

EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DEL PROCESO DE  
FITORREMEDIACIÓN CON PLANTAS GRAMÍNEAS PARA MITIGAR  
DERRAMES DE CRUDO EN EL DEPARTAMENTO DEL META, COLOMBIA.

JAVIER ANDRÉS CASTAÑO ERAZO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ D.C.  
2018

EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DEL PROCESO DE FITORREMEDIACIÓN  
CON PLANTAS GRAMÍNEAS PARA MITIGAR DERRAMES DE CRUDO EN EL  
DEPARTAMENTO DEL META, COLOMBIA.

JAVIER ANDRÉS CASTAÑO ERAZO

Proyecto Integral de grado para optar el título de  
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director

Lina Paola Matiz Pérez  
Ingeniera de Petróleos

Orientador

Yatnielah Isbel Pirela Ropero  
Ingeniera de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ D.C.  
2018

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Ing. Yatnielah Isbel Pirela Ropero  
Presidente del Jurado

---

Eliana Mesa  
Jurado 1

---

Yimy Parra  
Jurado 2

Bogotá D.C., Mayo de 2018

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. JAIME POSADA DIAZ**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA - PEÑA**

Vicerrectora Académica de Posgrados

**Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Secretario General

**Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCIA - PEÑA**

Decano General de Facultad de Ingenierías

**Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI**

Director Programa de Ingeniería de Petróleos

**Ing. JOSE HUMBERTO CANTILLO SILVA**

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

A Dios y a su amor inagotable que me ha mantenido y sostenido a lo largo de mi vida, ha puesto en mi vida a las personas que me han brindado la ayuda y guía que he necesitado y por darme la oportunidad de pasar por esta experiencia.

A mi madre y mis hermanos por el esfuerzo que han hecho para permitirme estar aquí, me han dado un apoyo incondicional y cuyo ejemplo espero poder seguir.

A los profesores que me han asesorado y aconsejado con paciencia y dedicación y al lector que con su curiosidad o necesidad de conocimiento hace que esto haya valido la pena.

Javier Andrés Castaño Erazo

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento a:

La empresa ATPIngeniería y a su Gerente Efraín Pérez por la amabilidad de su personal, por abrir sus puertas y permitir realizar este proyecto de grado, facilitando instalaciones, equipos y personal de apoyo durante el tiempo en que se realizó este trabajo.

Al Ingeniero Jairo Mosquera por su compromiso y guía en la realización de este trabajo.

Al personal de la Planta de Tratamiento de Residuos El Recreo, cuya hospitalidad y solidaridad brindada facilitaron el desarrollo de este proyecto.

A los profesores Alejandro Contreras Garzon por su dedicación y paciencia como durante el desarrollo de la propuesta de este proyecto de grado.

A la profesora Eliana Mesa Ramirez por su consejo y ayuda que fueron de gran aporte y ayuda en la elaboración de este proyecto.

A los asesores Yatnielah Isbel Pirela Romero y Carlos Alberto Espinosa Mora cuya asesoría técnica a lo largo de este proyecto fue de vital importancia.

A la Ingeniera Lina Paola Matiz Perez, Directora de este Proyecto de Grado, que con su colaboración permitió llevar este trabajo a feliz término.

Al asesor William Alejandro Palacios Torres, por el apoyo académico en el aspecto financiero del proyecto.

A las Directivas, Cuerpo Docente y Personal de la Biblioteca de la Universidad de América por el apoyo y capacitación recibida durante mi preparación como Ingenieros de Petróleos.

A todas aquellas personas que colaboraron de una u otra manera en el desarrollo de este proyecto.

## CONTENIDO

	pág.
<b>1. BIORREMEDIACIÓN Y FITORREMEDIACIÓN</b>	<b>21</b>
1.1. HISTORIA DE LA BIORREMEDIACIÓN	21
1.2. BIORREMEDIACIÓN	22
1.3. FITORREMEDIACIÓN	23
1.3.1 El efecto Rizosfera o Rizodegradación	24
1.3.2 La fitoacumulación o fitoextracción	24
1.3.3 La fitoestabilización	24
1.3.4 La Fitodegradación	24
1.3.5 La fitovolatilización	25
1.4 GENERALIDADES REMEDIACIÓN DE SUELOS	26
1.4.1 Extracción por vapor	26
1.4.2 Esparcimiento por aire	27
1.4.3 Paredes de Permeabilidad Reactiva	27
1.4.4 Oxidación Química	27
1.5 PROCESOS UTILIZADOS ACTUALMENTE POR ATPINGENIERÍA	27
1.5.1 Desorción térmica	27
1.5.2 Soil Washing	28
1.5.3 Landfarming estimulado	28
<b>2. DESCRIPCIÓN DE LOS CRUDOS Y LA GRAMÍNEA UTILIZADOS</b>	<b>29</b>
2.1 CRUDO UTILIZADO COMO CONTAMINANTE	29
2.2 GRAMÍNEA UTILIZADA	30
2.2.1 Familia Poaceae	30
2.2.2 Brachiaria Brizantha	31
<b>3. DISEÑO DE UN PLAN DE PRUEBAS Y SU IMPLEMENTACIÓN</b>	<b>34</b>
3.1 DISEÑO DEL PLAN DE PRUEBAS	34
3.1.1 Dimensiones de los recipientes	35
3.1.2 Volumen de crudo utilizado como contaminante	36
3.1.3 Plántulas	37
3.1.4 Método de determinación de la concentración de Hidrocarburos	
Totales	37
3.2 NORMATIVIDAD	38
3.2.1 Norma Lousiana 2B	39
3.3 INICIO DE LAS PRUEBAS Y MUESTREO	40
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	41
3.4.1 Análisis de varianza (ANOVA)	42
3.4.2 Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk	42



3.4.3	Método de Evaluación de Promedios de Tukey	43
<b>4</b>	<b>EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>	<b>45</b>
4.1.1	“Crudo Acacias”	46
4.1.2	“Crudo Castilla”	47
<b>4.2</b>	<b>DESARROLLO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>	<b>48</b>
4.2.1	Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk para las pruebas con “Crudo Acacias	49
4.2.2	Método de Evaluación de Promedios de Tukey para las pruebas con “Crudo Acacias”	50
4.2.3	Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk para las pruebas con “Crudo Castilla”	51
4.2.4	Método de Evaluación de Promedios de Tukey para las pruebas con “Crudo Castilla”	52
4.2.5	Segunda Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk para las pruebas con “Crudo Castilla”	53
<b>4.3</b>	<b>DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN</b>	<b>54</b>
4.3.1	Pruebas con Crudo Acacias	55
4.3.2	Pruebas con Crudo Castilla	56
4.3.3	Comparación con estudios aplicados a la Fitorremediación anteriormente	58
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS FINANCIERO</b>	<b>61</b>
<b>5.1</b>	<b>ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX)</b>	<b>61</b>
5.1.1	Tratamiento Actual (Soil Washing)	61
5.1.2	Tratamiento propuesto (Fitorremediación)	62
<b>5.2</b>	<b>EVALUACIÓN FINANCIERA</b>	<b>62</b>
5.2.1	Valor Presente Neto (VPN)	62
5.2.2	Tasa de Interés de Oportunidad (TIO)	63
5.2.3	Flujo de caja	63
<b>5.3</b>	<b>TRATAMIENTO ACTUAL</b>	<b>63</b>
<b>5.4</b>	<b>TRATAMIENTO PROPUESTO</b>	<b>65</b>
<b>5.5</b>	<b>CONCLUSIÓN DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA</b>	<b>66</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>69</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>73</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>70</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Comparacion Biorremediación y Fitorremediación	25
<b>Tabla 2.</b> Propiedades “Crudo Castilla”	29
<b>Tabla 3.</b> Características principales de la <i>Brachiaria Brizantha</i>	32
<b>Tabla 4.</b> Normativa Internacional	38
<b>Tabla 5.</b> Parámetros de la norma Lousiana 29B	39
<b>Tabla 6.</b> Resultados pruebas con “Crudo Acacias”	46
<b>Tabla 7.</b> Resultados pruebas con “Crudo Castilla”	47
<b>Tabla 8.</b> Análisis de Varianza para los datos del tratamiento con Crudo Acacias	48
<b>Tabla 9.</b> Análisis de Varianza para los datos del tratamiento con Crudo Castilla	48
<b>Tabla 10.</b> Resultados organizados para Shapiro-Wilk	49
<b>Tabla 11.</b> Promedios de los tratamientos de las pruebas con “Crudo Acacias	50
<b>Tabla 12.</b> Diferencias entre promedios	50
<b>Tabla 13.</b> Resultados organizados para Shapiro-Wilk	51
<b>Tabla 14.</b> Promedios	52
<b>Tabla 15.</b> Diferencias entre promedios	52
<b>Tabla 16.</b> Segundo Análisis de Varianza para los datos del tratamiento con Crudo Castilla	53
<b>Tabla 17.</b> Resultados organizados para Shapiro-Wilk	53
<b>Tabla 18.</b> Degradación total para las pruebas con “Crudo Acacias”	55
<b>Tabla 19.</b> Degradacion total para las pruebas con “Crudo Castilla”	57
<b>Tabla 20.</b> Comparacion resultados con “Assesment of Bermuda Grass Cultivars for Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils”	59
<b>Tabla 21.</b> Comparacion resultados con “El uso de <i>Panicum Maximum</i> y <i>Brachiaria Brizantha</i> para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano”	60
<b>Tabla 22.</b> <i>Costos Soil Washing</i>	61
<b>Tabla 23.</b> Costos Fitorremediación	62
<b>Tabla 24.</b> Costos Periodo Cero (0)	63
<b>Tabla 25.</b> Costos Periodo Cero (0) al 45	63
<b>Tabla 26.</b> Costos Periodo Cero (0)	64
<b>Tabla 27.</b> Costos Periodo Uno (1) al 60	64

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Pasto Marandu en recipientes de plastico	31
<b>Figura 2.</b> Dimensiones de los recipientes (1)	35
<b>Figura 3.</b> Dimensiones de los recipientes (2)	35
<b>Figura 4.</b> Recipiente contaminado con crudo	40
<b>Figura 5.</b> Recipiente con suelo contaminado y semillas de Brachiarea Brizantha germinadas	40
<b>Figura 6.</b> Diagrama de flujo para el muestreo	41

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<b>Ecuación 1.</b> Calculo del volumen de suelo	36
<b>Ecuación 2.</b> Calculo del volumen de la mezcla	36
<b>Ecuación 3.</b> Calculo de volumen de crudo	36
<b>Ecuación 4.</b> Coeficiente $b$ para la prueba de normalidad Shapiro-wilk	42
<b>Ecuación 5.</b> Coeficiente $W$ para la prueba de normalidad Shapiro-wilk	43
<b>Ecuación 6.</b> Diferencia Significativa Honesta	44
<b>Ecuación 7.</b> Coeficiente $b$ para los datos de las pruebas con “Crudo Acacias”	49
<b>Ecuación 8.</b> Coeficiente $W$ para los datos de las pruebas con “Crudo Acacias”	49
<b>Ecuación 9.</b> Diferencia Significativa Honesta para las pruebas con “Crudo Acacias”	50
<b>Ecuación 10.</b> Coeficiente $b$ para los datos de las pruebas con “Crudo Acacias”	51
<b>Ecuación 11.</b> Coeficiente $W$ para los datos de las pruebas con “Crudo Acacias”	51
<b>Ecuación 12.</b> Coeficiente $b$ para los datos de las pruebas con “Crudo Castilla”	53
<b>Ecuación 13.</b> Coeficiente $W$ para los datos de las pruebas con “Crudo Castilla”	53
<b>Ecuación 14.</b> Calculo del porcentaje de disminución en el contenido de Hidrocarburos Totales.	55
<b>Ecuación 15.</b> Calculo del porcentaje de disminución en el contenido de Hidrocarburos Totales para las pruebas con “Crudo Acacias”	55
<b>Ecuación 16.</b> Calculo del Valor Presente Neto (VPN) para Fitorremediación	66

## LISTA DE GRAFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Resultados pruebas con “Crudo Acacias”	46
<b>Gráfica 2.</b> Resultados pruebas con “Crudo Castilla”	47
<b>Gráfica 3.</b> Degradación total para las pruebas con “Crudo Acacias”.	56
<b>Gráfica 4.</b> Degradacion total para las pruebas con “Crudo Acacias”.	57
<b>Gráfica 5.</b> Flujo de caja para <i>Soil Washing</i> .	64
<b>Gráfica 6.</b> Flujo de caja para Fitorremediación	66

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
<b>Anexo A.</b> Anderson y McLean (1974)	76
<b>Anexo B.</b> Gill (1978)	77
<b>Anexo C.</b> Rango <i>estudentizado</i>	78

## GLOSARIO

**ALELOPATÍA:** la capacidad de una planta de influenciar el crecimiento y desarrollo de otras plantas y/o organismos por medio de la liberación de químicos.

**CICLO VEGETATIVO:** ciclo de vida de una planta.

**CULTIVARES:** subespecies de planta miembros de una misma especie y familia.

**CO-METABOLISMO:** ocurre cuando una encima producida para el metabolismo de un sustrato puede también degradar un segundo sustrato sin necesidad de energía o nutrientes adicionales.

**DATOS OUTLIERS:** también conocidos como datos atípicos, son aquellos datos que numéricamente difieren del resto, por lo general son debidos a un error y no representan un valor verdadero o asociado a la realidad.

**ESPIGAS:** etapa de la planta en la que el tallo ya germinó, sin embargo, la planta aún no se encuentra totalmente desarrollada

**FITOSANITARIO:** lo referente al estado de salud de una planta.

**EX-SITU:** significa que el proceso se lleva a cabo en un lugar diferente a donde ocurre el fenómeno y para ello hay un desplazamiento del objeto que está siendo procesado de un lugar a otro y un cambio en las condiciones.

**HÁBITO DE CRECIMIENTO:** el hábito de crecimiento de una planta, es la forma en la que crece.

**HUMEDAD:** la cantidad de agua en forma de vapor contenida en la atmósfera

**HUMIDÍCOLA:** subfamilia de las *Brachiareas*

**IN-SITU:** significa que el proceso se lleva a cabo en el lugar donde ocurre el fenómeno y en condiciones naturales.

**LODÍCULOS:** escamas que suelen ser de color verde o blanco cuya función es proteger el fruto de la planta y se ubica bajo el ovario de esta.

**LOUISIANA 29B:** norma estadounidense que junto al Decreto 4741 de 2005 reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.

**MACOLLO:** tipo de hoja de plantas gramíneas que se caracteriza por tener forma de yema

**NORMA EPA 3540C:** norma emitida por la EPA para llevar a cabo el procedimiento de extracción de aceites orgánicos de matrices sólidas.

**OLEOFÍLICO:** referente a sustancias que poseen afinidad hacia aceites como los son los hidrocarburos.

**OLEOFÓBICO:** referente a sustancias que carecen de afinidad hacia aceites.

**PALATABILIDAD:** la facilidad de la planta para ser consumida por animales.

**PERENNE:** indica que una planta florece más de una vez durante su vida y/o que vive más de dos años.

**PLANTULAS:** es la etapa de la planta en la que ya este se encuentra desarrollada totalmente.

**RANGO ESTUDENTIZADO:** rango de valores que sigue la distribución T de Student.

**RIZOSFERA:** capa o zona de la tierra donde se encuentran las raíces de las plantas

**SALIVAZO:** espécimen de mosca *Prosapia Bicinta* que se alimenta de plantas

**SIMPODIAL:** en agronomía se habla de simpodial cuando de un brote, ya sea de raíz, rama o tallo, emergen varios brotes y como resultado se da un crecimiento constante en las raíces, ramas o tallos a lo largo de la vida de la planta.



## ABREVIATURAS

- %V/V:** porcentaje volumen a volumen
- Bbl:** barriles de crudo, equivalente a 42 galones
- Cc:** centímetros cúbicos
- cP:** centiPoise, unidad de medida de viscosidad de fluidos que consiste en una dina por segundo sobre centímetro cuadrado ( *Dina × Segundo / Centímetro<sup>2</sup>*)
- EPA:** Agencia de Protección del Medio Ambiente por sus siglas en inglés, de los Estados Unidos de América.
- mm:** milímetro.
- MSNM:** metros sobre el nivel del mar
- pH:** nivel de acidez
- ton/ha:** tonelada de biomasa producida por las plantas por hectárea plantada.
- TPH:** *total Petroleum Hydrocarbons* o hidrocarburos de petróleo totales por sus siglas en inglés.

## RESUMEN

### **EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DEL PROCESO DE FITORREMIEDIACIÓN CON PLANTAS GRAMÍNEAS PARA MITIGAR DERRAMES DE CRUDO EN EL DEPARTAMENTO DEL META, COLOMBIA.**

El presente trabajo de grado se desarrolla dentro del área de biorremediación de suelos, a través de una prueba de laboratorio con un miembro de la especie vegetal de las Gramíneas, la *Brachiaria Brizantha*, este desarrollo se hace utilizando dos tipos de crudos con diferentes gravedades API que son denominados “Crudo Acacias” y “Crudo Castilla”, cada uno en cuatro muestras de suelo entre las cuales hay una muestra de control o de referencia en donde no se establecen gramíneas y de esta manera evaluar la fitorremediación como método de mitigación de derrames de crudos que sean provenientes del Departamento del Meta, Colombia. Además de esto se realiza una investigación sobre los métodos de remediación de suelos implementados actualmente a nivel nacional e internacional y se lleva a cabo la evaluación técnica y financiera con los resultados obtenidos en la prueba de laboratorio comparándolos con los obtenidos en estudios anteriores que abordan el tema y con el método que ATPIngeniería implementa actualmente, *Soil Washing*, para la remediación de suelos contaminados con crudo.

