

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN PILOTO DE FITORREMEDIACIÓN
MULTIPROCESO EN EL TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS CON
RESIDUOS DEL CAMPO RUBIALES BAJO EL MARCO
REGULATORIO LOUISIANA 29B**

**ALEJANDRO CALDERÓN CASTILLO
CAMILO ADOLFO SANDOVAL SAAVEDRA**

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO DE PETROLEOS**

**Director
Químico YEFFER CÁRDENAS GONZÁLEZ**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
Bogotá D.C., 2020**

Nota de aceptación

Yeffer Cárdenas González
Firma del director

Juan Carlos Rodríguez Esparza
Firma del presidente del jurado

Nelson Fernández Barrero
Firma del jurado

Adriangela Chiquinquirá Romero
Firma del jurado

Bogotá D.C., Diciembre de 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro
Dr. **Mario Posada García-Peña**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones
Dra. **María Claudia Aponte González**

Vicerrector Administrativo y Financiero
Dr. **Ricardo Alfonso Peñaranda Castro**

Secretaría General
Dra. **Alexandra Mejía Guzmán**

Decano de la Facultad
Dr. **Julio César Fuentes Arizmendi**

Director del Programa
Dr. **Juan Carlos Rodríguez Esparza**

DEDICATORIAS

Especialmente dedico este gran triunfo a Dios, quien supo guiarme en este largo camino, a mi madre porque sin ella habría sido imposible, a mi padre que estuvo ahí, a mis hermanos quienes siempre me acompañaron en este proceso, a mi abuela Diela que siempre me motivo en los momentos difíciles y también a mi tía Lucy quien siempre me ayudo en todo lo que necesité.

Adicionalmente les dedico este trabajo a todos mis amigos y compañeros quienes de una u otra manera aportaron y me ayudaron a que este logro se hiciera realidad, gracias por su apoyo, sin ustedes habría sido mucho más difícil.

ALEJANDRO CALDERÓN

Gracias a Dios por darme una familia que me apoyo en cada decisión y proyecto, gracias a la vida por darme la oportunidad de crecer como persona y mejorar con cada experiencia vivida. Gracias a cada una de las personas que han sido de ayuda para lograr este sueño trazado.

CAMILO ADOLFO SANDOVAL

AGRADECIMIENTOS

Los investigadores expresan sus más sinceros agradecimientos al grupo docente del programa de Ingeniería de Petróleos de la Fundación Universidad de América, especialmente a la codirectora del proyecto Angie Ortega.

De igual forma se expresa especial agradecimiento al Director de Operaciones de la Empresa AW Company S.A.S., Químico Yeffer Cárdenas González por su invaluable colaboración durante el proceso investigativo; a todo el personal de la Planta de Tratamiento AW Company S.A.S. Yopal.

CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1. Biorremediación	17
1.2. Fitorremediación	19
1.2.1. Fitoestabilización	21
1.2.2. Fitoextracción	21
1.2.3. Fitovolatilización	21
1.2.4. Fitodegradación	22
1.2.5. Rizodegradación	22
1.3. Fitorremediación multiprocesos	22
1.4. Rizosfera	23
1.5. Plantas rizomatosas	25
1.6. Planta vetiver	26
1.7. Bioaumentación	26
1.8. Residuo aceitoso	27
1.9. Borrás aceitosas	27
1.10. Norma Louisiana 29 B	28
1.11. Salinidad	29
1.11.1. Medida y clasificación	29
2. METODOLOGÍA Y DATOS	30
2.1. Tipo de investigación	30
2.2. Método de investigación	30
2.3. Fases del estudio	30
2.4. Datos	35
2.5. Técnicas estadísticas de análisis de la información obtenida	38
3. RESULTADOS	40

3.1.Descripción de resultados: Primer muestreo	40
3.2.Descripción de resultados: Segundo muestreo	45
3.3.Análisis y discusión de resultados	61
4.CONCLUSIONES	67
REFERENCIAS	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los suelos en función de su pH	35
Tabla 2. Caracterización típica de los lodos a tratar – BSW por centrifugación (entrada al proceso de tratamiento)	35
Tabla 3. Límites permisibles en la Norma Louisiana 29B	36
Tabla 4. Efectos producidos en el cultivo frente a las clases de suelo salino	37
Tabla 5. Muestra 1 biorremediación convencional; Muestra 2 fitorremediación plantas foráneas; Muestra 3 fitorremediación plantas nativas: Primer muestreo Vs. Norma Louisiana	41
Tabla 6. Porcentaje de aceites y grasas, hidrocarburos totales y humedad	42
Tabla 7. Concentración componentes metálicos	43
Tabla 8. Salinidad del suelo	44
Tabla 9. Valor de pH	45
Tabla 10. Muestra 1 biorremediación convencional; Muestra 2 fitorremediación plantas foráneas; Muestra 3 fitorremediación plantas nativas: Segundo muestreo. Vs. Norma Louisiana	46
Tabla 11. Porcentaje de Aceites y Grasas, Hidrocarburos Totales y Humedad	47
Tabla 12. Concentración componentes metálicos	48
Tabla 13. Salinidad del suelo	49
Tabla 14. Valor de pH	50
Tabla 15. Concentraciones de aceites y grasas, humedad e hidrocarburos totales: Primer muestreo Vs. Segundo muestreo	51
Tabla 16. pH, Conductividad y Zinc: Primer muestreo Vs. Segundo muestreo	58

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Flujograma de las fases del piloto de investigación	31
Figura 2. Clasificación suelos según su ESP y conductividad eléctrica	38
Figura 3. Reducción del porcentaje de aceites y grasas para el proceso de biorremediación convencional	52
Figura 4. Reducción del porcentaje de aceites y grasas para el proceso de Fitorremediación multiproceso con plantas foráneas	53
Figura 5. Reducción del porcentaje de aceites y grasas para el proceso de Fitorremediación multiproceso con plantas nativas	54
Figura 6. Reducción del porcentaje de hidrocarburos totales para el proceso de biorremediación convencional	55
Figura 7. Reducción del porcentaje de hidrocarburos totales para el proceso de fitorremediación con plantas foráneas	56
Figura 8. Reducción del porcentaje de hidrocarburos totales para el proceso de fitorremediación con plantas nativas	57
Figura 9. Valores de pH para los procesos de biorremediación convencional, fitorremediación con plantas foráneas y con plantas nativas	59
Figura 10. Valores de conductividad para los procesos de biorremediación convencional, fitorremediación con plantas foráneas y con plantas nativas	60
Figura 11. Valores de Zinc para los procesos de biorremediación convencional, fitorremediación con plantas foráneas y con plantas nativas	61

RESUMEN

El objetivo de este proyecto de investigación fue realizar un piloto de fitorremediación multiproceso en la planta de tratamiento de la compañía AW Company S.A.S. Yopal, buscando medios de remediación rápidos y sostenibles debido a sus procesos complementarios favoreciendo el crecimiento de las plantas y el desarrollo de la comunidad microbiana al reducir el estrés contaminante y ambiental, aumentando la degradación efectiva de TPH aceites y grasas debido a la abundancia de raíces y biomasa microbiana obteniendo altas tasas de remediación dentro de plazos aceptables. Para tales efectos se planteó la siguiente hipótesis de trabajo: Mediante la implementación de un piloto de fitorremediación multiproceso se garantizará el cumplimiento de las concentraciones inocuas de los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad, humedad, nitrógeno total, fosforo total, TPH, arsénico, bario, cadmio, cromo+6, plomo, zinc, mercurio, selenio, potasio, RAS y ESP; contemplados en la Norma Louisiana 29B. Se pudo determinar que la planta vetiver obtuvo un mejor rendimiento denotándose que igualmente el piloto de biorremediación convencional también obtuvo resultados favorables, por lo que cualquiera de estas dos opciones cumplen los estándares exigidos por la Norma Louisiana. Igualmente se destaca que las plantas nativas presentaron un rendimiento menor a nivel de aceites y grasas, conductividad e hidrocarburos, pH y Zinc, definiendo que los resultados se mantuvieron dentro de los límites permisibles de la Norma Louisiana.

Palabras clave: Fitorremediación, proceso piloto, Norma Louisiana 29B, degradación contaminante TPH, vetiver, rizoma, bacterias.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación buscó evaluar la eficiencia de un piloto de fitorremediación multiproceso en el tratamiento de suelos contaminados con residuos del Campo Rubiales bajo el marco regulatorio Louisiana 29B [1], y por ende describió un proceso complementario de fitorremediación que contribuya a mejorar los procesos de la planta de la empresa AW Company S.A.S. buscando aumentar su capacidad de tratamiento. Esto en razón a que la alta concentración de Porcentaje Total de Hidrocarburos- TPH, aceites y grasas remanentes que se generan en algunos materiales lo cual implica un aumento en los tiempos de degradación del residuo, y por ende una mayor aglomeración de material, implicando sobrecostos para la empresa además de generar retrasos en la entrega del material, limitando igualmente la capacidad de tratamiento de la planta.

Actualmente la empresa AW Company S.A.S. es la encargada de la disposición de residuos provenientes de los campos operados por Ecopetrol S.A., esto se logra mediante un proceso de biorremediación, el cual cumple la función de normalizar los parámetros físico químicos presentes en el suelo contemplados en la Norma Louisiana 29B. Esto se realiza con el fin de que los suelos se clasifiquen como descontaminados y sean reutilizados como material de aporte en futuros procesos de remediación.

A causa de la falta de implementación de nuevos procesos de remediación se desconoce las eficiencias de cada uno de ellos. Por lo que este proyecto busca dar solución al problema desconocimiento del proceso de fitorremediación multiproceso en la remoción total de hidrocarburos bajo el marco regulatorio Louisiana 29B.

Este desconocimiento genera dificultades en la disposición de los contaminantes pudiendo afectar las propiedades fisicoquímicas del suelo porque aumentan los niveles de carbono orgánico presente y disminuye el pH propio del terreno lo cual implica un alto potencial de contaminación al suelo y las fuentes hídricas. La incorrecta implementación del piloto no lograría obtener las concentraciones mínimas de los

contaminantes, ya que es necesario asegurar una remoción de 85% a 98% de los mismos en un periodo de noventa días, de no cumplir con estos parámetros la empresa afrontaría sanciones legales por el incumplimiento de la Norma Louisiana 29B, contemplada en la licencia ambiental 5.41.12-1627 de la compañía; por lo anterior, es pertinente desarrollar el presente proyecto de investigación.

Actualmente, la planta de tratamiento de AW Company S.A.S. cuenta con un proceso activo de biorremediación en el cual se usan, de manera estratégica, microorganismos o enzimas de estos para detoxificar diversos materiales y degradar residuos peligrosos provenientes de la industria petrolera, controlando y cumpliendo con los parámetros contemplados en la Norma Louisiana 29B (pH, conductividad, humedad, nitrógeno total, fosforo total, TPH, arsénico, bario, cadmio, cromo 6+, plomo, zinc, mercurio, selenio, potasio, RAS, ESP).

La planta de tratamiento cuenta con una capacidad de almacenamiento de 5600m³ por era (entendida como un área preparada con anterioridad con una tela impermeable o geomembrana para evitar la filtración y mezclas contaminantes al suelo y a las aguas subterráneas del mismo) de tratamiento, la cual, se está viendo limitada por el volumen de contaminantes a tratar; generando aglomeraciones y dificultades en la disposición de los residuos debido a periodos extensos de degradación utilizando el proceso actual de Biorremediación. Causados por las altas concentraciones de aceites y grasas e hidrocarburos presentes en el residuo a tratar además del porcentaje de hidrocarburos presentes, aceites y grasas mínimo necesario para cumplir la licencia ambiental.

En algunos estudios como los de Huang et al. del 2004, Gurska et al. del 2009 y Gerhardt et al. del 2016, citados por AW Company S.A.S. [2] en su Licencia Ambiental - Resolución 5.41.12-1627, se ha informado sobre el uso sinérgico de diferentes métodos de recuperación para disipar los HAP y sus resultados mostraron que la efectividad de un método único era limitada, y que la combinación de tres métodos de remediación (biorremediación, fitorremediación) (denominados FITORREMEDIACIÓN MULTIPROCESO) cuyas siglas en ingles son MPPS mejoró considerablemente el

rendimiento de la fitorremediación.

Por tal razón se propuso realizar un piloto de fitorremediación multiproceso en la planta de tratamiento de la compañía AW Company S.A.S., buscando medios de remediación rápidos y sostenibles debido a sus procesos complementarios favoreciendo el crecimiento de las plantas y el desarrollo de la comunidad microbiana al reducir el estrés contaminante y ambiental, aumentando la degradación efectiva de TPH aceites y grasas debido a la abundancia de raíces y biomasa microbiana obteniendo altas tasas de remediación dentro de plazos aceptables. Hasta ahora MPPS se ha utilizado para la eliminación efectiva de TPH, sal y metales de diferentes suelos contaminados en condiciones de invernadero y campo.

En este sentido se pueden señalar los hallazgos del estudio de Mellizo [3] quien en su trabajo "Biorrecuperación de sedimentos contaminados con hidrocarburos totales generados en las estaciones de servicio", evaluó la fitorremediación y biorremediación de hidrocarburos totales, presentes en los sedimentos de una estación de servicio. El estudio permitió evidenciar que la efectividad del sistema de tratamiento de biorremediación alcanzó remociones del 84.2%, mientras que la fitorremediación para biorrecuperar sedimentos estuvo en 72.85%.

En otro estudio desarrollado por los investigadores Hoang, Lamb, Seshadri, Sarkar, Choppala, Kirkham y Bolan [4] de Australia, Reino Unido, Estados Unidos y Vietnam, titulado "Rhizoremediation as a green technology for the remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils" (La rizorremediación como tecnología verde para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo), indican que para el caso de suelos contaminados con TPH, la rizorremediación es una técnica ampliamente aceptada porque se ha comprobado que es un mecanismo efectivo para la remoción de TPH logrando mineralización completas de los contaminantes. El estudio tuvo en cuenta la aplicación de enmiendas de suelo (Fertilizante NPK: N-NH 4: 666 kg N ha⁻¹, 272 kilogramos P ha⁻¹, KK 2 O: 514 kg K ha⁻¹), para las plantas *S.alterniflora* y *S.patens* las cuales evidenciaron alta capacidad para tolerar con

concentraciones de aceite de hasta 100 y 250 mg g⁻¹, respectivamente. Se encontró que la aplicación de fertilizantes aumentó tanto la biomasa de las especies vegetales como la tasa de degradación del aceite.

Con base en lo anterior, se planteó como objetivo general del estudio evaluar la eficiencia de un piloto de Fitorremediación Multiproceso en el tratamiento de suelos contaminados con residuos del Campo Rubiales bajo el marco regulatorio Louisiana 29B. Para ello se requirió: (i) Caracterizar los parámetros fisicoquímicos de los suelos contaminados con residuos del Campo Rubiales mediante el proceso convencional de biorremediación. (ii) Realizar la construcción e implementación del piloto de fitorremediación multiprocesos para la posterior caracterización de los suelos contaminados. (iii) Elaborar la caracterización de los parámetros fisicoquímicos de los suelos resultantes del piloto de fitorremediación multiproceso. (iv) Establecer la eficiencia del proceso de fitorremediación multiprocesos respecto al proceso de biorremediación mediante la comparación de los parámetros fisicoquímicos de los suelos contaminados bajo el cumplimiento de la Norma Louisiana 29B.

En el Anexo 1 se puede apreciar una reseña fotográfica teniendo en cuenta los pasos seguidos para dar cumplimiento a los objetivos del presente proyecto de investigación.

Bajo esta perspectiva se planteó la siguiente hipótesis de trabajo: Mediante la implementación de un piloto de fitorremediación multiproceso se garantizará el cumplimiento de las concentraciones inocuas de los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad, humedad, nitrógeno total, fosforo total, TPH, arsénico, bario, cadmio, cromo+6, plomo, zinc, mercurio, selenio, potasio, RAS y ESP; contemplados en la Norma Louisiana 29B.

