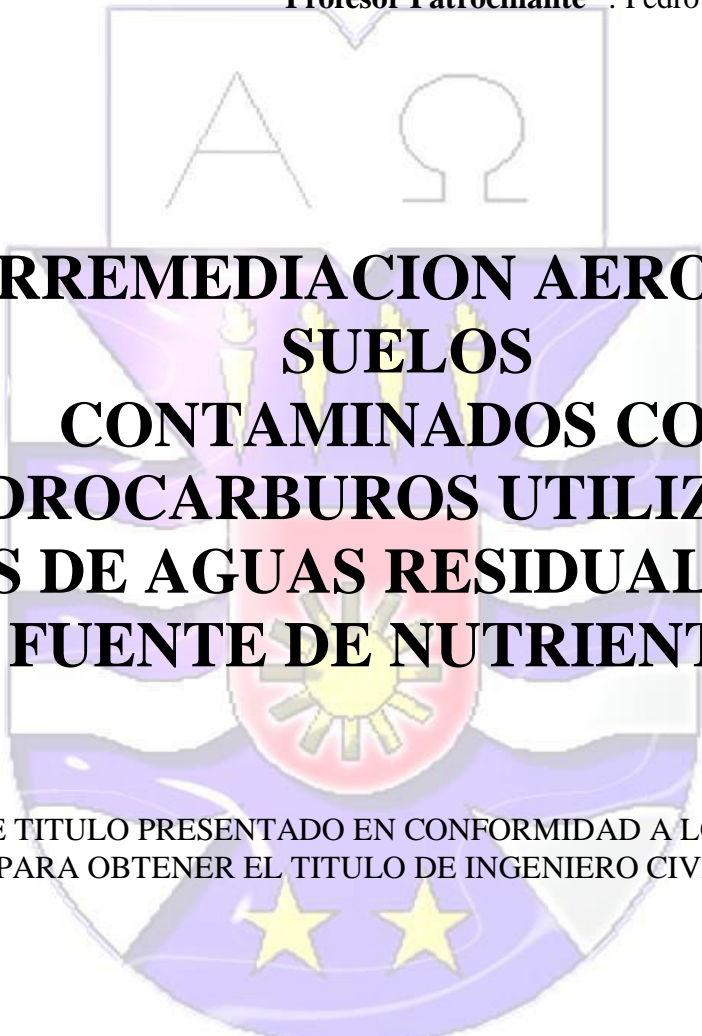


UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante : Pedro Cisterna O.



**BIORREMEDIACION AEROBIA DE
SUELOS
CONTAMINADOS CON
HIDROCARBUROS UTILIZANDO
LODOS DE AGUAS RESIDUALES COMO
FUENTE DE NUTRIENTES**

PROYECTO DE TITULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS
PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

HECTOR ALFREDO GAETE MORA

CONCEPCIÓN, ENERO 2019

AGRADECIMIENTOS

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
1 CAPITULO I INTRODUCCION.....	8
1.1 Contexto	8
1.2 Descripción del Proyecto	9
1.3 Objetivos del Proyecto	10
1.3.1 <i>Objetivo general.</i>	10
1.3.2 <i>Objetivos específicos.</i>	10
2 CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Contaminación del Suelo con Hidrocarburos.....	11
2.1.1 <i>Efectos de los hidrocarburos en el suelo.</i>	12
2.1.2 <i>Efectos de los hidrocarburos en los seres vivos.</i>	13
2.1.3 <i>Efectos de la contaminación por hidrocarburos en el ser Humano.</i>	14
2.1.4 <i>Daños a la fauna y flora.</i>	15
2.2 El Petróleo y sus Hidrocarburos	16
2.3 Composición por Familias de Hidrocarburos.....	16
2.4 Biorremediación.....	19
2.5 Fundamentación Bioquímica de la Biodegradación	21
2.6 Factores Físicoquímicos que Condicionan la Biorremediación de un Suelo.....	22
2.6.1 <i>Temperatura</i>	22
2.6.2 <i>pH</i>	22
2.6.3 <i>Humedad.</i>	23
2.6.4 <i>Necesidad de nutrientes inorgánicos</i>	23
2.6.5 <i>Oxígeno.</i>	24
2.6.6 <i>Microorganismos.</i>	24
2.6.7 <i>Estructura del suelo.</i>	25