Dentro de los resultados obtenidos de la evaluación técnica se encuentra que un proceso de fitorremediación se puede considerar factible si se implementa durante un lapso de tiempo de al menos cuatro (4) meses teniendo en cuenta la relevancia de la adición de fertilizante y el estado de madurez de la planta utilizada al momento de plantarse en un proceso de fitorremediación, también se confirma que la especie vegetal *Brachiaria brizantha* tiene la capacidad de fitorremediar crudos de gravedades API entre 15° y 20° a partir del 80% de disminución en las concentraciones de hidrocarburos en los suelos que se obtuvo en promedio y se recomienda implementar la fitorremediación con *Brachiaria Brizantha* bajo un estricto monitoreo de factores externos (variables climáticas, hombre, animales, etc.) que afecten la eficiencia del proceso.

El mayor aporte de este estudio es la evaluación del proceso de fitorremediación implementado en suelos contaminados con dos (2) tipos diferentes de crudos con lo cual se observa la influencia que tiene la característica de la gravedad API en la fitorremediación de suelos.

#### **PALABRAS CLAVE:**

- Fitorremediación.
- Derrames de Crudo.
- Plantas Gramíneas.
- Departamento del Meta.

## INTRODUCCIÓN

Los derrames de petróleo son un problema presente en las operaciones de producción y transporte de este, ya sea ocasionado por error humano, problemas con los equipos o causas externas y fuera del control de las compañías, este problema afecta al medio ambiente y a las comunidades cercanas lo que puede resultar en conflictos con las mismas comunidades y/o autoridades locales llevando a bloqueos de las operaciones y generando costos extras por tiempos no productivos.

Por esta razón el desarrollo de un tratamiento que anule el impacto del petróleo derramado en el medio ambiente que no genere efectos secundarios negativos y que no afecte de manera representativa al costo de la operación es una necesidad de la industria petrolera y por esta razón se desarrolla un tratamiento de biorremediación que logre degradar petróleo derramado en suelos de manera efectiva y eficiente económicamente.

El diseño de este tratamiento de biorremediación se realiza mediante pruebas de laboratorio en las instalaciones de ATPIngeniería con dos tipos de crudos mezclados en suelos en donde se plantan especímenes de gramínea “*Brachiaria brizantha*” para someterlos al efecto de la fitorremediación, observar como se ve afectada la concentración de Hidrocarburos Totales en dichos suelos , comparar sus resultados y costos con otro tratamiento de remediación que implementa ATPIngeniería para finalmente determinar si este tratamiento puede o no implementarse en casos reales y considerarse como una opción viable para ser utilizado como un método remediación de suelos.

Se aclara que el alcance de este proyecto está delimitado a observar el efecto de la fitorremediación en muestras de suelos contaminados con los dos crudos utilizados en la experimentación y en la realización de una evaluación financiera de los costos del tratamiento sometiéndolos a comparación con los tratamientos que ATPIngeniería ofrece actualmente, la implementación no está incluida en este proyecto.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar técnico y financieramente el proceso de fitorremediación con plantas gramíneas para la mitigación de derrames de crudo en el Departamento del Meta, Colombia.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir el proceso de fitorremediación y biorremediación.
- Describir las características de los crudos que serán utilizados como contaminantes de las muestras de suelo.
- Describir las características del espécimen de gramínea que se establecerá en las muestras de suelos con crudo.
- Diseñar el plan de pruebas de laboratorio para la medición de volumen de crudo en las muestras de suelo.
- Implementar el plan de pruebas de laboratorio estableciendo la gramínea “*Brachiaria brizantha*” en diferentes muestras de suelo.
- Evaluar los resultados de la prueba de medición de volumen de acuerdo con la cantidad de volumen volatilizado en el proceso.
- Desarrollar un análisis de los resultados teniendo en cuenta el tiempo que duró la prueba.
- Comparar los resultados con los de las pruebas de fitovolatilización usadas como antecedentes, determinando así la factibilidad de su implementación en un caso real
- Evaluar financieramente el proceso de fitorremediación a partir del establecimiento de gramíneas con base en el indicador valor presente neto (VPN)

## **1. BIORREMEDIACIÓN Y FITORREMEDIACIÓN**

En este capítulo se describen las características y la aplicabilidad de los procesos de biorremediación y fitorremediación, adicionalmente se especificarán los mecanismos mediante los cuales las plantas interactúan con los contaminantes en los suelos en un proceso de fitorremediación.

### **1.1 HISTORIA DE LA BIORREMEDIACIÓN**

El proceso de biorremediación nace de la necesidad de cambiar y/o mejorar los métodos convencionales de remediación o rehabilitación de ecosistemas que se han visto afectados por diversos contaminantes, métodos que tienen efectos secundarios en el ecosistema sobre el cual se están aplicando, con lo que pueden llegar a generar un daño mayor a corto y largo plazo del que trataban de remediar, este daño también puede ser a la salud humana. Entre los métodos convencionales de remediación están los mecánicos, el uso de químicos, la quema de crudo contaminante y lo más común es una combinación de estos, por lo general estos métodos no son aceptados por las autoridades ambientales locales ni las comunidades, es por eso que se empezó a buscar varias alternativas cuyo impacto en el ecosistema fuera nulo o cercano a nulo, además de que fueran económicamente sostenibles.

La Biorremediación traza su historia hasta la década de 1960 con George Robinson, microbiólogo que experimentó con tarros manchados de petróleo los cuales limpiaba con cultivos bacterianos, más tarde en 1972 este experimento pasaría a implementarse en un caso verdadero, el de la embarcación RMS Queen Mary. Ya en la década de 1990 la biorremediación tenía dos presentaciones o ramas, la Bioaumentación, que es el uso de bacterias y la Bioestimulación, que es el uso de nutrientes, con las cuales se buscaba acelerar el proceso natural de degradación del petróleo, más adelante se empezaron a usar en conjunto en un proceso conocido como biodegradación, se descubrió que las comunidades bacterianas utilizadas en la biodegradación se veían afectadas positivamente por la presencia de plantas al estas crear un ambiente propicio para su crecimiento y desarrollo y así nace la fitorremediación, como un proceso complementario de la Biodegradación.

## 1.2 BIORREMEDIACIÓN

La biorremediación también conocida como remediación biológica se define como el uso de seres vivos, ya sean organismos y/o microorganismos para recuperar o mejorar el proceso de recuperación de sitios contaminados<sup>1</sup>

Se caracteriza por sus bajos costos de operación, su bajo impacto sobre el medio ambiente y tiempos relativamente altos para degradar los contaminantes en cuestión. Los bajos costos que generan los procesos de biorremediación son gracias a que se trabajan con seres vivos, ya sean bacterias, vegetales u hongos, los cuales pueden estar presentes en el sitio contaminado o adquirirse en el mercado y según la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales no requieren de permisos para su compra, estos seres vivos deben ser seleccionados teniendo en cuenta su interacción con los ecosistemas que estén remediando como lo son el consumo de nutrientes, posibles productos secundarios y cambios en las propiedades de los suelos para lograr un bajo impacto en estos . En lo que respecta a tiempos de operación en los procesos de biorremediación pueden ser más altos o bajos dependiendo de los organismos y/o microorganismos utilizados, tipo de ecosistema que va a ser tratado y las condiciones meteorológicas y ambientales presentes.

El mecanismo de la biorremediación sin importar los tipos de organismos y/o microorganismos que se vayan a utilizar se basa en el principio que estos puedan metabolizar e interactuar con el contaminante y su entorno sin ser afectados de forma negativa en gran manera, es decir que puedan sobrevivir junto al contaminante y subsistir de este a las condiciones ambientales del ecosistema contaminado.

Este tipo de tratamiento de suelos se puede aplicar de dos formas, la primera es *ex-situ*, en el que se traslada el suelo a una planta de tratamiento. Un ejemplo de esta son las biopilas, una biopila es un proceso biológico controlado donde los contaminantes son degradados por bacterias y con un sistema de aireación y/o riego de agua remover los contaminantes degradados hacia el fondo de la biopila.

La segunda forma es *in-situ*, es decir no hay traslado del suelo contaminado y se implementa el tratamiento en el lugar, un ejemplo de un tratamiento de biorremediación *in-situ* es el de bioesparcimiento, en el que se establecen bacterias para degradar componentes orgánicos pesados en unos más ligeros que puedan ser removidos por medio de una inyección de aire. Otra forma de la biorremediación *in-situ* es la fitorremediación.

---

<sup>1</sup>VISHWANATHAN,S. y AYYASWAMI,Arul. SPE, 2010.

### 1.3 FITORREMIEDIACIÓN

Es una forma o rama de la biorremediación. En definición es una tecnología o método que usa especies de plantas como organismo vivo para aislar o degradar contaminantes orgánicos e inorgánicos a través de procesos bioquímicos naturales al interactuar con estos y los microorganismos que se puedan encontrar en el ecosistema contaminado. Aunque en principio se implementa como complemento o en conjunto con otros procesos de biorremediación, las plantas por si mismas pueden degradar hidrocarburos, lo que convierten a la fitorremediación en un método de remediación que puede ser utilizado independientemente.

La fitorremediación al igual que la biorremediación se caracteriza por sus bajos costos operacionales y su bajo impacto ambiental ya que sus subproductos finales son Dióxido de Carbono y agua<sup>2</sup>. Se habló que los tiempos de degradación dependen de los organismos y/o microorganismos utilizados, ya que en la fitorremediación se utilizan plantas los tiempos de degradación suelen ser altos en especial si es necesario la germinación previa de los especímenes que se van a implementar.

La principal ventaja de la fitorremediación frente a la biorremediación está en que la primera se caracteriza porque su principal fuente de energía es la solar, mejora el entorno donde se utilice desde el punto de vista estético y dependiendo del tipo de planta que se utilice se presenta una producción de biomasa, sin embargo, la fitorremediación es un proceso que solo puede ser *in-situ*, a diferencia de la biorremediación que puede ser *in-situ* o *ex-situ*.

En la fitorremediación hay cinco mecanismos mediante los cuales las plantas interactúan con los contaminantes en los suelos<sup>3</sup> :

---

<sup>2</sup> MÁSU,S., et al. Prospects of using leguminous species in phytoremediation of total petroleum hydrocarbons polluted soils. En: Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies. vol. 47, no. 1, p. 172-176

<sup>3</sup> CUBILLOS,Janneth, et al. Phytoremediation of Water and Soils Contaminated by Petroleum Hydrocarbons. En: Ingeniería Y Competitividad. vol. 16, no. 1, p. 131-146

**1.3.1 El efecto Rizosfera o Rizodegradación.** En el que los contaminantes son biodegradados en la rizosfera o zona de las raíces debido a la interacción con bacterias que se ven estimuladas por los nutrientes de las raíces de las plantas y a través del co-metabolismo de los contaminantes. A partir de este mecanismo se puede utilizar la fitorremediación para remover metales, pesticidas, lixiviados y diversos derivados del petróleo.

**1.3.2 La fitoacumulación o fitoextracción.** En la que las plantas acumulan los contaminantes en los tejidos de sus hojas y tallos por medio de una oxidación metabólica. Este mecanismo presenta la ventaja si se utiliza en solitario que es bastante barato y simple de implementar ya que depende enteramente de la tolerancia que las plantas al contaminante. Por esta misma razón este mecanismo en solitario solo se puede utilizar a bajas concentraciones de contaminación.

**1.3.3 La fitoestabilización.** En el que la migración de los componentes orgánicos o inorgánicos es reducida por medio de un cambio en la textura del suelo debido a la absorción de las raíces. Este mecanismo es principalmente utilizado para la remediación de suelos contaminados con metales pesados que no pueden ser biodegradados completamente como una forma de solución a largo plazo para evitar la propagación del problema, por esto mismo debe ser implementado con especies endémicas o nativa del ecosistema ya que una especie no nativa podría adaptarse de forma tal que invada la totalidad del ecosistema a largo plazo.

**1.3.4 La Fitodegradación.** En el cual la planta absorbe y transforma los contaminantes en moléculas más simples como  $CO_2$  y  $H_2O$  a través de un proceso que utiliza las proteínas y encimas de la planta como catalizador para romper las moléculas de los contaminantes. Esta se da en tres pasos: primero, una reacción de óxido-reducción, segundo, una conjugación de amino ácidos y azúcares y tercero, la incorporación a la planta. “Aunque en las células de la plantas no se da una completa biodegradación de los compuestos orgánicos, esta utiliza los productos de esta transformación en otras formas como la síntesis de amino ácidos”<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> CUBILLOS, Janneth, et al. Phytoremediation of Water and Soils Contaminated by Petroleum Hydrocarbons. En: Ingeniería Y Competitividad. vol. 16, no. 1, p. 131-146



**1.3.5 La fitovolatilización.** Ésta es definida en forma general como la absorción de los contaminantes menos pesados por las plantas junto con el agua para luego ser transferidos o volatilizados en forma de componentes menos tóxicos a la atmósfera por medio de las hojas de las plantas. Este mecanismo tiene la desventaja que los componentes volatilizados pueden regresar a los ecosistemas por medio de precipitaciones.

Estos cinco mecanismos se pueden utilizar en conjunto o de manera individual dependiendo de las necesidades y/o condiciones que se presenten. La fitorremediación está limitada por la concentración de contaminación que puede tratar ya que por lo general las plantas no pueden tolerar altas concentraciones de hidrocarburos debido a la alta acidificación del suelo que se presenta con estas<sup>5</sup>. A continuación, se presenta la **Tabla 1**. En donde se comparan las ventajas y desventajas de la biorremediación y la fitorremediación.

**Tabla 1.** Comparación Biorremediación y Fitorremediación

Biorremediación	Fitorremediación
<b>Ventajas</b>	
Bajos costos operacionales Bajo impacto al medio ambiente. Puede ser in-situ o ex-situ.	Bajos costos operacionales. Bajo impacto al medio ambiente. Energía solar como principal fuente De energía. Mejora estéticamente su entorno. Se implementa in-situ.
<b>Desventajas</b>	
Tiempos de degradación relativamente altos. Si se hace ex - situ se debe hacer un traslado del suelo y se necesita un espacio donde se lleve a cabo el tratamiento. Limitado por la disponibilidad de microorganismos y organismos.	Altos tiempos de degradación si es necesario la germinación de semillas Solo puede implementarse a bajas concentraciones de contaminación Limitado por la disponibilidad de especímenes de plantas.

**Fuente.** CUBILLOS, Janneth, et al. Phytoremediation of Water and Soils Contaminated by Petroleum Hydrocarbons. En: INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD. vol. 16, no. 1, p. 131-146

---

<sup>5</sup> MÂSU, S.; MORARIU, F. y DRAGOMIR, N. Using different tolerant plant for phytoremediation of contaminated soils with total petroleum hydrocarbons. En: Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies. vol. 46, no. 2, p. 175-179

## 1.4 GENERALIDADES REMEDIACIÓN DE SUELOS

En este numeral se describe el concepto de remediación de suelos y se mencionan los métodos actualmente usados en el ámbito internacional y nacional tomando como referencia los utilizados por la empresa ATPIngeniería para el nacional.

La remediación se puede definir como la recuperación parcial o total de las propiedades iniciales de un ecosistema, otra posible definición es evitar el daño a la salud y bienestar de los seres vivos y el impacto negativo sobre el medio ambiente causado por un contaminante. Con esto último se hace referencia a que la remediación de suelos también se enfoca en la contención de las sustancias contaminantes y no solo a su remoción.

La remediación de suelos en la industria de los hidrocarburos ha tenido una evolución acelerada debido a la presión ejercida por la necesidad de soluciones eficientes en términos de costos y técnicamente efectivas, uno de los principales problemas a los que se enfrenta la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos es la movilidad de estos últimos, la solución a esto fue mover el material contaminado a un entorno donde se remueva la contaminación sin la preocupación del esparcimiento de los crudos, así nace la remediación ex-situ.

Buscando una alternativa menos costosa en donde no se tuviera que mover el material contaminado llega la extracción por vapor como reemplazo de la inyección de agua dando las bases para tecnologías de remediación moderna para los compuestos orgánicos disueltos, sin embargo, debido a la complejidad de la composición de los hidrocarburos no se puede llegar a una solución única para todos los problemas y para mediados de la década del 2000 el enfoque cambia de la contención del problema al control y la reducción masiva de los contaminantes. Con este cambio de enfoque se empiezan a buscar alternativas que puedan implementarse de manera masiva en el menor tiempo posible y en la búsqueda de un método innovador se llega a la variedad de técnicas que actualmente se usan:

**1.4.1 Extracción por vapor.** Con la implementación de una inyección de aire en los suelos contaminados y bombas de vacío que capturan las corrientes de aire se remueven los componentes orgánicos más livianos por medio de la volatilización.

**1.4.2 Esparcimiento por aire.** Este método consiste en la inyección de aire a presiones controladas al agua subterránea por debajo del área contaminada para que la migración de esta capture los componentes orgánicos más livianos y luego ser removidos del agua que sube hasta superficie.

**1.4.3 Paredes de Permeabilidad Reactiva.** Anteriormente la contaminación de cuerpos de agua subterráneos se manejaba con bombas que la llevaban hasta superficie y era sometida a tratamientos químicos ex-situ. La tecnología de Paredes de Permeabilidad Reactiva es una tecnología emergente que busca reemplazar esto y consiste en la interceptación de los cuerpos de agua subterráneos e inmovilizarlos permanente en las paredes los contaminantes en estos.

**1.4.4 Oxidación Química.** Permanganato de Potasio, Persulfato de Sodio entre otros son sustancias químicas que actualmente se usan para reducir la masa de contaminantes tanto en suelos como en cuerpos de agua de forma efectiva y eficiente en términos de costos, sin embargo, tiene la limitación de no poderse aplicar en cualquier sitio debido a los posibles impactos que pueda tener en el medio ambiente.

## **1.5 PROCESOS UTILIZADOS ACTUALMENTE POR ATPINGENIERÍA**

En este numeral se describen las tecnologías que actualmente ATPIngeniería utiliza para tratar material contaminado por crudos en bajas y medias concentraciones.