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos y teniendo en cuenta la anterior hipótesis de trabajo es importante recordar que la técnica de rizerremediación es un proceso en el cual se utilizan plantas específicas y sus microorganismos

rizosféricos asociados con el de degradar los contaminantes, en este caso los residuos provenientes de la operación del Campo Rubiales, dado que con las plantas se busca actuar indirectamente al estimular las actividades catalíticas de los microorganismos a través de exudados radiculares donde las raíces proporcionan un entorno rico en nutrientes y carbono el cual estimula la actividad microbiana y, a cambio, algunos de los microorganismos facilitan la degradación de los contaminantes.

1. MARCO TEÓRICO

Este apartado se dedica a describir las principales temáticas que enmarcan el presente piloto de investigación y por ende incluye la definición de biorremediación; fitorremediación (fitoestabilización, fitoextracción, fitovolatilización y fitodegradación); rizodegradación; fitorremediación multiprocesos; rizosfera; plantas rizomatosas (planta vetiver y pasto de la región seleccionado); bioaumentación; residuo aceitoso; borras aceitosa; norma Louisiana 29B y la salinidad, buscando con ello ahondar en los conocimientos y métodos amigables con el medio ambiente relacionados con la disposición de residuos.

1.1. Biorremediación

La biorremediación se trata de una técnica que hace uso de los mismos microorganismos que viven en el suelo y el subsuelo los cuales cumplen en este caso la función de limpiar suelos contaminados de forma muy práctica dado que utiliza a los microorganismos para que degraden los compuestos del suelo contaminantes. Esto quiere decir que cumplen la función de alimentarse en el suelo de algunos compuestos químicos que resultan ser tóxicos para la naturaleza, como por ejemplo, hidrocarburos principalmente gasolina, petróleo, entre otros [5].

En este proceso se evidencia que cuando se da la degradación completa, el hidrocarburo se convierte en agua y bióxido de carbono elementos que derivan a compensar ambientalmente. Se hace necesario que, para que los microorganismos se puedan *comer* eficientemente el compuesto y degradarlo, se cumplan estas condiciones: (i) La temperatura debe ser la adecuada y monitoreada dado que en la medida que la temperatura aumenta, las reacciones químicas y enzimáticas aumentan en la célula lo cual es contraproducente; (ii) el agua debe ser suficiente (80% y 90% del peso de las células bacterianas es agua); (iii) debe existir una cantidad adecuada de nutrientes; así como (iv) cantidad de oxígeno suficiente (para microorganismos aerobios) [5].

Estas condiciones hacen que los microorganismos crezcan y se multipliquen y en dicho proceso requieran de una mayor cantidad de sustancias químicas para comer haciendo de esta forma la biodegradación más eficiente. Si estas condiciones no se dan, no se desarrollarían los microorganismos lo suficiente y éstos morirían [5]. Es decir, se requiere de un monitoreo del ciclo de vida de los microorganismos en estas las condiciones antes citadas. Además, existen factores físicos y químicos para que la biorremediación se desarrolle de manera eficiente: pH, oxígeno, nutrimentos mayores y menores [5].

En este sentido la Norma Louisiana indica que el pH debe oscilar entre 6.0 a 9.0 unidades. Para efectos del presente piloto de investigación se tiene en cuenta esta especificación además de las consideraciones generales para interpretar los análisis de suelos establecidas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC en el año de 1990, citado por el Consorcio Rubiales [6], en la Tabla 1 se presenta la clasificación de los suelos en función del pH la cual se describe en la Tabla 1 en el capítulo de la Metodología y Datos.

Igualmente se debe tener en cuenta que el valor de pH intracelular debe oscilar entre 6.5 y 7.5, brindando un intervalo ideal de pH para que el crecimiento de los microorganismos sea el esperado [5]. Esto en razón a que para cada organismo existe una temperatura mínima por debajo de la cual no se da el desarrollo esperado y por ello se debe buscar una temperatura óptima en la que se dé un desarrollo más rápido e igualmente evaluar una máxima para evitar que temperaturas extremas no faciliten el desarrollo. Se estima que el intervalo para alcanzar un crecimiento óptimo de las bacterias es entre 20 °C y 35 °C [5].

Otro factor importante a monitorear es el oxígeno presente en el suelo el cual debe ser mínimo del 1%; esto en razón a que si el contenido de oxígeno es menor a este porcentaje, se cambiarán las reacciones de respiración de los microorganismos de aerobias por anaerobias [5].

En lo que respecta a los nutrientes es necesario mencionar que la porción sólida de la célula de una bacteria está integrada por carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, fósforo y en menores cantidades de elementos como potasio, sodio, calcio, magnesio, cloruros, hierro, otros. Sin embargo, el mayor componente con el 50% lo constituye el carbono y esto indica que debe haber presencia de este elemento en el contaminante que se quiere degradar. Después del carbono, el oxígeno es el elemento que más espacio ocupa en la célula con un 20% [5].

De esta forma se puede definir que la biorremediación es un proceso por medio del cual los microorganismos transforman de un suelo contaminado aquellos compuestos químicos peligrosos y tóxicos en productos finales no peligrosos. Pero para que se logre alcanzar esta meta es necesario contar con tiempo suficiente, con condiciones físicas y químicas requeridas y apropiadas, porque la mayoría de los compuestos orgánicos y algunos inorgánicos pueden degradarse biológicamente [5].

De otra parte y respecto a las técnicas y tipos de biorremediación se tienen las siguientes: (i) In Situ como bioventeo o bioventing, inyección de aire a presión, atenuación natural, bioestimulación y bioaumentación; la técnica consiste en excavar el terreno tratándolo a pie de excavación y se trata del procedimiento más adecuado para la recuperación de suelos, ya que no es necesaria la preparación y excavación del material contaminado, sin embargo es necesario valorar factores como el impacto ambiental en la zona. (ii) Ex Situ como landfarming, biopilas, biorreactor, los cuales se realizan en instalaciones aparte y el cual es el resultado de la valoración de una serie de variables y de características del sitio o del contaminante a tratar [3] [5] [13] [23].

1.2. Fitorremediación

La fitorremediación se trata de un método que emplea las plantas y sus microorganismos asociados con el fin de alcanzar la recuperación de suelos contaminados y una mejora funcional; este método tiene fundamento en una serie de procesos naturales mediante el uso de las plantas y su microbiota asociada a sus

raíces, lo que facilita la degradación y/o secuestro los contaminantes [7]. Actualmente se consideran cuatro estrategias de fitorremediación principales: (i) Fitoextracción, (ii) fitoestabilización, (iii) fitovolatilización, y la (iv) rizodegradación, que para efectos de esta investigación es el método que se aplicará [7].

La fitorremediación puede ser aplicada bajo tres modelos. El primero de ellos es la fitorremediación in situ. Este método consiste en la implementación de plantas fitorremediadoras en el área donde se encuentran los suelos o aguas contaminados. Es importante tener en cuenta que la planta pueda tener acceso a los contaminantes con el objetivo de llevar a cabo una descontaminación eficiente [8].

El segundo modelo es la fitorremediación ex situ, la cual se da en el caso que la planta no tenga acceso a los contaminantes objetos de la fitorremediación. Por lo general se designan áreas de tratamiento a donde los contaminantes son trasladados para que las plantas lleven a cabo el proceso de fitorremediación. Una vez removidos los contaminantes del medio, el suelo o agua remediada es devuelto a la zona de donde se extrajo. El hecho de trasladar los contaminantes genera un costo más elevado que el método in situ [8].

Finalmente se tiene la fitorremediación in vitro, método en el cual el proceso de fitorremediación se alcanza no directamente con la planta sino aislando y utilizando los elementos particulares que la planta utiliza para llevar a cabo la fitorremediación como por ejemplo sus enzimas. Estos componentes pueden ser utilizados por ejemplo mediante la adición de extractos vegetales a volumen de agua contaminado. De igual manera este método demanda la designación de un área de tratamiento. Si a esto le sumamos la necesidad de comprender el comportamiento particular de cada enzima puede [8].

Además, existen varios procesos de fitorremediación, dependiendo los sistemas y estrategias que la planta utiliza para llevar a cabo la descontaminación. En algunos casos más de un proceso de fitorremediación puede presentarse en el proceso de

remoción de contaminantes.

1.2.1. Fitoestabilización

Este proceso, también conocido como fitorrestauración, se utiliza para cubrir y recuperar suelos evitando la erosión y la percolación del agua e inmovilizar los contaminantes por medio de adsorción en el suelo y acumulación en las raíces. Este proceso reduce la movilidad del contaminante y previene su migración en el suelo o a cuerpos de agua. De igual manera funciona para recuperar el paisaje debido a la ausencia de capa vegetal por la presencia de estos contaminantes [8] [9] [10].

1.2.2. Fitoextracción

También llamada fitoacumulación, consiste en la captura y transporte de contaminantes presentes en el medio para luego ser trasladados y almacenados en distintos tejidos de la planta. En estos tejidos los contaminantes son acumulados en concentraciones muy altas [9].

A este proceso igualmente se denomina comúnmente como Phytomining. Posee la ventaja que después de cosechar el material vegetal y dependiendo el tipo de tratamiento para su disposición, los contaminantes pueden reciclarse. En el caso de aplicar en suelos, el material para disposición es casi el 10% de lo que sería disponer directamente el suelo contaminado [9] [11] [12].

1.2.3. Fitovolatilización

Este proceso consiste en la captura de contaminantes por las raíces de la planta para luego por medio de reacciones enzimáticas ser convertidos en compuestos volátiles y liberados a la atmósfera por las estomas en las hojas. Este tipo de proceso funciona para metales altamente volátiles como el mercurio y el arsénico. Este proceso se ve influenciado por condiciones ambientales como la humedad, la temperatura y la

velocidad del viento [9] [11].

1.2.4. Fitodegradación

Conocida también como fitotransformación, es un proceso donde la planta toma los contaminantes del medio y por medio de procesos fisiológicos, que incluyen enzimas y sus cofactores, son degradados para ser incorporados a los tejidos de la planta y ser utilizados como nutrientes. Generalmente los compuestos finales son menos tóxicos [8] [9] [13].

1.2.5. Rizodegradación

Este método se utiliza buscando estimular la supervivencia, el crecimiento y la actividad de los microorganismos de la rizosfera que permiten la degradación de los contaminantes orgánicos porque las raíces de las plantas liberan determinados compuestos, denominados exudados, al suelo de su entorno (rizosfera). Se ha encontrado que la eficiencia de esta tecnología puede ser mejorada añadiendo microorganismos que tengan la capacidad de degradar contaminantes orgánicos o de aumentar su biodisponibilidad, proceso que se denomina bioaumentación, y/o mediante la adición de compuestos los cuales estimulen los procesos de la simbiosis planta-microorganismo, lo cual se denomina bioestimulación [7].

1.3. Fitorremediación multiprocesos

La fitorremediación multiproceso cuyas siglas en inglés son MPPS, se basa en la combinación de tres procesos prominentes, es decir, cultivo de tierras (aireación y fotooxidación), biorremediación (inoculación de bacterias degradadoras) y fitorremediación (uso de plantas solamente). Esta aplicación sinérgica de múltiples técnicas estimula los procesos de degradación de las bacterias en el suelo [14].

Al aplicar MPPS, se pueden considerar dos pasos para la eliminación completa de hidrocarburos de petróleo: (i) El tratamiento del suelo mediante prácticas como la labranza, donde se garantiza la mezcla adecuada para homogeneizar los residuos agregando niveles apropiados de fertilizantes orgánicos e inorgánicos con el fin de mejorar la germinación de las semillas y el crecimiento de las plantas. (ii) El segundo componente clave de MPPS es inocular plantas con bacterias degradadoras para mejorar la tolerancia de las plantas y promover los degradadores de hidrocarburos desarrollados en la rizosfera de las plantas como pastos y legumbres [15].

1.4. Rizosfera

Se define como una zona de interacción única y dinámica entre microorganismos del suelo y las raíces de las plantas, por ello se trata de una región específica que se caracteriza por el aumento de la biomasa microbiana y de su actividad. De esta forma suministra un complejo y dinámico microambiente en el cual las bacterias y hongos, asociados con las raíces, forman sociedades únicas para establecer un considerable potencial que facilita la detoxificación de compuestos orgánicos nocivos [16].

Dicha detoxificación busca terminar en la degradación, mineralización o polimerización de los tóxicos en la rizosfera, por ello este proceso no sólo depende de la microbiota de la rizosfera, sino también que también tiene en cuenta las propiedades de la planta huésped así como las características del suelo y las condiciones ambientales [16].

1.4.1. La rizosfera y su actividad microbiológica

Es de gran importancia debido a que en esta zona se lleva a cabo la rizofiltración y la rizodegradación. En esta zona predomina la actividad microbiana la cual mejora la eficiencia de la remoción ya sea aumentando la disponibilidad de los contaminantes o degradándose siendo asistida por elementos producidos por la planta [10].

Adicionalmente las micorrizas juegan un papel importante debido a que pueden aumentar notoriamente la capacidad de remoción y transformación de contaminantes, como metales pesados, aumentando el crecimiento de la planta y su capacidad de hiperacumulación y translocación del contaminante. Un ejemplo de esto es el aumento de la capacidad de translocación de arsénico por la planta *Pteris vittata* en presencia del hongo *Glomus mosseae* [17]. Esto se ha reportado de igual manera para el cinc y el uranio [18] [19].

La rizosfera se encuentra fuertemente influenciada por la planta puesto que esta libera exudados orgánicos que representan una fuente de carbono para los microorganismos presentes en esta. De igual manera la planta puede, a través de sus raíces, proveer enzimas y oxígeno, Este fenómeno hace que la densidad de microorganismos asociada a la raíz de la planta puede ser muchísimo mayor que en el resto del suelo o el agua. Estos exudados producidos pueden variar en concentración y composición dependiendo la planta lo cual se ve reflejado en la composición y capacidad de los organismos para llevar a cabo la degradación de los contaminantes [20].

La rizosfera puede extenderse aproximadamente hasta 1 mm en la superficie de la raíz y los microorganismos presentes en ella incluyen hongos, micorrizas y bacterias. La presencia de estos microorganismos estimula el crecimiento de las raíces de la planta promoviendo la expansión celular mediante la alteración del pH y la producción de hormonas vegetales como citoquininas. Estas hormonas tienen la capacidad de mejorar la capacidad fitorremediadora de plantas no hiperacumuladoras mediante un aumento en su crecimiento y su biomasa. Otra hormona producida es el ácido indolacético. Este compuesto estimula las bombas ATPasas lo cual baja el pH, debilitando las paredes celulares y acelerando el crecimiento de la planta por medio de expansión celular. Adicionalmente los microorganismos mejoran la fijación de nitrógeno y mediante la producción de antibióticos como sideróforos o agentes quelantes, generan una defensa contra patógenos. Si tenemos en cuenta todos estos factores, podemos concluir el uso de micorrizas en la fitorremediación aumenta

considerablemente la eficiencia de la fitorremediación [21].

La rizosfera llega a ser tan eficiente que tiene la capacidad de realizar procesos de remediación con sustratos complejos donde normalmente ni los microorganismos o la planta de manera separada podrían llevar a cabo. Un ejemplo de esto son los microorganismos que metabolizan hidrocarburos sosteniéndose con los exudados provenientes de la planta [20]. De igual manera la rizosfera puede influir de manera notoria en la biodisponibilidad de un contaminante. Esta biodisponibilidad, por ejemplo, de metales puede mejorar en la presencia de agentes quelantes como EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) DTPA (ácido dietilentriaminopentaacético). Algunos exudados vegetales pueden aumentar la solubilidad de contaminantes poco solubles mediante sustancias lipofílicas mientras los microorganismos pueden aumentar la solubilidad de contaminantes hidrofóbicos mediante la producción de biosurfactantes. Podemos concluir que la rizosfera juega un papel fundamental en la biodisponibilidad de los contaminantes tanto para la planta como para microorganismos asociados [22] [23] [24].

1.5. Plantas rizomatosas

Es necesario indicar que una especie rizomatosa es un tallo modificado el cual se encuentra dotado de yemas las cuales crecen horizontalmente suelo con raíces hacia abajo lo cual hace que se desarrollen nuevos brotes herbáceos en cada nudo. Sin embargo y con el pasar de los meses las partes más antiguas del rizoma mueren y cada año se presentan nuevos brotes al lado de la planta madre lo cual hace que se asegure la supervivencia de este tipo de plantas [25].

