Análisis de ciclo de vida de la remediación de pasivos ambientales del tipo derrame ejecutadas por el Proyecto Amazonía Viva de PETROAMAZONAS EP

García Villacís, Karina Isabel

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Maestría en Sistemas de Gestión Ambiental

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Sistemas de Gestión Ambiental

Ramos Guerrero, Luis Alejandro, Ph.D.

30 de julio de 2021

URKUND

Urkund AnalysisResult

Analysed Document: TESIS ACV PAV FINAL Rev LR corrKGV rMH FINAL.docx (D111153365)

Submitted: 8/11/2021 12:39:00 AM

Submitted By: luis.ramos@ute.edu.ec

Significance: 5%

Sources included in the report:

Trabajo de titulación completa: Análisis de Ciclo de Vida de la Remediación de Pasivos Ambientales del Tipo Derrame ejecutadas por el Proyecto Amazonía Viva de PETROAMAZONAS EP

https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/RAOHE-DECRETOEJECUTIVO-1215.pdf

https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001789.pdf

https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/34629/TFG-RESANO-GOIZUETA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15380/1/T-ESPE-057997.pdf

https://nurel.com/sites/nurel.com/files/EPD_NUREL_en.pdf

http://192.188.49.17/jspui/bitstream/123456789/22225/1/Vivian%20Jamileth%20Santos%20Orellana.pdf

Firma:

LUIS ALEJANDRO RAMOS GUERRERO

Dr. Luis Alejandro Ramos Guerrero, Ph.D.

DIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **"Análisis de ciclo de vida de la remediación de pasivos ambientales del tipo derrame ejecutadas por el Proyecto Amazonía Viva de PETROAMAZONAS EP"** fue realizado por la Ing. **García Villacís, Karina Isabel**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la "Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE", razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 30 de julio de 2021

Firma:

Firmado electrónicamente por:
LUIS ALEJANDRO RAMOS GUERRERO

Dr. Luis Alejandro Ramos Guerrero, Ph.D.
Director

C.C.: 1712923760

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **García Villacís Karina Isabel**, con cédula de ciudadanía N°1716642440, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Análisis de ciclo de vida de la remediación de pasivos ambientales del tipo derrame ejecutadas por el Proyecto Amazonía Viva de PETROAMAZONAS EP"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la "Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE", respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 30 de julio de 2021

Firma:

KARINA ISABEL
GARCIA
VILLACIS

Karina Isabel García Villacís
C.C.: 1716642440

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Karina Isabel García Villacís**, con C.C. Nº 1716642440, autorizo a la "Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE" publicar el trabajo de titulación: "**Análisis de ciclo de vida de la remediación de pasivos ambientales del tipo derrame ejecutadas por el Proyecto Amazonía Viva de PETROAMAZONAS EP**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 30 de julio de 2021

Firmado electrónicamente por:
KARINA ISABEL GARCIA VILLACIS

Karina Isabel García Villacís
C.C.: 1716642440

Dedicatoria

Para Joaquín, Julia y Alejandro

Agradecimientos

A mi familia, por su amor, paciencia, cariño y estímulos para seguir siempre adelante.

Al Dr. Luis Ramos PhD, por todo su soporte, guía y ánimos para la realización de esta investigación.

Al Dr. José Luis Canga, y por su intermedio al Instituto Superior del Medio Ambiente (ISM) de Madrid, por el soporte técnico brindado durante el análisis y evaluación de los datos del ACV.

A PETROAMAZONAS EP a través de la Jefatura de Seguridad, Salud y Control Ambiental por permitirme realizar esta investigación. Al personal del Proyecto Amazonía Viva, por brindarme todas las facilidades necesarias para la recolección de datos.

Tabla de contenido

Dedicatoria 6

Agradecimientos 7

Tabla de contenido 8

Índice de tablas 12

Índice de figuras 13

Resumen 15

Palabras clave: 15

Abstract 16

Capítulo I 17

Introducción 17

- Formulación del problema 17
- Justificación del problema 20
- Objetivos de la investigación 22
  - Objetivo general 22
  - Objetivos específicos 22
- Hipótesis 22
- Marco teórico 23
  - Marco legal aplicable al caso de estudio 23
  - Normativa legal asociada al ACV 23
  - Análisis de Ciclo de Vida (ACV) 24
    - Alcance de un ACV 25
    - Análisis de inventario 25
    - Evaluación del ACV 26
    - Interpretación de un ACV. 26
  - Análisis de ciclo de vida como herramienta para la comparación de técnicas de remediación ambiental 27

Caso de estudio: Análisis de ciclo de vida de actividades de remediación ambiental de pasivos ambientales tipo derrame 30
Categorías ambientales analizadas 31
Cambio climático. 31
Agotamiento del ozono. 31
Formación de ozono fotoquímico. 32
Uso de suelo. 32
Agotamiento de recursos hídricos, minerales, fósiles y renovables. 32
Toxicidad humana, efectos cancerígenos y no cancerígenos. 33
Ecotoxicidad de agua dulce. 33
Material particulado. 33
Radiación ionizante para la salud humana. 33
Radiación ionizante para los ecosistemas. 33
Acidificación. 33
Eutrofización. 34

Capítulo II 35

Metodología 35

Sitio de estudio 35

Actividades desarrolladas en la remediación ambiental 35

Definición del objetivo y alcance de la investigación 40
Objetivos 40
General 40
Específicos 40
Alcance 41

Inventario del ciclo de vida 44

Evaluación del ciclo de vida 44

Interpretación de resultados del análisis del ciclo de vida 44

Capítulo III 45

Análisis de inventario de ACV 45

Levantamiento del inventario escenario de remediación ambiental 45

Levantamiento del inventario escenario de no actuación 48

Inventario 48

Capítulo IV 55

Resultados y discusión 55

Tabla 7. 56

Concentraciones de contaminantes antes de las actividades de remediación ambiental (Fuente: Proyecto Amazonía Viva). 56

A) Muestreo realizado el 30 de diciembre de 2018 56

B) Muestreo realizado el 15 de marzo de 2019 56

Resultados ACV de los procesos de remediación y no actuación 57

Resultados detallados por categoría de impacto ambiental 61
Cambio climático 64
Agotamiento del Ozono 66
Formación de ozono fotoquímico 67
Uso de suelo 69
Agotamiento de recursos hídricos 71
Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables 72
Material particulado 75
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos 76
Ecotoxicidad de agua dulce 77
Radiación ionizante para la salud humana 79
Radiación ionizante para Ecosistemas 80
Acidificación 81
Eutrofización marina, eutrofización terrestre y eutrofización de agua dulce 82

Resultados Midpoint (Ponderados) – Comparación entre escenarios 85

Resultados Endpoint: Categorizados por tipo de afectación 88

Evaluación del Impacto Ambiental (ACV) de cada fase de la remediación ambiental 90

Estrategias de mejora al proceso de remediación actualmente desarrollado por el Proyecto Amazonía Viva. 92

Capítulo V 95

Conclusiones y recomendaciones 95

Conclusiones 95

Recomendaciones 98

Referencias bibliográficas.....99

Anexos 106

Índice de tablas

Tabla 1. Recursos naturales en el escenario de remediación ambiental 45
Tabla 2. Características de vehículos, maquinaria pesada y equipo móvil utilizadas en las actividades de remediación. 46
Tabla 3. Composición de EPP utilizado en la remediación ambiental.....47
Tabla 4. Inventario ACV del escenario de remediación ambiental. 49
Tabla 5. Inventario ACV del Escenario de no actuación 54
Tabla 6. Límites permisibles para la identificación y remediación de suelos contaminados en todas las fases de la industria hidrocarburífera, incluidas las estaciones de servicios 55
Tabla 7. Concentraciones de contaminantes antes de las actividades de remediación ambiental.....56
Tabla 8. Concentraciones de contaminantes después de las actividades de remediación ambiental (Fuente: Proyecto Amazonía Viva). 57
Tabla 9. Resultados de la evaluación del impacto ambiental ACV – Etapa Caracterización en referencia a la unidad funcional.....58
Tabla 10. Resultados de la evaluación del impacto ambiental ACV – Etapa Caracterización, unidad porcentaje (%). 59
Tabla 11. Impactos ambientales relacionados a la fabricación de los insumos y equipos de protección personal que se utilizaron en el proceso de remediación. 63
Tabla 12. Distancias recorridas por vehículos en las distintas fases de remediación ambiental.....65
Tabla 13. Evaluación del impacto ambiental ACV de las actividades de remediación ambiental– Resultados ponderados (en puntos, Pt). 86
Tabla 14. Grupos de afectación final de cada categoría de impacto. 89
Tabla 15. Aporte de cada etapa de la remediación ambiental a las categorías de impacto evaluadas.....91

Índice de figuras

Figura 1. Esquema del proceso de remediación del tipo derrame.....21
Figura 2. Esquema de un análisis de ciclo de vida 25
Figura 3. Actividades de desbroce y recolección de residuos. A1 y A2: Desbroce manual. B1 y B2. Desbroce con maquinaria pesada. C1 y C2. Recolección de residuos Fuente: Proyecto Amazonía Viva. 36
Figura 4. Construcción de accesos y facilidades. B1. Uso de maquinaria pesada para construcción de accesos. B2. Construcción de diques para control de agua. B3-B4. Construcción de accesos. B5. Vista panorámica de área intervenida B6. Construcción de facilidades. Fuente Proyecto Amazonía Viva. 37
Figura 5. Lavado de suelo. C1. Vista panorámica de lavado de suelo y sedimiento. C2 y C3. Lavado de suelo cómo actividad puntual.....38
Figura 6. Reconformación y revegetación. D1. Vista panorámica frontal de área intervenida. D2 Vista panorámica lateral de área intervenida y D3. Recuperación paulatina del área intervenida.....39
Figura 7. Evaluación del impacto ambiental ACV de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 60
Figura 8. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría de cambio climático de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.....64
Figura 9. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría agotamiento del ozono de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.....66
Figura 10. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría formación de ozono fotoquímico de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 68
Figura 11. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría material particulado de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.....75
Figura 12. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría toxicidad humana, efectos no cancerígenos de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 76
Figura 13. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría toxicidad humana, efectos cancerígenos de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 74

Figura 14. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría ecotoxicidad de agua dulce de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 78
Figura 15. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría uso de suelo de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 69
Figura 16. Cadena causa-efecto del impacto a la biodiversidad y servicios ecosistémicos causados por el uso de suelo. Fuente (Koellner, et al 2013). 70
Figura 17. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría radiación ionizante para la salud humana de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 79
Figura 18. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría radiación ionizante para Ecosistemas de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 81
Figura 19. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría acidificación de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 82
Figura 20. Evaluación ambiental (ACV) en las categorías eutrofización terrestre y eutrofización marina de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.....83
Figura 21. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría eutrofización de agua dulce de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 84
Figura 22. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 72
Figura 23. Evaluación ambiental (ACV) en la categoría agotamiento de recursos hídricos de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame. 72
Figura 24. Evaluación del impacto ambiental ACV de las actividades de remediación ambiental– Resultados ponderados (en puntos, Pt). 87
Figura 25. Evaluación del impacto ambiental ACV por grupos de afectación final de las actividades de remediación ambiental de pasivos ambientales del tipo derrame. Resultados ponderados (en puntos).....89
Figura 26. Evaluación del impacto ambiental (ACV) por cada etapa de la remediación ambiental – Resultados globales.....92

Resumen

PETROAMAZONAS EP a través del Proyecto Amazonía Viva realiza la remediación de pasivos ambientales producidos por actividades hidrocarburíferas pasadas ubicados en las provincias de Orellana y Sucumbíos en la región amazónica del Ecuador. Con la finalidad de conocer el impacto ambiental generado por las actividades de remediación, mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se estudiaron dos escenarios: 1) No actuación, que significa no ejecutar ninguna operación de tratamiento dejando las matrices contaminadas en el sitio y 2) Remediación ambiental, en donde se estudiaron las cargas ambientales asociadas a la limpieza del derrame SA_124_02D. Los resultados de caracterización mostraron un mayor impacto ambiental para el escenario de no actuación para las siguientes 12 categorías: cambio climático, agotamiento de ozono, toxicidad humana con efectos no cancerígenos, material particulado, radiación ionizante para la salud humana, radiación ionizante para los ecosistemas, formación de ozono fotoquímico, acidificación, eutrofización terrestre, eutrofización marina, toxicidad de agua dulce y agotamiento de recursos minerales, fósiles y no renovables, mientras que el escenario de remediación fue mayor en las categorías: toxicidad humana con efectos cancerígenos, eutrofización de agua dulce, uso de suelo y agotamiento de recursos hídricos. Por otro lado, los resultados ponderados del ACV muestran un puntaje global de 5,45 puntos para la no actuación y 3.3 puntos para la remediación ambiental, lo que refleja que la ejecución de la remediación de pasivos ambientales disminuye el impacto ambiental global en un 39%. Con respecto a los grupos de afectación final, se verificó que la remediación ambiental disminuye el impacto con respecto a la no actuación en un 39%, 43% y 36% para el potencial a la afectación a la salud humana, a los ecosistemas y la disponibilidad de los recursos, respectivamente, lo que sugiere que la remediación ambiental contribuye de manera positiva a mitigar los efectos ambientales generados por la presencia de fuentes de contaminación asociada a desechos de la actividad hidrocarburífera en la Amazonía ecuatoriana.

Palabras clave:

- **REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES**
- **ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**
- **CONTAMINACIÓN AMBIENTAL**
- **HIDROCARBUROS**

Abstract

PETROAMAZONAS EP through its Project Amazonía Viva carries out the remediation of Environmental Liabilities due to former petroleum-extraction activities in the provinces of Orellana and Sucumbios in the Amazonian region of Ecuador. A Lyfe-cycle Assessment was used to know the environmental impact of remediation activities, two scenarios were considered: 1) Non-action, which means that no treatments performed, leaving polluted matrixes in the place and 2) Environmental Remediation, where environmental impacts associated to the cleaning of oil-spill SA_124_02D were studied. Results showed a bigger environmental impact for the Non-action scenario in the following 12 categories: climate change, ozone depletion, human-toxicity with no-carcinogenic effects, particulate matter, ionizing radiation for human health, ionizing radiation for ecosystems, photochemical ozone formation, acidification, terrestrial eutrophication, marine eutrophication, freshwater toxicity and mineral, fossil and non-renewable resources depletion. In the other hand, weighted results of ACV showed a global score of 5.45 points for non-action and 3.3 for environmental remediation. It reflects that the remediation of environmental liabilities decrease global environmental impact in 39%. Respect to the final-affectation groups, it was verified that environmental remediation decreases the potential impact compared with non-action in 39%, 43% and 36% for human health, ecosystems affectation and resources availability respectively. This indicates that these activities have a positive contribution in the mitigation of environmental effects due to the presence of pollution sources associated to wastes of the petroleum-extraction activities in the Amazonian region of Ecuador.

Key words:

- **ENVIRONMENTAL REMEDIATION**
- **LIFE CYCLE ASSESSMENT**
- **ENVIRONMENTAL POLLUTION**
- **PETROLEUM**

Capítulo I

Introducción

Formulación del problema

La actividad petrolera en la Amazonía ecuatoriana comienza a partir de 1970 con el descubrimiento del campo Lago Agrio, etapa que se extiende hasta el año 2001 con la construcción del oleoducto de crudos pesados (Ministerio del Ambiente, 2020). La industria hidrocarburífera es hasta la actualidad uno de los principales rubros de la economía del Ecuador, representando junto con la agricultura una actividad económica primaria (Actividades Económicas, 2018) y alcanzando la producción nacional de petróleo un total de 48,22 millones de barriles en el tercer trimestre de 2018 (Banco Central del Ecuador, 2019).

En décadas pasadas, las actividades de la industria hidrocarburífera en todas sus fases desarrolladas en la región amazónica ecuatoriana, no fueron realizadas considerando las debidas precauciones ambientales, siendo una práctica común la construcción de piscinas alrededor de las facilidades de la industria para la disposición de todo tipo de residuos (entre ellos: pruebas de producción, lodos, agua de formación, ripios de perforación, etc.), en estos lugares posteriormente no se realizó ningún tipo de tratamiento a los desechos (Recalde, 2017; San Sebastián, Miguel;Tanguila, Aníbal; Santi, 2004). Otros factores de contaminación fueron los derrames de petróleo u otras sustancias (aguas de formación, por ejemplo que son de alta salinidad) ya sea de forma accidental, por fallas en las facilidades o atentados (San Sebastián, Miguel;Tanguila, Aníbal; Santi, 2004). Estos eventos convirtieron los lugares afectados con el paso del tiempo en “pasivos ambientales” que, se definen como *“aquellos daños ambientales y/o impactos ambientales negativos no reparados o restaurados respectivamente, o aquellos que han sido intervenidos previamente pero de forma inadecuada o incompleta y continúan estando presentes en el ambiente constituyendo un riesgo para cualquiera*

de sus componentes, generados por una obra, proyecto o una actividad productiva o económica en general"[1]*.*

Posteriormente, debido a varios fenómenos sociales como crecimiento demográfico, expansión de centros poblados y fronteras agrícolas, aumento de la densidad poblacional entorno a las vías de acceso e infraestructura petrolera y migración hacia la amazonía, algunos de estos pasivos ambientales pasaron a estar cerca o al interior de centros poblados, comunidades, comunas indígenas, propiedades públicas y privadas (San Sebastián, Miguel;Tanguila, Aníbal; Santi, 2004), causando problemas de salud en sus habitantes, problemas sociales como la falta de planificación en el crecimiento de las ciudades, la baja satisfacción de necesidades básicas y el deterioro del patrimonio natural-cultural (Ministerio del Ambiente, 2020). Es necesario recalcar que existe evidencia que asocia un mayor riesgo de enfermedades de la piel, genéticas, digestivas, respiratorias y reproductivas en poblaciones expuestas a contaminantes derivados de la actividad hidrocarburífera en comparación con poblaciones que no están expuestas a estos compuestos (Paz y Miño et al., 2010; San Sebastián, Miguel;Tanguila, Aníbal; Santi, 2004).

Desde el año 2005, el Gobierno ecuatoriano lleva adelante varios proyectos para el cierre y remediación de pasivos ambientales que fueron generados décadas atrás por la actividad hidrocarburífera en la Amazonía ecuatoriana. En el periodo 2005-2013 estas actividades fueron desarrolladas a través del Proyecto de Eliminación de Piscinas Contaminadas y Limpieza de Derrames (PEPDA) y del Plan de Restauración Integral de Pasivos Ambientales (PRIPA) (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2015) a cargo de la empresa pública EP PETROECUADOR. De octubre de 2013 a diciembre 2020, la remediación de pasivos fue asumida por PETROAMAZONAS EP a través del Proyecto Amazonía Viva en virtud del Decreto Ejecutivo 1351 A[2], y desde 2021 estas actividades fueron nuevamente asumidas por EP PETROECUADOR. El Proyecto Amazonía Viva realiza la limpieza, remediación, reconformación y revegetación de fuentes de

[1] (Acuerdo Ministerial 169 de 30 de agosto de 2012, publicado en R.O. No. 655 de 7 de septiembre de 2012.) (Acuerdo Ministerial 10 A y 11 A, publicados en el R.O. No. 791 de 18 de septiembre de 2012.)

[2] Decreto Ejecutivo 1351 A, publicado en el Segundo Suplemento del Registro Oficial No. 860 de 2 de enero de 2013.

contaminación ubicadas en siete áreas de operación en los campos: Bermejo, Lago Agrio, Libertador, Cuyabeno, Shushufindi, Sacha y Auca en las provincias de Francisco de Orellana y Sucumbíos, fundamentándose en los principios de prevención y precaución consagrados en los artículos 71 y 72 de la Constitución de la República del Ecuador.

Este proyecto ha desarrollado e implementado metodologías específicas para cada fase de la remediación ambiental, contando para ello con unidades de soporte para la limpieza de las fuentes de contaminación, la recuperación de crudo contenido en éstas, el tratamiento de suelo contaminado, la revegetación de áreas remediadas, investigación aplicada, entre otras.

Las actividades de remediación ambiental involucran una inversión considerable en recursos técnicos y humanos que conllevan finalmente a generar territorios libres de contaminación; sin embargo, estas actividades también pueden generar un impacto ambiental negativo por el uso de energía, químicos y otros recursos y por la generación de emisiones y desechos de diversos tipos, considerándose estos “impactos secundarios” de la actividad (Lemming et al., 2010).

Con la finalidad de evaluar los efectos ambientales globales de la remediación ambiental; es decir, conocer si el impacto ambiental por ejecutar la remediación es superior, inferior o igual a no ejecutarla y mantener el pasivo ambiental en el sitio a lo largo del tiempo, se utilizó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que en materia de gestión ambiental es útil para evaluar e identificar oportunidades de mejora en el desempeño ambiental a lo largo del ciclo de vida de un producto o servicio. Aporta de información a quienes toman decisiones en la industria (por ejemplo, para la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades, el diseño y rediseño de productos o procesos), además que constituye una herramienta de marketing en el caso de certificaciones ambientales de productos (ISO 14040:2006. Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia., 2006)

Por lo antes mencionado, el ACV constituye una herramienta válida para evaluar el impacto ambiental de las actividades de remediación ambiental ejecutadas por el Proyecto Amazonía Viva.

Justificación del problema

El Proyecto Amazonía Viva en el período 2013-2020 ha realizado la limpieza de 976 fuentes de contaminación asociados a la industria hidrocarburífera, la remediación de 1´316.000 m^3 de suelo y la recuperación de 42.700 barriles de crudo, siendo de esta manera el brazo ejecutor de la política pública en materia de remediación ambiental.

Se han identificado tres tipos de pasivos ambientales según sus características: piscinas, fosas y derrames y de manera general, el proceso de remediación ambiental contempla las siguientes fases[3]:

1. Desbroce del área, recolección y lavado de desechos sólidos contaminados.
2. Succión y transporte de fluidos como crudo y agua.
3. Tratamiento de crudo y agua y su posterior incorporación a la producción nacional.
4. Tratamiento de suelo contaminado.
5. Taponamiento y reconformación de las áreas intervenidas.
6. Revegetación del sitio.