**1.5.1 Desorción térmica.** Este tipo de tratamiento se desarrolla ex - situ y consiste en calentar el suelo a temperaturas de hasta 540°C para volatilizar los componentes orgánicos que se encuentren en este alterando de forma mínima la muestra, sin embargo, aumenta su costo por los procesos de pretratamiento para disminuir la humedad del suelo tratado. Entre sus características más importantes están:

- Tecnología aplicable preferiblemente para el tratamiento de material contaminado con concentraciones de hidrocarburos y sólidos superiores al 20%.
- Eficiencia de recuperación del hidrocarburo residual superior al 90%.
- Cenizas o sólidos residuales producto del tratamiento con contenidos menores al 1% de TPH, cumpliendo con el protocolo de *Lousiana 29B* y normatividad ambiental vigente.
- La emisión de Gases de combustión cumple los estándares de la EPA

- Por el cumplimiento de los estándares de la EPA, éste proceso es considerado con una tecnología limpia.
- Sistema portátil, lo que permite facilidad en transporte y acceso a locaciones donde se requiera el servicio.
- Sistema automatizado e intrínsecamente seguro para trabajo en áreas clasificadas.
- Diferentes tamaños de equipos con capacidades de tratamiento desde 50 hasta 600 barriles al día.

**1.5.2 Soil Washing.** Este tipo de tratamiento se desarrolla ex – situ y consiste en limpiar los componentes orgánicos e inorgánicos por medio de un líquido y aditivos químicos. El principio de funcionamiento de este tratamiento consiste en que los contaminantes tienden a pegarse a los granos finos en los suelos, los cuales a su vez tienden a pegarse a granos más gruesos, separando los granos finos de los gruesos permitiría tratar los finos o disponer de ellos junto al líquido que se utilizó para la limpieza según la situación lo requiera. Entre sus características importantes están:

- Proceso fisicoquímico de extracción de hidrocarburos de arenas y sólidos, por medio de productos químicos biodegradables y procesos físicos especialmente diseñados.
- Consiste en una mezcla de productos seleccionados que generan una reacción de cambio de humectabilidad de los sólidos, de oleofílicos a oleofóbicos, produciendo la separación agua-crudo y rompiendo las emulsiones presentes.
- En el proceso intervienen tres componentes principales:
  - a) Los productos químicos.
  - b) El mezclador dinámico.
  - c) El sistema de separación.

**1.5.3 Landfarming estimulado.** Es un proceso biológico que utiliza bacterias u hongos para atenuar, transformar o eliminar sustancias contaminantes y requiere el esparcimiento del suelo contaminado sobre una superficie previamente preparada. Se estimula la actividad bacteriana aeróbica en los suelos con la adición de nutrientes y complementando con un flujo de aire a través del suelo para promover la degradación aeróbica.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS CRUDOS Y LA GRAMÍNEA UTILIZADOS

En este capítulo se habla del espécimen de planta y del crudo que son utilizados en los diferentes tratamientos y etapas de la prueba de laboratorio, se mencionan sus características más importantes y se explica su importancia.

### 2.1 CRUDO UTILIZADO COMO CONTAMINANTE

Las características de un crudo varían según el ambiente de formación de su roca generadora, por lo cual los resultados de una prueba de fitorremediación en la que se utilizó un crudo de una región en particular con ciertas características pueden no ser representativos o válidos para otras pruebas que se hayan llevado a cabo con crudo proveniente de otra región, por esta razón es importante no solo registrar las características de los especímenes de planta utilizados, sino también las propiedades básicas de los crudos utilizados como contaminante para su futura comparación con otras pruebas.

Esta prueba de laboratorio se lleva a cabo con dos tipos de crudo, provenientes de la Cuenca Llanos Orientales, el primero de Campo Castilla con una gravedad API de 15.8° obtenida a partir de una prueba con picnómetro cuyas propiedades más relevantes para este estudio se listan en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Propiedades “Crudo Castilla”

Propiedad	Valor	Unidad
Tipo	Black Oil	
Viscosidad @ 198 °F	41.2	cP
Saturados	25.9	%
Aromáticos	46	%
Azufre	2.2	%
Resinas	14.7	%
Asfáltenos	13.5	%

**Fuente.** GUSTAVO ADOLFO NOVOA QUINTERO and YEISON DAVID PEÑA ARDILA. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS CRUDOS PESADOS DEL CAMPO CASTILLA ESTACIÓN 2 Y ACACIAS. Fundación Universidad de América, 2006. p. 52.

El segundo se le denomina “Crudo Acacias”. Se debe aclarar que “Crudo Acacias” es un crudo procedente de la estación del mismo nombre por lo tanto sus características no son las de un único crudo proveniente de un pozo en específico y por esta razón no se describen sus características a profundidad. Su gravedad API de 20.6° la cual también fue medida con una prueba con picnómetro y su viscosidad es de 35.6 a los 198°F.

## 2.2 GRAMÍNEA UTILIZADA

En este numeral se aborda el tema sobre la especie de planta que es utilizada en los tratamientos de suelos contaminados con crudos, sus características de mayor importancia y el porqué de su selección como agente fitorremediador para este estudio.

**2.2.1 Familia Poaceae.** La familia *Poaceae* también conocida como *Graminae* o simplemente Gramínea reúne a las plantas conocidas como pastos, de un único tallo cilíndrico que no se separa en ramas y cuyas hojas planas siguen su mismo eje emergiendo inicialmente en forma de clavos, sus flores están protegidas con lodículos en vez de pétalos y suele ser confundida con las familias *Cyperaceae* y *Juncaceae*. La característica más importante de esta familia que la diferencia de las familias mencionadas es su fruto en forma de semillas o granos secos en donde el ovario está unido a la pared de la semilla.

“La evolución de esta familia, aunque incompletamente entendida, representa un interesante ejemplo de adaptación y co-evolución con factores ambientales y bióticos.”<sup>6</sup> De esta familia hay entre 7500 a 11000 especies dependiendo de la fuente que se cite y se divide en más de 600 géneros. Evolutivamente se le asocia con los mamíferos herbívoros grandes, teniendo una relación de co-evolución con estos, es decir, una relación en donde dos seres se adaptan recíprocamente el uno al otro, los pastos desarrollaron hojas basales, es decir, que crecen desde la base del tallo para evitar que la hoja fuera comida en su totalidad y al ser constantemente aplastados y no poder depender enteramente de sus hojas para la obtención de sus nutrientes desarrollaron un fuerte sistema de raíces simpodial.

La subfamilia de *Panicoideae* es una de las más grandes subfamilias de gramíneas con 3500 especies inicialmente reconocida por el botánico Robert Brown (1810), esta subfamilia se caracteriza porque es la única subfamilia en donde se presenta la fotosíntesis  $C_3$  y  $C_4$ , lo que diferencia a estas dos formas de fotosíntesis es cómo el  $CO_2$  es metabolizado. En la fotosíntesis  $C_3$  con una molécula de  $CO_2$  en presencia de la encima Rubisco (ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa) se forman dos de 3-fosfoglicerato que es una molécula con tres carbonos, de ahí el nombre de fotosíntesis  $C_3$ , mientras que en la fotosíntesis  $C_4$  una molécula de  $CO_2$  en presencia de la encima NADP-Malato deshidrogenasa se forma una molécula de Oxalacetato, que tiene 4 carbonos. La desventaja que tiene la fotosíntesis  $C_3$  en comparación a la  $C_4$  es que la encima Rubisco tiene una afinidad al  $O_2$  dependiente de la temperatura, si esta aumenta la encima oxigena el 3-fosfoglicerato provocando que la energía producida en la fotosíntesis sea menor, esta desventaja hace que las plantas en

---

<sup>6</sup> GIBSON, David J. Grasses and Grassland Ecology. New York: OUP Oxford, 2009. 9780198529194

donde solo se presente la fotosíntesis  $C_3$  no puedan sobrevivir a altas temperaturas con la misma facilidad que lo hacen las plantas en donde la fotosíntesis  $C_4$  se encuentre presente.

**2.2.2 Brachiaria Brizantha.** Conocida comúnmente como Pasto Marandú que se puede observar en **Figura 1**. hace parte de la subfamilia *Panicoideae* lo que le permite sobrevivir en temperaturas altas como las del Departamento de Meta, Colombia; actualmente este espécimen de planta es ampliamente usado como pasto de forraje y de paisajismo en el país, logrando que se encuentre disponible, además ha sido implementado previamente en pruebas para fitorremediar sitios contaminados con crudo<sup>7</sup> dando resultados positivos y su sistema simpodial de raíces le permite abordar una mayor área de suelo, es por estas razones que fue seleccionada para la evaluación técnica y financiera de la fitorremediación con crudos provenientes del Departamento del Meta, Colombia.

**Figura 1.** Pasto Marandú en recipientes de plástico.



El espécimen de planta implementada en el tratamiento puede resultar nociva para el suelo que se está tratando debido al consumo de nutrientes que la planta requiera para su crecimiento, si es un consumo muy elevado puede terminar agotando al suelo e impidiendo que en este pueda crecer otros especímenes de plantas. En el caso de la *Brachiaria Brizantha* al ser una gramínea su requerimiento de nutrientes no es elevado, aunque en comparación a otras gramíneas si lo es, en especial el de Nitrógeno, por esto, aunque sea una planta no nativa de la región se adapta muy bien al suelo. Además de esto con un aditivo o sustrato que contenga Nitrógeno se

---

<sup>7</sup> HERNÁNDEZ VALENCIA, Ismael y MAGER, Denise. Uso de *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano. En: *Bioagro*. vol. 15, no. 3, p. 149-155

puede proveer a la planta con los nutrientes que el suelo no contenga o evitar que la planta lo agote, aumentando el costo del tratamiento, pero inhibiendo e incluso anulando el impacto negativo sobre el medio ambiente.

Las características o información del espécimen de *Brachiaria brizantha* que fue provista por el distribuidor del cual se adquirieron las semillas se encuentra en la **tabla 3**.

**Tabla 3.** Características principales de la *Brachiaria Brizantha*

Parámetro	Descripción	Comentarios
Fertilidad del suelo necesaria	La fertilidad de un suelo depende de la cantidad de nutrientes que pueda a portar a las plantas en este.	Media
Ciclo Vegetativo	Esto es el tiempo que se puede esperar que viva una planta.	Perenne (Vive alrededor de dos (2) años)
Palatabilidad	Que tan agradable es su consumo para los animales	Excelente
Digestibilidad	Que tan fácil de digerir es	Excelente
Habito de crecimiento	Forma que adquieren las hojas de la planta	Macollo (Forma de yema)
Altura de la planta	Rango de crecimiento de la planta	de uno (1) a 1.5 metros
mm Lluvia/Año	Se establece que 1 mm Lluvia equivale a 1 litro en un metro cuadrado.	Más de 800
Resistencia a la helada	Capacidad de la planta de adaptarse a temperaturas bajas	Baja
Resistencia a la sequía	Capacidad de la planta de sobrevivir con escasa humedad en el ambiente	Media
Resistencia al salivazo	El salivazo " <i>Prosapia Binta</i> " también conocida como Mosca Pinta es un insecto que se alimenta de gramíneas	Alta



**Tabla 3.** (Continuación.)

Parámetro	Descripción	Comentarios
Resistencia a la humedad	Capacidad de la planta de sobrevivir con una humedad en el ambiente alta	Baja
Altitud	Altitud sobre el nivel del mar en el cual la planta puede sobrevivir	De cero (0) a 1800 MSNM
Producción de masa verde	Cantidad másica de masa que la planta puede producir por hectárea plantada	50 a 60 toneladas por hectárea
Profundidad de siembra	Profundidad necesaria para que las raíces de la planta arraiguen	Dos (2) Centímetros
Asociación Humidícola	Especímenes que hacen parte de la misma familia o están asociadas directamente	Decumbens, Kudzú
Acción Aleopática	La acción alelopática es la que influye en el desarrollo de otros organismos y /o microorganismos	Presenta acción alelopática

**Fuente.** Acosemillas modificado por el autor.

### 3. DISEÑO DE UN PLAN DE PRUEBAS Y SU IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se aborda el tema del proceso, el desarrollo, las generalidades y características de los materiales y métodos utilizados en el diseño de la prueba de fitorremediación con gramíneas en suelos contaminados con “Crudo Acacias” y “Crudo Castilla”

#### 3.1 DISEÑO DEL PLAN DE PRUEBAS

Lo que se busca en este trabajo académico es evaluar técnica y financieramente si es o no viable utilizar la gramínea *Brachiaria Brizantha* en un proceso de fitorremediación para mitigar derrames de crudo. Para esto se llevaron a cabo pruebas de laboratorio en la Planta de Tratamiento El Recreo, la cual está localizada en el municipio de San Carlos de Guaroa en el Departamento del Meta, Colombia, y es administrada por la empresa ATPIngeniería S.A.S. En estas pruebas se utilizaron como muestra crudos provenientes del mismo departamento que son: Acacias y Castilla, con lo cual se apunta a delimitar la población de muestreo a crudos de la zona, estos crudos se van a mezclar con suelo proveniente de la región para en este plantar las gramíneas y desarrollar el proceso de fitorremediación.

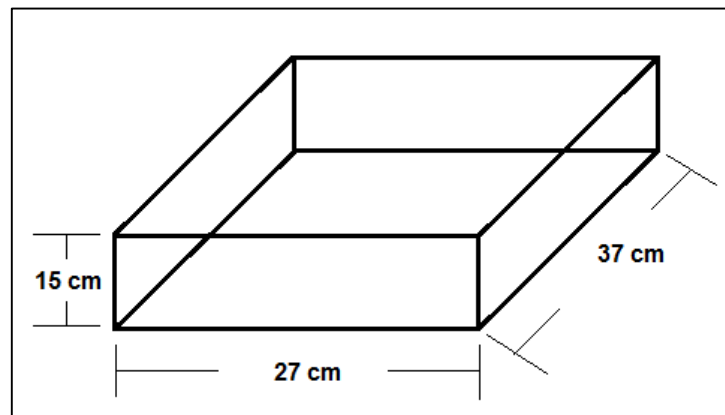
Lo que se espera observar es una disminución en la concentración de hidrocarburos inicial hasta llegar a un valor que sea aceptable dentro del protocolo de Louisiana 29B, es decir menor a un 1%.

Este diseño consistió en dos pruebas, una con “Crudo Acacias” y otra con “Crudo Castilla” cada una con 4 muestras de suelo, en tres (3) de estas muestras se plantan plántulas de *Brachiaria Brizantha* y la cuarta se toma como muestra de control para un total de ocho (8) muestras, las muestras de suelos se encuentran en ocho (8) recipientes distintos para evitar que el suelo de una muestra migre a otra o por fuera de los suelos de la prueba.

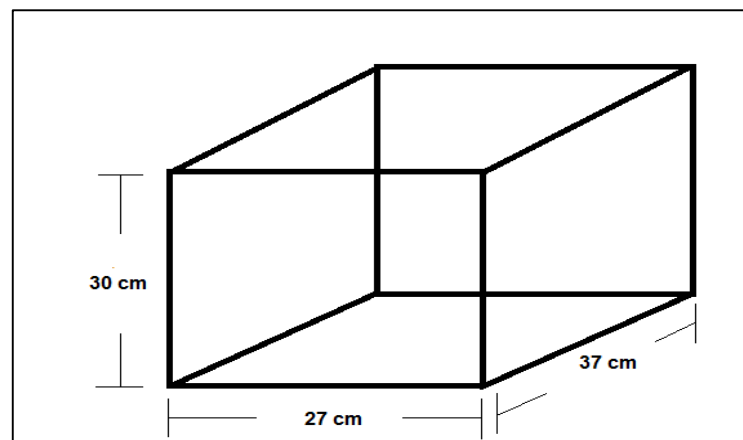
Los factores que se tienen en cuenta para el diseño de las pruebas son: dimensiones de los recipientes, volumen de crudo utilizado como contaminante, plántulas y método de determinación de la concentración de Hidrocarburos Totales, que se describen a continuación.

**3.1.1 Dimensiones de los recipientes.** Los recipientes utilizados son seis (6) recipientes de plástico de 27 centímetros de ancho, 38 centímetros de largo y 15 centímetros de profundidad y dos (2) de 27 centímetros de ancho, 37 centímetros de largo y 30 centímetros de profundidad como se muestra en la **Figura 2.** y en la **Figura 3.** Estos dos (2) últimos recipientes son los utilizados para las muestras de control. Esta selección se hace con el motivo de emular una materia de invernadero, con la suficiente profundidad para que las raíces de las plantas se desarrollen sin limitaciones de espacio, pero sin ningún tipo de orificio para aislar los crudos que se encuentren en estos.

**Figura 2.** Dimensiones de los recipientes (1)



**Figura 3.** Dimensiones de los recipientes (2)



**3.1.2 Volumen de crudo utilizado como contaminante.** Como lo que se busca medir es una concentración en porcentaje Volumen a Volumen (V/V), el volumen de crudo utilizado depende del volumen de suelo con el que se vaya a mezclar, entonces para determinar esta medida se hacen los siguientes cálculos:

Se calcula el volumen de suelo a utilizar en cada recipiente de acuerdo a las medidas considerando que de los 15 centímetros de profundidad solo se van a usar diez (10) para evitar que el crudo se rebose en caso de una precipitación de agua. En la **Ecuación 1.** el valor de 27 centímetros se refiere al ancho de los recipientes, el de 37 centímetro al largo y los diez (10) centímetros a la profundidad.

**Ecuación 1.** Calculo del volumen de suelo

$$27cm \times 37cm \times 10cm = 9990 cm^3$$

La concentración de Hidrocarburos Totales a la que se quiere llegar es a dos por ciento (2%) (V/V), por lo tanto, partiendo de que 9990 centímetros cúbicos es el 98 % de la mezcla se calcula el volumen total de esta y el volumen de crudo.