Para el caso del presente piloto de investigación se utiliza la planta vetiver que según el estudio de Brandt, Merkl, Schultze-Kraft e Infante [26] la especie *Vetiveria zizanioides* brinda mejores resultados para la remediación de suelos. Además y según los hallazgos de investigaciones desarrolladas por Eapen, Singh y D'Souza [27] y por Cho, Yavuz-Corapcioglu, Park y Sung [28] éstas son utilizadas para remover, reducir,

transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes. Se trata de una gramínea perenne que crece en grandes sepas; dentro de sus propiedades está que es estéril no invasiva y ésta característica hace que no se convierta en maleza además de ser una excelente planta nodriza que facilita el establecimiento de especies endémicas.

Además, el pasto de la región seleccionado es aquel que crece en las eras de tratamiento de la empresa el cual está sometido a un nivel de estrés mayor del contaminante y presente una inoculación previa de bacterias, lo cual lo convierte en un pasto mejor preparado genéticamente. Adicionalmente, los microorganismos que habitan en la rizosfera juegan un papel importante en la degradación de la materia orgánica dado que, los metabolitos generados de esta degradación son absorbidos por las plantas junto con elementos como nitrógeno, fósforo y otros minerales [29].

1.6. Planta vetiver

La biomasa, la altura y capacidad de enraizamiento de la planta vetiver son características que permiten reducir la presencia de crudo pesado y aceite en el suelo [26]. Además, esta especie presenta un alto potencial para adaptarse a los ambientes tóxicos dada su alta su capacidad de reproducción vegetativa [27] y por ello debe considerarse como una especie con un potencial fitorremediador definitivo [26] [28].

1.7. Bioaumentación

Este es un principio de la bioaumentación el cual se fundamenta en la utilización de microorganismos altamente especializados buscando incrementar y mejorar la capacidad de degradación de la población microbiana natural. Se trata de un proceso que permite inocular microorganismos vivos que han sido seleccionados y especialmente aislados por su alta capacidad de degradar los contaminantes, condición que facilita su biodegradación o su biotransformación [30].

1.8. Residuo aceitoso

De acuerdo a Velázquez y Pereira [31] existen dos tipos de residuos aceitosos: (i) Mezcla de crudo, agua, sólidos y algunas otras sustancias que generalmente se encuentra a manera de emulsión. (ii) Una emulsión espesa y viscosa que contiene aceite, agua, sólidos y residuos que se forma debido a la incompatibilidad de algunos crudos y ácidos inorgánicos fuertes utilizados en el tratamiento de crudo y de residuos de la industria petrolera.

El uso de determinados aditivos, tales como los surfactantes o tensoactivos, o la presencia de hierro disuelto pueden promover la formación de lodos, especialmente si hay presencia de asfáltenos en el crudo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que los asfáltenos generan una amplia distribución de estructuras moleculares que pueden variar mucho de un crudo a otro [32].

1.9. Borrás aceitosas

Las borras son el subproducto que se genera cuando el crudo se adhiere a los tanques de almacenamiento; en el momento en que se hace mantenimiento se retira y se lleva al área de tratamiento de sub borra. A esta área llega lo generado en el campo. Se almacena en un lugar donde por acción mecánica se mezcla con cal para absorber la humedad, luego se almacena en barriles y se pasa este producto mediante filtros, siguiendo un sistema de tuberías; luego se realiza un proceso de intercambio de calor para convertir este sólido en líquido y finalmente ingresa a centrifugadores y se separa hacia dos catch tank [6].

En el proceso el residuo a tratar proveniente del campo Rubiales es una mezcla de emulsión entre aceite y agua la cual presenta un bajo contenido de agua libre, altamente viscoso, conformado por agua, sólidos inorgánicos (arena, rocas, lodos de perforación), materia orgánica e hidrocarburos, y residuales de productos químicos usados en los procesos de tratamiento del crudo y agua de producción; todos ellos se

sedimentan y aglomeran después de largos periodos de tiempo en zonas del proceso de extracción y almacenamiento donde su consistencia es altamente viscosa, y su gravedad API es cercana a 12° [6].

Los lodos aceitosos generados en los campos Rubiales, provienen de diferentes procesos como la remoción de sólidos y aceites de las aguas residuales (retrolavado de lechos filtrantes en los trenes de filtración), mantenimientos de vasijas, fondos de tanques de almacenamiento de crudo, arranques de pozos nuevos (campañas de perforación) o reactivados, y residuos de operaciones de servicios a pozos [6].

Para la disposición de los residuos se requiere de su transporte el cual debe cumplir con una serie de normas especificadas en el Decreto Único Reglamentario del Sector Transporte 1079 de 2015 el cual en define dichos aspectos en la Parte 2, Título 1, Capítulo 7, Sección 8; y adicionalmente la empresa debe contar con un Plan de Contingencia y Control de Derrames aprobado por las autoridades ambientales y en los términos establecidos en el artículo 2.2.3.3.4.14 del Decreto 1076 de 2015, y conforme con lo establecido en la Resolución 1209 de junio de 2018, a fin de evitar sanciones y multas por incumplimiento de la ley ambiental y de manejo de residuos peligrosos [6].

1.10. Norma Louisiana 29 B

La Norma Louisiana 29-B/1999 (LAC 43: PartXIX, Subpart 1 State wide Order No. 29B, Chapter3), según el artículo 313 reglamenta el almacenamiento, tratamiento y disposición de residuos de exploración y producción de pozos de petróleo y gas. La Norma Louisiana 29B. Como se menciona en la Resolución No. 1001 del 25 de Mayo de 2010, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial declara que la disposición final de los residuos de actividades petroleras se puede hacer siempre y cuando la mezcla residuo/suelo cumpla con los parámetros estipulados en la Norma Louisiana 29B [1], en la cual se establecen los límites permisibles de diferentes parámetros, y se especifican en la Tabla 3, fuente del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 1001 [33].

1.11. Salinidad

La acumulación continua de las sales en el tiempo promueve la salinización de los suelos, afectando a la productividad de los cultivos y a la calidad ambiental del ecosistema. Para una mejor comprensión se suelen individualizar los efectos debidos a la salinidad y la sodicidad, que en muchos casos actúan en simultáneo [34].

Dentro de los efectos de la salinidad se encuentra los efectos osmóticos: (i) Las sales modifican el potencial osmótico del agua del suelo. (ii) Se inhibe el crecimiento y puede haber paso de agua de la planta al suelo (plasmólisis). (iii) Aumentan la concentración de algunos iones que afectan a la fisiología de la planta, por resultar tóxicos o provocar desequilibrios en el metabolismo de nutrientes [34].

1.11.1. Medida y clasificación

La medida de la salinidad se realiza mediante la conductividad eléctrica que se mide generalmente en unidades de dS/m. Dicha conductividad eléctrica depende de la temperatura por lo que, para realizar comparaciones válidas la conductividad eléctrica debe expresarse en relación a una temperatura de referencia. Habitualmente esta temperatura es de 25°C (IVIA, 2014). La conductividad del suelo se mide a partir del extracto de pasta saturada (CEe) [35].

Otro aspecto a tener en cuenta en la clasificación del suelo, como hemos visto anteriormente, es el sodio intercambiable. Su medida en base al uso del SAR o relación de adsorción de sodio a partir de los cationes Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} en solución (ver la clasificación suelos según su ESP y conductividad eléctrica de acuerdo a lo señalado por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de México [35].

2. METODOLOGÍA Y DATOS

2.1. Tipo de investigación

Se desarrolló una investigación técnica soportada de manera experimental porque se buscó establecer si el material en este caso se puede denominar descontaminado una vez se cumplan todas las fases del presente piloto.

2.2. Método de investigación

Se llevó a cabo un estudio descriptivo observacional en laboratorio con resultados cuantitativos dado que a través de un diseño longitudinal, los investigadores recolectaron los datos necesarios para el pilotaje en diferentes momentos o periodos buscando hacer inferencias respecto al cambio, sus determinantes y consecuencias, como lo señalan Hernández, Fernández y Baptista [36].

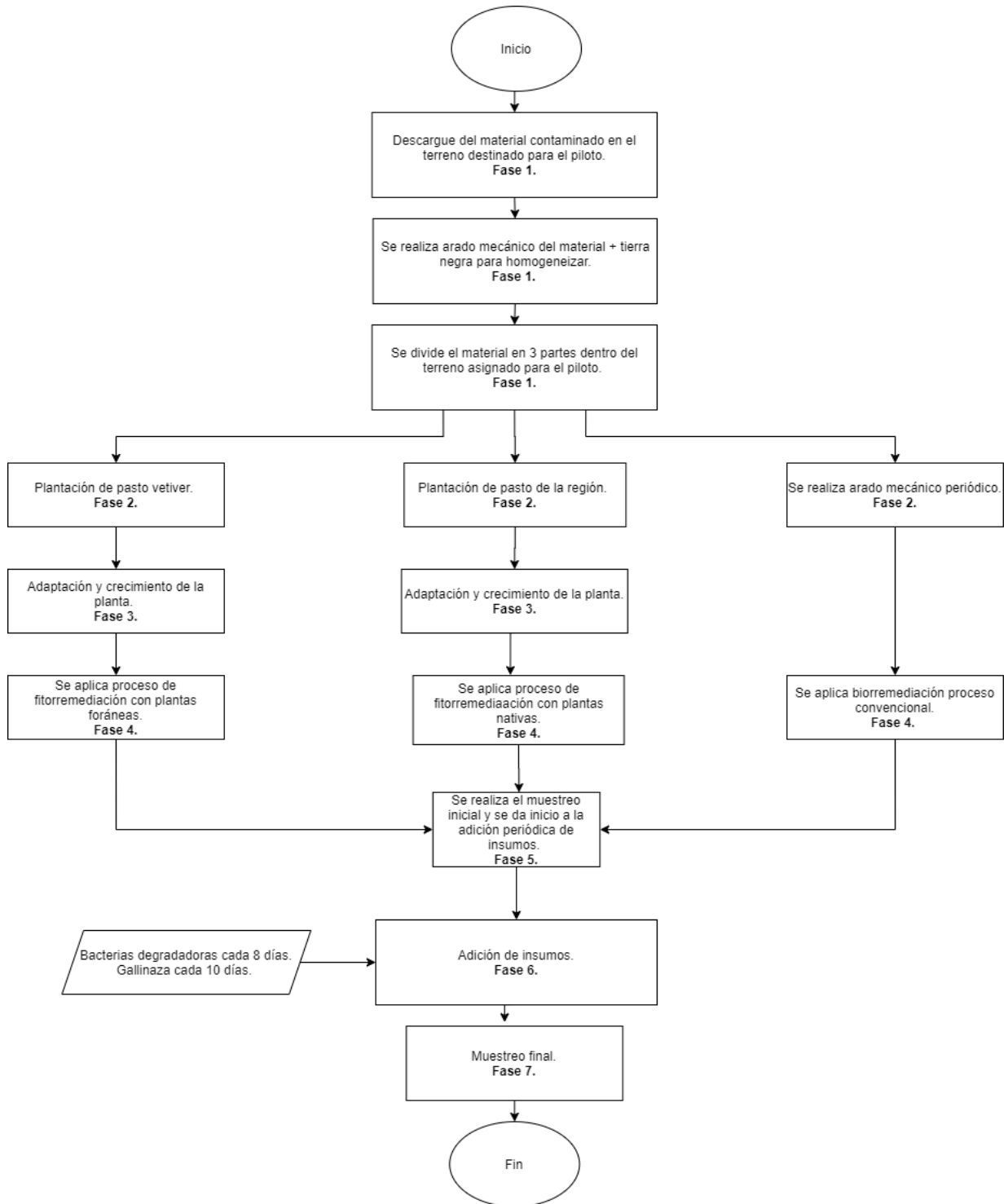
De esta forma y a fin de recolectar la información se llevó una bitácora de trabajo en la cual se consignaron datos como fecha de adición de insumos y sus respectivas cantidades aproximadamente de la siguiente forma: (i) Insumo A: una vez a la semana e (ii) Insumo B: tres veces al mes, el proyecto se configura en un estudio observacional dado que según Hernández, Fernández y Baptista [36] registros observacionales como parte de la investigación cuantitativa, todo ello teniendo en cuenta el permiso que los investigadores solicitaron a la empresa AW Company S.A.S.

2.3. Fases del estudio

El procedimiento y sus respectivas fases desarrolladas durante la parte práctica de esta investigación se describen a continuación en el flujograma.

Figura 1.

Flujograma de las fases del piloto de investigación



Nota: Se aprecian los procedimientos realizados durante la fase práctica de este proyecto de investigación.

- **Fase 1:** Involucró tres procedimientos: (i) En la disposición del material se realizó el traslado en volqueta del que ha sido seleccionado hacia el área de tratamiento en la que se va a realizar el piloto. (ii) Se realizó el arado mecánico del material utilizando tractor con rastra en el terreno dedicado a la ejecución de los pilotos. (iii) Se dividió el material para aplicar la técnica convencional de biorremediación, fitorremediación con plantas foráneas (vetiver), fitorremediación con plantas nativas (pasto de la región).

- **Fase 2:** El 26 de julio de 2020 se realizó el proceso de plantación de las plantas vetiver (fitorremediación plantas foráneas) y del pasto de la región (fitorremediación plantas nativas) obtenido de las eras de tratamiento, debido a que contó con una inoculación previa de bacterias; por ende se presentó una mejor adaptación al suelo contaminado como lo señala el estudio de Kiamarsi, Kafi, Soleimani, Nezami y Lutts [37]. Además se realizó un arado mecánico para la oxigenación del terreno destinado para el proceso de biorremediación convencional

- **Fase 3:** Fue necesario dar el tiempo necesario para que la planta lograra su afianzamiento al medio e hiciera su proceso de adaptación logrando de esta manera el desarrollo su rizoma.

- **Fase 4:** Se garantizaron las condiciones necesarias para la realización de los procesos de fitorremediación y biorremediación para lograr la correcta ejecución del piloto de fitorremediación multiproceso.

- **Fase 5:** El 25 de septiembre el laboratorio acreditado procedió a realizar el muestreo inicial del material; ese mismo día se da inicio a la adición periódica de los insumos. El procedimiento llevado a cabo por el laboratorio fue el siguiente:

(i) Materiales: Todos los elementos utilizados para la colección de muestras en campo, deben cumplir con requisitos sencillos como el ser fáciles de limpiar, resistentes al desgaste y no deberán contener sustancias químicas que puedan contaminar o alterar las muestras. En el caso de contaminantes orgánicos, las herramientas

utilizadas en el muestreo y los envases o contenedores para la conservación de la muestra no deberán contener sustancias químicas que puedan producir interferencias al momento de realizar las pruebas analíticas. Es necesario tener en cuenta que cuando se trata de suelos contaminados con metales, se recomienda utensilios de plástico, teflón o acero inoxidable para el muestreo. Es recomendable llevar un registro de las acciones de campo, realizar una reseña fotográfica y tener en cuenta los pasos de la cadena de custodia para las muestras. Palas. Barrenos. Balde o bolsa grande: Bolsas para suelos de papeles impermeables o comunes de plástico grueso. Etiquetas o marcador resistente al agua, lápiz y papel.

(ii) Procedimiento: Es importante que antes de la toma de cada muestra, los instrumentos de muestreo y guantes se limpien o se reemplacen de ser el caso. Las muestras deben colectarse en los recipientes adecuados de acuerdo al tipo de análisis y deben etiquetarse inmediatamente con los datos que sean necesario. La muestra simple se toma en el sitio representativo escogido para el muestreo y para ello se requiere eliminar la cobertura vegetal con una pala y efectuar cortes con la pala, hasta la profundidad señalada. La profundidad del muestreo dependerá del tipo de proyecto o tipo de suelo y contaminante a estudiar, y debe ser debidamente justificado dentro de los datos del informe que se levante. Por ejemplo: para verificar una contaminación en un suelo agrícola se verifica la capa vegetal, que va de 0 a 30 cm. Cavar una primera palada (haciendo un hoyo en forma de V) arrojándola al costado, y luego una segunda palada de 3 cm. de grosor aproximado, descartando los bordes mediante un corte a cuchillo. Colocar en un la bolsa de plástico. (Puede hacer uso de otras herramientas como barrenos). Obtener un peso final de aproximadamente 4 Kg. por muestra simple.