Considerando que hasta el momento no han sido evaluados los impactos ambientales generados por las actividades de remediación ambiental, resulta de particular importancia realizarlos, generando de este manera indicadores de desempeño ambiental, que permitan al Proyecto Amazonía Viva, de ser necesario implementar mejoras en sus procesos, y alinear sus actividades a los requerimientos establecidos en el Código Orgánico Ambiental que en su Artículo 245 establece: *"Obligaciones generales para la producción más limpia y el consumo sustentable. Todas las instituciones del Estado y las personas naturales o jurídicas, están obligadas según corresponda, a: (…)4. Prevenir y minimizar la generación de cargas contaminantes al ambiente, considerando el ciclo de vida del producto. (…)".* Esta información además le permite al Proyecto Amazonía Viva, alinearse a los requisitios establecidos en la Norma ISO 14001:2017, que en su artículo 6.1.2 *"Aspectos ambientales significativos*" señala que la organización deberá identificar los aspectos ambientales e impactos de sus

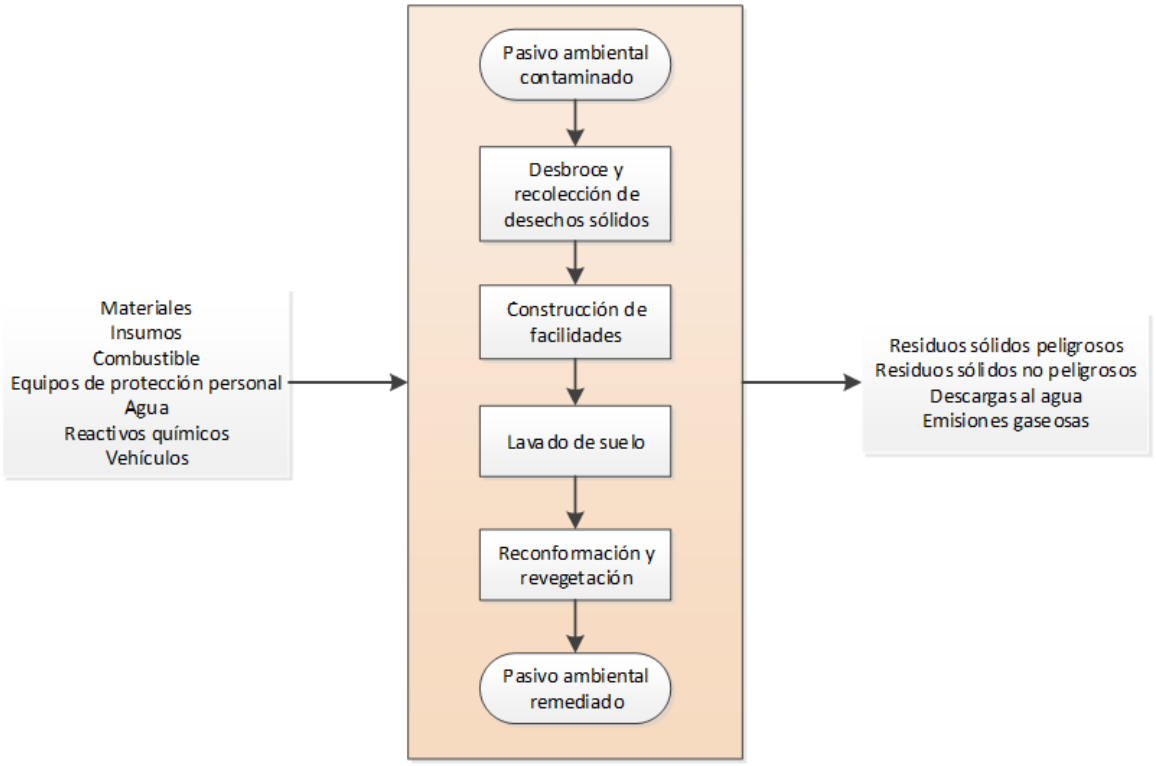
[3] Fases detalladas en la metodología de trabajo del Proyecto Amazonía Viva, adjunto al Oficio No. 063-PAM-SSA-2013 de 28 junio de 2013.

actividades, productos y/o servicios teniendo en cuenta la perspectiva del ciclo de vida (ISO 14001:2015. Sistemas de gestión ambiental - Requisitos con orientación para su uso, 2017).

Se ha seleccionado como modelo de estudio la fuente de contaminación del tipo “Derrame”, debido a la disponibilidad de datos relacionados con las entradas y salidas de recursos, además que un porcentaje considerable de fuentes de contaminación corresponde a este tipo de escenario (35%, periodo 2015-2019). Se ha escogido el derrame codificado como SA_124_02D, esta fuente de contaminación está asociada a un derrame proveniente del pozo Sacha 124, localizado en el área operativa Sacha, cantón Joya de los Sachas, provincia de Francisco de Orellana. Para el ACV se ha utilizado el enfoque de la cuna a la tumba como se visualiza en la Figura 1.

Figura 1.

Esquema del proceso de remediación del tipo derrame.



Objetivos de la investigación

Objetivo general

Realizar la evaluación ambiental de las actividades de remediación de fuentes de contaminación del tipo derrame ejecutadas por el Proyecto Amazonía Viva, mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

Objetivos específicos

- Realizar el inventario de ciclo de vida de las actividades de remediación de fuentes de contaminación tipo derrame.

- Desarrollar la evaluación ambiental del inventario de ciclo de vida de las actividades de remediación de fuentes de contaminación del tipo derrame.

- Realizar el estudio comparativo mediante el análisis de ciclo de vida del escenario de ejecución de remediación ambiental de fuentes de contaminación del derrame comparado con el escenario de no actuación.

- Proponer estrategias de mejora al proceso de remediación actualmente desarrollado en base a los resultados del ACV obtenidos.

Hipótesis

Las actividades de remediación ambiental del Proyecto Amazonía Viva desarrolladas en fuentes de contaminación tipo derrame contribuyen positivamente a la mejora en las categorías de impacto ambiental (cambio climático, acidificación, uso de suelo, entre otras) en comparación con espacios en los que no se realicen actividades de remediación ambiental.

Marco teórico

Marco legal aplicable al caso de estudio

La remediación ambiental de pasivos ambientales realizada por el Proyecto Amazonía Viva en la Amazonía ecuatoriana se sustenta en el siguiente marco legal:

- Constitución de la República del Ecuador publicada en el Registro Oficial No. 449 de 20 de Octubre de 2008. Artículos. 14, 66, 396 y 397.
- Código Orgánico del Ambiente publicado en el Registro Oficial No. 983 de 12 de Abril de 2017. Artículos: 1, 3 y 7,
- Código Orgánico Integral Penal publicado en Registro Oficial No. 180 de 10 de febrero de 2014. Capítulo XA.
- Ley de Patrimonio Cultural publicada en el Registro Oficial Suplemento No. 465 de 19 de noviembre de 2004.
- Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD) publicado en el Registro Oficial Suplemento No. 303 de 19 de octubre de 2010, modificado el 21 de mayo de 2018. Artículos 54 y 466.
- Reglamento al Código Orgánico del Ambiente expedido mediante Decreto Ejecutivo No. 752 de 21 de mayo de 2019.
- Reglamento Ambiental para Operaciones Hidrocarburíferas. Decreto Ejecutivo 1215 publicado en el Registro Oficial Suplemento No. 265 de 13 de febrero de 2001.

Normativa legal asociada al ACV

Por otro lado, las normas internacionales principales de aplicación en el ACV son:

- UNE-EN ISO 14040:2006. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia.
- UNE-EN ISO 14044:2006. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices. La ISO 14044 sustituyó a ISO 14041, 14042 y 14043.

Otras referencias a considerar son:

- ISO 14047:2003. Ejemplos de aplicación de Inventario de Ciclo de Vida.

- ISO 14048:2002. Formato de datos del Inventario de un ACV.
- ISO 14049:2000. Ejemplos de aplicación de objetivos, alcance y análisis de inventario.

Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El ACV según lo establecido en la norma NTE-ISO 14040:2006, es la "*recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida*", siendo el Ciclo de Vida de un producto las "*etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final*". Esta herramienta de evaluación ambiental se caracteriza porque analiza el sistema de forma global, desde la extracción y procesamiento de las materias primas hasta la disposición de los productos considerando sus efectos sobre todo el medio ambiente circundante (por ejemplo, sobre el calentamiento global, destrucción de la capa de ozono, entre otros), en contraste con otros métodos que usualmente se enfocan solamente en los efectos inmediatos que tiene el sistema sobre sus alrededores como son los vertidos y emisiones, por lo cual existe la posibilidad de que al tomar algunas medidas para reducir éstas en un proceso determinado, se aumenten las mismas o distintas en otras etapas del ciclo de vida del producto obtenido en el proceso (Cardona, 2012).

El ACV está basado en estudios científicos y ha aportado al establecimiento de políticas ambientales y en el soporte de decisiones basadas en la Producción y Consumo Sustentable (SCP, por sus siglas en inglés), además constituye el soporte técnico de aplicaciones como: el ecodiseño, las ecoetiquetas, las declaraciones ambientales de producto, la huella de Carbono, la huella hídrica, la huella ecológica y la compra verde (European Commission, 2012).

De acuerdo a lo establecido en la Norma UNE-EN ISO 14040:2006, un estudio de ACV consta de cuatro fases (ISO 14040:2006. Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia., 2006):

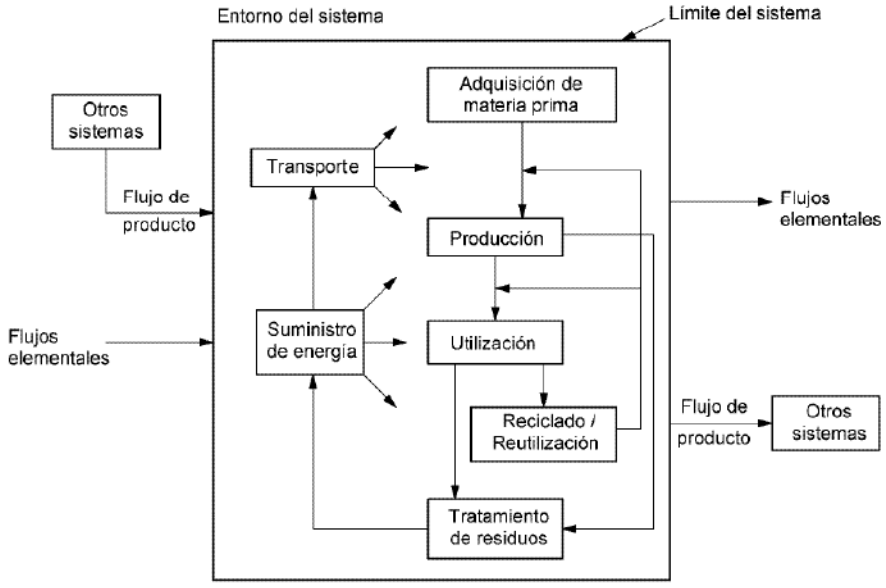
a) Definición del objetivo y el alcance,
b) Análisis de inventario,
c) Evaluación del impacto ambiental,
d) Interpretación de resultados.

Alcance de un ACV. Incluye los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y del uso previsto del estudio. La profundidad y amplitud del ACV puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de un ACV en particular.

Análisis de inventario. El inventario del ciclo de vida (ICV) recopila los datos de entrada y salida en relación con el sistema bajo estudio para cumplir los objetivos del estudio definido. El análisis a realizar incluye de forma general la extracción de las materias primas, producción, transporte, distribución, uso, reciclaje y disposición final (Lobo, 2013). En la Figura 2 se esquematiza el ACV, determinándose sus límites, flujos elementales e interacción con otros sistemas.

Figura 2.

Esquema de un análisis de ciclo de vida (Fuente: Lobo, 2013).



De acuerdo a lo citado por (Lobo, 2013), el inventario del ciclo de vida incluye los siguientes pasos:

- Definición detallada del sistema estudiado. A partir de la descripción preliminar del sistema realizado en Ia fase de objetivos y alcance se define detalladamente el sistema estudiado, incluyendo Ia división en subsistemas interrelacionados para facilitar la recogida de los datos asociados. Se recomienda Ia construcción de un diagrama de flujo para Ia identificación de corrientes y conexiones entre los subsistemas.

- Recogida de datos.
- Normalización de los datos en base a Ia unidad funcional definida.
- Obtención de los inventarios, parciales de los subsistemas y global del sistema.

Para garantizar Ia reproducibilidad del estudio, así como el carácter científico del mismo, es importante que los datos sean representativos, confiables y fiables, para lo que se definen criterios de validez de datos. En este sentido se busca que los datos sean en su mayoría adquiridos de manera experimental; sin embargo, pueden también ser valores tomados de Ia bibliografía o bases de datos (Lobo, 2013).

Evaluación del ACV. La evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) es la tercera fase del ACV. En esta etapa se seleccionan las categorías de impacto relevantes del sistema bajo estudio, los indicadores para esas categorías y los modelos de caracterización a emplear. Se clasifican los resultados del ICV, se calculan los valores de los indicadores de categoría ambiental de impacto y se los caracteriza, con la finalidad de evaluar los resultados del ICV a fin de comprender su importancia ambiental (Niembro García, 2009).

Interpretación de un ACV. La interpretación del ciclo de vida es la fase final del procedimiento de ACV, en la cual se resumen y discuten los resultados del ICV y de la EICV como base para las conclusiones y recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos. Generalmente incluye Ias siguientes etapas (Adriano, 2001):

- Análisis de contribución, en donde se identifican Ias principales cargas ambientales e impactos.
- Análisis de dominancia o identificación de los “*hot spots*” o puntos conflictivos del ciclo de vida. Una vez que se conocen, será sobre estos elementos a los que deben dirigirse Ias medidas de mejora o innovación.
- Análisis de sensibilidad de los datos. Este análisis ayuda a identificar los efectos que Ia variabilidad, lagunas o incertidumbres de los datos tienen sobre el resultado final del estudio e indican el nivel de fiabilidad del mismo.
- Conclusiones y recomendaciones finales del ACV.

Análisis de ciclo de vida como herramienta para la comparación de técnicas de remediación ambiental

Se han realizado numerosos estudios que mediante el uso del ACV evalúan desde un enfoque holístico la eficiencia de diversas tecnologías de remediación ambiental; ya que, si bien la remediación genera impactos locales, el costo ambiental de estas actividades puede ser global o regional (con respecto al cambio climático, generación de emisiones gaseosas, pérdida de biodiversidad, etc), por lo que, es necesario evaluar el balance costo-beneficio de ejecutarlas (Lemming et al., 2010; Singh et al., 2009).

La aplicación de ACV en la evaluación de tecnologías de remediación ambiental ha permitido cuantificar las emisiones al agua, suelo y aire en cada fase del proceso e identificar impactos ambientales significativos; entender los efectos al medio ambiente y salud humana con respecto al consumo de materiales y generación de emisiones y comparar los impactos ecológicos y a la salud entre tecnologías de remediación; para con esta información, promover la aceptación de las partes interesadas (estado, comunidad, otros) de una determinada estrategia de remediación (Nguyen, 2011):

Con estas consideraciones, en 2009 la Agencia de Regulación y Control Ambiental de Estados Unidos con el apoyo de organismos como el Departamento de Control de Sustancias Tóxicas introdujeron la “Iniciativa de Limpieza Verde” (The Green Cleanup Standard Initiative) con la finalidad de generar guías para una remediación ambiental amigable con el ambiente y que minimice la huella ambiental de su aplicación. En este proyecto se utilizó el ACV como una herramienta de análisis para la cuantificación de entradas y salidas asociadas a varias estrategias de remediación evaluadas (USEPA, 2009).

Algunos de los estudios realizados en ACV evaluando actividades de remediación ambiental son:

- Análisis comparativo de cinco tecnologías de remediación ambiental (no actuación, encapsulación, excavación, biorremediación y lavado de suelo) evaluando su impacto de manera cualitativa ó manejo de ciclo de vida (LCM: Life cycle management por sus siglas en inglés) y cuantitativa ó evaluación de ciclo de vida (LCA: Life cycle

assessment). En el LCM se identificaron todas las fases de la remediación y en cada una se describieron las entradas y salidas de recursos, materiales y energía, identificando así los procesos más contaminantes y estableciendo de manera global el impacto de cada proceso, permitiendo establecer estrategias de mejora de forma general. Por otro lado, el LCA es un estudio cuantitativo, sistemático, riguroso y detalla todos los materiales, energía y recursos a lo largo del ciclo de vida del proceso de remediación, siguiendo para ello las metodologías establecidas en las Normas ISO para ACV. El estudio concluyó que es recomendable el LCM para una selección de tecnologías que priorice el cuidado del medio ambiente y la salud humana (Page et al., 1999).

- Evaluación de los efectos primarios y secundarios asociados a las actividades de remediación de suelo contaminado con diésel con una concentración inicial promedio de 6145 mg diésel/kg de suelo, comparando dos escenarios: construcción de facilidades temporales aledañas al sitio contaminado para el tratamiento *on site* del suelo y el uso de una plataforma de remediación permanente, con capacidad de tratar 25000 m^3 de suelo por año. Se determinó que los impactos primarios correspondieron a la toxicidad de los contaminantes residuales del suelo tratado y se observó que el suelo por si solo es responsable de la disminución de una importante fracción de sus contaminantes, por lo que, es adecuado alcanzar metas más restrictivas de remediación. Con respecto a los impactos secundarios, que correspondieron al impacto de las actividades de remediación se determinó que el uso de facilidades temporales contribuyó de forma significativa al impacto ambiental global del sistema, debido mayoritariamente al uso de asfalto y pavimentación necesarios para su construcción, en contraste con el uso de plataformas permanentes, donde se observó que el transporte de material contaminado no contribuye significativamente a las cargas ambientales del sistema (Toffoletto et al., 2005).
- Al analizar la remediación de pasivos contaminados con tricloroetileno, se observó que declorinación y posterior biorremediación *in situ* reducen significativamente los impactos ambientales en comparación con otras metodologías como desorción térmica *in situ* y excavación, tratamiento *ex situ* y disposición (Lemming et al., 2010).

- En la revisión bibliográfica de los estudios de ACV realizados para evaluar tecnologías de remediación realizada por Lemming et al., 2010, se determinó que la mayoría de estudios son *ex situ*, y solo pocos *in situ*. Esta investigación resalta la importancia de la evaluación de los impactos primarios y secundarios, definiéndose como impactos primarios, aquellos relacionados con la contaminación residual dejada en el subsuelo o cuerpos hídricos posterior a las actividades de remediación estando éstas asociadas a la eficiencia y tiempo de aplicación de cada metodología, mientras que los impactos secundarios se refieren al consumo de recursos y generación de emisiones en todas las fases del ciclo de vida del proyecto. El estudio enfatiza que debido a la fuerte dependencia de los resultados a las condiciones locales son necesarios estudios complementarios y sugiere la inclusión de las afectaciones a los cuerpos hídricos como una categoría de impacto específica que incluya los daños a la salud humana a través del agua o la inclusión de este aspecto en la categoría de toxicidad humana asociada a su modelo de caracterización y normalización.

- Análisis tres tecnologías de remediación de suelo contaminado con Policloruros de Bifenilo (PCB): biorremediación con aireación mecánica, biorremediación con aireación eléctrica e incineración. De éstas, la más amigable desde el punto de vista ambiental fue la biorremediación con aireación eléctrica, seguida de la biorremediación con aireación mecánica y la incineración. Se concluyó que se requieren datos más precisos y detallados para el caso de la incineración y se debe complementar el estudio utilizando análisis de riesgo a la salud humana y un estudio de aceptabilidad (Busset G, 2011). Resultados similares se observaron al comparar tres estrategias de remediación usadas en Palo Alto, California: la biorremediación, lavado de suelo y una tecnología híbrida de ambas concluyéndose que la biorremediación es la que menos cargas ambientales genera (Nguyen, 2011).

- Estudio de las siguientes metodologías de remediación a pasivos ambientales contaminados con metales pesados producto de la actividad siderúrgica: excavación y transporte al vertedero, encalado, estabilización/solidificación, fitorremediación y no actuación. Se determinó que la fitorremediación es la tecnología más amigable y eficiente, siendo su limitante el tiempo que se requiere la remediación total que supera los 5 años de tratamiento (Lobo, 2013).

Caso de estudio: Análisis de ciclo de vida de actividades de remediación ambiental de pasivos ambientales tipo derrame

El Proyecto Amazonía Viva ha desarrollado metodologías específicas para la eliminación de fuentes de contaminación de la industria hidrocarburífera, las cuales han sido catalogadas en tres tipos: piscinas, fosas y derrames.

Se definen los siguientes términos, en el contexto de las actividades que realiza el Proyecto Amazonía Viva[4]:

- *"**Derrames:** Son vertidos no controlados de hidrocarburos, agua de formación o sus derivados que se producen debido a causas naturales, accidentes o prácticas inadecuadas, que contaminan el medio ambiente, especialmente los suelos y cuerpos de agua.*
- ***Fosas**: Son excavaciones de dimensiones pequeñas, en promedio de 2x2x3 m, que se realizaban como una mala práctica cerca de las orillas de los ríos, lagunas o pantanos con la finalidad de confinar el material contaminado producto de los derrames de los hidrocarburos.*
- ***Piscinas:** Son excavaciones de dimensiones considerables que van desde 10x8x3 m hasta 100x100x5 m, ubicados normalmente adyacentes a una plataforma de perforación y/o en las estaciones de producción, las cuales servían para depositar lodos o ripios de perforación o realizar las pruebas de producción; estas piscinas pueden estar abiertas y/o taponadas. Una piscina abierta mantiene los contaminantes en contacto directo con el medio ambiente, mientras que la taponada está cubierta con capas de suelo sobre los contaminantes, por lo que a simple vista pareciera que no existe contaminación.*
- ***Remediación:** Conjunto de medidas y acciones tendientes a restaurar afectaciones ambientales producidas por impactos ambientales negativos o*

[4]Acuerdo Ministerial 169 de 30 de agosto de 2012, publicado en el Registro Oficial No. 065 de 7 de marzo de 2012 y de Acuerdos Ministeriales 010 A y 011 A, publicados en el Registro Oficial No. 791 de 18 de septiembre de 2012.

daños ambientales a consecuencia del desarrollo de actividades, obras o proyectos económicos o productivos".

Para el caso de la remediación ambiental de derrames, se siguen las etapas detalladas en la Figura 1 que se describen a continuación:

- Desbroce y recolección de desechos sólidos.
- Construcción de facilidades.
- Lavado de suelo.
- Reconformación y revegetación.

Categorías ambientales analizadas

Una categoría de impacto es una clase específica que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos. Cada categoría de impacto (por ejemplo, acidificación), precisa de una representación cuantitativa denominada indicador de categoría o unidad de referencia (por ejemplo emisión de ácido equivalente). La suma de diferentes intervenciones ambientales (por ejemplo emisión de gases), se convierten a unidades equivalentes del indicador (Leiva, 2016).

Para el ACV del presente estudio se consideraron los impactos ambientales organizados en las siguientes categorías ambientales, mismas que están establecidas en el Centro Común de Investigación de la Unión Europea y son las utilizadas en la metodología ILCD 2011, Midpoint V1.10.

Cambio climático. Es el fenómeno observado que muestra un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas. Está asociado a la emisión de gases de efecto invernadero al aire y tiene efectos negativos en la conservación de ecosistemas, salud humana y bienestar en general. Su unidad de referencia es el kg eq.CO_2 y su factor de caracterización es el Potencial de calentamiento global en un periodo de 100 años (PCG100) (PRé, 2019).

Agotamiento del ozono. Es la destrucción de la capa de ozono se genera principalmente por la emisión de compuestos hidrocarbonados halogenados (bromuros, fluoruros, cloruros, en conjunto denominados CFC), lo que disminuye la capacidad de

protección de las radiaciones ultravioletas solares causando afectación a la salud humana, animal, ecosistemas terrestres y acuáticos, ciclos bioquímicos y materiales. Su unidad de referencia es el kg eq.CFC^{-11} y su factor de caracterización es el Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono, en un horizonte de tiempo de 100 años. (PCG100) (PRé, 2019)(Prinn R., 2013).

Formación de ozono fotoquímico. Formación de precursores como CO_2, PM_{10} y NO_x. Los NO_X incluyen: NO, NO_2, NMHCS (hidrocarburos diferentes al metano por sus siglas en inglés), CH_4 y CO. En conjunto estos compuestos se denominan NMVOC (Johnson, 2017) y dan lugar a la contaminación fotoquímica. La luz solar incide sobre dichos precursores, provocando la formación e incremento de una serie de compuestos conocidos como oxidantes fotoquímicos (el Ozono-O3 es el más importante por su abundancia y toxicidad). Su unidad de referencia es el kg eq. NMVOC y su factor de caracterización es el Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos (PFOF) (PRé, 2019).

Uso de suelo. Se refiere al uso de suelo y su relación con la biodiversidad, funciones ecológicas y calidad de suelo como base de las funciones vitales. Para el caso de estudio, la metodología ILCD interpreta el uso de suelo como el Potencial de Producción Biótica y se refiere a la capacidad de los ecosistemas para la producción de biomasa, por lo que su indicador es el Déficit de Materia Orgánica en el Suelo (SOM) debido al uso de suelo (mg SOM/año). Su unidad de referencia es el kg de déficit de C y su factor de caracterización es el Factor de Agotamiento biótico. (PRé, 2019).