**Ecuación 2.** Calculo del volumen de la mezcla

$$9990 cm^3 \times 1.02 = 10189.8 cm^3$$

**Ecuación 3.** Calculo de volumen de crudo

$$10189.8 cm^3 \times 0.02 = 203.796cm^3$$

Por lo tanto, cada recipiente se llena de suelo hasta los diez centímetros de altura y este suelo se mezcla con 204 centímetros cúbicos de crudo, este dato se redondea para facilitar la medición de volumen.

**3.1.3 Plántulas.** Como ya se ha mencionado en este trabajo se utiliza el espécimen de gramínea *Brachiaria Brizantha*. Se habla de plántulas cuando la planta ya ha alcanzado su madurez, se selecciona esta etapa porque es en esta que el embrión se ha desarrollado por completo y tiene menos probabilidades de morir por la acción de un agente externo, para la obtención de las plántulas se plantan las semillas de la especie en materas para su cuidado, el suelo en las cuales se plantan no es el mismo que se mezcla con el crudo sino uno al que se le ha adicionado abono, sustrato para germinación y un producto llamado Hidrokeeper, un acondicionador de suelos, para garantizar que las plantas estén totalmente desarrolladas y maduras para el día en que se trasplanten a los suelos contaminados.

**3.1.4 Método de determinación de la concentración de Hidrocarburos Totales.**

El método seleccionado para este fin es el del Extractor Soxhlet, nombrado así por su inventor Franz Von Soxhlet, fue creado en 1879 con el fin de extraer lípidos de sólidos. Con un extractor Soxhlet las muestras son removidas de una matriz sólida con un solvente que es evaporado y condensado de forma cíclica, de tal forma que cada vez que se evapora una fracción del compuesto que se quiere extraer se evapora junto al solvente para luego ser condensado en un recipiente para su medición.

Básicamente consiste en poner en contacto la muestra o matriz con un solvente de extracción que en este caso sería acetona. La muestra ha de ser previamente molida o cortada para aumentar su superficie de contacto con el solvente extractor, luego la muestra molida o cortada pasa a un dedal o recipiente metálico con agujeros para dejar pasar el solvente extractor en forma de vapor. La acetona va al fondo o en la parte más baja del ensamblaje, donde se calentará hasta que se vaporice y empiece a fluir hacia arriba, a través del dedal con la muestra y en ese contacto del solvente caliente con la muestra sólida es cuando el fluido o el aceite en este caso, que está dentro de la muestra se quedará impregnado al solvente que está fluyendo hacia un condensador. Luego que es condensada la acetona pasa por un tratamiento para ser separada del aceite que estaba en la matriz sólida y esta última es medida en peso y/o volumen para determinar el grado de concentración en la que estaba inicialmente en la matriz.

Además de estos cuatro (4) factores, se debe tener en cuenta que la prueba se realiza en un periodo de 60 días en los cuales se planea tomar las muestras a los cero (0), treinta y sesenta días y adicionar abono a las plantas cada 15 días (0, 15, 30, 45 y 60).

La hipótesis que se plantea afirma que después de un periodo de 60 días, la concentración de Hidrocarburos Totales en las muestras de suelo disminuirá debido

al efecto de la Fitorremediación, y que esta disminución será mayor a la presentada en las muestras de control donde también se espera observar una disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales debido al efecto de la volatilización del crudo.

### 3.2 NORMATIVIDAD

En este numeral se describen las normas de mayor importancia bajo las cuales se rige la remediación de suelos en Colombia.

En el ámbito nacional la normatividad ambiental que rige en Colombia se basa en la Ley 99 de 1993 en donde se establecen los fundamentos de la política ambiental colombiana y se hace el reconocimiento de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial como el organismo encargado de la gestión ambiental. Esta ley es de relevancia para este trabajo porque en esta establece que una de las obligaciones del mencionado ministerio es la de formular políticas y expedir normas, directrices e impulsar planes, programas y proyectos dirigidos a la conservación, protección, restauración, recuperación y rehabilitación de los suelos. También Colombia ha acogido varias normatividades ambientales, los cuales se van a mencionar a continuación en la **tabla 4**.

**Tabla 4.** Normativa Internacional

<b>Normativa Internacional Aplicada</b>
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 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 TORO, María Alejandra y RAMÍREZ QUIRAMA, Juan Fernando. Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia. En: REVISTA DE INVESTIGACIÓN AGRARIA y AMBIENTAL. vol. 3, no. 2.

**3.2.1 Norma Lousiana 29B.** En Colombia la normatividad ambiental referente al manejo de residuos contaminantes para el medio ambiente se encuentra basada en la norma estadounidense Louisiana 29 B. En el reglamento de Louisiana, título 43, parte XIX orden estatal 29B, capítulo 3, se contemplan los parámetros para el manejo y disposición final de los residuos aceitosos.

**Tabla 5.** Parámetros de la norma Lousiana 29B

Parámetro	Objetivo de la Norma
Ph	06-09
Metal	Contenido de metales en los residuos mezclados con la tierra no pueden exceder
Arsénico	10 ppm
Cadmio	10 ppm
Cromo	500 ppm
Plomo	500 ppm
Mercurio	10 ppm
Plata	200 ppm
Selenio	10 ppm
Zinc	500 ppm
Humedad	< 50% en peso
Conductividad Eléctrica	< 12mmohm/cm
TPH	< 1%

**Fuente.** Environment, Health and Safety [En línea]. Citado el 13 de Marzo del 2017. Disponible en: <http://www.ehso.com/cssepa/TCLP.htm>

### 3.3 INICIO DE LAS PRUEBAS Y MUESTREOS

Se debe determinar de manera experimental la capacidad que tiene el espécimen de gramínea *Brachiaria Brizantha* para biodegradar hidrocarburos derivados del petróleo, por este motivo se llevan a cabo pruebas de laboratorio, a través de las cuales se llegan a resultados cuyo análisis arroja información acertada sobre esta capacidad.

Se realizan pruebas de laboratorio con el espécimen de gramínea "*Brachiarea Brizantha*" y con dos diferentes hidrocarburos para determinar el efecto del tipo de crudo sobre la reducción de contenido de hidrocarburos en el suelo con una concentración de 2% (V/V) en un proceso de fitorremediación. Se tienen dos muestras de control en las que no hay plántulas, como la que se puede apreciar en la **Figura 4** que sirvió de referencia para cada tratamiento y 6 muestras con plántulas como la mostrada en la **Figura 5**. para un total de ocho recipientes. En todos los ocho recipientes se dispone el mismo volumen de suelo y crudo. Los ensayos se realizaron a una densidad de siembra de 70 plántulas por cada recipiente, estas

fueron plantadas con sus raíces a dos cm de profundidad aproximadamente. Para ayudar a la subsistencia de las plantas a cada recipiente se le añade 100 gramos de fertilizante a los cero, 15, 30, 45 y 60 días

**Figura 4.** Recipiente contaminado con crudo.



**Figura 5.** Recipiente con suelo contaminado y semillas de *Brachiaria Brizantha* germinadas.

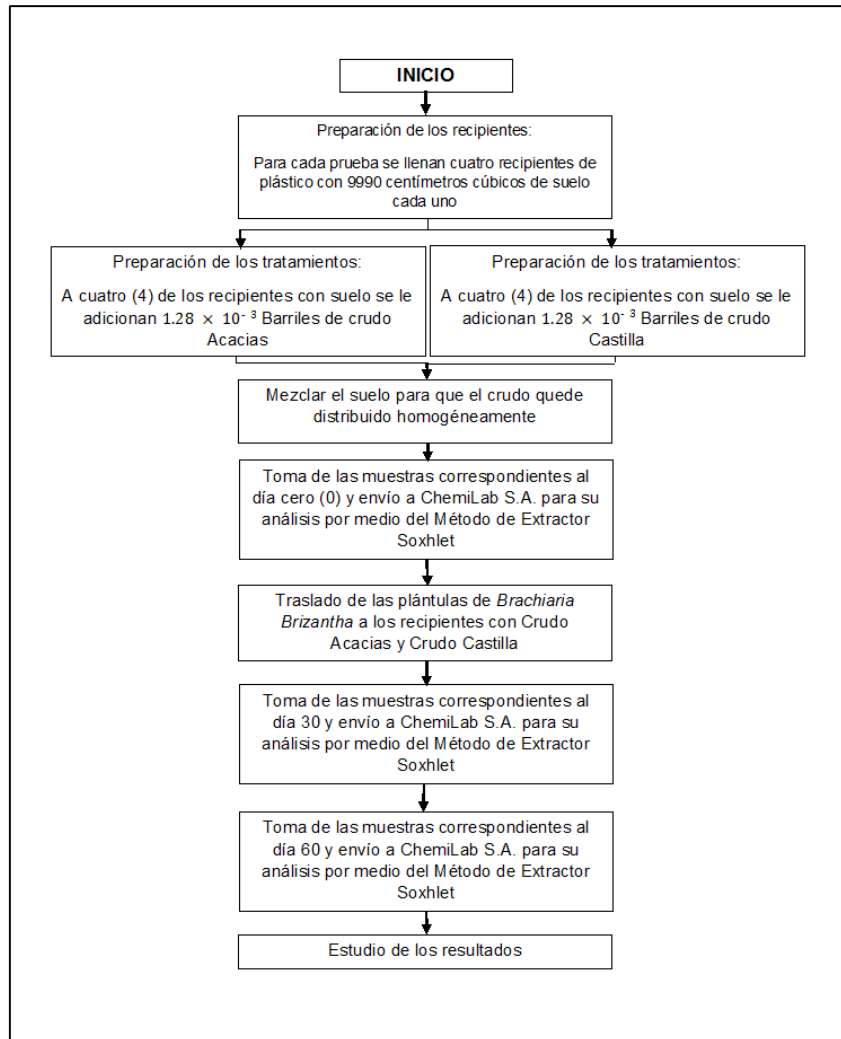


Las semillas de *Brachiaria Brizantha* son plantadas el día 15 de Julio del año 2017 para que el 15 de septiembre del mismo año, día que inicia la prueba, ya estén desarrolladas y listas para ser trasplantadas a las muestras de suelos de los dos (2) tratamientos.



A partir del inicio de las pruebas el día 15 de septiembre del año 2017 se prosigue de acuerdo al diagrama de flujo mostrado en la **Figura 6.** para la obtención de los datos de concentración de Hidrocarburos Totales (TPH) a través del tiempo establecido de 60 días y en la fecha 15 de Noviembre del mismo año finaliza la parte práctica de la experimentación.

**Figura 6.** Diagrama de flujo para el muestreo



### 3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En este numeral se describe el análisis estadístico desarrollado para las pruebas en las cuales la variable fue la concentración de Hidrocarburos Totales (TPH), las diferencias entre estas fueron evaluadas con un análisis de varianza (ANOVA) de un

factor con dos tratamientos, tres muestras y tres repeticiones para un total de 18 muestras o valores, el método de promedios de Tukey y la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, estas se realizan con el fin de determinar si la hipótesis que se plantea, la disminución en la concentración de hidrocarburos en las muestras de suelo se cumple y corroborar que los datos sigan una misma desviación normal y se puedan agrupar en un mismo bloque homogéneo de datos.

**3.4.1 Análisis de varianza (ANOVA).** “El análisis de varianza es una técnica estadística para analizar mediciones que dependen de varias clases de efectos que operan simultáneamente, para estimar los efectos y para decidir cuáles efectos son importantes.”<sup>8</sup> El análisis de varianza (ANOVA) también se puede definir como varios procedimientos utilizados en conjunto y que se amoldan a las características de un diseño experimental.

En este trabajo el análisis de varianza ANOVA es utilizado como de un solo factor, ya que el único factor a analizar es la concentración de Hidrocarburos Totales (TPH) en las muestras de suelos a lo largo de un periodo de 60 días.

**3.4.2 Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk.** Publicada en 1965 por Samuel Shapiro y Martin Wilk, su objetivo es determinar si una muestra aleatoria presenta una distribución normal y es utilizado cuando el número de muestras es menor a 50. Esta prueba requiere dos tablas para que pueda ser aplicada, Anderson y McLean (1974) y Gill (1978).

Para la aplicación de esta prueba se utiliza la ecuación mostrada a continuación

**Ecuación 4.** Coeficiente b para la prueba de normalidad Shapiro-wilk.

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (y_{n-i+1} - y_i)$$

**Fuente** DÍAZ CADAVID, Abel. Diseño estadístico de experimentos. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.

En donde

n es el número de muestras

k es el número de tratamientos

---

<sup>8</sup> DÍAZ CADAVID, Abel. Diseño Estadístico De Experimentos. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009. 9789587142648

$b$  es el coeficiente de Shapiro-Wilk  
 $a$  es el coeficiente de Anderson y McLean-

Luego de determinar  $b$  se debe determinar el coeficiente de Shapiro-Wilk ( $W$ ) con la **ecuación 5**

**Ecuación 5.** Coeficiente  $W$  para la prueba de normalidad Shapiro-wilk

$$W = \frac{b^2}{SC}$$

**Fuente** DÍAZ CADAVID, Abel. Diseño estadístico de experimentos. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.

Donde

$b$  es es el coeficiente de Shapiro-Wilk  
 $SC$  es la suma de cuadrados de los valores de las muestras

Por ultimo este valor de  $W$  se debe comparar con otro valor de  $W$  tabulado en Gill (1978) nombrado como  $W_{\alpha,n}$ , que se determina con el número de muestras ( $n$ ) y con un porcentaje de error ( $\alpha$ ), si el  $W$  obtenido es mayor al  $W_{\alpha,n}$  tabulado se concluye que los datos provienen de una población Normal

**3.4.3 Método de Evaluación de Promedios de Tukey.** Este método utiliza la distribución del rango *estudentizado* para fijar el valor con el cual se comparan las diferencias entre los promedios para determinar si dos o más grupos de estudio, que en este trabajo se denominan tratamientos, hacen parte del mismo bloque homogéneo, es decir un grupo de datos cuyos valores se encuentran en un mismo rango. Este método es recomendado para corroborar los resultados de otras pruebas como la Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk <sup>9</sup>.

Con el método de Tukey se determina un valor crítico para los promedios o medias, a este valor crítico se le conoce como Diferencia Significativa Honesta (DHS) y se calcula de la siguiente manera

---

<sup>9</sup> DÍAZ CADAVID, Abel. Diseño Estadístico De Experimentos. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009. 9789587142648

**Ecuación 6.** Diferencia Significativa Honesta

$$DHS = q_{(k,v)}\sqrt{MCE/r}$$

**Fuente** DÍAZ CADAVID, Abel. Diseño estadístico de experimentos. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.

En donde

$q$  es el rango *studentizado* que se encuentra tabulado.

MCE es la varianza residual

$r$  es el número de repeticiones por tratamiento.

El valor de DHS obtenido es comparado a las diferencias de las medias entre los tratamientos, si alguna de estas diferencias es mayor al valor crítico obtenido significa que uno de los tratamientos no pertenece a la misma población homogénea de muestras a un rango de error dado.

## 4. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se lleva a cabo la discusión de resultados, comparando estos con los de las pruebas de fitorremediación usadas como antecedentes, determinando así la factibilidad de su implementación en un caso real.

### 4.1 RESULTADOS OBTENIDOS

En esta numeral se harán las observaciones y comentarios relacionados con los resultados obtenidos que se muestran en sus tablas y graficas respectivas

Como primera observación cabe aclarar que los efectos negativos de los hidrocarburos sobre las plantas son principalmente debidos a la alteración en la absorción de nutrientes y agua a través de las raíces causada cuando estas son cubiertas u obstruidas, también a que los hidrocarburos pueden penetrar el tejido de las plantas dañando la membrana de sus células e impidiendo el transporte de metabolitos<sup>10</sup> cuando se efectúa la fitoacumulación.

Durante Octubre y Diciembre de 2017, cuando se hizo el desarrollo de las pruebas hubo escasas pero fuertes lluvias en el municipio de San Carlos de Guaroa.

Se desarrollaron dos tratamientos con dos crudos diferentes, Acacias y Castilla, por cada tratamiento se tomaban tres repeticiones o muestras representativas de suelo contaminado y una muestra de control para garantizar la aleatoriedad de las muestras, se hicieron tres análisis de laboratorio a los 0, 30 y 60 días de iniciado el tratamiento y los resultados fueron los siguientes.

Se debe reiterar que durante el tiempo que se realizaron las pruebas el clima no fue favorable, con ocurrencia de lluvias escasas pero muy fuertes que se presentaron a mediados del mes de noviembre, cercanas al día 30 de las pruebas que las afectaron de manera significativa.

En las tablas de resultados se habla de Remoción Total (R.T) como un porcentaje, esto es la reducción total de hidrocarburos en las muestras de suelos contaminados.