(iii) Empaque, conservación y remisión de muestras: Las muestras se deben empacar en bolsas plásticas nuevas y todas las muestras colectadas deben guardarse en un lugar oscuro, fresco, esterilizado, aisladas térmicamente hasta su ingreso al laboratorio. La mayoría de las muestras tomadas para evaluar contaminantes deben ser analizadas en el menor tiempo posible dado que cuando los análisis químicos son realizados después de este tiempo, los resultados pueden resultar sesgados al tener

una menor confiabilidad. Se deben marcar las muestras identificando fecha, ubicación y tipo de matriz, identificación o número de la muestra en caso de que se trate muestras compuestas. Se debe remitir la muestra al laboratorio en el menor tiempo posible.

- **Fase 6:** Se realizó una adición periódica de insumos agrícolas en las siguientes proporciones: Gallinaza (carga inicial: 60%, segunda y tercera carga: 20% cada 10 días) y Bacterias Degradadoras (36 litros; bacterias bioaumentadas se suministran semanalmente) (ver modelo de bitácora en el Anexo 3).

- **Fase 7:** Se continuó con la adición periódica de insumos hasta la fecha en la que el laboratorio acreditado procede a realizar el muestreo final. Durante este muestreo final se siguen los mismos pasos descritos en el procedimiento de laboratorio definidos en la Fase 5.

- **Fase 8:** Los investigadores realizaron el análisis de los resultados a fin de establecer la eficiencia del proceso de fitorremediación multiprocesos respecto al proceso de biorremediación mediante la comparación de los parámetros fisicoquímicos de los suelos contaminados bajo el cumplimiento de la Norma Louisiana 29B [1].

2.4. Datos

En la Tabla 1 se presenta la clasificación de los suelos en función del pH.

Tabla 1.

Clasificación de los suelos en función de su pH

pH	Condición del Suelo
Menor de 4.5	Extremadamente Ácido
4,6 a 5,0	Muy Fuertemente Ácido
5,1 a 5,5	Fuertemente Ácido
5,6 a 6,0	Medianamente Ácido
6,1 a 6,5	Ligeramente Ácido
6,6 a 7,3	Neutro
7,4 a 7,8	Ligeramente Alcalino
7,9 a 8,4	Medianamente Alcalino
8,5 a 9,0	Fuertemente Alcalino
Mayor de 9	Extremadamente Alcalino

Nota: Se describen los datos de las consideraciones generales para el análisis de suelos según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC en el año de 1990. Tomado de: Consorcio Rubiales. Especificaciones técnicas: Disposición y tratamiento de residuos. Puerto Gaitán (Meta): El Consorcio, 2020. p. 1-31.

En la Tabla 2 se puede apreciar la caracterización típica tanto en rango y valor típico del lodo aceitoso teniendo en cuenta cinco variables.

Tabla 2.

Caracterización típica de los lodos a tratar – BSW por centrifugación (entrada al proceso de tratamiento)

Fluido/Parámetro	Gravedad API (° API)	Contenido de agua (%)	Contenido de emulsión (%)	Contenido de aceite (%)	Contenido de sólidos (%)
Lodo aceitoso (rango)	11,0 - 13,0	1-60	1-68	24-90	0,1-20
Lodo aceitoso (valor típico)	12,0	20	48	30	1,5

Nota: Se definen parámetros sobre la caracterización típica tanto en rango y valor típico del lodo aceitoso. Tomado de: Consorcio Rubiales. Especificaciones técnicas:

Disposición y tratamiento de residuos. Puerto Gaitán (Meta): El Consocio, 2020. p. 1-31.

Los límites permisibles de diferentes parámetros se especifican en la Tabla 3 según la Norma Louisiana 29B.

Tabla 3.

Límites permisibles en la Norma Louisiana 29B

Parámetro	Valor
Arsénico	10 ppm
Bario	20.000 ppm
Cadmio	10 ppm
Cromo +6	500 ppm
Plomo	500 ppm
Mercurio	10 ppm
Selenio	10 ppm
Plata 200 ppm	200 ppm
Zinc	500 ppm
Hidrocarburos totales del petróleo (TPH)	10.000 ppm
Aceites y grasas	<1% peso en seco
Conductividad Eléctrica	<4 $\mu\text{mhos/cm}$
Relación Absorción de Sodio (RAS)	<12
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PIS)	<15%
pH	6 a 9
Contenido de Humedad	<50% en peso

Nota: Se describen parámetros estipulados en la Norma Louisiana 29B. Tomado de: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 1001: Por la cual se otorga una licencia ambiental y se toman otras determinaciones. Bogotá: El Ministerio, 2010. (25, Mayo).

En la Tabla 4 quedan reflejados los efectos producidos en el cultivo frente a las clases de suelo salino.

Tabla 4.

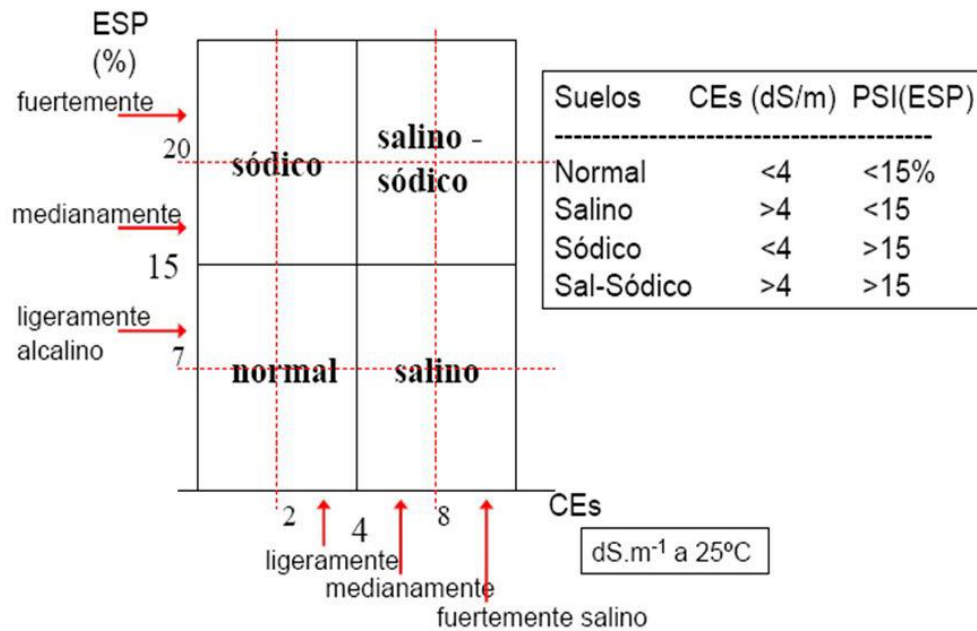
Efectos producidos en el cultivo frente a las clases de suelo salino

Salinidad	Valor ($\mu\text{S/cm}$)	Efecto
No salino	0 - 2	Efectos de la salinidad imperceptibles
Ligeramente salino	2 - 4	Rendimientos en cultivos sensibles pueden verse limitados
Moderadamente salino	4 - 8	Rendimientos limitados en la mayoría de cultivos
Fuertemente salino	8 - 16	Solo cultivos tolerantes tendrán rendimientos aceptables
Muy fuertemente salino	> 16	Solo cultivos muy tolerantes tendrán rendimientos aceptables

Nota: Se pueden apreciar los efectos según las clases de suelo salino. Tomado de: I. Pachón. Salinidad: Consideraciones de manejo en Nutrición®. 2019, Blog MetroFlor. [En línea]. Disponible en: <http://www.metroflorcolombia.com/salinidad-consideraciones-de-manejo-en-nutrigacion/>.

Figura 2.

Clasificación suelos según su ESP y conductividad eléctrica



Nota: La figura representa la clasificación de suelos según su ESP (Porcentaje de Sodio Intercambiable) y su conductividad eléctrica. Tomado de: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de México. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Instituto nacional de investigaciones agrícolas. México: Secretaría de agricultura y ganadería, 1962.

2.5. Técnicas estadísticas de análisis de la información obtenida

Los resultados se entregan mediante tablas según la estadística descriptiva convencional haciendo uso de la herramienta Excel. Para ello se utiliza un análisis univariado que se aplica para las variables que incluyen las concentraciones de cada

parámetro según la Norma Louisiana 29B.

El análisis univariado de datos permite que el investigador se concentre en cada variable de forma independiente; usualmente se trabaja con distribuciones de frecuencias, medidas de tendencia central y medidas de dispersión, como lo señalan Fernández, Cordero y Córdova [38]. De esta forma, resultan útiles las tablas univariadas según las necesidades del problema a partir de los datos encontrados en el análisis de frecuencias, teniendo en cuenta que la distribución de frecuencias indica el número de casos que hay en cada categoría de la variable; a partir de dichos valores, en una tabla de frecuencias se indican los resultados como lo señala Martínez [39].

3. RESULTADOS

3.1. Descripción de resultados: Primer muestreo

Teniendo en cuenta los datos recolectados entre los meses de octubre y noviembre de 2020, a continuación se describen los hallazgos planteados con su respectivo análisis univariado en aquellas variables de interés que permiten responder los objetivos del presente proyecto de investigación.

Tabla 5.

Muestra 1 biorremediación convencional; Muestra 2 fitorremediación plantas foráneas; Muestra 3 fitorremediación plantas nativas: Primer muestreo Vs. Norma Louisiana

DATOS DE LA MUESTRA							
Municipio de recolección				Yopal			
Dirección de toma de muestras				N 05°25'03.8" w 72°16'12.7"			
Matriz				Suelos			Louisiana 29B/99
Tipo de muestra			Compuesta	M1	M2	M3	
Fecha de muestreo: 25 de septiembre/20							
Parámetro (unidades)	Método	Unid.	LC M	Resultado	Resultado	Resultado	
ACEITES Y GRASAS (%)	EPA 9071 B	%	0,02	2,3	2,41	1,67	< 1%
CONDUCTIVIDAD (µS/cm)	NTC 5596:2008	µS/cm	0	0,333	0,327	0,329	<4000 µS/cm)
HIDROCARBUROS TOTALES (%)	USEPA 9071 B-SM 5520 F	%	0,01	1,91	2,01	1,36	< 1%
HUMEDAD (%)	EPA 3050 B-SM 3111 B	%	0,5	18%	19%	18%	N.R
pH (Und pH)	NTC 5264:2008	Und de pH	0	6,57	6,58	6,69	6,0 - 9,0
ARSÉNICO (mg As/Kg)	EPA 7062 - SM 3114 C	mg/kg ss	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	10
BARIO (mg Ba/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	100	396	396	396	20000
CADMIO (mg Cd/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	2	<2,00	<2,00	<2,00	10
CROMO TOTAL (mg Cr/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	20	<20	<20	<20	500
COBRE (mg Cu/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	20	<20	<20	<20	N.R
FOSFORO TOTAL (mg P/kg)	Colorimétrico Azul de Molibdeno	mg/kg ss	69,5	190,3	170,7	175,3	N.R
MERCURIO (mg Hg/Kg)	EPA 7471B - SM 3112 B	mg/kg ss	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	10
NITROGENO TOTAL(mg N/Kg)	IGAC 6° ED/2006	mg/kg ss	0,02	<0,2	<0,2	<0,2	N.R
PLOMO (mg Pb/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	20	<20	<20	<20	500
SELENIO (mg Se/Kg)	EPA 7742-SM 3114C	mg/kg ss	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	10
ZINC (mg Zn/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	10	87,6	77,8	74,6	500
POTASIO (mg K/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	25	368	375	372	N.R
PORCENTAJE DE SODIO INTERCAMBIABLE (%)	NORM-021 RECNAT 2000 Diario Oficial Segunda Seccion:2002	%	0	1,63	1,65	1,62	<15
RELACIÓN ABSORCIÓN DE SODIO (-)	Cálculo NOM-021-RECNAT-2000 AS-21	-	0	0,242	0,283	0,277	<12

LCM: Limite de cuantificación del método N.R: No regulado por la normatividad en mención.

Nota: Datos adaptados por los investigadores a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.

Tabla 6.*Porcentaje de aceites y grasas, hidrocarburos totales y humedad*

Parámetro (unidades)	BIORREMEDIACION PROCESO CONVENCIONAL	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS FORANEAS	FITORREMEDIACION PLANTAS NATIVAS	Louisiana 29B/99	Cumple Louisiana 29B	
	Resultado	Resultado	Resultado		SI	NO
ACEITES Y GRASAS (%)	2,3	2,41	1,67	< 1%		X
HIDROCARBUROS TOTALES (%)	1,91	2,01	1,36	N.R		X
HUMEDAD (%)	19%	20,7%	20,8%	N.R	X	

N.R: No regulado por la normatividad en mención.

Nota: Se observan los hallazgos del primer muestreo para aceites y grasas, hidrocarburos totales y humedad.

De la caracterización fisicoquímica de las muestras de suelo analizadas en el monitoreo del primer muestreo, se destaca que la presencia de aceites y grasas e hidrocarburos totales es alta; con porcentajes mayores a los permitidos en la norma para el caso de los aceites y grasas.

Aunque la humedad no es un factor relacionado en la norma Louisiana 29B es un principio de gran importancia en los cultivos o zonas plantadas de cualquier índole para lo cual es necesario una presencia del 20-30% de agua para asegurar un buen crecimiento de la planta.

Tabla 7.*Concentración componentes metálicos*

Parámetro (unidades)	BIORREMEDIACION PROCESO CONVENCIONAL	FITORREMEDIACION PLANTAS FORANEAS	FITORREMEDIACION PLANTAS NATIVAS	Louisiana 29B/99	Cumple Louisiana 29B	
	Resultado	Resultado	Resultado		SI	NO
ARSENICO (mg As/Kg)	<0,5	<0,5	<0,5	10	x	
BARIO (mg Ba/Kg)	396	396	396	<20000	x	
CADMIO (mg Cd/Kg)	<2,00	<2,00	<2,00	<10	x	
CROMO TOTAL (mg Cr/Kg)	<20	<20	<20	500	x	
COBRE (mg Cu/Kg)	<20	<20	<20	N.R	x	
MERCURIO (mg Hg/Kg)	<0,2	<0,2	<0,2	10	x	
PLOMO (mg Pb/Kg)	<20	<20	<20	500	x	
SELENIO (mg Se/Kg)	<0,5	<0,5	<0,5	10	x	
ZINC (mg Zn/Kg)	87,6	77,8	74,6	500	x	
POTASIO (mg K/Kg)	368	375	372	N.R	x	

N.R: No regulado por la normatividad en mención.

Nota: Se aprecia la concentración de los 10 metales analizados en el primer muestreo.

Por otra parte, los resultados obtenidos para los metales, refieren concentraciones inferiores a los límites de cuantificación de las técnicas de análisis en el caso del arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, selenio y mercurio en las muestras colectadas. Se observan concentraciones bajas en los reportes del zinc y el bario y concentraciones favorables en los niveles el potasio; sin embargo y en términos normativos se resalta que la totalidad de elementos metálicos evaluados reporta concentraciones que son conformes a lo reglamentado en la normatividad de referencia.

Tabla 8.*Salinidad del suelo*

Parámetro (unidades)	BIORREMEDIACION PROCESO CONVENCIONAL	FITORREMEDIACION PLANTAS FORANEAS	FITORREMEDIACION PLANTAS NATIVAS	Louisiana 29B/99	Cumple Louisiana 29B	
	Resultado	Resultado	Resultado		SI	NO
CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,333	0,327	0,329	<4 mmhos/cm (4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)	x	
PORCENTAJE DE SODIO INTERCAMBIABLE (%)	1,63	1,65	1,62	<15	x	
RELACIÓN ABSORCIÓN DE SODIO (-)	0,242	0,283	0,277	<12	x	

Nota: Se observan los valores de salinidad en el primer muestreo a nivel de conductividad, porcentaje de sodio intercambiable y relación absorción de sodio.

Por otro lado, la Conductividad en las muestras de suelo reporta ser de 0,333 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 0,327 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y 0,329 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, es decir, que presentan una baja salinidad y en términos normativos son conformes a lo reglamentado en la Norma Louisiana 29B, en donde se establece una conductividad máxima permisible de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Además, una vez que se conoce el PSI de un suelo, se puede determinar la salinidad del mismo mediante la comparación del valor obtenido con los rangos propuestos por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) citada por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de México [35], que se muestran en la Figura 1 (fuente: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de México [35]) y la Tabla 4 (fuente: Pachón [34]) del capítulo del marco teórico; donde con el valor del porcentaje de sodio intercambiable y la conductividad podemos definir el suelo como un ambiente Normal con efectos de salinidad imperceptibles.

