

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Revisión y análisis de los tratamientos biológicos y físico en la
recuperación de suelos contaminados por petróleo crudo**

Por:

Jhoselin Milagritos Tarazona Ocampo

Anggy Stefany Soto Delgado

Asesor:

Mg. Ricardo Victor Felipe Arias Salcedo

Tarapoto, agosto de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORIA DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Yo, *Ricardo Víctor Felipe Arias Salcedo* de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LOS TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS Y FÍSICO EN LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR PETRÓLEO CRUDO" constituye la memoria que presenta(n) el(la)(los) Bachiller(es) Tarazona Ocampo, Jhoselin Milagritos y Soto Delgado, Anggy Stefany; para aspirar al Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental cuyo trabajo de investigación ha sido realizado en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en Morales, a los 17 días del mes de agosto del año 2020.



Asesor

Mg. Ricardo Víctor Felipe Arias Salcedo

Revisión y análisis de los tratamientos biológicos y físico en la
recuperación de suelos contaminados por petróleo crudo

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Presentado para optar el Grado de Bachiller en Ingeniería Ambiental

JURADO CALIFICADOR

Mtra. Betsabeth Teresa Padilla
Macedo
Presidente

Ing. Jhon Patrick Rios Bartra
Secretario

Ing. Katterin Jina Luz Pinedo Gómez
Vocal

Mg. Ricardo Victor Felipe Arias Salcedo
Asesor

Tarapoto, agosto de 2020

Resumen

Las tecnologías para la recuperación de suelos contaminados con petróleo crudo pueden clasificarse de diferentes maneras, como físicos, químicos y biológicos los cuales se diferencian por la capacidad de remoción; el presente estudio tiene el objetivo de identificar el mejor tratamiento para recuperar suelos degradados por emisiones con petróleo crudo, para ello se seleccionó diez tratamientos en los cuales fueron identificados y seleccionados de acuerdo al análisis de la metada conformada por la revisión de los indicadores de las variables, obteniendo cuatro tratamientos: Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados, Evaluación de la eficacia de *Trichoderma* sp y *Pseudomonas* sp para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo y el Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural, como también se realizó el análisis comparativo entre los tratamientos seleccionados para ser calificados por las cualidades con respecto al impacto ambiental generado y al riesgo en función del insumo utilizado, obteniendo el mejor tratamiento llamado: Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados con una puntuación final de 14, por lo tanto se acepta la hipótesis nula que por lo menos un tratamiento es mejor en la recuperación de suelos degradados por emisiones de petróleo crudo.

Palabras claves: Eficiencia; petróleo crudo; recuperación; suelos contaminados; tratamientos.

Abstract

Technologies for the recovery of soils contaminated with crude oil can be classified in different ways, such as physical, chemical and biological, which are differentiated by removal capacity; this study aims to identify the best treatment to recover soils degraded by crude oil emissions, for this ten treatments were selected in which they were identified and selected according to the analysis of the metadata formed by the review of the indicators of the variables, obtaining four treatments: Bacterial colonies present in the manure of white hens of the strain of leghorn responsible for the biodegradation of oil in contaminated soils, Evaluation of the efficacy of *Trichoderma* sp and *Pseudomonas* sp for bioremediation of soils contaminated with hydrocarbons, Hydroalcoholic extract of orange peels (*Citrus sinensis*) as a biostimulator in an oil-contaminated savannah soil and the ex situ treatment of hydrocarbon-contaminated soil through the natural volatilization method, as was also performed comparative analysis between the treatments selected to be qualified by the qualities with respect to the environmental impact generated and the risk depending on the input used, obtaining the best treatment called: Bacterial colonies present in the manure of white hens of the leghorn strain responsible for the biodegradation of oil in contaminated soils with a final score of 14, therefore the null hypothesis is accepted that at least one treatment is better in the recovery of soils degraded by crude oil emissions.

Keywords: Efficiency; crude oil; recovery; contaminated soils; treatments.

1. Introducción

mundo, la desigualdad en la localización geográfica de grandes reservas de petróleo en el planeta y la magnitud de las inversiones que se requieren para producirlo, en los últimos años la extracción de este recurso está considerado como un problema ambiental ya que se ha visto incrementada en todas las principales categorías: sectores de biomasa, combustibles fósiles, minerales (Paneque, Gallo y Nuñez, 2016) (Friends of the Earth Europe [FoEE], 2016). Por otro lado, los macroprocesos de la industria petrolera también representan un gran problema ya que se encargan de despachar diariamente grandes volúmenes de crudo a los puertos de embarque o directamente a las refinerías; en las cuales lo almacenan el crudo y otros hidrocarburos requeridos para el funcionamiento continuo de las plantas por un cierto número de días, después de ser usados los residuos son estos expulsados al medio ambiente mayormente sin ningún tratamiento (Ávila, 2016).

Según Grados y Pacheco (2016) el Perú cuenta con diversos yacimientos de petróleo, destacando la zona noroccidental, el zócalo continental y la selva peruana (norte). Esta última zona es la más importante porque se extrae el mayor volumen total en el país. El traslado del hidrocarburo de la selva a la costa se realiza por el oleoducto norperuano y se encuentra a cargo de la empresa estatal Petroperú. La gestión y administración del traslado del oleoducto se ha visto cuestionada por los diversos derrames de petróleo que han afectado al medio ambiente, sobre todo a los ríos, contaminándolos y generando pérdidas irremediables de fauna y flora aledaña a los ríos. En el año 2016 se produjeron derrames, alcanzando hasta trece fugas de petróleo, se vertió en promedio 6.000 barriles con petróleo en las localidades de Loreto y Amazonas (Comercio, 2016).