---

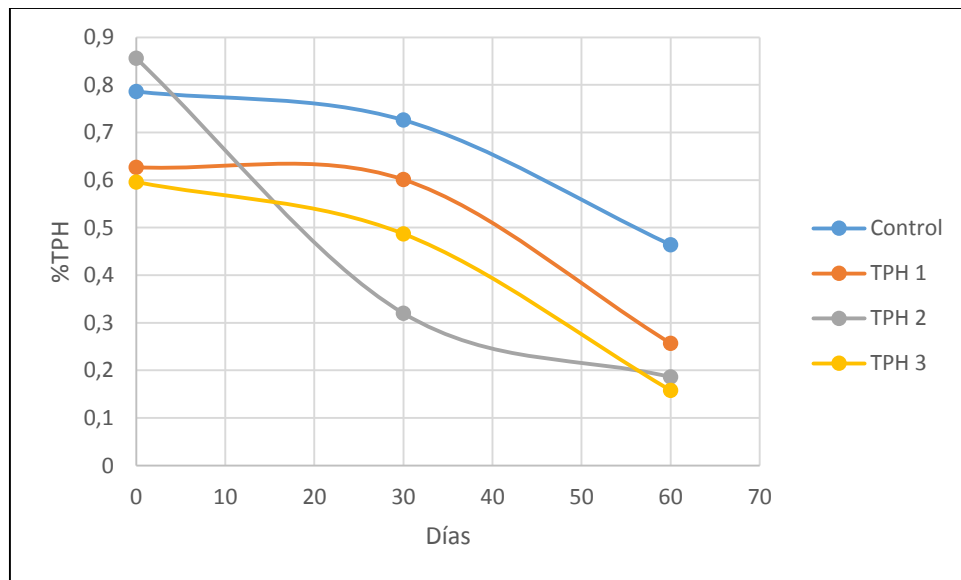
<sup>10</sup> HERNÁNDEZ VALENCIA, Ismael y MAGER, Denise. Uso de *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano. En: Bioagro. vol. 15, no. 3, p. 149-155

**4.1.1 “Crudo Acacias”.** Los resultados para la prueba de laboratorio de fitorremediación utilizando Crudo Acacias como contaminante están resumidos en la tabla 15. y mostrados en la Grafica 1. Como observación general, tanto en los tres (3) tratamientos, nombrados como TPH1, TPH2 y TPH3, como en la muestra de control hay una disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales (TPH).

**Tabla 6.** Resultados pruebas con “Crudo Acacias”

Muestra	Control (%)	TPH 1 (%)	TPH 2 (%)	TPH 3 (%)
Inicial	0.786	0.627	0.856	0.596
Intermedia (30 días)	0.726	0.601	0.32	0.487
Final (60 días)	0.464	0.257	0.186	0.158

**Gráfica 1.** Resultados pruebas con “Crudo Acacias”



En la **gráfica 1** se puede apreciar un comportamiento en la disminución de la concentración de Hidrocarburos Totales (TPH) muy similar entre los tratamientos “TPH1” y “TPH3” y la muestra de control.

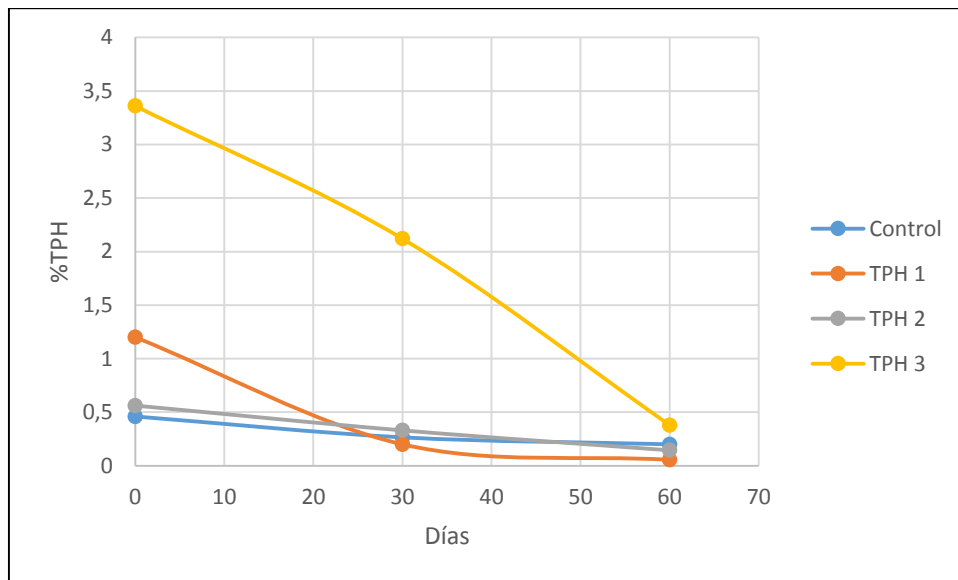
Para el caso del tratamiento “TPH2”, la disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales (TPH) se comporta de diferente manera a los otros dos tratamientos, esto es debido a la presencia de una humedad excesiva en el suelo que hizo que la concentración disminuyera a los 30 días de la prueba.

**4.1.2 “Crudo Castilla.”** En la **tabla 7.** Están resumidos los resultados para la prueba de laboratorio de fitorremediación utilizando Crudo Castilla como contaminante y a continuación mostrados en la **Grafica 2.** Tanto en los tres (3) tratamientos como en la muestra de control hay una disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales (TPH).

**Tabla 7.** Resultados pruebas con “Crudo Castilla”

Muestra	Control (%)	TPH 1 (%)	TPH 2 (%)	TPH 3 (%)
Inicial	0.46	1.2	0.562	3.36
Intermedia (30 días)	0.265	0.2	0.33	2.12
Final (60 días)	0.2	0.055	0.144	0.38

**Gráfica 2.** Resultados pruebas con “Crudo Castilla”



El tratamiento “TPH1” tiene una disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales bastante precipitada y diferente a la presentada en el tratamiento “TPH2”, este comportamiento es debido a la presencia de un exceso de humedad en el suelo debido a lluvias que se presentaron, disminuyendo de manera abrupta la concentración de Hidrocarburos Totales (TPH) en las muestras de suelos como pasó con las pruebas con Crudo Acacias.

El comportamiento en la disminución de la concentración de Hidrocarburos Totales en el tratamiento “TPH3” es anómalo en comparación al de los tratamientos “TPH1”

y “TPH2”, esto es debido a un error humano durante la mezcla del “Crudo Castilla” con el suelo, llevando a una concentración inicial de 3.36%, mucho más alta que las otras siete (7) muestras en este trabajo.

## 4.2 DESARROLLO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Es importante corroborar que los datos obtenidos experimentalmente se ajusten a una misma distribución homogénea y normal, presenten una exactitud y precisión altas y de ser necesario, realizar un sesgo de los datos que no cumplan con estos requerimientos.

Para este trabajo los datos que se obtuvieron para el tratamiento con Crudo Acacias y con Crudo Castilla fueron los mostrados en la **Tabla 6** y en la **Tabla 7** respectivamente.

Utilizando el software Excel de Microsoft Office a estos datos se les hace un análisis de varianza (ANOVA), para el análisis no se tienen en cuenta los valores obtenidos con las muestras de control ya que no hacen parte de la misma población al ser muestras de referencia, el porcentaje de error alfa ( $\alpha$ ) utilizado es de cinco por ciento (5%) los resultados obtenidos son mostrados en las tablas a continuación.

**Tabla 8.** Análisis de Varianza para los datos del tratamiento con Crudo Acacias

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>
Columnas	0.009922889	2	0.004961444
Filas	0.365108222	2	0.182554111
Error	0.075568444	4	0.018892111
Total	0.450599556	8	

**Tabla 9.** Análisis de Varianza para los datos del tratamiento con Crudo Castilla

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>
Columnas	4.761173556	2	2.380586778
Filas	3.448741556	2	1.724370778
Error	1.898189778	4	0.474547444
Total	10.10810489	8	



**4.2.1 Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk para las pruebas con Crudo Acacias.** Para esta prueba lo primero que se hace es organizar los datos de menor a mayor como se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Resultados organizados para Shapiro-Wilk

Dato	Valor (%)
y1	0.158
y2	0.186
y3	0.257
y4	0.32
y5	0.487
y6	0.596
y7	0.601
y8	0.627
y9	0.856

El número de muestras totales para las pruebas con Crudo Acacias son nueve (9), tres (3) tratamientos, con tres (3) repeticiones en cada uno, por lo tanto se trabaja con un valor de nueve (9) para  $n$  para determinar los valores de  $a$  tabulados en las tablas de Anderson y McLean (1974) que se utilizan en la **ecuación 4** que queda de la siguiente manera:

**Ecuación 7.** Coeficiente  $b$  para los datos de las pruebas con “Crudo Acacias”

$$b = 0.5888 \times (0.856 - 0.158) + 0.3244 \times (0.627 - 0.186) + 0.1976 \times (0.601 - 0.257) + 0.0947 \times (0.596 - 0.32) = 0.6482$$

Y con este valor del coeficiente de Shapiro-Wilk con la **Ecuación 5.** que queda de la siguiente manera.

**Ecuación 8.** Coeficiente  $W$  para los datos de las pruebas con “Crudo Acacias”

$$W = \frac{0.6482^2}{0.4505} = 0.9323$$

Y el valor de  $W_{\alpha,n}$  tabulado en Gill (1978) para nueve (9) muestras y con un error del cinco por ciento (5%) es de 0.829, entonces como el valor de  $W$  calculado es mayor que el valor tabulado de  $W_{\alpha,n}$  se concluye que con un error del cinco por ciento (5%) los datos obtenidos provienen de una población normal.

**4.2.2 Método de Evaluación de Promedios de Tukey para las pruebas con Crudo Acacias.** Continuando con el análisis estadístico es necesario corroborar las conclusiones obtenidas con la Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk por esta razón se lleva a cabo el análisis de los datos obtenidos del tratamiento con Crudo Acacias con el método de Tukey.

El rango *estudentizado* que está tabulado se halla con los valores de  $k$  que es el número de tratamientos y  $v$  que es el valor de los grados de libertad, en este caso es 5.04, entonces la **ecuación 6**. Queda así:

**Ecuación 9.** Diferencia Significativa Honesta para las pruebas con "Crudo Acacias"

$$DHS = 5.04\sqrt{0.01889/3}$$

$$DHS = 0.2309$$

0.2309 es el rango de diferencia que puede haber entre el promedio de dos tratamientos, con los promedios de los tres (3) tratamientos son los mostrados en la siguiente tabla

**Tabla 11.** Promedios de los tratamientos de las pruebas con "Crudo Acacias"

Tratamiento	Promedio
TPH 1	0.495
TPH 2	0.454
TPH 3	0.414

Y las diferencias entre estos son:

**Tabla 12.** Diferencias entre promedios

TPH1-TPH2	0.041
TPH1-TPH3	0.081
TPH2-TPH1	0.040

Ninguna de las diferencias entre los promedios de los tres (3) tratamientos es mayor al DHS, de acuerdo a esto se concluye que los tres (3) tratamientos pueden ser agrupados como una misma población Normal con una distribución homogénea.

**4.2.3 Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk para las pruebas con Crudo Castilla.** Nuevamente se organizan los datos de menor a mayor.

**Tabla 13.** Resultados organizados para Shapiro-Wilk

Dato	Valor (%)
y1	0.055
y2	0.144
y3	0.2
y4	0.33
y5	0.38
y6	0.562
y7	1.2
y8	2.12
y9	3.36

En las pruebas con crudo Castilla también hay nueve muestras, tres (3) tratamientos con tres (3) repeticiones cada uno por lo tanto se tiene el mismo valor para  $n$  y se trabajan con los mismos valores tabulados de  $a$  de Anderson y McLean (1974) en la **Ecuación 4.**

**Ecuación 10.** Coeficiente  $b$  para los datos de las pruebas con “Crudo Acacias”

$$b = 0.5888 \times (3.36 - 0.55) + 0.3244 \times (2.12 - 0.144) + 0.1976 \times (1.2 - 0.2) + 0.0947 \times (0.562 - 0.33) = 2.8066$$

Y con este valor de  $b$  se determina el coeficiente de Shapiro-Wilk con la **Ecuación 5.**

**Ecuación 11.** Coeficiente  $W$  para los datos de las pruebas con “Crudo Acacias”

$$W = \frac{2.8066^2}{10.1081} = 0.7793$$

Se tiene el mismo valor tabulado de 0.829 para  $W_{\alpha,n}$ , en este caso la conclusión es que los datos obtenidos no provienen de una población normal porque el  $W$  obtenido es menor al tabulado, por lo tanto se utiliza el Método de Evaluación de Promedios de Tukey para corroborar esta conclusión y determinar los datos específicos que no hagan parte de la población Normal.

**4.2.4 Método de Evaluación de Promedios de Tukey para las pruebas con Crudo Castilla.** Como los resultados con la prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk indicaron que la población no es Normal es de suma importancia determinar cuáles son los datos que no se consideran parte de la población Normal para que la presencia de estos no afecte al análisis y discusión de resultados.

El rango *estudentizado* es el mismo para los datos de las pruebas con Crudo Acacias y los promedios de los tres tratamientos se presentan a continuación:

**Tabla 14.** Promedios

Tratamiento	Promedio
%TPH 1	0.485
%TPH 2	0.345
%TPH 3	1.953

Y las diferencias entre estos son:

**Tabla 15.** Diferencias entre promedios

TPH3-TPH2	1.610
TPH3-TPH1	1.468
TPH1-TPH2	0.140

A partir de estos valores se concluye que es el tratamiento “TPH3” cuyos datos se salen de la población normal y que uno o varios de estos son datos *outliers*, no se deben tener en cuenta para la discusión de resultados ni para las conclusiones. En la **grafica 2**. Se aprecia la diferencia entre los valores de los datos de los tratamientos “TPH1” y “TPH2” y el tratamiento “TPH3” esto posiblemente a un error humano que permite la distribución poco homogénea de hidrocarburos en el suelo.

Para reafirmar lo que se acaba de decir se hace un análisis de varianza (ANOVA) pero esta vez sin el tratamiento “TPH3” cuyos datos son *outliers*, y los resultados de este se muestran a continuación en la **Tabla 16**. Y a partir de los datos mostrados se hace la Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk.

**Tabla 16.** Segundo Análisis de Varianza para los datos del tratamiento con Crudo Castilla

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>
Entre grupos	0.029260167	1	0.029260167
Dentro de los grupos	0.865064667	4	0.216266167
Total	0.894324833	5	

**4.2.5 Segunda Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk para las pruebas con Crudo Castilla.** Los datos organizados de menor a mayor se muestran a continuación en la Tabla. Se aclara nuevamente que no se tienen en cuenta los datos del tratamiento “TPH3” porque fueron sesgados debido a que no mostraban la misma distribución que los otros dos (2) tratamientos en las pruebas con “Crudo Castilla”.

**Tabla 17.** Resultados organizados para Shapiro-Wilk

<u>Dato</u>	<u>Valor</u>
y1	0.055
y2	0.144
y3	0.2
y4	0.33
y5	0.562
y6	1.2

Nuevamente se calcula  $b$  pero esta vez con un valor de seis (6) para  $n$  y con el mismo valor para  $\alpha$  de 0.05 (5%) para determinar los valores de  $a$  tabulados en las tablas de Anderson y McLean (1974), la **ecuación 4.** queda de la siguiente forma.

**Ecuación 12.** Coeficiente  $b$  para los datos de las pruebas con “Crudo Castilla”

$$b = 0.6431 \times (1.2 - 0.55) + 0.2806 \times (0.562 - 0.144) + 0.0875 \times (0.33 - 0.2)$$

$$b = 0.865$$

Y con este valor de  $b$  se determina el coeficiente de Shapiro-Wilk

**Ecuación 13.** Coeficiente  $W$  para los datos de las pruebas con “Crudo Castilla”

$$W = \frac{0.865^2}{0.8943} 0.8367$$

Se tiene el valor tabulado de 0.788 para  $W_{\alpha,n}$ , entonces como el valor de  $W$  calculado es mayor que el valor tabulado de  $W_{\alpha,n}$  se concluye que con un error del cinco por ciento (5%) los datos obtenidos provienen de una población normal con una distribución homogénea y que el sesgo de los datos del tratamiento “TPH3” fue necesario.

### 4.3 DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN

En este numeral se compara la disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales (TPH) en los tratamientos en donde se tenían plántulas de *Brachiaria Brizantha* con la de las muestras de control donde no estaban presentes y por lo tanto, la disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales (TPH) en estas no es debida a un proceso de Fitorremediación sino de volatilización. También Se comparan los resultados obtenidos con otros estudios realizados para determinar si es factible o no la Fitorremediación como método de Biorremediación de suelos.

El pH es una propiedad química que poseen todos los suelos, en el caso de la gramínea *Brachiaria Brizantha* se desarrolla de manera óptima en pH comprendido entre 6 y 7, sin embargo en los suelos objeto de la investigación en “El uso de *Panicum Maximum* y *Brachiaria Brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano” sufrieron modificación del pH (4.9), debido a la presencia de hidrocarburos, situación que no afectó el crecimiento de la especie vegetal, manifestando probablemente resistencia a condiciones muy ácidas del suelo.

El protocolo de Louisiana 29B indica que el pH de los suelos remediados se debe encontrar entre 6.0 y 9.0, para el caso de la presente investigación, ninguna planta vegetal incluida la *Brachiaria Brizantha*, dentro de su funcionamiento fisiológico, no tienen la capacidad y competencia de modificar la condición del potencial iones de hidronios en el suelo. La utilización de la Fitorremediación deberá contemplar la aplicación al suelo de prácticas técnicas de enclavamiento con carbonatos de Calcio ó de Magnesio que reduzcan la acidez y aumenten el pH.

La especie *Brachiaria Brizantha* esta aclimatada a condiciones de temperatura altas, encontrándose que la óptima para el crecimiento y desarrollo de ésta gramínea está cercana a los 35°C, condición que cumple la zona de estudio localizada en el departamento del Meta, Colombia. La temperatura es una variable climática que dinamiza los procesos de fitorremediación y volatilización reduciendo los tiempos en la eficiencia de los tratamientos y velocidad en las reacciones físicas, químicas y fisiológicas de la especie gramínea frente a las concentraciones de los hidrocarburos contaminantes.

**4.3.1 Pruebas con Crudo Acacias.** En este numeral se compara la disminución de concentración de Hidrocarburos Totales (TPH) de los tratamientos de las pruebas con “Crudo Acacias” con la de la muestra de control de esta misma prueba.

En la **tabla 18** se muestran los resultados junto a los promedios de los tres tratamientos para cada día que se tomaron muestras (0, 30 y 60), además se presenta el dato de Remoción Total (R.T.) como un porcentaje tanto para los promedios de los datos de los tratamientos, como para los datos obtenidos de las muestras de control, este porcentaje es calculado como se muestra en la **Ecuación 14**.