Agotamiento de recursos hídricos, minerales, fósiles y renovables. Es la disminución de recursos asociados a la extracción de minerales, combustibles fósiles y recursos naturales y al uso del recurso hídrico a lo largo del tiempo, lo que implica que las futuras generaciones deberán realizar un mayor esfuerzo o “energía suplementaria” para conseguirlos. Su alcance geográfico es a escala global basado en la concentración de reservas y tasa de acumulación. Su unidad de referencia es el m^3 eq. de agua para el agotamiento de agua y kg eq. Sb para el agotamiento de recursos hídricos, minerales, fósiles y renovables. Su factor de caracterización es el Factor de Agotamiento abiótico. (PRé, 2019).

Toxicidad humana, efectos cancerígenos y no cancerígenos. Son los factores asociados a enfermedades cancerígenas y no cancerígenas causados por la emisión de compuestos químicos en ambientes industriales, urbanos, rurales, agua de consumo, agua del mar, suelo agrícola, suelos naturales y exposición del ser humano a pesticidas y otros residuos agrícolas. Los pesos añadidos a factores cancerígenos y no cancerígenos son iguales. Su unidad de referencia son las Unidades comparativas tóxicas (UTC) y su factor de caracterización es el Número casos/$kg_{emitido}$ (PRé, 2019).

Ecotoxicidad de agua dulce. Se refiere al impacto en los ecosistemas acuáticos como resultado de emisiones de sustancias tóxicas. Su unidad de referencia son las Unidades comparativas tóxicas (UTC) y su factor de caracterización es el PAF.m^3.dia/$kg_{emitido}$ (PRé, 2019).

Material particulado. Es la generación de material particulado de un tamaño igual o menor a 2.5 µm por el uso de fuentes de emisiones móviles. Se asocian a varias enfermedades del tipo respiratorio. Su unidad de referencia y factor de caracterización es el kg $PM_{2.5}$ eq. (Greco et al., 2007).

Radiación ionizante para la salud humana. Se refiere a las afectaciones a la salud humana producidas por actividades que generan material radiactivo al medio ambiente. Su unidad de referencia es el kBq U_{235} eq. y su factor de caracterización son las Unidades de U_{235} eq. (Frischknecht et al., 2000).

Radiación ionizante para los ecosistemas. Se refiere a los riesgos potenciales para el ambiente atribuibles a la emisión de sustancias contaminantes de las industrias. Su unidad de referencia es el UTC y su factor de caracterización es el CTUe*volumen*tiempo (Garnier-Laplace et al., 2009).

Acidificación. Es la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera en forma de ácidos. Se refiere a los riesgos potenciales para el ambiente atribuibles a la emisión de sustancias contaminantes de las industrias. Su unidad de referencia es la mol H^+ eq. y su factor de caracterización es el Potencial de Acidificación (PA) (PRé, 2019).

Eutrofización. Es el enriquecimiento excesivo de nutrientes en ecosistemas terrestres y acuáticos, principalmente por Nitrógeno y Fósforo, que causa el incremento en la producción de biomasa y su consecuente afectación en la composición de especies. En el caso de la eutrofización terrestre causa cambios en la flora y fauna y la disminución de la biodiversidad y su unidad de referencia es el mol N eq. En los ecosistemas acuáticos, causa el crecimiento desmedido de algas, en consecuencia la luz solar no alcanza las capas más profundas, ocasionando que menos fotosíntesis ocurra, la concentración de oxígeno disminuya y las plantas muertas se depositen en las capas inferiores y se degraden. Finalmente, la concentración de oxígeno es insuficiente para la vida acuática como peces y otros organismos. Las unidades de referencia para la eutrofización de agua dulce y eutrofización marina son los kg P eq. y kg N eq. respectivamente y su factor de caracterización es el Potencial de Eutrofización (PE) (PRé, 2019).

Capítulo II

Metodología

Sitio de estudio

Se evaluaron las actividades de remediación ambiental del derrame SA_124_02D, asociado a un evento ambiental producido por el pozo Sacha 124, ubicado en el Cantón Joya de los Sachas, Provincia de Francisco de Orellana, coordenadas geográficas: 9957666.78 N, 289612.60 E. El área intervenida posterior a la remediación ambiental fue de 2701,84 m^2. El sitio presenta una pendiente de tipo pronunciada a ligera. El perfil transversal de la cuenca es cerrado, con depósitos aluviales a los lados del canal de estiaje. Los escarpes son pronunciados. A sus alrededores se observan esteros estacionales, dependientes de la precipitación. En el Anexo 1, se detalla el plano catastral del área mencionada.

Actividades desarrolladas en la remediación ambiental

La remediación ambiental de pasivos ambientales del tipo derrame como el SA_124_02D, incluyó las siguientes actividades:

- **Desbroce y recolección de desechos sólidos:** Consiste en el desbroce de la vegetación del sitio y la recolección de otros desechos, mismos que pueden o no estar asociados a actividades hidrocarburíferas en razón que en repetidas ocasiones los pasivos ambientales al estar cerca de centros poblados son también utilizados por la población como un sitio para disposición de residuos urbanos. Involucra el uso de maquinaria pesada con la finalidad de remover toda la capa superficial del área a intervenir. La vegetación contaminada es llevada a centros de tratamiento para su compostaje y la vegetación no contaminada es acopiada en sitios específicos para que posteriormente sea reincorporada al sitio (Figura 3).

Figura 3.

Actividades de desbroce y recolección de residuos. A1 y A2: Desbroce manual. B1 y B2. Desbroce con maquinaria pesada. C1 y C2. Recolección de residuos y vegetación. Fuente: Proyecto Amazonía Viva.

- **Construcción de facilidades:** Con el uso de maquinaria pesada se construyen accesos y facilidades para que pueda efectuarse la remediación ambiental de manera segura, por ejemplo, accesos peatonales y vehiculares, sitios de resguardo y descanso del personal, sitios de recolección de desechos, entre otros. Se procede a balizar el área intervenida, para establecer los lugares en donde se realizan los monitoreos de suelo y como un marco de referencia espacial para la posterior fase de lavado (Figura 4).

Figura 4.

Construcción de accesos y facilidades. B1. Uso de maquinaria pesada para construcción de accesos. B2. Construcción de diques para control de agua. B3-B4. Construcción de accesos. B5. Vista panorámica de área intervenida B6. Construcción de facilidades. Fuente Proyecto Amazonía Viva.

- **Lavado de suelo:** Esta fase consiste en el lavado a presión del suelo contaminado, para lo cual se toma agua de esteros cercanos y mediante el uso de equipo móvil y bombas de presión se crean condiciones turbulentas para que se desprenda el contaminante del suelo. Se utilizan surfactantes biodegradables. La actividad se desarrolla hasta que visualmente no se observe la presencia de contaminación. El agua utilizada proviene de cuerpos de agua aledaños, y previo a su descarga al ambiente se realizan análisis físico-químicos del agua utilizada y si ésta cumple con los límites establecidos en la Normativa Ambiental vigente se descarga al ambiente a cuerpos de agua cercanos, caso contrario se trata el agua previa a la descarga (Figura 5). En esta fase además se recupera el crudo del suelo y agua, y se lo transporta, trata y reincorpora a la producción nacional.

-

Figura 5.

Lavado de suelo. C1. Vista panorámica de lavado de suelo y sedimento. C2 y C3. Lavado de suelo.

- **Reconformación y revegetación:** Se desmantelan las facilidades construidas como diques de contención. El área intervenida es reconformada en base a su topografía original y se revegeta con especies nativas del lugar (Figura 6).

Figura 6.

Reconformación y revegetación. D1. Vista panorámica frontal de área intervenida. D2 Vista panorámica lateral de área intervenida y D3. Recuperación paulatina del área intervenida.

Todas las actividades involucran el uso de maquinaria pesada (excavadoras, volquetas), vehículos para la movilización del personal (camionetas) y movilización de herramientas y equipos (camiones); además, todo el personal utiliza uniformes y equipo de protección personal específico (guantes, casco, mascarilla, trajes tyvek, entre otros).

Además de las mencionadas actividades se realizan otras como por ejemplo monitoreo de las matrices contaminadas antes, durante y después de la remediación, socialización del proyecto de remediación a los propietarios del área afectada para obtener los permisos respectivos, permisos ambientales, elaboración de planos catastrales, entre otras. Estas actividades, al no estar contempladas en el alcance del presente proyecto ya que no requieren de un consumo considerable de recursos no se las detalla a profundidad.

Definición del objetivo y alcance de la investigación

Para la definición del alcance del ACV, se han considerado los requisitos establecidos en la Norma ISO:14040 (Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia) que establece los principios y marco de referencia del ACV. El presente proyecto está integrado de cuatro fases: 1) definición del objetivo y el alcance, 2) análisis de inventario, 3) evaluación del impacto y 4) interpretación.

Objetivos

General

Evaluar ambientalmente mediante Análisis de Ciclo de Vida (ACV) las actividades de remediación de fuentes de contaminación del tipo derrame ejecutadas por el Proyecto Amazonía Viva.

Específicos

- Generar un inventario de ciclo de vida de las actividades de remediación de fuentes de contaminación tipo derrame.
- Desarrollar la evaluación del inventario de ciclo de vida de las actividades de remediación y no actuación mediante la metodología ILCD 2011, Midpoint V1.10.

- Interpretar los resultados del análisis de ciclo de vida para las distintas categorías ambientales establecidas en el Centro Común de Investigación de la Unión Europea.
- Proponer estrategias de mejora desde el punto de vista ambiental al proceso de remediación actualmente desarrollado en base a los resultados del ACV obtenidos.

Alcance

El presente estudio de ACV realizará la evaluación ambiental de las actividades de remediación de una fuente de contaminación del tipo derrame contaminado con desechos de actividades hidrocarburíferas, comparado con el escenario de no actuación, suponiendo que no se ejecutan actividades de remediación y por lo tanto se producirá una degradación lenta de los contaminantes variando escasamente su concentración a lo largo del tiempo.

El límite espacial del estudio es de la cuna a la tumba.

La unidad funcional corresponde al derrame SA_124_02D de 2701 m^2 de área intervenida.

El estudio es descriptivo, los resultados generados son informativos.

Los límites del sistema se visualizan en la Figura 1 que corresponden a las etapas desarrolladas en el proceso de remediación ambiental.

Considerando el fin académico del presente estudio se evaluaron todas las categorías de impacto disponibles para ACV (European Commission Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability, 2010) que son:

- Cambio climático
- Agotamiento del ozono
- Formación de ozono fotoquímico
- Uso de suelo
- Agotamiento de los recursos hídricos
- Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables
- Toxicidad humana, efectos cancerígenos y no cancerígenos

- Ecotoxicidad de agua dulce
- Material particulado
- Radiación ionizante para la salud humana
- Radiación ionizante para los ecosistemas
- Acidificación
- Eutrofización terrestre
- Eutrofización de agua dulce
- Eutrofización marina

Se realizó la modelación del flujo de materiales y los cálculos de impactos ambientales con la asistencia técnica del Instituto Superior del Medio Ambiente (ISM) de Madrid. Para la evaluación del ciclo de vida se utilizó el software Simapro, metodología ILCD 2011 Midpoint V1.10 (Pré, 2014). La integración de los Inventarios de Ciclo de Vida (ICV) se realizó con la base de datos Ecoinvent e información primaria (levantamiento de entradas y salidas durante todo el proceso de remediación ambiental).

Respecto a la información primaria, se cuantificó la cantidad de insumos y materiales utilizados en cada fase de la remediación ambiental, posteriormente mediante la evaluación de las hojas de especificación de materiales de cada insumo se determinó la composición predominante.

Al ser las actividades de remediación dependientes del uso de maquinaria pesada y vehículos, se cuantificó la cantidad de combustible utilizado por cada equipo pesado y vehículo (gasolina, diésel) en base al kilometraje recorrido y tiempo de uso de maquinaria pesada, además se determinó la cantidad de materiales necesarios para el mantenimiento periódico de la maquinaria como filtros, aceite, entre otros. Se cuantificó también el volumen de surfactante biodegradable usado en el lavado de suelo. No se cuantificó el agua utilizada, ya que este volumen posterior al uso vuelve al medio ambiente de donde fue tomado, siempre y cuando cumpla con los criterios para descarga establecidos en la Normativa Ambiental vigente.

Las limitaciones del estudio fueron la no disponibilidad de datos específicos asociados al consumo de recursos y energía durante el proceso de incineración de los materiales enviados al gestor ambiental. En este caso, se utilizó la información disponible en la base de datos Ecoinvent.

Las suposiciones consideradas fueron:

- La meta de remediación alcanzada fue hasta uso de suelo para ecosistema sensible en base a lo establecido en la Tabla 6 del Reglamento Ambiental de Operaciones Hidrocarburíferas del Ecuador Decreto Ejecutivo Núm. 1215 RAOHE D.E.1215.
- No se consideraron los valores económicos involucrados en la remediación.
- Se consideró el método de remediación aplicado, como idóneo en base a las características del contaminante, del pasivo ambiental y de los recursos disponibles.
- Se consideró que en la fase de reconformación y revegetación se consumen igual cantidad de recursos correspondientes a maquinaria pesada con respecto a la fase de construcción de accesos y facilidades.
- Se descartaron las cargas ambientales relacionadas con:
    - ✓ Contenedores plásticos de un solo uso usados en el embalaje de alimentos para la alimentación al personal por la falta de disponibilidad de datos.
    - ✓ Recursos asociados al levantamiento topográfico, medición de volumen de suelo y herramientas considerando que los materiales utilizados tienen un largo tiempo de vida con muy baja rotación y no requiere del uso de material perecible o contaminante.
    - ✓ Monitoreos físico-químicos, en razón que los equipos utilizados son de baja rotación, y la cantidad de reactivos por muestra es mínima comparada con el volumen de recursos empleados en la remediación.
    - ✓ Composición de los cordones de los zapatos de seguridad, por la amplia variedad de diseños disponibles.
    - ✓ Uso de filtros en los mantenimientos preventivos de la maquinaria pesada, por no existir disponibilidad de los datos de su composición.

Inventario del ciclo de vida

Esta fase consistió en la cuantificación de las entradas y salidas del sistema en estudio, tomando como referencia la unidad funcional. Para esto, se recopiló información primaria de todos los procesos llevados a cabo en cada uno de los escenarios evaluados dentro de los límites establecidos del sistema mediante el análisis de los registros de trabajo generados por el personal técnico del Proyecto Amazonía Viva, verificación del volumen de consumibles usados por la maquinaria pesada y vehículos, revisión de hojas técnicas para determinar la composición de los productos utilizados; además se complementó con el uso de la bases de dato especializadas como Ecoinvent.

Evaluación del ciclo de vida

La modelación del flujo de materiales y los cálculos de impactos ambientales se realizaron con el apoyo técnico del Instituto Superior del Medio Ambiente (ISM) de Madrid, con el uso del software Simapro y la metodología ILCD (International Reference Life Cycle Data System) 2011 Midpoint+ V1.10 / EC-JRC Global, esta técnica es el resultado de un proyecto llevado a cabo por el Joint Research Centre (JRC) de la Comisión Europea que analiza diversas metodologías para el ACV y busca consensos en los métodos recomendados en cada aspecto ambiental a nivel de punto medio (midpoint) y punto final (endpoint) (MyEcoCost, 2011).

Interpretación de resultados del análisis del ciclo de vida

La interpretación de resultados permite identificar en qué tratamiento y fase del ciclo de vida se producen las principales cargas ambientales, con lo que se pueden establecer mejoras al sistema evaluado de manera integral (análisis ponderado). Se analizaron los valores absolutos de los indicadores obtenidos en cada categoría ambiental, se realizó una comparación de los resultados de los dos escenarios evaluados y se discutieron resultados de cada escenario. También se evaluaron los impactos finales (*endpoint*) generados en base a la afectación a los ecosistemas, salud humana y disponibilidad de recursos.

Capítulo III

Análisis de inventario de ACV

Levantamiento del inventario escenario de remediación ambiental

Los recursos utilizados en el escenario de remediación ambiental fueron:

a) Recursos naturales: Se cuantificaron los recursos de acuerdo con el detalle de la Tabla 1.

Tabla 1.

Recursos naturales en el escenario de remediación ambiental

Recurso natural	Fuente de información
Área contaminada	Mapa topográfico de área intervenida.
Vegetación contaminada	Revisión de reportes de trabajo diario, se convirtió el volumen obtenido a unidades de masa, de acuerdo a la densidad del vegetal contaminado = 0.855 ton/m^3
Suelo contaminado	Informe de cuantificación del suelo lavado, se convirtió el volumen obtenido a unidades de masa, de acuerdo con la densidad de suelo: suelo = 1.35 ton/m^3
Crudo	Cantidad de hidrocarburo presente en el suelo contaminado que se recupera y reincorpora a la producción nacional.

b) Uso de maquinaria pesada y equipo móvil:

Para determinar los recursos asociados al uso de equipo móvil y maquinaria pesada, se consideraron las actividades de mantenimiento preventivo y el consumible utilizado mediante la revisión de reportes diarios de trabajo y registros de las actividades de los vehículos.

Con respecto al mantenimiento preventivo programado, se cuantificaron las cargas ambientales correspondientes a los consumibles de aceite y grasa. Para la fase de desbroce se consideró el mantenimiento de la excavadora, en la fase de

construcciones, del camión, en la fase de lavado de las bombas hale y en la fase de revegetación el mantenimiento de la camioneta.

En relación al combustible usado en la camioneta, se dividió la cantidad total para tres considerando que el vehículo es usado en varias actividades (en promedio 3), incluida la remediación del pasivo SA_124_02D.

Para el consumo de combustible en la maquinaria pesada, se calcularon las horas trabajadas en cada fase de la remediación ambiental, y en base los siguientes valores de rendimiento se determinó la cantidad utilizada: excavadora = 4.09 horas/galón diésel, camión= 20.81 km/galón gasolina, camioneta= 27.25 km/galón gasolina, bomba hale= 1.08 hora/galón gasolina. Las características de la maquinaria pesada, vehículos y equipo móvil es la detallada en la Tabla 2.

Tabla 2.

Características de vehículos, maquinaria pesada y equipo móvil utilizadas en las actividades de remediación.

Tipo de vehículo	Características
1 excavadora	Marca Komatsu, modelo PC200-8, motor: 6D10726528524, chasis: C6605, año 2009.
1 camión	Marca Chevrolet, modelo NQR 71L5.22p4x2TM diesel, año 2010.
1 camioneta	Marca Mazda, modelo: BT-50 CD 4x4 action gas 2.6 FL TM AC, chasis: 8LFUNY0699M000938, motor: G6373866, año 2009.
3 bombas de presión	Marca Hale, serie HP75, 105 GPM @ 150 PSI, potencia: 18 BHP (13.4 Kw) a 4000 rpm.

c) Equipos de protección personal (EPP):

En base a los registros diarios de trabajo, se cuantificó la cantidad de EPP utilizado en cada fase de la remediación ambiental y se determinó el material predominante de su composición, mediante el análisis de las hojas técnicas de los productos. Se tomaron en cuenta únicamente los que tienen una rotación superior a

uno, ya que los otros son reutilizados en la remediación de varios pasivos ambientales, por lo que, su tasa de rotación es baja. Así mismo, la duración estimada de los EPP fue obtenida de las recomendaciones del fabricante y en base a entrevistas con supervisores responsables de las actividades de remediación. Las salidas de EPP se clasificaron en dos categorías: la que se reutiliza y la que se desecha, a través del envío al gestor ambiental. En la Tabla 3 se detallada la composición de los EPP.

Tabla 3.

Composición de EPP utilizado en la remediación ambiental.

Equipo de protección personal	Unidad	Característica	Material predominante	Peso unitario (gramos)
Traje de pescador	1	Overol PVC fontanero	Plástico PVC	800
Guantes de pupo	par	Guantes de pupo con gotas eco, tejido mixto de algodón y poliamida, con gotas de PVC en la palma de la mano, protección contra riesgos mecánicos conforme a norma DIN en 388. Peso estimado: 4 gramos	Fibras de algodón natural 45% Poliamida 45% PVC 10%	1,8 1,8 0,4
Guantes de nitrilo largos	par	Guantes ultranitrilo 480 para manipulación de productos químicos, categoría de certificación 3 CE 0334, EN 374, EN 388, EN 374. Guantes de nitrilo no flockados, satinados.	Nitrilo	150
Guantes de nitrilo cortos	par	Guantes de ultranitrilo 480 para manipulación de productos químicos, categoría de certificación 3CE 0334, EN 374, EN 388, EN 374. Guantes de nitrilo no flockados, satinados.	Nitrilo	175
Gafas claras	1	Gafas de seguridad claras, tipo: K3H10, material de los lentes: policarbonato, material del marco: plástico, color de lentes: claro, color marco: negro, protección radiación UV 99.9%, P/N: KD110AF.	Policarbonato (66%) Plástico PVC (34%)	16,5 8,5
Chaqueta impermeable pantanera	1	Chaqueta de trabajo impermeable, norma EN 343 clase 3/2, peso 200 g/m^2, dimensión: 0.6 m x0.9 m: 0.54 m^2	Poliamida con recubrimiento de poliuretano	108
Auditivos desechables	1	Protector auditivo de copa ANSI S3-19 NRR 29DB	Espuma hipoalergénica	3
Gafas oscuras	1	Gafas de seguridad, Tipo: K3H10, material de los lentes: policarbonato, material del marco: plástico, color lentes: claro, color marco: negro,	Policarbonato (66%) Plástico PVC (34%)	16,5 8,5

		protección radiación UV 99.9%, P/N: KD110AF.		
Botas de caucho con punta de acero	par	Bota de PVC de seguridad, fabricado con compuesto de PVC modificado, de alta resistencia a hidrocarburos y sus derivados, ácidos y solventes, grasas, detergentes, aceites animales y vegetales, con puntera de acero. Cumple con norma EN 344.1. Puntera de seguridad cumple con Normas NCH 772/2 e ISO 20345, Peso 1500 gramos.	Capellada: PVC modificado: 50% Forro: poliéster 5% Punta: acero antiestático de 1.5 mm de espesor; 25% Suela: nitrilo 10% Palma: algodón y espuma de caucho 10%	750 75 375 150 150
Guantes de napa	par	Guante tipo conductor, cuero forrado, guante de cinco dedos, con elástico de ajuste en la muñeca, selección estándar, pulgar en forma de ala, ribete de algodón marrón y forrado completamente en su interior con un foro de franela, categoría CAT-II, cumple con normativa EN 388- EN 420, marca Mappa Professionel, peso aproximado: 8 gramos	Cuero vacuno tipo flor (napa) (80%) Algodón natural 20%	6,4 1,6

Levantamiento del inventario escenario de no actuación

Para el escenario de no actuación se consideró que las matrices contaminadas permanecen en el mismo sitio, por lo cual, no se consideran salidas operativas relacionadas al proceso.

Inventario

Se presentan a continuación en las Tablas 4 y 5, el detalle de las entradas y salidas de materia y energía para los escenarios de remediación ambiental y no actuación, respectivamente.

Tabla 4.

Inventario ACV del escenario de remediación ambiental.