En el año 2017 se registraron 2 derrames de petróleo; ocurrió el 19 de abril según lo informó SERVINDI, donde el OEFA afirmó que se produjo el derrame de 3 500 galones de petróleo producto del desviste de una cisterna en el kilómetro 44 de la carretera Yurimaguas (Tarapoto). En la cual afectó a la quebrada Sabaloyacu y el río Caynarachi, afectando a los

peces y aves de la zona indicada (Servicios en Comunicación Interactiva [SERVINDI], 2017).

Es necesario tomar en cuenta que la mayoría de los pobladores de la zona afectada carecen de los servicios básicos y no cuentan con agua potable, por lo que hacen uso de las aguas de los ríos aledaños para su consumo, así como de los peces que habitan en ellos. Por lo que al ser contaminados con petróleo derramado impacta directamente en la vida de los pobladores, limitando el consumo de agua y de alimentos, ya que el crudo derramado afecta los suelos, sus cosechas y especies comestibles y nativas alrededor de la zona de impacto (Mujica, López y Zavala, 2019).

Las tecnologías para la recuperación de suelos contaminados con petróleo crudo pueden clasificarse de diferentes maneras, como físicos, químicos y biológicos los cuales se diferencian por la capacidad de remoción; el presente estudio tiene el objetivo de identificar el mejor tratamiento para recuperar suelos degradados por emisiones con petróleo crudo.

2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción de los tratamientos

En la investigación titulada "Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos por derrames de la estación de servicio en el campamento de Guarumales-CELEC" se evaluó el efecto de la materia orgánica (Compost) y Biosurfactante (Ácido Húmico) para la biorremediación de sedimentos contaminados con hidrocarburos, estos sedimentos son producto del progresivo deterioro en las instalaciones de los tanques subterráneos de la estación de servicio, los cuales causaron percolaciones de gasolina hacia la superficie del lugar. Para el desarrollo del proceso de biorremediación mediante la técnica de compost, se propuso 4 tratamientos (T1, T3, T5, T7) con su respectiva repetición T2 (Repetición T1), T4 (Repetición T3), T6 (Repetición T5) y T8 (Repetición T7). La investigación empezó con un valor promedio de 21958 mg/kg de HTP y presentó una concentración promedio final de 2423.5 mg/kg de HTP, reduciéndose 19534.5 mg/kg HTP con el T1 (Materia Orgánica 6 lb + Surfactante 4 lb), siendo el tratamiento más eficiente con 88.96 % durante la investigación (Flores y Mendoza, 2017).

En la investigación titulada "Evaluación de la eficacia de *Trichoderma* sp y *Pseudomonas* sp para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos" se realizó en dos fases: la primera fase se dio en campo, consistió en el muestreo de suelo y la segunda fase se dio en el laboratorio, consistió en la instalación del ensayo con un sistema DBCA de 4 tratamientos, (T0: Suelo testigo, T1: Suelo + *Trichoderma* sp, T2: Suelo + *Pseudomonas fluorescens* y T3: Suelo con *Trichoderma* sp + *Pseudomonas fluorescens*) y 4 repeticiones con condiciones ambientales controladas como: pH, temperatura, conductividad eléctrica y humedad; se realizaron los análisis físico químicos y TPH al inicio y al final del ensayo durante 3 meses. La contaminación con TPH inicial en el suelo fue 42070.3 mg/kg, al final del ensayo los tratamientos T1, T2 y T3 obtuvieron una remediación eficaz; demostrando que los tratamientos funcionan de forma independiente y en consorcio,

siendo el T3 (consorcio) el cual degradó más cantidad de hidrocarburo llegando a 379.2 mg/kg teniendo un porcentaje de remoción de un 90.13 %, debido a que ambos microorganismos gozan de los mecanismos necesarios para degradar las moléculas de hidrocarburos, demostrándose que la biorremediación es un proceso ecológico y efectivo para la degradación de hidrocarburos (Muñoz, 2016).

En la investigación titulada "Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrus maximus*" se evaluó la capacidad del pasto *Megathyrus maximus* para fitorremediar un suelo contaminado con petróleo extra pesado, durante 120 días en el contenido de hidrocarburos totales de petróleo y de indicadores de la actividad microbológica en el suelo, los cuales fueron evaluados en dos tratamientos, uno en suelos contaminados en donde se trasplantó *Megathyrus maximus* y otro en suelos contaminados sin la planta. Los resultados mostraron que en 120 días el contenido de hidrocarburos se redujo en un 17.1 %, en el tratamiento con *M. maximus* y en 9.8 % en el tratamiento sin plantas (Hernández, Navas y Infante, 2017).

En la investigación titulada "Efecto de la materia orgánica en la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en establecimientos de servicios" se realizó bajo un diseño aleatorio con cinco tratamientos: Testigo absoluto (T1), testigo abiótico (T2), cachaza de *Saccharum officinarum* "caña de azúcar" (T3), compost (T4) y cascarilla de *Oryza sativa* "arroz" (T5). El suelo contaminado con aceite residual automotriz se mezcló en volúmenes iguales (1/1, v/v) de cachaza de caña de azúcar, compost o cascarilla de arroz y se mantuvo en microcosmos, con remoción manual dos veces a la semana y riego con agua declarada; la cachaza de caña de azúcar y compost aceleraron la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo alcanzándose un nivel bajo de toxicidad a los 60 días con la cachaza y 90 días con el compost; con la cachaza la eficiencia de biorremediación fue de 70.48 % a los 90 días (Bustamante y Silva, 2019).

