



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 22 de mayo de 2018

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad Neiva

Las suscritas Omaira Sanchez Ortiz con C.C. No. 1075297389, María Alexandra Velásquez Olarte con C.C. No. 1075295407, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado Evaluación Técnica-Económica para Área Landfarming Contaminada con un Crudo Liviano, Usando Abono 100% Orgánico de la Empresa Ceagrodex. Presentado y aprobado en el año 2018 como requisito para optar al título de Ingenieras de petróleos.

Autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Omaira Sanchez Ortiz

Firma: _____

Maria Alexandra Velasquez Olarte

Firma: _____



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Evaluación técnica económica para área landfarming contaminada con un crudo liviano, usando abono 100% orgánico de la empresa Ceagrodex

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Sanchez Ortiz	Omaira
Velásquez Olarte	María Alexandra

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Vargas Castellanos	Constanza

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Pinzón Torres	Carmen
Botero Rojas	Luz Marina

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingenieras de petróleos

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería de petróleos

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2018

NÚMERO DE PÁGINAS: 98

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos Ilustraciones en general Grabados
Láminas Litografías Mapas Música impresa Planos Retratos Sin ilustraciones
Tablas o Cuadros

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

Vigilada mieducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

Inglés

- | | |
|--------------------------------------|------------------------------|
| 1. Biorremediación | Bioremediation |
| 2. Landfarming | Landfarming |
| 3. Suelos contaminados | Oil Contaminated Soils |
| 4. Hidrocarburos totales de petróleo | Total petroleum hydrocarbons |

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

El proceso de biorremediación aeróbica de un suelo contaminado con hidrocarburos provenientes del petróleo, empleando como agente aportante de nutrientes y bacterias, un abono 100% orgánico producido por la empresa CEAGRODEX, fue analizado a través de una planta piloto en la que se mantuvo condiciones de experimentación controladas.

Para la experimentación se empleó suelos franco arcilloso, color light olive brown, conductividad y salinidad de 255,0 mV, densidad 1,26 g/mL, humedad de 18%, pH 6,33 y porosidad 56,5% proveniente de la propiedad privada La Bonita en cercanías a la ciudad de Neiva, en donde se instaló la planta piloto; el crudo de 37° API proveniente de la batería Tenay, fue suministrado por ECOPETROL; el agente biorremediador fue el abono producido por CEAGRODEX, con capacidad de retención de humedad de 192%.

El proceso de experimentación seguido consistió en una mezcla 1:1 suelo:abono, expuesta a diferentes concentraciones de hidrocarburos 3, 5 y 10% (en peso), controlando la humedad en 150 y 250 g H₂O/kg de suelo y el pH en 7 y 9, obteniendo que bajo las condiciones controladas se logró disminuir el TPH hasta valores inferiores al 1%, dando cumplimiento a la normativa internacional de Louisiana 29B (3%) y API (1%) en un máximo de 65 días.

La evaluación de costos indicó que usando esta técnica se tendría un ahorro del 15 al 70% comparado con métodos convencionales comerciales.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The process of aerobic bioremediation of a soil contaminated with petroleum hydrocarbons, using as a contributing agent of nutrients and bacteria, a 100% organic fertilizer produced by the company CEAGRODEX, it was analyzed through a plant Pilot in which experimentation conditions were kept under control.

For the experimentation is used clay loam soils, color light olive brown, conductivity and salinity of 255.0 MV, density 1.26 gr/mL, humidity of 18%, PH 6.33 and porosity 56.5% from private property La Bonita near the city of Neiva, where it was installed The pilot plant; The 37 ° API crude from the Tenay Battery was supplied by ECOPETROL; The remedy agent was the fertilizer produced by CEAGRODEX, with a capacity of retention of humidity of 192%.

The process of experimentation consisted in a 1:1 mixture soil:compost, exposed to different concentrations of hydrocarbons 3, 5 and 10% (by weight), controlling humidity in 150 and 250 g H₂O/kg of soil and pH at 7 and 9, obtaining that under the controlled conditions the TPH managed to be diminished up to values lower than 1 %, giving fulfillment to the international regulation of Louisiana 29B (3 %) and API (1 %) in a maximum of 65 days.

The cost assessment indicated that using this technique would have a savings of 15 - 70% compared with conventional commercial methods.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Constanza Vargas Castellanos

Firma:

Nombre Jurado: Carmen Pinzón Torres

Firma:

Nombre Jurado: Luz Marina Botero Rojas

Firma:

**EVALUACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA PARA ÁREA LANDFARMING
CONTAMINADA CON UN CRUDO LIVIANO, USANDO ABONO 100%
ORGÁNICO DE LA EMPRESA CEAGRODEX**

**OMAIRA SÁNCHEZ ORTIZ
MARÍA ALEXANDRA VELÁSQUEZ OLARTE**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA, HUILA
2018**

**EVALUACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA PARA ÁREA LANDFARMING
CONTAMINADA CON UN CRUDO LIVIANO, USANDO ABONO 100%
ORGÁNICO DE LA EMPRESA CEAGRODEX**

**OMAIRA SANCHEZ ORTIZ
MARÍA ALEXANDRA VELÁSQUEZ OLARTE**

Proyecto de grado como requisito para optar el título de Ingenieras de Petróleos

Director
Ms. CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS
Ingeniera de Petróleos

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA, HUILA
2018**

**EVALUACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA PARA ÁREA LANDFARMING
CONTAMINADA CON UN CRUDO LIVIANO, USANDO ABONO 100%
ORGÁNICO DE LA EMPRESA CEAGRODEX**

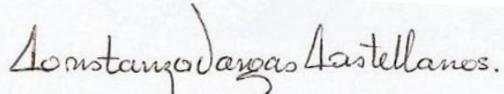
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Recursos Naturales y Medio Ambiente.

ÁREA DE INVESTIGACIÓN: Biorremediación

**SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN: Operations, Process, Hydrocarbons,
Energy and Environment- OPHEEN**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN: Geosciences, Infrastructure, Productivity
Environment- GIPE**

**PRESENTADO AL COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO DEL PROGRAMA DE
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

Director 
Msc. Constanza Vargas Castellanos

Jurado


Esp. Carmen Pinzón Torres

Jurado


Msc. Luz Marina Botero Rojas

Neiva, marzo de 2018

Agradecemos a nuestros formadores en especial a la Msc. Constanza Vargas por su amabilidad, sentido del humor y consejos para crecer como persona y culminar esta etapa académica. A todas aquellas personas que facilitaron la realización, revisión y publicación de este documento.

AGRADECIMIENTOS

Antes de todo quiero agradecer a Dios por regalarme el acompañamiento de todas las personas que contribuyeron en mi vida y en el desarrollo del presente proyecto, como la presencia y apoyo brindado por mi padre Javier Sánchez, mi madre Rosa Ortiz, mis incondicionales hermanas y mi apacible hermano (QEPD) que siempre está presente en el camino que recorro y por último, pero no menos importante a mi compañera Alexandra Velásquez, por su comprensión, disposición y acompañamiento durante todo el tiempo invertido.

Omaira Sánchez Ortiz

En primera instancia agradezco a Dios que me acompaña, guarda y protege en cada paso de mi vida, a mis padres Myriam Olarte y Luis Velásquez por brindarme educación y apoyo para tener un futuro mejor y ser orgullo para ellos y de toda la familia, a Omaira Sánchez por su disposición, gran entusiasmo, ser un complemento y parte fundamental de este proceso.

María Alexandra Velásquez Olarte

ÍNDICE GENERAL

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
Definición del problema.....	14
Justificación	14
OBJETIVOS	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 PETRÓLEO.....	18
2.1.1 Composición	18
2.1.2 Clasificación.....	20
2.1.3 Antecedentes de derrames	21
2.2 SUELOS.....	23
2.2.1 Clasificación de los suelos	24
2.2.2 Factores que influyen en la biorremediación en suelos	26
2.3 BIORREMEDIACIÓN.....	27
2.3.1 Técnicas	28
2.3.2 Landfarming.....	29
2.3.3 Biorremediación en Colombia. Técnica y normatividad	31
2.3.5 Prueba de TPH.....	35
2.4 ABONO CEAGRODEX	36
2.4.1 Composición	36
2.4.2 Características fisicoquímicas.....	37
2.4.3 Análisis microbiológico	38
2.4.4 Beneficios	38
2.4.6 Antecedentes.....	39
2.5 ÁREA DE ESTUDIO	39
3. MARCO EXPERIMENTAL.....	42

3.1	DISEÑO EXPERIMENTAL	42
3.2	TOMA Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO	43
3.3	CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO	44
3.4	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SUELO LIMPIO Y REMEDIADO.....	45
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
4.1	ANÁLISIS TÉCNICO.....	48
4.1.1	Análisis de humedad.....	48
4.1.2	Análisis de pH.....	54
4.1.3	Análisis de la carga contaminante	57
4.2	APORTE NUTRICIONAL DEL ABONO	61
4.3	ANÁLISIS BIOLÓGICO.....	62
4.3.1	Lenteja	62
4.3.2	Lechuga	67
4.4	ANÁLISIS ECONÓMICO	70
4.6	ANÁLISIS SEGÚN ANTECEDENTES	73
	CONCLUSIONES	75
	RECOMENDACIONES.....	77
	BIBLIOGRAFÍA	78
	ANEXO A	lxxxi
	ANEXO B	lxxxiv
	ANEXO C	xciv

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipo de crudo según el pozo de origen	20
Tabla 2. Clases texturales de suelos	25
Tabla 3. Normas y principios ambientales contenidos en la Constitución Política de Colombia.....	33
Tabla 4. Normas generales que sustentan la normatividad ambiental por contaminación con hidrocarburos	34
Tabla 5. Normatividad específica ambiental concerniente al derrame con hidrocarburos.....	34
Tabla 6. Normatividad internacional ambiental acogida por Colombia	35
Tabla 7. Generalidades del abono CEAGRODEX.....	37
Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas del abono CEAGRODEX	37
Tabla 9. Microorganismos presentes en abono de CEAGRODEX	38
Tabla 10. Prueba de TPH de las muestras de suelo	42
Tabla 11. Muestra de suelo previo a contaminación	44
Tabla 12. Caracterización del crudo Tenay.....	45
Tabla 13. Comparación de propiedades del suelo previo y después de su contaminación y biorremediación.....	45
Tabla 14. Valores de carga contaminante, pH, y humedad de cada era.	46
Tabla 15. Composición de las eras.....	47
Tabla 16. Valores de TPH en porcentaje de crudo de las muestras.....	47
Tabla 17. Porcentaje de biorremediación con respecto al tiempo.	48
Tabla 18. Estimación del tiempo @TPH=0	49
Tabla 19. Aporte nutricional del abono a cada era.....	61
Tabla 20. Seguimiento fisiológico de las semillas de lentejas sembradas en tierra de vivero.....	62
Tabla 21. Seguimiento fisiológico de las semillas de lentejas en muestras biorremediadas	63
Tabla 22. Comparación fisiológica de lentejas al tiempo de 2 días	65

Tabla 23. Comparación fisiológica de lentejas al tiempo de 7 días	65
Tabla 24. Costos de contratación de un obrero	70
Tabla 25. Comparación de TPH según la humedad y tipo de crudo a tiempo de 60 días.....	74
Tabla 26. Relación color - propiedades del suelo.	lxxxiv
Tabla 27. Clasificación de suelos según su CE, pH y sodio intercambiable	lxxxvii
Tabla 28. Prueba TPH @0 días.....	xcvi
Tabla 29. Prueba TPH @30 días.....	xcvi
Tabla 30. Prueba TPH @60 días.....	xcvii
Tabla 31. Prueba TPH @90 días.....	xcvii

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. TPH Vs. Tiempo (días).....	49
Gráfica 2. TPH Vs. Tiempo - pH 7 y carga contaminante: 3%.....	50
Gráfica 3. TPH Vs. Tiempo. – pH 9 y carga contaminante: 3%.....	50
Gráfica 4. TPH Vs. Tiempo. – pH 7 y carga contaminante: 5%.....	51
Gráfica 5. TPH Vs. Tiempo. pH 9 y carga contaminante: 5%.....	51
Gráfica 6. TPH Vs. Tiempo. – pH 7 y carga contaminante: 10%.....	52
Gráfica 7. TPH Vs. Tiempo. – pH 9 y carga contaminante: 10%	52
Gráfica 8. TPH Vs. Tiempo. Humedad:150 g H ₂ O/Kg suelo y carga contaminante:3%.....	54
Gráfica 9. TPH Vs. Tiempo. Humedad:150 g H ₂ O/Kg suelo, carga contaminante:5%.....	54
Gráfica 10. TPH Vs. Tiempo. Humedad:150 g H ₂ O/Kg Suelo, carga contaminante: 10%.....	55
Gráfica 11. TPH Vs. Tiempo. Humedad: 250g H ₂ O/Kg Suelo, carga contaminante:3%.....	55
Gráfica 12. TPH Vs. Tiempo. Humedad: 250 g H ₂ O/Kg Suelo, carga contaminante:5%.....	56
Gráfica 13. TPH Vs. Tiempo. Humedad: 250 g H ₂ O/Kg Suelo, carga Contaminante:10%	56
Gráfica 14. TPH Vs. Tiempo. pH 7 y humedad: 150 g H ₂ O/Kg Suelo.....	58
Gráfica 15. TPH Vs. Tiempo. pH 9 y humedad: 150 g H ₂ O/Kg Suelo.....	58
Gráfica 16. TPH Vs. Tiempo. pH 7, humedad: 250 g H ₂ O/Kg Suelo	59
Gráfica 17. TPH Vs. Tiempo. pH 9, humedad: 250 g H ₂ O/Kg Suelo	59
Gráfica 18. Tamaño promedio de los tallos (cm) Vs. Tiempo (días).....	66
Gráfica 19. Número promedio de hojas por tallo Vs. Tiempo (días).....	66

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Atentado contra el oleoducto Caño-Limón Coveñas el 5 de febrero de 2018	22
Ilustración 2. Atentado contra el oleoducto Caño-Limón Coveñas, al sur del Norte de Santander. 16 de febrero de 2018.....	22
Ilustración 3. Triángulo textural de suelos	25
Ilustración 4. Parámetros en la biorremediación	28
Ilustración 5. Propiedad privada La Bonita.....	40
Ilustración 6. Imagen aérea de la propiedad privada La Bonita.....	40
Ilustración 7. Plancha 323 Neiva.....	41
Ilustración 8. Montaje área landfarming	43
Ilustración 9. Muestras 1, 4 y 6 a tiempo 2 días.	64
Ilustración 10. Plantas de lenteja a tiempo de 7 días.	64
Ilustración 11. Plantas de lenteja en tierra abonada al tiempo de 10 días	65
Ilustración 12. Semillas de lechuga cultivadas en alvéolos a tiempo 0 días. ...	68
Ilustración 13. Brotes de lechuga en tierra biorremediada a tiempo 7 días	68
Ilustración 14. Comparación de plantas de lechuga a tiempo 7 días.....	69
Ilustración 15. Ficha técnica abono orgánico empresa CEAGRODEX.....	lxxxi
Ilustración 16. Carta Munsell.....	lxxxv
Ilustración 17. Muestras de tierra en Carta Munsell	lxxxvi
Ilustración 18. Conductímetro y potenciómetro	lxxxviii
Ilustración 19. Muestra de suelo en agua y cloroformo, método gravimétrico modificado.	xcviii

RESUMEN

El proceso de biorremediación aeróbica de un suelo contaminado con hidrocarburos provenientes del petróleo, empleando como agente aportante de nutrientes y bacterias, un abono 100% orgánico producido por la empresa CEAGRODEX, fue analizado a través de una planta piloto en la que se mantuvo condiciones de experimentación controladas.

Para la experimentación se empleó suelos franco arcilloso, color light olive brown, conductividad y salinidad de 255,0 mV, densidad 1,26 g/mL, humedad de 18%, pH 6,33 y porosidad 56,5% proveniente de la propiedad privada La Bonita en cercanías a la ciudad de Neiva, en donde se instaló la planta piloto; el crudo de 37° API proveniente de la batería Tenay, fue suministrado por ECOPETROL; el agente biorremediador fue el abono producido por CEAGRODEX, con capacidad de retención de humedad de 192%.

El proceso de experimentación seguido consistió en una mezcla 1:1 suelo:abono, expuesta a diferentes concentraciones de hidrocarburos 3, 5 y 10% (en peso), controlando la humedad en 150 y 250 g H₂O/kg de suelo y el pH en 7 y 9, obteniendo que bajo las condiciones controladas se logró disminuir el TPH hasta valores inferiores al 1%, dando cumplimiento a la normativa internacional de Louisiana 29B (3%) y API (1%) en un máximo de 65 días.

La evaluación de costos indicó que usando esta técnica se tendría un ahorro del 15 al 70% comparado con métodos convencionales comerciales.

PALABRAS CLAVE: Biorremediación, Landfarming, Suelos Contaminados, Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)

ABSTRACT

The process of aerobic bioremediation of a soil contaminated with petroleum hydrocarbons, using as a contributing agent of nutrients and bacteria, a 100% organic fertilizer produced by the company CEAGRODEX, it was analyzed through a plant Pilot in which experimentation conditions were kept under control.

For the experimentation is used clay loam soils, color light olive brown, conductivity and salinity of 255.0 MV, density 1.26 gr/mL, humidity of 18%, PH 6.33 and porosity 56.5% from private property La Bonita near the city of Neiva, where it was installed The pilot plant; The 37 ° API crude from the Tenay Battery was supplied by ECOJETROL; The remedy agent was the fertilizer produced by CEAGRODEX, with a capacity of retention of humidity of 192%.

The process of experimentation consisted in a 1:1 mixture soil:compost, exposed to different concentrations of hydrocarbons 3, 5 and 10% (by weight), controlling humidity in 150 and 250 g H₂O/kg of soil and pH at 7 and 9, obtaining that under the controlled conditions the TPH managed to be diminished up to values lower than 1 %, giving fulfillment to the international regulation of Louisiana 29B (3 %) and API (1 %) in a maximum of 65 days.

The cost assessment indicated that using this technique would have a savings of 15 - 70% compared with conventional commercial methods.

KEY WORDS: Bioremediation, Landfarming, Oil-Contaminated Soils, Total Petroleum Hydrocarbons (TPH).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Definición del problema

El manejo inadecuado de los materiales y residuos peligrosos ha generado a escala mundial, un problema de contaminación de suelos, aire y agua. Entre las más severas contaminaciones se destacan las que se produjeron y todavía se producen a causa de la extracción y el manejo del petróleo en todos los países productores de hidrocarburos. En nuestro país, el transporte de crudo y sus derivados se ha visto afectado considerablemente durante los últimos 18 años, por una permanente actividad terrorista contra los oleoductos e instalaciones petroleras. En el suelo los hidrocarburos impiden el intercambio gaseoso con la atmósfera, iniciando una serie de procesos físico-químicos simultáneos como evaporación y penetración que, dependiendo del tipo de hidrocarburo, temperatura, pH, humedad, textura del suelo y cantidad vertida puede ser más o menos lentos, ocasionando una mayor toxicidad, además de tener una moderada, alta o extrema salinidad, dificultando su tratamiento.

Justificación

Los altos gradientes de salinidad pueden destruir la estructura terciaria de las proteínas, desnaturalizar enzimas y deshidratar células, lo cual es letal para muchos microorganismos usados para el tratamiento de aguas y suelos contaminados.

Por lo anterior es necesario intervenir con técnicas y recursos que no se vean impedidos debido a la alteración de los hidrocarburos en el ambiente, uno de ellos es la biorremediación por disposición en el suelo o también conocida como *landfarming*, la cual será probada en el presente proyecto para evaluar la eficiencia de un abono 100% orgánico de la empresa CEAGRODEX bajo parámetros específicos de pH, humedad, carga contaminante y relación suelo : abono para tenerlo como base según sus resultados y que sea usado o no por las empresas de la industria para los debidos casos asegurando siempre la calidad del ambiente.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la eficiencia y factibilidad económica de un abono 100% orgánico de la empresa CEAGRODEX según la disminución de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en suelos contaminados con un crudo liviano, bajo condiciones controladas de humedad y pH.

Objetivos específicos

- Caracterizar fisicoquímicamente el suelo de estudio.
- Realizar montaje experimental de eras de landfarming, controlando pH y humedad para la mezcla suelo: abono: hidrocarburos.
- Evaluar TPH los suelos tratados con abono de la empresa CEAGRODEX a diferentes tiempos (0, 30, 60, 90 días).
- Realizar una evaluación económica al proceso de biorremediación.

1. INTRODUCCIÓN

El petróleo es un combustible fósil formado por mezclas de hidrocarburos que al entrar en contacto con el medio ambiente se constituyen en un factor contaminante de difícil degradación natural. Por tanto se hace necesario la utilización de agentes que aceleren los procesos de descomposición de estructuras químicas complejas en otras más asimilables por el medio ambiente.

Se han desarrollado diversas tecnologías de remediación, una de ellas es la disposición sobre el suelo o landfarming, técnica en la cual la aceleración de procesos se logra con el aumento de microorganismos y aporte de nutrientes a suelos contaminados con hidrocarburos, en donde la acción microbiana acelera la descomposición de estos.

El presente trabajo aborda un estudio técnico-económico de un abono 100% orgánico proporcionado por la empresa CEAGRODEX, usando la técnica de landfarming para reparar una zona que fue adecuada para la contaminación controlada con hidrocarburos, evaluando la eficiencia del abono como agente biorremediador y la influencia de factores como pH, humedad, concentración de hidrocarburos y relación suelo: abono.

2. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo describe las variables que deben tenerse en cuenta para un proceso de biorremediación de suelos contaminados, considerando que cada lugar a reparar es un reto único que puede analizarse según sus características fundamentales. La selección de técnicas de remediación para suelos contaminados, dependen de cuatro consideraciones generales (Sellers, 1999):

1. Según el tipo de contaminante. De acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas, factores que puedan influir en su movilidad y si persiste o no en el ambiente, se define si la zona requiere ser remediada y cómo debe tratarse el contaminante. Su estructura química determina su toxicidad y por consiguiente permite fijar ciertos criterios para establecer los límites de limpieza.
2. La localización y las características del sitio, así como el uso de suelo (industrial, residencial o agrícola), afectan la meta de la limpieza y los métodos que pueden emplearse para alcanzarla.
3. Las características naturales de los suelos, sedimentos y cuerpos de agua, a menudo determinan las particularidades de los sistemas de tratamiento. Para suelos o lodos, el manejo del material a tratar (conversión del contaminante a una forma en la que pueda tratarse y/o transportarse desde la fuente de la contaminación hasta el lugar de tratamiento), es el paso crítico en la mayoría de los procesos de tratamiento. Los pretratamientos para modificar las características naturales de un suelo contaminado pueden ser componentes muy caros en un proceso de remediación.
4. Las capacidades de las tecnologías de remediación pueden variar ampliamente en función de las condiciones específicas del sitio. Las tecnologías de remediación pueden actuar conteniendo la contaminación, separando el contaminante del suelo o destruyendo el contaminante. El uso de una tecnología en particular depende, además de los factores mencionados, de su disponibilidad, fiabilidad (demostrada o proyectada), estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo.