Sub-proceso	Rubro	Entradas	Salidas	Uso final
Desbroce	Recursos naturales	2701.84 m^2 de área contaminada	2701.84 m^2 de área contaminada	2701.84 m^2 de área contaminada pasa a la siguiente fase de la remediación
		80136 kg hidrocarburos totales de petróleo	80136 kg hidrocarburos totales de petróleo	Cantidad de crudo contenido en el suelo contaminado
		4 m^3 de vegetación contaminada con hidrocarburos	4 m^3 de vegetación contaminada con hidrocarburos	Tratamiento por compostaje
		3.42 ton vegetación contaminada con hidrocarburos	3.42 ton vegetación contaminada con hidrocarburos	Tratamiento por compostaje
		21.38 ton vegetación no contaminada/ hojarasca	21.38 ton vegetación no contaminada	Reincorporación al sitio de trabajo.
	Uso de maquina-ria pesada	99.4 galones de diésel usados en 1 excavadora 24.3 horas de uso de excavadora	Emisiones gaseosas	Emisión directa al ambiente
		1.88 litros de aceite de motor serie DH, EO10W30	1.88 litros de aceite de motor usado serie DH, EO10W30	Envío al gestor de desechos peligrosos, reciclaje
		0.2 filtro separador de agua/ combustible	0.2 filtro separador de agua/ combustible usado	Envío al gestor de desechos peligrosos, para incineración
		0.2 filtro de motor	0.2 filtro usado de motor	Envío al gestor de desechos peligrosos, para incineración
	Uso de vehículos	75.7 galones de diésel usados en 1 camión 1576 km recorridos por camión	Emisiones gaseosas	Emisión directa al ambiente
		25.17 galones de gasolina usados en camioneta 686 km recorridos por camioneta		
	Uso de equipo móvil	306.9 galones de gasolina, usados en 3 bombas de presión 284.1 horas de uso en 3 bombas de presión		
	EPP	10839 g de plástico PVC	6920 g de plástico PVC	Reutilización, pasa a la siguiente fase de la remediación
		15111 g de algodón natural	9491 g de algodón natural	
		4127 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano	2240 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano	
		5449 g de nitrilo	3907 g de nitrilo	

		5607 g de policarbonato 16719 g de espuma hipoalergénica 1365 g de poliéster 5316 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor 3847 g de algodón y espuma de caucho 11932 g de cuero vacuno tipo flor (napa) (80%)	2864 g de policarbonato 11121 g de espuma hipoalergénica 965 g de poliéster 3842 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor 2550 g de algodón y espuma de caucho 8639 g de cuero vacuno tipo flor (napa) (80%) 3919 g de plástico PVC 5620 g de algodón natural 1887 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano	
			1542 g de nitrilo 2743 g de policarbonato 5598 g de espuma hipoalergénica 400 g de poliéster 1474 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor 1297 g de algodón y espuma de caucho 3292 g de cuero vacuno tipo flor (napa) (80%)	Se envía a gestor de residuos peligrosos para su tratamiento (incineración) y disposición final (cubetos de contención)
		2701.84 m^2 de área contaminada	2701.84 m^2 de área contaminada	2701.84 m^2 de área contaminada pasa a la siguiente fase de la remediación
	Recursos naturales	4 ton de vegetación contaminada con hidrocarburos	4 ton de vegetación contaminada con hidrocarburos	Tratamiento por compostaje
		3.42 ton de vegetación contaminada con hidrocarburos	3.42 ton de vegetación contaminada con hidrocarburos	Tratamiento por compostaje
	Uso de maquina-ria pesada	10.6 galones de diésel usados en 1 excavadora	Emisiones gaseosas	Emisión directa al ambiente
		2.59 horas de uso de excavadora		
Construc-ción de facilidades		5.7 galones de diésel usados en 1 camión	Emisiones gaseosas	Emisión directa al ambiente
		118.6 km recorridos por camión	Emisiones gaseosas	Emisión directa al ambiente
	Uso de vehículos	8.9 litros de aceite de motor serie DH, EO10W30	8.9 litros de aceite usado de motor serie DH, EO10W30	Envío al gestor de desechos peligrosos, para incineración
		0.3 filtro de motor	0.3 filtro usado de motor	Envío al gestor de desechos peligrosos, para incineración
		25.2 galones de gasolina usados en 1 camioneta	Emisiones gaseosas	Emisión directa al ambiente
		686 km recorridos en camioneta		
		745.5 galones de gasolina, usados en 3	Emisiones gaseosas	Emisión directa al ambiente

	Uso de equipo móvil	bombas de presión, marca Hale 690 horas de uso de 3 bombas de presión, marca Hale		
	EPP	896 g de plástico PVC	572 g de plástico PVC	Reutilización, pasa a la siguiente fase de la remediación
		1249 g de algodón natural	784 g de algodón natural	
		341 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano	185 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano	
		450 g de nitrilo	323 g de nitrilo	
		463 g de policarbonato	237 g de policarbonato	
		1382 g de espuma hipoalergénica	919 g de espuma hipoalergénica	
		113 g de poliéster	80 g de poliéster	
		439 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor	318 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor	
		318 g de algodón y espuma de caucho	211 g de algodón y espuma de caucho	
		986 g de cuero vacuno tipo flor (napa) (80%)	714 g de cuero vacuno tipo flor (napa) (80%)	
			324 g de plástico PVC	Se envía a gestor de residuos peligrosos para su tratamiento (incineración) y disposición final (cubetos de contención)
			464 g de algodón natural	
			156 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano	
			127 g de nitrilo	
			227 g de policarbonato	
			463 g de espuma hipoalergénica	
			33 g de poliéster	
			122 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor	
			107 g de algodón y espuma de caucho	
			212 g de cuero vacuno tipo flor (napa) (80%)	
	Materiales de limpieza y construcción	44.4 kg policloruro de vinilo	44.4 kg policloruro de vinilo	Reutilización, pasa a la siguiente fase de la remediación
		719.7 kg de polietileno	719.7 kg de polietileno	
		4.1 kg de acero	4.1 kg de acero	
		18354.8 kg de polipropileno	18354.8 kg de polipropileno	
		9.5 kg fibra natural de yute	9.5 kg fibra natural de yute	
Lavado de suelos	Recursos naturales	2701.84 m^2 de área contaminada	2701.84 m^2 de área lavada	Área lavada pasa a la siguiente fase de remediación
		2198 m^3 de suelo contaminado	2198 m^3 de suelo lavado	Fin del proceso
		2968 ton de suelo contaminado	2968 ton de suelo lavado	Fin del proceso
		80136 kg hidrocarburos totales de petróleo	80136 kg hidrocarburos totales de petróleo recuperados	Crudo recuperado que se reincorpora a la producción nacional
		4678.77 m^3 de agua natural proveniente de	4678.77 m^3 de agua de proceso	Descarga al ambiente

		esteros o cuerpos de agua cercanos.		
		3.42 ton de vegetación contaminada con hidrocarburos	3.42 ton de vegetación contaminada con hidrocarburos	Tratamiento por compostaje
		35.05 ton de vegetación no contaminada	35.05 ton de vegetación no contaminada	Reincorporación al sitio de trabajo.
	Reacti-vos	39 gal de limonenes y terpenos cítricos con espuma controlada	39 gal de limonenes y terpenos cítricos con espuma controlada usados mezclados con el agua de proceso	Descarga al ambiente
	Uso de maquina-ria pesada	54.98 galones de diésel usados en 1 excavadora 13.44 horas usadas en 1 excavadora	Emisiones gaseosas	Emisión directa al ambiente
	Uso de vehículos	210.5 galones de diésel usados en 1 camión 4380 km recorridos por 1 camión 25.2 galones de gasolina usados en: camioneta 687 km recorridos por camioneta	Emisiones gaseosas	Emisión directa al ambiente
		745.5 galones de gasolina, usados en 3 bomba de presión 691 horas usados en 3 bomba de presión	Emisiones gaseosas	Envío al gestor de desechos peligrosos, reciclaje
	Uso de equipo móvil	6.9 litros de aceite de motor 20W50	6.9 litros de aceite usado de motor 20W50	Envío al gestor de desechos peligrosos, para incineración
		7 filtros de aceite	7 filtros usados de aceite	Envío al gestor de desechos peligrosos, para incineración
		7 filtros de combustible	7 filtros usados de combustible	Pasa a la siguiente fase de la remediación
	Equipo de protec-ción personal	14.4 kg de polipropileno	14.4 kg de polipropileno usado	Reutilización, pasa a la siguiente fase de la remediación
		25887 g de plástico PVC	16527 g de plástico PVC	
		36092 g de algodón natural	22669 g de algodón natural	
		9856 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano	5350 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano	
		13016 g de nitrilo	9332 g de nitrilo	
		13392 g de policarbonato	6841 g de policarbonato	
		39932 g de espuma hipoalergénica	26562 g de espuma hipoalergénica	
		3260 g de poliéster	2306 g de poliéster	
		12696 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor	9177 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor	
		9188 g de algodón y espuma de caucho	6090 g de algodón y espuma de caucho	
			9360 g de plástico PVC 13423 g de algodón natural	Se envía a gestor de residuos peligrosos

			4506 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano 3684 g de nitrilo 6551 g de policarbonato 13369 g de espuma hipoalergénica 955 g de poliéster 3519 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor 3098 g de algodón y espuma de caucho 7863 g de cuero vacuno tipo flor (napa) (80%)	para su tratamiento (incineración) y disposición final (cubetos de contención)
	Área interve-nida	2701.84 m^2 de área descontaminada	2701.84 m^2 de área reconformada	Fin
	Uso de maquinaria pesada	10.58 galones de diésel usados en 1 excavadora 2.6 horas en 1 excavadora 5.7 galones de diésel usados en 1 camión 119 km recorridos por 1 camión	Emisiones gaseosas	Emisión directa al ambiente
	Uso de vehículos	25.2 galones de gasolina usados en camioneta 687 km recorridos por camioneta		
		5 litros de aceite de motor 20W50	8.9 litros de aceite usado de motor serie 20W50	Envío al gestor de desechos peligrosos, para incineración
Taponamiento y reconfor-mación	EPP	896 g de plástico PVC 1249 g de algodón natural 341 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano 450 g de nitrilo 463 g de policarbonato 1382 g de espuma hipoalergénica 113 g de poliéster 439 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor 318 g de algodón y espuma de caucho 986 g de cuero vacuno tipo flor (napa) (80%)	572 g de plástico PVC 784 g de algodón natural 185 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano 323 g de nitrilo 237 g de policarbonato 919 g de espuma hipoalergénica 80 g de poliéster 318 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor 211 g de algodón y espuma de caucho 714 g de cuero vacuno tipo flor (napa) (80%)	Reutilización, pasa a la siguiente fase de la remediación
			324 g de plástico PVC 464 g de algodón natural 156 g de poliamida y poliamida con recubrimiento de poliuretano 127 g de nitrilo 227 g de policarbonato	Se envía a gestor de residuos peligrosos para su tratamiento (incineración) y disposición final (cubetos de contención)

	463 g de espuma hipoalergénica 33 g de poliéster 122 g de acero antiestático de 1.5 mm de espesor 107 g de algodón y espuma de caucho 272 g de cuero vacuno tipo flor (napa)

Tabla 5.

Inventario ACV del Escenario de no actuación

Entradas	Salidas	Uso final
2701.84 m^2 de área contaminada	2701.84 m^2 de área contaminada	Área que no puede tener ningún uso por la presencia de contaminación
2968 ton de suelo contaminado	2968 ton de suelo contaminado	Suelo contaminado sin ningún uso posterior
	Nada	Se mantiene en suelo
80136 kg hidrocarburos totales de petróleo	Exposición directa de 25 personas a la presencia de contaminación	Riesgo de enfermedades, mala calidad de vida.
	Exposición indirecta de 300 personas aproximadamente a la presencia de contaminación	Riesgo de enfermedades, mala calidad de vida, conflictividad social

Capítulo IV

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en el estudio de ACV para evaluar las actividades de remediación ambiental de pasivos ambientales del tipo derrame comparado con el escenario de no actuación o no ejecución de actividades de remediación, es decir, dejar las matrices contaminadas en el mismo sitio.

La legislación ambiental vigente a la fecha de las actividades de remediación ambiental del derrame SA_124_02D (RAOHE D.E. 1215) establece los límites de concentración máxima de acuerdo con el uso de suelo, que se deben alcanzar en la remediación de suelos contaminados como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6.

Límites permisibles para la identificación y remediación de suelos contaminados en todas las fases de la industria hidrocarburífera, incluidas las estaciones de servicios (Fuente, RAOHE D.E.1215).

Parámetro	**Unidad**	**Uso agrícola**	**Uso industrial**	**Ecosistema sensible**
Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	mg/kg	<2500	<4000	<1000
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)	mg/kg	<2	<5	<1
Cadmio (Cd)	mg/kg	<2	<10	<1
Níquel (Ni)	mg/kg	<50	<100	<40
Plomo (Pb)	mg/kg	<100	<500	<80

En las Tablas 7 y 8, se presentan los resultados físico-químicos realizados en el derrame SA_124_02D antes y después de la remediación ambiental, considerando que el uso de suelo corresponde a “ecosistema sensible”.

Tabla 7.

Concentraciones de contaminantes antes de las actividades de remediación ambiental (Fuente: Proyecto Amazonía Viva).

A) Muestreo realizado el 30 de diciembre de 2018

Muestra	TPH (mg/kg)	HAPs (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)
SA_124_02D_MS1	<45	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS2	1702	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS3	<45	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS4	<45	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS5	1379	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS6	3155	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS7	4385	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS8	5352	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS9	1973	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS10	3935	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS11	90	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS12	1325	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS13	1116	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS14	9280	0,48	<0.8	<30	<20

B) Muestreo realizado el 15 de marzo de 2019

Muestra	TPH (mg/kg)	HAPs (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)
SA_124_02D_MS1	6080	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS2	7040	0,35	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS3	7360	0,36	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS4	6720	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS5	2660	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS6	1092	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS7	2920	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS8	7800	0,34	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS9	10720	0,52	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS10	2500	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS11	13600	0,61	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS12	1900	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS13	1116	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS14	9280	0,48	<0.8	<30	<20

Tabla 8.

Concentraciones de contaminantes después de las actividades de remediación ambiental (Fuente: Proyecto Amazonía Viva).

Muestra	TPH (mg/kg)	HAPs (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)
SA_124_02D_MS1	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS2	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS3	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS4	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS5	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS6	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS7	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS8	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS9	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS10	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS11	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS12	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS13	<100	<0,3	<0.8	<30	<20
SA_124_02D_MS14	<100	<0,3	<0.8	<30	<20

Sobre la base de los resultados de laboratorio obtenidos, se determina que el principal contaminante identificado en el derrame SA_124_02D corresponde a TPH, por lo que este será uno de los contaminantes con mayor efecto en ciertas categorías ambientales. Es necesario recalcar que los TPH incluyen una amplia gama de compuestos hidrocarbonados (desde cadenas de carbono C6 hasta C35) además de otros tipos de compuestos químicos presentes en el crudo (Kuppusamy *et al,* 2005).

Resultados ACV de los procesos de remediación y no actuación

En la Tabla 9 se presentan los resultados de la evaluación del impacto ambiental en la etapa de caracterización, mientras que en la Tabla 10 y en la Figura 7, se indican los porcentajes de las categorías de impacto ambiental normalizados al mayor valor; es decir, que el valor más alto obtenido en cada categoría en cualquiera de los dos escenarios, constituye el cien por ciento para la respectiva categoría, dando una perspectiva más clara del comportamiento de cada indicador entre los diferentes escenarios.

De las 16 categorías de impacto evaluadas se observa que el escenario de no actuación presenta mayores valores en las siguientes 12 categorías: cambio climático, agotamiento del ozono, toxicidad humana con efectos no cancerígenos, material particulado, radiación ionizante para la salud humana, radiación ionizante para ecosistemas, formación de ozono fotoquímico, acidificación, eutrofización terrestre, eutrofización marina, ecotoxicidad de agua dulce y agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables. En cambio, el escenario de remediación ambiental mostró mayores valores en las siguientes 4 categorías: toxicidad humana con efectos cancerígenos, eutrofización de agua dulce, uso del suelo y agotamiento de los recursos hídricos.

Tabla 9.

Resultados de la evaluación del impacto ambiental ACV – Etapa Caracterización en referencia a la unidad funcional.

Categoría de impacto	Unidad	Escenario 0_ Sin actuación	Escenario 1_ Remediación ambiental
Cambio climático	kg CO_2 eq.	55.477,99	42.010,33
Agotamiento del ozono	kg CFC^{-11} eq.	$5{,}56E^{-02}$	$4{,}35E^{-03}$
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq.	255,40	169,50
Uso del suelo	kg de déficit de C	2.544,05	4.291,63
Agotamiento de los recursos hídricos	m^3 eq. de agua	52,29	65,39
Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables	kg eq. Sb	0,10	0,07
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	CTUh	$3{,}04E^{-03}$	$1{,}40E^{-03}$
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	CTUh	$9{,}97E^{-05}$	$5{,}79E^{-04}$
Ecotoxicidad de agua dulce	CTUe	30.066,81	27.747,30
Material particulado	kg $PM_{2.5}$ eq.	57,45	19,75
Radiación ionizante para la salud humana	kBq U_{235} eq.	18.951,12	1.282,53
Radiación ionizante para ecosistemas	CTUe	$1{,}34E^{-01}$	$9{,}20E^{-03}$
Acidificación	molc H^+ eq.	610,26	171,01
Eutrofización terrestre	molc N eq.	583,93	540,53
Eutrofización de agua dulce	kg P eq.	$5{,}23E^{-01}$	$7{,}12E^{-01}$
Eutrofización marina	kg N eq.	52,99	49,41

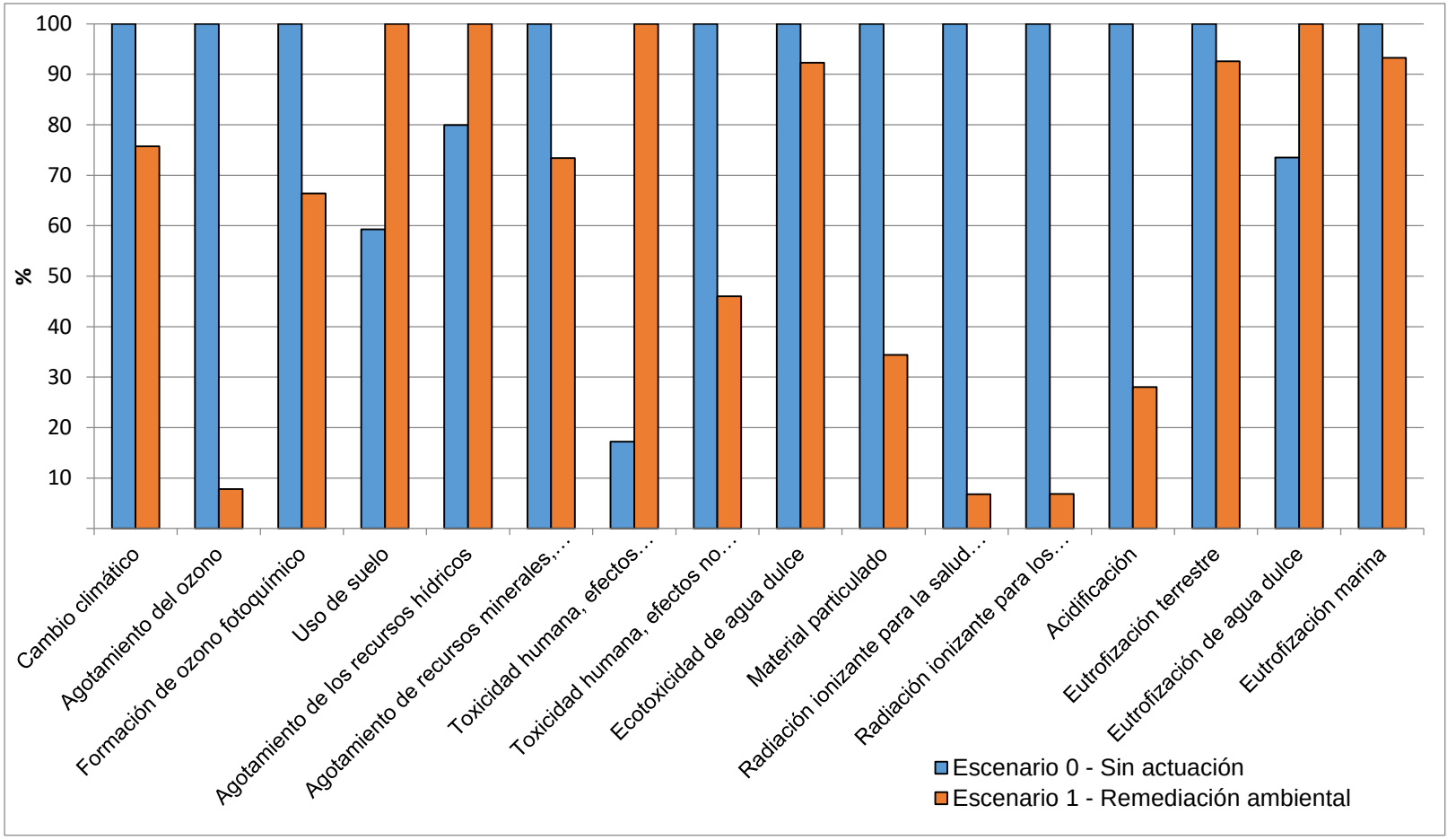
Tabla 10.

Resultados de la evaluación del impacto ambiental ACV – Etapa Caracterización, unidad porcentaje (%).

Categoría de impacto	**Escenario 0_ Sin actuación (%)**	**Escenario 1_ Remediación ambiental (%)**
Cambio climático	100	75,72
Agotamiento del ozono	100	7,83
Formación de ozono fotoquímico	100	66,37
Uso del suelo	59,28	100,00
Agotamiento de los recursos hídricos	79,97	100,00
Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables	100	73,29
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	100	46,02
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	17,22	100,00
Ecotoxicidad de agua dulce	100	92,29
Material particulado	100	34,37
Radiación ionizante para la salud humana	100	6,77
Radiación ionizante para ecosistemas	100	6,84
Acidificación	100	28,02
Eutrofización terrestre	100	92,57
Eutrofización de agua dulce	73,51	100,00
Eutrofización marina	100	93,25

Figura 7.

Evaluación del impacto ambiental ACV de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



Resultados detallados por categoría de impacto ambiental

Al analizar el escenario de no actuación, se determina que los impactos ambientales pueden estar relacionados a las siguientes causas:

- Contaminación del suelo y cuerpos de agua aledaños al pasivo ambiental por la presencia de los materiales contaminantes.
- Contaminación atmosférica por la generación de emisiones gaseosas permanentes a lo largo del tiempo por la presencia de crudo y otros contaminantes en el pasivo ambiental. Se debe considerar que por las características ambientales de la zona donde se ubica el pasivo ambiental (alta pluviosidad y humedad) es altamente probable que los contaminantes migren, siguiendo el curso natural de los cuerpos de agua cercanos alcanzado grandes espacios de terreno, y en consecuencia exista un mayor contacto de los contaminantes con el aire favoreciendo la evaporación de fracciones volátiles y las emisiones gaseosas.
- Contaminación atmosférica, en suelo y agua, causada por las emisiones y descargas generadas en la producción de crudo, tomando en consideración que en el inventario se utilizó la entrada "*Petrol, low-sulfur {RoW}| production | Cut-off, U*" de la base de datos Ecoinvent.

Por otro lado, al evaluar el escenario de remediación ambiental, se evidencia que los impactos ambientales provendrían de las siguientes fuentes:

- Consumo de combustible (diésel en excavadoras y camiones y gasolina en camionetas) para el uso de maquinaria pesada, en todos los procesos de remediación y en la movilización de técnicos y materiales de remediación.
- Consumo de diésel en bombas de presión, necesario para el funcionamiento del equipo móvil en el lavado de suelo.
- Evaporación de la fracción volátil del crudo y otros compuestos químicos presentes en el suelo y sedimento contaminado, principalmente en la fase de lavado de suelo en donde se crean condiciones turbulentas que propician que el crudo se separe de la matriz en la que se encuentra.
- Afectación al paisaje y al suelo por las propias actividades de remediación ambiental.