En la investigación titulada "Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo" el objetivo fue evaluar la aplicabilidad del extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja dulce (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en el tratamiento de un suelo de sabana contaminado con petróleo crudo liviano. Se aplicó un diseño experimental factorial sobre muestras de suelo contaminado con 100 mL por kilogramo de petróleo liviano. Se obtuvo que los tres factores tuvieron efecto estadísticamente significativo sobre la variable dependiente con un nivel de confianza de 95.0 % con un porcentaje máximo de remoción de petróleo de 90.9 % para una dosis de 150 mL/kg de extracto al 5 % de concentración (Velásquez, 2017).

En la investigación titulada "Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método de volatilización natural" se evaluó el efecto de la técnica de volatilización natural, para la investigación se utilizaron nueve pilas, compuesto por geomembrana de polietileno de alta densidad (3 m²), estos estaban conformados por cada punto de muestreo tres pilas de tratamiento, desarrollados en lugares in situ; las pilas de suelos contaminados presentaron tasas de degradación en el rango de 102.02 mg HTP/kg de suelo seco – 115.69 mg HTP/kg de suelo seco, con porcentaje de reducción de contenido de hidrocarburo entre 98.97 % y 99.75 %. Por otro lado durante el desarrollo del presente proyecto se presentaron impactos ambientales del nivel ligero, producto de la evaporación de compuestos volátiles típico de suelos contaminados por hidrocarburos de la Estación de Servicios de Combustibles (Sachun, 2015).

En la investigación titulada "Recuperación del suelo contaminado con petróleo utilizando Micro-nanoburbujas de aire-ozono a nivel de laboratorio" donde se contaminó 10 kilogramos de suelo franco limoso. Se pesó en 4 envases 2000 gramos de suelo en cada uno y luego se contaminó con el petróleo con volúmenes diferentes 133 ml, 267 ml, 400 ml y 534 ml. Pasado las 48 horas se realizó el tratamiento con micro-nanoburbujas. Se separó el agua utilizada en t=0, t=2, t=4 y t=8. Para observar una capa fina de petróleo

seguidamente se llevó al laboratorio para medir los siguientes parámetros: pH, CE, mv y T; juntamente con ello 4 muestras de suelo tratado para analizar los hidrocarburos totales, el mejor resultado fue la muestra número 3 con el 49 % de concentración de petróleo en la recuperación del suelo, considerando significativo para el trabajo de investigación (García, 2017).

En la investigación titulada "Efecto del humus de lombriz en la remediación de suelos contaminado con crudo de petróleo. Ucayali, Perú" en la cual la metodología usada de este proyecto contó con un nivel de investigación experimental y un diseño completamente al azar, compuesto por cuatro tratamientos y tres repeticiones por tratamiento, la investigación consistió en la instalación de un total de 12 celdas experimentales para el tratamiento de suelos contaminado con hidrocarburo, la dosis que mostro mayor índice de disminución de TPH presente en el suelo, fue la de 20 kg de humus de lombriz por 200 kg de suelo contaminado con 1 galón de crudo de petróleo, disminuyendo un 86.74 % de mg de TPH presente en el suelo, comparado al T1 sin aplicación de humus que disminuyó un 69.59 %, T2 que disminuyó un 84.33 % aplicando 10 kg de humus y T4 que disminuyó un 75.52 % aplicando 30 kg de humus (Rodríguez, 2018).

En la investigación titulada "Efecto del compost de cáscara de Citrus limon sobre la degradación de hidrocarburos totales de petróleo en suelos contaminados provenientes de Refinería Talara" se realizó mediante el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos como materia prima para la elaboración de compost. El diseño que se aplicó en la investigación fue un diseño experimental unifactorial, la muestra fue de 09 kg de suelo contaminado con hidrocarburo proveniente de Refinería Talara, el método de procesamiento y análisis de datos para probar las hipótesis fue el análisis de varianza ANOVA. En conclusión, el compost de cáscara de Citrus limon, tiene un efecto positivo en la degradación de hidrocarburos totales de petróleo presentes en dichos suelos, reportando un

promedio de 45.26 % de reducción de concentraciones de TPH aplicando 200g. de compost en un período de 50 días (Tamayo, 2016).

En la investigación titulada "Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa Leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados" se realizaron tres tipos de análisis, el primero el análisis de varianza para un diseño en bloques completamente al azar (DBCA), de modelo factorial 2A 3B con seis repeticiones (6 maceteros) dando un total de 36 maceteros experimentales (1 kg c/u), el segundo un análisis de varianza (ANOVA) con post Hoc Tukey, y por último análisis de regresión lineal simple para determinar la degradación de hidrocarburos por factores ambientales. Los maceteros fueron expuestos a la intemperie durante 180 días. Los resultados mostraron que el tratamiento B3 (colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn más aserrín de roble más semilla de *Triticum aestivum*) en el suelo contaminado por hidrocarburos C6-C10 en promedio disminuyó 97.4 %, el contenido de hidrocarburos C10-C35 en el suelo disminuyó solo 92.95 % y el contenido de hidrocarburos C10-C28 en el suelo disminuyó 30 %; demostrando que el tratamiento B3 es responsable de la degradación del hidrocarburo de petróleo presentando un alto porcentaje de remoción (91.1 %) de hidrocarburos totales en comparación a los tratamientos B1 y B2 (Muñoz y Pacheco, 2017).