La RAS o relación absorción de sodio se define como una unidad de medida que les

permite a los investigadores, en este caso reconocer en forma relativa la proporción en la que se encuentra el sodio presente en el suelo. Y en lo que respecta al porcentaje de sodio intercambiable se busca definir la forma en que la cantidad de sodio absorbido por las partículas del suelo (CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico) [40].

Tabla 9.

Valor de pH

Parámetro (unidades)	BIORREMEDIACION PROCESO CONVENCIONAL	FITORREMEDIACION PLANTAS FORANEAS	FITORREMEDIACION PLANTAS NATIVAS	Louisiana 29B/99	Cumple Louisiana 29B	
	Resultado	Resultado	Resultado		SI	NO
pH (Und pH)	6,57	6,58	6,69	6,0 - 9,0	x	

Nota: Se observan los valores de pH obtenidos en el primer muestreo.

Según los criterios de clasificación de la Tabla 1 citada en el capítulo de la Metodología y Datos, el valor de pH registrado en las muestras de suelos colectadas reflejan una condición ligeramente acida – neutra con valores de 6.57, 6.58 y 6.69 Und pH respectivamente. Condiciones óptimas para el proceso a implementar lo cual no genera restricciones a lo reglamentado en la Norma Louisiana (6,0 – 9,0 unidades).

3.2. Descripción de resultados: Segundo muestreo

Tabla 10.

Muestra 1 biorremediación convencional; Muestra 2 fitorremediación plantas foráneas; Muestra 3 fitorremediación plantas nativas: Segundo muestreo. Vs. Norma Louisiana

DATOS DE LA MUESTRA							
Municipio de recolección				Yopal			
Dirección de toma de muestras				N 05°25'03.8" w 72°16'12.7"			
Matriz				Suelos			Louisiana 29B/99
Tipo de muestra		Compuesta		M1	M2	M3	
Fecha de muestreo: 25 de septiembre/20							
Parámetro (unidades)	Método	Unidades	LC M	Resultado	Resultado	Resultado	
ACEITES Y GRASAS (%)	EPA 9071 B	%	0,02	0,222	0,254	0,261	< 1%
CONDUCTIVIDAD (µS/cm)	NTC 5596:2008	µS/cm	0	0,311	0,31	0,299	<4000 µS/cm)
HIDROCARBUROS TOTALES (%)	USEPA 9071 B-SM 5520 F	%	0,01	0,201	0,252	0,244	< 1%
HUMEDAD (%)	EPA 3050 B-SM 3111 B	%	0,5	20%	24,7%	24,5%	N.R
pH (Und pH)	NTC 5264:2008	Und de pH	0	7,62	7,93	7,87	6,0 - 9,0
ARSÉNICO (mg As/Kg)	EPA 7062 - SM 3114 C	mg/kg ss	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	10
BARIO (mg Ba/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	100	396	396	396	20000
CADMIO (mg Cd/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	2	<2,00	<2,00	<2,00	10
CROMO TOTAL (mg Cr/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	20	<20	<20	<20	500
COBRE (mg Cu/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	20	<20	<20	<20	N.R
FOSFORO TOTAL (mg P/kg)	Colorimétrico Azul de Molibdeno	mg/kg ss	69,5	185,3	168,9	172,3	N.R
MERCURIO (mg Hg/Kg)	EPA 7471B - SM 3112 B	mg/kg ss	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	10
NITROGENO TOTAL(mg N/Kg)	IGAC 6° ED/2006	mg/kg ss	0,02	<0,2	<0,2	<0,2	N.R
PLOMO (mg Pb/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	20	<20	<20	<20	500
SELENIO (mg Se/Kg)	EPA 7742-SM 3114C	mg/kg ss	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	10
ZINC (mg Zn/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	10	50,4	60,6	64,1	500
POTASIO (mg K/Kg)	EPA 3050 B-SM 3111 B	mg/kg ss	25	368	375	372	N.R
PORCENTAJE DE SODIO INTERCAMBIABLE (%)	NORM-021 RECNAT 2000 Diario Oficial Segunda Seccion:2002	%	0	1,63	1,65	1,62	<15
RELACIÓN ABSORCIÓN DE SODIO (-)	Cálculo NOM-021-RECNAT-2000 AS-21	-	0	0,242	0,283	0,277	<12

LCM: Limite de cuantificación del método N.R: No regulado por la normatividad en mención.

Nota: Datos adaptados por los investigadores a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.

Tabla 11.*Porcentaje de Aceites y Grasas, Hidrocarburos Totales y Humedad*

Parámetro (unidades)	BIORREMEDIACIÓN PROCESO CONVENCIONAL	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS FORÁNEAS	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS NATIVAS	Louisiana 29B/99	Cumple Louisiana 29B	
	Resultado	Resultado	Resultado		SI	NO
ACEITES Y GRASAS (%)	0,222	0,254	0,261	< 1%	x	
HIDROCARBUROS TOTALES (%)	0,201	0,252	0,244	N.R	x	
HUMEDAD (%)	20%	24,7%	24,5%	N.R	x	

N.R: No regulado por la normatividad en mención.

Nota: Se observan los hallazgos del segundo muestreo para aceites y grasas, hidrocarburos totales y humedad.

De la caracterización fisicoquímica de las muestras de suelo analizadas en el monitoreo del segundo muestreo, se destaca que la presencia de aceites y grasas e hidrocarburos totales es baja; con porcentajes permitidos en la norma para el caso de los aceites y grasas.

Aunque la humedad no es un factor relacionado en la norma Louisiana 29B es un principio de gran importancia en los cultivos o zonas plantadas de cualquier índole para lo cual es necesario una presencia del 20-30% de agua para asegurar un buen crecimiento de la planta.

Tabla 12.

Concentración componentes metálicos

Parámetro (unidades)	BIORREMEDIACIÓN PROCESO CONVENCIONAL	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS FORÁNEAS	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS NATIVAS	Louisiana 29B/99	Cumple Louisiana 29B	
	Resultado	Resultado	Resultado		SI	NO
ARSÉNICO (mg As/Kg)	<0,5	<0,5	<0,5	10	x	
BARIO (mg Ba/Kg)	396	396	396	<20000	x	
CADMIO (mg Cd/Kg)	<2,00	<2,00	<2,00	<10	x	
CROMO TOTAL (mg Cr/Kg)	<20	<20	<20	500	x	
COBRE (mg Cu/Kg)	<20	<20	<20	N.R	x	
MERCURIO (mg Hg/Kg)	<0,2	<0,2	<0,2	10	x	
PLOMO (mg Pb/Kg)	<20	<20	<20	500	x	
SELENIO (mg Se/Kg)	<0,5	<0,5	<0,5	10	x	
ZINC (mg Zn/Kg)	50,4	64,10	60,6	500	x	
POTASIO (mg K/Kg)	368	375	372	N.R	x	

N.R: No regulado por la normatividad en mención.

Nota: Se aprecia la concentración de los 10 metales analizados en el segundo muestreo.

Por otra parte, los resultados obtenidos para los metales refieren concentraciones inferiores a los límites de cuantificación de las técnicas de análisis en el caso del arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, selenio y mercurio en las muestras colectadas. Se destaca que los niveles de concentración de los metales, pese a no encontrarse en niveles peligrosos según la norma Louisiana, en este caso no afecta el desarrollo del ambiente plantado.

El método de análisis de laboratorio para el caso del Zinc reportó valores mínimos siendo el menor el que se evidencia en el proceso convencional seguido del valor de

las plantas nativas y por último el de las plantas foráneas; estos resultados permiten definir que el Zinc contribuyó al desarrollo vegetativo de la planta y en cuanto a las concentraciones de potasio se observaron los mismos resultados muy por debajo de los índices definidos por la norma Louisiana, dado que todos ellos fueron cargados con la misma cantidad de insumos agrícolas. Sin embargo y en términos normativos se resalta que la totalidad de elementos metálicos evaluados reporta concentraciones que son conformes a lo reglamentado en la normatividad de referencia.

Tabla 13.

Salinidad del suelo

Parámetro (unidades)	BIORREMEDIACIÓN PROCESO CONVENCIONAL	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS FORÁNEAS	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS NATIVAS	Louisiana 29B/99	Cumple Louisiana 29B	
	Resultado	Resultado	Resultado		SI	NO
CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,311	0,31	0,299	<4 mmhos/cm (4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)	x	
PORCENTAJE DE SODIO INTERCAMBIABLE (%)	1,63	1,65	1,62	<15	x	
RELACIÓN ABSORCIÓN DE SODIO (-)	0,242	0,283	0,277	<12	x	

Nota: Se observan los valores de salinidad en el segundo muestreo a nivel de conductividad, porcentaje de sodio intercambiable y relación absorción de sodio.

Por otro lado, la Conductividad en las muestras de suelo reporta ser de 0,311 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 0,31 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y 0,299 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, es decir, que presentan una baja salinidad y en términos normativos son conformes a lo reglamentado en la Norma Louisiana 29B, en donde se establece una conductividad máxima permisible de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Además, una vez que se conoce el PSI de un suelo, se puede determinar la salinidad del mismo mediante la comparación del valor obtenido con los rangos propuestos por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) citada por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de México

[35], que se muestran en la Figura 1 (fuente: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de México [35]) y la Tabla 4 (fuente: Pachón [34]) del capítulo del marco teórico; donde con el valor del porcentaje de sodio intercambiable y la conductividad podemos definir el suelo como un ambiente Normal con efectos de salinidad imperceptibles.

La RAS o relación absorción de sodio se define como una unidad de medida que le permite al Investigador, en este caso reconocer en forma relativa la proporción en la que se encuentra el sodio presente en el suelo. Y en lo que respecta al porcentaje de sodio intercambiable se busca definir la forma en que la cantidad de sodio absorbido por las partículas del suelo (CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico) [40].

Tabla 14.

Valor de pH

Parámetro (unidades)	BIORREMEDIACIÓN PROCESO CONVENCIONAL	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS FORÁNEAS	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS NATIVAS	Louisiana a 29B/99	Cumple Louisiana a 29B	
	Resultado	Resultado	Resultado		SI	NO
pH (Und pH)	7,62	7,93	7,87	6,0 - 9,0	x	

Nota: Se observan los valores de pH obtenidos en el primer muestreo.

Según los criterios de clasificación de la citada Tabla 1 en el capítulo de la Metodología y Datos, el valor de pH registrado en las muestras de suelos colectadas reflejan una condición ligeramente alcalino con valores de 7.62, 7.93 y 7.87 Und pH respectivamente. Condiciones óptimas para el desarrollo de un cultivo lo cual no genera restricciones a lo reglamentado en la Norma Louisiana (6,0 – 9,0 unidades).

Con base en los resultados obtenidos en los muestreos se puede afirmar que se logró degradar los siguientes contaminantes hasta alcanzar concentraciones permitidas en la la Norma Louisiana:

Tabla 15.

Concentraciones de aceites y grasas, humedad e hidrocarburos totales: Primer muestreo Vs. Segundo muestreo

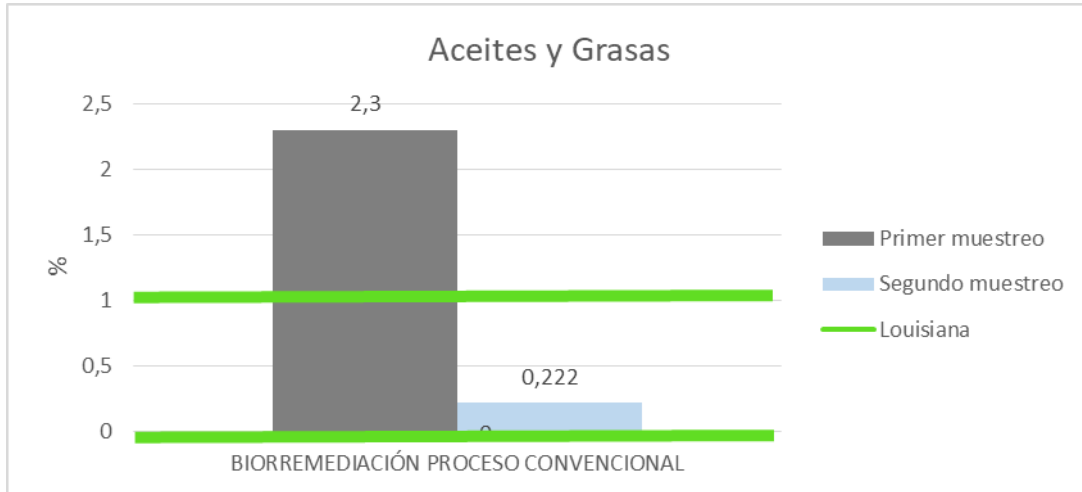
Parámetro %		BIORREMEDIACIÓN PROCESO CONVENCIONAL	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS FORÁNEAS	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS NATIVAS
		Resultado %	Resultado %	Resultado %
Aceites y grasas:	Primer muestreo	2,3	2,41	1,67
	Segundo muestreo	0,222	0,254	0,261
	Porcentaje de Remoción	90,3	89,5	84,4
Hidrocarburos totales	Primer muestreo	1,91	2,01	1,36
	Segundo muestreo	0,201	0,252	0,244
	Porcentaje de Remoción	89,5	87,5	82,1
Humedad	Primer muestreo	18	19	18
	Segundo muestreo	20	24,7	24,5
	Porcentaje de Mejora	11,1	30	36,1

Nota: Se evidencia el cambio porcentual obtenido al comparar los datos del primer muestreo con el segundo muestreo.

En la Tabla 15 se puede observar la comparación entre los hallazgos de los dos muestreos a nivel de: (i) Aceites y grasas los cuales en proceso convencional reportaron un porcentaje de remoción superior del 90.3% llevando el material desde un 2.3% a un 0.222% respecto al proceso de fitorremediación con plantas foráneas y el de las plantas nativas. (ii) En los Hidrocarburos totales se pudo determinar que nuevamente el porcentaje de remoción fue superior en el proceso convencional con un 89.5% llevando el material desde un 1.91% a un 0.201% respecto al proceso de fitorremediación con plantas foráneas y el de las plantas nativas. (iii) En cuanto a la Humedad se encontró que mejoró considerablemente para los ambientes plantados, sobresaliendo las plantas nativas, seguida de las plantas foráneas y por último el proceso convencional.

Figura 3.

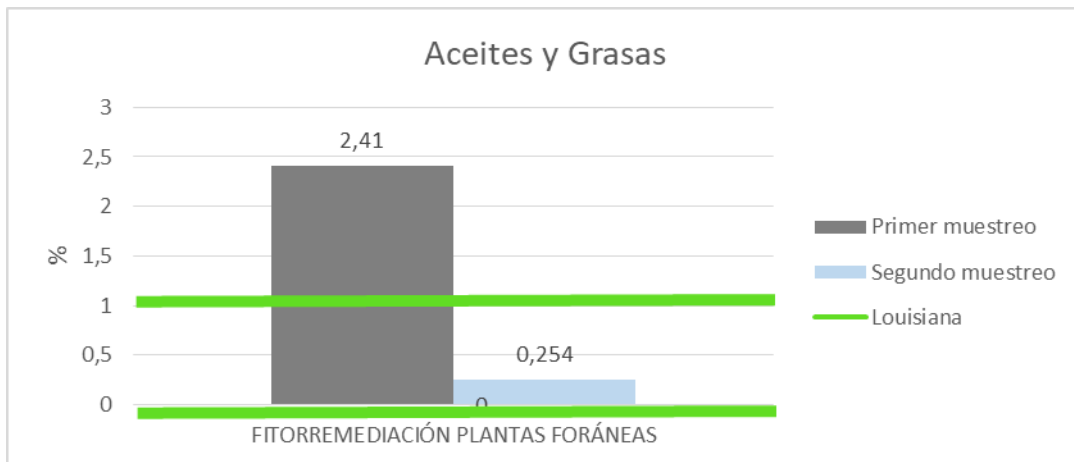
Reducción del porcentaje de aceites y grasas para el proceso de biorremediación convencional



Nota: En el grafico se muestra el cambio de las concentraciones en porcentaje para aceites y grasas evaluadas en el primer y segundo muestreo en el proceso de biorremediación convencional comparándolo con los rangos establecidos por la norma Louisiana 29B (<1%) alcanzado una remoción total del (90,3%).