2.1 PETRÓLEO

El petróleo es el producto de la degradación anaeróbica de materia orgánica, durante largos períodos de tiempo y bajo condiciones de alta presión y temperatura, que la convierte en gas natural, crudo y derivados del petróleo. El petróleo crudo es una mezcla extremadamente compleja y variable de compuestos orgánicos, donde la mayoría de los ellos son hidrocarburos, que varían en peso molecular desde el gas metano hasta los altos pesos moleculares de alquitranes y bitúmenes. Estos hidrocarburos pueden presentarse en un amplio rango de estructuras moleculares: cadenas lineales y ramificadas, anillos sencillos, condensados o aromáticos. Los dos grupos principales de hidrocarburos aromáticos son los monocíclicos, el benceno, tolueno y xileno (BTEX) y los hidrocarburos policíclicos (HAPs) tales como el naftaleno, antraceno y fenantreno. (Torres & Zuluaga, 2009)

2.1.1 Composición

Composición por familias de hidrocarburos

El estudio más detallado de los hidrocarburos de un crudo de petróleo agrupa estos compuestos en las siguientes familias, definidas en *Encyclopedia of Chemical Technology* por Howe-Grant:

- Parafinas volátiles. Representan hasta un 30% del crudo de petróleo. Son n-alcanos e isoprenoides (alcanos ramificados) de un tamaño C_1 a C_{10} . Es la fracción más volátil del crudo y por lo tanto la más susceptible de pérdidas abióticas por volatilización. La fracción gas natural contiene principalmente C_1 a C_5 . Los isoprenoides volátiles, están representados principalmente por el isobutano e isopentano. Los isoprenoides volátiles también pueden llegar hasta C_{10} (2,6 dimetil octano).
- Parafinas no volátiles. Se definen como aquellos n-alcanos e isoprenoides entre C_{11} y C_{40} . Los n-alcanos oscilan entre C_{11} y C_{40} , aunque se han descrito cadenas más largas y pueden constituir entre el 15 y 20% de crudos no degradados; mientras que los isoprenoides varían de C_{12} a C_{22} y constituyen entre 1-2% del crudo, llegando a 15% en crudos degradados. Los componentes entre C_{11} y C_{15} son de volatilidad intermedia.

- Naftenos. Esta familia está compuesta por las cicloparafinas o cicloalcanos. Los compuestos más abundantes de esta familia son los ciclopentanos alquilados (fundamentalmente metilados), que pueden llegar a representar un 31% del crudo. Los compuestos mono y dicíclicos corresponden entre el 50 y 55% de esta fracción, los tricíclicos al 20% y los tetracíclicos al 25%. Esta familia engloba a los hópanos.
- Olefinas. Son alquenos, los cuales están poco presentes en el crudo de petróleo, encontrándose en concentraciones traza. Adquieren importancia en los productos resultantes del refinado, ya que se generan durante el proceso de cracking, existiendo hasta un 30% en gasolinas y un 1% en kerosenos y diésel.
- Aromáticos. El crudo de petróleo contiene una mezcla muy compleja de hidrocarburos aromáticos. Esta fracción la componen moléculas que contienen uno o varios anillos bencénicos en su estructura. Así se encuentran hidrocarburos monoaromáticos (un anillo bencénico), diaromáticos (2 anillos bencénicos) y poliaromáticos (HAPs, con más de dos anillos bencénicos).
- Resinas y asfaltenos. Se trata de mezclas complejas, integradas por núcleos policíclicos o naftenoaromáticos. Contienen cadenas hidrocarbonadas con heteroátomos de oxígeno, nitrógeno y azufre (componentes NOS del petróleo) y a veces están asociadas con pequeñas concentraciones de metales como el vanadio y el níquel. Constituyen entre un 10% en crudos poco degradados o ligeros, hasta un 60% en crudos muy degradados. Es la fracción que presenta una mayor recalcitrancia de un crudo de petróleo. Se trata de agregados de piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfóxidos, amidas, HAP, sulfuros, ácidos nafténicos, ácidos grasos, metaloporfirinas y fenoles polihidratados.

Composición del crudo según el origen

Torres & Zuluaga, en su proyecto *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos* exponen que la composición de un crudo varía según su localización. Habitualmente todos los crudos de petróleo (no degradados) contienen alcanos de cadena lineal y ramificada de C_1 a C_{40} aproximadamente, cicloalcanos o naftenos e hidrocarburos aromáticos. Las fracciones de punto de ebullición menor, están formadas por alcanos, mientras que la composición de

las fracciones superiores varía según la fuente del petróleo. Se denomina crudo parafínico o ligero cuando el crudo contiene una elevada proporción de parafinas (n-alcanos y alcanos ramificados), y asfáltico o pesado si predominan naftenos (cicloalcanos), alcanos de cadena larga (C_{30} a C_{45}) y HAPs. Según el origen, se tienen crudos parafínicos o asfálticos como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Tipo de crudo según el pozo de origen

POZO DE ORIGEN	TIPO DE CRUDO
Irán	Parafínico
Irak	Parafínico
Rumania	Parafínico
Bakú	Asfáltico
Venezuela	Asfáltico
Texas	Intermedio
Oklahoma	Intermedio
Colombia	Intermedio

Fuente: (Torres & Zuluaga, 2009)

2.1.2 Clasificación

Clasificación del crudo según gravedad API

La gravedad API es una unidad implementada por el “American Petroleum Institute” en 1921. Básicamente creada para clasificar líquidos menos densos que el agua en una escala relacionada con la gravedad específica de dicho fluido. La Gravedad API se calcula según la ecuación 1

$$API = \frac{141.5}{GravedadEspecificadelFluido} - 131.5 \quad \text{Ecuación 1}$$

El petróleo con menor gravedad específica (más liviano), tendrá mayor valor API. Los petróleos con gravedades API entre 40° y 45° tienen más altos precios en el mercado. El petróleo se clasifica como liviano, mediano o pesado de acuerdo a su gravedad API:

- Petróleo liviano. Es el que tiene una gravedad API mayor que 31.1° API.
- Petróleo mediano. Está definido por una gravedad API entre 22.3° API y 31.1° API.

- Crudos pesados. Se caracterizan por tener gravedades API por debajo de 22.3° API.
- Crudos extrapesados o bitumen. Se caracterizan por tener gravedades API menores de 10° API.

Estas clasificaciones pueden variar por regiones, especialmente en el caso de crudos pesados y extrapesados (bitumen). El bitumen se hunde en el agua mientras que el petróleo flota.

En Colombia se han encontrado petróleos con un amplio rango de grados API, desde los livianos de Cusiana hasta los más pesados del Magdalena Medio o de los Llanos. En su gran mayoría, el crudo colombiano es pesado, llamado “Crudo de Castilla” que luego de ser mezclado con otros crudos pesados se vende en el mercado como Crudo de Castilla Blend, con una gravedad API de 18.8° API aproximadamente. Los petróleos también se clasifican entre “dulces” y “agrios”. Los primeros son aquellos que contienen menos de 0,5% de azufre; los segundos los que tienen más de 1,0% de azufre.

2.1.3 Antecedentes de derrames

En Colombia se presentan casos de atentados por parte de la guerrilla y ELN. Durante los últimos quince años, el oleoducto Caño Limón-Coveñas ha sufrido más de novecientos atentados, con el derramamiento de más de 450 millones de litros de petróleo. El impacto ambiental por los derrames de crudo, ha dejado más de 2.600 kilómetros entre ríos y quebradas, y alrededor de 1.600 hectáreas de ciénagas afectadas. Dadas estas circunstancias, los daños a las fuentes hídricas, suelos, aire, fauna y vegetación son de gran envergadura, pues los procesos de descontaminación no alcanzan a cubrir todas las áreas afectadas y se realizan mucho tiempo después de que el crudo ha penetrado el ecosistema. (Cuellar et al. 2004)

Ilustración 1. Atentado contra el oleoducto Caño-Limón Coveñas el 5 de febrero de 2018



Fuente: Amorocho B.J. (2018)

Ilustración 2. Atentado contra el oleoducto Caño-Limón Coveñas, al sur del Norte de Santander. 16 de febrero de 2018



Fuente: Caracol Radio. (2018)

2.2 SUELOS

El suelo constituye un recurso natural que desempeña diversas funciones en la superficie de la tierra, proporcionando un soporte mecánico, así como nutrientes para el crecimiento de plantas y microorganismos. La matriz del suelo está formada por cinco componentes principales: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos. Los materiales minerales son los principales componentes estructurales y constituyen más del 50% del volumen total del suelo. El aire y el agua juntos ocupan el volumen de los espacios, y usualmente conforman de 25% a 50% del volumen total. La proporción relativa de aire/ agua fluctúa considerablemente con el contenido de humedad del suelo. El material orgánico ocupa entre 3% y 6% del volumen promedio, mientras que los organismos vivos constituyen menos del 1% (Ergas et al. 1999). Todos estos factores definen el tipo de suelo, que junto con las condiciones particulares de un sitio frecuentemente pueden limitar la selección de un proceso de tratamiento en particular. Por otra parte, la posibilidad de usar una tecnología de tratamiento, puede eliminarse con base en la clasificación del suelo u otras características propias de éste. A continuación, se describen algunos de los datos del suelo, que pueden obtenerse con relativa facilidad y que controlan la eficiencia de una tecnología de remediación.

Tamaño de partícula. Los suelos se clasifican según su tamaño de partícula, siendo sus tres principales componentes las arcillas (< 0.002 mm), los sedimentos (0.002 - 0.05 mm) y las arenas (0.05 - 2.0 mm). Es importante considerar esta propiedad, ya que la relación área/volumen de los diferentes tipos de partícula, tienen un impacto directo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por consiguiente en las tecnologías de remediación. En general los materiales no consolidados (arenas y gravas finas) son más fáciles de tratar (Van Deuren et al. 1997, Ergas et al 1999).

Heterogeneidad. Un suelo demasiado heterogéneo puede impedir el uso de tecnologías in situ que dependan del flujo de un fluido. Pueden crearse canales indeseables de fluidos en las capas arenosas y arcillosas, dando como resultado tratamientos inconsistentes (Van Deuren et al 1997).

Densidad aparente. Es el peso del suelo por unidad de volumen, incluyendo agua y espacios. Es importante considerar que el suelo está compuesto por sólidos y espacios llenos de agua y/o aire, y que su densidad dependerá de su humedad. Es útil para realizar cálculos para el transporte del material (Van Deuren et al. 1997).

Permeabilidad. Es la capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido que lo atraviese sin alterar su estructura interna. La permeabilidad de un suelo es uno de los factores que controla la efectividad de tecnologías in situ (Sellers 1999). En general una baja permeabilidad en el suelo disminuye la efectividad de la mayoría de las tecnologías de remediación.

pH. El pH determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo (Alexander 1994). La solubilidad de muchos contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con altos valores de pH.

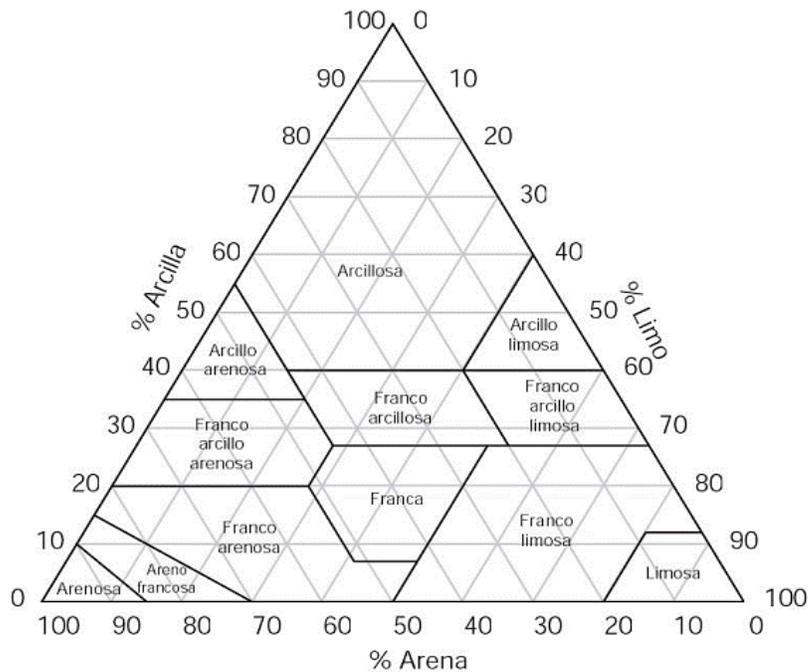
Humedad. La humedad del sitio a tratar es un factor importante para la elección de una tecnología en particular. Una alta humedad puede impedir el movimiento de aire a través del suelo, lo que afecta los procesos de biorremediación, así como provocar problemas durante la excavación y transporte, además de aumentar costos durante el uso de métodos de remediación térmicos (Van Deuren et al. 1997).

Materia orgánica. La fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, que generalmente se le conoce como humus. Un suelo con alto contenido húmico, disminuye la movilidad de los compuestos orgánicos y así la eficiencia de ciertas tecnologías (extracción de vapores, lavado de suelo) (Van Deuren et al. 1997, Ergas et al. 1999).

2.2.1 Clasificación de los suelos

Existen diversos criterios de clasificación de los suelos, entre ellos geológico, químico, climático, según su tipo de uso, y más, sin embargo, para este caso en particular sólo se mostrará la definición textural de acuerdo a la cantidad presente de arcilla, limo y arena en las muestras teniendo en cuenta la clasificación del suelo que emplea el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) basado en el triángulo textural que se presenta en la ilustración 3 y las clases texturales de suelos en la tabla 2.

Ilustración 3. Triángulo textural de suelos



Fuente: Agromática.

Tabla 2. Clases texturales de suelos

Nombres vulgares de los suelos (textura general)	Arenoso	Limoso	Arcilloso	Clase textural
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100	0-14	0-10	Arenoso
	70-86	0-30	0-15	Franco arenoso
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso
Suelos francos (textura mediana)	23-52	28-50	7-27	Franco
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
	0-20	88-100	0-12	Limoso
Suelos francos (textura moderadamente fina)	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
Suelos arcillosos (textura fina)	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

Fuente: USDA

Las partículas del suelo se agrupan en diversas fracciones atendiendo a su tamaño, de la siguiente forma:

Arcilla: Pasa por un tamiz de 0,002 mm (2 μ m).

Limo: Pasa por el tamiz de 0.05 mm, y queda retenido en el tamiz de 0,002 mm

Arena: Pasa por el tamiz de 2 mm, pero queda retenida en el tamiz de 0,05 mm

2.2.2 Factores que influyen en la biorremediación en suelos

La biodegradabilidad de una mezcla de hidrocarburos presente en un suelo contaminado, depende de diversos factores que son necesarios a la hora de proporcionar las condiciones óptimas para el crecimiento de los microorganismos que llevan a cabo la recuperación. Los microorganismos son muy sensibles a los cambios de temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes, oxígeno y humedad. (Torres & Zuluaga, 2009)

- *El pH.* Afecta significativamente la actividad microbiana. En consecuencia, cuanto mayor sea la diversidad de microorganismos existentes, potencialmente mayor será el rango de tolerancia. No existen unas condiciones preestablecidas que sean óptimas en todos los casos, pero en términos generales, el crecimiento de la mayor parte de los microorganismos es máximo dentro de un intervalo de pH situado entre 6 y 8. En general, el pH óptimo para las bacterias heterótrofas es neutro (pH 6 - 8), mientras que es más ácido para los hongos (pH 4 - 5). El pH óptimo establecido para procesos de biodegradación es neutro (pH 7,4 - 7,8) (Dibble & Bartha, 1979).

Así mismo el pH también afecta directamente en la solubilidad del fósforo y en el transporte de metales pesados en el suelo. La acidificación o la reducción del pH en el suelo se puede realizar adicionando azufre o compuestos del azufre.

- *Temperatura.* Es uno de los factores ambientales más importantes que afecta la actividad metabólica de los microorganismos y la tasa de biodegradación. Generalmente las especies bacterianas crecen a intervalos de temperatura bastante reducidos, entre 20 y 30 °C (condiciones mesófilas), decreciendo la biodegradación por

desnaturalización de las enzimas a temperaturas superiores a 40 °C e inhibiéndose a inferiores a 0 °C.

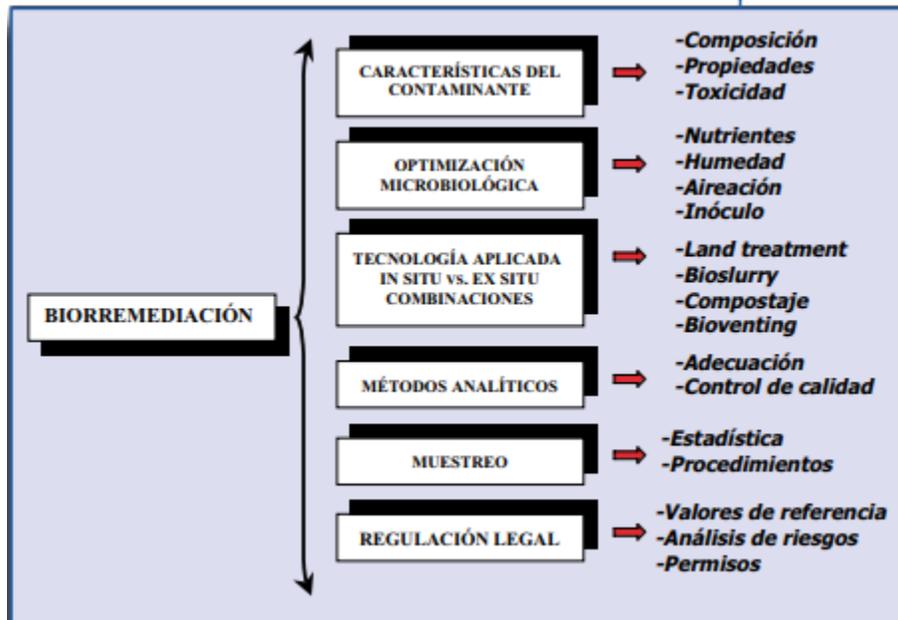
- *Humedad.* Los microorganismos requieren condiciones mínimas de humedad para su crecimiento. El agua forma parte del protoplasma bacteriano y sirve como medio de transporte a través del cual los compuestos orgánicos y nutrientes son movilizados hasta el interior de las células. Un exceso de humedad inhibirá el crecimiento bacteriano al reducir la concentración de oxígeno en el suelo (el rango varía en función de la técnica). (Torres & Zuluaga, 2009)

Por lo anterior, la humedad del suelo puede limitar de forma severa la biodegradación, fundamentalmente en suelos superficiales afectados por oscilaciones importantes en el contenido de agua; existen valores de humedad óptima para biorremediación de terrenos no saturados, que habitualmente están entre 150 y 250 gramos de agua por kilogramo de terreno seco. (Torres & Zuluaga, 2009)

2.3 BIORREMEDIACIÓN

El término biorremediación se aplica a cualquier sistema o proceso en el que se empleen métodos biológicos para transformar contaminantes en el suelo o en las aguas. La biorrecuperación en suelos contaminados puede llevarse a cabo "*In Situ*": excavando el terreno y tratándolo a pie de excavación, o bien "*Ex Situ*", en instalaciones aparte. Existen parámetros que aumentan o disminuyen la probabilidad de obtener buenos resultados en el proceso de biorremediación en un medio contaminado por hidrocarburos. La técnica apropiada para llevar a cabo este proceso, debe ser el resultado de la valoración de una serie de variables y de características del sitio o del contaminante a tratar como se presenta en la ilustración 4.

Ilustración 4. Parámetros en la biorremediación



Fuente: modificada de Walter (1997)

2.3.1 Técnicas

Para determinar la técnica de biorremediación más apropiada para el caso a tratar, deben ser consideradas las características propias del lugar, del agente contaminante, los recursos a disposición, y varios factores más (ilustración 4). A continuación se presentan algunas de las técnicas más usadas. (Boullosa, 2011)

MICRORREMEDIACION. La microrremediación es una forma de biorremediación en la que se emplean hongos para descontaminar un área usando micelios, el cuerpo vegetativo del hongo, difícil de estudiar debido a su carácter subterráneo y fragilidad.

BIOVENTING (BIOVENTEO). El objetivo de esta práctica es estimular a las bacterias ya presentes en el área degradada, para así acelerar la biodegradación de los hidrocarburos.

FITORREMEDIACIÓN. La fitorremediación se refiere al tratamiento de problemas medioambientales mediante el uso de plantas, un proceso más sencillo y mucho menos costoso que modalidades tradicionales, como excavar el material contaminante y depositarlo en un lugar controlado. Asimismo, como el resto de modalidades de biorremediación, se evita el impacto ecológico de la

maquinaria y el transporte de las sustancias peligrosas, que además deben ser almacenadas y no desaparecen.

BIORREACTORES. Son sistemas de descomposición biológica más complejos que un compostador casero, aplicados a escala industrial. En sentido estricto, son meros recipientes que mantienen un ambiente biológicamente activo, como un compostador doméstico o una cuba en la que fermenta un vino o un licor.

COMPOSTAJE. Consiste en estimular la descomposición aeróbica (con alta presencia de oxígeno) de la materia orgánica, en contraposición con métodos anaeróbicos. Hay técnicas que aceleran la descomposición empleando lombrices especialmente efectivas procesando material orgánico. Composta permite reinstaurar el ciclo natural a cualquier escala, desde un hogar hasta una explotación agraria orgánica.

Existen muchas más técnicas de biorremediación, sin embargo, el proyecto se realizó por medio del landfarming, lo cual hace necesario una descripción más profunda del mismo como se muestra a continuación.

2.3.2 Landfarming

Es la disposición sobre el suelo, tratamiento en lechos o tratamiento vía sólida. Esta es la técnica más usada para la biorremediación de los lodos contaminados con hidrocarburos y de otros desechos de la industria petrolera. Esta técnica consiste en excavar los suelos contaminados, extenderlos sobre un área suficientemente amplia y estimular las variables de incidencia en el proceso para promover la actividad de los microorganismos encargados de degradar los hidrocarburos. Antes de extender el suelo contaminado se deben adecuar las condiciones de la superficie para controlar los lixiviados y las aguas lluvias (Zitrides, 1990).