2.2. Variables de la investigación

2.2.1. Variables independientes

- **Suelos degradados**

En los suelos degradados se evalúan a partir del indicador extensión de suelos con la siguiente valoración: gran extensión (10000 m²), mediana extensión (entre 1000 y 5000 m²), pequeña extensión (<1000 m²), micro extensión (10 m²), la técnica utilizada fue mediante el análisis de la metadata.

- **Emisiones de petróleo**

En las emisiones de petróleo se evalúan a partir del indicador nivel de emisión con la siguiente valoración: muy grandes emisiones (>1000 barriles de petróleo), grandes emisiones (1000 hasta 100 barriles de petróleo), moderadas emisiones (100 hasta 5 barriles de petróleo), pequeñas emisiones (<5 barriles de petróleo), la técnica utilizada fue mediante el análisis de la metadata.

- **Recuperación de suelos**

En la recuperación de suelos se evalúan a partir del indicador nivel de recuperación con la siguiente valoración: suelo que se ha recuperado totalmente (100 %), suelo que se ha recuperado hasta el 90 % que aceptan una gran cantidad de actividades biológicas, suelo que se ha recuperado hasta el 75 % que aceptan algunas actividades biológicas, suelo que se ha recuperado hasta el 50 % que aceptan muy pocas actividades biológicas, suelo que se ha recuperado hasta el 20 % que no aceptan actividades biológicas está totalmente degradado. la técnica utilizada fue mediante el análisis de la metadata.

2.2.2. Variable dependiente

- **Tratamiento de recuperación de suelos**

En el tratamiento de recuperación de suelos se evalúan a partir del indicador capacidad de remoción con la siguiente valoración: suelo totalmente recuperado (100 %), suelo recuperado (<90 %), suelo moderadamente recuperado (<75 %), suelo deficientemente recuperado (<50 %), muy deficiente (<20 %), la técnica utilizada fue mediante el análisis de la metadata.

2.3. Análisis de la metadata para las variables

En el análisis de la metadata se muestra la información de las variables e información necesaria:

2.3.1. Tratamientos de recuperación de suelos

2.3.1.1. Clasificación de tecnologías de remediación

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios: estrategia de remediación; lugar en que se realiza el proceso de remediación, y tipo de tratamiento (Volke y Velasco, 2004).

A continuación, se describen con más detalle las clasificaciones de las tecnologías de remediación anteriores según (Volke y Velasco, 2004):

Las estrategias que pueden usarse para remediar los lugares contaminados son:

- Destrucción o modificación de los contaminantes que se basa en la alteración de la estructura química del contaminante.
- Extracción o separación en el cual se extrae o separa el contaminante, aprovechando sus propiedades físicas o químicas.
- Aislamiento o inmovilización del contaminante en los cuales los contaminantes con el uso de métodos físicos o químicos son estabilizados, solidificados o contenidos.

El lugar del proceso de remediación se distingue dos tipos:

- In situ, es decir que se realiza en el mismo lugar en donde se encuentra la contaminación.
- Ex situ, es decir que se puede realizar en el mismo sitio o fuera de él.

En el tipo de tratamiento de acuerdo al principio de la tecnología se divide en tres tipos:

- Tratamientos biológicos o biorremediación en los que se utiliza ciertos organismos para degradar, transformar o remover los contaminantes.
- Tratamientos fisicoquímicos en los cuales se utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.
- Tratamientos térmicos en los que se utiliza el calor para aumentar la volatilización, quemar, descomponer o fundir los contaminantes en el suelo.
- Tecnologías tradicionales en donde se utilizan a gran escala, la información de los costos y eficiencia es accesible. Las tecnologías utilizadas son la incineración in situ y ex situ, la solidificación/estabilización, la extracción de vapores y la desorción térmica.

2.3.1.2. Profundidad de tratamientos

Cuando la contaminación del suelo es más profunda, se emplean sistemas de inyección a través de pozos (Bouwer, Rijnaarts y Gerlach, 2000).

La vitrificación es una técnica especialmente indicada para tratar suelos contaminados poco profundos (Khan, Husain y Hejazi, 2004).

2.3.2. Suelos degradados

la degradación del suelo se puede definir como todo proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir, cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios (Bernad et al., 2017).

La extensión de la pluma de contaminación de un hidrocarburo es mayor cuando el nivel estático se encuentra cerca de la superficie, esto es que la capa de la zona vadosa es delgada; el volumen de adsorción disminuye y la retención decrece (Aceves et al., 2002).

2.3.3. Emisiones de petróleo

Las emisiones de hidrocarburos ocurren como resultado de la carga y la descarga de camiones/tanque de carga y descarga, vagones tanque y, en algunas refinerías, de buques y barcazas (Guía Ambiental para el Manejo de Emisiones Gaseosas de Refinerías de Petróleo, 2000).