- Emisiones gaseosas y descargas relacionadas a la fabricación de los insumos y EPP que se utilizaron en el proceso de remediación. En la Tabla 12, se detalla los aportes a cada categoría generados por cada material utilizado.
- Emisiones gaseosas y descargas generadas por la incineración de desechos peligrosos (material contaminado de las actividades de remediación ambiental enviados al gestor de desechos, por ejemplo, EPP contaminado o dañado, que no pudo ser reutilizado, equipo de limpieza que ya ha cumplido con su vida útil).
- Emisiones y descargas producto del tratamiento para la reincorporación del crudo recuperado del pasivo ambiental a la producción nacional.

Tabla 11.

Impactos ambientales relacionados a la fabricación de los insumos y equipos de protección personal que se utilizaron en el proceso de remediación.

Código base de datos Ecoinvent	Material usado en equipos de protección personal y herramientas	Categoría ambiental															Referencia bibliográfica
		CC	AO	TH	MP	RI	ERI	FOT	AC	ET	EAD	EM	TXAD	US	ARH	ARMF	
Polyvinylidenchloride, granulate {RoW}| production | Cut-off, U	PVC	X		X				X	X	X	X		X			X	European Comission, 2004
Cotton fibre {RoW}| cotton production | Cut-off, U	Algodón	X													X	X	(Wendin, 2016)
Nylon 6 {RoW}| production | Cut-off, U	Poliamida	X						X	X		X					X	(Potting & Blok, 1995; Sim & Prabhu, 2018)
Synthetic rubber {RoW}| production | Cut-off, U	Nitrilo	X	X						X							X	(Soratana et al., 2017)
Polycarbonate {RoW}| production | Cut-off, U	Policarbonato	X	X					X	X	X	X	X				X	(Altuwair, 2017)
Polyurethane, flexible foam {RoW}| production | Cut-off, U	Espuma hipoalergénica	X	X	X	X	X		X	X				X			X	(EUROPUR, 2015)
Polyester-complexed starch biopolymer {RoW}| production | Cut-off, U	Poliéster	X	X					X	X		X					X	(Patel et al., 2002)
Steel, low-alloyed {RoW}| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, U	Acero antiestático	X	X	X				X	X		X					X	(Montalbo T, 2014)
Seal, natural rubber based {RoW}| production | Cut-off, U	Caucho	X														X	(Dunuwila et al., 2018)

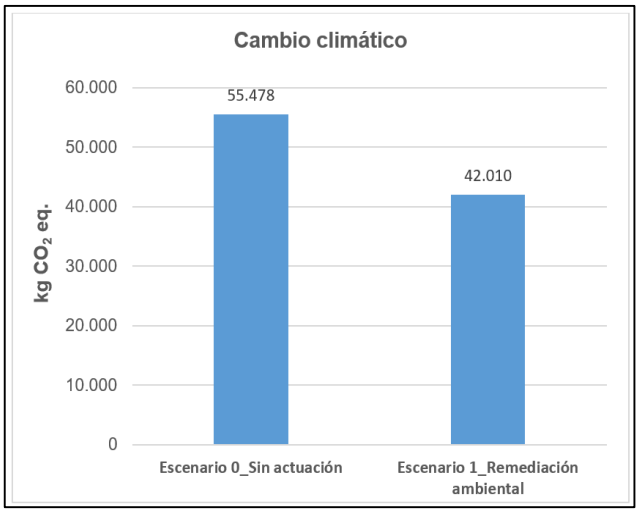
SIGLAS: CC: Cambio climático, **AO**: Agotamiento del ozono, **TH:** Toxicidad humana, **MP**: Material particulado, **RI:** Radiación ionizante, **ERI**: Ecosistemas de radiación ionizante, **FOT:** Formación ozono fotoquímico, **AC:** Acidificación, **ET:** Eutrofización terrestre, **EAD**: Eutrofización agua dulce, **EM**: Eutrofización marina, **TXAD**: Ecotoxocidad de agua dulce, **US**: Uso de suelo, **ARH:** Agotamiento recursos hídricos, **ARMF:** Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables.

Cambio climático

En la categoría de cambio climático, se observa un potencial de generación de 55.5 kg CO_2 eq. para el escenario de no actuación y 42.0 kg CO_2 eq. en la remediación ambiental (Figura 8).

Figura 8.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría de cambio climático de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



Al analizar el escenario de no actuación se determina que este impacto puede estar relacionado al área de suelo contaminada, sin vegetación que deja de secuestrar el carbono del ambiente. Otros estudios han demostrado también que la presencia de hidrocarburos residuales originados por la extracción de petróleo puede degradarse para formar metano en condiciones anaeróbicas, al estar en contacto con suelos con altos niveles de materia orgánica que promueven su descomposición y la formación de metano. En un contexto de cambio climático, el potencial de calentamiento del metano es 25 veces más alto que el CO_2 (New et al., 2009). También este aporte estaría relacionado a las emisiones de CO_2 y CH_4 en la producción de crudo (Liu et al., 2020; Morales et al., 2015; Yang et al., 2016). En términos globales, la remediación ambiental de este pasivo evitó que se liberen 13,5 ton kg CO_2 eq. al ambiente.

Con respecto al escenario de remediación ambiental, las actividades que generarían impacto en la categoría de cambio climático son:

- Uso de vehículos y maquinaria pesada ya que estos equipos son totalmente dependientes de los combustibles fósiles y emiten una cantidad considerable de gases de efecto invernadero y otros contaminantes a la atmósfera, los cuales tienen un efecto significativo en la salud humana (Jang & Song, 2015; Lemming et al., 2010; Nguyen, 2011; Yang et al., 2016). En estudios previos se determinó que para distancias mayores a 200 km entre el sitio de remediación y el lugar de tratamiento de suelo, el impacto asociado a emisiones gaseosas es significativo (Singh et al., 2009). En el presente estudio se observó que la distancia total recorrida por cada vehículo es superior a 200 km (Tabla 12); por lo que, otras tecnologías de remediación que involucren una menor movilización tendrían un menor impacto ambiental y deberían ser evaluadas para su implementación.

Tabla 12.

Distancias recorridas por vehículos en las distintas fases de remediación ambiental.

Fase de remediación	**Tipo de vehículo**	**Distancia recorrida**
Desbroce	Camión	1576 km
	Camioneta	686 km
Construcción de accesos	Camión	119 km
	Camioneta	686 km
Lavado de suelo	Camión	4380 km
	Camioneta	686 km
Taponamiento y reconformación	Camión	119 km
	Camioneta	686 km
Distancia total camión		**6194 km**
Distancia total camioneta		**2744 km**

- Incineración de los desechos peligrosos enviados al gestor ambiental, ya que se generan emisiones gaseosas principalmente CO_2 y metano. En estudios de ciclo de vida donde se analiza el impacto de la incineración de residuos peligrosos se reporta un impacto considerable a esta categoría (Hong et al., 2017; Turconi et al., 2011).

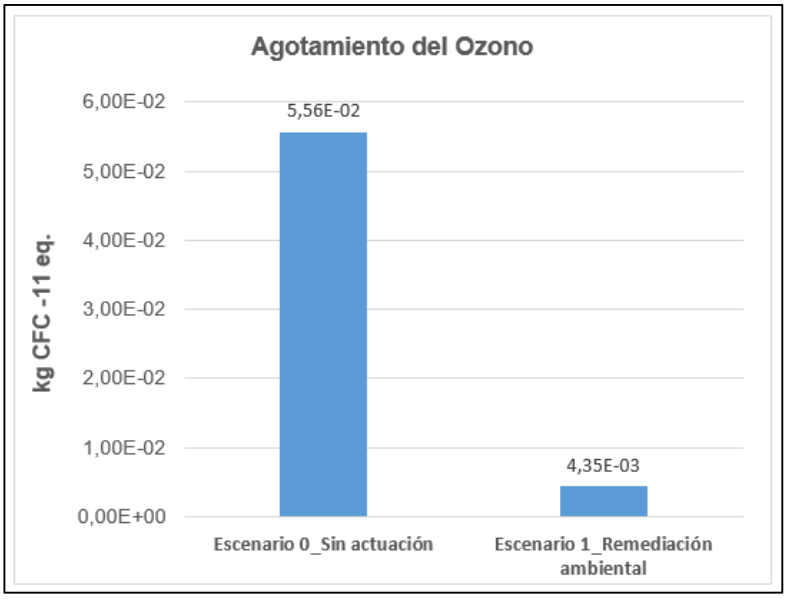
- Uso de EPP y herramientas, ya que la producción de todos los componentes de estos materiales, en todos los casos tienen un impacto en la categoría de cambio climático como se observa en la Tabla 12.

Agotamiento del Ozono

En la categoría agotamiento del ozono se calcularon 5,56x10^{-2} kg CFC $^{-11}$ eq. para el escenario de no actuación y 4,35x10^{-3} kg CFC $^{-11}$ eq. en el escenario de remediación ambiental (Figura 9).

Figura 9.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría agotamiento del ozono de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



El agotamiento del ozono estratosférico es producido por la presencia de compuestos clorofluorocarbonos (CFC) que son transportados por fuertes vientos hacia la estratósfera, donde se descomponen y liberan cloro y/o flúor, los que pueden reaccionar con el ozono. Cada átomo de cloro actúa como catalizador combinándose y descomponiendo repetidamente hasta 100000 moléculas de ozono durante el tiempo que permanece en la estratósfera (EPA, 2010). En este estudio, el escenario de no actuación muestra una contribución significativamente mayor que el escenario de remediación ambiental. A pesar de que en el material petrolífero como tal no se

documentan moléculas de compuestos halogenados que se relacionen con el agotamiento del ozono, si se encontró evidencia del aporte a esta categoría en el proceso de producción de crudo (upstream), considerando que se utilizó en el análisis el dato denominado *"Petrol, low-sulfur {RoW}| production | Cut-off, U"* de la base de datos Ecoinvent. En un estudio de ciclo de vida del proceso de la refinación del crudo, se verificó que aproximadamente el 20% de la contribución total asociada al agotamiento del ozono está relacionado con la producción de crudo (Liu et al., 2020). Sin embargo, en otros estudios de ACV, donde también se analizan de manera separada las cargas ambientales de la producción del crudo en la refinación de combustible, el aporte global para el agotamiento del ozono es menor (Morales et al., 2015; Yang et al., 2016).

Por otro lado, para el escenario de remediación ambiental los aportes a esta categoría estarían asociados a las emisiones gaseosas de los siguientes actividades que generan compuestos precursores del agotamiento del ozono estratosférico según el listado de sustancias indicadas en (Prinn R., 2013):

- Uso de combustibles fósiles (gasolina y diésel) para la movilización de maquinaria y vehículos que generan emisiones como el metano (CH_4) (Johnson, 2017).
- Producción de los componentes principales de los EPPs y herramientas, como se evidencia en estudios de ciclo de vida de la producción de estos materiales: nitrilo (Soratana et al., 2017), policarbonato (Altuwair, 2017), espuma hipo alergénica (EUROPUR, 2015), poliéster (Patel et al., 2002) y acero antiestático (Montalbo T, 2014), que generan impactos ambientales relacionados al agotamiento del ozono estratosférico.

Formación de ozono fotoquímico

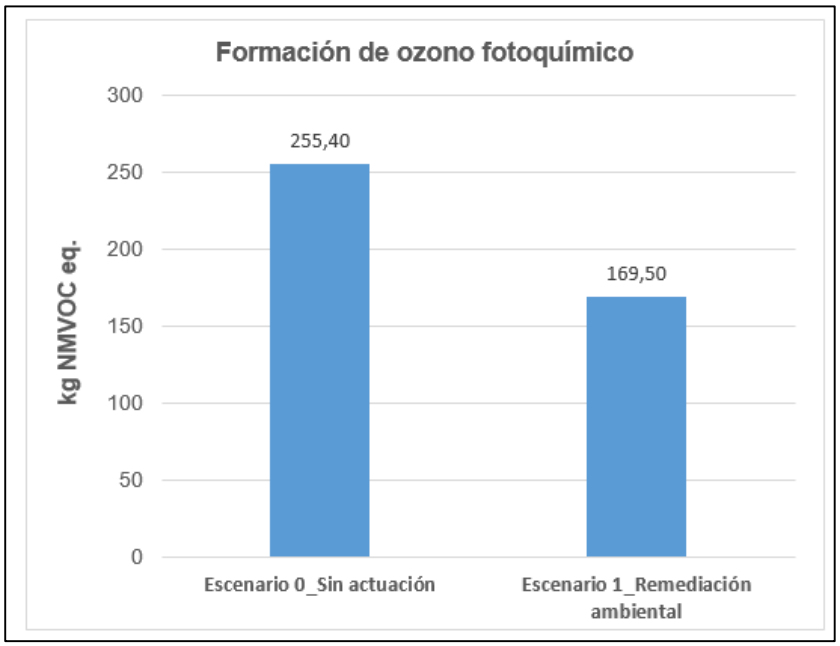
En relación a la categoría de formación de ozono fotoquímico, la remediación ambiental mostró 169,50 kg NMVOC eq., valor que es inferior en un 33% al observado en el escenario de no actuación (255,40 kg NMVOC eq.) como se verifica en la Figura 10. Este valor en el escenario de no actuación estaría relacionado a la formación de *smog* fotoquímico por la interacción de los hidrocarburos contenidos en el área superficial del derrame (m^2) con óxidos de nitrógeno en presencia de luz, tomando en consideración que los hidrocarburos semivolátiles (concentración de saturación= 101-103 µg m^{-3}) y volátiles intermedios (concentración de saturación=103-106 µg m^{-3}) se

encuentran en cantidades considerables en crudos pesados los cuales son precursores importantes de aerosoles orgánicos (Robinson et al., 2007). Esta ruta de disposición de hidrocarburos ha sido reportada por (Kuppusamy, Saranya; Maddela, Naga Raju; Megharaj, Mallavarapu; Venkateswarlu, 2005). Otro aporte estaría relacionado a las emisiones generadas en la producción de crudo (Liu et al., 2020).

Por otro lado, el aporte observado en el escenario de remediación ambiental estaría relacionado a la presencia de NO_x (que incluye: NO, NO_2, NMHCS, CH_4 y CO) producido por: la combustión de gasolina y diésel en el uso de maquinaria pesada y vehículos, ya que la actividad de transporte es una de las principales causas de formación de ozono fotoquímico (Johnson, 2017), la generación de las emisiones por la incineración de residuos peligrosos (Hong et al., 2017; Turconi et al., 2011) y la producción de la materia prima para EPPS y herramientas (Altuwair, 2017; EUROPUR, 2015; Montalbo T, 2014; Patel et al., 2002; Potting & Blok, 1995; Sim & Prabhu, 2018).

Figura 10.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría formación de ozono fotoquímico de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.

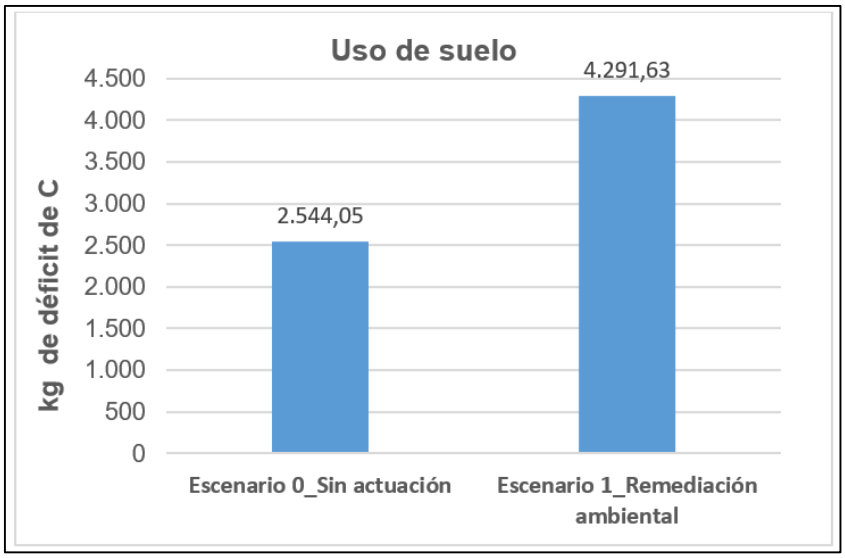


Uso de suelo

En la categoría de uso de suelo como se observa en la Figura 11, hay un mayor impacto para el escenario de remediación ambiental (2544.05 kg déficit de C), comparado con el escenario de no actuación (4291,63 kg déficit de C).

Figura 11.

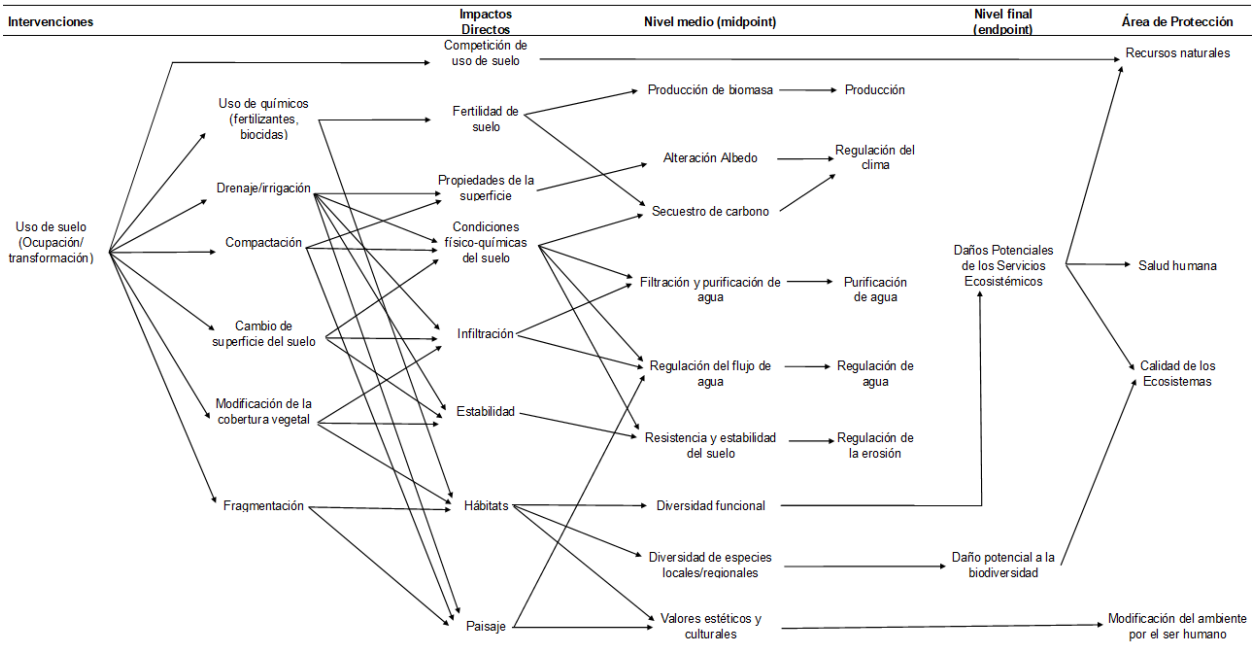
Evaluación ambiental (ACV) en la categoría uso de suelo de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



Para evaluar esta categoría se utilizó la metodología del software Simapro que analiza el Déficit de Materia Orgánica en el Suelo (SOM), éste indicador es uno de los propuestos por Milà I Canals et al., 2007, y se refiere a la capacidad de los ecosistemas para la producción de biomasa y los efectos de las prácticas agrícolas en la tasa de degradación del suelo. En la Figura 12, se muestra la cadena causa-efecto del impacto al uso de suelo sobre la biodiversidad y servicios ecosistémicos (Koellner et al., 2013).

Figura 12.

Cadena causa-efecto del impacto a la biodiversidad y servicios ecosistémicos causados por el uso de suelo. Fuente (Koellner, et al 2013).



Para el escenario de remediación, los aportes estarían asociados al drenaje/irrigación, compactación y modificación de la cobertura vegetal, según este detalle:

- **Drenaje/irrigación**: Cuando se realizan las actividades de desbroce, construcción de accesos y taponamiento se modifican los cursos de drenaje natural de los cuerpos de agua, ya que se construyen diques de contención que son después utilizados para el control de los efluentes en el lavado de suelo, además si bien las actividades de taponamiento y reconformación se realizan en base a la topografía inicial del sitio, al finalizar las operaciones el área del pasivo ambiental remediado no es igual al área inicial y la restauración natural tomará un tiempo significativo.
- **Compactación:** Las actividades de taponamiento afectan a la compactación del suelo.
- **Modificación de la cobertura vegetal**: Cuando finalmente se realizan las actividades de revegetación del área remediada se utilizan en primera instancia especies vegetales pioneras y al estar por lo general los pasivos ambientales

ubicados en propiedades privadas, se siembran especies vegetales del interés del propietario, por lo cual, la cobertura vegetal del sitio no será igual a la que se encontraba antes de las actividades de remediación.

Estos tres aspectos tienen impactos directos en la fertilidad, propiedades y condiciones físico-químicas de suelo, infiltración, estabilidad, hábitats, y morfología del sitio, lo que genera impactos de punto medio relacionados con la afectación a la producción de biótica y de biomasa, y como impacto final el daño potencial a los servicios ecosistémicos (Koellner et al., 2013).

Por otro lado, al analizar el escenario de no actuación, la presencia de contaminación en el sitio causa efectos en la cobertura vegetal del suelo, debido a los efectos adversos en las plantas por la presencia de los derivados de hidrocarburos como por ejemplo la capacidad de absorción de humedad y nutrientes, escaso desarrollo del sistema radicular por la disminución de la capacidad de retener agua, cambios en el sistema metabólico y hormonal en las células, bajo crecimiento de cotiledones, baja absorción de nutrientes, incremento de compuestos tóxicos, efectos negativos en el intercambio de carbono, decremento en la respiración y fotosíntesis y actividad enzimática (Kuppusamy, Saranya; Maddela, Naga Raju; Megharaj, Mallavarapu; Venkateswarlu, 2005). Estos efectos causan los siguientes impactos directos: afectaciones a la infiltración, estabilidad y uso de hábitats; y, estos a su vez generan impactos de punto medio en la filtración y purificación de agua, regulación del flujo de agua, resistencia y estabilidad del suelo, diversidad funcional, diversidad de especies y valores estéticos y culturales y como efectos de nivel final como la purificación y regulación de agua, regulación de la erosión y daños potenciales a la biodiversidad y servicios ecosistémicos.

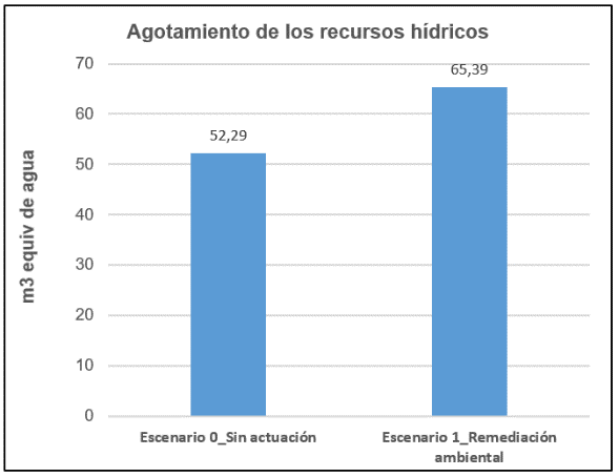
Agotamiento de recursos hídricos

En la categoría de agotamiento de los recursos hídricos, es mayor el aporte del escenario de remediación ambiental con 65,39 m^3 eq. de agua en contraste con el escenario de no actuación con 52,29 m^3 eq. de agua (Figura 13). Para el primer caso, el resultado se explicaría por el volumen de agua consumido principalmente para la producción de algodón en los equipos de protección personal (Wendin, 2016), mientras

que para el escenario de no actuación representaría el volumen de agua equivalente necesario para la producción de crudo derramado en el pasivo ambiental.