Una vez extendido el suelo contaminado se irriga con las disoluciones de nutrientes, los microorganismos y los aditivos químicos en el caso que sean necesarios para la biodegradación. Periódicamente se debe airear el suelo para suministrarle oxígeno, con la ayuda de tractores y retroexcavadoras (aireación mecánica) o sistemas de inyección de aire comprimido. Además, el espesor del suelo extendido debe ser menor de 70 u 80 cm, con el fin de permitir la transferencia de oxígeno del aire atmosférico a la pila del suelo.

El sitio donde se realice el tratamiento debe ser adecuado para el manejo de aguas lluvias y control de agua de escorrentía. El suelo extendido debe tener una pendiente para retirar excesos de humedad en la pila. Se deben construir canaletas o diques en tierra o suelo – cemento para evitar la entrada de agua de escorrentía a la zona de tratamiento. En áreas de riesgo de contaminación de acuíferos, se debe impermeabilizar la zona de tratamiento con sellos de arcilla o geomembranas para evitar el arrastre de hidrocarburos solubles de las lluvias hacia las aguas subterráneas.

Para empezar el procedimiento, se hace una búsqueda y selección de bacterias nativas aisladas de las muestras de suelos que se encuentran contaminados, ya que estas tienen la capacidad catabólica para crecer bajo las condiciones físico-químicas y de estrés a las que están sometidas, y tendrán un mejor desempeño a la hora de la biorremediación. La búsqueda comienza en el procesamiento de una muestra de suelo mediante una serie de diluciones, tratando de obtener aquellos morfotipos cultivables, ya que una gran parte de los microorganismos del suelo no pueden ser recuperados en medios para el cultivo de microorganismos. Además de una búsqueda general, se realiza una específica a través de medios selectivos y diferenciales, en la cual se pretende aislar ciertos morfotipos como las *Pseudomona* sp. y bacterias lactosa positivas, debido a su bien conocida actividad degradadora de hidrocarburos. Luego estas diluciones son sembradas en diferentes medios de cultivo, donde grandes familias de morfotipos se hacen presentes; éstas varían en densidad y diversidad. La diversidad está determinada por los morfotipos recuperados que se diferencian según su morfología macroscópica mientras que la densidad está determinada por el número total de individuos que pertenecen a un grupo con una morfología macroscópica común. Estos datos de densidad y diversidad son de gran valor. Primero, porque indican acerca de la calidad microbiana del suelo, ya que un suelo que tiene gran número de morfotipos, es un suelo que tiene vida y por ende presenta una buena prospección para la biorremediación debido a su posible alta actividad microbiana. Segundo, porque aquellos morfotipos que se encuentren en mayor número serán seleccionados por su habilidad para sobrevivir a la presión selectiva del contaminante y para usarlo como fuente de energía y carbono, pues por eso están creciendo. Ya seleccionados los morfotipos se conforma un consorcio o piscina de microorganismos degradadores de hidrocarburos y, utilizando la estrategia de bioaugmentación, se hace una producción a mayor escala y en proporciones estratégicas de estos. En esta producción debe tenerse en cuenta el volumen de suelo contaminado para biorremediar, la concentración del contaminante y las clases de morfotipos que se aislaron. (Torres & Zuluaga, 2009)

2.3.3 Biorremediación en Colombia. Técnica y normatividad

Política ambiental colombiana enfocada a la biorremediación

El 16 de diciembre de 2005 fue aprobada por el Consejo Nacional Ambiental, la Política Ambiental para la Gestión Integral de los Residuos o Desechos Peligrosos. El 30 de diciembre de 2005 entró en vigencia el Decreto 4741: “Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral”. La industria petrolera e investigadores tienen como referencia las normas API, en donde el valor máximo permisible de TPH en suelos es el 1%, así como también el país también cumple la normatividad internacional que regula el tema de biorremediación, del protocolo de Louisiana 29 B.

Dentro de las estrategias que plantea la política para prevenir y minimizar la generación de residuos o desechos peligrosos (Respel), se encuentra la reducción de la generación en la fuente, mediante la formulación e implementación de planes de gestión integral de Respel. Esta estrategia busca el desarrollo de acciones por parte del generador, tendientes a la gestión integral de estos residuos y a la adopción de compromisos dirigidos, principalmente a la prevención de la generación y reducción de la cantidad y peligrosidad de los mismos (UN. National Reports, 2009). Para este fin, los generadores deben formular e implementar Planes de Gestión Integral de Respel, mitigación y remediación según sea el caso.

El plan como herramienta de gestión, ha permitido a los generadores conocer y evaluar sus Respel (tipos y cantidades) y las diferentes alternativas de prevención y minimización. El plan ha permitido también el mejorar la gestión y asegurar que el manejo de estos residuos se realice de una manera ambientalmente razonable, con el menor riesgo posible, procurando la mayor efectividad económica, social y ambiental, en concordancia con la política y las regulaciones sobre el tema. Igualmente, su implementación ha permitido avanzar en la optimización de actividades, procesos y en la reducción de costos de funcionamiento y operación (UN. National Reports, 2009).

Las limitantes frente a estas estrategias se encuentran en la falta de recursos, dado que llevar experiencias piloto demostrativas de técnicas y tecnologías suelen ser costosas y los nodos de producción más limpia cuentan con recursos limitados. Sin embargo, ya se tienen empresas comprometidas en el país, tales

como ECOPETROL, TERPEL, EXXON MOBIL, PERENCO, PETROBRAS, ENAP SIPETROL. Igualmente, a partir de la expedición de la política, el número de empresas autorizadas por las autoridades ambientales para el aprovechamiento y valorización de residuos peligrosos se ha incrementado. Actualmente ya se tienen empresas que han obtenido licencia ambiental para el tratamiento y valorización de residuos contaminados con hidrocarburos.

Tratamiento ecoeficiente de residuos contaminados con hidrocarburos en Colombia

En la actualidad la capacidad de eliminación con que cuenta el país, comprende las siguientes instalaciones autorizadas para el tratamiento y eliminación de desechos peligrosos (residuos contaminados con hidrocarburos) como alternativas:

- PETROLABIN LTDA: Manejo de residuos propios de la industria del petróleo (bio-remediación de lodos, estabilización de lodos petroleros, lavado químico de lodos, des-adsorción térmica, recuperación de crudos partiendo de lodos residuales petroleros, asesorías sobre manejo de residuos especiales).
- ATP Ingeniería LTDA: Biorremediación y/o Landfarming estimulado.
- TOTAL waste management LTDA–TWM: Biorremediación de suelos contaminados.
- GEOAMBIENTAL LTDA: Biorremediación de suelos contaminados.
- PUJAR LTDA: Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

En la actualidad la biorremediación enfrenta un nuevo reto, el de convencer a las compañías y a los organismos oficiales de su alto potencial. En algunos países, la biorremediación fue una técnica poco reconocida y marginada, hoy se ha convertido en una verdadera industria.

Experiencias de investigación en biorremediación en Colombia

Las experiencias en biorremediación que tiene Colombia, se han realizado en forma experimental por centros académicos y de investigación, buscando crear o importar nuevas tecnologías para la remediación de lugares contaminados por lodos, a continuación, algunas experiencias:

- Proyecto liderado por la Universidad de Santander: biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados. (Vásquez et al. 2010)

- Proyecto liderado por el centro de investigaciones microbiológicas – CIMIC: biorremediación de residuos del petróleo (Cuellar et al. 2004).

Normatividad aplicable

La Constitución Política de Colombia de 1991 elevó a norma constitucional la consideración, manejo y conservación de los recursos naturales y el medio ambiente, a través de los siguientes principios fundamentales, entre ellos incluye o tiene relación directa a la contaminación de hidrocarburos (Tabla 3):

Tabla 3. Normas y principios ambientales contenidos en la Constitución Política de Colombia

Art.	Tema	Contenido
8	Riquezas culturales y naturales de la nación	Establece la obligación del Estado y de las personas para con la conservación de las riquezas naturales y culturales de la nación.
9	Atención de la salud y saneamiento ambiental	Consagra como servicio público la atención de la salud y el saneamiento ambiental y ordena al estado la organización, dirección y reglamentación de los mismos.
58	Función ecológica de la propiedad privada	Establece que la propiedad es una función social que implica obligaciones y que, como tal, le es inherente una función ecológica.
79	Ambiente sano	Consagra el derecho de todas las personas residentes en el país de gozar de un ambiente sano.
80	Planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales	Establece como deber del estado la planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.
95	Protección de los recursos culturales y naturales del país	Establece como deber de las personas, la protección de los recursos culturales y naturales del país, y de velar por la conservación de un ambiente sano.

Fuente: Trujillo & Ramírez, 2012

En general se usan como referencia los parámetros consignados en las distintas normas, leyes o decretos (ver tabla 3), y se generalizan para el territorio colombiano, soportados en legislación nacional y tratados internacionales vigentes y que comparativamente, se puede considerar una legislación exigente en cuanto a parámetros de limpieza y biorremediación. Otras normatividades en la que se basa la aplicación, protección y manejo ambiental hidrocarburos se observan en las tablas 3, 4, 5 y 6.

Tabla 4. Normas generales que sustentan la normatividad ambiental por contaminación con hidrocarburos

Norma	Objetivos de la norma
Decreto ley 2811 de 1974	Código nacional de los recursos naturales renovables RNR y no renovables y de protección al medio ambiente.
Ley 99 de 1993	Se crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental.
Decreto 1753 de 1994	Define la licencia ambiental LA: naturaleza, modalidad y efectos, contenido, procedimientos, requisitos y competencias para el otorgamiento de LA.
Decreto 2150 de 1995 y sus normas reglamentarias	Reglamenta la licencia ambiental y otros permisos. Define casos en que se debe presentar Diagnóstico Ambiental de Alternativas, Plan de Manejo Ambiental y Estudio de Impacto Ambiental. Suprime la licencia ambiental ordinaria.

Fuente: Trujillo & Ramírez, 2012

Tabla 5. Normatividad específica ambiental concerniente al derrame con hidrocarburos

Ley 2 de 1959	Reserva forestal y protección de suelos y agua
Decreto 622 de 1977	Sobre Parques Nacionales Naturales PNN
Ley 29 de 1986	Regula áreas de reserva forestal protectora
Decreto 1449 de 1977	Disposiciones sobre conservación y protección de aguas, bosques, fauna terrestre y acuática
Decreto 1594 de 1984	Normas de vertimiento de residuos líquidos
Decreto 2655 de 1988	Código de Minas
Ley 388 de 1997	Ley de ordenamiento territorial, que reglamenta los usos del suelo
Directiva Presidencial 33 de 1989	Responsabilidades de los organismos y entidades descentralizadas del orden nacional del sector público, en el desarrollo y operación del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres
Decreto 989 de 1995	Crea la Red Nacional de reservas para el caso de desastres
Decreto 321 de 1999	Por el cual se adopta el plan nacional de contingencias contra derrames de hidrocarburos, derivados y sustancias nocivas.

Fuente: Trujillo & Ramírez, 2012

Tabla 6. Normatividad internacional ambiental acogida por Colombia

Protocolo de Louisiana 29 B - Convenio internacional sobre responsabilidad por daños causados por la contaminación de aguas del mar con hidrocarburos (1969) y protocolo "CLC 69/76 (1976)
Convenio para la protección del patrimonio mundial, cultural y natural. París, 1972
Convenio Internacional para prevenir la contaminación por buques, 1973. - Protocolo relativo a la contaminación del mar (MARPOL) por buques 1978.
Convenio sobre la constitución de un fondo internacional de indemnización de daños causados por la contaminación del mar con hidrocarburos (1971) y su protocolo "El Fondo 71/76" (1976).
Acuerdo sobre la cooperación regional para el combate de la contaminación del Pacífico Sudeste por hidrocarburos y otras sustancias nocivas, en caso de emergencia. Lima, 1981.
Convenio de las Naciones Unidas sobre el derecho del Mar. Jamaica, 1982.
Protocolo de cooperación para combatir derrames de hidrocarburos en la región del Gran Caribe. Cartagena, 1983.
Protocolo complementario del Acuerdo sobre la cooperación regional para el combate de la contaminación del Pacífico Sudeste por hidrocarburos y otras sustancias nocivas, en caso de emergencia. Quito, 1983.
Protocolo relativo a las zonas protegidas del convenio para la protección y desarrollo del medio marino de la región del Gran Caribe. 1990.
Convenio relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas - RAMSAR (Acogido por Colombia en 1997).

Fuente: Trujillo & Ramírez, 2012

2.3.5 Prueba de TPH

La determinación de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) es usada para la evaluación de sitios contaminados por hidrocarburos. El uso de concentraciones máximas de TPH para establecer los niveles de limpieza de muestras de suelo o agua contaminados con hidrocarburos es un enfoque común implementado por autoridades reglamentarias.

Normalmente en la industria se suele usar dos técnicas: análisis por cromatografía y el método SOXHLET, este último ha sido uno de los métodos más empleados para la determinación de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en una muestra de suelo contaminado, ya que éste presenta valores confiables y está estandarizado como un procedimiento sumamente efectivo; sin embargo, requiere de un tiempo elevado para su desarrollo y el número de muestras que se logran procesar es limitada, puesto que solo se puede realizar una muestra por columna destiladora. Por esto, se han desarrollado otras

técnicas que tienen como finalidad optimizar el tiempo de realización de cada prueba y el tipo de solvente a utilizar, haciéndolas más económicas y rápidas, con el fin de poder realizar más muestras en menos tiempo y de manera eficaz.

El segundo método empleado para la determinación de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en la muestra de suelo contaminado, tiene en cuenta el mismo principio que emplea el equipo de extracción SOXHLET, que consiste en emplear un solvente de carácter orgánico para extraer todas las grasas y aceites presentes en el suelo; sin embargo, se optó por separar las diferentes fases (sólida/líquida) de la muestra de forma física, esperando que ésta se estabilice, y la fase sólida (suelo) precipite para su extracción; Para la fase líquida se busca eliminar el agua, obteniendo de esta manera un conjunto de solvente con el hidrocarburo (aceites y grasas) contenido en él, y por diferencia de pesos y volúmenes establecer la cantidad de solvente y la cantidad de TPH presentes.

Bajo la teoría anteriormente expuesta se realizó una modificación y adecuación del Método gravimétrico empleado para determinar hidrocarburos totales de petróleo (TPH's) que se encuentra estandarizado según la norma US EPA 821-B94-004,1995, las modificaciones se realizaron acorde a las necesidades y características del suelo que se analizó. En el Anexo C, se indica como quedó el método según las modificaciones realizadas teniendo en cuenta los productos con los que se contaba y el propósito con el cual se requería la realización de las pruebas.

2.4 ABONO CEAGRODEX

El abono que se empleó en la ejecución de este proyecto fue fabricado por la empresa huilense CEAGRODEX bajo la técnica del landfarming, es netamente orgánico, el cual se genera a partir de la descomposición de estiércol y contenido ruminal, restos de animales bovinos, lodos PTAR, material vegetal como restos de podas (ramas, hojas, césped), cáscaras de frutas-hortalizas y cal. Actualmente la aplicación del landfarming se emplea en la regeneración de la vida microbiana de la tierra en donde se mejora la textura y composición química del suelo. (Para ver toda la información acerca del Abono de la empresa CEAGRODEX, remitirse al Anexo A)

2.4.1 Composición

Las tablas 7, 8 y 9 presentan información sobre generalidades, características fisicoquímicas y microorganismos del abono CEAGRODEX.

Tabla 7. Generalidades del abono CEAGRODEX

Carbono orgánico oxidable total	27,70%
Cenizas	41,80%
CIC (Capacidad de intercambio catiónico)	39,8 mEq/100 g
Capacidad de retención de humedad	192%
Calcio	2,45%
Nitrógeno orgánico total (N)	2,56%
Fósforo total (P_2O_5)	2,55%
Potasio total (K_2O)	0,51%
Sodio (Na)	1,05%
Humedad	35,50%
pH	7,23%
Densidad	0,19 g/cm ³
Metales pesados	Contenido de metales pesados por debajo de los límites establecidos en la norma
Salmonella spp	Ausente
Entero bacterias	<10 ufc/g

Fuente: Ficha técnica del fertilizante orgánico CEAGRODEX

2.4.2 Características fisicoquímicas

En la tabla 8. se presentan las características fisicoquímicas del abono usado como bioestimulador en el proceso de biomirremediación

Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas del abono CEAGRODEX

Estado físico	Sólido de granos irregulares	
Humedad	35,5	%
Cenizas	41,1	%
Carbono oxidable	27	%
Capacidad de intercambio catiónico	39,8	ME/100 gr
C/N	14,5	
Capacidad de retención de humedad	192	%
Densidad	0,19	gr/cm ³
pH	7,23	
Nitrógeno total (N)	1,86	%
Fósforo total (P_2O_5)	1,701	%
Potasio (K_2O)	0,4333	%
Color	Café	
Olor	Amoniaco y a geosminas	

Fuente: Ficha técnica del fertilizante orgánico CEAGRODEX

2.4.3 Análisis microbiológico

En la tabla 9, se muestran la cantidad de microorganismos presentes en el abono según su temperatura de crecimiento óptima.

Tabla 9. Microorganismos presentes en abono de CEAGRODEX

Mesofilos Ufc/g	Termófilos Ufc/g	Mohos Ufc/g	Levaduras Ufc/g	Nematodos y/o protozoos	Entero Bacterias Ufc/g	Salmonel la en 25 gr
1,80E+10	2,10E+11	1,00E+10	0,00E+00	Ausentes	0,00E+00	Ausentes

Fuente: Ficha técnica del fertilizante orgánico CEAGRODEX

2.4.4 Beneficios

Nivel biológico

- Aumenta la flora microbiana beneficiosa.
- Aumenta la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades

Nivel físico

- Mejora la aireación y capacidad de retención de agua y nutrientes.
- Mejora la capacidad de germinación de las semillas.
- Reduce la erosión del suelo.
- Mejora el manejo del suelo.

Nivel químico

- Enriquece el suelo de sustancias orgánicas y minerales esenciales.
- Promueve la asimilación de los nutrientes transformándolos en formas asimilables.
- Conserva y eleva el contenido orgánico de los suelos.

2.4.6 Antecedentes

El presente trabajo se realizó como continuación de un proyecto de investigación (Bermeo & Pérez, 2017) en donde se evaluó el abono orgánico de la empresa CEAGRODEX como agente biorremediador, se desarrolló mediante un diseño experimental basado en 12 muestras preparadas con el mismo tipo de suelo y variación de la carga contaminante, a las cuales se les realizó la prueba TPH a diferentes tiempos para determinar la eficiencia del abono, analizando que relación suelo : abono era más favorable para el caso, de esto se concluyó que la mejor relación era la 1:2; sin embargo, desde la 1:1 era buena pero claramente el resultado era más lento.

Del documento mencionado, se tomó de las conclusiones:

“Se comprobó que el abono 100% orgánico de la empresa CEAGRODEX cumplió con las expectativas que se tenían como agente biorremediador, debido a su alta carga orgánica y por ende su elevada presencia de bacterias y microorganismos, haciendo que los niveles de TPH disminuyeran en proporciones diferentes siguiendo el diseño experimental propuesto.”

“La disminución en los valores de los TPH se hizo más notable al momento de realizar las pruebas correspondientes a la serie 4 (análisis adicional), es decir, entre los 25 y 90 días del proceso de biorremediación proporcionado a cada era, donde se encontró la eliminación total de los TPH en las muestras M2, M6 y M10, se evidenció que las muestras M1, M3, M4, M5, M7 y M9 lograron porcentajes de TPH inferiores al 3%, cumpliendo con establecido por la norma Louisiana 29B (norma a la cual Colombia se encuentra acogida).”

2.5 ÁREA DE ESTUDIO

La zona privada en la cual se dispuso la planta piloto se encuentra ubicada en la vereda Santa Clara del municipio de Palermo, debido a que la vereda colinda con la Batería Santa Clara de Ecopetrol y que se pueden presentar fallas mecánicas en las líneas, equipos, tanques, provocando una posible contaminación del suelo. Se hizo uso de la tierra de la zona para tener una referencia de biorremediación si se presentan esta clase de afectaciones.

Ilustración 5. Propiedad privada La Bonita



Ubicación:

Coordenadas: N 2°57'20" W 75°19'50"

Ilustración 6. Imagen aérea de la propiedad privada La Bonita



En esta zona se puede encontrar suelos áridos debido al clima cálido - seco de la zona, presenta una vegetación con predominio de pastos, rastrojos útiles para la ganadería.

Estratigráficamente en el área se presenta afloramiento de unidades de origen sedimentario, areniscas y arcillolitas con lentes delgadas de conglomerados,

3. MARCO EXPERIMENTAL

En el capítulo de marco teórico se presenta los factores a tener en cuenta en un proceso de biorremediación, a partir de ello, se describen las características y metodología bajo las cuales se desarrolló el presente proyecto.

3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Como se ha mencionado, este proyecto es de evaluación de la eficiencia bajo parámetros de pH, humedad, y carga contaminante de un abono probado anteriormente (Bermeo & Pérez, 2017), en donde se aconseja trabajarlo por un tiempo de aproximadamente 90 días, debido a que al transcurrir este tiempo se logró porcentajes de TPH inferiores al 3% de 9/12 de sus muestras. En la tabla 10 se especifican estos valores y el tiempo al cual se realizan las pruebas de TPH.

Tabla 10. Prueba de TPH de las muestras de suelo

Suelo : Abono		1:1											
Humedad (g H ₂ O /Kg suelo)		150						250					
Carga contaminante		3%		5%		10%		3%		5%		10%	
pH		7	9	7	9	7	9	7	9	7	9	7	9
Tiempo (días)	0												
	30												
	60												
	90												

El crecimiento de la mayor parte de los microorganismos es máximo dentro de un intervalo de pH situado entre 6 y 8, por ello se tomó el valor de pH de 7, no se tomaron valores inferiores a 6 debido a que son condiciones propicias para el crecimiento de hongos y no favorece a la naturaleza del estudio, se eligió el pH 9 que, es el valor alcalino más cercano a pH neutro y se espera que el abono por ser 100% orgánico pueda trabajar bajo esta condición.

Para la elección de valores de humedad, se optó por hacer las mismas pruebas a muestras con 150 y 250 gramos de agua por kilogramo de suelo ya que son valores recomendados para procesos de biorremediación (Torres & Zuluaga, 2009) y poder ver su influencia en la remediación de las muestras contaminadas.

