

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA PETROLERA



**“SISTEMAS DE BIOPILAS PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE
SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN LA
ZONA DEL CAMPO CARRASCO BASADO EN EL ANÁLISIS DE
VELOCIDAD DE BIODEGRADACIÓN”**

**Proyecto de Grado presentado para optar al título de Licenciado en
Ingeniería Petrolera**

POSTULANTE: RUBEN PRINCE VILLARROEL RODRIGUEZ
TUTOR: M. Sc. ING. LITZY GLENDA GASTELU HERRERA

La Paz Bolivia

2024



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

Dedicado en primer lugar a mi madre Rosalía Rodríguez por apoyarme de manera incondicional en los momentos más difíciles. A mi padre Rubén Villarroel por su ejemplo de esfuerzo y dedicación.

A Dios por guiarme en el camino correcto, por siempre acompañarme en mis decisiones gracias por permitirme encontrar en el camino profesionales excelentes, amigos y por regalarme vida y poder aprender mas día a día.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora MSc.Ing. Lizzy Glenda Gastelu Herrera por haberme dado el apoyo y las pautas necesarias para la elaboración de este proyecto, también a todos los Docentes, Profesores y compañeros que hicieron posible este proyecto.

A Dios por darme vida y la fuerza necesaria para seguir adelante ante todas las adversidades y retos.

A mi familia por su constante apoyo y brindarme la energía para perseverar y no decaer en el camino.

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo de grado propone un diseño optimizado para la biorremediación con el uso de biopilas, que se lleva realizando durante años, pero no gestionado profundamente hasta ahora. Las biopilas y la biorremediación son métodos eficaces para abordar la contaminación del suelo causada por las actividades de la industria petrolera. La tasa de biodegradación se puede medir en función de las variables tipo de compost y tamaño de la biopila, las cuales fueron optimizadas en este proyecto para obtener un diseño adecuado y determinar la reducción del componente contaminante en este campo de producción. El análisis cuantitativo para el diseño de biopilas no se proporciona en los programas de maestría o diplomado.

En primer lugar, se proporcionó una explicación clara y comprensible del uso de la biorremediación ex situ y las biopilas para abordar los problemas de contaminación del suelo causados por las actividades de la industria petrolera. Posteriormente se han medido cuantitativamente las tasas de biodegradación, teniendo en cuenta el tipo de compost y diversas variables del tamaño de la biopila, como la temperatura y las características geométricas. Se obtuvo un rango de tasa de degradación desde 0,26 gr de aceite por día hasta 0,40.

En la parte práctica, mediante el uso de varios tipos de compost, fue posible predecir la duración de la biodegradación, los parámetros de procesamiento y el resultado final de la producción de biopilas en suelos contaminados con hidrocarburos. Se realizaron simulaciones de la biopila para identificar parámetros que establecieran la correlación entre la temperatura y los procesos de volatilización. De manera adjunta, se determinó la eficiencia del tamaño de la biopila considerando las variables óptimas analizadas en el modelo cuantitativo.

Finalmente, después de un análisis técnico y económico detallado, se determinó que el proyecto era económicamente viable y que las ventajas superaban las desventajas desde una perspectiva técnica.

INDICE

1	CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	ANTECEDENTES.....	3
1.2.1	Antecedentes generales	3
1.2.2	Antecedentes académicos.....	6
1.3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.3.1	Identificación del problema.....	6
1.3.2	Árbol de problemas.....	8
1.3.3	Formulación del problema.....	9
1.4	OBJETIVOS.....	9
1.4.1	Objetivo general.....	9
1.4.2	Objetivos específicos.....	9
1.5	JUSTIFICACIÓN.....	10
1.5.1	Justificación teórica	10
1.5.2	Justificación económica.....	11
1.5.3	Justificación socio – ambiental	11
1.5.4	Justificación técnica.....	11
1.6	ALCANCE.....	12
1.6.1	Alcance temático	12
1.6.2	Alcance temporal	12
1.6.3	Alcance geográfico.....	13
1.7	METODOLOGÍA.....	14
1.7.1	Hipótesis de investigación científica	14
1.7.2	Enfoque de investigación científica.....	14

1.7.3	Tipo de investigación	14
1.7.4	Métodos de investigación científica	15
2	CAPITULO II: GENERALIDADES DE LA BIOREMEDIACIÓN Y EL SISTEMA DE BIOPILAS	16
2.1	BIOQUÍMICA DE LA BIORREMEDIACIÓN	16
2.2	BIORREMEDIACIÓN.....	17
2.2.1	Características.....	17
2.2.2	Tipos de biorremediación.....	18
2.2.3	Elementos que intervienen en la biodegradabilidad de una mezcla de hidrocarburos	26
2.3	BIOPILAS	33
2.3.1	Definición.....	33
2.3.2	Efectividad de la biopila	35
2.3.3	Ventajas y limitaciones de las biopilas.....	36
2.4	MÉTODOLOGÍA DE DISEÑO DE LA BIOPILA	36
2.4.1	Fundamentos.....	36
2.4.2	Colección de lixiviados	37
2.4.3	Construcción de la pila	37
2.4.4	Costo de la biopila	38
2.5	CARACTERÍSTICAS DE LOS HIDROCARBUROS	39
2.5.1	Clasificación.....	40
2.5.2	Compuesto heterocíclico	41
2.6	EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN AL MEDIO AMBIENTE Y LA SALUD GENERADA POR LOS HIDROCARBUROS	41
3	CAPÍTULO III: MODELO DE EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE BIORREMEDIACIÓN PARA EL SISTEMA DE BIOPILAS	43

3.1	ECUACIONES DE DISEÑO DE LA BIOPILA	43
3.1.1	Cálculo y hoja de trabajo de los datos de la prueba de respiración	43
3.1.2	Tasa de degradación de contaminante generado por la biopila	44
3.1.3	Dimensiones de la biopila	45
3.2	MODELO DE VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN	47
3.2.1	Fundamento	47
3.2.2	Algoritmo del proceso	48
3.3	CONSUMO DE CRUDO DENTRO DE UN SUELO TÍPICO EN UNA BIOPILA	49
3.4	MODELO DE SIMULACIÓN DE LA BIOPILA	51
3.4.1	Relación entre la biorremediación y la temperatura dentro de la pila	51
3.4.2	Modelo de relación entre la temperatura y el calor del aire	51
4	CAPITULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA	53
4.1	UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SUELO A BIORREMEDIA DEL CAMPO CARRASCO	53
4.2	PREDICCIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE COMPOSTA	53
4.3	GEOMETRÍA ÓPTIMA DE LA BIOPILA	66
4.3.1	Construcción de la función de Lagrange	66
4.3.2	Obtención de las derivadas parciales	66
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
4.4.1	Preparación de terreno y bases	68
4.4.2	Sistema de aireación	68
4.4.3	Sistema de riego	69
4.4.4	Recolección de lixiviado	70
5	CAPÍTULO V: EVALUACIÓN TÉCNICO Y ECONÓMICO	72
5.1	EVALUACIÓN TÉCNICA	72

5.1.1	Análisis FODA	72
5.2	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA	73
5.2.1	Costos fijos	73
5.2.2	Costos Variables con pérdidas	74
5.2.3	Depreciación anual del proyecto.....	74
5.2.4	Inversión inicial del proyecto.....	75
5.2.5	Estudio de TIR y VAN	76
5.2.6	Análisis de costo y beneficio.....	78
5.2.7	Resumen de las variables de rentabilidad	79
6	CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
6.1	CONCLUSIONES	81
6.2	RECOMENDACIONES.....	83
	Bibliografía	84
	ANEXOS	86

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Diferentes compostas para la construcción de una biopila	2
Figura 1. 2: Preparación del proceso de biorremediación en el Campo.....	4
Figura 1. 3: Preparación del suelo para generar la biorremediación.....	5
Figura 1. 4: Preparación del suelo para residuos de mezcla de hidrocarburos líquidos.....	7
Figura 1. 5: Árbol de problemas.....	8
Figura 1. 6: Ubicación de la Planta Carrasco.....	13
Figura 2. 1: Ingeniería de una biopila.....	34
Figura 3. 1: Dimensiones de la biopila.....	45
Figura 3. 2: Diagrama heurístico con los pasos del procedimiento para evaluar la biorremediación de hidrocarburos.....	49
Figura 4. 1: Variación de la concentración de HCs – MOD 1.....	59
Figura 4. 2: Variación de la concentración de HCs – MOD 2.....	59
Figura 4. 3: Variación de la concentración de HCs – Promedio.....	60
Figura 4. 4: Desgaste de la concentración y composición de la biopila	63
Figura 4. 5: Desgaste de la concentración	64
Figura 4. 6: Variación del pH para distintas concentraciones de biopila	65
Figura 4. 6: Vista en 3D de la biopila optimizada	67
Figura 4. 6: Vista lateral de la biopila optimizada	67

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1: Ventajas y Desventajas del método de biorremediación con biopilas ...	12
Tabla 4. 1: Composición con la biorremediación obtenida anteriormente en la gestión 2020.....	53
Tabla 4. 2: Tiempo de biodegradación con MOD 1	58
Tabla 4. 3: Tiempo de biodegradación con MOD 2.....	58
Tabla 4. 4: Tiempo de biodegradación con Promedio.....	58
Tabla 4. 5: Tiempo de biodegradación.....	62
Tabla 4. 6: Relación de Temperatura de la biopila y Calor de aire.....	63
Tabla 4. 7: Variación del pH.....	64
Tabla 5. 1: Análisis FODA.....	72
Tabla 5. 2: Análisis de costos fijos	73
Tabla 5. 3: Costos variables.....	74
Tabla 5. 4: Depreciación anual del proyecto	75
Tabla 5. 5: Capital de trabajo	75
Tabla 5. 6: Flujo de caja por año por venta de urea para demostrar el VAN	76
Tabla 5. 7: Interpretación de Costo y beneficios	78
Tabla 5. 8: Parámetros económicos.....	79

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN.

La implementación de técnicas de biorremediación para abordar la contaminación de terrenos contaminados químicamente ha ganado una aceptación significativa y actualmente se está poniendo en práctica a nivel comercial. Al principio, se idearon métodos ex situ como principal enfoque de biorremediación, que implicaba tratar el suelo que había sido excavado. Por otro lado, las tecnologías in situ se concentran en el tratamiento de la contaminación sin necesidad de excavación y se utilizan comúnmente para la remediación de suelos y aguas subterráneas (Skladany y Metting, 1993).

Existen varias técnicas para la biorremediación ex situ, incluida la remediación en fase de suspensión, que incorpora una fase de agua para mejorar la mezcla física. La remediación del lecho de tratamiento es otro método, que implica la adición de nutrientes a un lecho con una altura que generalmente oscila entre 0 y 1 m, agitado periódicamente mediante un dispositivo mezclador. Las biopilas, por su parte, consisten en apilar el material a tratar en montones o hileras, que suelen alcanzar una altura de 2 a 4 m, aportando nutrientes y aire. Estas biopilas pueden ser estáticas con tuberías de aireación o rotadas/mezcladas mediante dispositivos especializados. Además, la eficacia de las biopilas se puede mejorar incorporando un agente de carga, como paja, aserrín, corteza, astillas de madera u otros materiales orgánicos.

Compostaje es el término utilizado para describir la introducción de materia orgánica. Para mejorar el proceso de compostaje, se utilizó un compostador de tambor cerrado, lo que permite un flujo constante de entrada y salida. El landfarming, el método convencional para tratar los residuos de petróleo, implica la adición de lodos de petróleo y nutrientes a las tierras agrícolas, que luego se combinan mediante métodos agrícolas. Vale la pena señalar que los inóculos

microbianos o la bioaumentación pueden integrarse en cualquiera de estos métodos tecnológicos.

La eficacia de las biopilas en la remediación de diversos contaminantes orgánicos está bien establecida. A través de extensas investigaciones y pruebas de campo, la efectividad de esta tecnología ha sido demostrada consistentemente, especialmente en el tratamiento de hidrocarburos de petróleo (Samson et al., 1995).

Figura 1. 1: Diferentes compostas para la construcción de una biopila



Fuente: Tipos de compost: orgánica, industrial, seca, beneficios, 2023

Las consideraciones cruciales en la implementación de aplicaciones de biorremediación a gran escala incluyen las siguientes:

- ¿Es posible alcanzar un nivel mínimo de concentración de contaminantes (teniendo en cuenta la biodisponibilidad y la actividad microbiana)?

- ¿Cómo se comportan los contaminantes en términos de mineralización, biotransformación, evaporación, acumulación en biomasa microbiana, incorporación a residuos ligados, etc.?
- ¿Cuál es el plazo previsto para alcanzar el objetivo establecido (tasa de degradación)?
- ¿Cuál es el gasto más bajo posible asociado con las distintas opciones de suscripción?

Las respuestas a estas preguntas se pueden resumir sucintamente en la frase: "La biopila determina la tasa de biodegradación". Esta tasa está estrechamente relacionada con la composición del material de la biopila, y el objetivo del proyecto es identificar la composición óptima que aborde y erradica eficazmente la contaminación y al mismo tiempo minimice los gastos.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Antecedentes generales

A continuación, se brinda una descripción de los antecedentes que rodean al campo Carrasco.

En 1991, la empresa YPFB realizó un importante descubrimiento en este campo a través del pozo CRC-X1, que alcanzó una impresionante profundidad de 4770 metros. Este descubrimiento confirmó la presencia de formaciones que contienen cantidades sustanciales de gas y condensado dentro de las formaciones del Devónico.

Durante la exploración de la provincia geológica Pie de Monte Norte se perforaron nuevos pozos, entre ellos los campos Katari y Bulo-Bulo.

En el pasado, en esta estructura en particular se perforaron un total de nueve pozos antes de 1997. Posteriormente, YPFB Chaco S.A., que actúa como operador del campo, procedió a perforar el pozo CRC11 en el año 2000.

El agotamiento del campo se produjo de forma natural, dando lugar a su explotación. En febrero de 2002, YPFB Chaco S.A. inició la inyección de gas seco desde el campo Bulo para fines de almacenamiento. Esto fue necesario porque el yacimiento Roboré-I en el campo Carrasco ya había sido drenado significativamente. Al dedicarse a esta actividad, se hizo posible la producción de hidrocarburos líquidos.

Se perforaron un total de 12 pozos, 11 de los cuales funcionaron como productores de petróleo y uno sirvió como inyector de agua de formación. Desafortunadamente, un número significativo de estos pozos quedaron sumergidos debido a un alto corte de agua de formación y actualmente están cerrados o en intervención. En promedio, estos pozos tienen una profundidad de 4750 metros.

Figura 1. 2: Preparación del proceso de biorremediación en el Campo



Fuente: La Región.bo bajo el permiso y autorización de YPFB CHACO, 2023

YPFB Chaco ha establecido un amplio sistema de gestión de tratamiento de residuos, conocido como Gestión de Salud, Seguridad, Medio Ambiente y Social (SSAS), para manejar eficazmente los residuos generados durante sus operaciones

de campo. Como resultado, la empresa se ha convertido en pionera en Bolivia, siendo la primera en utilizar biotecnología para tratamientos de biorremediación en todas sus áreas operativas.

En 2014, el equipo de Gestión de Salud, Seguridad, Medio Ambiente y Social inició un esfuerzo de reestructuración para abordar el desafío de resolver efectivamente el problema de los suelos contaminados almacenados en tres de las cuatro áreas de biorremediación identificadas por YPFB Chaco.

La evaluación de las cuatro áreas de biorremediación de YPFB Chaco marcó el inicio de la investigación de la dirección de la SSAS sobre el tema. Esta evaluación reveló la existencia de cantidades significativas de suelos contaminados, así como sus atributos y composición específicos. Un total de 9.200 m³ de suelo en los campos Carrasco, Los Cusis y Vuelta Grande requirieron biorremediación. (La Región, 2016)

Figura 1. 3: Preparación del suelo para generar la biorremediación



Fuente: La Región.bo bajo el permiso y autorización de YPFB CHACO, 2023

La fase inicial de gestión de residuos contaminados se inició en 2015, centrándose en la biorremediación de suelos en las regiones de Carrasco, Los Cusis y Vuelta Grande, que fueron identificadas como las zonas más críticas. Tras la observación, resulta evidente que el proceso permanece confinado a un solo tipo de composición y no se ha sometido al proceso de biopila.

1.2.2 Antecedentes académicos

Gutiérrez (2021), en su proyecto “Cinética de degradación de hidrocarburos utilizando células biológicas a escala de laboratorio”, evaluó la cinética de degradación de hidrocarburos a escala de laboratorio mediante técnicas de ecología celular biológica utilizando diferentes agentes texturizantes. Implementó un protocolo experimental para evaluar seis tratamientos utilizando bagazo entero, cachaza, aserrín, pulpa de café, estiércol de vaca y residuos de *Thalassia testudinum* durante 0, 60, 90, 150 y 240 días. Por otra parte, ajustó datos experimentales a modelos matemáticos de reacciones de orden cero, primer orden y segundo orden; lo cual le sirvió para determinar estadísticamente el modelo y la serie de reacciones que mejor se ajustan. Finalmente, obtuvo la constante de velocidad de reacción y la vida media creando una hoja de cálculo de Microsoft Office Excel para los cálculos y gráficos correspondientes. (P. Agamuthu, 2013)

Del Real (2007) en su trabajo de investigación “Simulación matemática de digestores anaeróbicos de tanque agitado para el tratamiento de emisiones residuales” propuso y simuló la linealidad adimensional semiestable obtenida por biorreactores isotérmicos de tanque agitado mediante el uso de ecuaciones que intentan representar los cambios químicos que ocurren durante el tratamiento de las emisiones residuales. Tradicionalmente, los modelos se han basado en balances de materiales y cinética química de procesos biológicos. (Real, 2007)

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.3.1 Identificación del problema.

El gas y el gas licuado de petróleo se producen en el Campo Carrasco y luego se distribuyen directamente a la planta de Carrasco que para el 2018 tenía una capacidad de 70MMpcd para el procesamiento del gas natural, extracción de líquidos y gas licuado de petróleo para su posterior entrega a los hogares en Bolivia.

Lamentablemente, según la información recabada, este campo es un importante foco de contaminación debido al deterioro de las tuberías y al inadecuado manejo de accesorios y equipos en la planta. (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2018)

A pesar de la implementación de proyectos de biorremediación de suelos en las áreas antes mencionadas, no se ha logrado una depuración completa debido a la presencia persistente de concentraciones de hidrocarburos. Por lo tanto, es imperativo idear métodos alternativos que puedan evaluar y cuantificar con precisión estos contaminantes sin el requisito de un laboratorio físico, superando las limitaciones de los procesos de biorremediación tradicionales.

Para anticipar con precisión los requisitos para un proceso exitoso de biotratamiento del suelo en la eliminación de contaminantes de hidrocarburos, es esencial un enfoque sistemático. Varios tipos de abono producen reacciones distintas y eliminan contaminantes en diferentes concentraciones y velocidades. Por lo tanto, es imperativo establecer parámetros para diferentes variedades de compost y realizar un análisis económico para determinar la opción óptima para realizar la biorremediación del suelo en el campo específico bajo investigación.