**Ecuación 14.** Calculo del porcentaje de disminución en el contenido de Hidrocarburos Totales.

$$\frac{\text{Concentración al día 0} - \text{Concentración al día 60}}{\text{Concentración al día 0}} \times 100$$

Para dar un ejemplo se muestra el cálculo de la disminución en la concentración con los promedios.

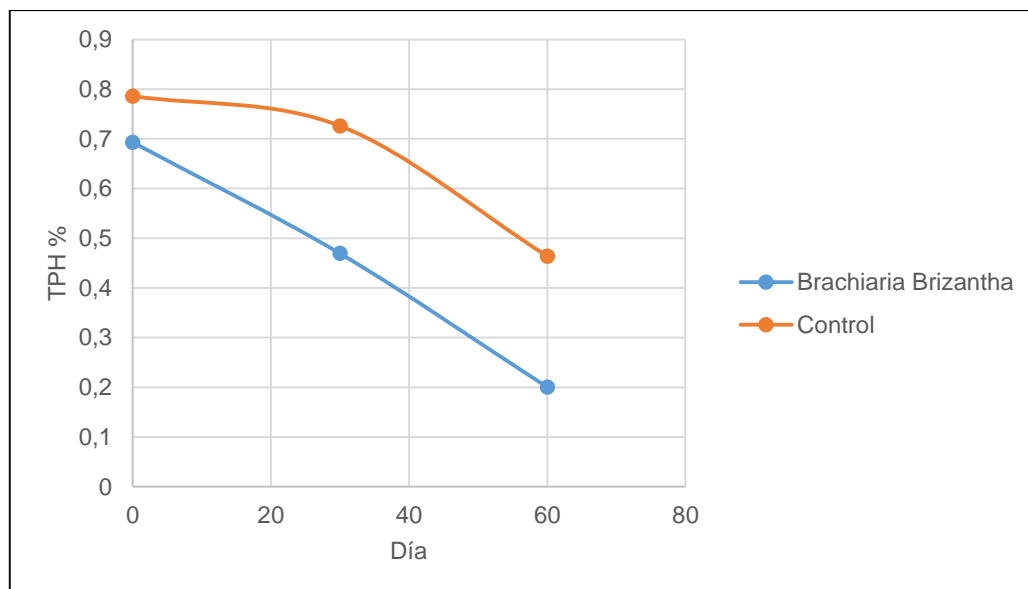
**Ecuación 15.** Calculo del porcentaje de disminución en el contenido de Hidrocarburos Totales para las pruebas con “Crudo Acacias”

$$\frac{0.693 - 0.200}{0.693} \times 100 = 71.092$$

**Tabla 18.** Degradación total para las pruebas con “Crudo Acacias”

Muestra	Control (%)	TPH 1 (%)	TPH 2 (%)	TPH 3 (%)	Promedio (%)
Inicial	0.786	0.627	0.856	0.596	0.693
Intermedia	0.726	0.601	0.32	0.487	0.4693333
Final	0.464	0.257	0.186	0.158	0.2003333
R.T (%)	40.966921				71.091871

**Gráfica 3.** Degradación total para las pruebas con “Crudo Acacias”



En la **Grafica 3.** se aprecia una disminución de 41% en la concentración de Hidrocarburos Totales (TPH) en la muestra de control y del 71% en promedio para las muestras con *Brachiaria Brizantha*, con lo cual se puede afirmar que la presencia de esta especie de gramínea si afecta la disminución de la concentración de hidrocarburos.

**4.3.2 Pruebas con Crudo Castilla.** En este numeral se compara la disminución de concentración de Hidrocarburos Totales (TPH) de los tratamientos de las pruebas con “Castilla” con la de la muestra de control de esta misma prueba.

En este caso la disminución en la concentración de hidrocarburos Totales (TPH) es del 56%, siendo mayor que en el caso de las pruebas con Crudo Acacias, sin embargo, la disminución en los tratamientos con *Brachiaria Brizantha* fue de 88.7% en promedio por lo tanto en general la disminución fue mayor en este caso y nuevamente se afirma que la presencia de la gramínea si influye en la disminución de la concentración de Hidrocarburos Totales (TPH).

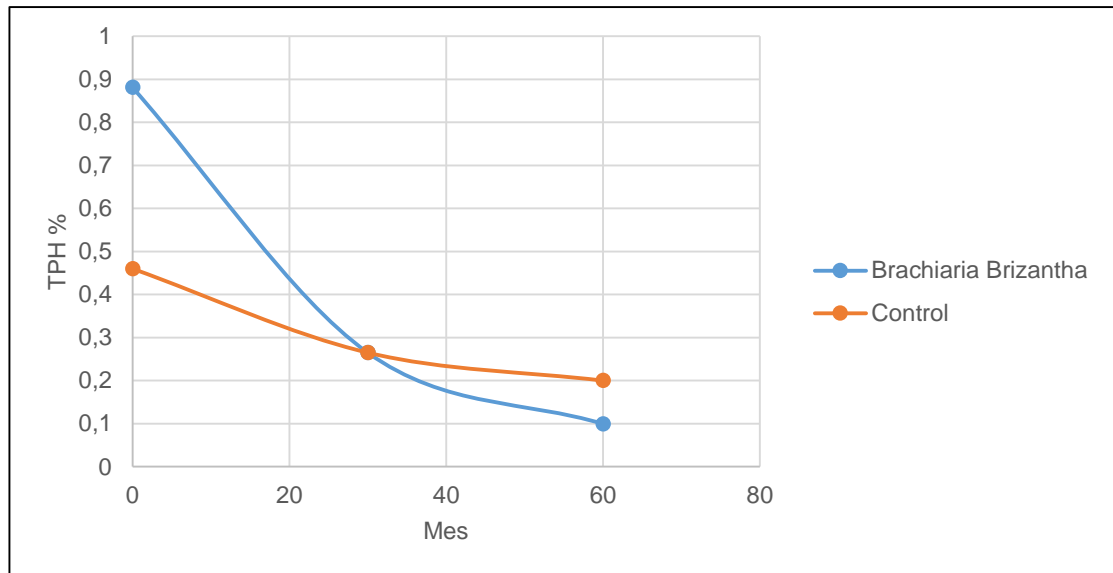
Un aspecto que se puede observar comparando la **Grafica 3.** y la **Grafica 4.** es que no disminuyen de la misma forma, ya que en ambas pruebas se utilizó la especie *Brachiaria Brizantha*; lo que se puede concluir es que esta diferencia es debida a que los crudos en cada una de las pruebas tienen una gravedad API diferente.



**Tabla 19.** Degradación total para las pruebas con “Crudo Castilla”

Muestra	Control (%)	TPH 1 (%)	TPH 2 (%)	Promedio (%)
Inicial	0.46	1.2	0.562	0.881
Intermedia	0.265	0.2	0.33	0.265
Final	0.2	0.055	0.144	0.0995
R.T. (%)	56.521739			88.706016

**Gráfica 4.** Degradación total para las pruebas con “Crudo Castilla”



#### 4.4 COMPARACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS APLICADOS A LA FITORREMIACION

En este trabajo solo se evalúa el comportamiento de la disminución en el contenido de hidrocarburos en el suelo con respecto al tiempo en un lapso de 60 días, no se estudia como la presencia de hidrocarburos afecta la germinación de la *Brachiaria Brizantha*, porque se utilizaron plantas maduras. Tampoco se evaluaron las propiedades del suelo, se utilizó suelo local, esto con dos razones, para que las pruebas fueran muy similares a una implementación en campo y porque el énfasis de la investigación está observación y evaluación del efecto fitorremediador de la especie de planta mencionada sobre los crudos utilizados como contaminante. Este estudio se compara con otros tres (3) que se consideran relevantes y que tienen alguna semejanza, sin embargo, en ninguno de los antecedentes consultados se utilizan crudos pesados como contaminantes, con lo cual hay una diferencia significativa entre este trabajo y los estudios con los que se le compara. Estos tres (3) estudios se enumeran a continuación:

- “Assesment of Bermuda Grass Cultivars for Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils”.
- “El uso de *Panicum Maximum* y *Brachiaria Brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano”.
- “Using Different Tolerant Plant for Phytoremediation of Contaminated Soils with Total Petroleum Hydrocarbons”.

En “Assesment of Bermuda Grass Cultivars for Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils” en español Evaluación de Cultivares de Pasto de Bermuda para la Fitorremediación de Suelos Contaminados por Petróleo publicado por la Universidad Tecnológica de Isfahan, Irán, se estudia el crecimiento y desarrollo de las raíces y la capacidad de fitorremediación en ambientes contaminados por hidrocarburos de varios miembros de la especie *Cynodos Spp*, comúnmente conocida como Pasto de Bermuda, utilizando espigas con diversas concentraciones de Hidrocarburos Totales (TPH): cero (0), dos (2) cuatro (4), seis (6) y ocho (8) por ciento. En el mencionado estudio se observó que al aumentar la concentración inicial aumenta la tasa de reducción en la concentración de hidrocarburos. En la **Tabla 20**. se comparan los resultados obtenidos.

**Tabla 20.** Comparación resultados con “Assesment of Bermuda Grass Cultivars for Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils”

Proyecto	Concentración	Remoción	Tiempo (Días)
“Assesment of Bermuda Grass Cultivars for Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils” (Especimen 3200W 18-4)	8%	55%	180
Assesment of Bermuda Grass Cultivars for Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils” (Especimen 3200W 18-4)	2%	18%	180
Evaluación técnico-financiera del proceso de fitorremediación con plantas gramíneas para mitigar derrames de crudo en el Departamento del Meta, Colombia. ( <i>Brachiaria Brizantha</i> )	2%	80%	60

**Fuente.** RAZMJOO, Khorshid and ADAVI, Zohrab. Assessment of Bermudagrass Cultivars for Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF PHYTOREMEDIATION. Jan 1, vol. 14, no. 1, p. 14-23. Modificado por el autor

Esto difiere con los resultados mostrados en la **Tabla 18** y en la **Tabla 19**, en donde con una concentración de dos (2) por ciento se obtuvo una disminución en promedio de 80%, esto se puede explicar si se tiene en cuenta que en “Assesment of Bermuda Grass Cultivars for Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils” se utilizaron espigas porque el estudio de las raíces era uno de los objetivos de dicho estudio, lo que afectó la capacidad de fitorremediación de las plantas en comparación a este estudio, en donde se permitió el desarrollo de las raíces para que estas pudieran abarcar una mayor cantidad de suelo.

En “El uso de *Panicum Maximum* y *Brachiaria Brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano” estudio del año 2003 llevado a cabo en la Universidad Central de Venezuela (UCV) en el que se compara la capacidad de fitorremediación de la *Brachiaria Brizantha* con la del *Panicum Maximum*, también se observa una disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales de 63% en las muestras de suelo a lo largo de un tiempo de 240 días para la *Brachiaria Brizantha*, en dicho estudio se menciona que en las fases más tardías de la prueba con *Brachiaria Brizantha* la tasa de degradación disminuye y los autores lo atribuyen a que el material remanente es de más lenta degradación debido a su composición química o a un agotamiento en los nutrientes del suelo

**Tabla 21.** Comparación resultados con “El uso de *Panicum Maximum* y *Brachiaria Brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano”

Proyecto	Concentración	Remoción	Tiempo (Días)
El uso de <i>Panicum Maximum</i> y <i>Brachiaria Brizantha</i> para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano	3%	63%	240
Evaluación técnico-financiera del proceso de fitorremediación con plantas gramíneas para mitigar derrames de crudo en el Departamento del Meta, Colombia.	2%	80%	60

**Fuente** HERNÁNDEZ VALENCIA,Ismael andMAGER,Denise. Uso de *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano. En: BIOAGRO. vol. 15, no. 3, p. 149-155. Modificado por el autor

Sin embargo esta disminución es menor en comparación a las que se obtuvieron en este trabajo, se puede explicar el porqué de la diferencia entre la disminución de la concentración entre “El uso de *Panicum Maximum* y *Brachiaria Brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano” y este estudio, ya que en el primero solo se adiciona abono el día de inicio de las pruebas permitiendo el agotamiento en los nutrientes del suelo<sup>11</sup>.

“Using Different Tolerant Plant for Phytoremediation of Contaminated Soils with Total Petroleum Hydrocarbons” o Uso de Diferentes Plantas Tolerantes para la Fitorremediación de Suelos Contaminados con Hidrocarburos de Petróleo Totales, utilizan semillas de la especie de gramínea *Lolium Perenne* con una concentración de hidrocarburos inicial de 2.8% y se compara la capacidad de fitorremediar hidrocarburos de la especie agregando y sin agregar fertilizante, el resultado fue que en el tratamiento sin fertilizante hubo una degradación de 23.3% en ocho (8) meses, mientras que en el que se adicionó fertilizante fue de 79.8%, con lo cual se afirma que la adición de fertilizante es de vital importancia para que la implementación de un proceso de fitorremediación sea viable en un caso real.

---

<sup>11</sup> HERNÁNDEZ VALENCIA,Ismael y MAGER,Denise. Uso de *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano. En: Bioagro. vol. 15, no. 3, p. 149-155

## 5. ANÁLISIS FINANCIERO

Actualmente la empresa ATPIngeniería S.A. maneja el tratamiento *ex-situ* de *Soil Washing* para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, para presentar una alternativa *in-situ* se propone la fitorremediación con gramíneas que es un proceso de menor costo pero que requiere un tiempo de desarrollo mucho más largo.

Para evaluar la viabilidad financiera de la fitorremediación como alternativa *in-situ* se deben tener en cuenta los siguientes aspectos: La unidad monetaria a usar es el Peso Colombiano (COP), la metodología a implementar es la del indicador Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa de Interés de Oportunidad que ATP Ingeniería S.A.S. maneja actualmente es de 1.79% Mensual Efectiva y por último el horizonte de proyección de este análisis financiero es de dos (2) meses.

### 5.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX)

Los costos de inversión son aquellos relacionados con las compras, mejoras, adiciones de materiales, maquinaria, reactivos y todo aquello que sea considerado como necesario para la realización del objetivo.

**5.1.1 Tratamiento Actual (Soil Washing).** Actualmente para procesos de remediación de suelos con concentraciones de hidrocarburos medias y bajas ATPIngeniería utiliza el *Soil Washing*. En la tabla 22. Se presentan los costos que conlleva la aplicación de este tratamiento en unidades de volumen (Barriles) y en Pesos Colombianos (COP).

**Tabla 22.** Costos *Soil Washing*

Parámetro	Costo por barril de material contaminado	
Maquinaria y equipo para volteo del material	\$	14,500.00
Materiales y reactivos	\$	7,250.00
Mano de obra	\$	5,800.00
Transporte	\$	30,000.00
Análisis de laboratorio	\$	1,450.00
Total	\$	59,000.00

**5.1.2 Tratamiento propuesto (Fitorremediación).** Para este caso se realizara el análisis sobre los costos de inversión y operación que conlleva la fitorremediación aplicada a escala de campo como tratamiento de biorremediación de suelos a partir de los costos que fueron necesarios para la prueba.

A continuación, en la **tabla 23**. Se muestran los costos necesarios para implementar un proceso de fitorremediación.

**Tabla 23.** Costos Fitorremediación

Parámetro	Costo por barril de material contaminado	
Semillas	\$	640.00
Abono	\$	800.00
Sustrato	\$	400.00
Mano de Obra	\$	5,800.00
Transporte	\$	30,000.00
Análisis de laboratorio	\$	1,450.00
Total	\$	39,090.00

## 5.2 EVALUACIÓN FINANCIERA

En este numeral se describe como se evalúa financieramente el método de fitorremediación, bajo que parámetros se hace y con qué conceptos se analiza.

Para la evaluación financiera es necesario aclarar que los egresos en cada periodo están en términos de capital necesario por barril de material contaminado y los ingresos están dados por la diferencia entre los egresos totales de cada tratamiento y que la Tasa Interna de Oportunidad manejada es de 1.79% efectiva mensual pero que para este análisis se va a manejar como 0.0583% efectiva diaria. También es necesario establecer que los egresos del primer periodo son los presentados en la **tabla 22** y en la **tabla 23** para cada tratamiento y para los siguientes periodos no se tendrían en cuenta los costos de las semillas, sustrato ni transporte para el caso del tratamiento de fitorremediación y para el caso del tratamiento de *Soil Washing* no se tendrían en cuenta los costos de transporte.

**5.2.1 Valor Presente Neto (VPN).** El Valor Presente Neto (VPN) es el recurso más apto para evaluar financieramente un proyecto debido a que tiene en cuenta los egresos e ingresos futuros y tiene en cuenta el cambio de valor del dinero con respecto al tiempo y una Tasa de Interés de Oportunidad.

De acuerdo al Valor Presente Neto (VPN) obtenido se puede deducir que:

- Si  $VPN > 0$ , el proyecto es atractivo para el inversionista

- Si  $VPN = 0$ , el proyecto es independiente financieramente para el inversionista
- Si  $VPN < 0$ , el proyecto no cumple con las expectativas esperadas por el inversionista

Desde el punto de vista matemático, el VPN es la sumatoria de los flujos de caja al valor actual mostrada por la **Ecuación 16.** a continuación.

**Ecuación 16.** Calculo del Valor Presente Neto (VPN)

$$VPN(i) = \sum F_n (1+i)^{-n} = F_0 + F_1 (1+i)^{-1} + F_2 (1+i)^{-2} + \dots + F_n (1+i)^{-n}$$

**Fuente** BACA C., Guillermo. Ingeniería Económica: Valor presente neto. Editorial educativa. Octava edición. 2005. p. 197

Dónde:

$i$  es la tasa a la cual son descontados los flujos de caja, denominada tasa de interés de oportunidad (TIO),

$F$  son los flujos de caja en cada período

$n$  corresponde al período de tiempo.