Se optó por utilizar un diseño correspondiente al 3% de carga contaminante que corresponde al valor máximo permitido de TPH's en suelos contaminados

(Louisiana 29B), con el fin de tener como punto de referencia inicial el valor permitido en la actualidad; de igual modo se diseñaron otras dos concentraciones una al 5% que sería el valor de referencia intermedio y otra al 10% que determina el valor final y máximo de contaminación empleado en la realización del proyecto además de que estos valores (3, 5 y 10% carga contaminante) permiten comparar resultados con los proyectos mencionados en el capítulo de abono CEAGRODEX.

Como se mencionó en la sección 2.4.6 Antecedentes, el trabajo de grado de Pérez & Bermeo, 2017 en donde se analizó qué relación suelo: abono era más favorable para el proceso, se concluyó que la mejor relación era la 1:2; sin embargo, desde la 1:1 era buena pero claramente el resultado era más lento, por lo que en el presente proyecto se estipula esta última para tener una base de tiempo mínimo en el cual se pueda presentar resultados óptimos.

3.2 TOMA Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO

En este proceso se tuvo en cuenta el terreno en el cual serían dispuestas las muestras de suelo contaminadas, como se mencionó en el Numeral 2.5, el proyecto se realizó en una propiedad privada, la cual se dispuso para la instalación de la planta piloto, la extracción y la disposición final del suelo. La selección de la zona landfarming se basó en buscar un área de más de $10m^2$ que corresponden a las eras de estudio y el sistema de recolección de lixiviados, que se encuentre relativamente alejado de la propiedad, y con facilidad de ingreso.

Se decidió realizar el trabajo en un área cercada a unos 100 metros de la propiedad, se procedió a cavar y realizar el montaje, se dejaron los espacios de las eras correspondientes y su respectivo sistema de drenaje, se adecuó malla polisombra, para mejorar las condiciones de trabajo y disminuir la influencia del ambiente en las eras. Se instaló en el suelo, plástico para impermeabilizarlo impidiendo el paso no deseado de lixiviados o parte de las muestras contaminadas al mismo.

Ilustración 8. Montaje área landfarming



Se hizo uso de la tierra que se extrajo a la hora de cavar las eras para la preparación de las muestras, ésta se tamizó para llevarla al Laboratorio de Suelos y Laboratorio de Química de la Universidad Surcolombiana y proceder a describir el suelo previamente a su contaminación, y tener una base de comparación al finalizar el proyecto.

En el ANEXO B se presentan las pruebas realizadas al suelo y su respectiva descripción; a continuación, en la tabla 11, se presentan los datos obtenidos.

Tabla 11. Muestra de suelo previo a contaminación

Color	Light olive Brown
Conductividad	255,0 mV
Densidad	1,26 g/mL
Humedad	18%
pH	6,33
Porosidad	56,5
Tipo	Franco arcillo arenosa

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO

El crudo utilizado en este proyecto fue suministrado por la empresa estatal ECOPETROL, proveniente del campo Tenay, el cual se encuentra ubicado en el Departamento del Huila, en jurisdicción del municipio de Neiva, a 325 Km. al sur de la ciudad de Bogotá. Hace parte de los campos pertenecientes a la ex-concesión Neiva-540, localizada en la Cuenca del Valle Superior del Magdalena. El campo Tenay lo constituye un área de 400 acres.

Fue descubierto en 1985 con la perforación del pozo Tenay-1 con producción inicial de 1.800 BOPD. Se han perforado solamente cuatro pozos a una profundidad aproximada de 12.000 pies; uno de los cuales quedó por fuera en el lado este. El campo ha producido desde entonces 7 MBIs de petróleo de 36° API hasta diciembre de 1998.

Tabla 12. Caracterización del crudo Tenay

Densidad (g/cc)	0,833
°API	37
Viscosidad (cP)	1,638
Factor volumétrico (BY/BY)	1,7623
Compresibilidad (1/psig)	2,45E-5
Rs (PCN/BF)	1421

3.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SUELO LIMPIO Y REMEDIADO

Para conocer el comportamiento del abono sobre el tipo de suelo usado, se realiza una serie de pruebas para determinar las características fisicoquímicas del suelo limpio y del mismo después del proceso de biorremediación.

Tabla 13. Comparación de propiedades del suelo previo y después de su contaminación y biorremediación

	Suelo limpio	Suelo biorremediado
Color	Light olive Brown	Dark yellowish brown
Conductividad	255,0 mV	222 mV
Densidad	2,23 g/mL	1,8 g/mL
Humedad	3.9%	22
pH	6,33	6,93
Porosidad	43,5	42
Tipo	Franco arcillo arenosa	Franco arenosa

En cuanto a las propiedades físicas perceptibles por los autores de las muestras, se tiene que, en el área de estudio, al día 11 después de la preparación de las mismas, ya no presentaban el olor y la fluorescencia característica del hidrocarburo en aquellas con baja carga contaminante inicial, sin embargo, el olor dejó de ser apreciable hasta el día 23 en las muestras 5, 6, 11 y 12, y en éstas últimas hasta el día 60 se evidenciaba una fluorescencia en la parte superficial del suelo abonado.

74. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo al montaje realizado en la propiedad privada La Bonita, se enumeraron y caracterizaron las eras como se enuncia en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores de carga contaminante, pH, y humedad de cada era.

ERA	CARGA CONTAMINANTE (%)	pH	HUMEDAD (g H ₂ O/Kg suelo)
1	3	7	150
2	3	9	150
3	5	7	150
4	5	9	150
5	10	7	150
6	10	9	150
7	3	7	250
8	3	9	250
9	5	7	250
10	5	9	250
11	10	7	250
12	10	9	250

Fuente: Autores

En la tabla 15. se muestra cómo fueron distribuidas las cantidades de suelo, abono, agua y crudo. Para evitar una redistribución de los valores de agua y crudo debido a la adición del abono a las muestras de suelo ya contaminadas, fue necesario hacer las proporciones teniendo en cuenta la cantidad total que habría de suelo y abono al finalizar la preparación de éstas. Por esto desde el comienzo se trabajó con valores iniciales de 3, 5 y 10% de crudo y de 150 y 250 g H₂O / Kg suelo según corresponda.

Tabla 15. Composición de las eras

ERA	SUELO (g)	ABONO (g)	AGUA (g)	CRUDO	
				g	mL
1	6804	6804	2041	408,24	501,9
2	6804	6804	2041	408,24	501,9
3	6804	6804	2041	680,4	836,6
4	6804	6804	2041	680,4	836,6
5	6804	6804	2041	1360,8	1673,1
6	6804	6804	2041	1360,8	1673,1
7	6804	6804	3402	408,24	501,9
8	6804	6804	3402	408,24	501,9
9	6804	6804	3402	680,4	836,6
10	6804	6804	3402	680,4	836,6
11	6804	6804	3402	1360,8	1673,1
12	6804	6804	3402	1360,8	1673,1

A continuación, en la tabla 16 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de TPH a los tiempos de 0, 30, 60 y 90 días. En el Anexo C, se muestran los materiales y procedimiento que se siguió para determinar el TPH de las muestras analizadas.

Tabla 16. Valores de TPH en porcentaje de crudo de las muestras

Suelo : Abono		1:1											
Humedad (g H ₂ O/ Kg suelo)		150						250					
Concentración		3%		5%		10%		3%		5%		10%	
pH		7	9	7	9	7	9	7	9	7	9	7	9
Tiempo (días)	0	2,900	2,800	4,300	4,700	9,600	10,00	2,900	2,900	5,000	4,800	9,900	9,5
	30	1,700	2,100	2,800	3,400	4,600	5,300	1,900	2,300	3,300	3,700	5,200	6,8
	60	0,155	0,281	0,258	0,456	0,265	0,457	0,189	0,294	0,344	0,483	0,428	0,9
	90	ND	ND										

ND: No detectable con el método gravimétrico modificado.

4.1 ANÁLISIS TÉCNICO

El análisis técnico se divide en 3 secciones, las cuales comprenden la comparación de muestras para evaluar los parámetros (humedad, carga contaminante y pH) de manera individual determinando su influencia en el proceso de biorremediación.

4.1.1 Análisis de humedad

En la presente sección se comparan las muestras cuyo valor de humedad es diferente y los de carga contaminante y pH iguales, de esta manera solo se verá la influencia de este parámetro. Como se observa en la tabla 17, los valores de porcentaje de crudo a tiempo 0, en la mayoría de las muestras se desvían de los valores planteados en el diseño experimental (3, 5 y 10%), lo cual se pudo deber a la homogenización y manejo de las muestras por parte de los autores o debido a la interacción de un crudo muy volátil como lo es el de crudo Tenay con el abono y el ambiente de deposición, por esta razón es necesario analizar estos parámetros de acuerdo al porcentaje de biorremediación (%Brr) presentada con respecto a los datos de TPH a tiempo 0 días.

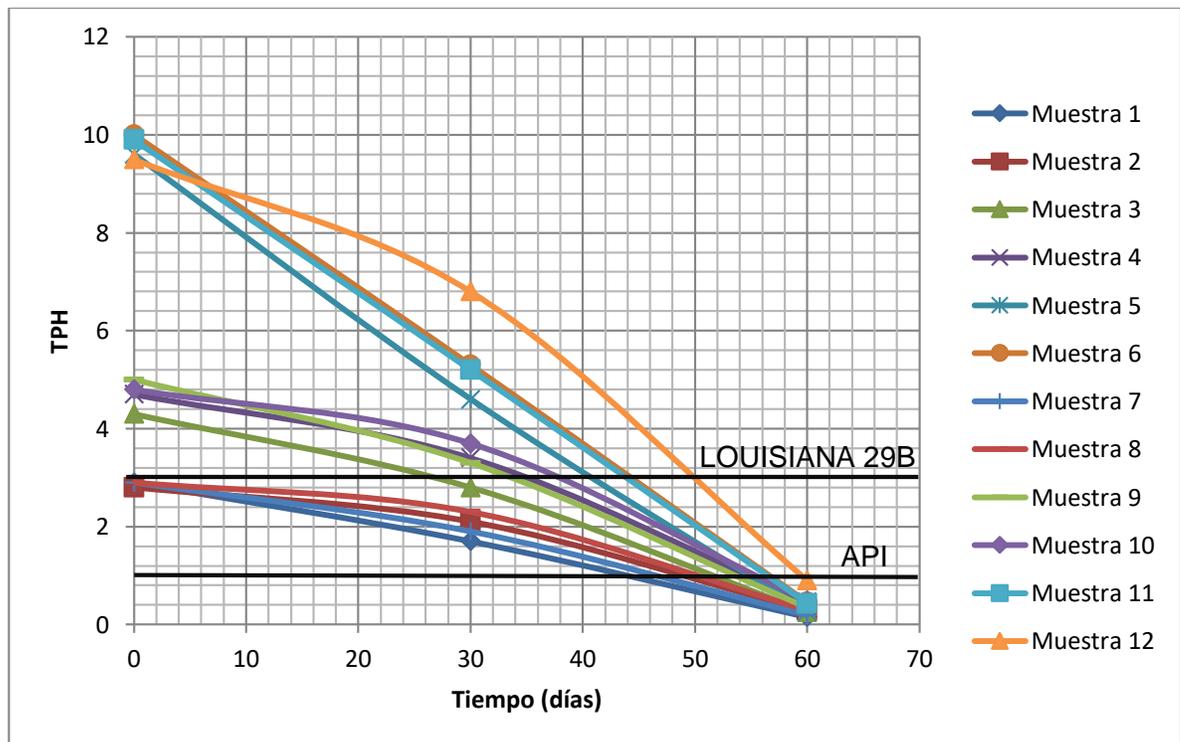
Tabla 17. Porcentaje de biorremediación con respecto al tiempo.

TIEMPO	0 días		30 días		60 días		90 días	
	% Crudo	%Brr	% Crudo	%Brr	% Crudo	%Brr	% Crudo	%Brr
1	2,9	0	1,7	41,379	0,1554	94,641	ND	100
2	2,8	0	2,1	25,000	0,2808	89,971	ND	100
3	4,3	0	2,8	34,884	0,2575	94,012	ND	100
4	4,7	0	3,4	27,660	0,456	90,298	ND	100
5	9,6	0	4,6	52,083	0,265	97,240	ND	100
6	10	0	5,3	47,000	0,457	95,430	ND	100
7	2,9	0	1,9	34,483	0,189	93,483	ND	100
8	2,9	0	2,3	20,690	0,2943	89,852	ND	100
9	5	0	3,3	34,000	0,3435	93,130	ND	100
10	4,8	0	3,7	22,917	0,4825	89,948	ND	100
11	9,9	0	5,2	47,475	0,428	95,677	ND	100
12	9,5	0	6,8	28,421	0,9	90,526	ND	100

ND: No detectable al método gravimétrico modificado (Extracción por solvente)

Los datos de porcentaje biorremediado al tiempo de 60 días presentados en la Tabla 17, son mayores del 89% siguiendo el comportamiento que presentan las muestras, los valores de TPH serán No Detectables mucho antes de los 90 días, así que se procede a estimar la función de la línea de tendencia que más se ajusta a las series de datos representados en la gráfica 1, y con ella determinar aproximadamente el día en el que la carga contaminante empezó a ser imperceptible por el método gravimétrico modificado tal como se registra en la tabla 18.

Gráfica 1. TPH Vs. Tiempo (días).

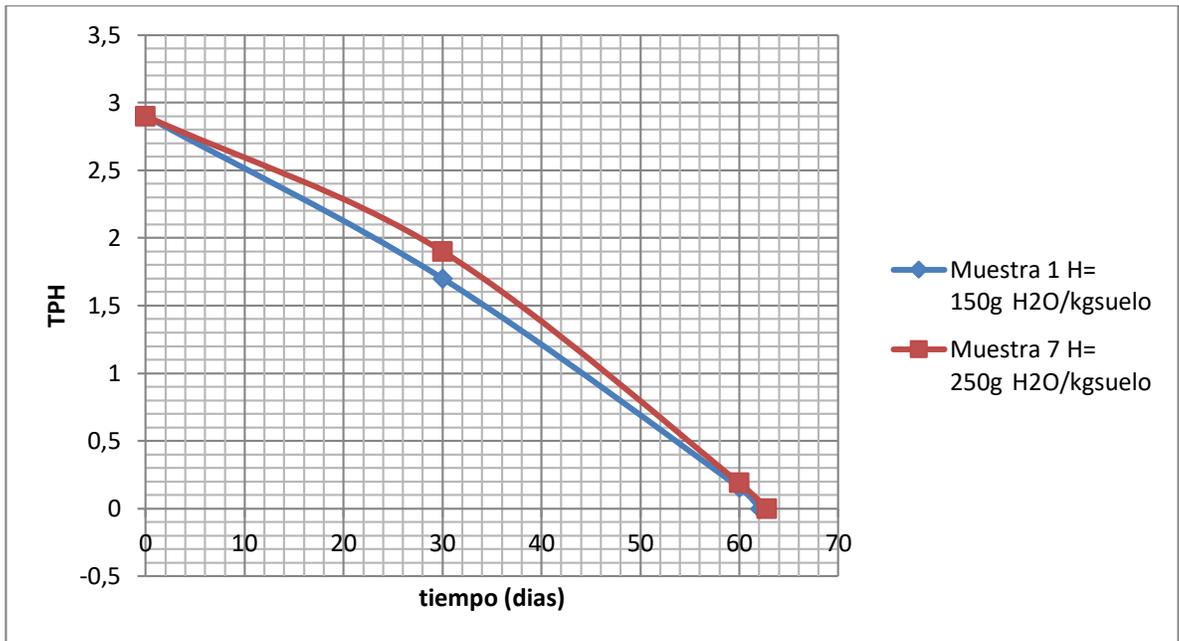


En la gráfica 1 se observa que las muestras 3,4,9 y 10 con TPH inicial de 5%, al tiempo de 38 días y las muestras 5,6,11 y 12 con TPH inicial de 10% a los 50 días aproximadamente cumplen los requisitos de la norma Louisiana 29B, y para estar bajo el 1% exigido en la norma API las muestras con TPH inicial de 3, 5 y 10% requieren estar 50, 56 y 60 días respectivamente en el proceso de biorremediación.

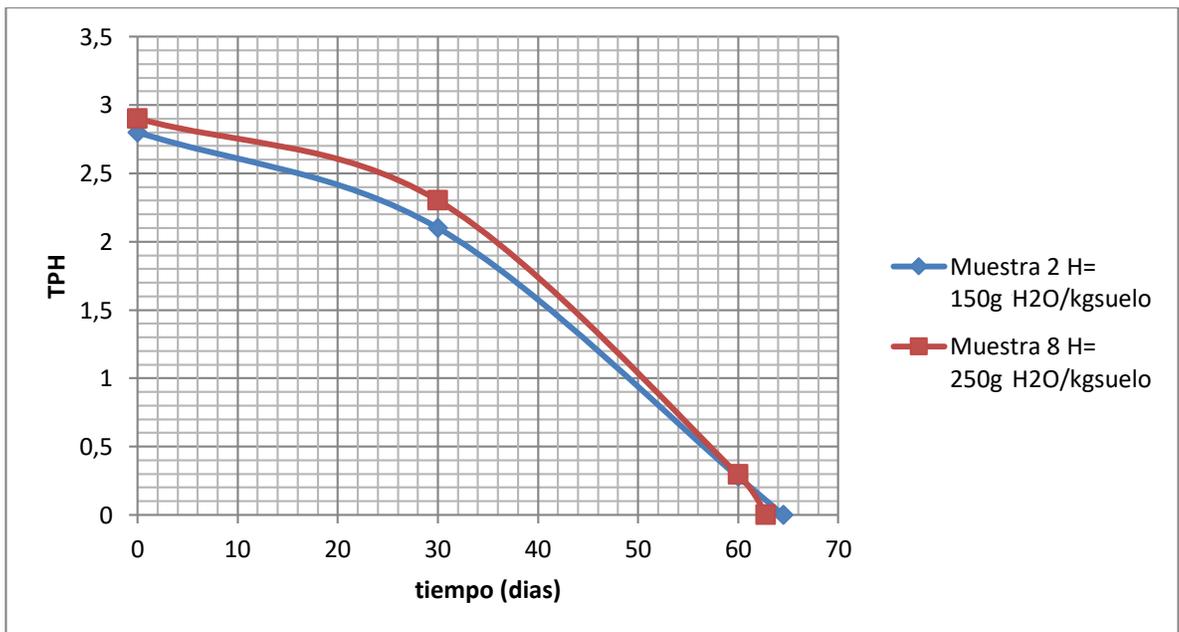
Tabla 18. Estimación del tiempo @TPH=0

muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TPH 0	62,1	64,5	61,7	64,0	62,0	62,8	62,8	62,8	62,8	62,7	62,8	63,2

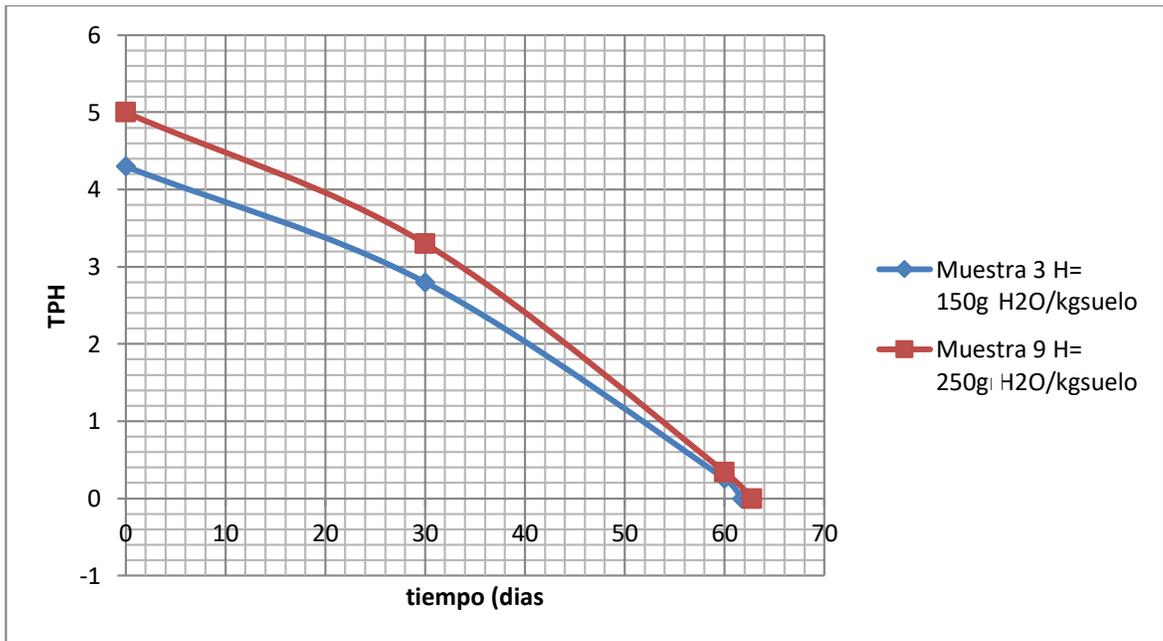
Gráfica 2. TPH Vs. Tiempo - pH 7 y carga contaminante: 3%



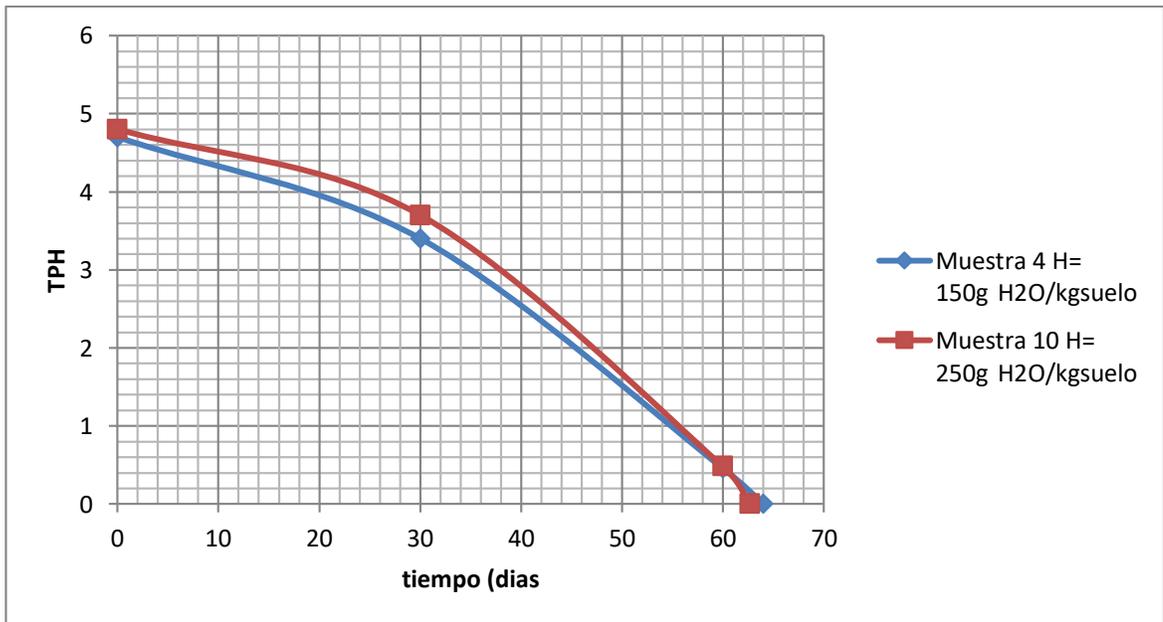
Gráfica 3. TPH Vs. Tiempo. – pH 9 y carga contaminante: 3%