	4
2.6.8. Estructura del contaminante.....	25
2.7. Beneficios de los Lodos de Aguas Residuales.....	26
2.7.1. Contenido orgánico.....	26
2.7.2. Contenido de nitrógeno (N).....	26
2.7.3. Contenido de fosforo (P).....	26
2.7.4. Contenido de potasio (K).....	27
2.7.5. Contenido de agua.....	27
2.7.6. Presencia de agentes patógenos.....	27
2.7.7. Contenidos de metales o ETM (elementos traza metálicos).....	27
2.7.8. Estabilidad y Mineralización.....	28
2.7.9. Aumento de la porosidad.....	28
2.8 Desventajas de los Lodos de Aguas Residuales.....	28
2.8.1. Contaminación del medio acuático.....	28
2.8.2. Contaminación del medio terrestre.....	29
2.8.3. Contaminación al ambiente.....	29
2.8.4. Contaminación de patógenos y en la cadena trófica.....	29
3. CAPITULO III METODOLOGÍA.....	29
3.1. Preparación de la Experiencia.....	30
3.1.1. Fase I.....	30
3.1.2. Fase II:.....	31
3.1.3 Procedencia del suelo a tratar.....	31
3.1.4 Procedencia de lodos a utilizar.....	32
3.1.7. Concentración del contaminante (HTPs).....	32
3.2. Variables a Investigar.....	34
3.4. Configuración de Mezclas y Mesocosmos.....	35
3.5. Descripción de los Ensayos y Mediciones.....	36
3.5.1. Método para determinar la granulometría.....	37
3.5.2. Método para determinar el contenido de humedad.....	37

3.5.3. Método para determinar la capacidad de campo.....	38
3.5.5. Método para determinar pH.....	38
3.4.6. Método para determinar EC.....	38
3.5.6. Método para determinar humedad y temperatura.....	39
4. CAPITULO IV RESULTADOS.....	40
4.1. Caracterización del Suelo.....	40
4.1.1. Densidad y porosidad.....	40
4.1.2. Granulometría.....	40
4.1.3. Capacidad de campo.....	40
4.1.4. Análisis de metales pesados y materia orgánica del suelo. (falta redactar los resultados)	40
4.2. Caracterización de Lodos Residuales.....	41
4.2.1. Análisis de lodos activos.....	41
4.2.2. Humedad de lodos activos.....	41
4.2.3. Medición de parámetros.....	41
4.2.4. Degradación de HTPs.....	42
5. CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
5.6. Conclusiones.....	44
5.7. Recomendaciones.....	45
6. BIBLIOGRAFIA.....	46
ANEXOS.....	48
Anexo. Realización de la Etapa Experimental.....	48
Anexo. Caracterización de materias primas.....	50
Configuración de parámetros.....	54

BIORREMEDIACION AEROBICA DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS UTILIZANDO LODOS DE AGUAS RESIDUALES COMO FUENTE DE NUTRIENTES

Autor: Hector Alfredo Gaete Mora

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: hecgae@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Pedro Cisterna Osorio

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: Pcisterna@ubiobio.cl

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa, cuantifica y compara el proceso de biorremediación aeróbica de un suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo empleando lodos de aguas residuales (Biosólidos), provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) domésticas de la ciudad de Nacimiento, como fuente sustituta de macro y micronutrientes. La contaminación del suelo fue provocada por derrames de diésel, siendo elegido un suelo próximo a empresas productoras de hidrocarburos en la comuna de Hualpén. Se realizaron experimentos y análisis a escala laboratorio, en los cuales se montaron distintos escenarios ajustados a capacidad de campo y en los cuales se evaluará el efecto de la adición de lodos de aguas residuales, se va a comparar al proporcionarle aire, se controlarán y medirán los factores ambientales en el proceso de degradación. Los lodos residuales provocarán la estimulación de los microorganismos nativos del suelo y estos últimos a su vez serán los responsables de degradar los hidrocarburos. Los hidrocarburos serán empleados como fuente de carbono y de donador de electrones, acoplado la reacción de óxido-reducción con el oxígeno que funcionara como aceptor de electrón.

Palabras claves: biorremediación, hidrocarburos de petróleo, suelos contaminados, nutrientes.

