y Estado de Consevación de la Microcuenca del Río Pindo". Tesis de pregrado, Quito, Ecuador: Universidad Tecnológica Equinoccial. <http://repositorio.ute.edu.ec/handle/123456789/4704>.
- Teague, Richard, y Urs Kreuter. 2020. "Managing Grazing to Restore Soil Health, Ecosystem Function, and Ecosystem Services". *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4 (septiembre): 534187. doi:10.3389/fsufs.2020.534187.

- Terlouw, Tom, Christian Bauer, Lorenzo Rosa, y Marco Mazzotti. 2021. "Life Cycle Assessment of Carbon Dioxide Removal Technologies: A Critical Review". *Energy & Environmental Science* 14 (4): 1701–21. doi:10.1039/D0EE03757E.
- Torres Ordóñez, Mishell Fernanda. 2019a. "Percepción social respecto a suelos contaminados por hidrocarburos en la parroquia San Carlos, perteneciente al cantón Joya de los Sachas, provincia de Orellana, Ecuador". B.S. thesis, PUCE-Quito.
- . 2019b. "Percepción social respecto a suelos contaminados por hidrocarburos en la parroquia San Carlos, perteneciente al cantón Joya de los Sachas, provincia de Orellana, Ecuador". Tesis de pregrado, Quito, Ecuador: PUCE. [http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/17431/PERCEPCI%
c3%93N%20SOCIAL%20RESPECTO%20A%20SUELOS%20CONTAMINADOS%
20POR%20HI-DROCARBUROS%20EN%20LA%20PARROQUIA%20SAN%20CARLOS%2
c%20P.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/17431/PERCEPCI%c3%93N%20SOCIAL%20RESPECTO%20A%20SUELOS%20CONTAMINADOS%20POR%20HI-DROCARBUROS%20EN%20LA%20PARROQUIA%20SAN%20CARLOS%20c%20P.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- UK Environment Agency. 2003. "Principles for Evaluating the Human Health Risks from Petroleum Hydrocarbons in Soils: A Consultation Paper". *R&D Technical Report P5-080/TR1*, junio. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7cb30ded915d63cc65c503/sp5-080-tr1-e-e.pdf>.
- Valdes, James J. 2012. *Bioremediation*. 1^a ed. Dordrecht: Springer Dordrecht. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-015-9425-7>.
- Valenzuela, Ibonne, Laura Galindo, Diana Mantilla, Daren Stella Moncada, Eloy Orjuela, Keila Romano, y Javier Rincón. 2021. "Técnicas de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos con fines de uso en el municipio de Tibú, norte de Santander". *Suelos Ecuatoriales* 51 (1–2). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo: 107–18.
- Vicent, Teresa, Gloria Caminal, Ethel Eljarrat, y Damià Barceló. 2013. *Emerging organic contaminants in sludges: analysis, fate and biological treatment*. 1^a ed. Vol. 24. The Handbook of Environmental Chemistry. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35609-4>.
- Villalobos, Eduardo Martin, y Martín Sánchez. 2022. "El impacto de la actividad extractiva de hidrocarburos en la pesca artesanal". *Revista Kawsaypacha*:

- sociedad y medio ambiente*, n° 9 (mayo): 56–79. doi:10.18800/kawsaypacha.202201.003.
- Viñas, Marc. 2005. “Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica”.
- Vizúete, Ricardo, Alexandra Lascano, y Rodrigo Moreno. 2019. “Análisis econométrico en la gravedad de un derrame petrolero y su contaminación ambiental. Caso de estudio: Campo Sacha–Ecuador”. *Revista Espacios* 40 (18): 24–33.
- Vizúete-García, Ricardo Abel, Alina Eugenia Pascual-Barrera, Carlos Wilfrido Taco-Taco, y María Monserrath Morales-Padilla. 2020. “Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos”. *Revista Lasallista de Investigación* 17 (1): 177–87. doi:10.22507/rli.v17n1a19.
- Vogel, Hans-Jörg, Stephan Bartke, Katrin Daedlow, Katharina Helming, Ingrid Kögel-Knabner, Birgit Lang, Eva Rabot, et al. 2018. “A Systemic Approach for Modeling Soil Functions”. *SOIL* 4 (1): 83–92. doi:10.5194/soil-4-83-2018.
- Wang, Zhendi, y Merv Fingas. 1997. “Developments in the Analysis of Petroleum Hydrocarbons in Oils, Petroleum Products and Oil-Spill-Related Environmental Samples by Gas Chromatography”. *Journal of Chromatography A* 774 (1–2): 51–78. doi:10.1016/S0021-9673(97)00270-7.
- Williams, Richard T, P.S Ziegenfuss, y Peter J Marks. 1988. “Field Demonstration Composting of Explosives-Contaminated Sediments at the Louisiana Army Ammunition Plant (LAAP)”. *WESTON (ROY F) INC WEST CHESTER PA*, septiembre. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA202383.pdf>.
- Wu, Bo, Shuhai Guo, y Jianing Wang. 2021. “Spatial Ecological Risk Assessment for Contaminated Soil in Oiled Fields”. *Journal of Hazardous Materials* 403 (febrero): 123984. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123984.
- Wu, Manli, Warren A Dick, Wei Li, Xiaochang Wang, Qian Yang, Tingting Wang, Limei Xu, Minghui Zhang, y Liming Chen. 2016. “Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil”. *International Biodeterioration & Biodegradation* 107 (febrero). Elsevier: 158–64. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.019>.
- Xia, Yuqiang, y Michel C Boufadel. 2010. “Lessons from the Exxon Valdez Oil Spill disaster in Alaska”. *Disaster Advances* 3 (4): 270–73.

- Yagual Barzola, Karen Rocío. 2020. “Técnicas de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos aplicables en el cantón Salinas”. Tesis de pregrado, Universidad Estatal Península de Santa Elena. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/5345>.
- Yim, U. H., J. S. Khim, M. Kim, J.-H. Jung, y W. J. Shim. 2017. “Environmental Impacts and Recovery After the Hebei Spirit Oil Spill in Korea”. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 73 (1): 47–54. doi:10.1007/s00244-017-0375-z.