La diferencia en los niveles de emisiones entre convencionales y no convencionales radica esencialmente en la etapa de extracción y procesamiento del hidrocarburo, también existen diferencias notorias en función de las tecnologías utilizadas para la extracción, las particularidades de la geografía y terreno donde se desenvuelven, las distancias desde las fuentes de suministro de los insumos (agua, arena, materiales, etc.) entre otros.(Centro Latinoamericano de Ecología Social [CLAES], 2014).

2.3.4. Recuperación de suelos

Se dispone de un amplio abanico de tecnologías de recuperación de suelos contaminados, algunas de aplicación habitual y otras todavía en fase experimental, diseñadas para aislar o destruir las sustancias contaminantes alterando su estructura química mediante procesos generalmente químicos, térmicos o biológicos; su aplicación depende de las características del suelo y del contaminante, de la eficacia esperada con cada tratamiento, de su viabilidad económica y del tiempo estimado para su desarrollo (Richardson et al., 1999).

2.3.5. Identificación y valoración de impactos

Procedimiento técnico que permite interpretar cualitativa o cuantitativamente a través de variables, como escalas de valor fijas que definen los atributos mismos del impacto ambiental así como el cumplimiento normativo en relación con el aspecto ambiental (Plan Institucional de Gestión Ambienta [PIGA], 2013).

3. Resultados y Discusión

3.1. Resultados 1

En los siguientes cuadros se presentan las claves para los valores de calificación de indicadores, en el (**Cuadro 1**) se muestra la capacidad de remoción de petróleo, en el (**Cuadro 2**) se muestra la extensión de suelos, en el (**Cuadro 3**) se muestra el nivel de emisión, en el (**Cuadro 4**) se muestra el nivel de recuperación.

Tabla 1

Claves para los valores de calificación de indicadores

CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE PETRÓLEO		
INDICADOR	VALOR	CLAVE DE VALORACIÓN
Suelo totalmente recuperado	100 %	5
Suelo recuperado	<90 %	4
Suelo moderadamente recuperado	<75 %	3
Suelo deficientemente recuperado	<50 %	2
Muy deficiente	<20 %	1

Nota 1. Determinación de valores de calificación de indicadores

Tabla 2

Claves para los valores de calificación de indicadores

EXTENSIÓN DE SUELOS		
INDICADOR	VALOR	CLAVE DE VALORACIÓN
Gran extensión	10000 m ²	4
Mediana extensión	Entre 1000 y 5000 m ²	3
Pequeña extensión	<1000 m ²	2
Micro extensión	10 m ²	1

Nota 2. Determinación de valores de calificación de indicadores

Tabla 3

Claves para los valores de calificación de indicadores

NIVEL DE EMISIÓN		
INDICADOR	VALOR	CLAVE DE VALORACIÓN
Muy grandes emisiones	>1000 barriles de petróleo	4
Grandes emisiones	1000 hasta 100 barriles de petróleo	3
Moderadas emisiones	100 hasta 5 barriles de petróleo	2
Pequeñas emisiones	<5 barriles de petróleo	1

Nota 3. Determinación de valores de calificación de indicadores

Tabla 4

Claves para los valores de calificación de indicadores

NIVEL DE RECUPERACIÓN		
INDICADOR	VALOR	CLAVE DE VALORACIÓN
Suelo que se ha recuperado totalmente	100 %	5
Suelo que se ha recuperado hasta el 90 % que aceptan una gran cantidad de actividades biológicas	90 %	4
Suelo que se ha recuperado hasta el 75 % que aceptan algunas actividades biológicas	75 %	3
Suelo que se ha recuperado hasta el 50 % que aceptan muy pocas actividades biológicas	50 %	2
Suelos que se ha recuperado hasta el 20 % que no aceptan actividades biológicas está totalmente degradado	20 %	1