Figura 1. 4: Preparación del suelo para residuos de mezcla de hidrocarburos líquidos



Fuente: La Región.bo bajo el permiso y autorización de YPFB CHACO, 2023

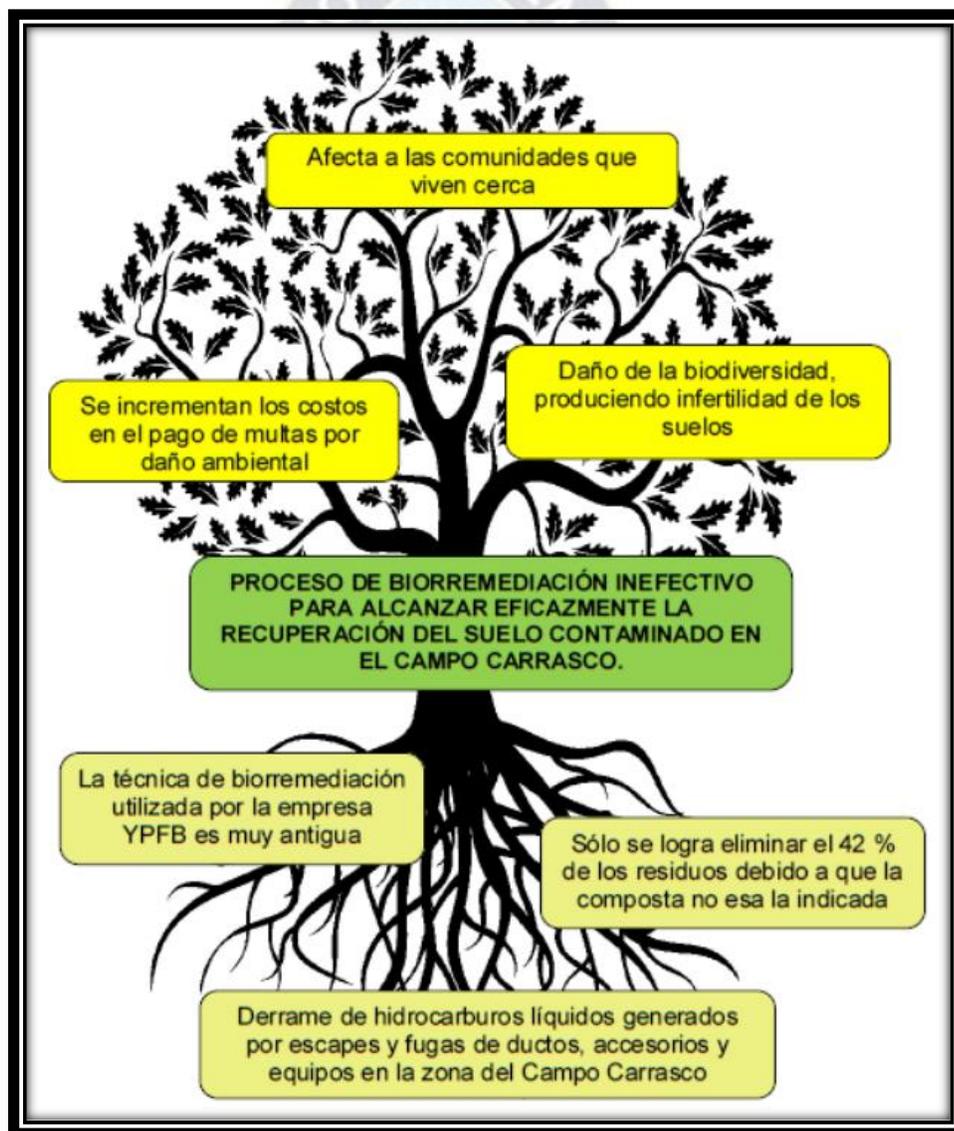
Cuando se inició el proyecto en 2014, no se tuvo en cuenta el tiempo que lleva eliminar la concentración y los distintos tipos de compost que pueden eliminar

eficazmente los hidrocarburos. Para evitar pérdidas financieras innecesarias, es fundamental realizar una simulación exhaustiva y una evaluación cuantitativa antes de realizar cualquier inversión.

1.3.2 Árbol de problemas

A continuación, se presenta el siguiente árbol de problemas para formular el problema de investigación:

Figura 1. 5: Árbol de problemas



Fuente: Elaboración propia, 2023

Por lo tanto, se puede concluir que el problema principal radica en la contaminación del suelo por la presencia de hidrocarburos como el gasóleo, la gasolina natural y el GLP. Estos contaminantes son resultado de fugas de ductos, accesorios y equipos en la región de Campo Carrasco, y es evidente que aún existen niveles importantes de hidrocarburos presentes en la zona.

1.3.3 Formulación del problema.

Luego de considerar la identificación previa del problema, es posible formular la siguiente pregunta de investigación para poder proceder con el proyecto de titulación:

¿Cuál es el método para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en la zona del Campo Carrasco más eficiente disponible?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Proponer sistemas de biopilas para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en la zona del Campo Carrasco basado en el análisis de velocidad de biodegradación.

1.4.2 Objetivos específicos

- Describir los conceptos de la biorremediación y el uso de biopilas que apuntan a abordar la contaminación del suelo resultante de las actividades de la industria petrolera.
- Utilizar técnicas cuantitativas para determinar la velocidad a la que se produce la biodegradación, teniendo en cuenta factores como el tipo de

compost y diversas variables de tamaño de la biopila, incluida la temperatura y las características geométricas.

- Anticipar la duración de la biodegradación, los parámetros de tratamiento necesarios y los resultados finales que producirá la biopila cuando se utilicen varios tipos de compost en suelos contaminados con hidrocarburos.
- Ejecutar una simulación de biorremediación para determinar los parámetros que establecen la correlación entre la temperatura y la volatilización dentro de la biopila.
- Determinar el tamaño adecuado de la biopila, mediante la consideración de las variables óptimas que han sido analizadas en los modelos cuantitativos.
- Realizar un análisis técnico y económico del proyecto.

1.5 JUSTIFICACIÓN.

1.5.1 Justificación teórica

El objetivo de este proyecto es utilizar modelos cinéticos basados en el balance energético para pronosticar la tasa de biodegradación de hidrocarburos en los suelos de Campo Carrasco. Mediante la implementación de varios tipos de compost, el objetivo es crear una biopila eficiente que minimice efectivamente la contaminación por hidrocarburos. El método cuenta con las siguientes características:

- La facilidad y velocidad de uso lo hacen particularmente conveniente para predecir la duración de la biodegradación en varios tipos de compost.

- La biopila se puede dimensionar adecuadamente teniendo en cuenta factores como el flujo de aire, la temperatura y el tamaño del equipo.
- Teniendo en cuenta las características de la biopila, se puede estimar la disminución de la concentración de contaminantes a lo largo de un período de tiempo.

1.5.2 Justificación económica.

Al anticipar con precisión el compost óptimo para minimizar los niveles de hidrocarburos en suelos contaminados, se pueden evaluar eficazmente los gastos asociados y recomendar la opción más adecuada a la empresa, garantizando una implementación exitosa del proyecto. Al presentar una gama de opciones de compost con diferentes costos, se minimizan los posibles contratiempos financieros, al mismo tiempo que se garantiza la eliminación de hidrocarburos y se beneficia tanto la reputación de la empresa como el medio ambiente.

1.5.3 Justificación socio – ambiental

El proyecto apoya efectivamente en el transporte y la producción de hidrocarburos en Campo Carrasco, ya que no sólo ayuda a controlar la contaminación en beneficio del medio ambiente, sino que también promueve la reutilización de suelos y la generación de recursos que en última instancia benefician a la población aledaña.

1.5.4 Justificación técnica.

Los modelos sugeridos pretenden potenciar el tamaño de la biopila y su correspondiente sistema operativo, abarcando aspectos como el flujo de aire por la entrada y salida, así como los equipos que dan soporte al sistema. Utilizando datos optimizados adquiridos a través de modelos cinéticos, se realizará una caracterización geométrica de la biopila.

Por otra parte, se puede mencionar las siguientes ventajas y desventajas:

Tabla 1. 1: Ventajas y Desventajas del método de biorremediación con biopilas

BIORREMEDIACIÓN CON SISTEMAS DE BIOPILAS	
<u>Ventajas</u>	<u>Desventajas</u>
Menor tiempo de tratamiento	Se necesita excavar el suelo
Mayor uniformidad de muestras	Exposición al contaminante
Facilidad en la obtención de muestras	Incremento de costos operativos

Fuente: Elaboración propia, 2023

1.6 ALCANCE

1.6.1 Alcance temático

El alcance temático se engloba dentro de los parámetros designados siguientes:

Mediante la utilización de ecuaciones y simulaciones, este proyecto de análisis cuantitativo adopta un enfoque teórico para cuantificar el diseño y las dimensiones de una biopila. Se centra en la variación de la biodegradación de diferentes compost.

El proyecto, sin embargo, centra su atención en el control ambiental, la seguridad industrial, la simulación numérica y la programación aplicada. Nuestra metodología de investigación adopta un enfoque cuantitativo al analizar las concentraciones de contaminación del suelo, la temperatura dentro de la biopila, así como la velocidad y duración de la biodegradación del contaminante.

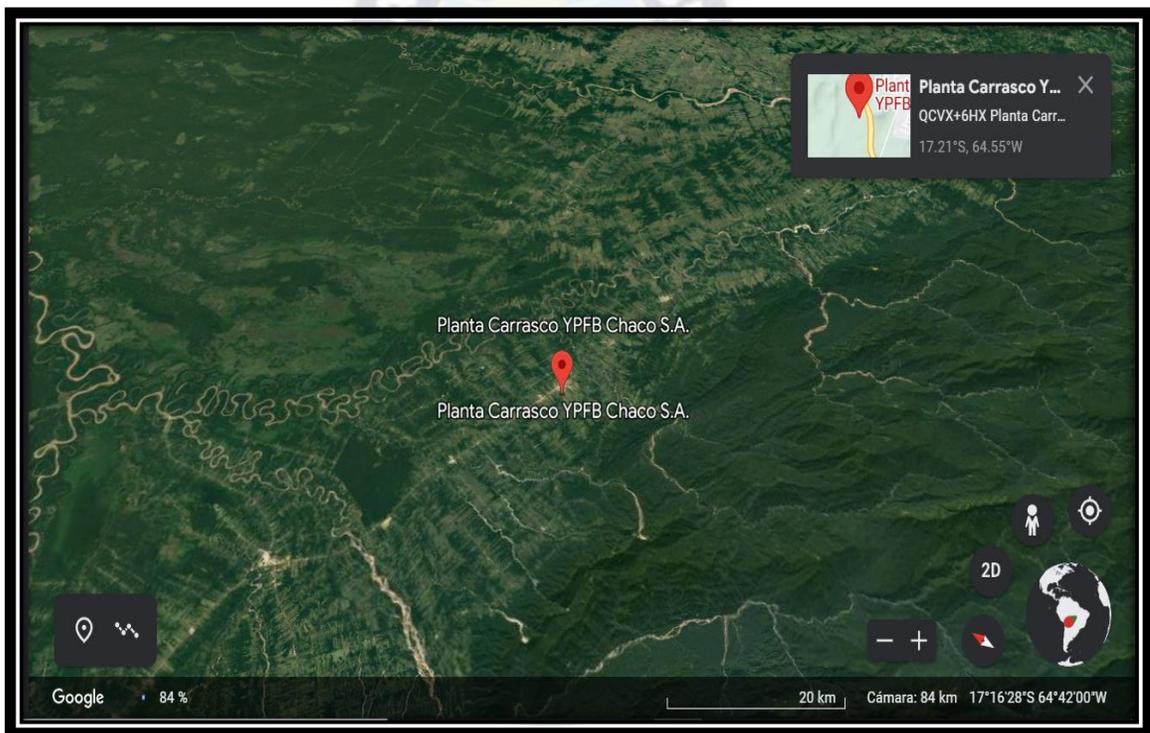
1.6.2 Alcance temporal

Para completar este proyecto, se asignará un plazo de tres meses, a partir de este mes de 2023, utilizando datos históricos desde enero de 2021 hasta diciembre de 2022.

1.6.3 Alcance geográfico.

Campo Carrasco está situado en la provincia Carrasco de Cochabamba, específicamente en la región tropical conocida como el “Chapare”. Se ubica a 174 km al este de la ciudad de Cochabamba y a 230 km de la ciudad de Santa Cruz. Geográficamente se encuentra dentro de la llanura chaco-beniana, enclavada entre los ríos Ichilo e Isarsama. El área central del campo se encuentra a una altura de aproximadamente 320 m sobre el nivel del mar, experimentando una presión atmosférica de 14,05 PSI.

Figura 1. 6: Ubicación de la Planta Carrasco



Fuente: earth.google.com/web/search/Planta+Carrasco+YPFB, 2023

La planta está situada a sólo 7 km de la localidad de Entre Ríos, a la que se puede acceder cómodamente a través de una carretera asfaltada en buen estado. Durante todo el año, el acceso a la planta es posible a través de un camino de ripio que se bifurca desde la carretera principal pavimentada que conecta los departamentos de Santa Cruz y Cochabamba.

1.7 METODOLOGÍA

La sección de metodología, proporciona una descripción general del enfoque de investigación y las técnicas empleadas en este estudio.

1.7.1 Hipótesis de investigación científica

Las hipótesis de la investigación científica son un componente integral del proceso de investigación y sirven como base para la investigación y el análisis.

Para determinar correctamente el método mas eficiente posible para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos el enfoque mas efectivo se basa en un análisis de las tasas de biodegradación, para obtener una biorremediación eficiente.

1.7.2 Enfoque de investigación científica

El enfoque de investigación cuantitativa utilizado en este estudio implica un método sistemático y organizado para recopilar y evaluar datos de múltiples fuentes. En concreto, la investigación se centra en analizar las propiedades geométricas de la biopila y el porcentaje de contaminantes antes y después de la aplicación del proceso de biorremediación. Se emplean herramientas matemáticas, como modelos de velocidad de reacción y ecuaciones de crecimiento poblacional, para cuantificar los parámetros de diseño de la biopila para varios tipos de compost.

1.7.3 Tipo de investigación

Esta investigación cae dentro de la categoría de investigación descriptiva ya que examina los atributos de las tasas de biodegradación de hidrocarburos en relación con la utilización de varias bioceldas con distintas composiciones, así como los procedimientos necesarios para implementar la biorremediación. A través de este

estudio, pretendemos determinar los parámetros ideales de diseño de la biopila y establecer los plazos en los que disminuirán las concentraciones de contaminantes en el suelo.

1.7.4 Métodos de investigación científica

Los métodos de investigación científica abarcan una amplia gama de enfoques y técnicas utilizados para realizar investigaciones rigurosas y sistemáticas.

1.7.4.1 Método inductivo

Al utilizar el método inductivo, se puede emplear un enfoque lógico que implica examinar los datos para llegar a una inferencia amplia derivada de casos particulares. En este escenario particular, luego de examinar datos preliminares sobre la contaminación del suelo dentro de una sección específica del Campo Carrasco y emplear estas biopilas mejoradas, se puede deducir que esta metodología resultará efectiva no sólo para la totalidad de dicho campo sino también para todos los campos ubicados en Bolivia.

1.7.4.2 Método sintético

En este caso, se profundiza en el método sintético, un proceso lógico que tiene como objetivo reconstruir una entidad integral uniendo los elementos identificados a través del análisis. Específicamente, exploraremos el procedimiento de optimización de biopilas para varios tipos de compost y el proceso de instalación, que se aclarará mediante diagramas de flujo, al mismo tiempo que consideraremos el análisis de las tasas de biodegradación.

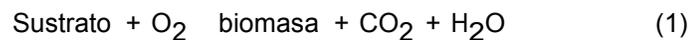
CAPITULO II: GENERALIDADES DE LA BIORREMEDIACIÓN Y EL SISTEMA DE BIOPILAS

2.1 BIOQUÍMICA DE LA BIORREMEDIACIÓN

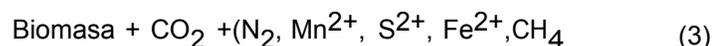
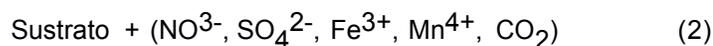
El fundamento bioquímico de la biorremediación se basa en que, en la cadena respiratoria, o transportadora de electrones de las células, se van a producir una serie de reacciones de óxido-reducción cuyo fin es la obtención de energía. La cadena la inicia un sustrato orgánico (compuestos hidrocarburos) que es externo a la célula y que actúa como dador de electrones, de modo que la actividad metabólica de la célula acaba degradando y consumiendo dicha sustancia.

Los aceptores más comúnmente utilizados por los microorganismos son el oxígeno, los nitratos, el hierro (III), los sulfatos y el dióxido de carbono. Cuando el oxígeno es utilizado como aceptor de electrones la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo aerobio; sin embargo, si utiliza los sulfatos o el dióxido de carbono se produce en condiciones reductoras o anaerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo anaerobio. Se define como biorremediación al proceso de aceleración de la tasa de degradación natural de hidrocarburos por adición de fertilizantes para provisión de nitrógeno y fosforo. (Amellal, 2001).

Degradación aerobia:



Degradación anaerobia:



2.2 BIORREMEDIACIÓN

2.2.1 Características

A mediados del siglo XX se desarrollaron las primeras investigaciones encaminadas a estudiar el potencial de los microorganismos para biodegradar contaminantes (Zobell, 1946; Davis, 1956). Este "uso" intencionado recibió entonces el nombre de biorremediación ("bioremediation"). Las primeras técnicas que se aplicaron fueron similares al "landfarming" („labranza") actual y sus actores, lógicamente, compañías petrolíferas. Las primeras patentes, fundamentalmente para remediación de vertidos de gasolina, aparecen en los años 70. En los años 80 se generalizó el uso del aire y peróxidos para suministrar oxígeno a las zonas contaminadas mejorando la eficiencia de los procesos degradativos.

Durante los años 90 el desarrollo de las técnicas de "air sparging" (burbujeo de oxígeno) hizo posible la biorremediación en zonas por debajo del nivel freático. Al mismo tiempo, la implementación en la práctica de aproximaciones experimentales en el laboratorio permitió el tratamiento de hidrocarburos clorados, los primeros intentos con metales pesados, el trabajo en ambientes anaerobios, etc. Paralelamente, se desarrollaron métodos de ingeniería que mejoraron los rendimientos de las técnicas más populares para suelos contaminados ("landfarming", "composting", etc.) (Riser-Roberts, 1998).