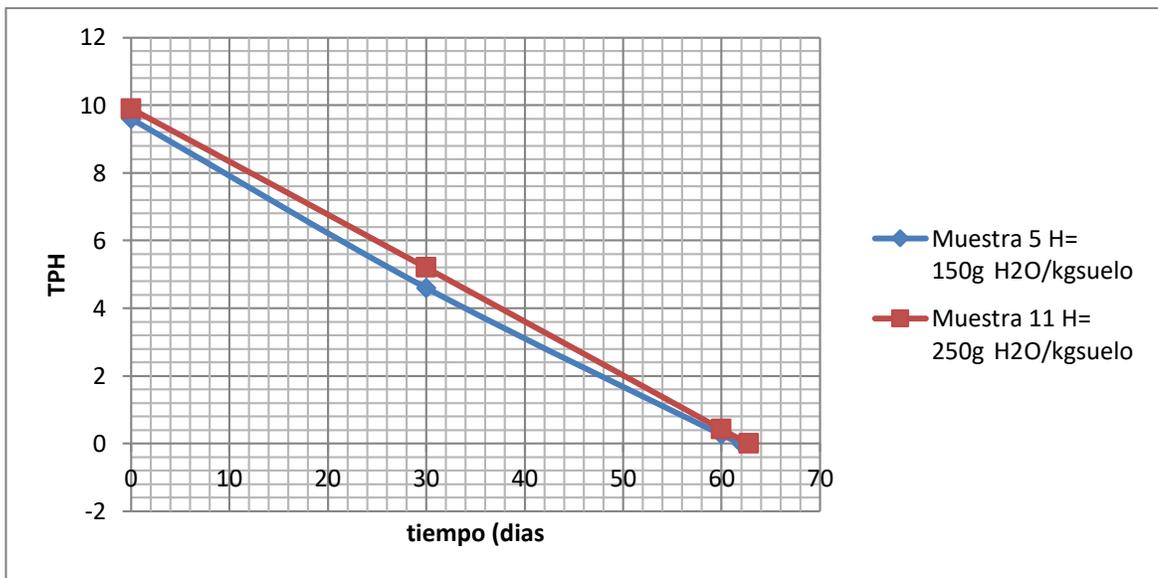
Gráfica 4. TPH Vs. Tiempo. – pH 7 y carga contaminante: 5%



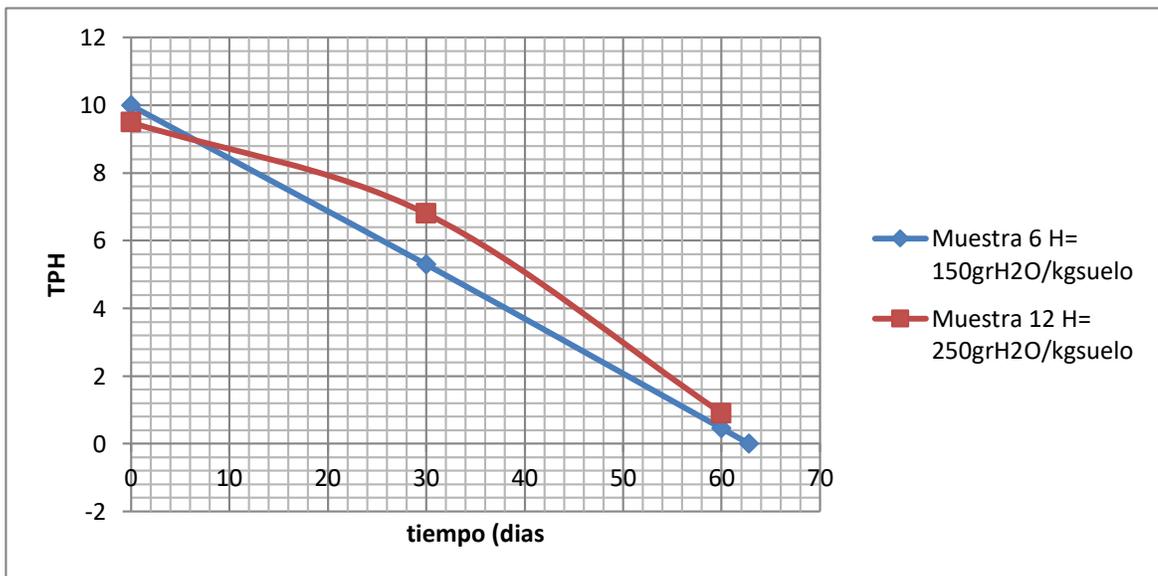
Gráfica 5. TPH Vs. Tiempo. pH 9 y carga contaminante: 5%



Gráfica 6. TPH Vs. Tiempo. – pH 7 y carga contaminante: 10%



Gráfica 7. TPH Vs. Tiempo. – pH 9 y carga contaminante: 10%



En las gráficas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 se observa que durante el proceso de biorremediación las muestras con humedad de 150 g H₂O/ Kg suelo tenían menores valores de TPH con respecto a las muestras de 250 g H₂O/ Kg suelo, es decir, las 6 primeras muestras presentan mayor porcentaje de biorremediación principalmente durante el primer mes en comparación con las 6 últimas muestras.

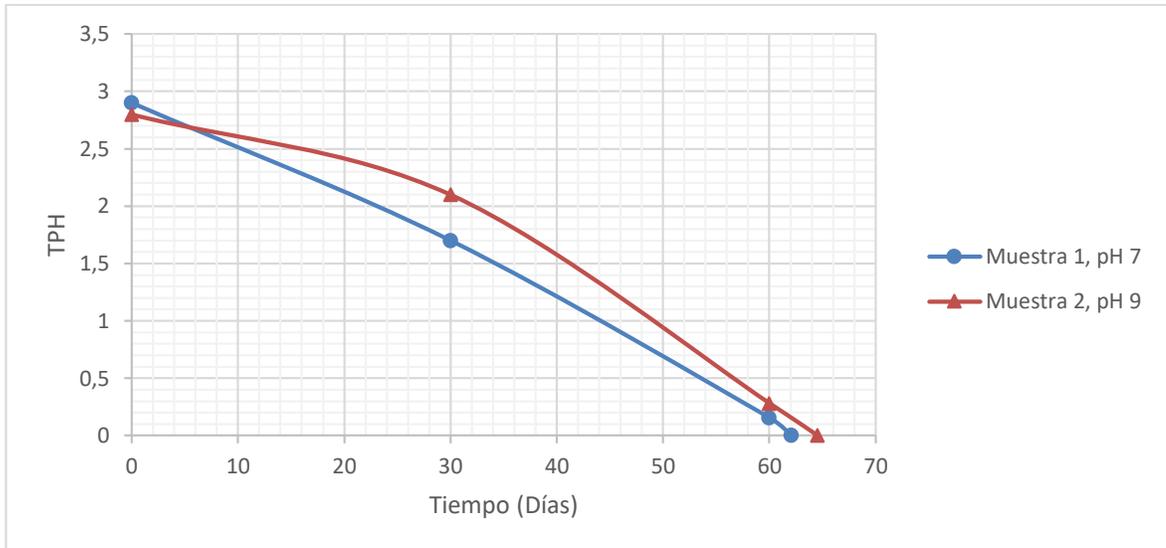
Las diferencias de TPH entre las muestras comparadas en cada gráfica varían con el tiempo, ya que a 30 días esta diferencia es en promedio 0.55% y a 60 días sólo era de 0.1276%. Dicho de otro modo, las ratas de biorremediación de las muestras de 250 g H₂O / Kg suelo después de los 30 días aumentaron aún más que las ratas de biorremediación de las muestras de 150 g H₂O / Kg suelo, se puede confirmar considerando las pendientes de disminución de TPH con respecto al tiempo, las 6 primeras muestras tienen en promedio una pendiente negativa de 0.08 y las muestras 7, 8, 9, 10, 11 y 12 tienen como pendiente negativa promedio 0.065 al cabo de los 30 días, pero en el segundo mes el comportamiento cambia, debido a que las muestras de mayor humedad (muestras 7, 8, 9, 10, 11 y 12) aumentaron su pendiente negativa promedio a 0.1142 y las muestras correspondientes con humedad de 150 g H₂O / Kg suelo solo aumentaron su pendiente negativa promedio a 0.1001, pero los valores de TPH siguen siendo menores en las muestras de baja humedad en el proyecto.

Durante los meses de octubre y noviembre (del día 30 a 90) se presentaron precipitaciones, lo que aumento la humedad relativa del ambiente y aunque las muestras dispuestas en el suelo estaban protegidas por plásticos y una cuneta perimetral hubo un aporte de humedad por parte del ambiente, por lo que fue necesaria la adición de cal para corregir la humedad y pH. Para esta época también hubo presencia de ciempiés (pertenecen a la familia de los artrópodos, concretamente al grupo de las Myriapodas); éstos se alimentan de materiales orgánicos en descomposición, lo que beneficia la naturaleza del proyecto, ya que contribuye a la oxigenación del área de landfarming, aumentando el efecto biorremediador del abono, lo cual se observa en el cambio notable de las pendientes de las gráficas 2, 3, 4, 5 y 7 que eran en promedio de -0.073 hasta que las muestras llegan a los 30 días y de ahí cambia a -0.107 hasta los 60 días y por ultimo a -0.134 aproximadamente hasta que los valores de TPH no son detectables por el método usado.

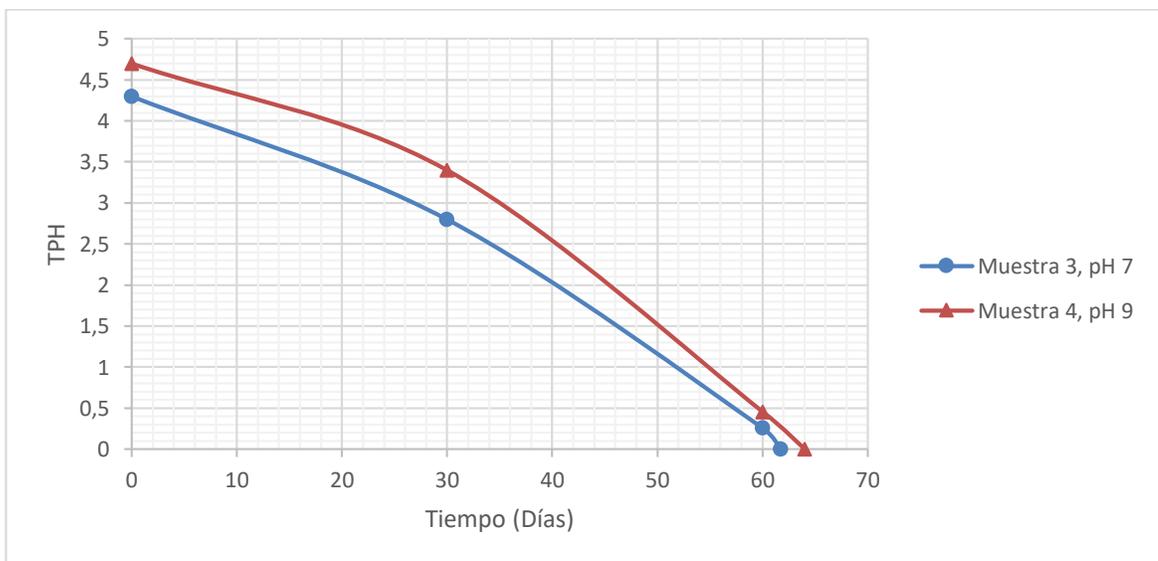
4.1.2 Análisis de pH

Se comparan y analizan las muestras teniendo en cuenta que su humedad y carga contaminante sean iguales y difiera el valor del pH, así solo se evidenciará la influencia de esta variable en la disminución del TPH de las muestras.

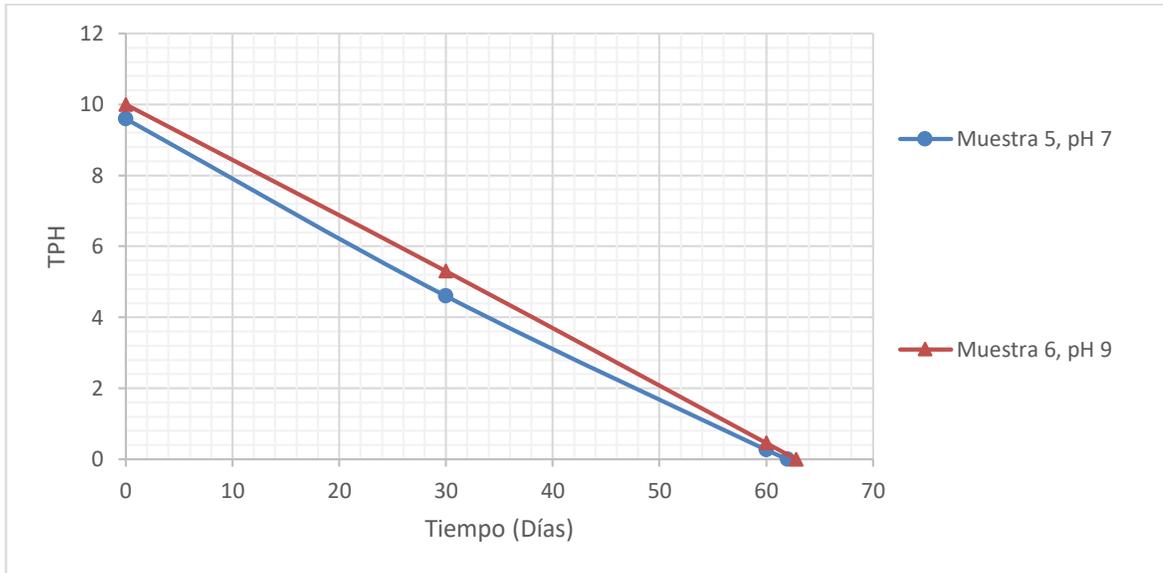
Gráfica 8. TPH Vs. Tiempo. Humedad:150 g H₂O/Kg suelo y carga contaminante:3%



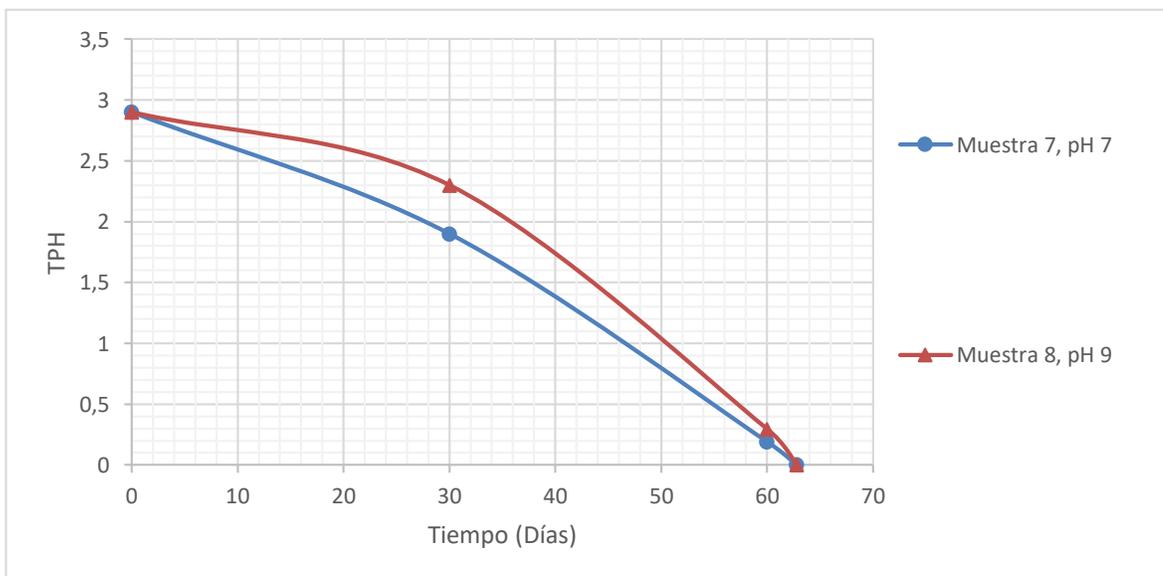
Gráfica 9. TPH Vs. Tiempo. Humedad:150 g H₂O/Kg suelo, carga contaminante:5%



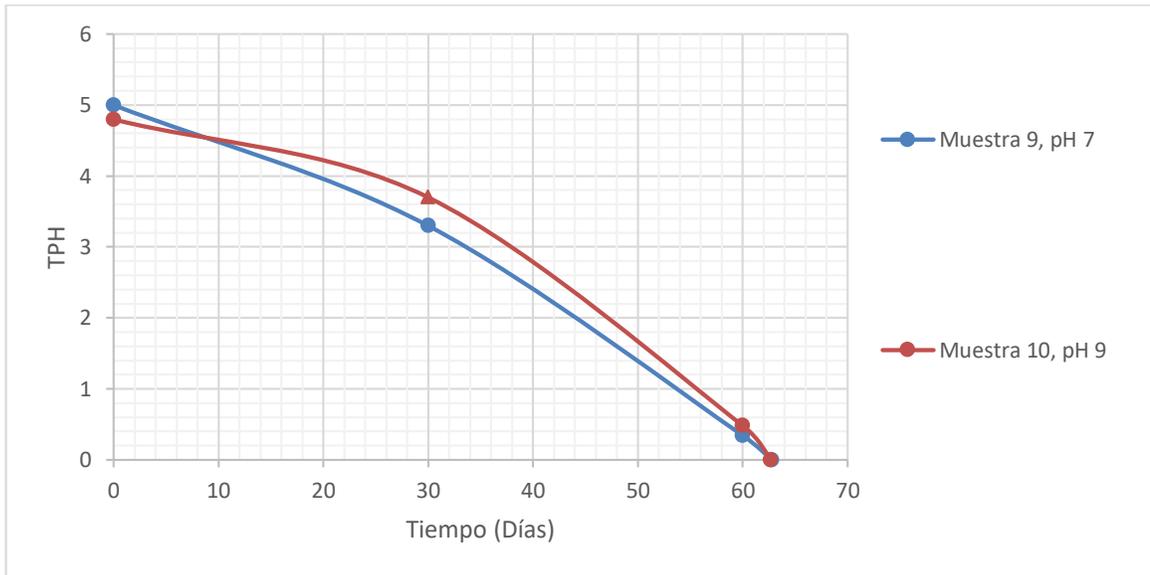
Gráfica 10. TPH Vs. Tiempo. Humedad: $150 \text{ g H}_2\text{O/Kg Suelo}$, carga contaminante: 10%



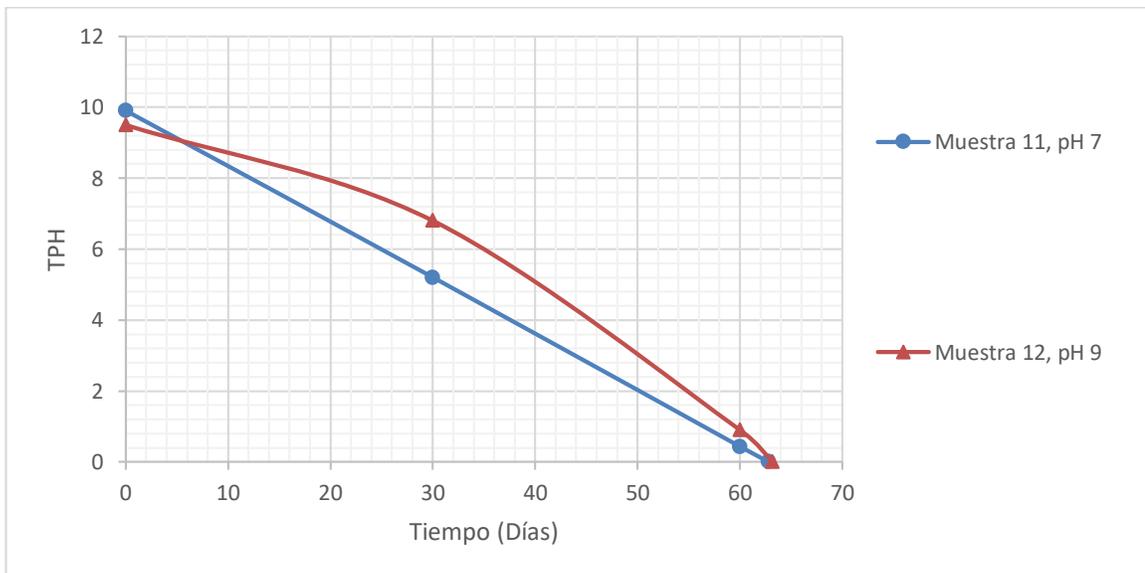
Gráfica 11. TPH Vs. Tiempo. Humedad: $250 \text{ g H}_2\text{O/Kg Suelo}$, carga contaminante: 3%



Gráfica 12. TPH Vs. Tiempo. Humedad: 250 g H₂O/Kg Suelo, carga contaminante:5%



Gráfica 13. TPH Vs. Tiempo. Humedad: 250 g H₂O/Kg Suelo, carga Contaminante:10%



Como se mencionó en el Numeral 3, el pH óptimo para el crecimiento de microorganismos es un pH neutro (Dibble & Bartha, 1979), por lo que es de esperarse que las muestras de pH 7, tengan mayor número de comunidades bacterianas y éstas harán el proceso de biorremediación aún más rápido que las muestras de pH 9. En la tabla 18, se muestra el tiempo en días calculado para el cual las muestras presentan una cantidad de TPH no detectable por el método usado, los correspondientes a las muestras 1, 3, 5, 7, 9 y 11 las cuales poseen un pH de 7, son menores en comparación con las muestras 2, 4, 6, 8, 10 y 12 con un pH de 9.