Figura 4.

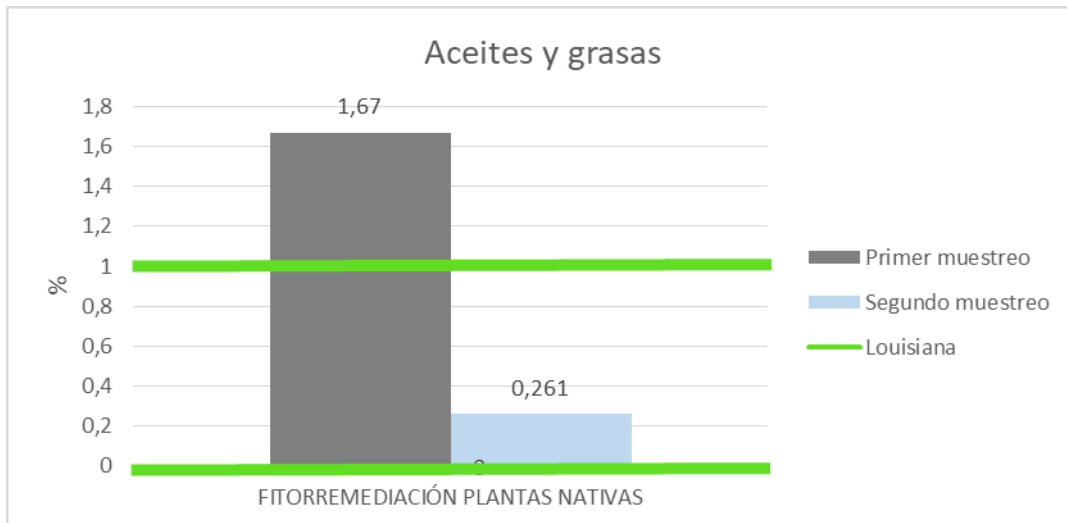
Reducción del porcentaje de aceites y grasas para el proceso de Fitoremediación multiproceso con plantas foráneas.



Nota: En el grafico se muestra el cambio de las concentraciones en porcentaje para aceites y grasas evaluadas en el primer y segundo muestreo en el proceso de biorremediación convencional comparándolo con los rangos establecidos por la norma Louisiana 29B (<1%) alcanzado una remoción total del (89,5%).

Figura 5.

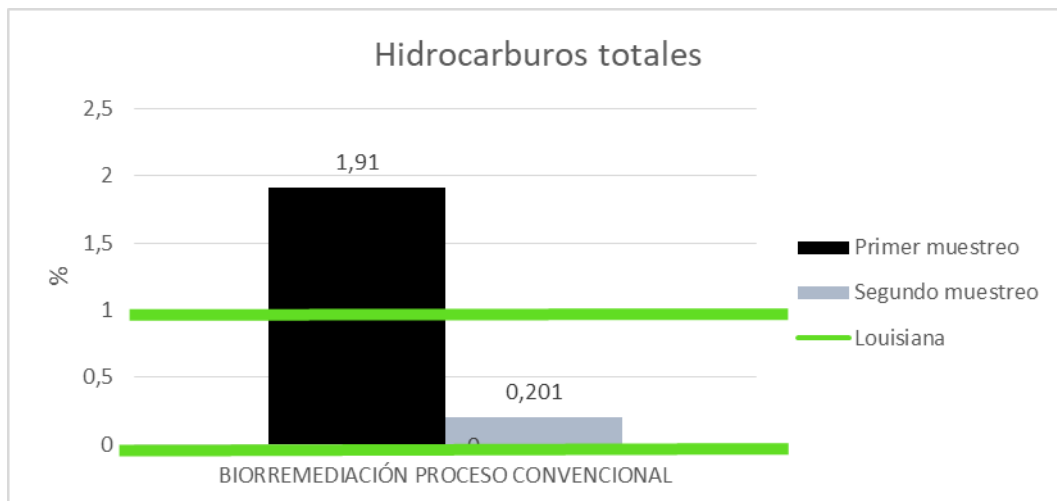
Reducción del porcentaje de aceites y grasas para el proceso de Fitorremediación multiproceso con plantas nativas.



Nota: En el grafico se muestra el cambio de las concentraciones en porcentaje para aceites y grasas evaluadas en el primer y segundo muestreo en el proceso de biorremediación convencional comparándolo con los rangos establecidos por la norma Louisiana 29B (<1%) alcanzado una remoción total del (84,4%).

Figura 6.

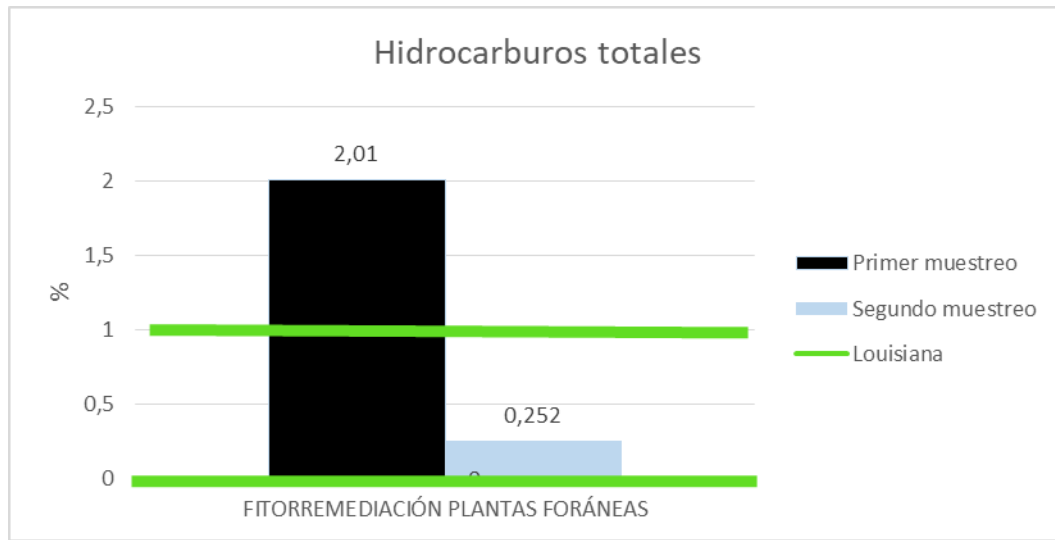
Reducción del porcentaje de hidrocarburos totales para el proceso de biorremediación convencional



Nota: En el grafico se muestra el cambio de las concentraciones en porcentaje para hidrocarburos totales evaluadas en el primer y segundo muestreo en el proceso de biorremediación convencional comparándolo con los rangos establecidos por la norma Louisiana 29B (<1%) alcanzado una remoción total del (89,5%).

Figura 7.

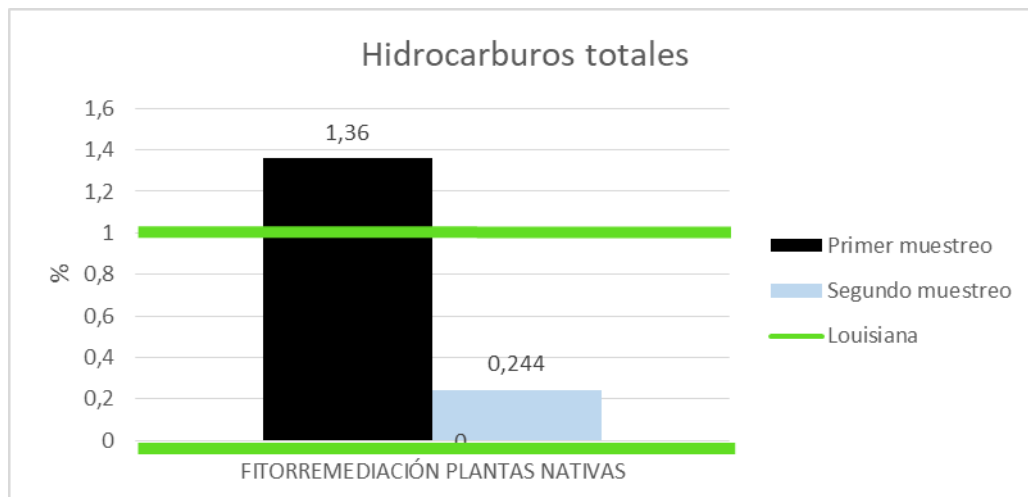
Reducción del porcentaje de hidrocarburos totales para el proceso de Fitorremediación con plantas foráneas.



Nota: En el grafico se muestra el cambio de las concentraciones en porcentaje para hidrocarburos totales evaluadas en el primer y segundo muestreo en el proceso de fitorremediación con plantas foráneas comparándolo con los rangos establecidos por la norma Louisiana 29B (<1%) alcanzado una remoción total del (87,5%).

Figura 8.

Reducción del porcentaje de hidrocarburos totales para el proceso de Fitorremediación con plantas nativas.



Nota: En el grafico se muestra el cambio de las concentraciones en porcentaje para hidrocarburos totales evaluadas en el primer y segundo muestreo en el proceso de fitorremediación con plantas foráneas comparándolo con los rangos establecidos por la norma Louisiana 29B (<1%) alcanzado una remoción total del (82,1%).

Para los resultados de aceites y grasas así como de hidrocarburos totales se encuentran por debajo del 1% en la toma de muestras el día del segundo muestreo, es decir, se encuentran dentro de los límites establecidos dentro de la norma Louisiana 29B.

Tabla 16.

pH, Conductividad y Zinc: Primer muestreo Vs. Segundo muestreo

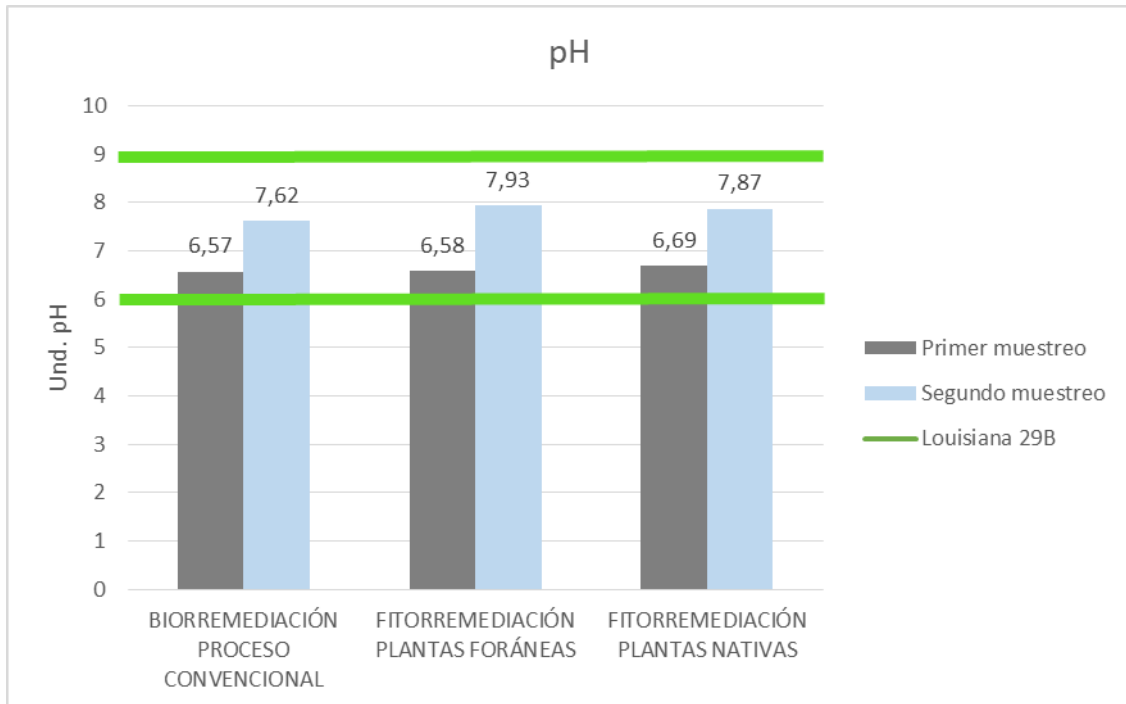
Parámetro		BIORREMEDIACIÓN PROCESO CONVENCIONAL	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS FORÁNEAS	FITORREMEDIACIÓN PLANTAS NATIVAS
		Resultado	Resultado	Resultado
pH (und. pH)	Primer muestreo	6,57	6,58	6,69
	Segundo muestreo	7,62	7,93	7,87
	Porcentaje de mejora	14,4%	20,5%	17,6%
Conductiv idad (μ S/cm)	Primer muestreo	0,333	0,327	0,329
	Segundo muestreo	0,311	0,31	0,299
	Porcentaje de mejora	6%	5%	9%
Zinc (mg Zn/kg)	Primer muestreo	87,6	77,8	74,6
	Segundo muestreo	50,4	60,6	64,1
	Porcentaje de asimilación	42,5%	22%	14,1%

Nota: Se evidencia el cambio porcentual obtenido al comparar los datos del primer muestreo con el segundo muestreo.

En la Tabla 16 se evidencia que el pH mejoró considerablemente obteniendo niveles propios de un cultivo de plantas para los pilotos plantados, donde el mejor rendimiento se evidenció en el piloto de las plantas foráneas con un porcentaje de mejora del 20.5% llevando el material desde un 6.58 und pH a 7.93 und pH, seguido del rendimiento observado en la fitorremediación con plantas nativas con un porcentaje de mejora del 17.6% llevando el material desde un 6.69 und pH a 7.87 und pH, y se encontró que en el proceso convencional el porcentaje de mejora fue de 14.4% llevando el material desde un 6.57 und pH a un 7.62 und pH. Estos resultados permiten definir que el suelo asimiló correctamente los insumos adicionados y por ende se encuentra en condiciones óptimas no requiriéndose más insumos.

Figura 9.

Valores de pH para los procesos de biorremediación convencional, fitorremediación con plantas foráneas y con plantas nativas.



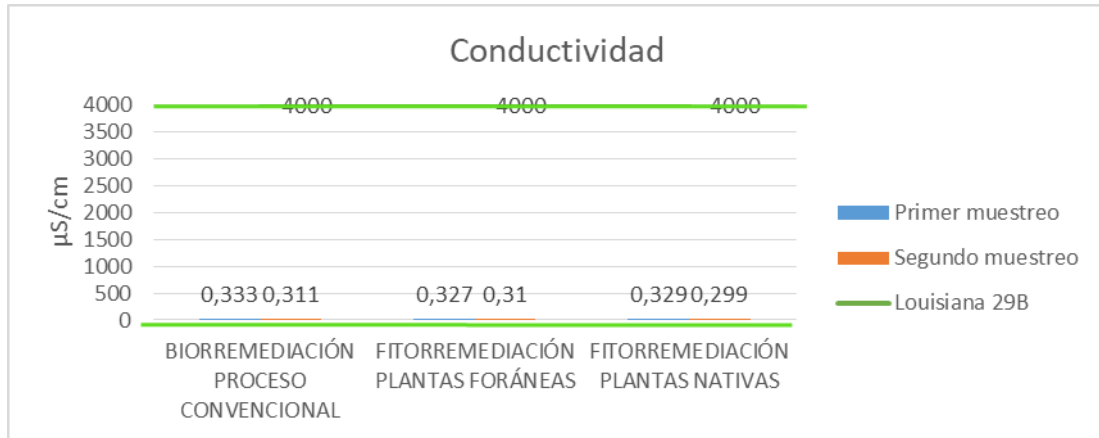
Nota: En el grafico se muestra el cambio de los valores de pH evaluados en el primer y segundo muestreo para los procesos de biorremediación convencional, fitorremediación con plantas nativas y con plantas foráneas. Comparándolo con los rangos establecidos por la norma Louisiana 29B (6-9 Und. pH) alcanzado un porcentaje de mejora de (14,4%) (20,5%) y (17,6%) respectivamente.