**5.2.2 Tasa de Interés de Oportunidad (TIO).** La tasa de interés de oportunidad, es la tasa de interés mínima a la que un inversor o compañía está dispuesto a ganar al invertir en un proyecto y con la cual se determina el valor actual neto de los flujos futuros de caja del proyecto.

**5.2.3 Flujo de caja.** El flujo de caja llamado también flujo de efectivo es el cálculo del volumen de ingresos y de egresos, que ocurren en una empresa durante un determinado periodo.

### 5.3 TRATAMIENTO ACTUAL

A continuación, se presenta el análisis correspondiente sobre los costos de tratamiento con *Soil Washing*.

Los costos del tratamiento para cada uno de sus periodos están presentados en la **Tabla 24** y la **Tabla 25** mostradas a continuación.

**Tabla 24.** Costos Periodo Cero (0)

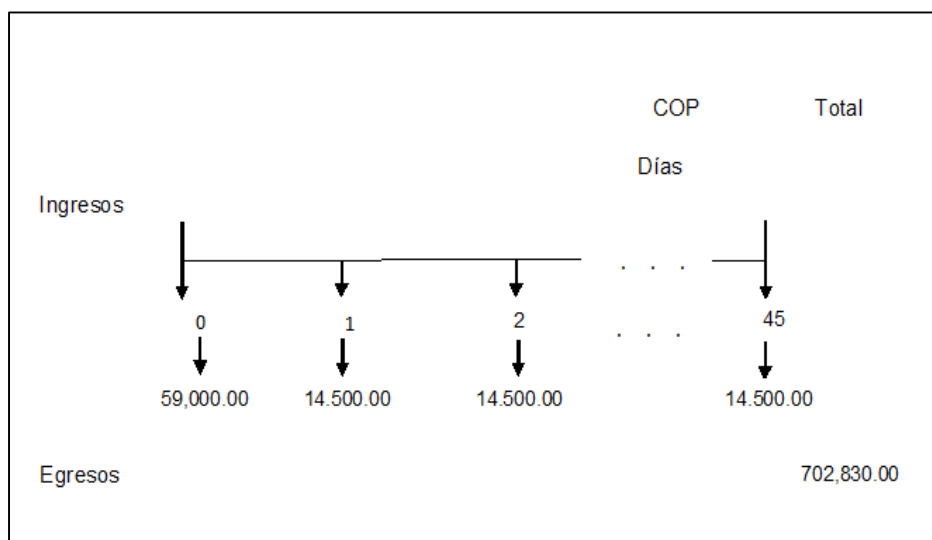
Parámetro	Costo por barril de material contaminado	
Maquinaria y equipo para volteo del material	\$	14,500.00
Materiales y reactivos	\$	7,250.00
Mano de obra	\$	5,800.00
Transporte	\$	30,000.00
Análisis de laboratorio	\$	1,450.00
<b>Total</b>	\$	<b>59,000.00</b>

**Tabla 25.** Costos Periodo Uno (1) al 4

Parámetro	Costo por barril de material contaminado	
Materiales y reactivos	\$	7,250.00
Mano de obra	\$	5,800.00
Análisis de laboratorio	\$	1,450.00
<b>Total</b>	\$	<b>14,500.00</b>

A continuación, se observa el procedimiento del cálculo del VPN (tomando como referencia la **Grafica 5**, como es un estudio de costos donde no se tienen ingresos, se discrimina el signo negativo correspondiente a los egresos.

**Gráfica 5.** Flujo de caja para *Soil Washing*





**Ecuación 17** Cálculo del Valor Presente Neto (VPN) para *Soil Washing*

$$VPN(0.0583\%) = 59,000.00 + \frac{14,500.00}{(1 + 0,000583)^1} + \frac{14,500.00}{(1 + 0,000583)^2} + \dots + \frac{14,500.00}{(1 + 0,000583)^{45}}$$
$$VPN(0.0583\%) = 702,830.00$$

#### 5.4 TRATAMIENTO PROPUESTO

A continuación, se presenta el análisis correspondiente sobre los costos de tratamiento con Fitorremediación.

En la **Tabla 26** se presentan los costos asociados al tratamiento de suelo por una medida de volumen que es el Barril para el periodo cero (0) y en la **tabla 27** los costos de los periodos uno (1) al 60

**Tabla 26 Costos Periodo Cero (0)**

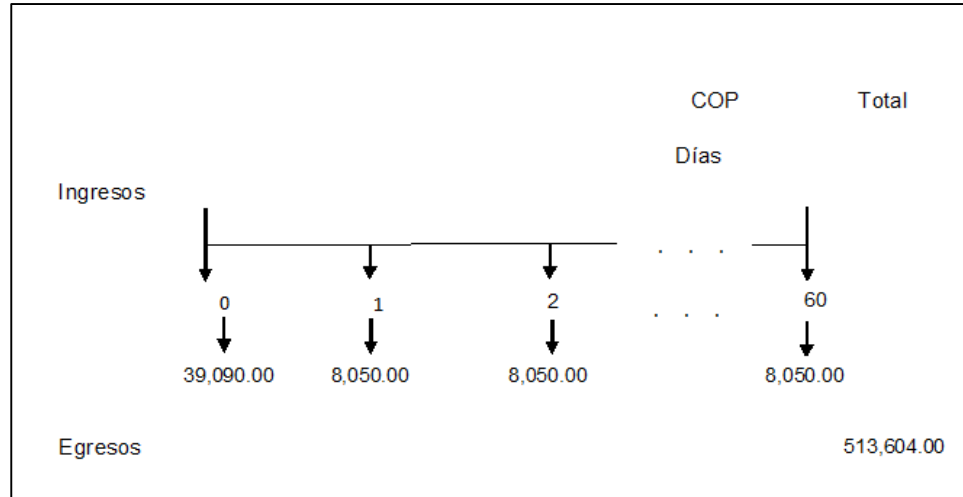
Parámetro	Costo por barril de material contaminado	
Semillas	\$	640.00
Abono	\$	800.00
Sustrato	\$	400.00
Mano de Obra	\$	5,800.00
Transporte	\$	30,000.00
Análisis de laboratorio	\$	1,450.00
<b>Total</b>	\$	<b>39,090.00</b>

**Tabla 27.** Costos Periodo Uno (1) al 6

Parámetro	Costo por barril de material contaminado	
Abono	\$	800.00
Mano de Obra	\$	5,800.00
Análisis de laboratorio	\$	1,450.00
<b>Total</b>	\$	<b>8,050.00</b>

A continuación, se observa el procedimiento del cálculo del VPN (tomando como referencia la **Grafica 6**, como es un estudio de costos donde no se tienen ingresos, se discrimina el signo negativo correspondiente a los egresos.

**Gráfica 6.** Flujo de caja para Fitorremediación



**Ecuación 16.** Calculo del Valor Presente Neto (VPN) para Fitorremediación.

$$\begin{aligned}
 VPN(0.0583\%) &= 39,090.00 + \frac{8,050.00}{(1 + 0,000583)^1} \\
 &+ \frac{8,050.00}{(1 + 0,000583)^2} + \dots + \frac{8,050.00}{(1 + 0,000583)^{60}}
 \end{aligned}$$

## 5.5 CONCLUSIÓN DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA

Desde el punto de vista financiero el tratamiento propuesto, es decir, la implementación de un proceso de fitorremediación es viable, debido a que este tratamiento implica un ahorro de COP 182.226.00, que corresponde al 26.92% de ahorro frente al tratamiento actual.

Además de esto la *Brachiaria brizantha* en comparación a otras especies vegetales tiene una alta capacidad de fitorremediar suelos contaminados con hidrocarburos (80% de degradación en promedio obtenida en este trabajo), también está el hecho que un proceso de fitorremediación no requiere de costos elevados de mantenimiento ya que su fuente de energía es la solar y su principal aditivo es abono, a esto se le suma que el manejo de la especie vegetal no presenta factores de riesgo asociados a la integridad del trabajador que la manipula. De esta forma las ventajas asociadas a la ejecución del proyecto, aunque sean difíciles de cuantificar en costos, presentan una mejora al tratamiento actual.

## 6. CONCLUSIONES

- Para las pruebas con “Crudo Acacias” la disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales en la muestra de control es de un 41%, mientras que la disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales en los tratamientos (TPH1, TPH2 y TPH3) es de 71%. Comparando estos dos (2) valores se concluye que la *Brachiaria Brizantha* puede fitorremediar satisfactoriamente suelos contaminados con crudos con una gravedad API cercana a los 21°.
- Para las pruebas con “Crudo Castilla” la disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales en la muestra de control es de un 57%, mientras que la disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales en los tratamientos (TPH1, TPH2 y TPH3) es de 89%. Se concluye entonces que la *Brachiaria Brizantha* puede fitorremediar satisfactoriamente suelos contaminados con crudos con una gravedad API cercana a los 16°.
- En las pruebas con “Crudo Castilla” la disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales es de 89%, mientras que en las pruebas con “Crudo Acacias” es de 71%; hay una diferencia significativa entre estos dos valores. Entre las gravedades API de estos dos crudos hay una diferencia de 4.8°, y partir de esto, se concluye que la gravedad API de un crudo influye de manera directa en el proceso de fitorremediación.
- Al comparar los resultados obtenidos en este estudio, con los obtenidos en estudios anteriores, en donde la mayor disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales obtenida fue la de este estudio, se encontró que las dos (2) principales diferencias fueron la adición de fertilizante y el estado de madurez de la planta al momento de plantarse. La conclusión que se desprende de esto es que el fertilizante y la madurez de la planta son factores de vital importancia para garantizar la efectividad de un proceso de fitorremediación de suelos.
- A partir del diseño del plan de pruebas, y su implementación, se concluye que la *Brachiaria brizantha* requiere, ya sea para una prueba de laboratorio o para una implementación, de un ambiente ajeno al suelo contaminado que presente las condiciones óptimas (contenido de nutrientes, humedad, clima, pH, etc.) en donde las semillas de la planta puedan germinar para, de esta forma, garantizar un buen estado fitosanitario.

- La implementación de la fitorremediación como una metodología efectiva que garantiza la recuperación y habilitación del suelo, debe contemplar a largo plazo, un lapso mayor a cuatro (4) meses, un monitoreo continuo que asegure no tener impactos negativos por factores externos (variables climáticas, hombre, animales, etc.) que afecten la eficiencia del proceso.
- A corto plazo, o un lapso menor a cuatro (4) meses, la fitorremediación como una metodología efectiva para la recuperación y habilitación del suelo no es viable, ya que para garantizar la eficiencia sobre la tasa de disminución en la concentración de Hidrocarburos Totales, las plantas deben llegar a punto de madurez, y en el caso específico de las gramíneas, requieren de al menos 45 días para alcanzarlo.

## 7. RECOMENDACIONES

- Desarrollar una evaluación técnica sobre el proceso de fitorremediación en suelos contaminados con crudos, donde se documente a fondo las características del crudo contaminante para determinar si hay alguna propiedad, aparte de su gravedad API, que tenga influencia significativa en el proceso de fitorremediación.
- Es recomendable utilizar más de dos (2) tipos de crudos que provengan de campos específicos para poder documentar las características geológicas de su formación y desarrollar un análisis amplio sobre cómo los ambientes de formación de éstos influyen en el proceso de fitorremediación.
- Se deberá realizar una prueba de fitorremediación en un invernadero, para evitar que factores externos (variables climáticas, hombre, animales, etc) influyan en los resultados de las pruebas, y así determinar el efecto de las raíces de una especie vegetal, sea que se trate de la *Brachiaria Brizantha* u otra gramínea, ya que en la rizosfera es en donde la mayoría del proceso de fitorremediación se lleva a cabo.
- Se debe hacer más énfasis en el estudio de la rizosfera, especialmente porque las raíces de la *Brachiaria brizantha* pueden llegar a los 20 centímetros de profundidad, y las pruebas de este trabajo se realizaron a diez (10) centímetros; por lo tanto, se recomienda hacer muestreos a varias profundidades, si es posible hasta los 30 centímetros, para determinar el efecto de la profundidad sobre la fitorremediación.
- Para estudiar cómo la concentración de Hidrocarburos Totales afecta el proceso de fitorremediación, se deberá llevar a cabo pruebas con varias concentraciones utilizando la misma especie vegetal, para poder llegar a una conclusión significativa sobre este tema.
- Realizar un estudio con la *Pennisetum clandestinum* comumente conocida como Pasto Kikuyo u otra gramínea que pueda crecer en alturas mayores a los 2500 msnm, para evaluar la factibilidad de la fitorremediación en sitios contaminados por hidrocarburos que se encuentren a estas alturas.

## BIBLIOGRAFIA

BACA CURREA,Guillermo andBACA CORREDOR,Carlos A. Ingeniería económica. Bogotá: Fondo Educativo Panamericano, 2000.

BESTENE TORRES,José Miguel andBARRAGÁN B.,Daniel. Bioremediación de suelos afectados por hidrocarburos mediante la aplicación de productos orgánicos. Santafé de Bogotá: Fundación Universidad de América, 1995.

CARTMILL,Andrew D.; CARTMILL,Donita L. andALARCÓN,Alejandro. Controlled Release Fertilizer Increased Phytoremediation of Petroleum-Contaminated Sandy Soil. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF PHYTOREMEDIATION. Mar 4,.vol. 16, no. 3, p. 285-301

CHAINEAU,Claude-Henri; SETIER,Jean-Claude andMORILLON,Anne. Is Bioremediation A Solution for the Treatment of Oily Waste? [0]:Society of Petroleum Engineers, 2002. ISBN 9781-555639365.

CHAINEAU,Claude-Henri, *et al.* Bioremediation of Oil-Based Drill Cuttings under Tropical Conditions. [0]:Society of Petroleum Engineers, 2003. ISBN 9781-555639570.

CHATTERJEE,Soumya andGUPTA,Dharmendra Kumar. Heavy Metal Remediation : Transport and Accumulation in Plants. New York, New York: Nova Science Publishers, Inc, 2014. ISBN 9781633215689

COOK,Rachel L. andHESTERBERG,Dean. Comparison of trees and grasses for rhizoremediation of petroleum hydrocarbons. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF PHYTOREMEDIATION. vol. 15, no. 9, p. 844-860

Crawford, Ronald L., Crawford,Don L.,. Bioremediation. [0]. Cambridge, GBR. Disponible en: <http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=4637062>

CUBILLOS,Janneth, et al. Phytoremediation of Water and Soils Contaminated by Petroleum Hydrocarbons. En: INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD. vol. 16, no. 1, p. 131-146

DÍAZ CADAVID,Abel. Diseño estadístico de experimentos. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.

DONG,Xiucheng, et al. The reform of the natural gas industry in the PR of China. En: RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS. vol. 73, p. 582-593

EKEH-ADEGBOTOLU,U. V.; WEGWU,M. O. andEKEH,O. M. Cleanup of Crude Oil Polluted Sites Using *Arachis hypogaea* L. (Groundnut) and Biostimulants. SPE, 2012.

EKEH-ADEGBOTOLU,U.; EKEH,O. M. andWEGWU,M. O. Cleanup of Crude Oil Polluted Sites Using *Arachis hypogaea* L. (Groundnut) and Biostimulants. [0]:Society of Petroleum Engineers, 2012. ISBN 9781-613992104.

ENVIRONMENTAL and SANITARY ENGINEERING. Fitorremediación en Aguas y Suelos Contaminados con Hidrocarburos del Petróleo.

GIBSON,David J. Grasses and Grassland Ecology. New York: OUP Oxford, 2009. ISBN 9780198529194

GUSTAVO ADOLFO NOVOA QUINTERO andYEISON DAVID PEÑA ARDILA. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS CRUDOS PESADOS DEL CAMPO CASTILLA ESTACIÓN 2 Y ACACIAS. Fundación Universidad de America, 2006. p. 52.

HERNÁNDEZ VALENCIA,Ismael andMAGER,Denise. Uso de *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano. En: BIOAGRO. vol. 15, no. 3, p. 149-155

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El Instituto, 1998.

\_\_\_\_\_. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El Instituto, 1998.

\_\_\_\_\_.Referencias documentales para fuentes de información electronica. NTC 4490. Bogotá: El instituto, 1998

KELLOGG,E. A. Grasses, Synteny, Evolution, and Molecular Systematics. En: MALOY,Stanley andHUGHES,Kelly eds. Brenner's Encyclopedia of Genetics (Second Edition). San Diego: Academic Press, 2013. 356-357 p. ISBN 9780080961569

KUYKENDALL,D. C. and MCMULLAN,A. Using an Environmental Footprint Analysis to Evaluate the Sustainability of Remedial Alternatives. [0]:Society of Petroleum Engineers, 2014. ISBN 9781-613993057.

LEE,D. W. andDONALD,G. M. Environmental Biotechnologies For the Fossil Fuel Industry. [0]:Petroleum Society of Canada, 1997. ISBN 9781-613991008.

MÂSU,S.; MORARIU,F. and DRAGOMIR,N. Using different tolerant plant for phytoremediation of contaminated soils with total petroleum hydrocarbons. En: SCIENTIFIC PAPERS: ANIMAL SCIENCE AND BIOTECHNOLOGIES. vol. 46, no. 2, p. 175-179

MÂSU,S., et al. Prospects of using leguminous species in phytoremediation of total petroleum hydrocarbons polluted soils. En: SCIENTIFIC PAPERS: ANIMAL SCIENCE AND BIOTECHNOLOGIES. vol. 47, no. 1, p. 172-176

MCMULLAN,Ashby andKUYKENDALL,Dina C. Using an Environmental Footprint Analysis To Evaluate the Sustainability of Remedial Alternatives. SPE, 2013.

OLABISI,Odutola Toyin; SUNDAY,Ikiensikimama Sunday andJOSEPH,Ajienka Atubokiki. Effective Hydrate Management during Gas Expansion. [0]:Society of Petroleum Engineers, 2015. ISBN 9781-613994344.