En la actualidad, la biorremediación enfrenta un nuevo reto: el de convencer a las compañías y a los organismos oficiales de su alto potencial. En algunos países, la biorremediación fue una técnica poco reconocida y marginada, hoy en día se ha convertido en una verdadera industria. Esta "industria" busca seguir mejorando en sus líneas interdisciplinarias, que se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Integración en el proceso de técnicas innovadoras que ayuden a comprender y controlar los fenómenos de transporte de nutrientes y otros posibles aditivos.
- Desarrollo de técnicas rápidas de biología molecular que permitan caracterizar las poblaciones indígenas de los emplazamientos contaminados, así como su potencial enzimático (Theron y Cloete, 2000; Watanabe, 2001).
- Exploración de las implicaciones del concepto de biodisponibilidad ("bioavailability") definido por las propiedades físico-químicas de los contaminantes. Se trata de un factor que en muchos casos está limitando la biodegradación y en otros reduciendo la toxicidad de los contaminantes.

2.2.2 Tipos de biorremediación

2.2.2.1 Biorremediación "in situ"

Este tipo de tratamiento normalmente es la opción más adecuada para la recuperación de suelos, ya que no es necesaria la preparación y excavación del material contaminado. No obstante, antes de decidir el tipo de tratamiento deben valorarse numerosos factores entre los que se destacan:

- Impacto ambiental en la zona.
- Actividades industriales que pueden verse afectadas.
- Costos comparativos con otros tratamientos.
- La dificultad de acceso a la zona contaminada para proveer de oxígeno y nutrientes.
- La determinación del porcentaje de tratamiento.
- La velocidad del proceso.
- El potencial peligro de extensión de la contaminación.

Las técnicas más utilizadas se ven con detalle a continuación:

2.2.2.1.1 Bioaireación o bioventeo

Es una variante de la técnica de extracción de gas con vapor (“Soil Gas Extraction” o “Volatilización”), que consiste en suministrar aire al terreno contaminado para promover la actividad de los microorganismos presentes en el subsuelo y biodegradar los hidrocarburos. El aire se suministra mediante un sistema de extracción e inyección.

Para diseñar estos sistemas es necesario conocer la permeabilidad del suelo a los gases, con el fin de determinar el radio de influencia de los pozos de venteo, la distancia entre pozos y las dimensiones de los equipos de inyección. La bioaireación generalmente se lleva a cabo en áreas poco profundas y pequeñas; a menudo es factible la instalación de barreras para guiar el flujo, el uso de cubiertas, un control intensivo, un plan de muestreo y un sistema de ventilación.

Una característica determinante en la selección de esta técnica es el tipo de contaminante, puesto que es de mayor efectividad donde los contaminantes tienen baja volatilidad. Además, se deben tener en cuenta las características físicas del suelo, la profundidad de la zona contaminada y el potencial para transportar contaminantes fuera de la zona.

2.2.2.1.2 Inyección de aire a presión

Consiste en inyectar aire a presión en la parte inferior para desplazar el agua de los espacios intersticiales de la matriz del suelo. Esta inyección genera principalmente dos efectos:

- Absorber gran cantidad de los hidrocarburos volátiles presentes en el agua y el suelo.

- Elevar los niveles de oxígeno del agua mejorando la biodegradación de los contaminantes (Matthews, 1993).

Con la inyección de aire a presión se llevan a cabo dos mecanismos de remoción del contaminante, la volatilización de compuestos de la zona insaturada y la fase acuosa y la biodegradación. El mecanismo gobernante depende de las características de los contaminantes.

Las características determinantes en la selección de esta técnica son:

- El tipo de contaminante. Se degradan fácilmente las moléculas más pequeñas (hasta C₂₀), siendo más biodegradables los compuestos parafinados o de cadena lineal que los compuestos aromáticos. En general, son favorables los compuestos de alta volatilidad (presión de vapor mayor de 10 mm de Hg a 20°C).
- Tipo de suelo. Los suelos deben contener bajos contenidos en arcilla y ser lo más homogéneamente posible, con un valor de permeabilidad al aire adecuado (> 10⁻¹⁰ cm²).
- Los aportes de oxígeno deben ser suficientes, así como la existencia de fuentes de carbono, aceptores de electrones y energía suficientes.
- Deben existir unas condiciones óptimas de pH (6 a 8), de humedad (12 a 30% en peso), potencial redox mayor de -50 mV, temperatura entre 0 y 40 °C y los nutrientes del suelo en relación N:P de 10:1.

-

2.2.2.2 Bioestimulación

En este sistema, el agua subterránea es conducida a la superficie por medio de un sistema de pozos de extracción, se acondiciona en un reactor para volverla a inyectar y estimular la degradación bacteriana de los contaminantes del subsuelo y del acuífero. En el reactor en superficie se agregan al agua: nutrientes, oxígeno, microorganismos previamente seleccionados y adaptados, y el efluente se retorna

al subsuelo por medio de pozos de inyección, aspersores superficiales o galerías de infiltración distribuidas a lo largo y ancho del sitio que se requiere remediar. Algunas veces esta técnica utiliza biosurfactantes para ayudar al lavado de contaminantes del suelo (Zitrides, 1990); (Cole, 1994).

Las características determinantes en la selección, el éxito o el fracaso de esta técnica de remediación son:

- Tipo de suelo. Los suelos deben ser lo más homogéneos posible, con un valor de porosidad y permeabilidad al aire adecuado ($> 10^{-10}$ cm²).
- Deben existir unas condiciones óptimas de pH (6 y 8), de humedad (1230% en peso), temperatura entre 0 y 40 °C y los nutrientes del suelo en relación N:P de 10:1.

2.2.2.3 Biorremediación “ex situ”

Dos son los tratamientos que se distinguen cuando el procedimiento se realiza fuera del lugar donde está la contaminación: tratamiento por vía sólida y tratamiento por vía suspensión. (P. Agamuthu, 2013).

La biorrecuperación vía sólida se puede realizar por dos métodos: tratamiento en lechos y tratamiento por compostaje. La diferencia fundamental entre ambos es el sistema de aireación, mientras que en el primero sólo se pueden tratar las capas de suelo menos profundas, en el compostaje se requiere la formación de grandes apilamientos de material degradable. (Vinas, 2002)

En el tratamiento vía suspensión se excava el material contaminado y se traslada a un reactor. La característica de este método es la suspensión en un medio acuoso del suelo contaminado, es decir, el tratamiento se lleva a cabo bajo condiciones de saturación de agua.

La ventaja de estos procedimientos frente a los primeros radica en la posibilidad de optimizar mejor los parámetros microbiológicos, así como el control del proceso; a cambio, lógicamente, de un mayor costo.

2.2.2.3.1 Disposición sobre el suelo

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

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

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

Para empezar el procedimiento, se hace una búsqueda y selección de bacterias nativas aisladas de las muestras de suelos que se encuentran contaminados, ya que estas tienen la capacidad catabólica para crecer bajo las condiciones físico-químicas y de estrés a las que están sometidas, y tendrán un mejor desempeño a la hora de la biorremediación.

La búsqueda comienza en el procesamiento de una muestra de suelo mediante una serie de diluciones, tratando de obtener aquellos morfotipos cultivables; ya que una gran parte de los microorganismos del suelo no pueden ser recuperados en medios para el cultivo de microorganismos.

Además de una búsqueda general, se realiza una específica a través de medios selectivos y diferenciales, en la cual se pretende aislar ciertos morfotipos como las *Pseudomona* sp. y bacterias lactosa positivas (bacterias capaces de utilizar la lactosa), debido a su bien conocida actividad degradadora de hidrocarburos.

Luego, estas diluciones son sembradas en diferentes medios de cultivo donde grandes familias de morfotipos se hacen presentes; éstas varían en densidad y diversidad. La diversidad está determinada por los morfotipos recuperados que se diferencian según su morfología macroscópica (su aspecto físico), mientras que la densidad está determinada por el número total de individuos que pertenecen a un grupo con una morfología macroscópica común.

Estos datos de densidad y diversidad son de gran valor. Primero, porque indican acerca de la calidad microbiana del suelo, ya que un suelo que tiene gran número de morfotipos, es un suelo que tiene vida y por ende presenta una buena prospección para la biorremediación debido a su posible alta actividad microbiana. Segundo, porque aquellos morfotipos que se encuentren en mayor número serán seleccionados por su habilidad para sobrevivir a la presión selectiva del contaminante y para usarlo como fuente de energía y carbono, pues por eso están creciendo.

Ya seleccionados los morfotipos se conforma un consorcio o pool de microorganismos degradadores de hidrocarburos y, utilizando la estrategia de bioaumentación, se hace una producción a mayor escala y en proporciones estratégicas de estos. En esta producción debe tenerse en cuenta el volumen de suelo contaminado para biorremediar, la concentración del contaminante y las clases de morfotipos que se aislaron.

Los factores a tener en cuenta en la aplicación del “Landfarming” son:

- La existencia de unas condiciones geológicas y geoquímicas favorables.
- El manejo de un consorcio microbiano sobre la utilización de un solo morfotipo, debido a que los morfotipos al estar en grupo pueden tolerar mejor los cambios físico-químicos en el campo y sus actividades metabólicas pueden interactuar entre sí para la parcial o final biorremediación.
- Conocer las condiciones ambientales en las cuales se desea que los morfotipos trabajen, para así poder optimizar la biorremediación, cambiando los posibles parámetros físicos o químicos que puedan ir en contra de la actividad microbiana en el material a biorremediar o en el ambiente.
- Resaltar la importancia que tiene la selección de microorganismos autóctonos (aislados del lugar para la biorremediación), debido a que estos morfotipos se encuentran mejor adaptados al contaminante; a diferencia de morfotipos foráneos, que aunque con una gran actividad biorremediadora, pueden no funcionar bajo las condiciones ambientales del lugar.

2.2.2.3.2 Bioceldas o biopilas

La técnica conocida como bioceldas o biopilas es un tratamiento de biorrecuperación en condiciones no saturadas, que consiste en la reducción de la concentración de contaminantes derivados del petróleo en suelos excavados mediante el uso de la biodegradación a partir de la construcción de un sistema

cerrado que permita controlar lixiviados, hidrocarburos volátiles y algunas variables de diseño mediante el suministro de nutrientes y oxígeno a través de la pila del suelo.

La técnica consiste en la formación de pilas de material biodegradable de dimensiones variables, formadas por suelo contaminado y materia orgánica (compost) en condiciones favorables para el desarrollo de los procesos de biodegradación de los contaminantes. En el fondo de la pila el sistema cuenta con un aislante que generalmente son geomembranas o canales plásticos para el control de lixiviados. Estas pilas de compost pueden ser aireadas de forma activa, volteando la pila, o bien de forma pasiva, mediante tubos perforados de aireación, con distribución permanente de nutrientes, microorganismos y aire. En principio, las biopilas se pueden aplicar a la mayoría de los compuestos orgánicos, siendo más eficaz en los compuestos de carácter más ligero.

Entre los factores que influyen en la aplicación de las biopilas se destacan:

- Los hidrocarburos deben ser no halogenados y deben encontrarse en el suelo en concentraciones menores a 50.000 ppm.
- Dada la necesidad de excavación y posterior depósito del suelo contaminado, se requiere una superficie de trabajo relativamente grande cuyas dimensiones dependen del volumen de suelo a tratar.
- Necesidad de una densidad de poblaciones microbianas (>1.000 CFU/gramo de suelo), condiciones de humedad (40 a 85% de capacidad de campo), temperatura (10 a 45°C), textura (baja proporción de arcillas), pH del suelo adecuadas (6 a 8) y baja presencia de metales pesados (< 2.500 ppm).
- La concentración de nutrientes en el suelo cuyo rango normal de C:N:P sea de 100:10:1.

2.2.2.3.3 Tratamiento de biosuspensión

También conocido como sistema biorreactor o contacto líquido-sólido. El procedimiento consiste en excavar el suelo contaminado y luego introducirlo en un reactor añadiendo nutrientes, agua, y los cultivos microbianos adecuados para que se lleve a cabo la degradación. Se mezcla bien y se airea la suspensión hasta que las transformaciones de los compuestos seleccionados para su eliminación alcanzan el nivel deseado. A continuación se detienen el mezclado y la aireación, y se deja a los sólidos separarse de los fluidos por sedimentación. El sedimento es retirado y, si la transformación ha tenido éxito, el suelo se devuelve a su lugar de origen, mientras que los líquidos se tratan como aguas residuales.

El suministro de oxígeno puede realizarse mediante aireación difusa, turbina difusora y aireación superficial (Metcalf y Eddy, 1991). La tasa de transferencia de oxígeno necesaria es función de la tasa de degradación de los compuestos orgánicos y de la tasa de crecimiento microbiano. Su determinación no es fácil de hacer, sin embargo, las tasas de transferencia disminuyen al aumentar la concentración de sólidos suspendidos.

El mezclado y el suministro de nutrientes también son fundamentales, ya que por el primero se incrementa el contacto entre los microorganismos y los componentes contaminantes, dando como resultado un incremento de las velocidades de transferencia de masa y de reacción. Los nutrientes normalmente optimizan la biorrecuperación por favorecer el crecimiento de los microorganismos. Por otro lado, el mezclado y la aireación ayudan a romper los flóculos de tierra y a disolver los contaminantes.

2.2.3 Elementos que intervienen en la biodegradabilidad de una mezcla de hidrocarburos

La biodegradabilidad de una mezcla de hidrocarburos presente en un suelo contaminado depende de diversos factores, los cuales como pueden clasificarse en cuatro grupos:

2.2.3.1 Elementos medio ambientales

Los factores medio ambientales son aquellos necesarios a la hora de proporcionar las condiciones óptimas para el crecimiento de los microorganismos que llevan a cabo la recuperación. Los microorganismos son muy sensibles a los cambios de temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes, oxígeno y humedad.

2.2.3.1.1 El pH

El pH afecta significativamente la actividad microbiana; en consecuencia, cuanto mayor sea la diversidad de microorganismos existentes, potencialmente mayor será el rango de tolerancia. No existen unas condiciones preestablecidas que sean óptimas en todos los casos, pero en términos generales el crecimiento de la mayor parte de los microorganismos es máximo dentro de un intervalo de pH situado entre 6 y 8.

En general, el pH óptimo para las bacterias heterótrofas es neutro (pH 6 - 8), mientras que es más ácido para los hongos (pH 4 - 5). El pH óptimo establecido para procesos de biodegradación es neutro (pH 7,4 - 7,8) (Dibble y Bartha, 1979). Así mismo el pH también afecta directamente en la solubilidad del fósforo y en el transporte de metales pesados en el suelo. La acidificación o la reducción del pH en el suelo se puede realizar adicionando azufre o compuestos del azufre.

2.2.3.1.2 Temperatura

Es uno de los factores ambientales más importantes que afecta la actividad metabólica de los microorganismos y la tasa de biodegradación. Generalmente, las especies bacterianas crecen a intervalos de temperatura bastante reducidos, entre 20 y 30 °C (condiciones mesófilas), decreciendo la biodegradación por desnaturalización de las enzimas a temperaturas superiores a 40 °C e inhibiéndose

a inferiores a 0 °C. Sin embargo, también se ha dado la biodegradación de hidrocarburos a temperaturas extremas:

- 10°C en suelos subárticos y subalpinos (Sparrow y Sparrow, 1988; Margesin y Schinner, 1997a,b).
- 5°C en suelos árticos (Whyte et al., 1999)
- 60°C por una cepa termófila de *Bacillus stearothermophilus* aislada de un suelo contaminado con crudo de petróleo del desierto kuwaití (Sorkoh et al., 1993).

2.2.3.1.3 Humedad

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

Por lo anterior, la humedad del suelo puede limitar de forma severa la biodegradación, fundamentalmente en suelos superficiales afectados por oscilaciones importantes en el contenido de agua. No obstante, el nivel óptimo de humedad depende de las propiedades de cada suelo, el tipo de contaminación y si la biodegradación es aeróbica o anaeróbica.

2.2.3.1.4 El oxígeno.

Es el aceptor final de electrones generalmente empleado en procesos biológicos y también es necesario en determinados tipos de reacciones de oxidación – reducción catalizada por enzimas. Los microorganismos, oxidan compuestos orgánicos o inorgánicos, obteniendo así la energía necesaria para su crecimiento. El proceso de

oxidación da lugar a electrones que intervienen una cadena de reacciones en el interior de la célula y, al final, deben ser vertidos en el entorno. El aceptor final de electrones es el receptor de los mismos y, en el caso de un metabolismo aerobio, O₂ es el aceptor y H₂O es el producto.

La mayor parte de hidrocarburos presentes en los productos petrolíferos son degradados con mayor extensión y rapidez de forma aeróbica (O₂ como aceptor final de electrones), ya que en ausencia de O₂, y en presencia de aceptores de electrones alternativos (NO₃⁻, SO₄²⁻, CO₂, Mn⁴⁺ y Fe³⁺) los hidrocarburos pueden ser degradados, pero con unas tasas de biodegradación muy inferiores a las aeróbicas (Holliger y Zehnder, 1996; Grishchenkov et al., 2000; Boopathy, 2002; Massias et al., 2003).

2.2.3.1.5 Necesidad de nutrientes inorgánicos

El metabolismo microbiano está orientado a la reproducción de los organismos y éstos requieren que los constituyentes químicos se encuentren disponibles para su asimilación y sintetización. Los nutrientes principalmente requeridos son el fósforo y el nitrógeno, por tanto, las concentraciones asimilables de dichos elementos presentes en el suelo, suelen ser limitantes para un incremento y activación de la población microbiana, mientras que otros nutrientes esenciales como el Ca²⁺, Na⁺, Fe²⁺ y SO₄²⁻ ya están presentes en cantidades suficientes (Menn et al., 2000).

La adición de fuentes de N y P inorgánicas, generalmente tiene un efecto positivo incrementando las poblaciones microbianas y las tasas de biodegradación de hidrocarburos en suelos contaminados (Dott et al., 1995; Breedveld y Sparrevik, 2001; Chaîneau et al., 2003).

Las proporciones molares de C:N:P, descritas en la bibliografía, respecto al contenido de carbono a degradar son muy distintas; el rango normal de C:N:P depende del sistema de tratamiento a emplear, siendo de modo habitual 100:10:1.

Aunque en general la adición de fuentes inorgánicas de N y P al suelo es beneficiosa para los procesos de biodegradación, de igual manera, el uso excesivo de nutrientes inorgánicos también puede inhibir los procesos de biodegradación (Zhou y Crawford, 1995; Margesin y Schinner, 1997; Genouw et al., 1994). Para evitar el exceso de nutrientes, así como la pérdida de los mismos por lixiviación, también se han utilizado fertilizantes inorgánicos oleofílicos de liberación lenta (Inipol EPA® 22) para la biorremediación de suelos contaminados (Lindstrom et al., 1991; Pritchard y Costa, 1991)

Además, es importante destacar que la acción de los nutrientes inorgánicos puede estar limitada debido a la interacción química con los minerales del suelo. (el amonio se puede unir a las arcillas por intercambio catiónico y el fosfato puede unirse y precipitar con iones calcio, hierro y aluminio) (Morgan y Watkinson, 1992).

2.2.3.2 Elementos físicos

Los factores físicos de mayor importancia en la biorremediación son la biodisponibilidad, la presencia de agua y la provisión de un aceptor de electrones adecuado, por ejemplo, el oxígeno.