En lo relacionado con la conductividad es claro que los resultados obtenidos en el muestreo inicial y final no reportan cambios significativos con una mejora lo cual define el suelo como un ambiente normal con efectos de salinidad imperceptibles, porque el ambiente de plantas nativas reportó un porcentaje de mejora del 9% (0,299 $\mu\text{S}/\text{cm}$), el ambiente del proceso convencional un 6% (0,311 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el ambiente de plantas foráneas un 5% (0,31 $\mu\text{S}/\text{cm}$), es decir, que presentan una baja salinidad y en términos normativos son conformes a lo reglamentado en la Norma Louisiana 29B, en donde se

establece una conductividad máxima permisible de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Figura 10.

Valores de conductividad para los procesos de biorremediación convencional, fitorremediación con plantas foráneas y con plantas nativas.

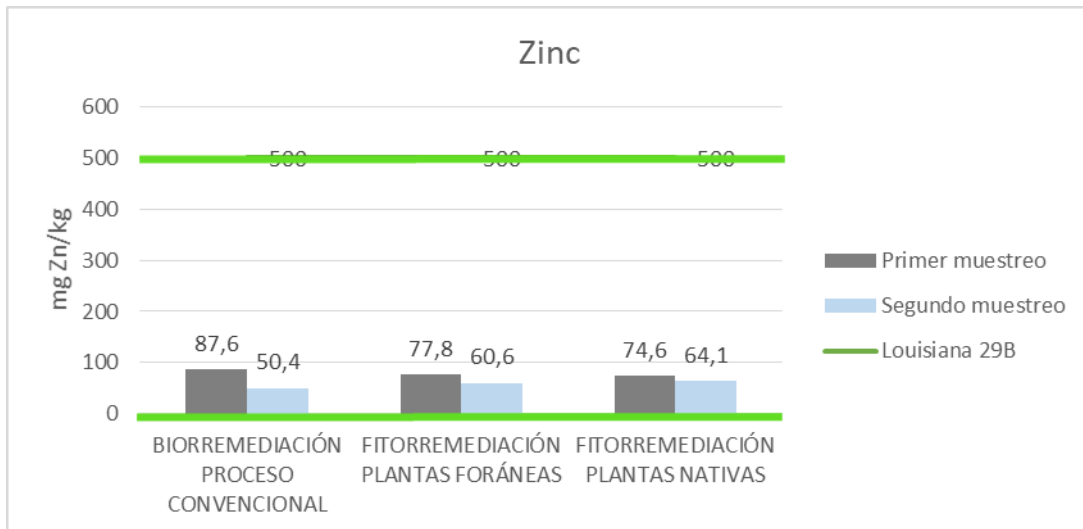


Nota: En el grafico se muestra el cambio de los valores de conductividad evaluados en el primer y segundo muestreo para los procesos de biorremediación convencional, fitorremediación con plantas nativas y con plantas foráneas. Comparándolo con los rangos establecidos por la norma Louisiana 29B (0-4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) alcanzado un porcentaje de mejora de (6%) (5%) y (9%) respectivamente.

En cuanto al Zinc se denota que fue aprovechado por el suelo con los siguientes porcentajes de asimilación: Proceso convencional con el 42.5%, plantas foráneas con el 22% y plantas nativas con el 14.1%; estos resultados permiten definir que el Zinc contribuyó al desarrollo vegetativo de la planta además de su reproducción. Igualmente se encontró que en general los metales se mantuvieron dentro de los límites permisibles de la Norma Louisiana 29B.

Figura 11.

Valores de Zinc para los procesos de biorremediación convencional, fitorremediación con plantas foráneas y con plantas nativas.



Nota: En el gráfico se muestra el cambio de los valores de Zinc evaluados en el primer y segundo muestreo para los procesos de biorremediación convencional, fitorremediación con plantas nativas y con plantas foráneas. Comparándolo con los rangos establecidos por la norma Louisiana 29B (0-500 mgZn/kg) alcanzado un porcentaje de asimilación de (42,5%) (22%) y (14,1%) respectivamente.

3.3. Análisis y discusión de resultados

En el caso de este proyecto de investigación fue claro que la planta vetiver obtuvo un mejor rendimiento de los procesos de fitorremediación, denotándose que el piloto de biorremediación convencional también obtuvo resultados favorables, por lo que cualquiera de estas dos opciones cumplen los estándares exigidos por la Norma Louisiana 29B [1].

Igualmente se destaca que las plantas nativas presentaron un rendimiento menor en cuanto a nivel de aceites y grasas e hidrocarburos presentes, resaltando que al igual que en los otros procesos los resultados se mantuvieron dentro de los límites permisibles de la Norma Louisiana 29B [1].

En cuanto a los resultados obtenidos para los metales reglamentados en la norma Louisiana 29B se evidencio que en los dos muestreos realizados las concentraciones presentas valores inferiores a los límites de cuantificación de las técnicas de análisis para el caso del arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, selenio y mercurio. Se destaca que los niveles de concentración de los metales, al no encontrarse dentro de los límites de cuantificación de las técnicas de análisis se puede inferir que la presencia de metales es casi nula y en este caso el suelo analizado no afecta el desarrollo del ambiente según la norma Louisiana 29B.

Los hallazgos del presente proyecto de investigación en cuanto a los efectos de remoción para la especie *Vetiveria zizanoides*, concuerdan con los encontrados en estudios como el de Brandt, Merkl, Schultze-Kraft e Infante [26], Eapen, Singh y D'Souza [27], Cho, Yavuz-Corapcioglu, Park y Sung [28], Delgadillo, González, Prieto, Villagómez y Acevedo [41], dado que éstas son utilizadas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes.

En concordancia con estos resultados, los hallazgos del presente proyecto de investigación también se encuentran acordes con lo descrito por el estudio de Brandt, Merkl, Schultze-Kraft e Infante [26] quienes afirman que la planta vetiver se puede utilizar con resultados eficaces para melioración o mejoramiento de los suelos contaminados por el crudo (según los resultados de su ensayo llevado a cabo en seis meses), dado que este tipo de planta actúa como una especie de bomba orgánica además de ejercer control de la erosión para prevenir la distribución de contaminantes en suelos contaminados por hidrocarburos. Además, esta planta tiene la ventaja de presentar una alta capacidad de producción de hijos en suelo sin contaminantes y se

denota una mayor eficacia bajo la influencia de los residuos derivados de la operación petrolera

Lo anterior en razón a que las empresas de exploración, explotación, producción de hidrocarburos son altamente generadoras de residuos contaminantes que generan un impacto ambiental y el uso de técnicas de remediación se hace indispensable dado que su gran ventaja y fortaleza radica en que son técnicas amigables con el medio ambiente ya que eliminan del suelo los contaminantes de manera eficiente con la ayuda de componentes orgánicos.

De igual forma en el presente proyecto de investigación se encontraron resultados que concuerdan con los hallazgos descritos en el estudio de Cho, Yavuz-Corapcioglu, Park y Sung [28] quienes encontraron un menor porcentaje contaminantes en las muestras de brotes, raíces y suelo en un sistema a cielo abierto con suelo contaminado, teniendo la precaución de realizar una adición controlada de bacterias degradadoras periódicamente buscando controlar la humedad y mantenerla dentro de los estándares ideales para un ambiente plantado y contribuir con la eliminación del contaminante.

En este sentido el estudio de Brandt, Merkl, Schultze-Kraft e Infante [26] define que la degradación enzimática mediada por microbios es el mecanismo principal de eliminación de hidrocarburos en los procesos de fitorremediación dado que los exudados de las raíces de las plantas pueden influir directamente en la eliminación de los hidrocarburos totales presentes - TPH al secretar enzimas extracelulares como lacasas y peroxidasas. Además, es necesario indicar que los hongos micorrízicos arbusculares - AMF juegan un papel importante en la disipación de moléculas de TPH al proporcionar enzimas extracelulares.

Pese a que la fitorremediación está incluida en la lista de métodos in situ prioritarios para la rehabilitación de suelos contaminados con TPH, la aplicación de plantas por sí sola puede tener una eficacia de remediación limitada [26]. Para reducir el tiempo de tratamiento del suelo y mejorar la eficiencia de la remediación de la fitorremediación,

esta tecnología se puede combinar con diferentes enfoques [9], los cuales abarcan la adición de enmiendas del suelo inorgánicas (nutrientes, fertilizantes, tensioactivos) y orgánicas (compost, biocarbón), inoculación del suelo o de las plantas (semillas) con cepas microbianas endofíticas o rizosféricas, la aplicación de microbios o plantas transgénicas y enfoques integrados [11].

Al igual que el estudio de Brandt, Merkl, Schultze-Kraft e Infante [26], en el presente proyecto de investigación se no solo se utilizó el potencial natural de las plantas y sus microbios asociados, sino que se agregaron enmiendas al suelo con el fin de mejorar el proceso el uso de bacterias biodegradadoras bioaumentadas disponibles en el campo.

En este sentido estudios como los de Ansari, Singh, Gill, Lanza y L. Newman [14] y de Siciliano y Germida [24] encontraron que el proceso de bioestimulación con fertilizantes inorgánicos conduce a una mayor disipación de hidrocarburos que cuando se trabaja solo con abono orgánico, por esta razón su combinación resulta ser más efectiva, y con base en estas afirmaciones en el presente proyecto de investigación se utilizaron los dichos procesos.

Adicionalmente y de acuerdo a Ansari, Singh, Gill, Lanza y Newman [14], Hussain et. al. [15] así como Siciliano y Germida [24], se optó por la realización de un sistema de fitorremediación multiproceso el cual se basa en la combinación de tres procesos principales: (i) La tierra agricultura (aireación y fotooxidación), (ii) biorremediación (inoculación de bacterias degradadoras) y (iii) fitorremediación (uso exclusivo de plantas), porque se ha encontrado que la aplicación sinérgica de múltiples técnicas estimula los procesos de remediación al aprovechar los beneficios de cada componente. Al aplicar el proceso de fitorremediación multiproceso se pueden considerar dos pasos para completar eliminación de hidrocarburos de petróleo: (i) Pretratamiento del suelo mediante prácticas agronómicas adecuadas, como la labranza, garantiza una mezcla adecuada de capas de suelo para homogeneizar los puntos calientes y permite la aireación para fotoquímica degradación de hidrocarburos de petróleo de bajo peso molecular; se pueden agregar niveles apropiados de

fertilizantes orgánicos e inorgánicos mejorar la labranza del suelo, la germinación de semillas y el crecimiento de las plantas. (ii) Inocular semillas/plantas con bacterias degradadoras a ambos mejorar la tolerancia de las plantas y promover los degradadores de hidrocarburos. Con fitorremediación multiproceso, una mezcla de plantas (por ejemplo, gramíneas con leguminosas) puede producir más biomasa de raíces y sustentar diferentes comunidades microbianas en la rizosfera.

Además, de que esta técnica permite a la empresa reducir costos en cuanto a maquinaria y operarios evitando el retrabajo de los materiales que presenten características de tratamiento complicadas. En este sentido el estudio de Garbisu, Becerril, Epelde y Alkort [29] señalan la importancia de reducir las concentraciones de contaminantes del suelo hasta alcanzar los límites marcados en la legislación principalmente con la meta de recuperar la salud del suelo en términos de aquella capacidad de este recurso para realizar sus funciones y proveer sus servicios de una forma sostenible desde una doble perspectiva ambientalmente amigable y bajo las exigencias de la norma Louisiana [1].

La técnica de fitorremediación multiproceso implementada para las dos especies de plantas demostró ser un proceso efectivo en la remoción del total de hidrocarburos presentes y en la degradación de aceites y grasas en el suelo, mejorando la humedad y conductividad de este, debido a que el proceso de fitorremediación junto con la adición de enmiendas orgánicas (gallinaza) y la inoculación con bacterias degradadoras bioaumentadas logra una eficiencia aceptable dentro de los marcos legales además con base en la investigación realizada se corrobora la hipótesis planteada y se respalda con los resultados de laboratorio obtenidos.

Por ello igualmente se requiere de estudios en los que se actualicen los conocimientos específicamente en el medio colombiano respecto al cumplimiento de las normas ambientales vigentes a fin de dar cumplimiento a las exigencias planteadas en la Licencia Ambiental de la empresas AW Company S.A.S. buscando prevenir multas y cierres parciales o definitivos que necesariamente implicarían no solo pérdidas

económicas sino también el nivel de competitividad de la empresa frente a la competencia dado que es claro que aquellas organizaciones que apliquen políticas amigables con el medio ambiente, son las que tendrán mejores expectativas futuras.

Pese a que la temática de análisis en la presente investigación tiene una orientación netamente de ingeniería de petróleos, hallazgos de estudios futuros podrían alimentar bases para otras especialidades como la ingeniería ambiental, agronomía, ecología, ecosistemas, remediación de suelos y aguas, laboratorio, biología y microbiología, toxicología, diseño de procesos ambientalmente amigables, correlación de los sistemas de valoración de los métodos de biorremediación Vs. métodos de fitorremediación, entre otros.

4. CONCLUSIONES

En términos normativos se destacó en este proyecto de investigación el cumplimiento a conformidad de la totalidad de los de resultados obtenidos para los parámetros mencionados analizados según los estándares reglamentados en la Norma Louisiana 29B/1999 (LAC 43: XIX, Subpart 1, StatewideOrder No. 29B, Chapter 3) [1].

Por ello se confirma la hipótesis planteada para efectos del presente proyecto de investigación, la cual indica que, mediante la implementación de un piloto de fitorremediación multiproceso se garantizará el cumplimiento de las concentraciones inocuas de los siguientes parámetros fisicoquímicos contemplados en la Norma Louisiana 29B: pH, conductividad, humedad, nitrógeno total, fosforo total, TPH, arsénico, bario, cadmio, cromo+6, plomo, zinc, mercurio, selenio, potasio, RAS y ESP.

Para el caso de los procesos de fitorremediación se pudo concluir que la planta vetiver presenta una mejor adaptación al medio contaminado, debido a que evidencia un mayor crecimiento y tamaño de raíz, además presenta una mejor degradación de contaminantes según los resultados obtenidos en la eliminación de hidrocarburos totales, aceites y grasas logrando un porcentaje de degradación del 87,5% y 89,5% respectivamente; en cuanto a la fitorremediación con plantas nativas los resultados obtenido en la eliminación de hidrocarburos totales, aceites y grasas fueron de 82,1% y 84,4% respectivamente. En el caso de la biorremediación convencional se presentó una eliminación de hidrocarburos totales, aceites y grasas del 89,5% y 90,3% respectivamente. Por lo que se recomienda seguir implementando el piloto de fitorremediación multiproceso especialmente para materiales contaminados que estén generando retrasos de entrega en la Fase 3 del proceso de biorremediación convencional debido a su difícil manejo.

Para el parámetro de pH se obtuvieron inicialmente valores de: biorremediación 6,57 Und pH, fitorremediación plantas foráneas 6,58 Und pH y fitorremediación plantas nativas 6,69 Und pH, mostrando una significativa mejora a la hora del análisis del

segundo muestreo con un porcentaje de mejora del (14,4%) (20,5%) y (17,6%) respectivamente, demostrando que las enmiendas orgánicas escogidas y las cantidades adicionadas a lo largo del proceso fueron las adecuadas para mantener el suelo en condiciones óptimas de cultivo.

Con los valores reportados en el análisis de conductividad presentado por el laboratorio, para los procesos de biorremediación convencional, fitorremediación con plantas foráneas y fitorremediación con plantas nativas podemos definir el suelo como un ambiente normal con efectos de salinidad imperceptibles. Se evidenció que en tanto el muestreo 1 como el muestreo 2 los efectos de salinidad fueron insignificantes y en términos normativos son conformes a lo reglamentado en la Norma Louisiana 29B, en donde se establece una conductividad máxima permisible de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A pesar de lo anterior hubo una mejora en este parámetro del (6%) (5%) y (9%) respectivamente.