RAZMJOO,Khorshid andADAVI,Zohrab. Assessment of Bermudagrass Cultivars for Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF PHYTOREMEDIATION. Jan 1,.,vol. 14, no. 1, p. 14-23

SHAIKH,Faheemullah, et al. Modelling an optimal foreign natural gas import scheme for China. En: JOURNAL OF NATURAL GAS SCIENCE AND ENGINEERING. vol. 40, p. 267-276

SOMMERVILLE,Matthew andMASSOURA,Tina. Realities of Spill: Waste Remediation Strategies. SPE, 2009.

UMUKORO,G. Ezaina andISMAIL,O. Saheed. Modelling emissions from natural gas flaring. En: JOURNAL OF KING SAUD UNIVERSITY - ENGINEERING SCIENCES. vol. 29, no. 2, p. 178-182

VISHWANATHAN,S. andAYYASWAMI,Arul. State Of The Art Of Remediation For Petroleum Industries. SPE, 2010.

YENN,R., et al. Phytoremediation of Abandoned Crude Oil Contaminated Drill Sites of Assam with the Aid of a Hydrocarbon-Degrading Bacterial Formulation. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF PHYTOREMEDIATION. vol. 16, no. 9, p. 909-925

YENN,R., et al. Phytoremediation of Abandoned Crude Oil Contaminated Drill Sites of Assam with the Aid of a Hydrocarbon-Degrading Bacterial Formulation. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF PHYTOREMEDIATION. Jan 1,.,vol. 16, no. 9, p. 909-925



## **ANEXOS**

## ANEXO A

### ANDERSON Y MCLEAN (1974)

**Tabla A.4** Coeficientes ( $a_{n-i+1}$ ) para la prueba W de normalidad, y  $n = 2(1)50$

$n \backslash i$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0.7071	0.7071	0.6872	0.6646	0.6431	0.6233	0.6052	0.5888	0.5739	
2		.0000	.1677	.2413	.2806	.3031	.3164	.3244	.3291	
3			.0000	.0875	.1401	.1743	.1976	.2141		
4				.0000	.0561	.0947	.1224			
5					.0000	.0399				
$n \backslash i$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.5601	0.5475	0.5359	0.5251	0.5150	0.5056	0.4968	0.4886	0.4808	0.4734
2	.3315	.3325	.3325	.3318	.3306	.3290	.3273	.3253	.3232	.3211
3	.2260	.2347	.2412	.2460	.2495	.2521	.2540	.2553	.2561	.2565
4	.1429	.1586	.1707	.1802	.1878	.1939	.1988	.2027	.2059	.2085
5	.0695	.0922	.1099	.1240	.1353	.1447	.1524	.1587	.1641	.1686
6	0.0000	0.0303	0.0539	0.0727	0.0880	0.1005	0.1109	0.1197	0.1271	0.1334
7			.0000	.0240	.0433	.0593	.0725	.0837	.0932	.1013
8					.0000	.0196	.0359	.0496	.0612	.0711
9							.0000	.0163	.0303	.0422
10									.0000	.0140
$n \backslash i$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0.4643	0.4590	0.4542	0.4493	0.4450	0.4407	0.4366	0.4328	0.4291	0.4254
2	.3185	.3156	.3126	.3098	.3069	.3043	.3018	.2992	.2968	.2944
3	.2578	.2571	.2563	.2554	.2543	.2533	.2522	.2510	.2499	.2487
4	.2119	.2131	.2139	.2145	.2148	.2151	.2152	.2151	.2150	.2148
5	.1736	.1764	.1787	.1807	.1822	.1836	.1848	.1857	.1864	.1870
6	0.1399	0.1443	0.1480	0.1512	0.1539	0.1563	0.1584	0.1601	0.1616	0.1630
7	.1092	.1150	.1201	.1245	.1283	.1316	.1346	.1372	.1395	.1415
8	.0804	.0878	.0941	.0997	.1046	.1089	.1128	.1162	.1192	.1219
9	.0530	.0618	.0696	.0764	.0823	.0876	.0923	.0965	.1002	.1036
10	.0263	.0368	.0459	.0539	.0610	.0672	.0728	.0778	.0822	.0862
11	0.0000	0.0122	0.0228	0.0321	0.0403	0.0476	0.0540	0.0598	0.0650	0.0697
12			.0000	.0107	.0200	.0284	.0358	.0424	.0483	.0537
13					.0000	.0094	.0178	.0253	.0320	.0381
14							.0000	.0084	.0159	.0227
15									.0000	.0076

Tabla A.4 (continuación)

$\frac{n}{i}$	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	0.4220	0.4188	0.4156	0.4127	0.4096	0.4068	0.4040	0.4015	0.3989	0.3964
2	.2921	.2898	.2876	.2854	.2834	.2813	.2794	.2774	.2755	.2737
3	.2475	.2463	.2451	.2439	.2427	.2415	.2403	.2391	.2380	.2368
4	.2145	.2141	.2137	.2132	.2127	.2121	.2116	.2110	.2104	.2098
5	.1874	.1878	.1880	.1882	.1883	.1883	.1883	.1881	.1880	.1878
6	0.1641	0.1651	0.1660	0.1667	0.1673	0.1678	0.1683	0.1686	0.1689	0.1691
7	.1433	.1449	.1463	.1475	.1487	.1496	.1505	.1513	.1520	.1526
8	.1243	.1265	.1284	.1301	.1317	.1331	.1344	.1356	.1366	.1376
9	.1066	.1093	.1118	.1140	.1160	.1179	.1196	.1211	.1225	.1237
10	.0899	.0931	.0961	.0988	.1013	.1036	.1056	.1075	.1092	.1108
11	0.0739	0.0777	0.0812	0.0844	0.0873	0.0900	0.0924	0.0947	0.0967	0.0986
12	.0585	.0629	.0669	.0706	.0739	.0770	.0798	.0824	.0848	.0870
13	.0435	.0485	.0530	.0572	.0610	.0645	.0677	.0706	.0733	.0759
14	.0289	.0344	.0395	.0441	.0484	.0523	.0559	.0592	.0622	.0651
15	.0144	.0206	.0262	.0314	.0361	.0404	.0444	.0481	.0515	.0546
16	0.0000	0.0068	0.0131	0.0187	0.0239	0.0287	0.0331	0.0372	0.0409	0.0444
17			.0000	.0062	.0119	.0172	.0220	.0264	.0305	.0343
18					.0000	.0057	.0110	.0158	.0203	.0244
19							.0000	.0053	.0101	.0146
20									.0000	.0049

$\frac{n}{i}$	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
1	0.3940	0.3917	0.3894	0.3872	0.3850	0.3830	0.3808	0.3789	0.3770	0.3751
2	.2719	.2701	.2684	.2667	.2651	.2635	.2620	.2604	.2589	.2574
3	.2357	.2345	.2334	.2323	.2313	.2302	.2291	.2281	.2271	.2260
4	.2091	.2085	.2078	.2072	.2065	.2058	.2052	.2045	.2038	.2032
5	.1876	.1874	.1871	.1868	.1865	.1862	.1859	.1855	.1851	.1847
6	0.1693	0.1694	0.1695	0.1695	0.1695	0.1695	0.1695	0.1693	0.1692	0.1691
7	.1531	.1535	.1539	.1542	.1545	.1548	.1550	.1551	.1553	.1554
8	.1384	.1392	.1398	.1405	.1410	.1415	.1420	.1423	.1427	.1430
9	.1249	.1259	.1269	.1278	.1286	.1293	.1300	.1306	.1312	.1317
10	.1123	.1136	.1149	.1160	.1170	.1180	.1189	.1197	.1205	.1212
11	0.1004	0.1020	0.1035	0.1049	0.1062	0.1073	0.1085	0.1095	0.1105	0.1113
12	.0891	.0909	.0927	.0943	.0959	.0972	.0986	.0998	.1010	.1020
13	.0782	.0804	.0824	.0842	.0860	.0876	.0892	.0906	.0919	.0932
14	.0677	.0701	.0724	.0745	.0765	.0783	.0801	.0817	.0832	.0846
15	.0575	.0602	.0628	.0651	.0673	.0694	.0713	.0731	.0748	.0764
16	0.0476	0.0506	0.0534	0.0560	0.0584	0.0607	0.0628	0.0648	0.0667	0.0685
17	.0379	.0411	.0442	.0471	.0497	.0522	.0546	.0568	.0588	.0608
18	.0283	.0318	.0352	.0383	.0412	.0439	.0465	.0489	.0511	.0532
19	.0188	.0227	.0263	.0296	.0328	.0357	.0385	.0411	.0436	.0459
20	.0094	.0136	.0175	.0211	.0245	.0277	.0307	.0335	.0361	.0386
21	0.0000	0.0045	0.0087	0.0126	0.0163	0.0197	0.0229	0.0259	0.0288	0.0314
22			.0000	.0042	.0081	.0118	.0153	.0185	.0215	.0244
23					.0000	.0039	.0076	.0111	.0143	.0174
24							.0000	.0037	.0071	.0104
25									.0000	.0035

Fuente. DÍAZ CADAVID, Abel. Diseño estadístico de experimentos. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.



## ANEXO B

### GILL (1978)

**Tabla A.5** Valores porcentuales de la prueba W para  $n = 3(1)50$

$\alpha$ $n$	0.01	0.02	0.05	0.10	0.50	0.90	0.95	0.98	0.99
3	0.753	0.756	0.767	0.789	0.959	0.998	0.999	1.000	1.000
4	.687	.707	.748	.792	.935	.987	.992	.996	.997
5	.686	.715	.762	.806	.927	.979	.986	.991	.993
6	0.713	0.743	0.788	0.826	0.927	0.974	0.981	0.986	0.989
7	.730	.760	.803	.838	.928	.972	.979	.985	.988
8	.749	.778	.818	.851	.932	.972	.978	.984	.987
9	.764	.791	.829	.859	.935	.972	.978	.984	.986
10	.781	.806	.842	.869	.938	.972	.978	.983	.986
11	0.792	0.817	0.850	0.876	0.940	0.973	0.979	0.984	0.986
12	.805	.828	.859	.883	.943	.973	.979	.984	.986
13	.814	.837	.866	.889	.945	.974	.979	.984	.986
14	.825	.846	.874	.895	.947	.975	.980	.984	.986
15	.835	.855	.881	.901	.950	.975	.980	.984	.987
16	0.844	0.863	0.887	0.906	0.952	0.976	0.981	0.985	0.987
17	.851	.869	.892	.910	.954	.977	.981	.985	.987
18	.858	.874	.897	.914	.956	.978	.982	.986	.988
19	.863	.879	.901	.917	.957	.978	.982	.986	.988
20	.868	.884	.905	.920	.959	.979	.983	.986	.988
21	0.873	0.888	0.908	0.923	0.960	0.980	0.983	0.987	0.989
22	.878	.892	.911	.926	.961	.980	.984	.987	.989
23	.881	.895	.914	.928	.962	.981	.984	.987	.989
24	.884	.898	.916	.930	.963	.981	.984	.987	.989
25	.888	.901	.918	.931	.964	.981	.985	.988	.989
26	0.891	0.904	0.920	0.933	0.965	0.982	0.985	0.988	0.989
27	.894	.906	.923	.935	.965	.982	.985	.988	.990
28	.896	.908	.924	.936	.966	.982	.985	.988	.990
29	.898	.910	.926	.937	.966	.982	.985	.988	.990
30	.900	.912	.927	.939	.967	.983	.985	.988	.990
31	0.902	0.914	0.929	0.940	0.967	0.983	0.986	0.988	0.990
32	.904	.915	.930	.941	.968	.983	.986	.988	.990
33	.906	.917	.931	.942	.968	.983	.986	.989	.990
34	.908	.919	.933	.943	.969	.983	.986	.989	.990
35	.910	.920	.934	.944	.969	.984	.986	.989	.990
36	0.912	0.922	0.935	0.945	0.970	0.984	0.986	0.989	0.990
37	.914	.924	.936	.946	.970	.984	.987	.989	.990
38	.916	.925	.938	.947	.971	.984	.987	.989	.990
39	.917	.927	.939	.948	.971	.984	.987	.989	.991
40	.919	.928	.940	.949	.972	.985	.987	.989	.991
41	0.920	0.929	0.941	0.950	0.972	0.985	0.987	0.989	0.991
42	.922	.930	.942	.951	.972	.985	.987	.989	.991
43	.923	.932	.943	.951	.973	.985	.987	.990	.991
44	.924	.933	.944	.952	.973	.985	.987	.990	.991
45	.926	.934	.945	.953	.973	.985	.988	.990	.991
46	0.927	0.935	0.945	0.953	0.974	0.985	0.988	0.990	0.991
47	.928	.936	.946	.954	.974	.985	.988	.990	.991
48	.929	.937	.947	.954	.974	.985	.988	.990	.991
49	.929	.937	.947	.955	.974	.985	.988	.990	.991
50	.930	.938	.947	.955	.974	.985	.988	.990	.991

**Fuente.** DÍAZ CADAVID, Abel. Diseño estadístico de experimentos. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.

## ANEXO C

### RANGO ESTUDENTIZADO

Número de tratamientos, *k*

Grados de libertad, *v*

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	18.0	27.0	32.8	37.2	40.5	43.1	45.4	47.3	49.1	50.6	51.9	53.2	54.3	55.4	56.3	57.2	58.0	58.8	59.6
2	6.09	8.33	9.80	10.89	11.73	12.43	13.03	13.54	13.99	14.39	14.75	15.08	15.38	15.65	15.91	16.14	16.36	16.57	16.77
3	4.50	5.91	6.83	7.51	8.04	8.47	8.85	9.18	9.46	9.72	9.95	10.16	10.35	10.52	10.69	10.84	10.98	11.12	11.24
4	3.93	5.04	5.76	6.29	6.71	7.06	7.35	7.60	7.83	8.03	8.21	8.37	8.52	8.67	8.80	8.92	9.03	9.14	9.24
5	3.64	4.60	5.22	5.67	6.03	6.33	6.58	6.80	6.99	7.17	7.32	7.42	7.60	7.72	7.83	7.93	8.03	8.12	8.21
6	3.46	4.34	4.90	5.31	5.63	5.89	6.12	6.32	6.49	6.65	6.79	6.92	7.04	7.14	7.24	7.34	7.43	7.51	7.59
7	3.34	4.16	4.68	5.06	5.35	5.59	5.80	5.99	6.15	6.29	6.42	6.54	6.65	6.75	6.84	6.93	7.01	7.08	7.16
8	3.26	4.04	4.53	4.89	5.17	5.40	5.60	5.77	5.92	6.05	6.18	6.29	6.39	6.48	6.57	6.65	6.73	6.80	6.87
9	3.20	3.95	4.42	4.76	5.02	5.24	5.43	5.60	5.74	5.87	5.98	6.09	6.19	6.28	6.36	6.44	6.51	6.58	6.65
10	3.15	3.88	4.33	4.66	4.91	5.12	5.30	5.48	5.60	5.72	5.83	5.93	6.03	6.12	6.20	6.27	6.34	6.41	6.47
11	3.11	3.82	4.26	4.58	4.82	5.03	5.20	5.35	5.49	5.61	5.71	5.81	5.90	5.98	6.06	6.14	6.20	6.27	6.33
12	3.08	3.77	4.20	4.51	4.75	4.95	5.12	5.27	5.40	5.51	5.61	5.71	5.80	5.88	5.95	6.02	6.09	6.15	6.21
13	3.06	3.73	4.15	4.46	4.69	4.88	5.05	5.19	5.32	5.43	5.53	5.63	5.71	5.79	5.86	5.93	6.00	6.06	6.11
14	3.03	3.70	4.11	4.41	4.64	4.83	4.99	5.13	5.25	5.36	5.46	5.56	5.64	5.72	5.79	5.86	5.92	5.98	6.03
15	3.01	3.67	4.08	4.37	4.59	4.78	4.94	5.08	5.20	5.31	5.40	5.49	5.57	5.65	5.72	5.79	5.85	5.91	5.96
16	3.00	3.65	4.05	4.34	4.56	4.74	4.90	5.03	5.15	5.26	5.35	5.44	5.52	5.59	5.66	5.73	5.79	5.84	5.90
17	2.98	3.62	4.02	4.31	4.52	4.70	4.86	4.99	5.11	5.21	5.31	5.39	5.47	5.55	5.61	5.68	5.74	5.79	5.84
18	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.83	4.96	5.07	5.17	5.27	5.35	5.43	5.50	5.57	5.63	5.69	5.74	5.79
19	2.96	3.59	3.98	4.26	4.47	4.64	4.79	4.92	5.04	5.14	5.23	5.32	5.39	5.46	5.53	5.59	5.65	5.70	5.75
20	2.95	3.58	3.96	4.24	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	5.11	5.20	5.28	5.36	5.43	5.50	5.56	5.61	5.66	5.71
24	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	5.01	5.10	5.18	5.25	5.32	5.38	5.44	5.50	5.55	5.59
30	2.89	3.48	3.84	4.11	4.30	4.46	4.60	4.72	4.83	4.92	5.00	5.08	5.15	5.21	5.27	5.33	5.38	5.43	5.48
40	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.74	4.82	4.90	4.98	5.05	5.11	5.17	5.22	5.27	5.32	5.36
60	2.83	3.40	3.74	3.98	4.16	4.31	4.44	4.55	4.65	4.73	4.81	4.88	4.94	5.00	5.06	5.11	5.15	5.20	5.24
120	2.80	3.36	3.69	3.92	4.16	4.24	4.36	4.47	4.56	4.64	4.71	4.78	4.84	4.90	4.95	5.00	5.04	5.09	5.13
∞	2.77	3.32	3.63	3.86	4.03	4.17	4.29	4.39	4.47	4.55	4.62	4.68	4.74	4.80	4.84	4.89	4.93	4.97	5.01

Fuente. DÍAZ CADAVID, Abel. Diseño estadístico de experimentos. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.