2.2.3.2.1 Biodisponibilidad

La tasa de degradación depende tanto de la capacidad de transporte y del metabolismo microbiano, como de la transferencia de masas del compuesto.

La relación entre estos factores se conoce como biodisponibilidad. En los suelos uno de los factores limitantes para la biodegradación es la transferencia de masas, ya que los microorganismos de los suelos contaminados, suelen tener amplias capacidades biodegradativas al estar expuestos a una gran variedad de compuestos orgánicos diferentes.

Por lo tanto, la adsorción, la absorción, desadsorción, disolución y la difusión son fenómenos, propios de la transferencia de masas, que condicionan la biodisponibilidad de los contaminantes (Stucki y Alexander, 1987; Tabak et al., 1994 y 1995; Harms et al., 1996; Bosma et al., 1997). Un fenómeno que afecta de forma negativa a la biodisponibilidad de los contaminantes es el envejecimiento o ageing que se define como la pérdida de la biodegradabilidad de los compuestos a lo largo del tiempo en el suelo (aunque la población microbiana mantenga intacto su potencial catabólico), el cual es más importante en suelos con elevado contenido en materia orgánica (Huesemann, 1995; Nocentini, 2000; Breedveld y Sparrevik, 2001).

Este efecto se produce por una serie de fenómenos como son: la adsorción con la materia particulada del suelo, absorción a la materia orgánica del suelo, a la baja difusividad de los compuestos, principalmente desde los microporos; a la disolución en fases líquidas no acuosas (FLNAs), o a la formación de uniones covalentes con la materia orgánica e inorgánica del suelo (Loosdrecht et al., 1990; Weissenfels et al., 1992; Erickson et al., 1993; Alexander, 1995; Shuttleworth y Cerniglia, 1995; Alexander, 1999; Bosma et al., 1997). Con la finalidad de aumentar la biodisponibilidad de los contaminantes existen numerosos ejemplos en la bibliografía de la utilización de tensoactivos sintéticos y biotensoactivos en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos (Volkering y Breure, 1998 ; Chritofi y Ivshina, 2002).

2.2.3.2.2 Presencia de agua

Ésta es necesaria ya que, como se ha visto con anterioridad, los microorganismos toman en carbono orgánico, los nutrientes inorgánicos y los aceptores de electrones, necesarios para el crecimiento microbiano, de la fase líquida. Por lo tanto, el agua debe estar en contacto con los contaminantes estar presente en cantidades que permitan el desarrollo de las comunidades microbianas. Sin embargo, el agua puede llegar a inhibir el flujo de aire y reducir el suministro de oxígeno

necesario para la respiración microbiana. Existen valores de humedad óptima para biorremediación de terrenos no saturados, que habitualmente están entre 150 y 250 grados de agua por kg de terreno seco.

2.2.3.3 Elementos químicos

El factor químico más importante en la biorremediación es la estructura molecular del contaminante, cómo ésta afecta a sus propiedades químicas y físicas y su capacidad para ser biodegradado. La capacidad para ser biodegradado está relacionada con factores tales como la solubilidad, el grado de ramificación, el grado de saturación y la naturaleza y el efecto de los sustituyentes. Estructura química. La inherente biodegradabilidad de un hidrocarburo depende, en gran medida, de su estructura molecular. Siendo los parámetros que más van a afectar la halogenación, la existencia de ramificaciones, la baja solubilidad en el agua y la diferente carga atómica.

De las distintas familias de hidrocarburos del petróleo, los n-alcanos y los alcanos ramificados (isoprenoides) de cadena intermedia (C10-C20) son los sustratos más fácilmente degradables por los microorganismos del suelo, y que por lo tanto tienden a ser eficazmente biodegradados.

Sin embargo, los alcanos de cadena larga (>C20) son más difíciles de degradar debido a su (elevado peso molecular) y su baja solubilidad en agua (Chaîneau et al., 1995).

Los cicloalcanos, por norma general, se degradan más lentamente que los n-alcanos y alcanos ramificados. De igual forma, los HAPs que contienen de 2 a 3 anillos aromáticos pueden ser biodegradados eficazmente en el suelo en condiciones ambientales óptimas, mientras que los HAP de 4 anillos, y especialmente, los de 5 o más anillos bencénicos presentan una mayor recalcitrancia inherente y una baja solubilidad (Kästner, 2000).

Las fracciones de resinas y asfaltenos son las que presentan una menor degradabilidad debido a las complejas estructuras químicas y al elevado peso molecular de sus moléculas (Harayama et al., 1997, 1999).

2.2.3.4 Elementos microbiológicos

El factor microbiológico más importante en la biorremediación es la transformación biológica de compuestos orgánicos, catalizada por acción de las enzimas. La biodegradación de un compuesto específico es frecuentemente un proceso que se realiza paso a paso en el cual se involucran muchas enzimas y muchos organismos. Las enzimas son específicas en términos de los compuestos que atacan y las reacciones que catalizan.

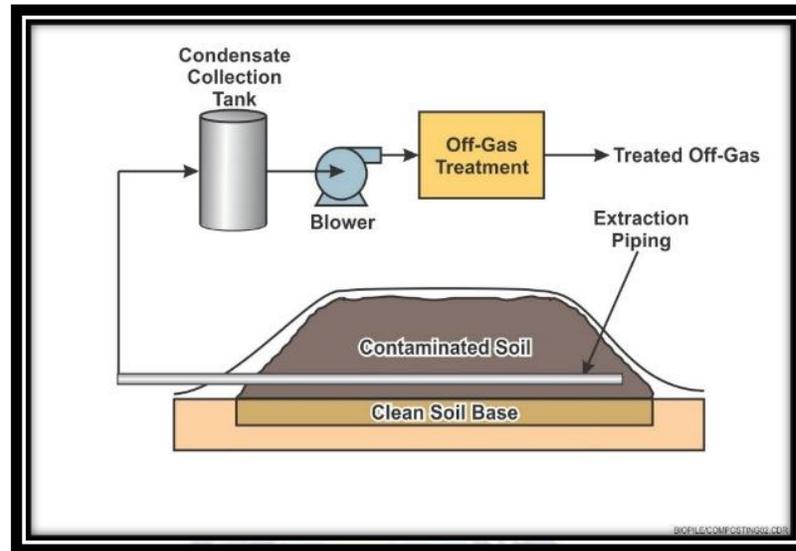
Más de una enzima es normalmente requerida para romper una sustancia orgánica. Frecuentemente, los organismos que tienen las enzimas para degradar están presentes en el suelo.

2.3 BIOPILAS

2.3.1 Definición

Se definen como un proceso biológico controlado donde los contaminantes orgánicos son biodegradados y mineralizados. Se utilizan para reducir las concentraciones de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) en suelos contaminados, con hidrocarburos. El proceso consiste en formar pilas con el suelo contaminado y estimular la actividad microbiana, aireando y/o adicionando nutrientes y humedad.

Figura 2. 1: Ingeniería de una biopila



Fuente: <https://www.frtr.gov/matrix/Biopiles/>, 2023

Uno de los métodos de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos son las biopilas que también se conocen como bioceldas, biomontículos o pilas de composteo. Se utilizan para reducir las concentraciones de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) en suelos contaminados con hidrocarburos a través de la biodegradación. La biopila se define como un proceso biológico controlado donde los contaminantes orgánicos son biodegradados y mineralizados. El proceso consiste en formar pilas con el suelo contaminado y estimular la actividad microbiana, aireando y/o adicionando nutrientes y humedad. El incremento de la actividad microbiana es proporcional a la reducción de las concentraciones de HTP

La tecnología de biopilas es similar a la biolabranza ya que ambas se llevan a cabo fuera del sitio, utilizan el oxígeno contenido en el aire y estimulan el crecimiento de bacterias aerobias, las cuales degradan los constituyentes del petróleo adsorbido por el suelo; pero su diferencia radica en la forma de suministrar el oxígeno, es decir en la biolabranza se suministra el oxígeno labrando o arando el suelo contaminado, mientras que en la biopilas el aire se inyecta o extrae a través de tubos perforados o ranurados que atraviesan la pila (figura 2.1, EPA, 1994).

Una vez formadas o construidas las pilas, éstas deben cubrirse con una cubierta de plástico para evitar la volatilización de HTP y pérdida de calor en el proceso. Si la concentración de compuestos volátiles es significativa, deberá colocarse un filtro a la salida del aireador, para tratar los gases antes de ser liberados a la atmósfera. En este trabajo se describe el diseño, construcción y operación de un sistema de biopilas proyectado en los terrenos de una Terminal de Almacenamiento y Distribución cuyos suelos están contaminados con hidrocarburos en concentraciones promedios de HTP de 21 000 mg/Kg.

2.3.2 Efectividad de la biopila

La biodegradación de los hidrocarburos es óptima con un contenido de humedad entre 70 y 95 por ciento de la capacidad de campo.

La biorremediación depende principalmente de la actividad de los microorganismos aerobios por lo que se requiere un suministro adecuado de oxígeno al suelo. Aproximadamente se requieren de 3 Kg de oxígeno por Kg de hidrocarburos para asegurar una buena degradación. Cuando los poros del suelo se encuentran ocupados por moléculas de agua, la difusión del oxígeno es menor y se pueden presentar condiciones anóxicas. Para tener una degradación aerobia es necesario tener aproximadamente 10 por ciento de poros libres en la matriz del suelo. Los contaminantes orgánicos presentes en el suelo, son la fuente de carbono que los microorganismos requieren para la biodegradación.

La efectividad de la biopila depende de los siguientes factores:

- Características del suelo.
- Características de los contaminantes.
- Condiciones climatológicas.

2.3.3 Ventajas y limitaciones de las biopilas

2.3.3.1 Ventajas

- Los contaminantes se destruyen en vez de pasar a otra condición.
- El diseño y construcción son relativamente fáciles.
- El saneamiento del suelo se lleva a cabo en un período entre 3 y 6 meses, dependiendo de las condiciones climáticas, la concentración de hidrocarburos y del tipo de suelo.
- El suelo saneado mediante biopilas no requiere ser confinado después.
- Las biopilas ofrecen un costo más competitivo con respecto a otras técnicas de saneamiento de suelos.

2.3.3.2 Limitaciones

- Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) de cinco y seis anillos son difícilmente degradables en las biopilas.
- Las biopilas no son efectivas para concentraciones de HTP superiores a 50 000 mg/Kg.
- La presencia de metales pesados puede inhibir el crecimiento de microorganismos.

2.4 MÉTODOLOGÍA DE DISEÑO DE LA BIOPILA

2.4.1 Fundamentos

- Establecer los niveles de limpieza en base a los Criterios interinos de Restauración de suelos, buscaron parámetros internacionales que establecieran concentraciones máximas permisibles en el suelo.
- Determinar los volúmenes de suelo a sanear.
- Seleccionar la técnica de saneamiento, La selección de la técnica involucra las características físicas y químicas del material contaminante, condiciones

ambientales, equipos requeridos, regulaciones ambientales, aspectos de seguridad, salud pública y los tiempos y requerimientos económicos globales.

2.4.2 Colección de lixiviados

La pila se diseña para que la generación de lixiviados sea mínima, por lo que la construcción de un sistema recolector de lixiviados no es necesario, a menos que las condiciones lo requieran. Los lixiviados se recolectan utilizando zanjas o canales.

Sin embargo, cuando es necesario el sistema recolector, éste se construye siguiendo la pendiente de la base y utilizando tubos de PVC de 2" de diámetro que conduzcan los lixiviados hacia las zanjas, éstas deben estar cubiertas por una capa impermeable. El sistema recolector requiere de una bomba para transferir los lixiviados de la zanja, al tanque de almacenamiento.

El sistema recolector de lixiviados constará de una zanja o canal alrededor de la pila con una base de arcillas compactas y una pendiente del 2%, las paredes del canal se cubrirán con mortero para evitar deslaves. La profundidad de la zanja será de 20 cm y el ancho de 30 cm. El agua recolectada puede reutilizarse, debido a que contienen nutrientes (en bajas concentraciones) que no se absorbieron. También pueden descargarse hacia el alcantarillado, verificando si cumple con las condiciones, que se requiere para los niveles máximos de contaminantes en las descargas de aguas residuales. La reutilización dependerá de los requerimientos de humedad, nutrientes y del volumen de lixiviados recolectados. Se proyectaron las dos posibilidades, reutilizar y descargar el agua al alcantarillado, para ello es necesario un tanque, para almacenar los lixiviados que se reutilizarán.

2.4.3 Construcción de la pila

La construcción o formación de la pila consiste en los siguientes pasos.

- 1) Limpiar el área de construcción. La base debe tener una pendiente que permita drenar y coleccionar el agua de lluvia.
- 2) Excavar el suelo contaminado. (Se excavará hasta 2.48 m)
- 3) Cargar los camiones de volteo con el suelo contaminado
- 4) Trasladar el suelo contaminado hasta el sitio donde se construirán las pilas
- 5) Descargar el suelo contaminado
- 6) Construcción de la base de la pila con una pendiente del 2%
- 7) Construcción de las zanjas de tierra, alrededor de la pila para prevenir el deslave de la biopila y la infiltración de los lixiviados, si la zanja se construye con tierra, esta debe cubrirse con una capa de polietileno o plástico grueso para protegerla de la erosión.
- 8) Formación de la pila en capas y adición de nutrientes
- 9) Antes de la construcción de la pila se instala el sistema de aireación con todos sus accesorios:
 - Colocación de la cubierta.
 - Conexión de la tubería de aireación al equipo
 - Muestreo de la biopila cada semana durante 1 mes y después de este período 1 vez al mes

2.4.4 Costo de la biopila

Para elaborar el presupuesto del saneamiento del suelo contaminado con hidrocarburos, las actividades son:

- 1) Preparación del sitio; que incluye los trabajos preliminares, limpieza del terreno y acarreo del desmonte.

- 2) Construcción de la base; incluye todos los trabajos involucrados en la construcción como la colocación de la arcilla, compactación, impermeabilización, excavación de las zanjas para drenes, etc.
- 3) Construcción de la pila; incluye la excavación del suelo contaminado, acarreo del mismo y la formación de la pila.
- 4) Sistema de aireación; incluye el suministro y colocación de los tubos del sistema de aireación para las pilas de 500 m³ y 800 m³ así como las compresores correspondientes.
- 5) Recolección de lixiviados, incluye el suministro y colocación del depósito de lixiviados, bomba y la tubería para la conducción hacia las zanjas.
- 6) Adicción de humedad, incluye el suministro y colocación del sistema de irrigación y el suministro del agua.
- 7) Adición de nutrientes, incluye el suministro y adición de nutrientes.
- 8) Cubierta; incluye el suministro y colocación de la cubierta.
- 9) Muestreo; incluye la colocación de los puntos de muestreo y análisis.
- 10) Monitoreo; incluye los trabajos de inspección semanal y mensual de todo el sistema.
- 11) Mantenimiento, incluye todos los trabajos necesarios para mantener operando en óptimas condiciones los elementos que integran el sistema de biopilas.

2.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS HIDROCARBUROS

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. La estructura molecular consiste en un armazón de átomos de carbono a los que se unen los átomos de hidrógeno. Los hidrocarburos son los compuestos básicos de la Química Orgánica. Las cadenas de átomos de carbono pueden ser lineales o ramificadas y abiertas o cerradas. Los que tienen en su molécula otros elementos químicos (heteroátomos), se denominan hidrocarburos sustituidos.

Los hidrocarburos se pueden clasificar en dos tipos, que son alifáticos y aromáticos. Los alifáticos, a su vez se pueden clasificar en alcanos, alquenos y alquinos según los tipos de enlace que unen entre sí los átomos de carbono. Las fórmulas generales de los alcanos, alquenos y alquinos son C_nH_{2n+2} , C_nH_{2n} y C_nH_{2n-2} , respectivamente.

2.5.1 Clasificación

De acuerdo al tipo de estructuras que pueden formar, los hidrocarburos se pueden clasificar como:

- Hidrocarburos acíclicos, los cuales presentan sus cadenas abiertas. A su vez se clasifican en:
 - ❖ Hidrocarburos lineales a los que carecen de cadenas laterales (Ramificaciones).
 - ❖ Hidrocarburos ramificados, los cuales presentan cadenas laterales.
- Hidrocarburos cíclicos ó cicloalcanos, que se definen como hidrocarburos de cadena cerrada. Éstos a su vez se clasifican como:
 - ❖ Monocíclicos, que tienen una sola operación de ciclización.
 - ❖ Policíclicos, que contienen varias operaciones de ciclización.

Los sistemas policíclicos se pueden clasificar por su complejidad en:

- Fusionados, cuando al menos dos ciclos comparten un enlace covalente.
- Espiroalcanos, cuando al menos dos ciclos tienen un sólo carbono en común.
- Puentes o Estructuras de von Baeyer, cuando una cadena lateral de un ciclo se conecta en un carbono cualquiera. Si se conectara en el carbono de unión del ciclo con la cadena, se tendría un compuesto espiro. Si la conexión fuera sobre el carbono vecinal de unión del ciclo con la cadena, se tendría un compuesto fusionado. Una conexión en otro carbono distinto a los anteriores genera un puente.

2.5.2 Compuesto heterocíclico

Los compuestos heterocíclicos son compuestos orgánicos cíclicos en los que al menos uno de los componentes del ciclo es de un elemento diferente al carbono. Los átomos distintos de carbono presentes en el ciclo se denominan heteroátomos, siendo más comunes los heteroátomos de nitrógeno, oxígeno y azufre.

Los hidrocarburos alicíclicos, también conocidos como cíclicos, son aquellos formados por átomos de carbono e hidrógeno en cadena cerrada o anillos.

Entre los hidrocarburos alicíclicos se encuentran tres grandes grupos, que son:

- Cicloalcanos
- Cicloalquenos
- Cicloalquinos

2.6 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN AL MEDIO AMBIENTE Y LA SALUD GENERADA POR LOS HIDROCARBUROS

Los derrames de hidrocarburos de petróleo son una de las principales fuentes de contaminación de suelos y aguas ya que ocasionan perturbaciones en los ecosistemas al afectar su estructura y bioprocesos. Este tipo de contingencias ambientales originan efectos directos sobre la biota, ya que el petróleo contiene compuestos químicos tóxicos que producen daños a plantas, animales y humanos, pero principalmente sobre las poblaciones de microorganismos, los cuales representan parte importante del ecosistema y son claves para los procesos biogeoquímicos (Vasudevan y Rajaram, 2001).

La estructura funcional de las comunidades microbianas ha sido ampliamente utilizada como indicador biológico, debido a la sensibilidad a los cambios y a su

capacidad de proveer información que integre diversos factores ambientales (P. Agamuthu, 2013)



CAPÍTULO III: MODELO DE EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE BIORREMEDIACIÓN PARA EL SISTEMA DE BIOPILAS

3.1 ECUACIONES DE DISEÑO DE LA BIOPILA

3.1.1 Cálculo y hoja de trabajo de los datos de la prueba de respiración

La prueba de respiración se realiza para obtener datos para calcular las tasas de degradación de Hidrocarburos en el suelo de la biopila. En la prueba de respiración, los niveles de O₂ se miden en el gas del suelo tomado de los puntos de monitoreo instalados en varias ubicaciones de la biopila.