Figura 13.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría agotamiento de recursos hídricos de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.

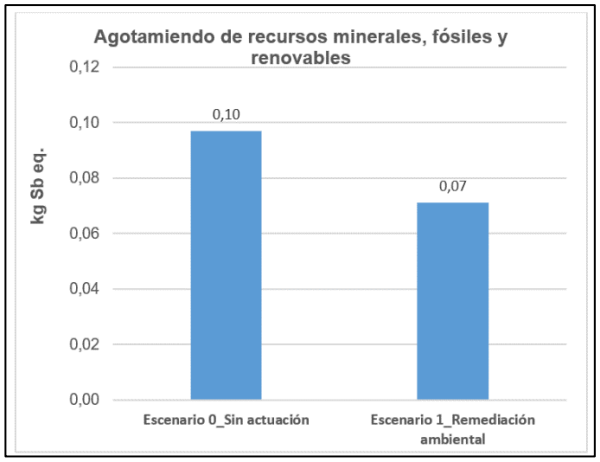


Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables

En relación a la categoría de agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables, el escenario de no actuación (0,1 kg Sb eq.) aporta en mayor cantidad que el escenario de remediación ambiental (0,07 kg Sb eq.) (Figura 14).

Figura 14.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



Los aportes asociados al escenario de no actuación estarían relacionados a las cargas ambientales en la producción del crudo que fue posteriormente derramado en el área de estudio. En base a estudios previos en Latinoamérica la contribución a esta categoría por la producción de crudo es significativa (Morales et al., 2015). En cambio, en el escenario de remediación ambiental, las contribuciones a esta categoría estarían asociadas a los recursos que se consumieron en el proceso de fabricación de todos los insumos, herramientas y equipos utilizados en las actividades, según lo detallado en la Tabla 12 y a la incineración de desechos peligrosos ya que en sus operaciones utiliza gas natural, crudo, carbón y electricidad como fuente de energía (Hong et al., 2017).

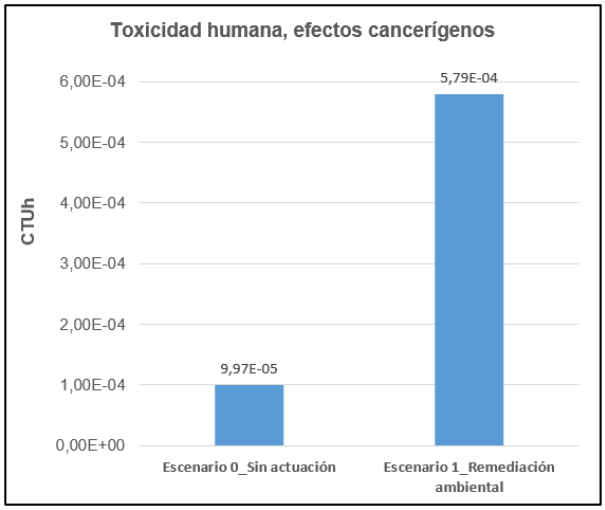
Toxicidad humana, efectos cancerígenos

En esta categoría se observa que el valor para el escenario de remediación ambiental en casi 6 veces mayor comparado con el escenario de no actuación (Figura 15). En el escenario de remediación ambiental, los aportes a esta categoría podrían estar asociados a:

- Las emisiones gaseosas producidas por la incineración de residuos peligrosos como equipos de protección personal contaminados. En estudios previos de ACV sobre esta actividad, se ha identificado la presencia de metales pesados como arsénico y mercurio en emisiones gaseosas y cromo, plomo, cadmio, mercurio y cobre en las descargas al suelo, las que pueden estar asociadas a efectos cancerígenos (Hong et al., 2017). Otras emisiones gaseosas producidas por los incineradores como las dioxinas se han asociado también a diversos tipos de cáncer infantil y leucemia (Costner & Johnston, 2001; Knox, 2005).
- La reincorporación del crudo contenido en el pasivo ambiental a la producción nacional, lo cual generará emisiones y descargas algunas de ellas cancerígenas, de acuerdo al listado de sustancias cancerígenas reportado en (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2018).

Figura 15.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría toxicidad humana, efectos cancerígenos de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



En cambio, en el escenario de no actuación, la toxicidad humana con efectos cancerígenos estaría ligada a la presencia de compuestos catalogados como cancerígenos por la ATSDR que están presentes en el crudo: benceno, benzopireno, benzoantraceno, dibenzoantraceno, criseno, benzo(b)fluoroanteno y benzo(k)fluoroanteno (Anexo 2). Algunos de estos compuestos que estarían migrando del crudo al ambiente son de naturaleza lipofílica, por lo que, son poco solubles en agua, son transportados por las lipoproteínas de las membranas celulares y se acumulan en los tejidos grasos de organismos vivos entrando de esta manera a la cadena trófica, provocando serios desórdenes como por ejemplo cáncer, malformaciones y mutaciones genéticas (Kuppusamy, Saranya; Maddela, Naga Raju; Megharaj, Mallavarapu; Venkateswarlu, 2005). Se han encontrado efectos tóxicos relacionados a HAPs causantes de cáncer de vejiga, pecho, esófago, laringe, pulmón, hígado, piel, páncreas y próstata (Xu et al., 2013).

En relación con los aportes a las categorías de toxicidad humana con efectos cancerígenos y efectos no cancerígenos, tanto en los escenarios de no actuación como de remediación ambiental se identificaron actividades que de acuerdo con estudios previos contribuyen a la toxicidad humana de manera general (sin especificar si tiene o no efectos cancerígenos). Estos son la producción de crudo en el escenario de no actuación (Liu et al., 2020; Morales et al., 2015; Yang et al., 2016) y la producción de

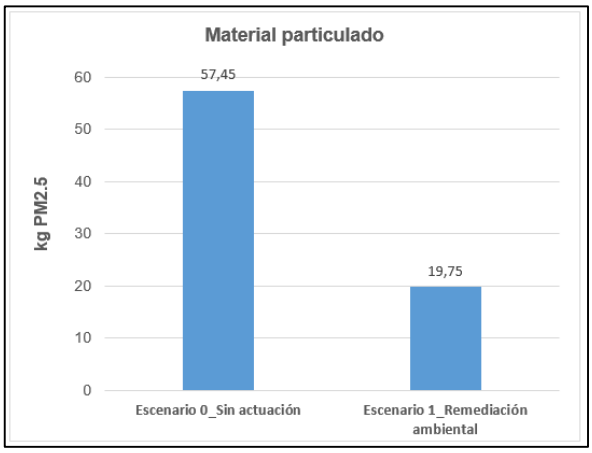
PVC, espuma antialergénica y acero antiestático usado en los EPP (EUROPUR, 2015; Montalbo T, 2014).

Material particulado

En relación a la categoría ambiental de material particulado, el escenario de no actuación muestra valores significativamente superiores (57,45 kg PM2.5) al de remediación ambiental (19.75 kg PM2.5) como se observa en la Figura 16.

Figura 16.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría material particulado de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



Una posible causa de la mayor concentración de material particulado en el escenario sin actuación sería el relacionado a la formación de pavimentos o estructuras estables en la superficie de suelo o sedimentos contaminados con hidrocarburos poco solubles en agua, que al ser compuestos combustibles, una cantidad considerable de humo negro con material particulado se genera en el proceso de ignición natural del hidrocarburo, que pese a contener mínimas cantidades de hidrocarburos residuales, presentan un potencial riesgo a la salud humana (Kuppusamy, Saranya; Maddela, Naga Raju; Megharaj, Mallavarapu; Venkateswarlu, 2005). El material particulado también es un compuesto presente en la extracción de petróleo y su presencia está asociada a

enfermedades cardiovasculares y enfermedades del sistema respiratorio (Liu et al., 2020).

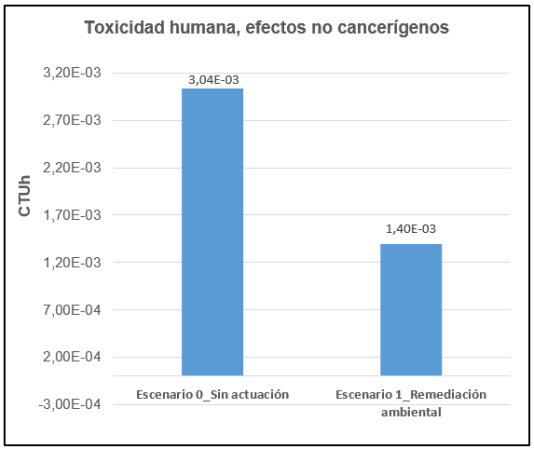
La generación de material particulado en las actividades de remediación ambiental estaría asociado al uso de combustibles fósiles principalmente PM_{10} (Johnson, 2017) en todas las fases de la remediación ambiental, a la incineración de desechos peligrosos que generan material particulado a la atmósfera (Hong et al., 2017; Turconi et al., 2011) y a la producción de materia prima para la fabricación de EPP, principalmente espuma hipoalergénica (EUROPUR, 2015).

Toxicidad humana, efectos no cancerígenos

La categoría de toxicidad humana, con efectos no cancerígenos en el escenario de no actuación duplica su valor ($3.04x10^{-3}$ CTUh) con respecto al escenario de remediación ambiental ($1.4x10^{-3}$ CTUh) como se observa en la Figura 17.

Figura 17.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría toxicidad humana, efectos no cancerígenos de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



Para el escenario de no actuación, esta toxicidad estaría asociada a los compuestos presentes en el crudo en el pasivo ambiental catalogados como tóxicos, pero sin efectos cancerígenos. Es necesario recalcar que el crudo está compuesto por una amplia variedad de compuestos hidrocarbonados. La ATSDR, presenta un compendio de los compuestos asociados a hidrocarburos en los cuales se ha evaluado su toxicidad en vertebrados, según el tipo de exposición, frecuencia y dosis y se

adjuntan en el Anexo 2; sin embargo, en términos generales las siguientes compuestos son tóxicos sin efectos cancerígenos: compuestos aromáticos (C_5-C_9) como el tolueno etilbenceno, xileno; compuestos aromáticos (C_9-C_{16}) como naftaleno, isopropil benceno, bifenil, compuestos alifáticos (C_5-C_8) como hexano; compuestos alifáticos (C_8-C_{16}) como kerosene, fuel oil. De acuerdo a la base de datos utilizada en el software Simapro se consideran también compuestos con efectos tóxicos para la salud humana los siguientes: C_XH_YOH (como isopropanol), C_XH_Y alifáticos , C_XH_Y aromáticos, C_XH_Y Cloro y HAPs (PRé, 2019).

En el escenario de remediación ambiental, se observa que los aportes a la toxicidad humana con efectos no cancerígenos estarían relacionados con la exposición del personal a las emisiones gaseosas en todas las fases de la remediación ambiental, por ejemplo, la generación a NO_X, material particulado, CO_2, CH_4, entre otros que como se explicó anteriormente se generan en las diferentes etapas del proceso y en el resto de proceso de la remediación con las emisiones por la incineración de desechos peligrosos y las emisiones generadas en la reincorporación de crudo a la producción nacional. Estos contaminantes están asociados a enfermedades respiratorias y pulmonares de la población (Hernández et al., 2010).

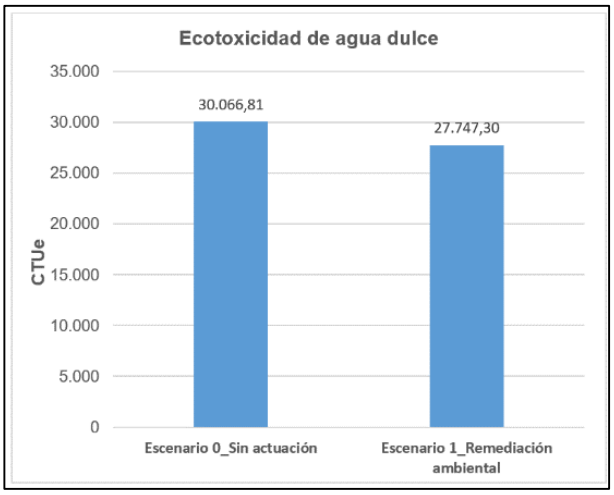
Otras compuestos sin efectos cancerígenos, pero que muestran toxicidad, persistente y bioacumulativos, se observan en las emisiones producidas por los incineradores, por ejemplo, material particulado, PCBs, naftalenos policlorinados, bencenos clorinados, HAPs, COVs, entre otros, mismos que se relacionan también con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y del sistema reproductivo (Costner & Johnston, 2001).

Ecotoxicidad de agua dulce

En esta categoría se observó un impacto ligeramente superior en el escenario de no actuación con respecto al de remediación ambiental (Figura 18).

Figura 18.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría ecotoxicidad de agua dulce de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



En el escenario de no actuación, la ecotoxicidad de agua dulce se explicaría por la contaminación de los acuíferos cercanos y agua de escorrentía por la presencia de crudo en el suelo. Se debe considerar que cuando ocurre un derrame (en este caso producido por el pozo Sacha 124) el crudo seguirá el o los cursos de agua más cercanos, como por ejemplo esteros de la zona, mezclándose con el suelo, sedimentos, vegetación y agua circundante. El crudo mezclado con agua interactúa con los sedimentos formando Partículas Agregadas de Crudo (OPA, por sus siglas en inglés). De acuerdo a lo reportado por (Bandara et al., 2011), basado en modelos de interacciones crudo-sedimentos, hasta un 65% del volumen de crudo derramado se enlaza como OPA y el resto es particionado directamente en el agua, siendo esta fracción altamente biodisponible, por lo que, su toxicidad se incrementa afectando a los ecosistemas acuáticos. Se debe considerar que para el caso de estudio, el agua de esteros es común que sea utilizada por la población humana aledaña para el cumplimiento de sus funciones vitales, por lo que, esta contaminación podría afectar a su salud. En la producción de crudo, también se han reportado impactos considerables a esta categoría por las descargas y emisiones generadas (Liu et al., 2020), lo cual también se aplicaría para el escenario de remediación ambiental considerando que parte del crudo (recuperado) pasa a formar parte de la producción nacional. En este escenario (remediación), los aportes también podrían estar relacionados a la afectación del agua utilizada en la fase del lavado, ya que en esta etapa se generan condiciones

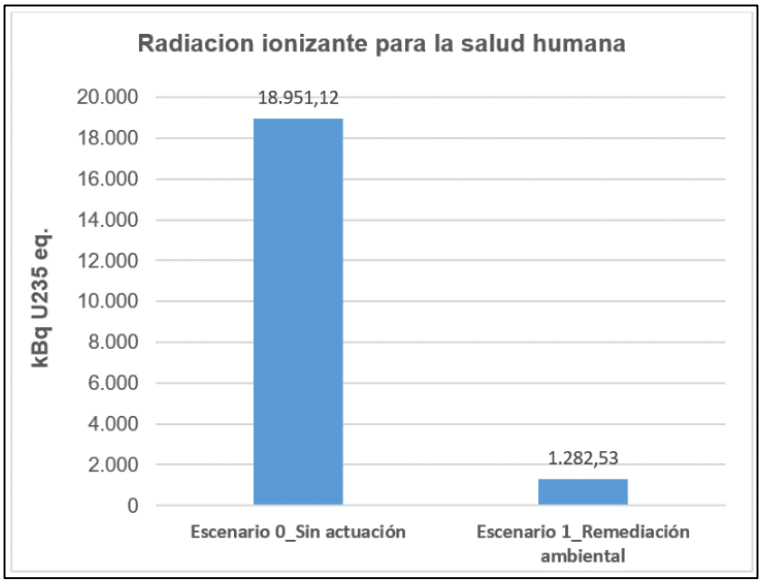
turbulentas, para que el crudo se desprenda del suelo, ocasionando que parte de la fracción no biodisponible de los TPH pase a estar disponible (Cheng et al., 2018) y en consecuencia aumente su toxicidad. También se han reportado contribuciones en la elaboración de materia prima para el EPP y herramientas como el PVC (European Comission, 2004) y la espuma hipoalergénica (EUROPUR, 2015).

Radiación ionizante para la salud humana

En relación a la categoría de radiación ionizante para la salud humana, el impacto ambiental es significativamente superior en el escenario de no actuación (18951.12 kBq U_{235} eq. vs 1282,53 kBq U_{235} eq.) y estaría relacionado a la presencia de desechos radiactivos en el pasivo ambiental contaminado, tomando en cuenta que en décadas pasadas, fecha que se presume que ocurrió el derrame producido por el pozo Sacha 124, las consideraciones ambientales para la producción de crudo no cumplían con los estándares técnicos adecuados (Figura 19).

Figura 19.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría radiación ionizante para la salud humana de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



De acuerdo a lo reportado por (Ali et al., 2019), el crudo, lodos de producción, aguas de formación, gas, entre otros, son una fuente considerable de Materiales Radiactivos Naturales Tecnológicamente Acumulados (TENORM, por sus siglas en inglés) por el alto contenido de radionucleidos de las rocas (por ejemplo Uranio, Torio y Radio y sus productos de decaimiento, Potasio-40, entre otros) que han existido desde la formación de la tierra, que se caracterizan además por acumularse a lo largo del tiempo, por lo que, pueden poner en riesgo la salud humana y afectaciones en el ambiente. Esta aseveración es corroborada por (Suárez & Gonzalez, 2010) que menciona que las categorías: *"Extracción, refinación y uso de gas natural*" y *"Extracción, refinación y uso de petróleo"* son una fuente considerable de TENORM en Ecuador.

Por otro lado, el aporte a la categoría por el escenario de remediación ambiental estaría justificado por la actividad de recuperación del crudo del pasivo ambiental y su reincorporación a la producción nacional ya que como se mencionó anteriormente, la actividad productiva *"Extracción, refinación y uso de petróleo"* genera compuestos TENORM.

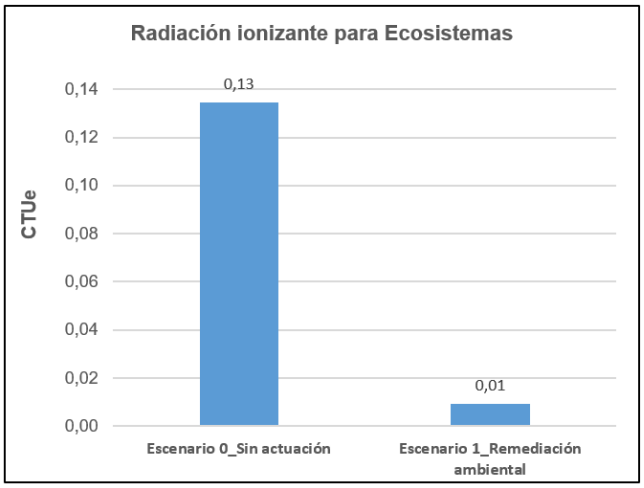
Radiación ionizante para Ecosistemas

De forma similar a la categoría radiación ionizante para la salud humana, la categoría de radiación ionizante para Ecosistemas es superior (0,13 CTUe) en el escenario de no actuación, y los factores que explicarían estos valores están también relacionados con la presencia de desechos radiactivos en el pasivo ambiental generados por la explotación de petróleo (Figura 20). La unidad de análisis en este caso son las Unidades Comparativas Tóxicas (UTC). Existe una amplia cantidad de bibliografía que asocia los daños a los ecosistemas y a la salud humana a la presencia de material radiactivo (Garnier-Laplace et al. 2009; Michalik, Wysocka, and Liland 2011; EPA, 2005, Ali et al. 2019; Speight 2005), siendo un factor predominante su característica de ser bioacumulable. Es necesario recalcar que la catalogación de esta categoría es "provisional" lo que significa que el método usado es el más adecuado con respecto a otros, pero que requiere aún mayor desarrollo, por lo que sus resultados, requieren de validaciones previo a emitir una recomendación (European Commission, 2012). Para el escenario de actividades de remediación (0,01 CTUe) el aporte a la

categoría estaría también relacionado a la recuperación del crudo del pasivo ambiental y su reincorporación a la producción nacional.

Figura 20.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría radiación ionizante para Ecosistemas de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



Acidificación

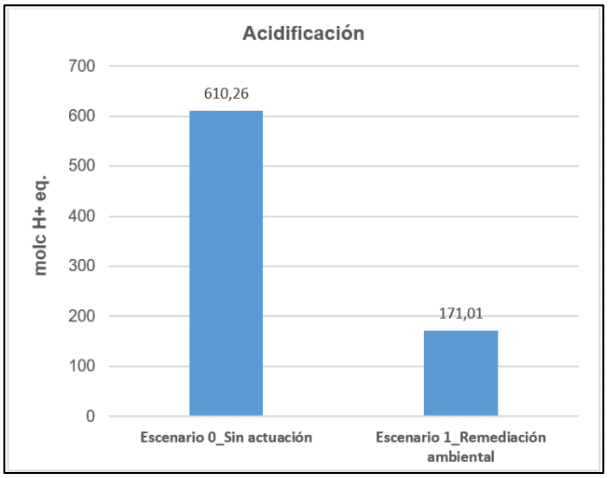
Respecto a la categoría de acidificación (Figura 21), se observa que la aplicación de la remediación genera un aporte de 171,01 molc H+eq., mientras que en la no actuación esta cifra casi se cuatriplica (610,26 molc H^+eq.) lo que demuestra que la remediación es efectiva para disminuir considerablemente los impactos asociados a esta categoría y esta reducción se explicaría debido a la eliminación de los compuestos hidrocarbonados evitando así la formación de *smog* fotoquímico por la interacción de hidrocarburos volátiles con óxidos de nitrógeno en presencia de luz, que posteriormente regresaría a la superficie terrestre en forma de ácidos (Kuppusamy et al., 2005). Además, se ha reportado que la producción de crudo genera aportes significativos a esta categoría ambiental (Liu et al., 2020; Morales et al., 2015; Yang et al., 2016).

Por otro lado, la carga ambiental en el proceso de remediación ambiental, estaría asociada a las emisiones gaseosas que generan óxidos de nitrógeno y azufre producidos por el uso de combustibles fósiles (Johnson, 2017; Morales et al., 2015), y a la producción de la materia prima utilizada en el EPP y herramientas, que generan

emisiones que contribuyen a la acidificación como: PVC (European Commision, 2004), poliamida (Sim & Prabhu, 2018), nitrilo (Soratana et al., 2017), policarbonato (Altuwair, 2017), espuma hipoalergénica (EUROPUR, 2015), poliéster (Patel et al., 2002) y acero antiestático (Montalbo T, 2014).

Figura 21.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría acidificación de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.

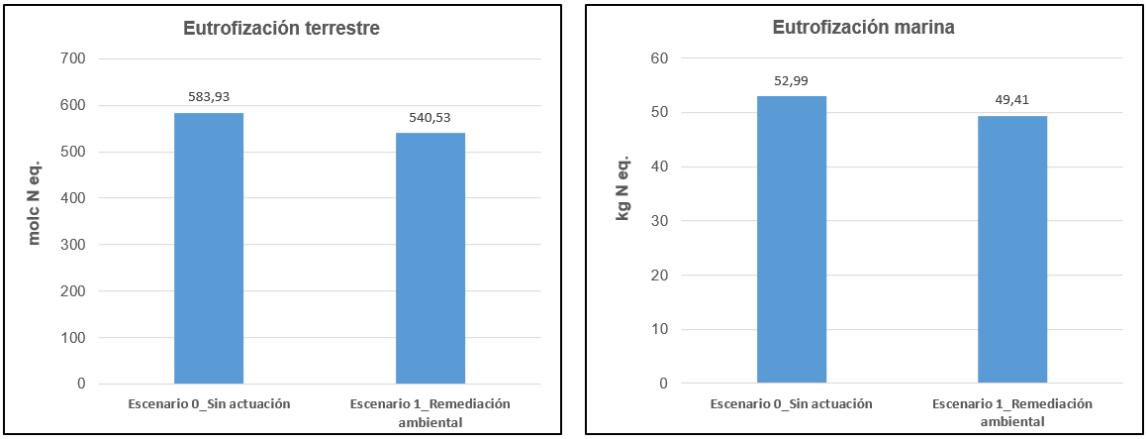


Eutrofización marina, eutrofización terrestre y eutrofización de agua dulce

Los resultados obtenidos respecto a las categorías de eutrofización terrestre y eutrofización marina muestran un aporte muy similar entre los dos escenarios evaluados (Figura 22).