REFERENCIAS

- [1] Department of Natural Resources of The United State. "Louisiana Standard 29B Section XIX 301 - 323: LR 26:2798 (December 2000), amended LR 33:1653 (August 2007), LR 36:2570 (November 2010)". Current through Register, 46(6), 5-26. [En línea]. Disponible en <https://n9.cl/1393q>.
- [2] AW Company S.A.S. Resolución 5.41.12-1627: Por medio de la cual se otorga una Licencia Ambiental. Bogotá: Corporinoquía, 2012 (7 de diciembre).
- [3] F. Mellizo. Biorrecuperación de sedimentos contaminados con hidrocarburos totales generados en las estaciones de servicio. 2017. Trabajo de grado Magister en Ingeniería Ambiental, 1-98. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/59125/1/201710691352.pdf>.
- [4] S. Hoang, D. Lamb, B. Seshadri, B. Sarkar, G. Choppala, M. Kirkham, N. Bolan. Rhizoremediation as a green technology for the remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils. 2016, Journal of Hazardous Materials, 401:123282. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123282.
- [5] R. Iturbe. ¿Qué es la biorremediación?. Serie Ciencia de Boleto, 11. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010. ISBN 978-607-02-1267-3.
- [6] Consorcio Rubiales. Especificaciones técnicas: Disposición y tratamiento de residuos. Puerto Gaitán (Meta): El Consorcio, 2020. p. 1-31.
- [7] European Regional Development Found. ¿Qué es la fitorremediación?. 2019, Blog Proyecto PhytoSUDOE, 1-4. [En línea]. Disponible en: <http://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/>.
- [8] S. Susarla, V. Medina Y S. McCutcheon. Phytoremediation: An Ecological Solution to Organic Chemical Contamination. 2002, Ecological Engineering 18(5):647-658. DOI: 10.1016/S0925-8574(02)00026-5.
- [9] United States Environmental Protection Agency. Phytoremediation Resource Guide. 1999, EPA, 1-56. [En línea]. Disponible en: <https://semspub.epa.gov/work/HQ/189992.pdf>.

- [10] E. Pilon-Smits. Phytoremediation. 2005, Annual Review of Plant Biology, 56:15-39. [En línea]. Disponible en: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>.
- [11] H. Moriwaka y O. Erkin. Basic processes in phytoremediation and some applications to air pollution control. 2003, Chemosphere 52(9):1553-1558. DOI: 10.1016/S0045-6535(03)00495-8.
- [12] R. Brooks, M. Chambers, L. Nicks y B. Robinson. Phytomining. 1998, Trends in Plant Science, 3(9), 359-362. [En línea]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01283-7](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01283-7).
- [13] A. Gerth. Phytoremediation of soil and sludge with special examination of heavy metal contamination. En Wise, D.L., Trandolo, D.J., Chichon, E.J., Inyang, H.I., Stottmeister, U. (Eds.). Bioremediation of Contaminated Soils (pp. 787-809). New York: U.S. Marcel Dekker, Inc, 2000.
- [14] A. Ansari, S. Singh, R. Gill, G. Lanza y L. Newman, L. Phytoremediation: Management of environmental contaminants. New York: Springer, 2014. ISBN 978-3-319-10395-2.
- [15] I. Hussain et. al. Rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: Improvement opportunities and field applications. 2017, Environmental and Experimental Botany, 147, 202-219. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S009884721730343X>.
- [16] M. Steciow. Rizósfera. 2017, Blog Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, 1-2. [En línea]. Disponible en: <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Rizosfera.htm>.
- [17] A. Trotta, P. Falaschi, L. Cornara, V. Minganti, A. Fusconi, G. Drava y G. Berta. Arbuscular mycorrhizae increase the arsenic translocation factor in the As hyperaccumulating fern *Pteris vittata* L. 2006, Chemosphere, 65(1):74-81. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.02.048.
- [18] M. Fomina, J. Charnock, S. Hillier, I. Alexander y G. Gadd, Zinc Phosphate transformations by the *paxillus involutus*/pine ectomycorrhizal association. 2006 Ecology, 52(2), 322-333. DOI: 10.1007/s00248-006-9004-5.






- [19] B. Chen, Y. Zhu y F. Smith. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on uranium and arsenic accumulation by Chinese brake fernf (*Pteris vittata* L.) from a uranium mining impacted soil. 2006, *Chemosphere* 62(9), 1464-1473. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653505008179>.
- [20] C. Frick, R. Farrell y J. Germida. *Assesments of Phytoremediation as an In Situ Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites*. Saskatoon, SK Canada: Department of Soil Science. University of Saskatchewan, 1999.
- [21] A. Khan. Role of soil microbes in the rizosphere of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. 2005, *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18(4), 355-364. DOI: 10.1016/j.jtemb.2005.02.006.
- [22] P. White. Phytoremediation assisted by microorganisms. 2001, *Trends in Plant Science*, 6(11), 502. DOI: 10.1016/s1360-1385(01)02093-3.
- [23] F. Volkering, A. Breure y W. Rulkens. Microbiological aspects of surfactante use for biological soil remediation. 1998, *Biodegradation*, 8(6), 401-417. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008291130109>.
- [24] S. Siciliano y J. Germida. Mechanisms of phytoremediation, biochemical and ecological interactions between plants and bacteria. 1998, *Environmental Reviews*, 6(1), 65-79. DOI: 10.1139/er-6-1-65.
- [25] A. Espinoza. ¿Qué es una planta rizomatosa?. 2020, *Blog Guía de Jardinería*, 1-11. [En línea]. Disponible en: <https://www.guiadejardineria.com/que-es-una-especie-rizomatosa/>.
- [26] R. Brandt, N. Merkl, R. Schultze-Kraft y C. Infante, C. Potential of vetiver (*Vetiveria zizanoides* L. Nash) for phytoremediation of hydrocarbon contaminated soils in Venezuela. 2006, *International Journal of Phytoremediation*. 8(4), 273-284. DOI: 10.1080/15226510600992808.
- [27] S. Eapen, S. Singh y S. D'Souza. Advances in development of transgenic plants for remediation of xenobiotic pollutants. 2007, *Biotechnology Advances*. 25(5), 442-451. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.05.001.
- [28] C. Cho, M. Yavuz-Corapcioglu, S. Park y K. Sung. Effects of Grasses on the Fate of VOCs in Contaminated Soil and Air. 2008, *Water, Air, & Soil Pollution*. 187(),

- 243-250. DOI: 10.1007/s11270-007-9512-z.
- [29] C. Garbisu, J. Becerril, L. Epelde e I. Alkort. Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador. 2007, *Ecosistemas*. 16(2), 44-49. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/39439868_Bioindicadores_de_la_calidad_del_suelo_herramienta_metodologica_para_la_evaluacion_de_la_eficacia_de_un_proceso_fitorremediador.
- [30] Amerex Argentina. BIOAUMENTACIÓN: Una solución para aumentar la eficacia y la eficiencia en las plantas de tratamiento de efluentes. 2019, Blog Amerex Innovación y Experiencia, 1-5. [En línea]. Disponible en: <http://www.labamerex.com/novedad019.htm>.
- [31] I. Velázquez y J. Pereira. Emulsiones de agua en crudo. Aspectos Generales. 2014, *Revista Ingeniería UC*, 21(3), 45-54. [En línea]. Disponible en: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v21n3/art06.pdf>.
- [32] S. Marfisi. Estabilidad de la Emulsiones relacionadas con el proceso de deshidratación de Crudos. Tesis doctoral. Mérida (Venezuela): Universidad de los Andes, 2005.
- [33] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 1001: Por la cual se otorga una licencia ambiental y se toman otras determinaciones. Bogotá: El Ministerio, 2010. (25, mayo).
- [34] I. Pachón. Salinidad: Consideraciones de manejo en Nutrigación®. 2019, Blog MetroFlor. [En línea]. Disponible en: <http://www.metroflorcolombia.com/salinidad-consideraciones-de-manejo-en-nutrigacion/>.
- [35] Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de México. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Instituto nacional de investigaciones agrícolas. México: Secretaría de agricultura y ganadería, 1962.
- [36] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista. Metodología de la investigación. 6 ed. México: McGraw Hill, 2014. p. 1-634. ISBN: 978-1-4562-2396-0.
- [37] Z. Kiamarsi, M. Kafi, M. Soleimani, A. Nezami y S. Lutts, S. Conjunction of *Vetiveria zizanioides* L. and oil-degrading bacteria as a promising technique for the remediation of crude oil contaminated soils. 2020, *J. Limpio*. Pinchar, 253,

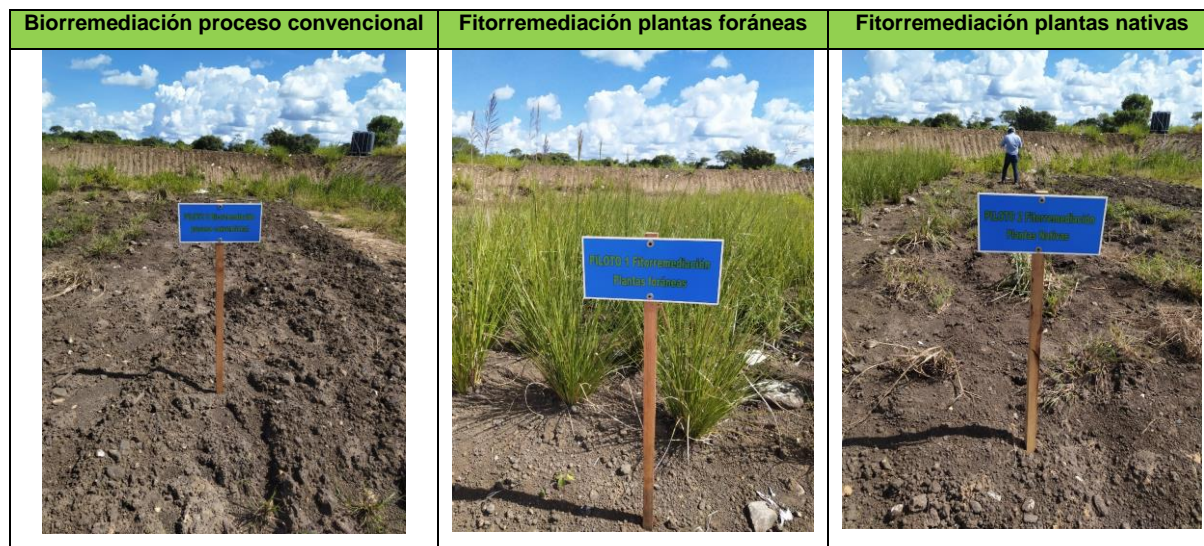
119719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119719>.

- [38] S. Fernández, J. Cordero y A. Córdova A. Estadística descriptiva. 2 ed. Madrid: ESIC, 2002. p. 1-566.
- [39] W. Martínez. Estadística descriptiva con énfasis en salud pública. Bolivia: Editorial La Hoguera, 2002. p. 1-177.
- [40] G. Álvaro. Medidas de sodicidad: RAS y PSI. 2019, Blog Análisis de Suelos, 1-12. [En línea]. Disponible en: <https://www.fertibox.net/single-post/ras-psi>.
- [41] A. Delgadillo, C. González, F. Prieto, J. Villagómez y O. Acevedo. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. 2011, Tropical and Subtropical Agroecosystems, 14 (2): 597- 612. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>.

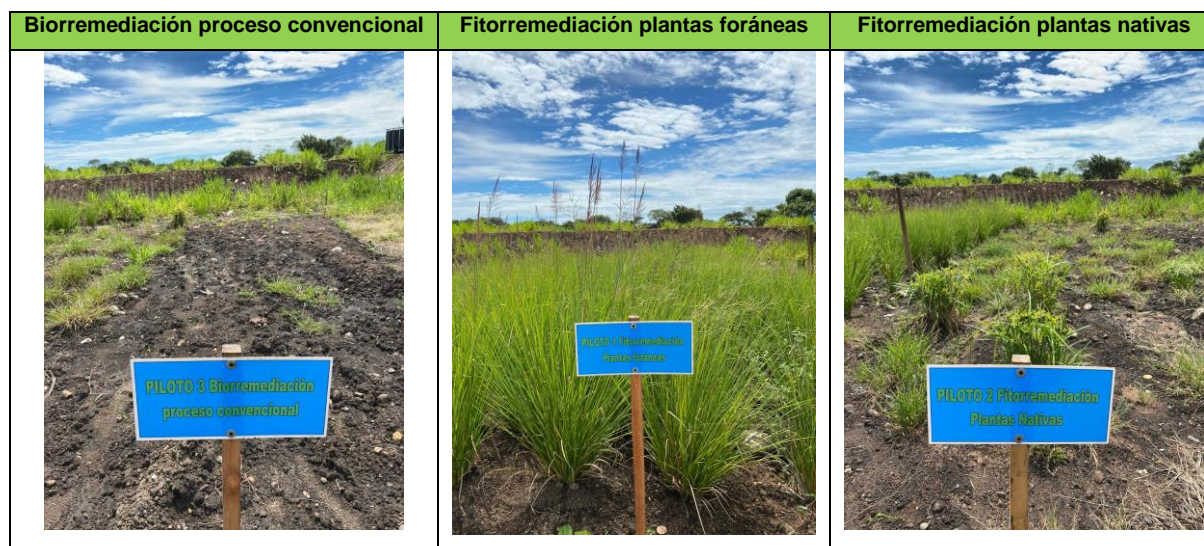
ANEXO 1. RESEÑA FOTOGRÁFICA

REGISTRO FOTOGRÁFICO	ACTIVIDAD
	El 26 de julio de 2020 se realizó la plantación de los pilotos de fitorremediación.
	Adición de Bacterias degradadoras bioaumentadas: 36 L semanal.
	Adición de Gallinaza (carga inicial: 60%, segunda y tercera carga: 20% cada 10 días).
	El 25 de septiembre el laboratorio realiza el primer muestreo.
	El 3 de noviembre el laboratorio realiza el segundo muestreo.

Nota: Reseña fotográfica tomada desde el 26 de julio hasta el 25 de septiembre durante el primer muestreo, y el 3 de noviembre correspondiendo al segundo muestreo.




Nota: Reseña fotográfica tomada desde el 25 de septiembre durante el primer muestreo.



Nota: Reseña fotográfica tomada el 3 de noviembre, día del segundo muestreo.

ANEXO 2.

MODELO DE BITÁCORA DE ADICIÓN DE INSUMOS

	MES	SEPTIEMBRE		OCTUBRE	
	ACTIVIDAD	FECHA	CANT. (L)	FECHA	CANT. (L)
ADICION BACTERIAS					
semana 1				2-oct-20	36
semana 2				9-oct-20	36
semana 3				16-oct-20	36
semana 4		25-sep-20	36	23-oct-20	36
semana 5				30-oct-20	36

Nota: Bitácora de adición de bacterias degradadoras.

	MES	SEPTIEMBRE		OCTUBRE	
	ACTIVIDAD	FECHA	CANT. (Kg)	FECHA	CANT. (Kg)
ADICION GALLINAZA					
1ra CARGA		25-sep-20	120	5-oct-20	40
2da CARGA				15-oct-20	40
3ra CARGA				25-oct-20	40

Nota: Bitácora adición de gallinaza.

ANEXO 3.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los hallazgos de la presente investigación se recomienda que se busque la mejor forma de que los resultados de laboratorio acreditado sean entregados de forma más rápida y que el plan de muestreo en lo posible se realice de forma más rigurosa, esto con el fin de que futuros grupos de investigación obtengan resultados más exactos y acertados.

Asimismo, se recomienda en futuras investigaciones que se tenga en cuenta la realización de estudio general en el cual se verifique la presencia de bacterias y un grupo de estas, evaluando igualmente la presencia de hongos definiendo cuales están en este tipo de suelo.

Para tales efectos igualmente se sugieren estudios que cubran un período más prolongado al utilizado en esta investigación el cual cubrió desde julio hasta noviembre de 2020 (5 meses) sugiriendo un lapso de 12 meses para un material con una concentración de contaminantes mayor, y de esta forma lograr un mejor establecimiento del suelo para eventualmente esperar tasas de biodegradación más altas en presencia de ambientes plantados.

Con base en esto también se sugiere realizar los análisis de bacterias mesófilas, bacterias heterótrofas y recuento e identificación de hongos, esto con el fin de conocer más a fondo la interacción que ocurre entre las bacterias degradadoras introducidas y el hábitat microbiano presente en las raíces de las plantas.

Al Programa de Ingeniería de Petróleos de la Facultad de Ingenierías de la Fundación Universidad de América, se le recomienda que la asignatura Gestión Ambiental esté incluida con carácter obligatorio en el pensum del Programa de Ingeniería de Petróleos buscando ahondar más en el tema de este estudio a través de cátedras teórico prácticas respecto a la remediación de suelos y aguas contaminadas

por residuos de la industria, para que los estudiantes puedan reforzar sus conocimientos en esta área.