Las lecturas generalmente se toman hasta que las concentraciones de oxígeno caen por debajo del 7% o hasta que la concentración de O₂ ya no disminuye. Si el O₂ disminuye rápidamente, serán necesarias lecturas más frecuentes que si el O₂ disminuye lentamente. Para determinar la tasa de utilización de oxígeno, el porcentaje de oxígeno se traza frente al tiempo:

$$\frac{dm_{O_2}}{dt} = TUO \times m_{O_2} \quad (3.1)$$

La pendiente de esta línea TUO se conoce como tasa de utilización de oxígeno y se informa como cambio de porcentaje de oxígeno por día. Si los niveles bajos de oxígeno se convierten en un factor limitante para la biodegradación, la pendiente de la línea se nivelará y ya no será indicativa del consumo de oxígeno en relación con la degradación del TPH.

En este caso, solo se utilizará la parte lineal de la curva, generalmente limitada a puntos de datos iguales o superiores al 12% de O₂, para calcular las tasas de biodegradación. La relación estequiométrica entre el consumo de oxígeno y la degradación de TPH usando hexano como compuesto representativo se muestra en la Ecuación 3.2:



Utilizando esta ecuación, se puede estimar la tasa de biodegradación en términos de miligramos de hexano equivalente por kilogramo de suelo por día y calcular con esa tasa el porcentaje de oxígeno que se consume en la ecuación diferencial (3.1)

3.1.2 Tasa de degradación de contaminante generado por la biopila

Según la tasa de utilización de oxígeno, se utiliza la siguiente ecuación para calcular la tasa de degradación:

$$K_B = - \frac{K_O \times a \times \rho_{O_2} \times C}{100} \quad (3.3)$$

Donde:

K_B : tasa de degradación (mg/kg-día)

K_O : tasa de utilización de oxígeno (%/día)

a : Consumo de volumen de aire respecto a la masa de suelo de suelo $\left(\frac{L_{aire}}{Kg_{suelo}}\right)$. Que se da por la siguiente relación:

$$a = \frac{\emptyset_{suelo} * R_{aire-suelo}}{\rho_{suelo}} \quad (3.4)$$

Donde:

$R_{aire-suelo}$: es la relación de consumo de volumen de aire respecto al volumen de suelo que se obtiene con modelos de simulación o datos experimentales $\left(\frac{L_{aire}}{m^3_{suelo}}\right)$

ρ_{suelo} : densidad del suelo $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

\emptyset_{suelo} : Porosidad del suelo

ρ_{O_2} : densidad del gas oxígeno (mg/L). Que se da por la siguiente relación:

$$\rho_{O_2} = \frac{PM_{O_2}}{RT} \quad (3.5)$$

Donde:

P : es la presión de inyección del aire en la biopila (atm)

M_{O_2} : peso molecular del oxígeno ($\frac{gr}{mol}$)

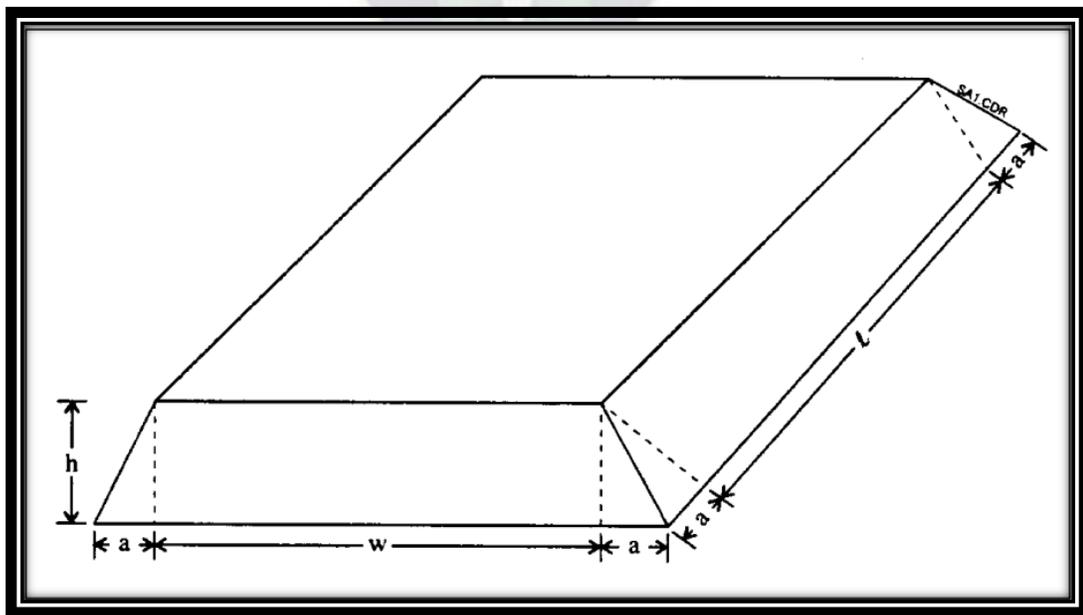
T : Temperatura de inyección del aire (K)

C : relación estequiométrica de masa de hidrocarburo a oxígeno requerida para la mineralización (1/3.5)

3.1.3 Dimensiones de la biopila.

El tamaño de la plataforma se puede dimensionar según el volumen de suelo a procesar y suponiendo una altura y altura de pila promedio.

Figura 3. 1: Dimensiones de la biopila



Fuente: <https://www.frtr.gov/matrix/Biopiles/>, 2023

El volumen de la biopila está representado por la ecuación (3.6) para el volumen de un prismoide:

$$V = \frac{1}{6} h (B_1 + 4\tilde{M} + B_2) \quad (3.6)$$

dónde:

V : volumen de pila

h : altura de la pila

B_1 : área de la base inferior

B_2 : área de la base superior

\tilde{M} : área de la sección media de la biopila

Para las otras constantes:

$$B_1 = (l + 2a)(w + 2a) = lw + 2aw + 2al + 4a^2 \quad (3.7)$$

$$B_2 = lw \quad (3.8)$$

$$M = (l + 2\left(\frac{a}{2}\right))(w + 2\left(\frac{a}{2}\right)) = lw + aw + al + a^2 \quad (3.9)$$

$$V = \left(\frac{h}{6}\right) [(lw + 2aw + 2al + 4a^2) + lw + 4(lw + aw + al + a^2)] \quad (3.10)$$

$$V = h(lw + aw + al + 1.33 a^2) \quad (3.11)$$

$$\frac{V}{h} = (l + a)w + (al + 1.33 a^2) \quad (3.12)$$

Luego:

$$w = \frac{\left[\frac{V}{h} - (al + 1.33 a^2)\right]}{l + a} \quad (3.13)$$

3.2 MODELO DE VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN

3.2.1 Fundamento

La cinética de degradación de la concentración de los hidrocarburos se puede describir con el modelo:

$$R = \frac{\partial C}{\partial t} = -k \cdot C^n \quad (3.14)$$

Donde:

R es la velocidad de reacción

C es la concentración residual oleosa en el suelo

k es la velocidad de reacción constante

n es el orden de reacción¹.

Considerando el modelo de segundo orden (n = 2), la ecuación (3.14) queda:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -k \cdot C^2 \quad (3.15)$$

Integrando se tiene:

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C^2} = -k \cdot \int_0^t dt \quad (3.15.1)$$

$$\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C} = -k \cdot t \quad (3.15.2)$$

Despejando "C", se tiene:

¹ En este estudio, se consideraron los modelos de primer (n = 2) y tercer orden (n = 3), debido a su buen ajuste de los datos

$$C = \left(\frac{1}{C_0} + k \cdot t \right)^{-1} \quad (3.16)$$

Considerando el modelo de tercer orden ($n = 3$), la ecuación (3.14) queda:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -k \cdot C^3 \quad (3.17)$$

Integrando se tiene:

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C^3} = -k \cdot \int_0^t dt \quad (3.17.1)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{C_0^2} - \frac{1}{C^2} \right) = -k \cdot t \quad (3.17.2)$$

Despejando "C", se tiene:

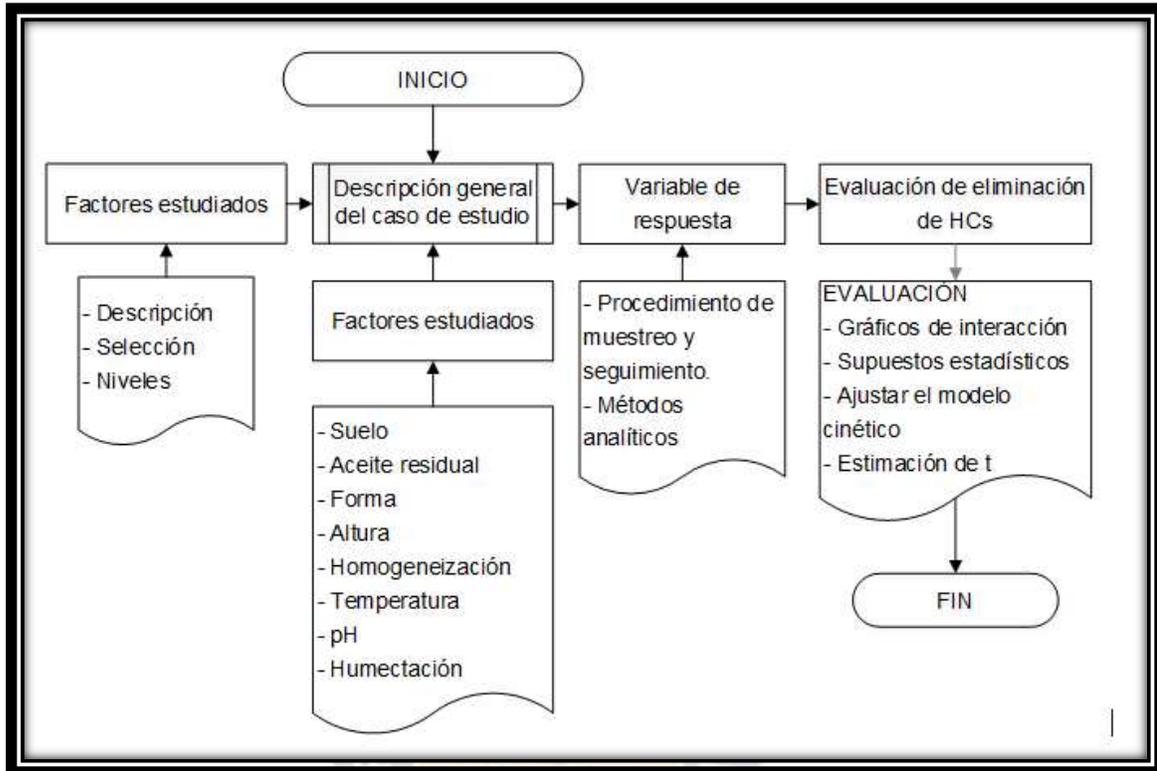
$$C = \left(\frac{1}{C_0^2} + 2k \cdot t \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.18)$$

3.2.2 Algoritmo del proceso

Se sistematiza la evaluación de estudio con contaminantes de hidrocarburos, diferentes escalas y operación de bioestimulación.

Este tipo de diseño es útil para situaciones donde el interés principal es comparar niveles de dos o más factores categóricos. El procedimiento crea un diseño factorial multinivel con ejecuciones en cada combinación de niveles de factores. En ambos casos, se evalúan los efectos de dos factores sobre la variable de respuesta única concentración de hidrocarburos totales de petróleo (CTH). La Figura 3.2 presenta un diagrama heurístico con los pasos de este procedimiento. Luego, se proporciona una descripción de cada paso y detalles.

Figura 3. 2: Diagrama heurístico con los pasos del procedimiento para evaluar la biorremediación de hidrocarburos.



Fuente: Chapter IV: Biopiles. In *How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites. A Guide for Corrective Action Plan Reviewers*, 2017

3.3 CONSUMO DE CRUDO DENTRO DE UN SUELO TÍPICO EN UNA BIOPILA

3.3.1.1 Desarrollo del modelo del consumo de crudo

La descripción matemática del consumo de crudo dentro de un suelo típico en una biopila puede obtenerse a partir de los siguientes principios físicos

- Ley de conservación de la masa
- La cinética de Monod.

La ley de conservación de la masa establece que la materia no puede crearse ni destruirse en un proceso, sino que puede cambiar de una forma a otra mientras la

masa total permanece constante. Sin embargo, en el proceso no se genera petróleo crudo, sino que se consume.

La cinética de Monod se trata de un modelo matemático sencillo que relaciona la tasa de crecimiento específica del microorganismo con la concentración de nutrientes del suelo. La ecuación de Monod considera el nutriente limitante. Es una ecuación empírica que adopta la forma de la ecuación de Michaelis-Menten. La ecuación de Monod es: (P. Agamuthu, 2013)

$$\mu = \frac{\mu_{max}}{k_s + s} \quad (3.19)$$

Dónde:

- μ : constante de crecimiento específico (h^{-1})
- μ_{max} : constante de crecimiento específico máxima
- k_s : constante de velocidad media de reacción
- s = concentración de sustrato limitante (g/L)

Según la ecuación de continuidad:

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{\mu \cdot x}{Y_{x/s}} \quad (3.20)$$

Sustituyendo por x:

$$Y_{x/s} = \frac{x - x_0}{s_0 - s} \quad (3.20.1)$$

$$x - x_0 = Y_{x/s}(s_0 - s) \quad (3.20.2)$$

Poniendo (3.20.2) en (3.19):

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{\mu \cdot [Y_x(s_0 - s) + x_0]}{Y_{x/s}} \quad (3.21)$$

Introduciendo la ecuación de Monod,

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{\mu_{max}}{k_s + s} \frac{[Y_{x/s}(s_0 - s) + x_0]}{Y_{x/s}} \quad (3.22)$$

3.4 MODELO DE SIMULACIÓN DE LA BIOPILA

3.4.1 Relación entre la biorremediación y la temperatura dentro de la pila

Se utiliza la siguiente relación diferencial:

$$\frac{dT}{dt} = -k_T T \left(1 - \frac{T}{T_{min}}\right) \quad (3.23)$$

Donde:

T : temperatura de la biopila (K)

T_{min} : temperatura mínima de alcanzar o ambiente (K)

k_T : constante de velocidad de la disminución de la temperatura de la biopila

t : tiempo de aplicación de la biopila (días)

3.4.2 Modelo de relación entre la temperatura y el calor del aire

Para el flujo de calor:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Delta Q}{mC_p} \quad (3.24)$$

Sustituyendo en la ecuación 3.23:

$$Q = Q_0 - tmC_p k_T T \left(1 - \frac{T}{T_{\min}} \right) \quad (3.25)$$



CAPITULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SUELO A BIORREMIAR DEL CAMPO CARRASCO

Para composición con la biorremediación obtenida anteriormente en la gestión 2020

Tabla 4. 1: Composición con la biorremediación obtenida anteriormente en la gestión 2020

Tratamiento	% Remoción
C1	93,62
C2	90,43
C3	88,36
C4	87,10
C5	82,08
C6	78,67
C7	74,42
C8	71,32

Fuente: YPFB TRANSPORTE, 2020

4.2 PREDICCIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE COMPOSTA

Para la velocidad de biodegradación se utiliza la ecuación 3.16 mencionada en el anterior capítulo²:

$$C = \left(\frac{1}{C_0} + k \cdot t \right)^{-1}$$

Despejando la velocidad de reacción:

² Se aplica los datos de la tabla 4.1 para la obtención de las velocidades respectivas

$$k = \frac{1}{t} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} \right)$$

Para el metano "C1", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{126} \left(\frac{1}{0,01} - \frac{1}{93,62} \right)$$

$$k_{C_1} = 0,7936 \left(\frac{\% C_1}{\text{día}} \right)$$

Para el etano "C2", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{126} \left(\frac{1}{0,01} - \frac{1}{90,43} \right)$$

$$k_{C_2} = 0,7932 \left(\frac{\% C_2}{\text{día}} \right)$$

Para el propano "C3", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{126} \left(\frac{1}{0,05} - \frac{1}{88,36} \right)$$

$$k_{C_3} = 0,1586 \left(\frac{\% C_3}{\text{día}} \right)$$

Para el butano "C4", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{126} \left(\frac{1}{0,04} - \frac{1}{87,10} \right)$$

$$k_{C_4} = 0,1983 \left(\frac{\% C_4}{\text{día}} \right)$$

Para el pentano "C5", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{126} \left(\frac{1}{0,04} - \frac{1}{82,08} \right)$$

$$k_{C_5} = 0,1889 \left(\frac{\% C_5}{\text{día}} \right)$$

Para el hexano "C6", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{126} \left(\frac{1}{0,04} - \frac{1}{78,07} \right)$$

$$k_{C_6} = 0,1934 \left(\frac{\% C_6}{\text{día}} \right)$$

Para el heptano "C7", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{126} \left(\frac{1}{0,037} - \frac{1}{74,42} \right)$$

$$k_{C_7} = 0,2143 \left(\frac{\% C_7}{\text{día}} \right)$$

Para el octano "C8", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{126} \left(\frac{1}{0,04} - \frac{1}{71,32} \right)$$

$$k_{C_8} = 0,2333 \left(\frac{\% C_8}{\text{día}} \right)$$

Para la segunda iteración de la velocidad de biodegradación se utiliza la ecuación 3.18 mencionada en el anterior capítulo³:

$$C = \left(\frac{1}{C_0^2} + 2 k \cdot t \right)^{-\frac{1}{2}}$$

Despejando la velocidad de reacción:

$$k = \frac{1}{2t} \left(\frac{1}{C^2} - \frac{1}{C_0^2} \right)$$

Para el metano "C1", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{2 \times 126} \left(\frac{1}{93,62^2} - \frac{1}{0,01^2} \right)$$

$$k_{C_1} = 39,68 \left(\frac{\% C_1}{\text{día}} \right)$$

Para el etano "C2", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{2 \times 126} \left(\frac{1}{90,43^2} - \frac{1}{0,01^2} \right)$$

$$k_{C_2} = 38,26 \left(\frac{\% C_2}{\text{día}} \right)$$

Para el propano "C3", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{2 \times 126} \left(\frac{1}{88,36^2} - \frac{1}{0,01^2} \right)$$