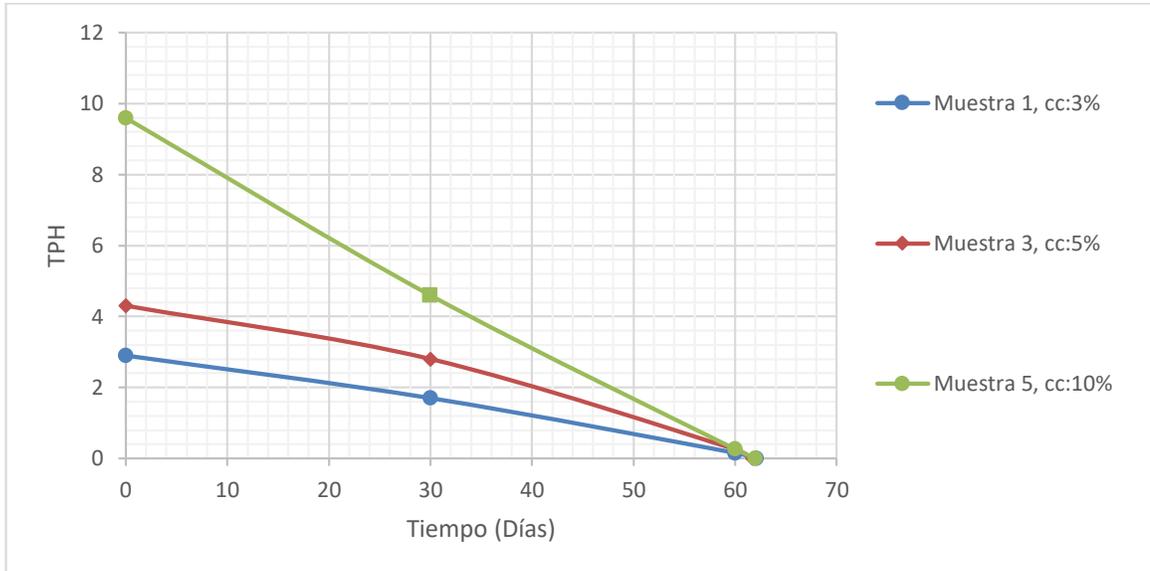
En las gráficas de la sección 2. Análisis de pH, se puede confirmar lo expuesto en el párrafo anterior, por ejemplo en la gráfica 8, se tiene el comportamiento del TPH con respecto al tiempo de la muestras 1 con humedad del 150 g H₂O/ Kg suelo y carga contaminante del 3%, pH de 7 y la muestra 2 con humedad del 150 g H₂O/ Kg suelo y carga contaminante del 3%, pH de 9, para un tiempo de 30 días la muestra 1 presenta un valor de TPH del 1.7%, menor al TPH de 2.1 % de la muestra 2, es decir, la muestra con pH de 7 presenta una rata de biorremediación mayor que la muestra con pH de 9.

También es claro que la rata de biorremediación de las muestras de pH 9 aumentó en el periodo de 30 a 60 días como se puede ver en las gráficas 8, 9, 11, 12 y 13, ya que a partir del día 30 comienza a incrementar la pendiente negativa, dando a entender que estas muestras aumentaron su rata biorremediadora, pero siguen sin presentar valores de TPH mayores a la de las muestras de pH 7.

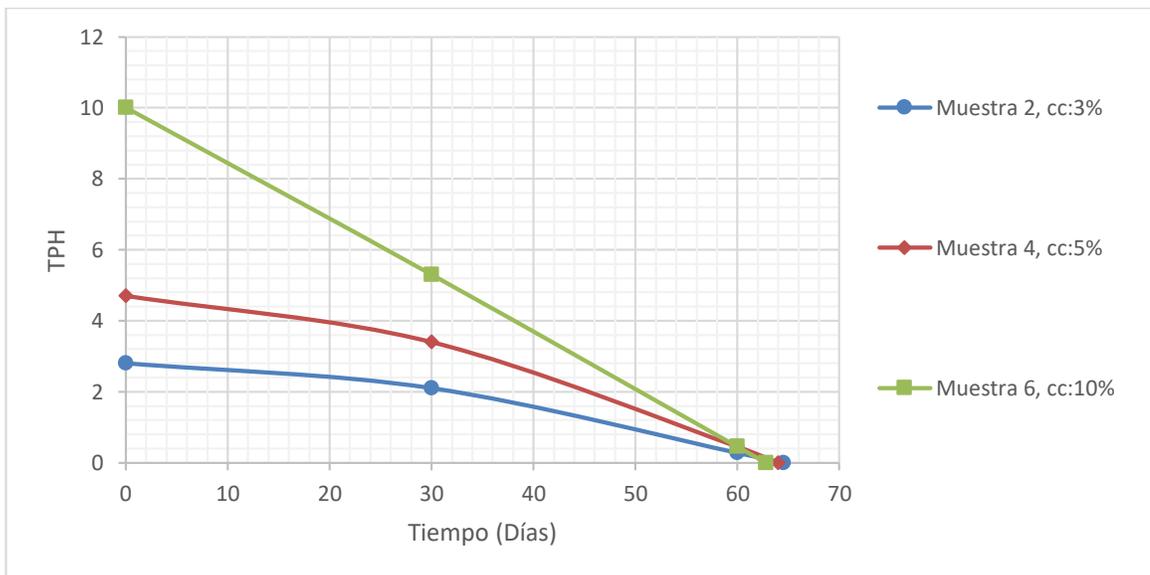
4.1.3 Análisis de la carga contaminante

En esta sección se agrupan y comparan las muestras que según el diseño experimental presentado en el marco teórico tienen valores de pH y humedad iguales y varía su carga contaminante inicial, obteniendo cuatro (4) gráficas (14, 15, 16 y 17) de TPH Vs. Tiempo, con tres (3) series de datos que corresponde a las muestras con 3, 5 y 10% de concentración de crudo a tiempo 0 días.

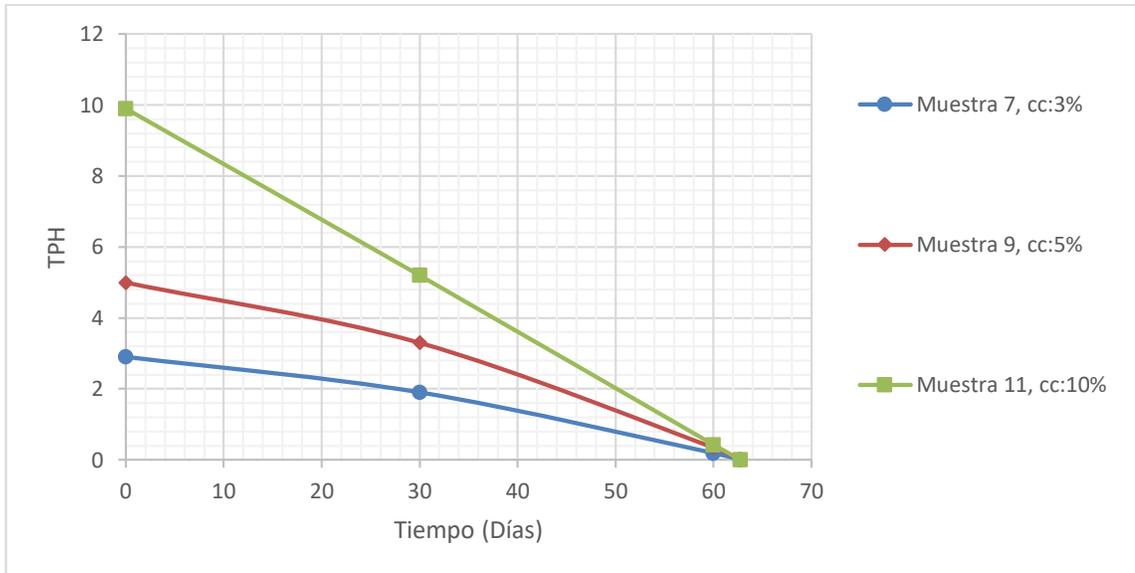
Gráfica 14. TPH Vs. Tiempo. pH 7 y humedad: 150 g H₂O/Kg Suelo



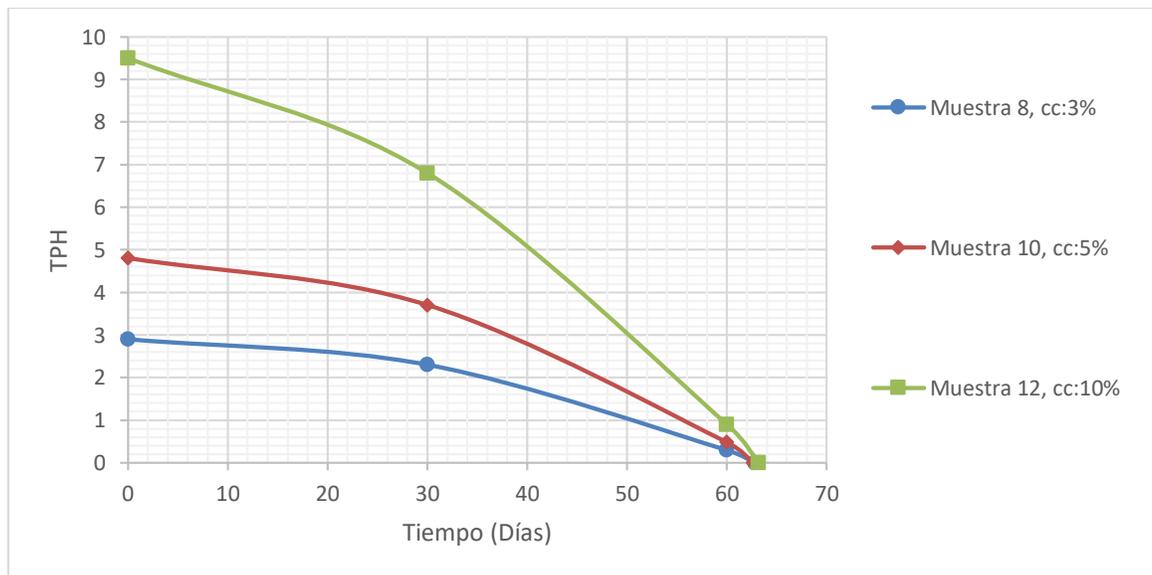
Gráfica 15. TPH Vs. Tiempo. pH 9 y humedad: 150 g H₂O/Kg Suelo



Gráfica 16. TPH Vs. Tiempo. pH 7, humedad: 250 g H₂O/Kg Suelo



Gráfica 17. TPH Vs. Tiempo. pH 9, humedad: 250 g H₂O/Kg Suelo



Inicialmente se esperaba que se remediaron más rápido las muestras que poseían mayor TPH inicial debido a la presencia de bacterias organotrofas que aprovechan la presencia de hidrocarburos, y al haber un mayor porcentaje, éstas se nutren y

reproducen exponencialmente más rápido que las comunidades en donde la concentración inicial de hidrocarburos fue menor, sin embargo, el porcentaje de hidrocarburo se disminuyó notablemente en las muestras, haciendo que las comunidades bacterianas también disminuyan, así la rata de biorremediación será más pequeña a medida que avanza el tiempo, para el día 60 las muestras a comparar en las gráficas 14, 15, 16 y 17 tenían valores cercanos de TPH, al extrapolar el comportamiento que presentaba la biorremediación para cada muestra se obtuvo a qué día aproximadamente finaliza este proceso (Tabla 18) viéndolo como el último punto de cada serie de datos representado en las gráficas mencionadas, al observarlo se ve claramente que el tiempo para biorremediar casi a totalidad las muestras es menor para las que tenían inicialmente un TPH de 3%.

Teniendo en cuenta que para las muestras con pH 7 y carga contaminante alta, el tiempo para que proceso de biorremediación permita tener valores cercanos a cero de TPH, es menor que las muestras con pH 9 y misma carga contaminante, por lo tanto, para mayor crecimiento microbiológico a altos niveles de contaminación por hidrocarburos (TPH 10%) se requiere un pH neutro.

4.2 APORTE NUTRICIONAL DEL ABONO

Es conveniente determinar el aporte de nutrientes por parte del abono al suelo de estudio partiendo de la ficha técnica obtenida de la empresa CEAGRODEX, sabiendo que todas las muestras finalmente fueron biorremediadas, se quiere resaltar parte de los componentes obtenidos, beneficios en cuestión de nutrientes y elementos que éste le brinda al suelo en su interacción.

“Se conoce que el abono es una sustancia rica en nutrientes, empleada en su mayoría para mejorar las condiciones de los suelos principalmente con fines agrícolas, ya que son capaces de optimizar y recuperar la materia orgánica de los suelos, permitiendo la fijación del carbono en éste y mejorando así la capacidad de absorción de agua entre otras cosas.” (Bermeo & Pérez, 2017). Teniendo en cuenta lo anterior se llevó a cabo en la tabla 19. una relación correspondiente a los nutrientes que aportó el abono al suelo tratado y como éste mejoró sus niveles de fijación de nutrientes.

Tabla 19. Aporte nutricional del abono a cada era

Nutrientes	% en 1 bulto (50Kg)	g Nutrientes / bulto de Abono	g Nutrientes / era
Nitrógeno Total (N)	2.56	1280	174.1824
Fosforo total (P ₂ O ₅)	2.558	1279	174.04632
Potasio (K ₂ O)	0.517	258.5	35.17668
Sodio (Na)	1.056	528	71.85024
Calcio (Ca)	2.45	1225	166.698

4.3 ANÁLISIS BIOLÓGICO

Teniendo en cuenta que las muestras de suelo fueron biorremediadas hasta que el contenido de hidrocarburos fue no detectable por el método gravimétrico modificado y el gran aporte nutricional por parte del abono, se aprovecharon semillas de lentejas y lechugas para ratificar que la cantidad de nutrientes son asimilables por las plantas y determinar el comportamiento de las mismas en comparación con muestras que no han pasado por procesos de contaminación y biorremediación.

4.3.1 Lenteja

Se añadieron 3 semillas de lenteja en cada uno de seis envases plásticos que contenían muestras de tierra que habían pasado por el proceso de biorremediación del presente proyecto (Eras 1, 2, 3, 4, 5 y 6), a continuación, se muestra la Tabla 20, en la cual se anotaron las observaciones de su crecimiento con respecto al tiempo.

Tabla 20. Seguimiento fisiológico de las semillas de lentejas sembradas en tierra de vivero

No. Semillas	Tiempo			
	0 días	2 días	4 días	7 días
3	No germina	No germina	Germina 1 semilla, presencia de tallo de 2 cm, con pequeño brote de hoja	Presencia de 3 tallos de 9, 12 y 17 cm con 4, 9 y 13 hojas de 6 mm aproximadamente en cada uno

Fuente: Autores

Tabla 21. Seguimiento fisiológico de las semillas de lentejas en muestras biorremediadas

	No. Semillas	Tiempo 0 días	Tiempo 2 días	Tiempo 7 días
1	3	No germina, tierra tiene una capa impermeable	Germina 1 semilla	1 tallo de 7 cm, 6 hojas de aproximadamente 5 mm
2	3	No germina, tierra tiene una capa impermeable	Germina 1 semilla	3 tallos de 14, 17 y 10 cm con 6, 8 y 5 hojas respectivamente de 6 mm aproximadamente
3	3	No germina, tierra tiene una capa impermeable	Germinan 2 semillas	2 tallos de 14 y 17 cm con 6 y 12 hojas respectivamente
4	3	No germina, tierra tiene una capa impermeable	Germinan 3 semillas	3 tallos de 24, 19 y 14 cm con 15, 10 y 12 hojas de aproximadamente 1 cm
5	3	No germina, tierra tiene una capa ligeramente impermeable	Germinan 3 semillas, presencia de un tallo de 4 cm, con una hoja de 4 mm	5 tallos de 24, 22, 19, 19 y 15 cm, con más de 20 hojas de 1,3 cm aproximadamente en cada uno
6	3	No germina, tierra tiene una capa ligeramente impermeable	Germinan 1 semilla, con tallo de 3,4 cm con 4 hojas de 3,4,4 y 6 mm	3 tallos de 25, 19 y 17 cm con 27, 16 y 19 hojas de 1,2 cm aproximadamente

Fuente: Autores

Ilustración 9. Muestras 1, 4 y 6 a tiempo 2 días.



Fuente: Autores

Ilustración 10. Plantas de lenteja a tiempo de 7 días.



Fuente: Autores

Ilustración 11. Plantas de lenteja en tierra abonada al tiempo de 10 días



Fuente: Autores

Tabla 22. Comparación fisiológica de lentejas al tiempo de 2 días

Muestra	No. de semillas germinadas	Número de tallos	Tamaños promedio de tallos (cm)	Numero de hojas	Tamaño promedio de hojas (mm)
1	1	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0
3	2	0	0	0	0
4	3	0	0	0	0
5	3	1	4	1	4
6	1	1	3,4	4	4,25
vivero	0	0	0	0	0

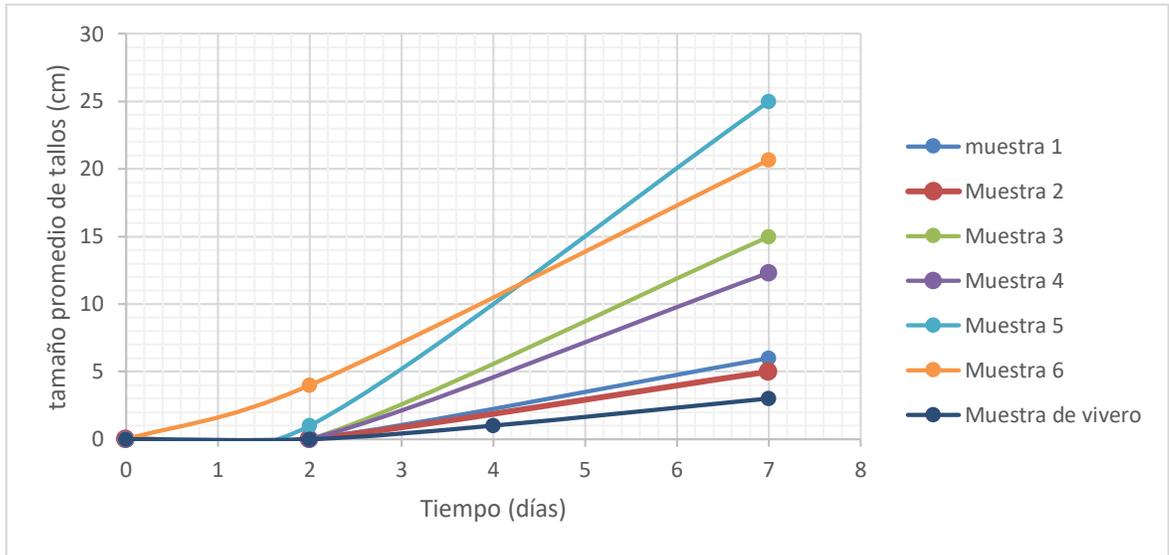
Fuente: Autores

Tabla 23. Comparación fisiológica de lentejas al tiempo de 7 días

Muestra	No. de semillas germinadas	Número de tallos	Tamaños promedio de tallos (cm)	Número promedio de hojas	Tamaño promedio de hojas (mm)
1	1	1	7	6	5
2	3	3	14	5	6
3	2	2	2	15	9
4	3	3	19	12	10
5	3	5	20	20	13
6	3	1	20	21	12
vivero	3	3	11	9	6

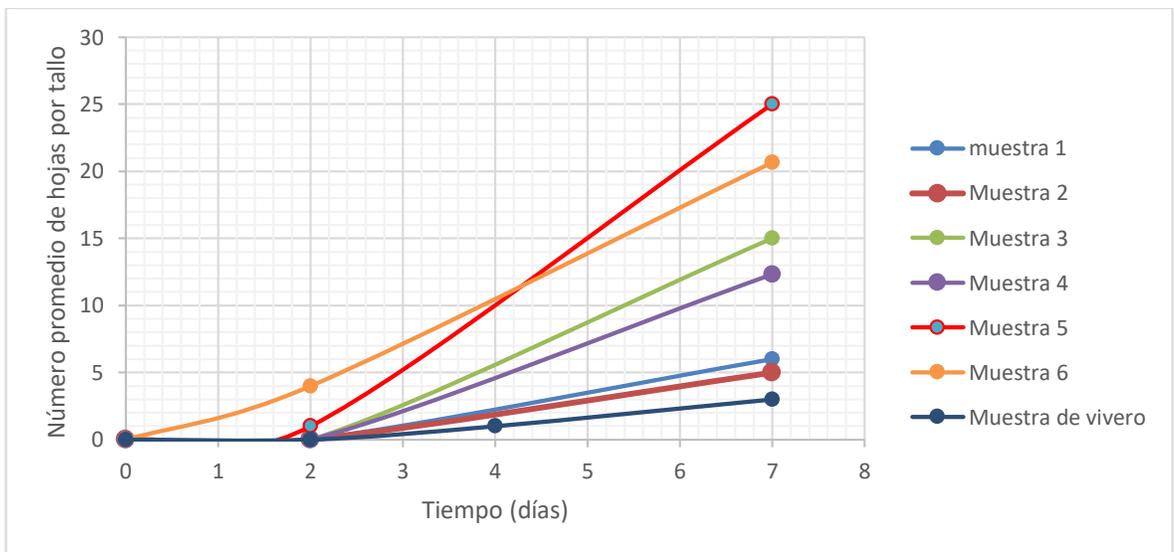
Fuente: Autores

Gráfica 18. Tamaño promedio de los tallos (cm) Vs. Tiempo (días)



Fuente: Autores

Gráfica 19. Número promedio de hojas por tallo Vs. Tiempo (días)



Fuente: Autores

En la gráfica 18 y 19, se muestra el crecimiento de las semillas de lenteja plantadas en muestras de suelo biorremediado y en tierra de vivero. Al cabo de 2 días se observó que el proceso de crecimiento de tallos y hojas se aceleró en las muestras de suelo biorremediado, teniendo un tamaño de tallos y número de hojas un 45% mayor que los presentados en las plantas de tierra de vivero.

Según lo descrito en la Tabla 21, es fácil notar que en las muestras que inicialmente tenían un TPH de 3% las semillas de lenteja germinaron y crecieron, pero no de la misma manera que en las muestras de TPH 10%, ya que en las muestras 5 y 6 crecieron todas las semillas, el tamaño de los tallos se encuentra en el orden de los 20 cm a diferencia de las muestras 1 y 2 en donde el tallo más largo es de apenas 17 cm, lo mismo sucede con el número de hojas. Se cree que parte de la razón de ese bajo crecimiento con respecto a las muestras 5 y 6 es debido a una pequeña capa de hidrocarburo que impermeabilizaba la tierra, esto se notó al hacer los respectivos riegos, sin embargo, solo permaneció así durante los dos primeros días, luego de ello la tierra era completamente permeable, las muestras 5 y 6 también tenían esta capa, pero solo duro el primer riego.

Las semillas plantadas en tierra con abono orgánico empezaron a germinar al día 3, y al cabo de los 7 días tenían un tamaño aproximado de 18 cm, con un promedio de hojas por tallo de 16, su color no era del todo verde a diferencia de las plantas en tierra biorremediada, y no tenían la fuerza para mantenerse verticales. Lo que le confirma el aporte de nutrientes dado a la tierra por el abono CEAGRODEX.