Nota 4. Determinación de valores de calificación de indicadores

Gráfico 1

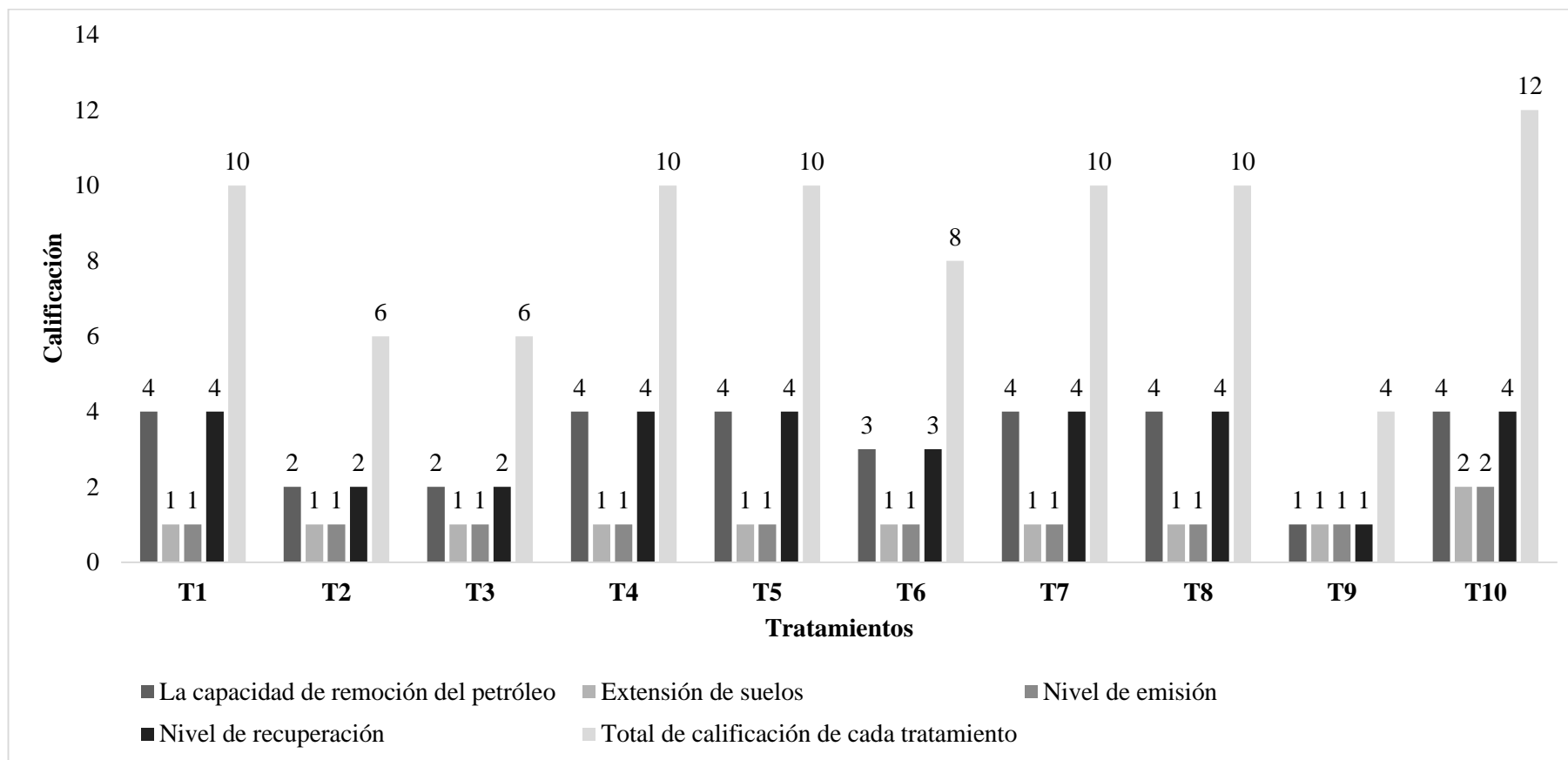


Figura 1. Identificación y selección de los tratamientos. Fuente, Elaboración propia

Leyenda

T1: Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados

T2: Efecto del compost de cáscara de *Citrus limon* sobre la degradación de hidrocarburos totales de petróleo en suelos contaminados provenientes de Refinería Talara

T3: Recuperación del suelo contaminado con petróleo utilizando Micronanoburbujas de aire-ozono a nivel de laboratorio

T4: Efecto del humus de lombriz en la remediación de suelos contaminado con crudo de petróleo. Ucayali, Perú

T5: Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos por derrames de la estación de servicio del campamento de Guarumales-CELEC

T6: Efecto de la materia orgánica en la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en establecimiento de servicios

T7: Evaluación de la eficacia de *Trichoderma sp* y *Pseudomona sp* para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos

T8: Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo

T9: Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrsus maximus*

T10: Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural

En la (Figura 1) se puede observar que de acuerdo a la calificación obtenida de cada tratamiento, se eligió cuatro tratamientos los cuales son los siguientes: Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados con un porcentaje de remoción de 97.4 %, Evaluación de la eficacia de *Trichoderma sp* y *Pseudomona sp* para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos con un porcentaje de remoción de 90.13 %,

Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo con un porcentaje de remoción de 90.9 %, Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural con un porcentaje de remoción de 99.36 %, por haber obtenido los porcentajes más altos en remediación de suelos contaminados con petróleo crudo. A pesar del alto porcentaje de remoción de los tratamientos para suelos contaminados con petróleo crudo no se recupera a su estado original ni tampoco la biodiversidad del suelo, quedando siempre gran porcentaje degradado que debe continuar siendo recuperado.

3.2. Resultado 2

En el (**Cuadro 5**) se presenta las claves para los valores de calificación de cualidades en función al impacto, en el (**Cuadro 6**) se presenta las claves para los valores de calificación de cualidades en función al insumo.

Tabla 5

Valores de calificación de cualidades

CUALIDADES	IMPACTOS	
	VALOR	CLAVE DE VALORACIÓN
Positivo	3	Gran impacto positivo
	2	Mediano impacto positivo
	1	Poco impacto positivo
Inocuo	0	No genera impacto
Negativo	-1	Poco impacto negativo
	-2	Mediano impacto negativo
	-3	Gran impacto negativo

Nota 5. Determinación de valores de calificación de cualidades

Tabla 6

Valores de calificación de cualidades

RIESGO EN FUNCIÓN DEL INSUMO	
CUALIDADES	VALOR
Insumos totalmente naturales	3
Insumos químicos e insumos amigables con el medio ambiente	2
Insumos químicos	1