³ Se aplica los datos de la tabla 4.1 para la obtención de las velocidades respectivas

$$k_{C_3} = 41,23 \left(\frac{\% C_3}{\text{día}} \right)$$

Para el butano "C4", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{2 \times 126} \left(\frac{1}{87,10^2} - \frac{1}{0,01^2} \right)$$

$$k_{C_4} = 42,12 \left(\frac{\% C_4}{\text{día}} \right)$$

Para el pentano "C5", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{2 \times 126} \left(\frac{1}{93,62^2} - \frac{1}{0,01^2} \right)$$

$$k_{C_5} = 42,78 \left(\frac{\% C_5}{\text{día}} \right)$$

Para el hexano "C6", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{2 \times 126} \left(\frac{1}{90,43^2} - \frac{1}{0,01^2} \right)$$

$$k_{C_6} = 42,23 \left(\frac{\% C_6}{\text{día}} \right)$$

Para el heptano "C7", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{2 \times 126} \left(\frac{1}{88,36^2} - \frac{1}{0,01^2} \right)$$

$$k_{C_7} = 43,72 \left(\frac{\% C_7}{\text{día}} \right)$$

Para el octano "C8", en un total de 126 días:

$$k = \frac{1}{2 \times 126} \left(\frac{1}{87,10^2} - \frac{1}{0,01^2} \right)$$

$$k_{C_8} = 44,56 \left(\frac{\% C_8}{\text{día}} \right)$$

Para el cálculo del tiempo de degradación, se utiliza las velocidades de biodegradación y se halla el tiempo de biodegradación en la siguiente tabla:

Tabla 4. 2: Tiempo de biodegradación con MOD 1

Tiempo (días)	C1	C4	C5	C8
10	0,12618089	0,50706585	0,53244438	0,43063903
35	0,0360164	0,14430784	0,15150068	0,12262971
75	0,01680414	0,06728737	0,07063828	0,05718655
85	0,01482687	0,0593661	0,06232226	0,05045503
100	0,01260253	0,0504563	0,05296854	0,04288325
105	0,01200233	0,04805236	0,05044485	0,04084028
110	0,01145671	0,04586708	0,0481507	0,03898312

Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

Tabla 4. 3: Tiempo de biodegradación con MOD 2

Tiempo (días)	C1	C4	C5	C8
10	71,8290951	70,9758741	70,749361	70,1470289
35	47,29706	45,7008298	45,2770626	44,1502025
75	22,8507947	20,5141529	19,8938212	18,244267
85	17,868399	15,3808539	14,7204604	12,9643758
100	10,9157709	8,2176494	7,501352	5,59661086
105	8,71582896	5,95107719	5,21709077	3,2653119
110	6,56767218	3,73785852	2,98659947	0,98889011

Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

Tabla 4. 4: Tiempo de biodegradación con Promedio

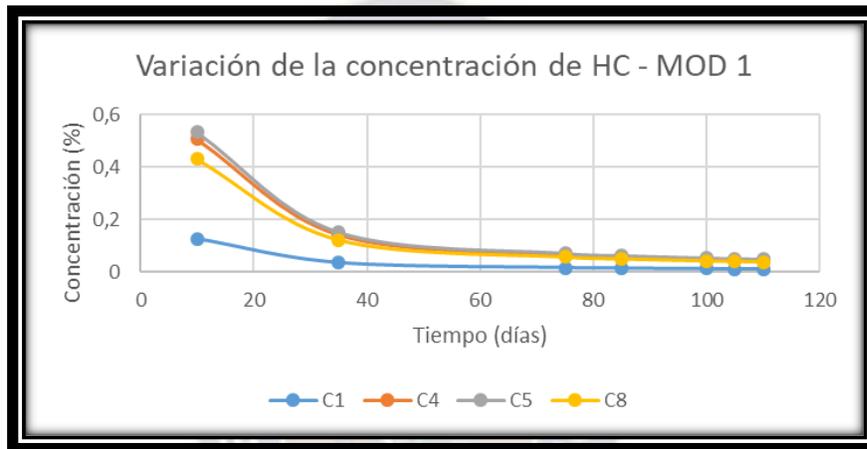
Tiempo (días)	C1	C4	C5	C8
10	35,977638	35,74147	35,6409027	33,288834

35	23,6665382	22,9225688	22,7142816	22,1364161
75	11,4337994	10,2907202	9,98222974	9,15072676
85	8,94161294	7,72011001	7,39139131	6,50741541
100	5,4641867	4,13405285	3,77716027	2,81974705
105	4,36391565	2,99956478	2,63376781	1,65307609
110	3,28956444	1,8918628	1,51737509	0,51393661

Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

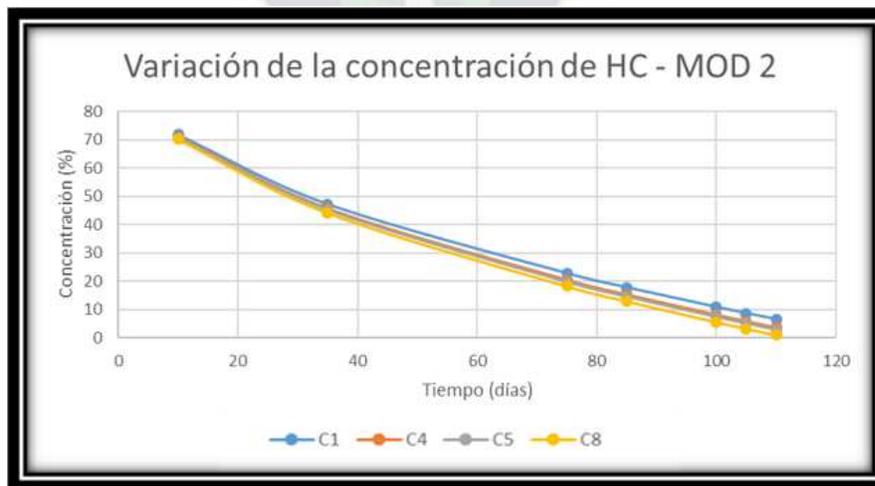
Graficando:

Figura 4. 1: Variación de la concentración de HCs – MOD 1



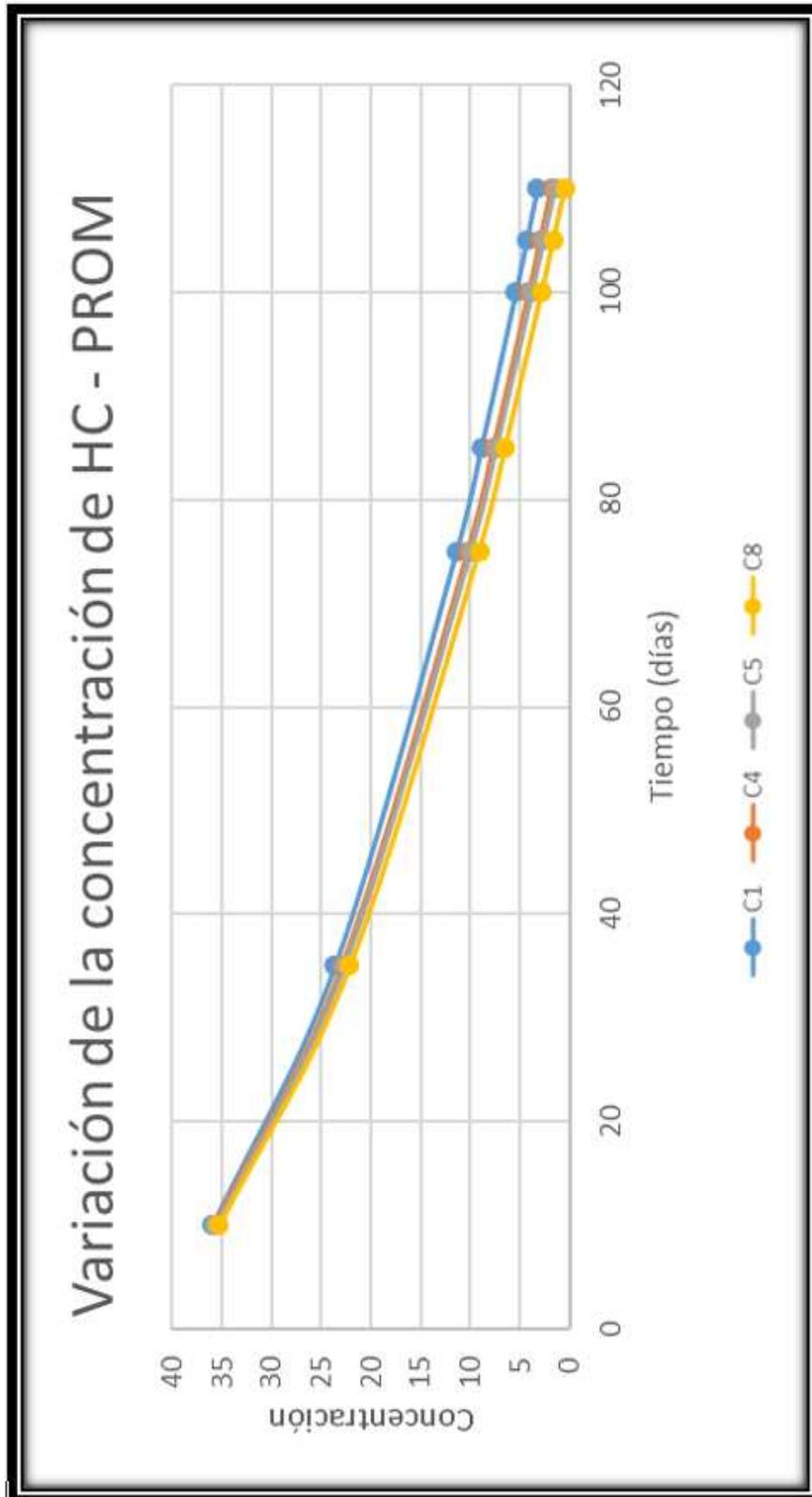
Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

Figura 4. 2: Variación de la concentración de HCs – MOD 2



Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

Figura 4. 3: Variación de la concentración de HCs – Promedio



Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

Para construir la función restrictiva de la concentración utilizamos la regresión lineal que se da para las variables de concentración para cada componente contaminante de la siguiente forma:

$$t_{biodegradación} = \alpha_0 + \alpha_1 C_{C1} + \alpha_2 C_{C4} + \alpha_3 C_{C5} + \alpha_4 C_{C8}$$

Reemplazando para diferentes puntos de la tabla anterior se tiene:

$$10 = \alpha_0 + 35,97\alpha_1 + 34,44\alpha_2 + 35,64\alpha_3 + 33,28\alpha_4$$

$$37 = \alpha_0 + 23,67\alpha_1 + 24,92\alpha_2 + 22,71\alpha_3 + 20,14\alpha_4$$

$$75 = \alpha_0 + 12,43\alpha_1 + 11,29\alpha_2 + 9,98\alpha_3 + 9,15\alpha_4$$

$$85 = \alpha_0 + 8,94\alpha_1 + 8,72\alpha_2 + 7,39\alpha_3 + 7,51\alpha_4$$

$$105 = \alpha_0 + 5,29\alpha_1 + 6,00\alpha_2 + 5,63\alpha_3 + 5,65\alpha_4$$

Llevando a matrices para resolver el sistema lineal se tiene:

$$A \cdot X = B \approx X = A^{-1} \times B$$

Entonces:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 35,97 & 34,44 & 35,64 & 33,28 \\ 1 & 23,67 & 24,92 & 22,71 & 20,14 \\ 1 & 12,43 & 11,29 & 9,980 & 9,150 \\ 1 & 8,94 & 8,720 & 7,390 & 7,510 \\ 1 & 5,29 & 6,000 & 5,630 & 5,650 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 10 \\ 37 \\ 75 \\ 85 \\ 105 \end{bmatrix}$$

Resolviendo con la ayuda de una calculadora científica se tiene:

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 125,186 \\ -4,323 \\ -5,031 \\ 8,987 \\ -3,206 \end{bmatrix}$$

Luego la función del tiempo de degradación en función de los porcentajes de concentración para diferentes compuestos hidrocarburíferos se da por:

$$t_{biodeg} = 125,186 - 4,323 \cdot C_{C1} - 5,031 \cdot C_{C4} + 8,987 \cdot C_{C5} - 3,206 \cdot C_{C8}$$

Para la obtención de la función restrictiva del sustrato, se determina ahora la función del tiempo de disminución de la composta utilizando la ecuación de Monod (3.22) detallada en el capítulo anterior:

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{\mu_{max}}{k_s + s} \frac{[Y_{x/s}(s_0 - s) + x_0]}{Y_{x/s}}$$

La ecuación diferencial anterior es difícil despejar e integrar ya que se convierte en una función implícita, por tanto se procede a aplicar ecuaciones discretas de la siguiente forma:

$$s = s_0 - \Delta t \frac{\mu_{max}}{k_s + s} \frac{[Y_{x/s}(s_0 - s) + x_0]}{Y_{x/s}}$$

Iterando se tiene:

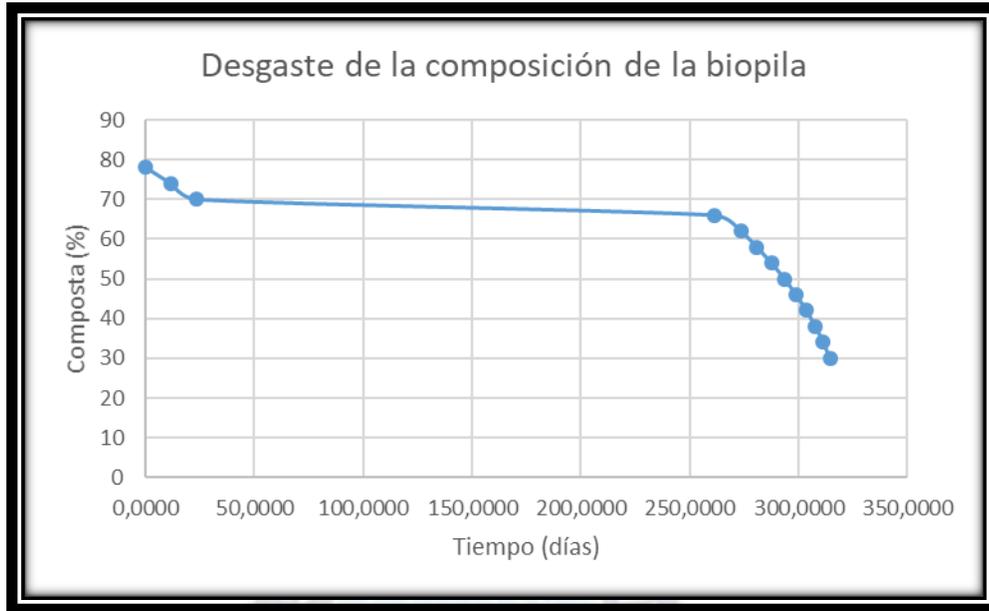
Tabla 4. 5: Tiempo de biodegradación

Tiempo (días)	s
0,0000	78
11,4036	74
23,3076	70
261,3907	66
273,3424	62
280,8194	58
287,5409	54
293,5422	50
298,8766	46
303,5917	42
307,7304	38
311,3310	34
314,4283	30

Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

Graficando se tiene:

Figura 4. 4: Desgaste de la concentración y composición de la biopila



Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

Para la obtención de la relación entre la temperatura y el calor del aire, se determina ahora la función de disminución de calor en la composta utilizando la ecuación de la temperatura y el calor del aire:

$$Q = Q_0 - tmC_p k_T T \left(1 - \frac{T}{T_{\min}} \right)$$

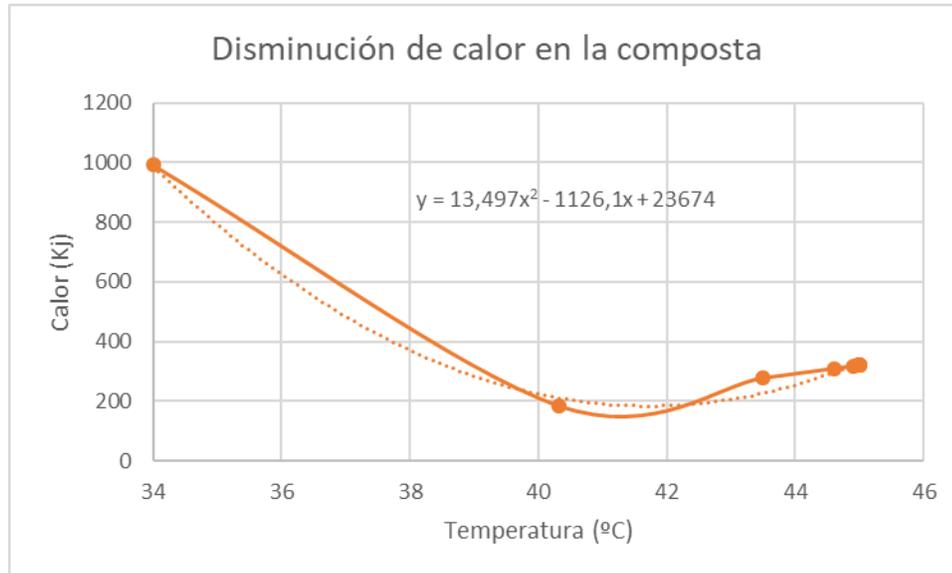
Tabla 4. 6: Relación de Temperatura de la biopila y Calor de aire

Tiempo (días)	T (°C)	Q (Kj)
0	34	991,44
10	40,3164444	184,18752
20	43,5054772	277,179715
30	44,6035915	309,200729
40	44,9022081	317,908387
50	44,9763684	320,070903
60	44,994319	320,594342
70	44,998636	320,720226
80	44,9996726	320,750453
90	44,9999214	320,757709

Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

Graficando la iteración se tiene:

Figura 4. 5: Desgaste de la concentración



Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

$$Q = 13,497 \cdot T^2 - 1126,1 \cdot T + 23674$$

Para la función del pH, se tiene la siguiente tabla de variación de pH para distintas biopilas:

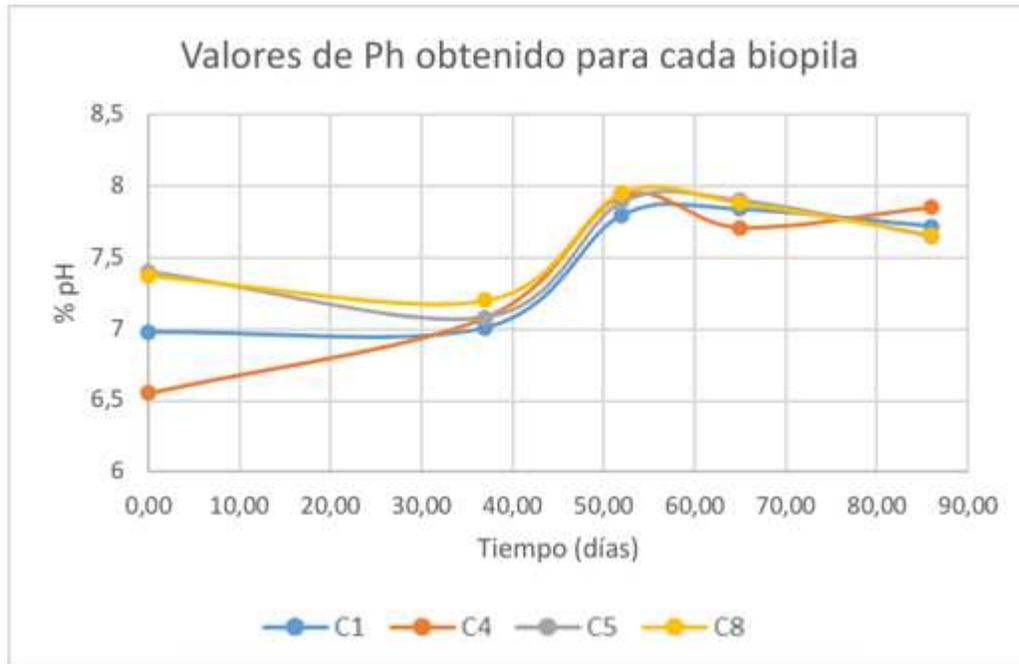
Tabla 4. 7: Variación del pH

Tiempo (días)	% Ph 1	% Ph 2	% Ph 3	% Ph 4
0,00	6,98	6,55	7,4	7,37
37,00	7,01	7,08	7,08	7,2
52,00	7,8	7,93	7,89	7,95
65,00	7,84	7,71	7,9	7,88
86,00	7,72	7,85	7,65	7,66

Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

Graficando se puede observar:

Figura 4. 6: Variación del pH para distintas concentraciones de biopila



Fuente: Elaboración propia en base a Excel, 2023

Para representar la función utilizamos la siguiente expresión polinomial:

$$t_{biodeg} = a_0 + a_1 \cdot pH + a_2 \cdot pH^2 + a_3 \cdot pH^3$$

Reemplazando los puntos de la anterior tabla se tiene:

$$0 = a_0 + a_1 \cdot 6,98 + a_2 \cdot 6,55^2 + a_3 \cdot 7,4^3$$

$$37 = a_0 + a_1 \cdot 7,01 + a_2 \cdot 7,08^2 + a_3 \cdot 7,01^3$$

$$52 = a_0 + a_1 \cdot 7,93 + a_2 \cdot 7,95^2 + a_3 \cdot 7,8^3$$

$$65 = a_0 + a_1 \cdot 7,72 + a_2 \cdot 7,85^2 + a_3 \cdot 7,65^3$$

De la misma forma como se ha obtenido la función de concentración, se obtiene las constantes para la función de pH en el tiempo:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -222,74 \\ -188,11 \\ 141,20 \\ 82,547 \end{bmatrix}$$

Luego se obtiene la siguiente función:

$$t_{biodeg} = -2222,74 - 188,11 \cdot pH + 141,20 \cdot pH^2 + 82,55 \cdot pH^3$$

4.3 GEOMETRÍA ÓPTIMA DE LA BIOPILA

La relación del volumen de la biopila según el anterior capítulo es:

$$V = h (lw + aw + al + 1.33 a^2)$$

4.3.1 Construcción de la función de Lagrange

Siguiendo lo indicado en el capítulo anterior se llega a construir la siguiente función:

$$\begin{aligned} L_p(l, h, a, w, s, t, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4) &= h (lw + aw + al + 1.33 a^2) \\ &+ \lambda_1 \left(-t + \frac{1}{\mu_{max}} \cdot \left\{ (s - s_0) + \left(s_0 + \frac{x_0}{Y_{x/s}} + k_s \right) \cdot \ln \left[1 - \frac{Y_x}{x_0} (s - s_0) \right] \right\} \right) \\ &+ \lambda_2 (-t_{biodeg} + 125,186 - 4,323 \cdot C_{C1} - 5,031 \cdot C_{C4} + 8,987 \cdot C_{C5} \\ &- 3,206 \cdot C_{C8}) + \lambda_3 (-Q + 13,497 \cdot T^2 - 1126,1 \cdot T + 23674) \\ &+ \lambda_4 (t_{biodeg} = -2222,74 - 188,11 \cdot pH + 141,20 \cdot pH^2 + 82,55 \cdot pH^3) \end{aligned}$$

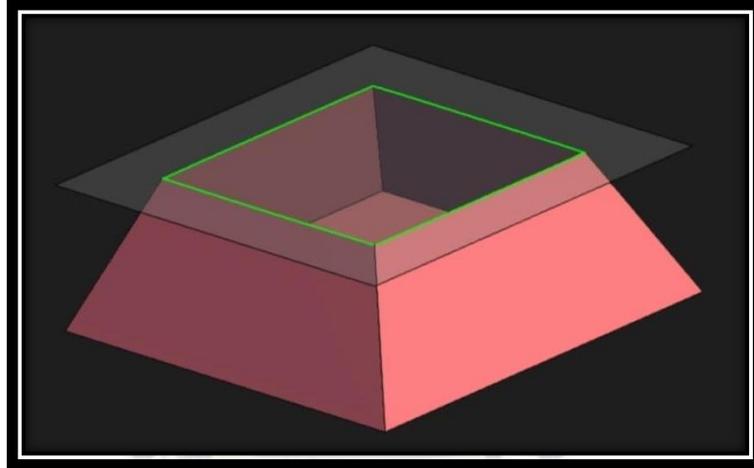
4.3.2 Obtención de las derivadas parciales

Las derivadas que se deben obtener son:

$$\frac{\partial L_p}{\partial h} = 0; \frac{\partial L_p}{\partial l} = 0; \frac{\partial L_p}{\partial w} = 0; \frac{\partial L_p}{\partial a} = 0; \frac{\partial L_p}{\partial t} = 0; \frac{\partial L_p}{\partial \lambda_1} = 0; \frac{\partial L_p}{\partial \lambda_2} = 0; \frac{\partial L_p}{\partial \lambda_3} = 0$$

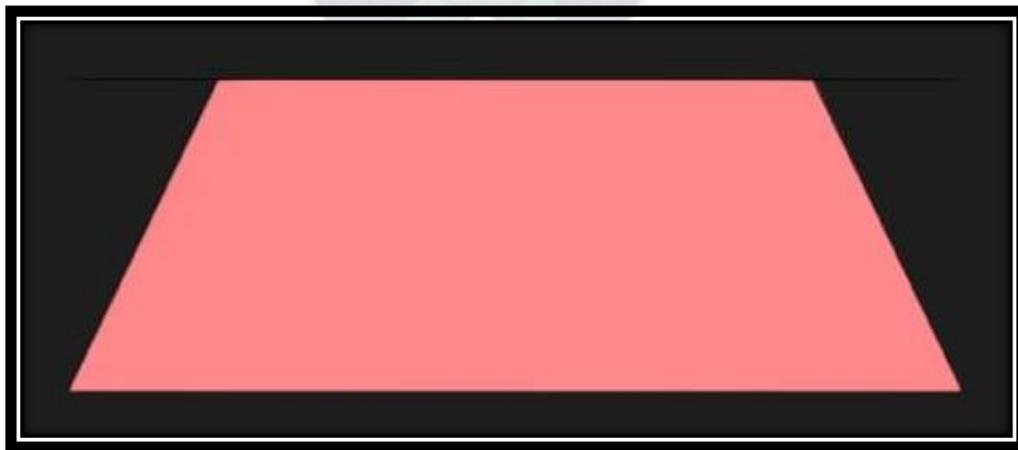
Obteniendo los diseños optimizados se tiene las siguientes gráficas

Figura 4. 7: Vista en 3D de la biopila optimizada



Fuente: Elaboración propia en base a optimización de biorremediación, 2023

Figura 4. 8: Vista lateral de la biopila optimizada



Fuente: Elaboración propia en base a optimización de biorremediación, 2023

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se ponen los siguientes resultados técnicos

4.4.1 Preparación de terreno y bases

- ✓ La Biopila debe ubicarse sobre una estructura de cemento la cual cumple tres condiciones principales.
 1. Provee una fundación estable para soportar la biopila y el manejo de suelo que debe realizarse.
 2. Actúa como barrera contra posible migración de contaminantes hacia las napas inferiores.
 3. Evita acumulación de lixiviados en la misma ya que su diseño, prevee una pendiente de 1 a 2 %.
- ✓ El espesor de dicha base es aproximadamente de 20 cm y el material más usualmente utilizado es concreto.
- ✓ Esta base debe ser hecha sobre un terreno muy firme, es decir un suelo muy bien consolidado de espesor aproximado entre 40 ó 50 cm.
- ✓ Deberá estar provisto también de una valla de concreto de 15 ó 20 cm de altura para evitar el derrame de material fuera del área de tratamiento.
- ✓ Uno de los extremos debe ser abierto para permitir el acceso a la biopila para carga y/o descarga de material.
- ✓ El modo de construcción de la biopila es por capas, es decir se coloca unos centímetros de suelo a tratar hasta donde deben ir los primeros caños de aireación, se enrosca los caños perforados y luego se continua con otra capa de suelo, hasta llegar a la altura de diseño de la biopila.

4.4.2 Sistema de aireación

Es la base para un proceso degradativo exitoso ya que todos los factores metabólicos el oxígeno es el más importante, existen dos formas de realizarlo:

METODO PASIVO: consiste en instalar tubos perforados en distintas alturas de la biopila, estos se unen, todos en un extremo de la misma y están abiertos

directamente al aire ambiente permitiendo la transferencia de aire por las corrientes naturales.

Este sistema si bien es más conocido es muy ineficiente por tanto prácticamente no se utiliza.

METODO ACTIVO: es más costosa ya que se requiere de un soplador para el movimiento del aire, pero es preferible debido a que permite controlar el flujo de aire a través de la biopila aumentando la velocidad de degradación.

Inyección de aire o por Extracción de aire.

Ambas configuraciones tienen caños perforados ubicados en la base de la biopila que están conectados a un soplador para empujar el aire a través de ella en el caso de la inyección o para extraer aire en el caso de extracción.

El flujo de aire debe estar justo por encima de la condición limitante para evitar evaporación, tal cantidad previene la volatilización de los hidrocarburos ya que se reduce las emisiones de vapor.

Como consideración de diseño se considera que, para el caso de que la altura de la biopila no supere los 3 metros, un solo nivel de caños ubicados en la base de la misma es suficiente.

4.4.3 Sistema de riego

Una de las opciones aconsejables es agregar agua mientras se prepara el suelo o cuando la biopila se está construyendo, no obstante, es importante tener la instalación armada para cuando sea necesario ajustar el contenido de humedad.

El sistema de goteo se aplica a muy baja velocidad para prevenir la formación de zonas inundadas o canalizaciones que pueden originarse con muy altos caudales.

Consiste de un grupo de caños perforados distribuidos uniformemente sobre la superficie de la biopila.

Los mismos deben estar conectados a la red principal mediante un sistema de acople rápido o roscado de manera que puedan ser removidos cuando sea necesario.

Ventajas:

- ✓ Es un método eficiente de distribuir el riego.
- ✓ Permiten manejar caudales minimizando los inconvenientes de canalización.
- ✓ Se puede operar en forma automática.

Desventajas:

- ✓ Mayor costo inicial.
- ✓ Mayor tiempo de instalación.
- ✓ La medición de caudal es suficiente un rotámetro.

4.4.4 Recolección de lixiviado

En todo el perímetro de la biopila debe construirse una barrera de contención.

Su finalidad es acumular el lixiviado, debido a la pendiente prevista, en la base drenará hacia un extremo donde será recolectado en un tanque pulmón.

Utilizando para el vaciado una pequeña bomba que lo succionara enviándolo hacia el tanque de almacenaje.

Una ventaja que se tiene al tener un tanque de recolección es que se puede armar un circuito cerrado de manera que la humectación de la biopila que se recicle el agua.

El monitoreo se realiza antes y durante el funcionamiento.

Antes, para determinar las condiciones de partida y en función a ello realizar los ajustes que sean necesarios en parámetros tales como dilución de la concentración, humedad, nutrientes, pH, etc.

Durante, para evaluar el proceso y optimizar la evolución del proceso.

Los puntos de muestreo se prevén en el momento de la formación de la biopila de manera que en el momento de la toma de muestra solo deberá colocarse el muestreador mediante un sistema de acople rápido.

Se debe tener un muestreador por aproximadamente cada 50 m³ de suelo contaminado distribuidos a distintas alturas y posiciones.



CAPÍTULO V: EVALUACIÓN TÉCNICO Y ECONÓMICO

5.1 EVALUACIÓN TÉCNICA

5.1.1 Análisis FODA

A continuación, representa el siguiente análisis de fortalezas, oportunidades debilidades y amenazas sobre el estudio e implementación de una biopila:

Tabla 5. 1: Análisis FODA

FORTALEZA	DEBILIDADES
<ul style="list-style-type: none">➤ Se puede calcular el volumen y composición indirectamente desde gabinete sin necesidad de estar en el lugar de la instalación .➤ Excelente control y manejo de datos.➤ Existe personal totalmente capacitado para la programación de métodos cuantitativos en macros Excel.➤ La idea es innovadora.➤ Se cuenta con Tecnología adecuada (computadoras, equipos, válvulas)➤ Existen profesionales que se capacitan a diario para el control cuantitativo ambiental .➤ Relativamente económico	<ul style="list-style-type: none">❖ Se debe seguir periodos estrictos de control en campo e implica un costo.❖ Falta de presupuesto para Innovación y compra de Software.

➤ También sirve como una propuesta de control ambiental para evitar emisiones de gases al medio ambiente.	
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
✓ Se predice las concentraciones con las que debe y la concentración final de hidrocarburo que tendrá determinada área.	• Pueden existir nuevos métodos de biorremediación con técnicas más sencillas.

Fuente: Elaboración propia en base a propuesta planteada, 2023

Se puede observar que existen más aspectos positivos que negativos por lo tanto el proyecto cualitativamente es factible. Pero, puede que el proyecto sea fácil de implementar y controlar, pero también tenemos que ver si es rentable económicamente y se lo analizará en el siguiente punto.

5.2 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA

5.2.1 Costos fijos

A continuación, se presentan los costos fijos considerando los costos de simulación y los costos de los equipos de la biopila:

Tabla 5. 2: Análisis de costos fijos

COSTOS FIJOS EN BOLIVIANOS		
COSTOS FIJOS	Mensual	Tipo
SERVICIOS BÁSICOS	10.000	adm
MANO DE OBRA DIRECTA (MOD)	37.500	adm
MANO DE OBRA INDIRECTA (MOI)	14.000	adm
SEGURIDAD AMBIENTAL	12.500	adm
INSTALACIÓN DE BIOPILA	20.000	operativo

GASTOS GRALES. DE LEVANTAMIENTO DE DATOS	5.000	Ventas
IMPUESTOS	7.000	
TOTAL COSTO FIJO MES	106.000	

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

El costo fijo de levantamiento del proyecto para el proceso de biorremediación con biopilas anual es de 106.000 Bolivianos.

5.2.2 Costos Variables con pérdidas

A continuación, se presentan los costos variables que con el volumen necesario para el proceso de biorremediación considerando los costos de implementación de una biopila para la biorremediación de suelos en el campo determinado.

Tabla 5. 3: Costos variables

COSTOS VARIABLES EN BOLIVIANOS			
COSTOS VARIABLE	Cantidad	V/r Unit	Mensual
Accesorios	10	200,00	2.000
Soldadura	2	10.000,00	20.000
Compresor de aire	3	14.000,00	42.000
Equipos de seguridad	8	1.000,00	8.000
Productos químicos	6	4.000	24.000
TOTAL COSTO VARIABLE MES			98000

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

Los costos variables analizados tomados en cuenta para un mes para el proceso de biorremediación de suelos con sistema de biopilas tiene un costo variable mes total de 98000 Bolivianos.

5.2.3 Depreciación anual del proyecto

Para la inversión inicial del proyecto se cuenta con la siguiente tabla:

Tabla 5. 4: Depreciación anual del proyecto

PROPIEDAD	Valor	Vida Útil/ Años	Depreciación Anual
Compresor de aire	80000	8	10000
Computadora	3800	4	950
Total	83800		10950

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

La depreciación anual del proyecto es de 10950 Bolivianos.

5.2.4 Inversión inicial del proyecto

Se tiene la siguiente tabla donde se describe la inversión total del proyecto:

Tabla 5. 5: Capital de trabajo

COSTOS FIJOS	106000
COSTOS VARIABLES AL MES	98000
TOTAL COSTOS Y GASTOS	204000
DEPRECIACIÓN	10950
Compresores de aire	80000
Software	10000
TOTAL INVERSION INICIAL	304950

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

La inversión inicial del levantamiento de datos, la simulación la compra de nuevos equipos de biorremediación y la instalación de la biopila y análisis cuantitativo predictivo para el proceso de biorremediación ex situ es de 304950 Bolivianos.

5.2.5 Estudio de TIR y VAN

5.2.5.1 Estudio del Van

Se puede desarrollar un proyecto de inversión cuando el valor actual neto total (VAN o NVP) de todos los flujos de efectivo es positivo, y un proyecto de inversión se rechaza cuando el VAN es negativo. Para calcular el VAN se determinan todos los flujos de efectivo y los flujos de efectivo futuros se recalculan al valor actual del dinero descontándolos por la tasa de interés. La fórmula que se suele mencionar para calcular el VAN es:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=0}^T \frac{X_t}{(1+r)^T} \quad (5.1)$$

Donde:

VAN = Valor Actual neto

I_0 = Inversión inicial en Bs

FC = Flujo de efectivo de cada año en \$us cada año en Bs

r = interés en tanto por 1, en nuestro proyecto se considera 15% de interés en tanto por 1.

El flujo de caja será la utilidad estimada en Bs como parte de los ingresos generados para el presupuesto generados por la venta de gas natural en las redes de distribución. Los ingresos son altos, pero se estima que se destina medio millón en proyectos nuevos, por tanto

Tabla 5. 6: Flujo de caja por año por venta de urea para demostrar el VAN

Años	Flujo de Caja [Bs]
2024	500000
2025	500000

Fuente: Elaboración propia, 2023

Por lo tanto, proyectando para dos años se tiene:

$$VAN = -304950Bs + \frac{500000}{(1 + 0.15)^1} + \frac{500000}{(1 + 0.15)^2}$$

$$VAN = 506314$$

El proyecto está proyectado para su financiamiento en 2 años; por lo tanto, para hallar el VAN, recurrimos al siguiente criterio:

- Si $VAN > 0$ ES RENTABLE
- Si $VAN = 0$ ES INDIFERENTE
- Si $VAN < 0$ NO ES RENTABLE

Por lo tanto:

$$VAN = 506314 > 0 \text{ Por lo tanto es rentable}$$

5.2.5.2 Estudio del TIR

La TIR se puede definir como la tasa de descuento a la que el valor presente de todos los flujos de efectivo futuros (o beneficios hipotéticos esperados monetizados) es igual a la inversión inicial, es decir, la tasa a la que una inversión se equilibra. Se puede utilizar para medir y comparar la rentabilidad de las inversiones.

El TIR se calcula con la siguiente fórmula:

$$\sum_{n=0}^N \frac{FC}{(1 + TIR)^n} - I_0 = 0 \quad (5.2)$$

Reemplazando se tiene:

$$0 = -304950 \text{ Bs} + \frac{500000}{(1 + TIR)^1} + \frac{500000}{(1 + TIR)^2}$$

Resolviendo:

$$304950 \text{ Bs} = \frac{500000}{(1 + TIR)^1} + \frac{500000}{(1 + TIR)^2}$$

$$304950(1 + 2 * TIR + TIR^2) = 500000 * (1 + TIR) + 500000$$

Iterando se tiene:

$$TIR = 94,26 \%$$

Por lo tanto, como el TIR es > a la Tasa de descuento de 15% (0,15). El proyecto es factible.