Figura 22.

Evaluación ambiental (ACV) en las categorías eutrofización terrestre y eutrofización marina de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



Ambas categorías consideran la eutrofización a la presencia de los compuestos químicos asociados principalmente al nitrógeno: amonio, nitratos, nitritos, dióxido de nitrógeno y monóxido de nitrógeno. Para el caso de eutrofización terrestre incluye las emisiones tanto al aire como suelo, en cambio en la eutrofización marina se refiere a los compuestos de nitrógeno descargados a los ríos y que posteriormente desembocan en el mar (European Commission, 2012).

El escenario de remediación ambiental explicaría su aporte a ambas categorías por:

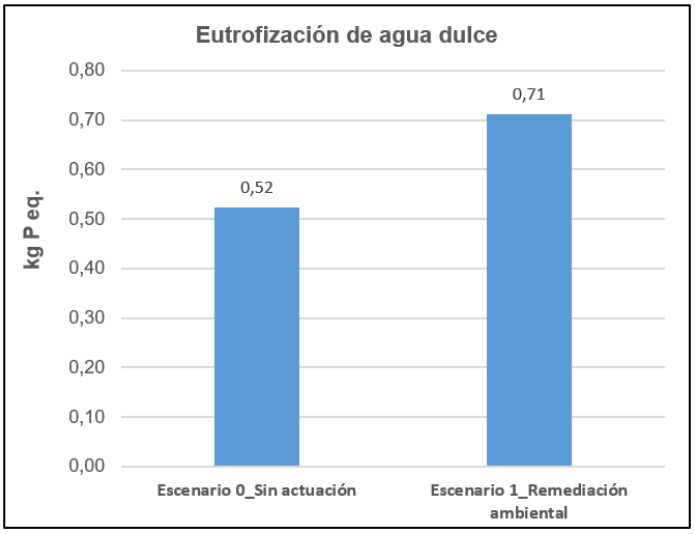
- Las emisiones gaseosas generadas en todas las fases de la remediación debido al uso de combustibles fósiles ya que se generan óxidos de nitrógeno y azufre (Kuppusamy, Saranya; Maddela, Naga Raju; Megharaj, Mallavarapu; Venkateswarlu, 2005; Morales et al., 2015).
- Producción de PVC y policarbonato utilizado como materia prima en el EPP y herramientas, acorde a lo reportado en estudios de análisis de ciclo de vida previos (Altuwair 2017, European Comission 2014).
- Emisiones gaseosas de compuestos nitrogenados en la incineración de residuos peligrosos (Hong et al., 2017; Turconi et al., 2011).
- Emisiones generadas por el crudo reincorporado a la producción nacional.

Por otra parte, el escenario de no actuación explicaría su aporte debido al contenido tanto de nitrógeno como de carbono biodisponible presentes en el pasivo ambiental que de alguna manera podrían favorecer el crecimiento biótico en su superficie.

Por otro lado, la categoría eutrofización de agua dulce, considera las sustancias químicas fosfato, ácido fosfórico y fósforo total (European Commission, 2012). Los resultados obtenidos muestran que el aporte del escenario de remediación ambiental (0,71 kg P eq.) es superior al escenario de no actuación (0,52 kg P eq.) (Figura 23).

Figura 23.

Evaluación ambiental (ACV) en la categoría eutrofización de agua dulce de las actividades de remediación de pasivos ambientales tipo derrame.



En el escenario de remediación ambiental se identifican los siguientes aspectos que aportarían a esta categoría de forma superior que el escenario de no actuación:

- Materia prima utilizada en el EPP y herramientas en la remediación, específicamente: policarbonato, poliamida, PVC, poliéster y acero antiestático cuyo proceso de producción genera aportes a la eutrofización de agua dulce (Altuwair, 2017; Montalbo T, 2014; Patel et al., 2002; Sim & Prabhu, 2018)

- En el lavado de suelo se utilizan surfactantes cuya composición incluye compuestos anfóteros que desprenden el crudo del sedimento. Este mecanismo disminuye la cantidad de oxígeno en el agua, favoreciendo la eutrofización.
- Emisiones generadas por el crudo recuperado del pasivo ambiental, el cual es reincorporado a la producción nacional.

Para el escenario de no actuación, el proceso de producción de crudo posteriormente descargado al ambiente podría ser el mayor aporte, como se observa en estudios previos de análisis de ciclo de vida donde se reporta que la categoría de eutrofización de agua dulce es una de las más afectadas por este proceso (Liu et al., 2020; Morales et al., 2015). Por otro lado, el crudo contenido en el pasivo ambiental en contacto con el agua, forma una capa oleosa en la superficie que dificulta el intercambio gaseoso, incrementando la cantidad de oxígeno requerida por la biota en el agua, favoreciendo la eutrofización (Werner et al., 1983).

Resultados Midpoint (Ponderados) – Comparación entre escenarios

En la Tabla 13 y Figura 24 se visualizan los resultados ponderados de punto medio (en puntos, pt), de cada una de las categorías evaluadas comparando los dos escenarios de estudio. La metodología de ponderación fue la propuesta por (Sleeswijk et al., 2008) en la cual todas las extracciones y emisiones a nivel mundial fueron tomados como factores de referencia para cada uno de los valores de las categorías ambientales y transformados a un valor adimensional como los puntos para poder ser comparados entre ellos en una misma referencia. Para la categoría radiación ionizante para ecosistemas, el valor ponderado es muy bajo, por lo que se considera imperceptible.

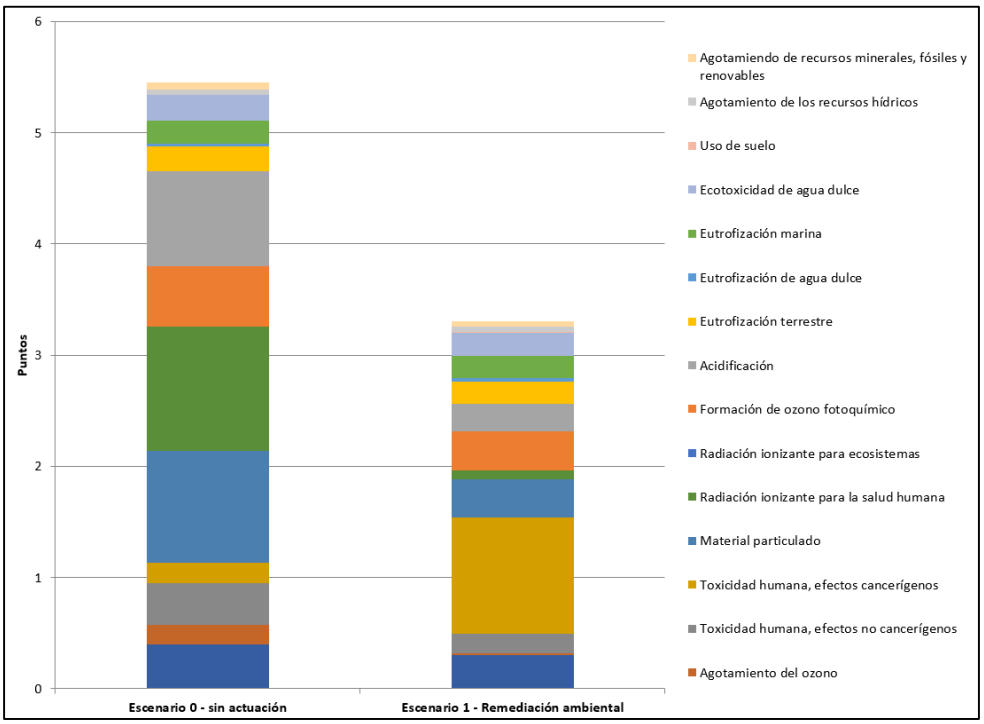
Tabla 13.

Evaluación del impacto ambiental ACV de las actividades de remediación ambiental– Resultados ponderados (en puntos, Pt).

Categoría de impacto	Escenario 0 - sin actuación	Escenario 1 - con actuación
Total	**5,448**	**3,305**
Cambio climático	0,401	0,304
Agotamiento del ozono	0,172	0,013
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	0,380	0,175
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	0,180	1,046
Material particulado	1,008	0,346
Radiación ionizante para la salud humana	1,118	0,076
Radiación ionizante para ecosistemas	0,000	0,000
Formación de ozono fotoquímico	0,537	0,356
Acidificación	0,860	0,241
Eutrofización terrestre	0,221	0,205
Eutrofización de agua dulce	0,024	0,032
Eutrofización marina	0,209	0,195
Ecotoxicidad de agua dulce	0,229	0,212
Uso de suelo	0,002	0,004
Agotamiento de los recursos hídricos	0,043	0,054
Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables	0,064	0,047

Figura 24.

Evaluación del impacto ambiental ACV de las actividades de remediación ambiental– Resultados ponderados (en puntos, Pt).



De manera global se muestra que existe un mayor impacto ambiental en el escenario de no actuación con 5,45 puntos. Además, entre los dos escenarios evaluados existe una diferencia de 2,14 puntos, por lo que, la carga ambiental correspondiente al escenario de remediación es inferior en 39.4%.

El escenario de no actuación tiene sus impactos ambientales más representativos en las siguientes categorías: radiación ionizante para la salud humana, material particulado, acidificación y formación de ozono fotoquímico. Por otro lado, las categorías que menores valores presentaron fueron: eutrofización de agua dulce, uso de suelo, agotamiento de los recursos hídricos y agotamiento de los recursos minerales, fósiles y renovables.

En cambio, el escenario de remediación muestra valores mayores en la categoría de toxicidad humana asociada a efectos cancerígenos que es al menos tres veces mayor que el resto de categorías. En cambio las categorías cambio climático, material particulado, formación de ozono fotoquímico, acidificación y eutrofización

terrestre presentaron valores medios y el uso de suelo fue la que menos impacto presentó.

Los resultados obtenidos donde se observa un mayor impacto en la no actuación concuerdan con estudios previos donde se comparó el impacto de ejecutar actividades de remediación con la no actuación. En el estudio realizado por (Toffoletto et al., 2005) se evaluó la aplicación de la biorremediación mediante biopilas a suelos contaminados con diesel, y se observó que la presencia de contaminación en los suelos constituía la contribución más importante a los impactos ambientales globales, en un orden de 1 a 10 con respecto a suelos que fueron remediados hasta distintos niveles de concentración de hidrocarburos. Así mismo, en estudios desarrollados por (Singh et al., 2009), se evaluó la aplicación de varias tecnologías de remediación comparado con el escenario de no actuación, determinándose que la no actuación tiene mayor impacto ambiental que la aplicación de tecnologías de remediación. Es decir, al final de los tratamientos de remediación se causa un impacto positivo al medio ambiente y a la salud de las personas; dicho en otras palabras, el costo ambiental de efectuar la remediación ambiental es inferior al costo ambiental de dejar la contaminación en el suelo.

Resultados Endpoint: Categorizados por tipo de afectación

En la tabla 14 y figura 25, se muestran los impactos para los grupos de afectación final. En todos los grupos evaluados se observa un menor impacto ambiental en el escenario de remediación ambiental, principalmente en la afectación de los ecosistemas donde se observa un impacto ambiental inferior en un 43%, el cual estaría relacionado principalmente a las cargas ambientales correspondientes a la acidificación.

Con respecto a la afectación a la salud humana, donde el impacto de remediación ambiental es inferior en un 39%, esta disminución está mayormente relacionada a la categoría de radiación ionizante, observándose una diferencia de 1,04 puntos entre ambos escenarios, y finalmente, en el grupo correspondiente a la afectación a la disponibilidad de recursos se verifica en el escenario de remediación un aporte ambiental inferior en un 36%, relacionado principalmente a la categoría de formación de ozono fotoquímico con una diferencia de 0,18 puntos entre los dos escenarios evaluados.

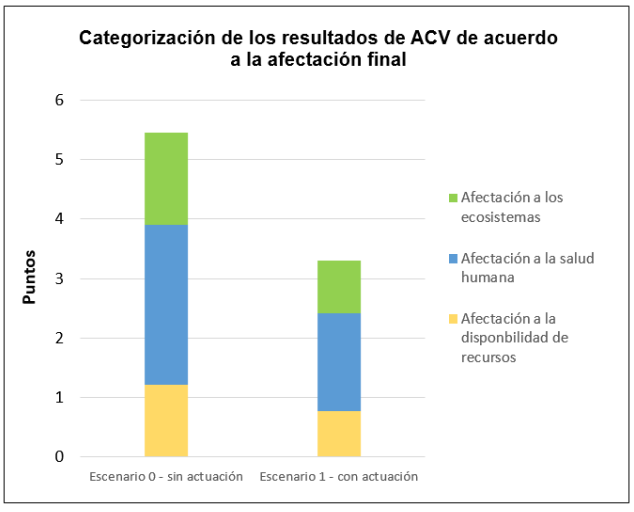
Tabla 14.

Grupos de afectación final de cada categoría de impacto. Se muestran la sumatoria de puntos de los grupos de afectación para cada escenario. En paréntesis se señala el porcentaje de reducción en el escenario que presentó menor valor.

Categoría de impacto	Grupo de afectación final	Puntos Escenario 0 - sin actuación	Puntos Escenario 1 - con actuación -
Cambio climático Agotamiento del ozono Formación de ozono fotoquímico Uso de suelo Agotamiento de los recursos hídricos Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables	Afectación a la disponibilidad de recursos	1,22	0,78 **(36%)***
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos Toxicidad humana, efectos cancerígenos Material particulado Radiación ionizante para la salud humana	Afectación a la salud humana	2,69	1,64 **(39%)***
Acidificación Eutrofización terrestre Eutrofización de agua dulce Eutrofización marina Ecotoxicidad de agua dulce	Afectación a los ecosistemas	1,54	0,88 **(43%)***

Figura 25.

Evaluación del impacto ambiental ACV por grupos de afectación final de las actividades de remediación ambiental de pasivos ambientales del tipo derrame. Resultados ponderados (en puntos).



Evaluación del Impacto Ambiental (ACV) de cada fase de la remediación ambiental

Como se visualiza en la Tabla 15 y Figura 26, en las actividades de remediación ambiental, la etapa que mayor impacto ambiental genera es el desbroce de suelo, seguida de la construcción de accesos y lavado de suelos. Es necesario recalcar que es común que estas tres etapas se realicen de manera paralela, dependiendo de las condiciones ambientales y operativas como, por ejemplo: disponibilidad de maquinaria pesada, factibilidad de realizar desbroce de suelos, tipo de topografía. Al analizar el desbroce de suelos, se observa que la mayor carga ambiental está relacionada con las categorías de impacto: radiación ionizante para la salud humana (1.14 puntos) y material particulado (1.06 puntos). La fase de construcción en cambio tiene un aporte importante en la categoría toxicidad humana con efectos cancerígenos (0.9 puntos) y el lavado de suelo tiene su mayor aporte en las categorías: formación de ozono fotoquímico (0,12 puntos), toxicidad humana con efectos cancerígenos (0,11 puntos) y material particulado (0,10 puntos). Por otro lado, el taponamiento muestra contribuciones positivas al ambiente en todas las categorías ambientales evaluadas, lo cual se explica porque en esta fase se vuelven a dejar las condiciones del sitio remediado de manera similar a su entorno y se realiza la revegetación que promueve la restauración del área impactada, la recuperación de la biodiversidad y uso de suelo, que en condiciones previas fue severamente afectada. Así mismo, en la etapa de taponamiento se incluye la recuperación del crudo derramado y su incorporación al sistema de producción tiene el beneficio de que no se generarían las cargas ambientales propias de la extracción del mismo. Resultados similares son reportados por (Singh et al., 2009).

Tabla 15.

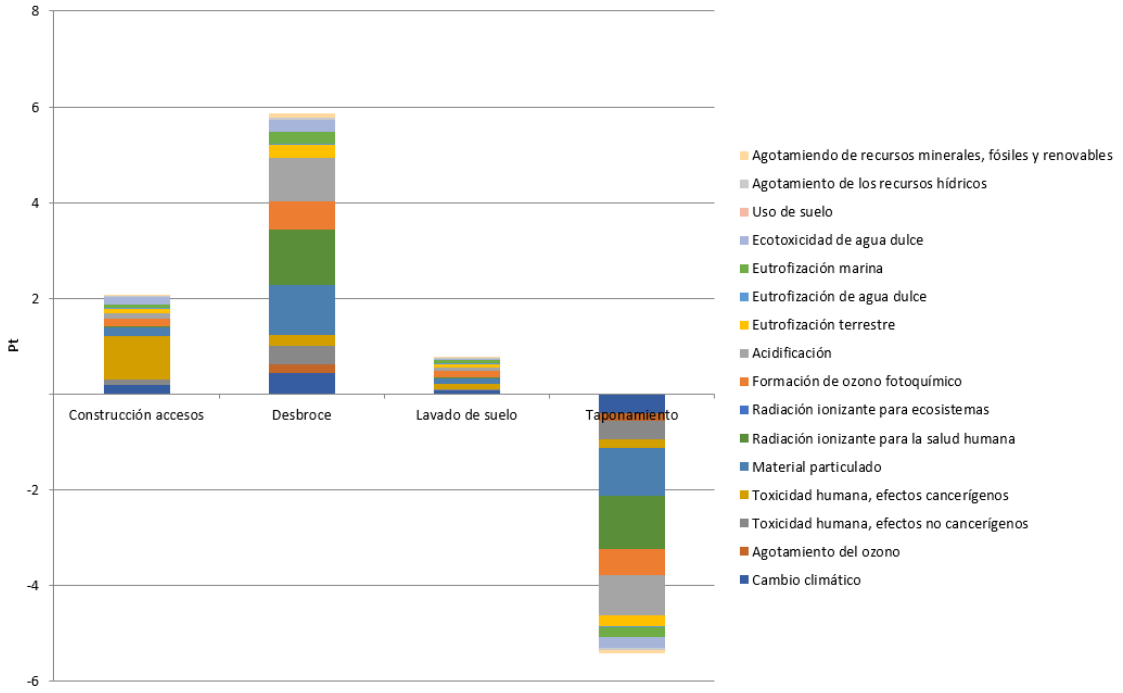
Aporte de cada etapa de la remediación ambiental a las categorías de impacto evaluadas.

Categoría ambiental	Aportes de las etapas de la remediación ambiental (Puntos)				Total (Puntos)
	Desbroce	Construcción accesos	Lavado de suelo	Taponamiento	
Total	**5,86**	**2,07**	**0,79**	**-5,41**	**3,31**
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	0,21	0,90	0,11	-0,18	1,05
Formación de ozono fotoquímico	0,61	0,16	0,12	-0,53	0,36
Material particulado	1,06	0,19	0,10	-1,00	0,35
Cambio climático	0,45	0,18	0,07	-0,40	0,30
Acidificación	0,90	0,12	0,07	-0,86	0,24
Ecotoxicidad de agua dulce	0,24	0,17	0,03	-0,23	0,21
Eutrofización terrestre	0,27	0,08	0,08	-0,22	0,20
Eutrofización marina	0,25	0,07	0,07	-0,21	0,19
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	0,40	0,12	0,04	-0,38	0,17
Radiación ionizante para la salud humana	1,14	0,02	0,03	-1,12	0,08
Agotamiento de los recursos hídricos	0,05	0,01	0,03	-0,04	0,05
Agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables	0,07	0,02	0,02	-0,06	0,05
Eutrofización de agua dulce	0,02	0,03	0,004	-0,02	0,03
Agotamiento del ozono	0,18	0,005	0,005	-0,17	0,01
Uso de suelo	0,003	0,001	0,002	-0,002	0,004
Radiación ionizante para ecosistemas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Se ordenan las categorías de forma descendente de acuerdo al aporte total (sumatoria de todas las actividades de remediación). Se señalan con rojo los valores de las categorías que más aportan al impacto ambiental por etapa de la remediación.

Figura 26.

Evaluación del impacto ambiental (ACV) por cada etapa de la remediación ambiental – Resultados globales.



Estrategias de mejora al proceso de remediación actualmente desarrollado por el Proyecto Amazonía Viva.

En base a los resultados obtenidos se identificaron los principales factores que contribuyen a las categorías de impacto de mayor puntaje en el análisis de ciclo de vida (toxicidad con efectos cancerígenos, formación de ozono fotoquímico, material particulado y cambio climático); y en base a estos factores se proponen estrategias de mejora que disminuyan este impacto ambiental:

- **Materia prima utilizada en los equipos de protección personal y herramientas e incineración de residuos peligrosos:** La materia prima necesaria para el equipo de protección personal y herramientas principalmente espuma hipoalergénica y acero antiestático y las emisiones gaseosas producidas en la fase de incineración de residuos peligrosos contribuyen principalmente en la categoría de toxicidad con efectos cancerígenos. Al ser

estos materiales esenciales para las actividades, ya que proporcionan condiciones de protección y trabajo adecuadas para el personal, no se puede evitar su pero se podría evaluar otros materiales que generen una menor carga ambiental. Un resultado interesante encontrado es el significativo aporte de carga ambiental del escenario de no actuación a las categorías de radiación ionizante para la salud humana y radiación ionizante efecto sobre ecosistemas, pese a que en los resultados ponderados presenten una baja contribución, ya que está relacionado con la exposición a sustancias radiactivas al ambiente y personas. En este sentido, se sugiere hacer énfasis en la protección de la salud del personal operativo de la remediación ambiental e incluso realizar una evaluación detallada que permita identificar si la cantidad y tipo de equipo de protección personal utilizado es el óptimo para las actividades que se realizan.

- **Emisiones gaseosas generadas por el uso de maquinaria pesada y vehículos en todas las fases de la remediación ambiental.** El uso de maquinaria pesada y vehículos contribuye a la generación de emisiones gaseosas que finalmente aportan de manera significativa a las categorías: formación de ozono fotoquímico, material particulado, cambio climático y acidificación. Una acción que se puede implementar como una mejora para gestión de la remediación es llevar un proceso de mantenimiento riguroso a los vehículos y maquinaria pesada, que permita mantenerlos en óptimas condiciones, que minimicen las emisiones gaseosas. Otro aspecto operativo importante es utilizar los vehículos con la carga máxima permitida, de esta manera se disminuyen cantidad de recorridos y la generación de emisiones. Así como, planificar una optimización de las rutas para reducir al máximo el recorrido.

- **Uso de surfactantes:** El uso de surfactantes promueve que el crudo presente en el sedimento se desprenda, favoreciendo así su recuperación. Sin embargo, esta acción también incrementa la biodisponibilidad del contaminante con efectos negativos en la categoría ecotoxicidad de agua dulce. Una manera de contrarrestar este efecto es con una selección rigurosa del tipo de surfactante que se debe utilizar en el lavado, priorizando aquellos que sean biodegradables e implementando controles de biotoxicidad a estos productos. Se sugiere

además la ejecución de estudios más profundos del nivel de toxicidad en agua con el uso de surfactantes, para de esta manera poder determinar otras estrategias de mejora en el proceso de remediación.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El proceso de remediación de fuentes de contaminación del tipo derrame ejecutadas por Proyecto Amazonía Viva se evaluó ambientalmente, mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) acorde al procedimiento de las normas ISO 14040 y 14044 y se comparó con el escenario de no actuación. Para el efecto, se utilizó como modelo de estudio el derrame SA_124_02D y el ACV aplicado sobre este ha permitido analizar las cargas ambientales en las distintas categorías de impacto propuestas, lo que ha conllevado a una mejor comprensión de las implicaciones ambientales asociadas a este sistema de remediación.