Nota 6. Determinación de valores de calificación de cualidades

Gráfico 2

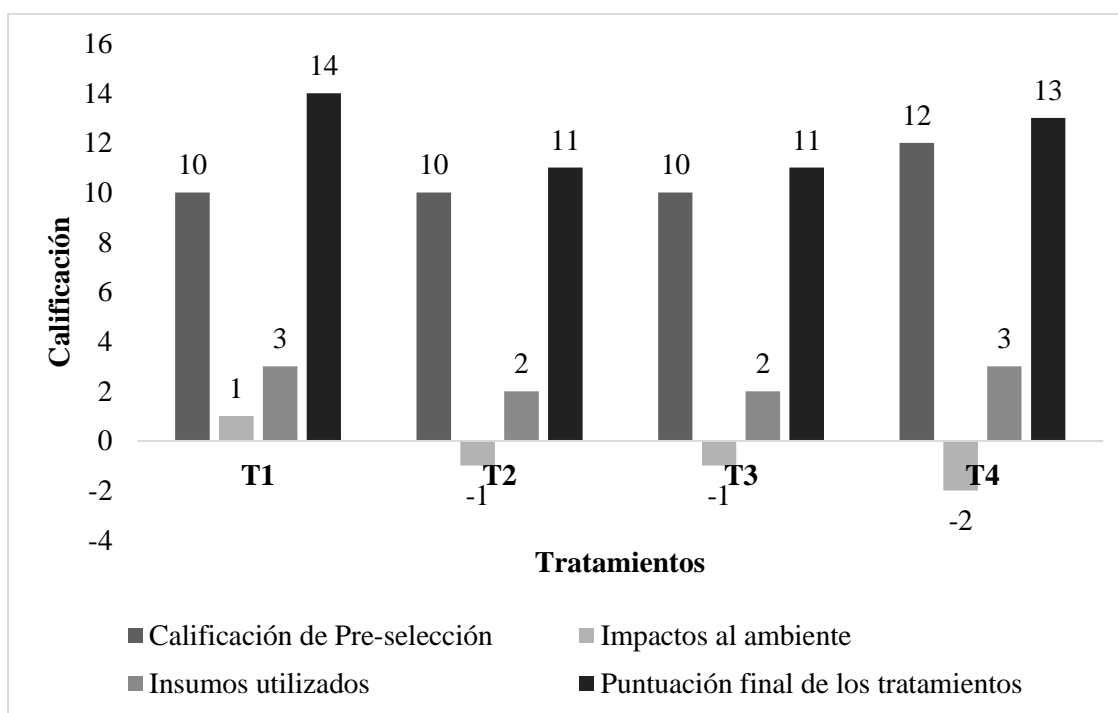


Figura 2. Análisis comparativo entre los tratamientos seleccionados. Fuente, Elaboración propia

Leyenda

T1: Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados

T2: Evaluación de la eficacia de *Trichoderma* sp y *Pseudomona* sp para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos

T3: Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo

T4: Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural

En la (Figura 2) podemos observar que en el análisis comparativo entre los tratamientos seleccionados para suelos degradados se obtuvo la puntuación final de los tratamientos con respecto a los impactos (positivo y negativo) y riesgos en función al insumo utilizado por parte de ellos, los cuales nos dieron los siguientes resultados: Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo con una puntuación final de 11, teniendo poco impacto negativo por la generación de gases y residuos, usando insumos químicos e insumos amigables con el medio ambiente; Evaluación de la eficacia de *Trichoderma* sp y *Pseudomona* sp para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos con una puntuación final de 11, teniendo poco impacto negativo por la generación de residuos, usando insumos químicos e insumos amigables con el medio ambiente; Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural con una puntuación final de 13, teniendo mediano impacto negativo por la generación de gases y generación de aguas residuales, usando insumos totalmente naturales y Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados con una puntuación final de 14, teniendo poco impacto positivo por la incorporación de biodiversidad, usando insumos totalmente naturale

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se acepta la hipótesis nula que por lo menos un tratamiento es mejor en la recuperación de suelos degradados por emisiones de petróleo crudo, el tratamiento que se ha obtenido las mejores calificaciones y cualidades que los demás tratamientos es el de Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados con un porcentaje de remoción de 97.4 % y con una puntuación final de 14, teniendo poco impacto positivo por la incorporación de biodiversidad, usando insumos totalmente naturales.

Los demás tratamientos identificados y seleccionados de acuerdo al porcentaje de remoción del petróleo crudo fueron los siguientes: Evaluación de la eficacia de *Trichoderma* sp y *Pseudomona* sp para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos con un porcentaje de remoción de 90.13 %, Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo con un porcentaje de remoción de 90.9 %, Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural con un porcentaje de remoción de 99.36 %, por haber obtenido los porcentajes más altos en remediación de suelos contaminados con petróleo crudo. Estos tratamientos no fueron elegidos como el mejor por la generación de impactos negativos al medio ambiente.

Ningún tratamiento recupera el suelo a su estado original ni tampoco la biodiversidad, por lo tanto, siempre va quedar suelo contaminado que tendrá que seguir siendo tratado.

4.2. Recomendaciones

Debido a nuestra investigación dada, por lo que se recomienda que el mejor tratamiento: Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados que

muestra condiciones apropiadas para recuperar suelos degradados por petróleo crudo se le debe continuar la investigación involucrando a diversas extensiones para saber así hasta donde responde mejor para ser considerado un buen tratamiento.

Se busque incesantemente encontrar tratamientos que nos devuelvan nuestros recursos naturales a su estado natural y la biodiversidad, la investigación tiene que continuar.

La principal medida para evitar que se degraden los suelos es el control preventivo en todos sus niveles desde la operación, seguimiento y monitoreo. Los tratamientos son buenos algunos como medida reactiva pero el mejor tratamiento es el que viene de las medidas preventivas, el control de todos los aspectos ambientales evitando que haya emisiones en todos los sistemas en donde se extrae, almacena, transporta o se conduce el petróleo crudo y sus derivados.