5.2.6 Análisis de costo y beneficio

La siguiente tabla puede usarse como indicador para determinar si los costos de implementación de una biopila óptima tiene los siguientes beneficios:

Tabla 5. 7: Interpretación de Costo y beneficios

CRITERIO	DESCRIPCION	SIGNIFICADO
B/C > 1	Los ingresos son mayores que los egresos	El proyecto es aconsejable
B/C = 1	Los ingresos son iguales que los egresos	El proyecto es indiferente
B/C < 1	Los ingresos son menores que los egresos	El proyecto no es aconsejable

Fuente: Elaboración propia, 2023

Por lo tanto, usando la ecuación:

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Beneficios}}{\text{Inversión inicial}}$$

Para los dos años de financiamiento:

$$\frac{B}{C} = \frac{[500000]Bs}{304950 Bs}$$

$$\frac{B}{C} = 1,64$$

Se obtiene una relación mayor al criterio mínimo para la inversión, por lo tanto, el proyecto es factible ya que sobraré dinero después de la implementación del proyecto en la recuperación de dos años.

5.2.7 Resumen de las variables de rentabilidad

Se tiene el siguiente recuadro que relaciona el TIR, el VAN y la relación de costos y beneficios:

Tabla 5. 8: Parámetros económicos

FLUJO DE CAJA LIBRE	
VALOR PRESENTE NETO	506314
TIR	94,26 %
Rel Ben / Costo	1,64

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

Se observa que la relación costo beneficio es de 1,64 con lo cual se puede afirmar que la utilidad es alta y afirmar que el proyecto se financiará en menos de dos años y el TIR equivale al 94 % porque los costos estarán cubiertos cada año.



CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Después de una cuidadosa deliberación, se extraen las siguientes conclusiones:

- Se ha explicado detalladamente de forma clara y comprensible el uso de la biorremediación ex situ y las biopilas como medio para hacer frente a la contaminación del suelo causada por las actividades de la industria petrolera.
- Teniendo en cuenta el tipo de compost y diferentes variables como la temperatura y las características geométricas, la tasa de biodegradación se puede medir cuantitativamente. Esta medición arroja valores de degradación de 0,26 g de petróleo por día a 0,40 considerando la tasa de degradación.
- Se determinó que el tamaño ideal de la biopila para el Campo Carrasco es de 5m de largo, por 4 de ancho y 2,5 metros de diagonal con 45° de inclinación, por tener un volumen de residuos altos y por tener las siguientes características como una selección de una buena composta y un tiempo de degradación de la biopilas de 120 días.
- De acuerdo a la simulación de biorremediación se identificó los siguientes parámetros de variación del pH del suelo que cambia de 7 a 8 en menos de 10 días y la validación del modelo se representa con varios modelos polinomiales, y no así con una ecuación que represente todas las fases. Considerando que el tiempo establecido del tratamiento es de 125 días aproximadamente demostrando que es menor que el proceso de landfarming que dura en promedio de 200 a 250 días de aplicación.

- De acuerdo a los siguientes tipos de compost se tiene los siguientes parámetros de tratamiento; los cuáles deben mezclarse, filtrarse y ser una masa sólida para poder construir la biopila. Con estos anteriores, se tienen los siguientes resultados:
 - Compost 1: Preparado sólo con residuos orgánicos vegetales y animales.
 - Compost 2: Preparado con desechos y productos fermentados.
 - Compost 3: Preparado con desechos orgánicos y hongos silvestres.
- Se ha determinado la velocidad de biodegradación considerando optar por el compost 3 ya que elimina los contaminantes en un tiempo de 119 días, el compost presenta una velocidad de 0.27 %f/día.
- El mejor sistema de biopilas optimizado con la mayor velocidad de degradación de 0.27 posee la factibilidad de eliminar fluidos contaminantes en 119 días y debe ser aplicado con el compost 3.
- Considerando que en el Campo Carrasco se ha implementado el proceso de Landfarming, el cual tiene una velocidad de degradación de suelos de 0.15 %f/día la que es menor a la variación de fluidos respecto al tiempo del sistema de biopilas .
- La inversión inicial del proyecto total es de 500000 Bs, cuyo valor del VAN es de 506314 lo cual indica que es factible, pero el valor del TIR del 95% indica que el costo de inversión se recupera en un año. Lo cual el proyecto es rentable

- Se llega a cumplir la hipótesis donde se afirma que recuperar exitosamente el suelo contaminado en el Campo Carrasco, el mejor método de aplicación es emplear sistemas de biopilas basados en un análisis de las tasas de biodegradación, asegurando así una biorremediación eficiente y se demuestra con datos optimizados y una representación gráfica del mismo.

6.2 RECOMENDACIONES

Luego de analizar la tasa de biodegradación, podemos definir como resultado que la implementación de sistemas de biopilas es una opción viable para proponer un proceso de biorremediación para abordar la contaminación del suelo causada por hidrocarburos en la zona de Campo Carrasco.

Para mejorar la eficiencia de las biopilas en la reducción de la concentración de hidrocarburos, se recomienda mejorar las metodologías de diseño y cálculo considerando las propiedades del compost y la cantidad de oxígeno requerida. Se sugiere incorporar software 3D con capacidades de predicción de temperatura a lo largo del tiempo para la planificación de costos y la programación de mantenimiento de la biopila. Además, es esencial evaluar si la biopila logra con éxito su objetivo de disminuir los niveles de contaminantes líquidos en el suelo.

Se recomienda el uso de herramientas para análisis cuantitativo preciso para el diseño de biopilas debido a que los métodos de investigación que se usan son estandarizados genéricos que no atienden las necesidades específicas de los sitios contaminados.

BIBLIOGRAFÍA

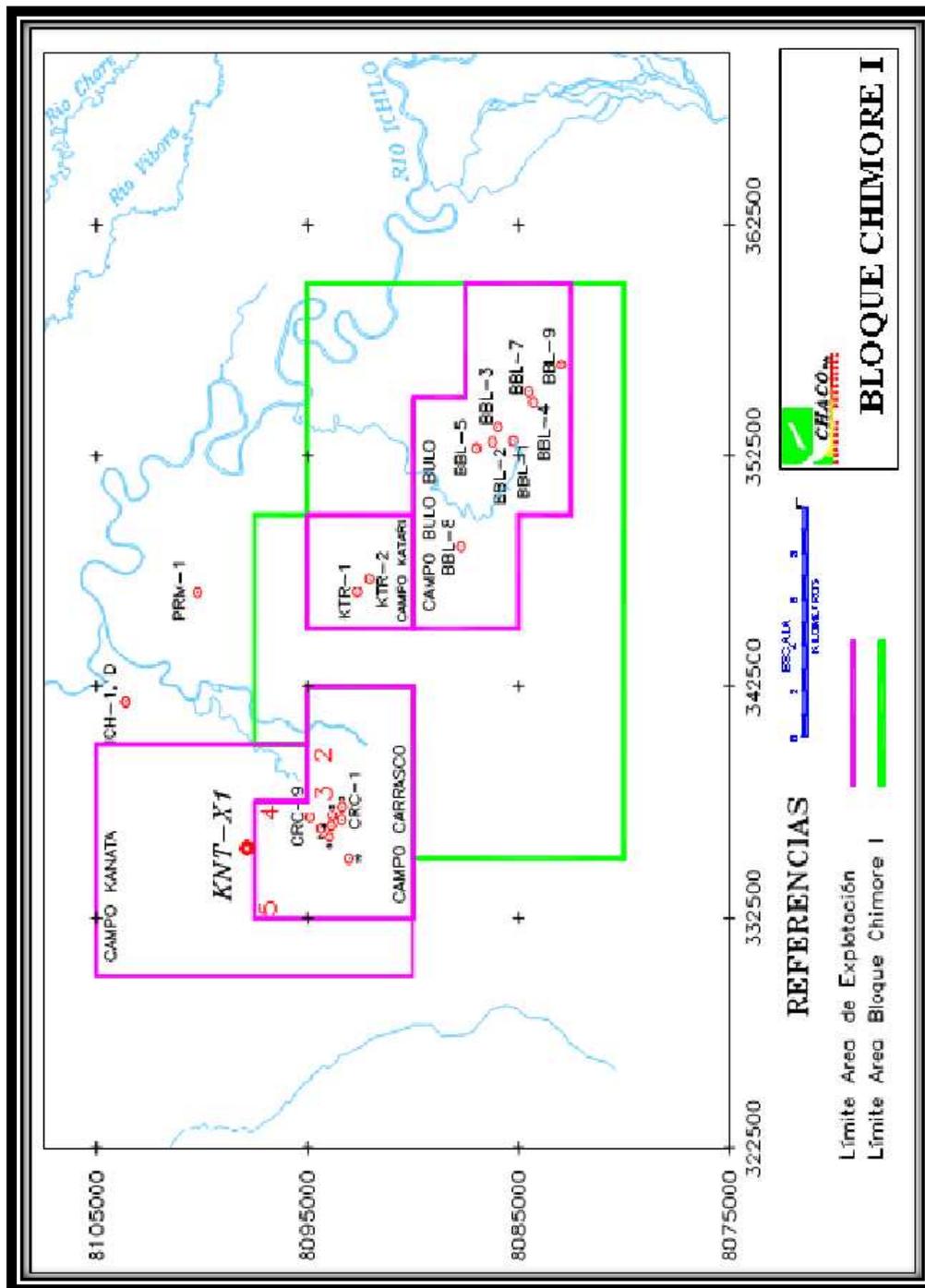
- ANH. (18 de junio del 2018). Agencia Nacional de Hidrocarburos obtenido de ANH: <https://www.anh.gob.bo/w2019/contenido.php?s=5&O=2068>
- Amellal, N. (2001). *Effect of soil structure on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons within aggregates of a contaminated soil*. *Geochem.*
- Bento, F. (2005). *Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation*. *Technol.*
- Bronick, C. (2005). *Soil structure and management: a review*. *Geoderma*.
- Calvo, C. (2009). *Application of bioemulsifiers in soil oil bioremediation processes, Future prospects*. *Total Environ.*
- Cerqueira, V. (2014). *Comparison of bioremediation strategies for soil impacted with petrochemical oily sludge**Int. Biodeterior. Biodegradation.*
- Chaîneau, C. (2005). *Effects of nutrient concentration on the biodegradation of crude oil and associated microbial populations in the soil* *Biol. Biochem.*
- Delille, D. (2007). *The influence of temperature on bacterial assemblages during bioremediation of a diesel fuel contaminated subAntarctic soil**cold. Reg, Sci. Technol.*
- Gallego, J. (2006). *Natural attenuation and bioremediation of prestige fuel oil along the Atlantic coast of Galicia (Spain)*. Galicia, España: *Geochem.*
- Gallego, J. (2010). *Weathering processes only partially limit the potential for bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils**org. Geochem.*
- Gutiérrez Benítez Omar, D. J.-R.-R. (2021). *Cinética de la degradación de hidrocarburos mediante biopilas a escala de banco*. Cuba: Departamento de Gestión e Ingeniería Ambiental. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos.
- Larter, S. (2012). *A practical biodegradation scale for use in reservoir geochemical studies of biodegraded oils*. *Geochem.*
- Li, H. (2007). *Dynamic changes in microbial activity and community structure during biodegradation of petroleum compounds: a laboratory experiment* *J. China: Environ. Sci.*

- Lladó, S. (2013). *Comparative assessment of bioremediation approaches to highly recalcitrant PAH degradation in a real industrial polluted soil* J. Hazard, Mater.
- MR CFD. (2021). *Population Balance Model (PBM)*. Obtenido de <https://www.mrcfd.com/services/population-balance-model-pbm/>
- Norma Boliviana (NB) 65001:2013, “Calidad de suelos – Límites máximos permisibles en suelos donde exista actividad con presencia de hidrocarburos”.
- P. Agamuthu, Y. T. (2013). *Bioremediation of hydrocarbon contaminated soil using selected organic wastes*. Kuala Lumpur, Malaysia: Institute of Biological Sciences, Faculty of Science, University of Malaya.
- R. (2000). *Boopathy Factors limiting bioremediation technologies*. Technol.
- Real, D. (2007). *Simulación matemática de un digestor anaerobio tipo tanque agitado para el tratamiento de vertidos residuales*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería Química, Universidad Veracruzana.
- Rodríguez, G., José Luis, Sánchez M., (2005). *Biorremediación. Artículo: Fundamentos y aspectos microbiológicos*
- Samson, R., Greer, C., Hawkes, T., Desrochers, R., Nelson, C., & Stcyr, M. (1995). *Monitoring an Aboveground Bioreactor at a Petroleum Refinery Site Using Radiorespirometry and Gene Probes: Effects of Winter Conditions and Clayey Soil*. New York: Lewis Publishers.
- Skladany, G. J., & Metting, F. (1993). *Bioremediation of contaminated soil*. New York: Marcel Dekker Editorial.
- Vinas, M., Grifoll, M. Sabate, J. & Solanas, A.M. (2002) *Biodegradation of a crude oil by three microbial consortia of different origins and metabolic capabilities*.
- YPFB Corporación. (s.f.). *Yacimientos petrolíferos Fiscales Bolivianos*. Recuperado el 30 de Agosto de 2021, de <https://www.ypfb.gob.bo/comercializacion/index.php/que-es-la-urea>
- Zitrides. (2020). *Advanced Measurement Cells For Automated Quantification of Biodegradative Microbial Oxygen Uptake in Fluid, Semi-Solid and Solid Media*. Science Direct.

ANEXOS

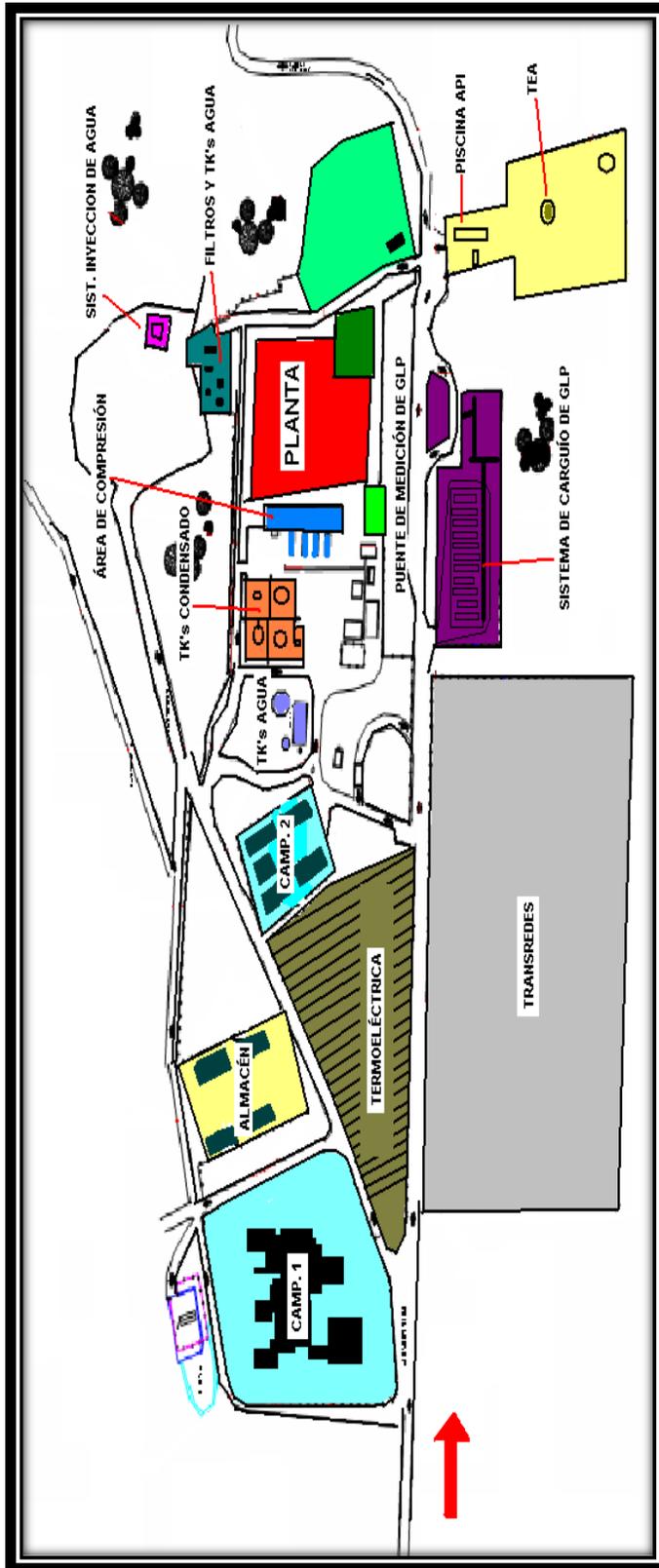
Anexos A: Datos del campo Carrasco

Figura A. 1: Bloque Chimoré I



Fuente: YPFB Chaco, 2022

Figura A. 2: Campo Carrasco



Fuente: YPFB Chaco, 202

NOMBRE: RUBEN PRINCE VILLARROEL RODRIGUEZ

CELULAR: 77768287

CORREO ELECTRONICO: rubenbens2020@gmail.com



2024-11ES-637-D-1

DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-1804/2024
La Paz, 19 de junio de 2024

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **12 de junio de 2024**, por **RUBEN PRINCE VILLARROEL RODRIGUEZ** con C.I. N° **9896460 LP**, con número de trámite **DA 1029/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"SISTEMAS DE BIOPILAS PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN LA ZONA DEL CAMPO CARRASCO BASADO EN EL ANÁLISIS DE VELOCIDAD DE BIODEGRADACIÓN"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO:

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena"*



fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO:

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"SISTEMAS DE BIOPILAS PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN LA ZONA DEL CAMPO CARRASCO BASADO EN EL ANÁLISIS DE VELOCIDAD DE BIODEGRADACIÓN"** a favor del autor y titular: **RUBEN PRINCE VILLARROEL RODRIGUEZ** con C.I. N° **9896460 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/Im

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI
CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO
DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS
LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



4c3y2Xd5xb74H

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB www.senapi.gob.bo/verificacion Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz
Av. Morales, N° 575,
entre Eje. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Telfs.: 2115200
2119206 - 2119251

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
Amalargación Quijano,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Telfs.: 3117152 - 73042936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 130,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telfs.: 4141403 - 73942957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Lda. Piso 2, Of. 5B,
Zona 16 de Julio.
Telfs.: 2141001 - 73940029

Oficina - Chapaca
Calle Kilómetros 1, N° 366
casí esq. Urinlagallá,
Zona Parque Bolívar.
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calle Ciro Trigo y Ruana
Edif. Santa Clara, N° 243.
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre, N° 5832,
entre Ajacucho
y Janin, Galería Central,
Of. 14.
Telf.: 6707288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM, Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 17.
Telf.: 72018160