Se generó el inventario de ciclo de vida de las actividades de remediación efectuadas en el derrame SA_124_02D. Se consideraron las etapas de desbroce, construcción de facilidades, lavado de suelo, taponamiento y reconformación, y dentro de cada etapa, a través de registros directos tomados de campo y la verificación de hojas de seguridad, se cuantificaron las entradas (materiales y energía) y salidas (desechos y emisiones) asociadas a recursos naturales, uso de equipo móviles, vehículos y maquinaria pesada, equipo de protección personal y herramientas y disposición final de los desechos peligrosos generados.

Se realizó la caracterización ambiental de los escenarios de remediación ambiental y de la no actuación que significa no realizar ningún tratamiento de las matrices contaminadas, dejándolas en el sitio de origen. De las 16 categorías ambientales evaluadas, se determinó que la no actuación muestra un mayor impacto en las siguientes 12 categorías: cambio climático, agotamiento de ozono, toxicidad humana con efectos no cancerígenos, material particulado, radiación ionizante para la salud humana, radiación ionizante para los ecosistemas, formación de ozono fotoquímico, acidificación, eutrofización terrestre, eutrofización marina, toxicidad de agua dulce y agotamiento de recursos minerales, fósiles y no renovables. En cambio, el proceso de remediación ambiental, presentó un mayor aporte en las siguientes 4

categorías: toxicidad humana con efectos cancerígenos, eutrofización de agua dulce, uso de suelo y agotamiento de recursos hídricos.

En el escenario de no actuación, principalmente la presencia de matrices contaminadas (suelo, agua, sedimentos) en el ambiente aporta de manera significativa a todas las categorías ambientales evaluadas, y en menor magnitud a las categorías agotamiento del ozono y agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables. El aporte en estas cuatro últimas categorías se explicaría por las cargas ambientales asociadas a la producción del crudo derramado.

En el escenario de remediación ambiental las emisiones gaseosas generadas por el uso de maquinaria pesada, vehículos y equipo móvil aporta principalmente a las categorías de cambio climático, agotamiento del ozono, toxicidad humana con efectos no cancerígenos, material particulado, formación de ozono fotoquímico, acidificación y eutrofización. Las actividades propias de la remediación como remoción y lavado de suelo contribuyen al agotamiento de recursos hídricos, uso de suelo, toxicidad de agua dulce y eutrofización de agua dulce. Las emisiones gaseosas y descargas generadas por la incineración de residuos peligrosos contribuyen a todas las categorías y en menor grado al agotamiento del ozono, radiación ionizante, uso de suelo y agotamiento de recursos hídricos y finalmente las emisiones y descargas producto de la reincorporación del crudo a la producción nacional aporta a la toxicidad humana con efectos cancerígenos, radiación ionizante para ecosistemas, eutrofización y toxicidad de agua dulce.

Los resultados ponderados de los escenarios evaluados muestran un puntaje global de 5,45 puntos para la no actuación y 3.3 puntos para la remediación ambiental, lo que refleja que la ejecución de la remediación de pasivos ambientales disminuye el impacto ambiental global en un 39.4%. La no actuación mostró una contribución significativa a las categorías ambientales radiación ionizante para la salud humana, material particulado, acidificación y formación de ozono fotoquímico, mientras que en la remediación ambiental los aportes mayores se observaron en las categoría de toxicidad humana asociada a efectos cancerígenos, seguida de las categorías cambio climático, material particulado, formación de ozono fotoquímico, acidificación y eutrofización terrestre.

Con respecto a los grupos de afectación final, se verificó la mayor afectación en la salud humana, seguida de la afectación a los ecosistemas y la afectación a la disponibilidad de los recursos. En las tres categorías de impacto final la contribución de la remediación ambiental fue el de reducir la potencial contaminación en un 39%, 43% y 36% respectivamente, lo cual indica que estas actividades contribuyen de manera favorable a mitigar los efectos ambientales generados por la presencia de fuentes de contaminación asociadas a desechos de la actividad hidrocarburífera pasada en la Amazonía ecuatoriana.

Al estudiar las etapas de la remediación, se verifica que en la que mayor impacto ambiental se produce en el desbroce, seguida de la construcción de accesos y el lavado de suelo. Estos impactos están relacionados con las contribuciones a cada categoría explicados anteriormente. En cambio, el taponamiento y reconformación, en todas las categorías evaluadas mostró un impacto beneficioso, que se explica porque en esta fase se vuelven a dejar las condiciones del sitio remediado de manera similar a su entorno, promoviendo la restauración del área impactada, la recuperación de la biodiversidad y uso de suelo. Así mismo, en esta fase se incluye la recuperación del crudo derramado y su incorporación al sistema de producción tiene el beneficio de que no se generarían las cargas ambientales propias de la extracción del mismo.

Se identificaron las siguientes oportunidades de mejora en el proceso de remediación ambiental:

- Análisis de riesgo asociado en los trabajadores directamente involucrados con la remediación para evaluar el equipo de protección personal que utilizan.

- Programas de mantenimiento riguroso en el equipo pesado y vehículos y evaluación de las rutas de los vehículos

- Evaluación del uso de surfactantes utilizados en el lavado de suelo para seleccionar el que mejores características de biodegradabilidad presente. Así como la búsqueda de materiales de protección a base de materiales que generen una menor carga ambiental.

Recomendaciones

Se recomienda implementar el enfoque de ciclo de vida para la ejecución de las actividades del Proyecto Amazonía Viva, ya que permitirá visualizar de manera global todas las cargas ambientales involucradas en sus procesos; como por ejemplo para la evaluación de varias tecnologías de remediación del tipo compostaje, la biorremediación mediante biopilas, la solidificación de residuos peligrosos y otras tecnologías físico-químicas.

El enfoque de ciclo de vida y la aplicación del análisis de ciclo de vida en diversos ámbitos (por ejemplo, a nivel social) permite además generar información relevante del desempeño del proyecto y la implementación de indicadores ambientales de interés social como el cálculo de la huella hídrica y huella del carbono, que permiten implementar mejoras a las actividades del proyecto en favor del ambiente y las comunidades.

Referencias bibliográficas

ISO 14001:2017. Sistemas de gestión ambiental - Requisitos con orientación para su uso, International Standards Organization 35 (2017).

ISO 14040:2006. Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia., (2006).

Actividades Económicas. (2018). *Actividades económicas de Ecuador | Actividades Economicas*. https://www.actividadeseconomicas.org/2017/12/actividades-economicas-de-ecuador.html

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2018). *Toxicological Profile of Total Petroleum Hydrocarbons*. https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp123-c6.pdf

Ali, M. M. M., Zhao, H., Li, Z., & Maglas, N. N. M. (2019). Concentrations of TENORMs in the petroleum industry and their environmental and health effects. *RSC Advances*, *9*(67), 39201–39229. https://doi.org/10.1039/c9ra06086c

Altuwair, A. (2017). Environmental Performance Evaluation of Polycarbonates Production Processes. *Industrial Engineering & Management*, *06*(03). https://doi.org/10.4172/2169-0316.1000214

Banco Central del Ecuador. (2019). *Reporte Del Sector Petrolero, IV trimestre año 2019.*

Bandara, U. C., Yapa, P. D., & Xie, H. (2011). Fate and transport of oil in sediment laden marine waters. *Journal of Hydro-Environment Research*, *5*(3), 145–156. https://doi.org/10.1016/j.jher.2011.03.002

Cardona, C. A. (2012). Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: Una aproximación cualitativa. *Revista Universidad EAFIT*, *43*(146), 59–79.

Cheng, M., Zeng, G., Huang, D., Yang, C., Lai, C., Zhang, C., & Liu, Y. (2018). Tween 80 surfactant-enhanced bioremediation: toward a solution to the soil contamination by hydrophobic organic compounds. *Critical Reviews in Biotechnology*, *38*(1), 17–30. https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1311296

Costner, P., & Johnston, P. (2001). *Greenpeace Research Incineration and Human*

Health. *8*(2), 141–145.

Dunuwila, P., Rodrigo, V. H. L., & Goto, N. (2018). Sustainability of natural rubber processing can be improved: A case study with crepe rubber manufacturing in Sri Lanka. *Resources, Conservation and Recycling*, *133*(May 2017), 417–427. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.029

EPA. (2010). La disminución de la capa de ozono. *Hágase Sunwise*, 1–3. www.epa.gov/sunwise%0ALa

European Commission. (2012). Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods: database and supporting information. In *European Commission*. https://doi.org/10.2788/60825

EUROPUR. (2015). *Flexible Polyurethane (PU) Foam. Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers.* (Issue August).

Frischknecht, R., Braunschweig, A., Hofstetter, P., & Suter, P. (2000). Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, *20*(2), 159–189. https://doi.org/10.1016/S0195-9255(99)00042-6

Garnier-Laplace, J., Beaugelin-Seiller, K., Gilbin, R., Della-Vedova, C., Jolliet, O., & Payet, J. (2009). A Screening Level Ecological Risk Assessment and ranking method for liquid radioactive and chemical mixtures released by nuclear facilities under normal operating conditions. *Radioprotection*, *44*(5), 903–908. https://doi.org/10.1051/radiopro/20095161

Greco, S. L., Wilson, A. M., Spengler, J. D., & Levy, J. I. (2007). Spatial patterns of mobile source particulate matter emissions-to-exposure relationships across the United States. *Atmospheric Environment*, *41*(5), 1011–1025. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.09.025

Hernández, M., Encalada, M., & Molina, S. (2010). Plan Nacional de Calidad del Aire. *Ministerio Del Medio Ambiente*, *1*(Reintegración Comunitaria), 5–90.

Hong, J., Han, X., Chen, Y., Wang, M., Ye, L., Qi, C., & Li, X. (2017). Life cycle environmental assessment of industrial hazardous waste incineration and landfilling in China. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *22*(7), 1054–1064.

https://doi.org/10.1007/s11367-016-1228-0

Jang, J. J., & Song, H. H. (2015). Well-to-wheel analysis on greenhouse gas emission and energy use with petroleum-based fuels in Korea: gasoline and diesel. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *20*(8), 1102–1116. https://doi.org/10.1007/s11367-015-0911-x

Johnson, E. (2017). Cars and ground-level ozone: how do fuels compare? *European Transport Research Review*, *9*(4). https://doi.org/10.1007/s12544-017-0263-7

Knox, E. G. (2005). Childhood cancers and atmospheric carcinogens. *Journal of Epidemiology and Community Health*, *59*(2), 101–105. https://doi.org/10.1136/jech.2004.021675

Koellner, T., Baan, L., Beck, T., Brandão, M., Civit, B., Margni, M., Canals, L. M., Saad, R., Souza, D. M., & Müller-Wenk, R. (2013). UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *18*(6), 1188–1202. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0579-z

Kuppusamy, Saranya; Maddela, Naga Raju; Megharaj, Mallavarapu; Venkateswarlu, K. (2005). Total Petroleum Hydrocarbons. Environmental Fate, Toxicity, and Remediation. In *Environmental Analysis and Technology for the Refining Industry*. Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1002/0471739855.ch8

Leiva, E. H. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida*. 43. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2207.3689

Lemming, G., Hauschild, M. Z., & Bjerg, P. L. (2010). Life cycle assessment of soil and groundwater remediation technologies: Literature review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *15*(1), 115–127. https://doi.org/10.1007/s11367-009-0129-x

Liu, Y., Lu, S., Yan, X., Gao, S., Cui, X., & Cui, Z. (2020). Life cycle assessment of petroleum refining process: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, *256*, 120422. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120422

Lobo, P. (2013). *Evaluación de la sostenibilidad de las diferentes técnicas de recuperación de suelos contaminados*. 84.

Michalik, B., Wysocka, M., & Liland, A. (2011). Survey of the impact of enhanced natural

radioactivity on human and natural environments: The example based on PORANO project. *Radioprotection*, *46*(6 SUPPL.). https://doi.org/10.1051/radiopro/20116737s

Milà I Canals, L., Bauer, C., Depestele, J., Dubreuil, A., Knuchel, R. F., Gaillard, G., Michelsen, O., Müller-Wenk, R., & Rydgren, B. (2007). Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *12*(1), 2–4. https://doi.org/10.1065/lca2006.12.296

Ministerio del Ambiente. (2020). *Subsistema Multidimensional de Estadísticas Socioambientales de las Actividades Productivas*. http://pras.ambiente.gob.ec/web/siesap/informacion-eh

Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2015). *Informe del Plan de Reparación Integral de la microcuenca del río Pacayacu*. http://pras.ambiente.gob.ec/documents/228536/737569/Plan+de+Reparación+de+Pacayacu+-+Final-1+_1_.pdf/2edd1e88-566c-413b-a422-b7ac3bfe46d3

Montalbo T. (2014). *LCA Background Report for Steel Specialty Products Life cycle assessment background report in support of an Environmental Product Declaration (EPD) for steel specialty products. I On behalf of PE INTERNATIONAL AG and its subsidiaries*. http://www.gordon-inc.com/literature/pdf/cisca epd background report (fe) 2014-11-25.pdf

Morales, M., Gonzalez-García, S., Aroca, G., & Moreira, M. T. (2015). Life cycle assessment of gasoline production and use in Chile. *Science of the Total Environment*, *505*(x), 833–843. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.067

MyEcoCost. (2011). Impact Analysis ILCD 2011. In *myEcoCost*. http://adm-global.org/productionsupporttools/Impact_Analysis_ILCD2011.html

New, F., Alliance, F., & Alliance, N. F. (2009). Assessment of Direct and Indirect GHG Emissions Associated with Petroleum Fuels. *Cycle*, *August 2008*.

Nguyen, D. (2011). *Optimization of Hazardous Waste Remediation Activities Using Life Cycle Assessment*. http://dukespace.lib.duke.edu/dspace/handle/10161/3629

Page, C. A., Diamond, M. L., Campbell, M., & McKenna, S. (1999). Life-cycle framework for assessment of site remediation options: Case study. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *18*(4), 801–810. https://doi.org/10.1002/etc.5620180428

Patel, M., Bastioli, C., Marini, L., & Würdinger, E. (2002). Life-cycle Assessment of Bio-based Polymers and Natural Fiber Composites. *Biopolymers Online*. https://doi.org/10.1002/3527600035.bpola014

Paz y Miño, C., Castro, B., López Cortés, A., Muñoz, M. J., Cabrera, A., Herrera, C., Maldonado, A., Valladares, C., & Sánchez, M. E. (2010). Impacto genético en comunidades Amazónicas del Ecuador localizadas en zonas petroleras. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, *31*(1–2). https://doi.org/10.26807/remcb.v31i1-2.39

Potting, J., & Blok, K. (1995). Life-cycle assessment of four types of floor covering. *Journal of Cleaner Production*, *3*(4), 201–213. https://doi.org/10.1016/0959-6526(95)00082-8

Pré. (2014). *Update of the ILCD 2011 Midpoint method version 1.04 in SimaPro*. *September*, 1–6.

PRé. (2019). *SimaPro Database Manual Methods Library Title: SimaPro Database Manual Methods Library Written by: PRé, various authors*. 75. http://creativecommons.org/licenses/

Prinn R., Z. R. (2013). Part 1. Halocarbon, Ozone, and Temperature Changes. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Recalde, C. (2017). *DISEÑO METODOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN EX SITU: COMPOSTAJE EN BIOPILAS, BIOAUMENTACIÓN Y BIOESTIMULACIÓN, APLICADAS PARA LA DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS EN LOS PROCESOS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS QUE EJECUTA LA GERENCIA*. Universidad Central del Ecuador.

Robinson, A. L., Donahue, N. M., Shrivastava, M. K., Weitkamp, E. A., Sage, A. M., Grieshop, A. P., Lane, T. E., Pierce, J. R., & Pandis, S. N. (2007). Rethinking organic aerosols: Semivolatile emissions and photochemical aging. *Science*, *315*(5816), 1259–1262. https://doi.org/10.1126/science.1133061

San Sebastián, Miguel;Tanguila, Aníbal; Santi, S. (2004). *Informe Yana Curi. Impacto de la actividad petrolera en la salud de poblaciones rurales de la Amazonía*

ecuatoriana.

Sim, J., & Prabhu, V. (2018). The life cycle assessment of energy and carbon emissions on wool and nylon carpets in the United States. *Journal of Cleaner Production*, *170*, 1231–1243. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.203

Singh, A., Kuhad, R. C., & Ward, O. P. (2009). Advances in Applied Bioremediation. *Soil Biology, Vol. 17*, *17*, 361. https://doi.org/10.1007/978-3-540-89621-0

Sleeswijk, A. W., van Oers, L. F. C. M., Guinée, J. B., Struijs, J., & Huijbregts, M. A. J. (2008). Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *Science of the Total Environment*, *390*(1), 227–240. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.09.040

Soratana, K., Rasutis, D., Azarabadi, H., Eranki, P. L., & Landis, A. E. (2017). Guayule as an alternative source of natural rubber: A comparative life cycle assessment with Hevea and synthetic rubber. *Journal of Cleaner Production*, *159*, 271–280. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.070

Suárez, O., & Gonzalez, Y. (2010). Tenorm en el Ecuador: inventario preliminar y el papel de la autoridad reguladora. *VIII Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear, I Congreso Latinoamericano Del IRPA y V Congreso Nacional de Protección Radiológica DSSA*, *October 2010*, 0–6. https://www.researchgate.net/publication/261651276_TENORM_EN_EL_ECUADOR_INVENTARIO_PRELIMINAR_Y_EL_PAPEL_DE_LA_AUTORIDAD_REGULADORA

TENORM_ Oil and Gas Production Wastes _ Radiation Protection _ US EPA. (n.d.).

Toffoletto, L., Deschênes, L., & Samson, R. (2005). LCA of ex-situ bioremediation of diesel-contaminated soil. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *10*(6), 406–416. https://doi.org/10.1065/lca2004.09.180.12

Turconi, R., Butera, S., Boldrin, A., Grosso, M., Rigamonti, L., & Astrup, T. (2011). Life cycle assessment of waste incineration in Denmark and Italy using two LCA models. *Waste Management and Research*, *29*(10 SUPPL.), 78–90. https://doi.org/10.1177/0734242X11417489

USEPA. (2009). *Principles for Greener Cleanups*.

http://www.epa.gov/oswer/greenercleanups/pdfs/oswer_greencleanup_principles.pdf

Wendin, M. (2016). *LCA of Recycling Cotton* (Issue August 2016). https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22598.57927

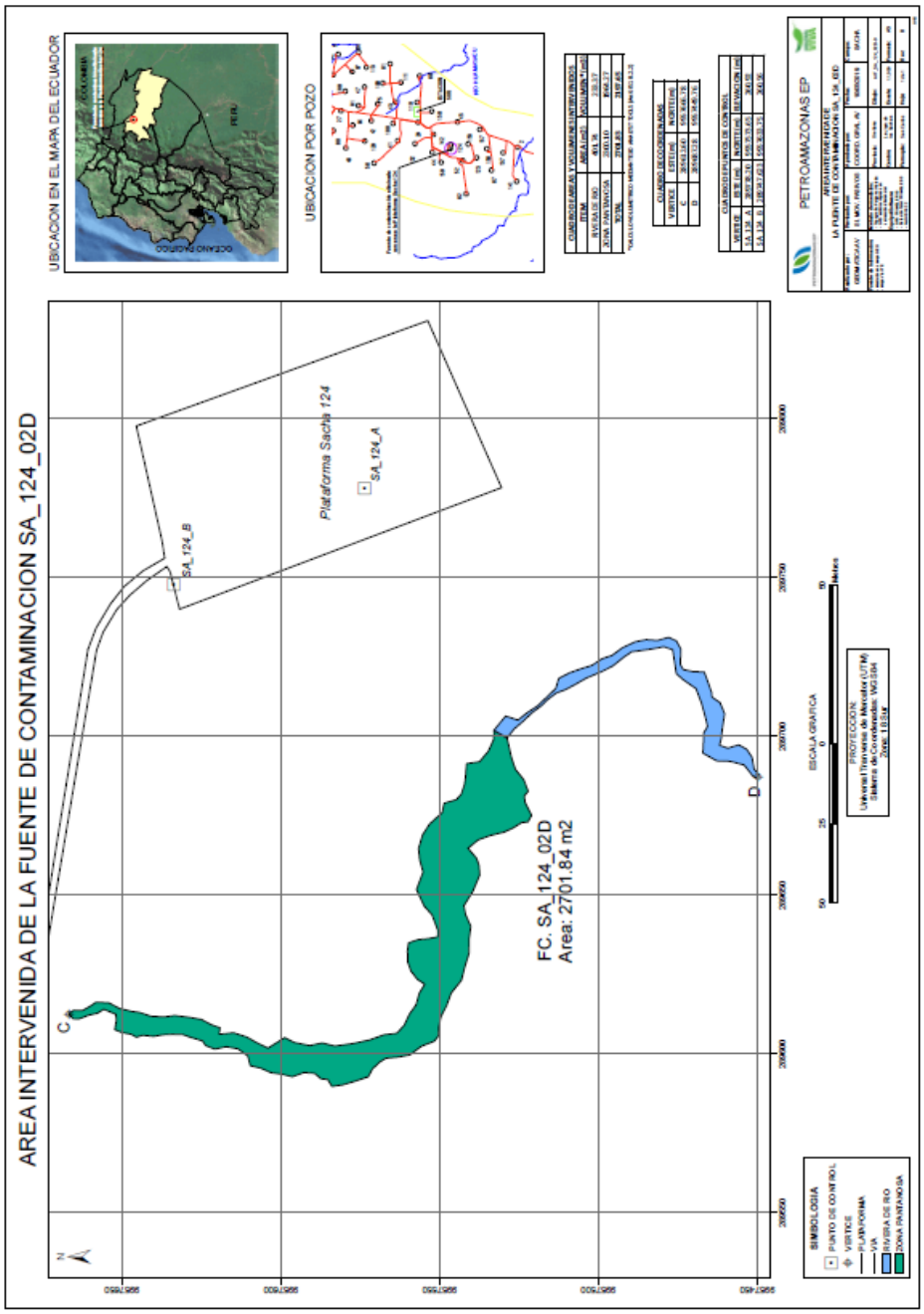
Werner, M. D., Adams, V. D., & Lamarra, V. A. (1983). *An Experimental Investigation of the Effects of Crude Oil on Two Freshwater Lake Ecosystems OF THE EFFECTS OF CRUDE OIL*. *January*.

Xu, X., Hu, H., Kearney, G. D., Kan, H., & Sheps, D. S. (2013). Studying the effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on peripheral arterial disease in the United States. *Science of the Total Environment*, *461–462*, 341–347. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.089

Yang, R., Ozer, H., & Al-Qadi, I. L. (2016). Regional upstream life-cycle impacts of petroleum products in the United States. *Journal of Cleaner Production*, *139*, 1138–1149. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.164

Anexos

Anexo 1. Plano catastral del derrame SA_124_02D2



Anexo 2. Compendio de los compuestos asociados a hidrocarburos en los cuales se ha evaluado su toxicidad en vertebrados, según el tipo de exposición, frecuencia y dosis

Disponible en:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjynt6v4ojyAhXfRTABHSwqAgcQFjABegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.atsdr.cdc.gov%2FToxProfiles%2Ftp123-a.pdf&usg=AOvVaw3ckDM1SO1bR0OWJ6vsnOjU