4.3.2 Lechuga

Tres (3) días antes de sembrar las semillas en tierra biorremediada, ya se tenían sembradas 10 entre dos semilleros independientes con tierra abonada de un vivero; para las muestras de interés, cada alvéolo posee tierra correspondiente a una de los doce (12) eras, y fueron plantadas cinco (5) semillas en cada uno.

En la ilustración 12, 13 y 14, se muestran imágenes de los cultivos realizados en diferentes tiempos.

Ilustración 12. Semillas de lechuga cultivadas en alvéolos a tiempo 0 días.



Fuente: Autores

Ilustración 13. Brotes de lechuga en tierra biorremediada a tiempo 7 días



Fuente: Autores

Ilustración 14. Comparación de plantas de lechuga a tiempo 7 días



Fuente: Autores

Como se observa en la Ilustración 13, en algunos alvéolos no se germinaron todas las semillas como en 1, 3, y 8, en el 11 no se desarrolló ninguna, estas muestras se caracterizaron por mantener una membrana que impermeabilizaba la tierra, la cual se mantuvo durante los 4 primeros días, luego de ello el riego resulto más rápido debido al contacto directo del agua con la tierra y se observó un crecimiento de 2 cm en las plantas, en la Ilustración 14 se tiene la comparación del crecimiento de las lechugas que fueron sembradas en dos muestras biorremediadas y dos en tierra de vivero, se presentó un 70% más de brotes en la tierra biorremediada.

4.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para esta sección se tienen en cuenta todos los gastos en insumos y mano de obra por metro cúbico biorremediado. Se toma como referencia el precio del dólar correspondiente al mes de febrero del 2018.

Tabla 24. Costos de contratación de un obrero

COSTOS	PORCENTAJE	VALOR
Salario mínimo 2018		781.242,00
Auxilio de transporte	11,27	88.045,97
Salud	8,5	66.405,57
Pensión	12	93.749,04
ARL (Nivel I)	0,52	4.062,46
Parafiscales	9	70.311,78
Prima	8,33	65.077,46
Cesantías	8,33	65.077,46
Intereses de cesantías	12	7.809,30
Vacaciones	4,17	32.577,79
Dotación aproximada	5	39.062,10
Costo mensual aproximado		1.313.420,93

Fuente: Autores

Costo de bulto de abono 50 kg = de \$18.000 a \$20.000 pesos

Bulto de cal 25 kg= \$12.000 pesos

Para el análisis económico se utilizó una base de cálculo de $1m^3$ de suelo contaminado; teniendo en cuenta la densidad del suelo usado se requiere 1260 kg de suelo para este volumen, manejando la relación suelo y abono de 1: 1, se emplearía también 1260 kg de abono, es decir, 25 bultos de abono. En cuanto a costos de la técnica de landfarming con abono CEAGRODEX se tiene:

Gastos en insumos Se desprecian los costos de pruebas de laboratorio, herramientas o maquinarias de trabajo como lo son palas, barras, retroexcavadoras o materiales para la adecuación del lugar ya que esto depende únicamente de la

empresa, solo se consideran los insumos necesarios para el proceso de biorremediación de 1 m^3 de suelo contaminado.

- 25 bultos de abono de 50 kg: \$ 475.000 pesos – 166 USD / m^3
- 1 bulto de cal agrícola de 25 kg: \$11.000 pesos – 4 USD / m^3

El gasto en insumos para el proceso de biorremediación de 1 m^3 de suelo contaminado es aproximadamente de 170 USD / m^3 .

Gastos en recursos humanos Se tiene en cuenta que el tiempo ideal de tratamiento para un crudo liviano bajo las condiciones planteadas es de dos meses, para 1 m^3 se considera que es necesario el trabajo de una persona por lo que el costo que debe asumir la empresa por su labor es de \$2.626.841,86 COP aproximadamente \$920 USD. En la tabla 20 se puede observar los valores y porcentajes correspondientes a las prestaciones que debe incurrir la empresa para la liquidación del salario del trabajador encargado de supervisar el área de estudio. El gasto en insumos y mano de obra durante los 2 meses del proceso de biorremediación se estima que sea aproximadamente de 1086 USD / m^3 .

En el desarrollo del proyecto se usó 81,65 Kg de suelo, por lo tanto, se agregó 81,65 Kg de abono, correspondiente a menos de 2 bultos de 50 Kg, añadiendo el bulto de cal comprado para regular la humedad y pH de las eras, el gasto por uso de insumos sólo corresponde entre \$48.000 a \$52.000 COP aproximadamente \$18 USD / m^3 . Con respecto al método de venteo o aireación depende de la cantidad de suelo, y la política de la empresa, se estima que para un volumen de 1 a 5 m^3 se puede emplear un obrero como mano de obra, para volúmenes mayores se recomienda el uso de maquinaria.

Biorremediadores Los valores presentes son tentativos, teniendo en cuenta su valor comercial o referencias dadas por terceros. Para el desarrollo del proyecto se hizo uso de una relación suelo-agente biorremediador 1:1, por lo tanto, se tiene en cuenta la misma relación con respecto a los siguientes productos, sin embargo, no se conoce bajo que concentraciones y parámetros son más eficientes los otros biorremediadores. (Chamarro & Tovar, 2018)

- Septitrim grasas con presentación de 1 gramo aproximadamente tiene un costo de \$3,2 COP y presenta un tiempo de biorremediación de 160 días aproximadamente.

- Biomerck Hc 85 con presentación de 1 gramo aproximadamente tiene un costo de \$4.8 COP y presenta un tiempo de biorremediación de 100 y 120 días aproximadamente.
- Abono CEAGRODEX se vende en sacos de 50 kilogramos, con un valor entre \$18.000 y \$20.000 COP por saco, con presentación de 1 gramo aproximadamente tendría un costo de \$0,36 a \$0,40 COP y presenta un tiempo de biorremediación de 60 a 120 días aproximadamente dependiendo del tipo de contaminante.
- Biodyne 101 (líquido) con presentación de 1 gramo aproximadamente tiene un costo de \$2,1 COP y presenta un tiempo de biorremediación de 190 días aproximadamente.

Métodos de biorremediación Los valores presentes son rangos tentativos de costos de insumos correspondientes al año 2014. (Petro & Mercado, 2014)

- Bioestimulación: 30 y 100 USD/m³, la duración puede tomar varios años.
- Biolabranza: 30 y 70 USD/m³, duración mediano a largo plazo.
- Compostaje: 130 y 260 USD/m³, duración: entre semanas hasta varios meses.
- Biorremediación en fases de lodos (Biorreactores): 130 y 200 USD/m³ duración: corto a mediano plazo.

Otro tratamiento usado en la Industria (Volke & Velasco, 2002).

- Tratamiento químico: El principal recurso que hace uso éste tratamiento son las reacciones de oxidación reducción (redox) que convierten químicamente compuestos tóxicos o peligrosos a compuestos menos tóxicos o no peligrosos que son más estables, menos móviles o inertes. Los agentes oxidantes como peróxido de hidrógeno, hipocloritos, cloro, dióxido de cloro y el reactivo de Fenton son los más usados comúnmente, a estos se les adicionan bacterias organotrofas especiales para degradación de hidrocarburos. Este método puede aplicarse in situ o ex situ en suelos, lodos, sedimentos y otros sólidos. Su eficiencia se ve afectada si la carga contaminante son compuestos orgánicos.

Los costos oscilan entre 190 y 600 USD/m³, duración: de corto a mediano plazo (100 a 170 días) con un porcentaje de remoción exitoso entre 70% y 90%.(Van Deuren, 1997).

Teniendo en cuenta el precio comercial por unidad de gramo del abono 100% orgánico CEAGRODEX con respecto a los otros biorremediadores presentados, se puede aseverar que es el más económico para el desarrollo del proceso de biorremediación contando con un ahorro del 80 al 92%. Con respecto a otros métodos convencionales con tiempos similares de remediación al tratamiento usado, todo el proceso de biorremediación se da en un lapso de tiempo más corto, sus insumos son económicos de fácil acceso y operación revelando un ahorro en un rango del 15 al 70%, es decir considerando los resultados obtenidos durante los 2 meses aproximados que fueron necesarios para obtener %TPH en el suelo permitidos por la normatividad de referencia, el rendimiento alcanzado es rentablemente económico con respecto a los otros métodos expuestos, dando a relucir la viabilidad económica para el desarrollo e implementación en casos reales de contaminación de suelos por hidrocarburos en procesos de la industria petrolera.

4.6 ANÁLISIS SEGÚN ANTECEDENTES

En este apartado se presentan dos proyectos de grado que son antecedentes de biorremediación con abono CEAGRODEX, el primero de ellos corresponde al realizado por Bermeo & Pérez, 2017 “VARIACIÓN PORCENTUAL DE LOS HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) EN SUELOS CONTAMINADOS MEDIANTE EL USO DE ABONO 100% ORGÁNICO” en el cual se considera este abono como agente biorremediador y se evalúan su eficacia según la concentración de crudo de 20.9° API presente en el suelo y la relación suelo: abono determinando si era viable para una empresa usarlo como estrategia de respuesta ante un derrame de crudo en tierra. El segundo es elaborado por Chamorro & Tovar, 2018, “EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA PARA ÁREA DE LANDFARMING CONTAMINADA CON UN CRUDO PESADO, USANDO ABONO CEAGRODEX” proyecto que tenía el mismo tiempo de estudio que el presente y que serviría para comparar la efectividad del abono usado con una relación 1:1 y 1:0 suelo:abono controlando parámetros de pH y porcentaje de carga contaminante de 21°API, a diferencia del presente en el cual solo se evalúa la eficiencia bajo relación suelo:abono 1:1 y controlando parámetros de pH, humedad y porcentaje de carga contaminante de 37°API.

Bermeo & Pérez, 2017 en sus conclusiones exponen que, las muestras con relación suelo:abono 1:0,5 y 1:0,25 registraron en sus niveles de contaminación una disminución no tan notoria, en cuanto a la relación 1:1, los niveles de TPH disminuyeron al punto de cumplir con el límite máximo permisible (3%) por parte de la normatividad de Louisiana 29B, siendo éste el mejor prospecto para proyectos futuros, el cual fue usado por Chamorro & Tovar, 2018 en donde lo comparan con una relación 1:0, siendo evidente que presenta mejor biorremediación aquellas en las que se usó abono, sin embargo para el crudo de 21°API usado al tiempo de 90 días sólo dos muestra no se encontraba bajo el LMP de Louisiana 29 B y sólo una se encontraba bajo el de API (1%), en el presente proyecto usando un crudo de 37°API a los 60 días las doce muestras estaban bajo el límite permisible de ambas normas.

Considerando que en el proyecto de Chamorro & Tovar, 2018 la humedad se mantuvo en 80 g H₂O/kg suelo y el presente se trabajó con 150 y 250 g H₂O/kg suelo, se aprovechan los resultados obtenidos y la similitud de las muestras para tener una idea de la influencia de la humedad según el tipo de contaminante.

Tabla 25. Comparación de TPH según la humedad y tipo de crudo a tiempo de 60 días.

PARAMETROS		HUMEDAD g H ₂ O/kg suelo		
% Carga Contaminante	pH	Crudo 21°API 80	Crudo 37°API 150	Crudo 37°API 250
3	7	1,2	0,15	0,19
3	9	1,4	0,28	0,29
5	7	3,18	0,26	0,34
5	9	3,38	0,46	0,48
10	7	7,37	0,26	0,23
10	9	7,41	0,46	0,9

Fuente: Autores

Como se mencionó en la sección 4.1 Análisis técnico, los valores de TPH son menores en las muestras con 150 g H₂O/kg suelo porque este es el menor valor de humedad usado en el presente proyecto, sin embargo, como se aprecia en la Tabla 25, los valores de TPH en las muestras con humedad 80 g H₂O/kg suelo son mayores que las demás, esto se debe al API del crudo usado, ya que esta condición tiene prelación con respecto a la humedad en el proceso de biorremediación.

También se observa que los valores de TPH son mayores en las muestras que poseen mayor pH.

CONCLUSIONES

Una vez realizado el proceso de biorremediación, se observó el mejoramiento de las características del suelo, con el aumento de la concentración de nutrientes provenientes del abono utilizado como agente biorremediador; aunado a esto, se registra una disminución del TPH a valores no detectables (ND) en un tiempo inferior a 90 días cuando el suelo se ha expuesto a contaminación con un hidrocarburo liviano y bajo condiciones de pH y humedad controladas, a un costo que no supera el 20% del costo de la aplicación de productos comercialmente usados.

- Se caracterizó fisicoquímicamente el suelo de estudio previo al tratamiento como un suelo franco arcillo arenoso, presentando una densidad de 2,23 g/mL, un pH de 6,33, una humedad del 3.9% y conductividad de 255 mV, y el suelo posterior al proceso de contaminación y biorremediación como un suelo franco arenoso, con una densidad de 1,8 g/mL, un pH neutro de 6,93, una humedad del 22% y conductividad de 222 mv, siendo ésta una tierra menos conductiva permitiéndole ser lo suficientemente fértil para uso agrícola debido a su textura relativamente suelta propiciada por la cantidad de arena y la fertilidad aportada por los limos.
- Se evaluaron los hidrocarburos totales de petróleo presentes en las muestras a los tiempos de 0, 30, 60 y 90 días, mostrando que bajo condiciones de pH 7 las muestras tienen una biorremediación más rápida en aproximadamente 2 días que las muestras con pH de 9, con humedad de 150 g H₂O/ Kg suelo las muestras revelan una rata de biorremediación mayor en un 19% que aquellas con humedad de 250 g H₂O/ Kg suelo y con respecto a la carga contaminante aquellas muestras con concentración en peso de crudo inicial de 10% presentaron al final del proceso los mayores porcentajes de biorremediación.

- Se evidenció que bajo las condiciones del proyecto fueron necesarios 50 días para que todas las muestras cumplieran el valor establecido por la norma Louisiana 29B (TPH del 3%), y para estar bajo el 1% exigido en la norma API las muestras con TPH inicial de 3, 5 y 10% requieren estar 50, 56 y 60 días respectivamente en el proceso de biorremediación.
- Se realizó una evaluación económica del abono 100% orgánico CEAGRODEX como agente biorremediador, para ello se comparó con 3 agentes presentes en el mercado evidenciando su rentabilidad en un 80 a 92% y teniendo en cuenta los precios de algunos métodos de biorremediación usados en la industria petrolera se evidenció un ahorro de 15 a 70 %.
- Se compararon los resultados obtenidos con la fuente base del proyecto (Bermeo y Pérez, 2017), en el cual se trabaja con un crudo de 21° API presentando que al cabo de 90 días para las muestras cuya relación de suelo:abono es de 1:1 el porcentaje de biorremediación es de aproximadamente 83% controlando solo la carga contaminante, en el proyecto de Chamorro y Tovar también se trabaja con un crudo de 21° API sin embargo las variables controladas incluyen carga contaminante y pH, mostrando que al tiempo de 90 días sólo dos muestra no se encontraba bajo el LMP de Louisiana 29 B y sólo una se encontraba bajo el de API (1%). Para el mismo tiempo las pruebas realizadas por los autores indican que todas las muestras generan valores de TPH indetectables por el método gravimétrico modificado.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta las experiencias durante el desarrollo del proyecto se plantean una serie de recomendaciones que sirvan de referencia para futuros proyectos de biorremediación bajo la técnica de landfarming y uso de abono 100% orgánico como agente biorremediador.

- En primer lugar, aislar la zona de estudio adecuando con mecanismos de contención para evitar que los seres vivos del entorno se vean involucrados en accidentes y a su vez mitigar y/o controlar los componentes volátiles de la carga contaminante.
- Diseñar un sistema cíclico automatizado de canalización y recolección de lixiviados, para la regulación de los niveles de humedad bajo los cuales son planteados los proyectos.
- El método gravimétrico modificado (Extracción por solvente) usado en el presente proyecto generó resultados coherentes según el estado físico de las muestras, sin embargo, presenta limitaciones para valores de TPH cercanos al 0%, ya que al día 63 aproximadamente el porcentaje de carga contaminante no era detectable, por lo que se recomienda el uso de un cromatógrafo para un análisis composicional, en cuanto a la determinación de contenido de TPH seguir el procedimiento sugerido por la EPA, y además de la normatividad colombiana legal vigente tener en cuenta la norma de Los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación de los Estados Unidos Mexicanos como sugiere Castellanos et al. 2015.
- Teniendo en cuenta el análisis según antecedentes, se puede decir que para casos en donde la carga contaminante sea un crudo liviano, se puede

mantener la relación suelo: abono 1:1 durante 2 meses, y en caso de que se requiera menos tiempo de operación hacer uso de mayor porcentaje de abono y para crudos pesados se puede utilizar una relación 1:1 para un tiempo mayor de 90 días, y en caso de que sea necesario menos tiempo se recomienda aumentar la cantidad de abono usado en el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Agromática. Cómo medir la textura del suelo. Tomado de:
<https://www.agromatica.es/textura-del-suelo/>
- Alexander M. (1994). *Biodegradation and Bioremediation*. (p. 302 pp). San Diego: Academic Press.
- Alexander M. (1999). *Biodegradation and Bioremediation 2nd ed*. London: Academic Press.
- Amorocho B.J. (2018). Nuevo atentado a Caño Limón-Coveñas en Arauca. C.el COLOMBIANO. Tomado de: <http://m.elcolombiano.com/colombia/nuevo-atentado-a-cano-limon-covenas-en-arauca-NJ8139917>
- Atlas R. M. & Unterman, R. (1999). *Manual of Industrial Microbiology and Biotechnology 2nd ed*. Washington D.C: Bioremediation In: Demain AL & Davies JE (Eds).
- Benavides L.Q. (2006). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *NOVA Publicación científica*. , Vol. 4 No. 5.
- Bermeo C.D. & Pérez. L. (2017). *Variación porcentual de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos contaminados mediante el uso de abono 100% orgánico*. Neiva: Universidad Surcolombiana.
- Boullosa N. (2011). Biorremediación: 10 métodos de recuperación ecológica. Faircompanies. Tomado de: <https://faircompanies.com/articles/biorremediacion-10-metodos-de-recuperacion-ecologica/>
- Caracol Radio. (2018). Atentado al Oleoducto Caño Limón Coveñas en Norte de Santander. Tomado de:
http://caracol.com.co/emisora/2018/02/16/cucuta/1518748400_807842.html

- Castellanos M.L., Isaza R. & Torres J. (2015). *Evaluación de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) sobre suelos urbanos en Maicao, Colombia*. Riohacha: Universidad de La Guajira.
- Chamorro D.A. & Tovar J. (2018). *Evaluación Técnica económica para área de landfarming contaminada con un crudo pesado, usando abono CEAGRODEX*. Neiva: Universidad Surcolombiana.
- Cuellar R.R., Dussán J. & Gallego P.A. (2004). Biorremediación de residuos del petróleo. *Apuntes científicos Uniandinos*, 44.
- Dibble J.T. & Bartha R. (1979). *Effect of environmental parameters on the biodegradation of oil sludge*. New Jersey: University of New Jersey.
- Ergas S.J, Chang D.P. & Schroeder E.D. (1999). *Principios de biorrecuperación*. Madrid: McGrawHill.
- Fernández, R. (2006). *Monitoring photooxidation of the Prestige's oil spill by attenuated total reflectance infrared spectroscopy*. Elsevier. Vol 69 Págs 409-417.
- Guerrero, J. (1993). *Magnetostratigraphy of the upper part of the Honda Group and Neiva Formation. Miocene Uplift of the Colombian Andes. Tesis PhD*. Duke University.
- Howe-Grant M. (1996). *Encyclopedia of Chemical Technology*. New York: Wiley Interscience.
- King R.B., Long G.M. & Sheldon J.K. (1997). *Practical environmental bioremediation, the field guide*. NY: Lewis publishers.
- Petro P.H. & Mercado P.H. (2014). *Biorremediación de suelos contaminados por derrames de HC'S derivados del petróleo Colombia*. Cartagena de indias D.T y C: Universidad de San Buenaventura Seccional Cartagena.
- Sellers, K. (1999). *Fundamentals of hazardous waste site remediation*. Lewis Publishers. pp 326.
- Trujillo M.A. & Ramírez J.F. (2012). Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, Volumen 3 Número 2.
- Torres K. & Zuluaga. T. (2009). *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

UN. National Reports. (2009). *Waste management*. Bogotá.

Van Deuren J.Z. (1997). Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. *3a Ed. Technology Innovation Office*. EPA.

Vásquez M.C., Guerrero F.J. & Quintero A. (2010). Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados. *Revista colombiana biotecnología.*, Volumen 12, Número 1, p. 141-157

Volke S.T. & Velasco. T.J. (2003). *Biodegradación de hidrocarburos de petróleo en suelos intemperizados mediante composteo*. México D.F.: Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental.

Walter M.V. (1997). *Bioaugmentation, Manual of Environmental Microbiology*. Washington, D.C.: Hurst CJ.

Zitrides T.G. (1990). Biorremediation comes of age. *Pollut Eng XXII*, 59-60.

ANEXO A

FICHA TÉCNICA ABONO ORGÁNICO EMPRESA CEAGRODEX

Ilustración 15. Ficha técnica abono orgánico empresa CEAGRODEX



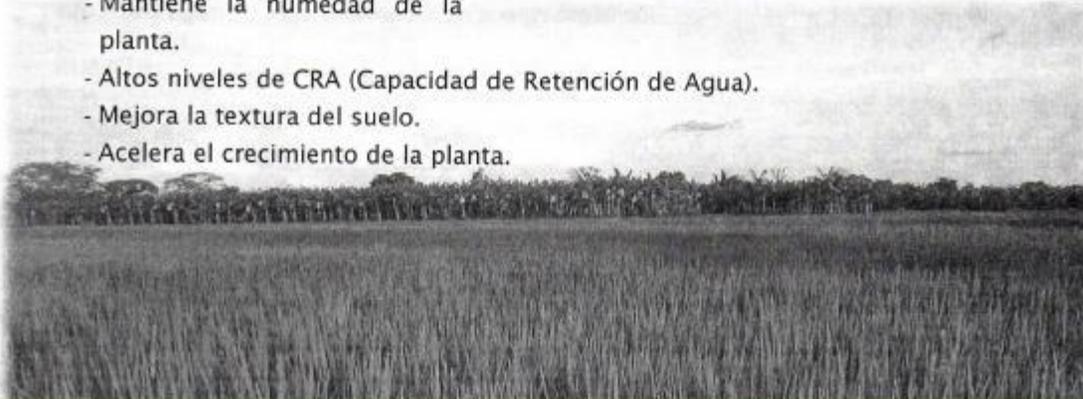
**FERTILIZANTE ORGANICO PARA
APLICACIÓN AL SUELO DE USO
AGRICOLA**



Carbono orgánico oxidable total	27.7 %
Cenizas	41.8 %
CIC (capacidad de intercambio catiónico)	39.8 mEq/100g
Capacidad de retención de humedad	192%
Calcio	2.45%
Nitrógeno orgánico total (N)	2.56 %
Fosforo total (P ₂ O ₅)	2.558%
Potasio total (K ₂ O)	0.517 %
Sodio (Na)	1.056%
Humedad	35.5 %
pH	7.23
Densidad	0.19 g/Cm ³
Metales pesados	Contenido de metales pesados por debajo de los límites establecidos en la norma.
Salmonella spp	Ausente
Entero bacterias	<10ufc/g

CEAGROCOMPOST

- Mantiene la humedad de la planta.
- Altos niveles de CRA (Capacidad de Retención de Agua).
- Mejora la textura del suelo.
- Acelera el crecimiento de la planta.