Se recomienda a los tratamientos que no llegaron a tener una eficiencia alta poder complementarse con otro tipo de tecnología o insumo natural que le ayude a poder lograr la eficiencia necesaria para recuperar el suelo degradado con petróleo crudo a su estado original, como también a evitar generar impactos negativos y proponerse a generar impactos positivos.

5. Referencias

- Aceves, A. A.-M., Peña, G., Puente, M., & Anguas, P. (2002). Metodología para saneamiento de acuíferos profundos por derrame de hidrocarburos. 196, 55.
- Ávila Forero, R. A. (2016). La economía petrolera en un mundo politizado y global. México y Colombia. Cuadernos de Economía, 35(69), 791-798. <https://doi.org/10.15446/cuad.econ.v35n69.56759>
- Bernad, I. O., García, J. S., Valiño, M. D., & Fernández, S. V. (2017). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. 109.
- Bustamante, G., & Silva, J. (2019). Efecto de la materia orgánica en la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en establecimientos de servicios. 66.
- Bouwer, E. y Rijnaarts, H. y Gerlach R. (2000). Biofilms in porous media. Recuperado de https://scholarworks.montana.edu/xmlui/bitstream/handle/1/13397/00018_Ch5_Biofilms_in_porous_media.pdf?sequence=5
- Centro Latinoamericano de Ecología Social [CLAES]. (2014). Potenciales emisiones de la explotación de hidrocarburos no convencionales. Recuperado de https://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/foee_esp_overconsumption_0909.pdf
- Comercio. (2016). Perú: Trece derrames de crudo en el Oleoducto Nor Peruano el año 2016 | Noticias El Comercio Perú. El Comercio Perú; Noticias El Comercio Perú. <https://elcomercio.pe/peru/trece-derrames-crudo-oleoducto-nor-peruano-ano-2016-156155-noticia/>
- Flores Barreto, C. S., & Mendoza Sigüencia, J. P. (2017). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos por derrames de la estación de servicio en el campamento de Guarumales-CELEC. 129.
- Friends of the Earth Europe [FoEE]. (2016). ¿Consumimos demasiado? cómo utilizamos los recursos naturales del planeta. Recuperado de <https://fdocuments.es/document/consumimos-demasiado-como-utilizamos-los-recursos-naturales-del-planeta.html>
- García, C. S. (2017). Recuperación del suelo contaminado con petróleo utilizando Micronanoburbujas de aire-ozono a nivel de laboratorio. 87.
- Grados Bueno, C. V., & Pacheco Riquelme, E. M. (2016). El impacto de la actividad extractiva petrolera en el acceso al agua: El caso de dos comunidades kukama kukamiria de la cuenca del Marañón (Loreto, Perú). Anthropologica, 34(37), 33-59. <https://doi.org/10.18800/anthropologica.201602.002>
- Guía Ambiental para el Manejo de Emisiones Gaseosas de Refinerías de Petróleo. (2000). Recuperado de

<https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/regionales/Publicaciones/GUIA%20HIDROCARBUROS%20VIII.pdf>

- Hernández Valencia, I., Navas, G., & Infante, C. (2017). Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrus maximus*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(3), 495-503. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.12>
- Khan, F. I., Husain, T., & Hejazi, R. (2004). An Overview and Analysis of Site Remediation Technologies. *Journal of Environmental Management*.71:95–122.
- Mujica, F. P., López, H. M., & Zavala, V. M. (2019). Derrames de petróleo y afectación a la salud materno infantil en pueblos indígenas de la amazonía peruana: un análisis exploratorio desde los determinantes de la salud. 96.
- Muñoz Cuaical, S. D. (2016). Evaluación de la eficacia de *Trichoderma sp* Y *Pseudomona sp* para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. 125.
- Muñoz, J., & Pacheco, M. (2017). Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados. 91.
- Paneque, A., Gallo, M., & Nuñez, E. (2016). Su influencia en el ser humano, en especial: el sistema re- productor femenino. 7.
- Plan institucional de Gestión Ambienta [PIGA]. (2013). Diligenciamiento de la Matriz de Identificación de aspectos y valoración de impactos ambientales. Recuperado de http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/2426046/INSTRUCTIVO_MATRIZ_EI_A.pdf
- Richardson, C., Adams, J., & Reddy, K. (1999). Potential Technologies for Remediation of Brownfields | *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management* | Vol 3, No 2. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-025X%281999%293%3A2%2861%29>
- Rodríguez, P. (2018). Efecto del humus de lombriz en la remediación de suelos contaminado con crudo de petróleo. Ucayali, Perú. Recuperado de http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4047/000003720T_AMBIENTAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sachun, V. R. (2015). Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural. 118.
- SERVINDI. (2017). Se vuelca camión con 700 galones de petróleo en San Martín | Servindi— Servicios de Comunicación Intercultural. <https://www.servindi.org/actualidad-noticias/17/04/2017/camion-que-transportaba-700-galones-de-petroleo-se-vuelca-en-san>

- Tamayo, L. N. (2016). Efecto del compost de cáscara de Citrus limon sobre la degradación de hidrocarburos totales de petróleo en suelos contaminados provenientes de Refinería Talara. 73.
- Velásquez, M. (2017). Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (Citrus sinensis) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo. 11.
- Volke Sepúlveda, T., & Velasco Trejo, J. A. (2004). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Inst. Nacional de Ecología.