1. INFORMACION GENERAL.

Fabricante: CEAGRODEX DEL HUILA S.A.

Registro de empresa fabricante, formulador y empacador de fertilizantes orgánicos (compost) N° 002816.

El compostaje es el proceso de descomposición aeróbica y térmica de residuos orgánicos a través de poblaciones de microorganismos que existen en los propios residuos y con los obtenidos en caldos microbianos, bajo condiciones controladas, para producir abono orgánico que aplicado al suelo influye de manera favorable en el aspecto Fisicoquímico y biológico.

El abono orgánico se usa para restaurar los niveles de materia orgánica del suelo, con el fin de aumentar la capacidad de retención de nutrientes.

1. IDENTIFICACION DEL PRODUCTO

NOMBRE: CEAGROCOMPOST

PRODUCTO: Acondicionador de suelos orgánico.

FUENTE: Estiércol y contenido ruminal, restos de animal, lodos PTAR, material Vegetal (Restos de podas) cal.

TIPO DE FORMULACION: Polvo mojable.

PRESENTACION: 1kl, 5kl, 25kl, 40kl



CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS

ESTADO FISICO	Solido de granos irregulares	
Humedad	35.5	%
Cenizas	41.1	%
Carbono oxidable	27.0	%
Capacidad de intercambio Cationico.	39.8	ME/100gr
C/N	14.5	
Capacidad de retención de humedad.	192	%
Densidad	0.19	gr/cm ³
pH	7.23	
Nitrógeno Total (N)	1.86	%
Fosforo Total (P ₂ O ₅)	1.701	%
Potasio (K ₂ O)	0.4333	%
Color	Café	
Olor	Amoniacal y a geosminas (olor a tierra fértil).	

ANALISIS MICROBIOLÓGICO

Mesofilos Ufc/g	Termófilos Ufc/g	Mohos Ufc/g	Levaduras Ufc/g	Nematodos y/o protozoos ausentes	Enterobacterias Ufc/g	Salmonella En 25 gr ausente
1,8E+10	2,1E+11	1,0E+03	0,0E+00		0,0E+00	

METALES PESADOS: Cumple norma ICA sobre contenidos máximos.
ENTERO BACTERIAS: Ausentes

MODO DE EMPLEO

Cultivos: este producto se ha probado en pastos, cultivos de arroz, hortalizas y frutales.

Dosis de empleo recomendada

CULTIVO RECOMENDADO	PERIODO O TIEMPO DE GERMINACION	DOSIS
Cilantro	2 semanas	10kl /m ²
zanahoria	3 semanas	10kl /m ²
Tomate	2 semanas	10kl /m ²
Maíz de tuza	1 semana	10kl /m ²
Maíz sorgo	1 semana	10kl /m ²
Melón	1 semana	2.5kl /m ²
patilla	1 semana	2.5kl /m ²
pastos	3 días	9kl/m ²

Carrera 5 N° 81S-45 Tel: 8731568 – 8732434 FAX: 8731073 Nit 891.104.681-6

ANEXO B

PRUEBAS AL SUELO

Color. El color es una de las características morfológicas más importantes, la más obvia, fácil de determinar y relevante en la identificación taxonómica de los suelos. El color de los suelos guarda una estrecha relación con los componentes sólidos (materia orgánica, textura, composición mineralógica, morfología), siendo los metales de transición principalmente, los que pueden dotar a los suelos esta característica particular.

Tabla 26. Relación color - propiedades del suelo.

Color	Propiedad Representativa
Oscuro	Es determinado principalmente por la presencia de materiales orgánicos descompuestos y su intensidad depende del contenido de humedad que el suelo posea
Rojo	Este color indica buena aireación y drenaje. El color se debe a la presencia de óxidos de hierros no hidratados.
Amarillo	El color amarillo es un indicativo de drenaje. El color se debe a la presencia de óxidos de hierros no hidratados.
Pardos	Denota presencia de óxidos de hierro en adición a la materia orgánica.
Grisés	Su color se debe a la presencia de fracciones minerales. Los color grises claros y blancuzcos son causados por el material original en suelos litosoles.
Verdosos y azulados	Se presentan principalmente en subsuelos mal drenados y con presencia de minerales como pirita y vivianita.

Fuente: Bermeo & Pérez, 2016

El Sistema de Notación Munsell y CIELab, son dos técnicas que permiten la determinación del color del suelo. Para el presente caso se usó la Carta Munsell, la cual comprende variables como:

- Hue: Longitud de onda dominante.
- Value: Cantidad de luz, variando entre colores claros y oscuros.
- Chroma: Pureza relativa de la longitud de onda de luz.

Ilustración 16. Carta Munsell



Fuente: Autores

Procedimiento:

- Determine el estado de humedad del suelo: Seco, húmedo o mojado y anótelos. El suelo al estar seco es compacto, duro, no se adhiere y no mancha los dedos; por el contrario, al aumentar la humedad y ser comprimido en la mano, cambian estas características: Mayor plasticidad, pegajosidad, cohesión, etc. Debe observarse al comprimirlo si alcanza a salir o no agua entre los nudillos de la mano, si sale estará en el rango de mojado, sino en el de húmedo.
- Coloque el suelo detrás de los círculos (agujeros) presentes en la tabla Munsell y compare el color con los patrones, hasta encontrar el más aproximado.
- Anote el color valiéndose de la nomenclatura de la tabla, anotando primero el matiz, seguidamente el valor (números localizados sobre la parte izquierda

vertical) como numerador, y el chroma (localizado en la parte inferior de la tabla), como denominador.

- Anote el equivalente de la clave observando el reverso de la hoja anterior identificada en la misma clave. Queda así definido el color codificado.

Ilustración 17. Muestras de tierra en Carta Munsell



Fuente: Autores

Conductividad y Salinidad. La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica que generalmente se expresa en mmhos/cm. Es una propiedad de las disoluciones que se encuentra muy relacionada con el tipo de iones, sus concentraciones, su movilidad, la temperatura

del fluido y contenido de sólido disuelto. La salinidad de un suelo o agua, se refiere a la cantidad de sales presentes en disolución, y puede ser estimada indirectamente mediante la medición de la conductividad eléctrica (CE). De acuerdo a los valores de conductividad eléctrica, pH y concentración de sodio intercambiable, los suelos se pueden clasificar en las siguientes categorías.

Tabla 27. Clasificación de suelos según su CE, pH y sodio intercambiable

Tipo de suelo	Conductividad (mmhos/cm)	pH	sodio intercambiable (%)
Salino	Mayor o igual a 4	-	Menor a 15
Sódico	Menor a 4	8,5 - 10	Mayor a 15
Salino-Sódico	4	Superior a 8,5	15

Fuente: Fernández, 2006

Material y equipo

- Muestra de suelo seco y molida en un mortero.
- Balanza analítica.
- Vaso de precipitado de 100 mL.
- Bureta.
- Papel filtro.
- Conductímetro.
- Frascos
- Agua destilada

Procedimiento

- Pesar 20 g de suelo seco y colocarlo en un recipiente de plástico.
- Agregar 20 mL de agua destilada con la bureta y mezclar.
- Colocar papel filtro sobre el embudo, humedecerlo con agua destilada, dejando drenar el exceso.
- Obtener un extracto.
- Calibrar el conductímetro. Antes de usar el medidor de conductividad debe calibrarse con una solución estándar.
- Leer la conductividad eléctrica.

Ilustración 18. Conductímetro y potenciómetro



Fuente: Autores

Densidad. La densidad es una propiedad física de las sustancias, que indica la razón que existe entre su masa y el volumen que ocupa en el espacio. El suelo por ser un cuerpo poroso, presenta dos condiciones de densidad: densidad real y densidad aparente.

La densidad real, es la razón entre la masa de suelo seco y el volumen de los sólidos del suelo. De esta forma no se tiene en cuenta el volumen que ocupan los espacios porosos, ni tampoco la humedad que tiene el suelo. La densidad aparente es la razón entre la masa del suelo seco y el volumen total del suelo (volumen de sólidos más volumen de espacios porosos), es decir que tiene en cuenta el arreglo estructural del suelo.

- *Densidad aparente*

Es la relación entre la masa de las partículas del suelo secas a la estufa y el volumen total, donde se incluye el espacio vacío. La densidad aparente puede ser afectada por el contenido de materiales orgánicos, textura y origen del suelo principalmente.

Método cilindro biselado

Procedimiento:

- Se introduce el cilindro en la porción del suelo que se desea muestrear. Se debe tener precaución de introducir completamente el cilindro y hacerlo de forma que se disturbe lo menos posible la muestra.
- Se retira el cilindro lleno con suelo, se enrasan sus bordes con una navaja, se coloca una bolsa plástica y se sella, para llevarlo al laboratorio.
- Se coloca el cilindro con la muestra de suelo a secar en el horno a 105 °C, durante 24 horas, al cabo de las cuales se retira el conjunto del horno, se deja enfriar y se pesa (Pt).
- Se retira el suelo del cilindro y se pesa éste (Pc). Además al cilindro se le toman las medidas de su longitud (h) y de su diámetro interno (d), con las cuales se calcula el volumen de éste.
- Se calcula la densidad aparente mediante la relación entre el peso del suelo seco y el volumen del cilindro como se muestra en la ecuación 2.

$$Da = \frac{Ps}{Vt} \qquad \text{Ecuación 2}$$

Da = Densidad aparente.

Ps = Peso del suelo seco.

Vt = Volumen total del suelo seco.

- *Densidad Real*

Es la relación entre la masa del suelo y el volumen de sólidos. Es decir, no incluye el volumen de espacios vacíos. Los valores de densidad real se ven afectados por los contenidos de materiales piroclásticos y orgánicos. La presencia de materiales orgánicos es el factor que más influye en sus valores.

Método del picnómetro

El método del picnómetro es el más empleado para medir la densidad de los sólidos o gravedad específica. Se fundamenta en determinar el volumen de los sólidos del suelo a través de un frasco de volumen conocido.

Procedimiento:

- Pesar el picnómetro completamente seco.
- Agregar aproximadamente de 2 a 5 g de suelo seco a 105°C, el cual previamente debe haber sido tamizado por la malla de 2mm.
- Pesar el picnómetro más el suelo seco y por diferencia de pesos con respecto al picnómetro vacío obtenga el peso del suelo.
- Adicionar agua al picnómetro lentamente hasta una tercera parte de su volumen (el agua utilizada debe ser destilada y hervida para eliminar el aire que se encuentra en el suelo).
- Llevar el picnómetro destapado a la campana de vidrio y aplique vacío durante dos horas para eliminar las burbujas de aire; retire el picnómetro de la campana de vacío y agregue agua hasta completar 2/3 del volumen del picnómetro y llevarlo nuevamente al vacío durante una hora.
- Sacar el picnómetro de la campana, llenar con agua, taparlo y pesarlo.
- Secar completamente el picnómetro y pesarlo nuevamente.
- Calcular la densidad real

Humedad. El agua que un suelo puede almacenar en sus espacios porosos se conoce como capacidad de retención de humedad. Sobre esta agua actúan las fuerzas de adhesión, cohesión y capilaridad. La interacción de estas fuerzas se conoce como succión del suelo o tensión de humedad del suelo.

Materiales

- Cápsulas para humedad
- Balanza analítica
- Estufa para secado (Horno)
- Espátula
- Suelo

Procedimiento

- Pesar las cápsulas de humedad.
- Pesar el suelo (húmedo) que se va a introducir en las cápsulas de humedad.
- Pesar las cápsulas de humedad con el suelo húmedo.
- Llevar a la estufa la cápsula con la muestra de suelo previamente pesada para secarla hasta obtener un peso constante a la temperatura de 105 °C.
- Apagar la estufa, tapar la cápsula, sacarla de la estufa y dejarla enfriar en un desecador.
- Realizar el cálculo.

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{W_{sh} - W_{ss}}{W_{ss}} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

W_{sh} = Peso suelo húmedo

W_{ss} = Peso suelo seco

pH. El pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas). La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos (H⁺) que se da en la interfase líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo.

Materiales y equipo

- Muestra de suelo.
- Balanza analítica.
- Vasos de precipitado de 50 mL.
- Pipeta de 10 mL.
- Pipeta con agua destilada.
- Potenciómetro.
- Agua destilada.
- Soluciones amortiguadoras de pH 7 y 4.

- Agitadores magnéticos.

Procedimiento

- Pesar 20 gramos de suelo y colocarlo en un vaso de precipitado de 50 mL.
- Agregar 20 mL de agua destilada.
- Agitar y dejar reposar 10 minutos.
- Ajustar el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras.
- Pasados los 10 minutos, medir el pH con el potenciómetro.

Porosidad. La porosidad constituye una de las características más importantes al definir el valor ecológico de los suelos. En estudios de caracterización física del suelo, es conveniente determinar la porosidad de aireación.

La porosidad equivale a la diferencia entre la densidad real y la aparente. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Pt (\%) = 1 - \left(\frac{Da}{Dr} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 4.}$$

Pt = Porosidad total

Da = Densidad aparente

Dr = Densidad real

Clases texturales del suelo.

Procedimiento

- Se seca la muestra de suelo
- Se eliminan las partículas mayores de 2 mm, tales como la grava y las piedras
- La parte restante de la muestra, la tierra fina, se tritura bien a fin de liberar todas las partículas separadas
- Se mide con precisión el peso total de la tierra fina
- La tierra fina se hace pasar a través de una serie de tamices con mallas de diversos tamaños de hasta alrededor de 0,1 mm de diámetro
- El peso del contenido de cada malla se calcula por separado y se expresa como porcentaje del peso total inicial de la tierra fina

- Los pesos de las partículas muy pequeñas de limo y arcilla que hayan pasado a través de la malla más fina se miden por sedimentación y también se expresan como porcentaje del peso total inicial de la tierra fina.
- Finalmente se comparan con la clasificación USDA. (Ilustración 3 y tabla 2)

ANEXO C

MÉTODO GRAVIMÉTRICO MODIFICADO (EXTRACCIÓN CON SOLVENTE)

se realizó una modificación y adecuación del Método gravimétrico empleado para determinar Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH's) que se encuentra estandarizado según la norma US EPA 821-B94-004,1995, las modificaciones se realizaron acorde a las necesidades y características del suelo que se analizó.

Materiales y Equipos:

- Montaje de calentamiento de tipo “Baño de María”
- Embudo de decantación
- Balanza
- Cámara de extracción de gases y vapores orgánicos
- Manta de calentamiento/estufa
- Termómetro
- Filtros
- Cápsulas de vidrio
- Probetas de diferentes volúmenes
- Vasos de precipitado de diferentes volúmenes
- Agitador

Elementos y reactivos:

- Muestra de suelo contaminado
- Cloroformo
- Agua destilada

Procedimiento

- Se agrega 1 gramo de suelo contaminado a una cápsula de porcelana y se pesa en una balanza.
- Se diluye el gramo de suelo en 100 mL de agua a 40°C aproximadamente, agitando constantemente hasta obtener la dilución completa del suelo en el agua.

- A la mezcla de agua y suelo se le agrega el cloroformo de forma gradual, es decir, se comienza agregando 10 mL de cloroformo y agitando, si aún no se desprenden los hidrocarburos del suelo se agregan otros 10 mL de cloroformo hasta encontrar la concentración óptima.
- Se vierte la fase líquida de la mezcla en el embudo de decantación mientras se observa la separación de la fase aceitosa y la fase acuosa. El residuo sólido se separa para su posterior proceso de filtrado.
- Teniendo la mezcla en el embudo de decantación y después de agitar vigorosamente se extrae la fase aceitosa en un vaso de precipitado y se elimina el residuo de la fase acuosa.
- Se realiza un montaje para realizar el proceso de filtración empleando un filtro, éste se dispone sobre un vaso de precipitado sujetándolo con una liga o cuerda y se procede a pasar el residuo sólido junto con el residuo líquido (fase aceitosa) obtenido en el procedimiento anterior, dejándola pasar por completo y de forma natural sin acelerar el proceso; mientras el suelo se está filtrando se le agregan de 5 a 10 mL de cloroformo con el fin de lavar por completo el suelo filtrado y extraer hasta la última gota de hidrocarburo presente en él.
- Se desecha el suelo ya limpio que queda sobre la tela de filtrado y se observa una iridiscencia presente en la fase acuosa obtenida del filtrado, por lo que es necesario volver a decantar en el embudo y agregar agua destilada hasta lavar la disolución y lograr que se estabilicen las fases (aceitosa/acuosa). Por último, se extrae la fase aceitosa del embudo de decantación y se almacena en una cápsula de vidrio o porcelana.
- Se coloca la solución aceitosa que se encuentra en la cápsula de vidrio en el conjunto de baño de maría para eliminar (evaporar) el cloroformo aun presente y separar por completo el hidrocarburo contenido.
- Conociendo los pesos y volúmenes empleados de solvente y el volumen final de la mezcla se puede determinar la cantidad de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) presentes en el suelo.

Datos tomados durante las pruebas de TPH.

A continuación, en las tablas 28, 29, 30 y 31 se presentan los datos que fueron tomados durante las pruebas de TPH a tiempo 0, 30, 60 y 90 días

Tabla 28. Prueba TPH @0 días

Muestra	Peso cápsula vacía (g)	Peso cápsula + fase aceitosa (g)	Peso fase aceitosa (g)	Peso de cápsula después del baño (g)	peso crudo (g)	% crudo
1	41,34	62,3352	20,9952	41,369	0,029	2,9
2	55,44	76,5309	21,0909	55,468	0,028	2,8
3	91,72	114,2134	22,4934	91,763	0,043	4,3
4	41,34	62,1075	20,7675	41,387	0,047	4,7
5	55,44	75,7439	20,3039	55,536	0,096	9,6
6	91,72	113,7580	22,0380	91,82	0,1	10
7	41,34	61,8503	20,5103	41,369	0,029	2,9
8	55,44	77,9610	22,5210	55,469	0,029	2,9
9	91,72	113,6433	21,9233	91,77	0,05	5
10	41,34	61,7583	20,4183	41,388	0,048	4,8
11	55,44	75,9555	20,5155	55,539	0,099	9,9
12	91,72	112,4514	20,7314	91,815	0,095	9,5

Tabla 29. Prueba TPH @30 días

Muestra	Peso cápsula vacía (g)	Peso cápsula + fase aceitosa (g)	Peso fase aceitosa (g)	Peso de porcelana después del baño (g)	peso crudo (g)	% crudo
1	91,77	103,4500	11,6800	91,787	0,017	1,7
2	55,44	67,8368	12,3968	55,461	0,021	2,1
3	55,44	67,2794	11,8394	55,468	0,028	2,8
4	91,77	102,6211	10,8511	91,804	0,034	3,4
5	55,44	69,6869	14,2469	55,486	0,046	4,6
6	91,77	104,2362	12,4662	91,823	0,053	5,3
7	55,44	69,1288	13,6888	55,459	0,019	1,9
8	55,44	66,5307	11,0907	55,463	0,023	2,3
9	91,77	102,9979	11,2279	91,803	0,033	3,3
10	91,77	104,2433	12,4733	91,807	0,037	3,7
11	55,44	65,4409	10,0009	55,492	0,052	5,2
12	55,44	68,6883	13,2483	55,508	0,068	6,8

Tabla 30. Prueba TPH @60 días

Muestra	Peso cápsula vacía (g)	Peso cápsula + fase aceitosa (g)	Peso fase aceitosa (g)	Peso de porcelana después del baño (g)	peso crudo (g)	% crudo
1	49,2379	59,4048	10,1669	49,2395	0,0016	0,1554
2	41,3363	46,6636	5,3273	41,3391	0,0028	0,2808
3	29,6636	38,3028	8,6392	29,6662	0,0026	0,2575
4	49,3887	57,0267	7,6380	49,3933	0,0046	0,4560
5	48,0841	57,4632	9,3791	48,0868	0,0027	0,2650
6	49,3761	55,4864	6,1103	49,3807	0,0046	0,4570
7	29,6582	37,5389	7,8807	29,6601	0,0019	0,1890
8	49,377	58,5666	9,1896	49,3799	0,0029	0,2943
9	48,0862	57,7105	9,6243	48,0896	0,0034	0,3435
10	56,0563	62,7486	6,6923	56,0611	0,0048	0,4825
11	41,3367	49,3470	8,0103	41,3410	0,0043	0,4280
12	49,243	55,7532	6,5102	49,2520	0,0090	0,9000

Tabla 31. Prueba TPH @90 días

MUESTRA	Peso cápsula vacía (g)	Peso cápsula + fase aceitosa (g)	Peso fase aceitosa (g)	Peso de porcelana después del baño (g)	peso crudo (g)	% crudo
1	49,2379	54,9295	5,6916	49,2379	0,0000	0,0000
2	41,3363	46,6501	5,3138	41,3363	0,0000	0,0000
3	29,6636	36,0379	6,3743	29,6636	0,0000	0,0000
4	49,3887	54,9725	5,5838	49,3887	0,0000	0,0000
5	48,0841	54,0234	5,9393	48,0841	0,0000	0,0000
6	49,3761	56,1699	6,7938	49,3761	0,0000	0,0000
7	29,6582	34,6598	5,0016	29,6582	0,0000	0,0000
8	49,377	54,6069	5,2299	49,3770	0,0000	0,0000
9	48,0862	53,1222	5,0360	48,0862	0,0000	0,0000
10	56,0563	61,1317	5,0754	56,0563	0,0000	0,0000
11	41,3367	47,1283	5,7916	41,3367	0,0000	0,0000
12	49,243	54,5678	5,3248	49,2430	0,0000	0,0000

Ilustración 19. Muestra de suelo en agua y cloroformo, método gravimétrico modificado.



Fuente: Autores