ABSTRACT

In the present work, the aerobic bioremediation process of a soil contaminated with petroleum hydrocarbons is evaluated, quantified and compared using sewage sludge (Biosolids), coming from a domestic wastewater treatment plant (WWTP) of the city of Nacimiento., as a substitute source of macro and micronutrients. The soil contamination was caused by diesel spills, being chosen a soil next to companies producing hydrocarbons in the commune of Hualpén.

Experiments and laboratory-scale analyzes were carried out, in which different scenarios adjusted to field capacity were mounted and in which the effect of the addition of sewage sludge will be evaluated and compared when providing air. Besides, the environmental factors in the degradation process will be controlled and measured. The residual sludge will provoke the stimulation of the microorganisms native to the soil and the latter in turn will be responsible for degrading the hydrocarbons. The hydrocarbons will be used as carbon and electron donor sources, coupling the oxide-reduction reaction with the oxygen that will function as an electron acceptor.

Keywords: bioremediation, petroleum hydrocarbons, contaminated soils, nutrients.

1 CAPITULO I INTRODUCCION.

1.1 Contexto

Los problemas de contaminación en el ámbito local, nacional e internacional son parte de nuestra vida cotidiana; es preocupante la manera en cómo se han ido degradando los ecosistemas de nuestro planeta, y la capa superficial de la corteza terrestre no es la excepción. El uso de aguas negras, pesticidas, plaguicidas, la carencia de sistemas de eliminación de basura urbana son algunas de las causas más comunes de contaminación de suelos, pero en este estudio nos concentraremos en la actividad industrial, donde el derrame de hidrocarburos derivados del petróleo ha sido la causa de los problemas más serios en la materia ambiental.

En este sentido, los daños ocasionados por los derrames de hidrocarburos en las fuentes hídricas, el suelo, el aire, la fauna y la vegetación son difícilmente reversibles, pues los procesos de descontaminación no alcanzan a cubrir todas las áreas afectadas y en ocasiones se realizan mucho tiempo después de que el crudo ha hecho tránsito y alterado el ecosistema.

Los hidrocarburos afectan las propiedades físicas y químicas del suelo, como el pH, textura, permeabilidad, pérdida de capacidad de soporte al crecimiento vegetal y causan un impacto paisajístico. Para limpiar zonas afectadas con hidrocarburos existen tratamientos físicos, químicos y biológicos, siendo éstos últimos ambientalmente seguros y económicamente accesibles a la hora de realizar tratamientos de biorremediación de hidrocarburos. Los tratamientos biológicos emplean microorganismos (bacterias y hongos), los cuales transforman los contaminantes presentes en una matriz sólida o líquida y recuperan la matriz original.

Por otra parte, los lodos residuales o biosólidos son residuos sólidos, semisólidos o líquidos que se obtienen a partir del tratamiento de estas aguas y son ricos en materia orgánica, bacterias, minerales y químicos, algunos nocivos como el arsénico y el mercurio, y otros muy beneficiosos como el nitrógeno y el fósforo. Estos biosólidos, pueden ser nocivos para la salud por sus virus y bacterias, que pueden causar enfermedades, es por esto que requieren un manejo adecuado para prevenir impactos negativos en la salud humana y medio ambiente. Pero a su vez estos biosólidos poseen un alto contenido de materia orgánica los cuales pueden contribuir a mejorar las condiciones físicas de los suelos al promover la remoción de contaminantes por lo tanto permitirían su reutilización, evitando así el costo para a empresa sanitaria el transporte y disposición final, por lo tanto al otorgarle un valor económico, tendría un impacto positivo en tarifas de agua en la región. Es necesario, inicialmente, distinguir entre los siguientes conceptos:

Biodegradación, se refiere al proceso natural mediante el cual bacterias u otros microorganismos alteran y convierten moléculas orgánicas en otras sustancias, como ácidos grasos y CO₂.

Biorremediación, adición de materiales a ambientes contaminados para producir una aceleración del proceso natural de biodegradación.

Fertilización, método de biorremediación de adición de nutrientes, como Nitrógeno o Fósforo a un medio contaminado para estimular el crecimiento de microorganismos nativos.

Inoculación, adición de microorganismos a un sitio contaminado, los cuales pueden adicionarse junto con nutrientes, también llamado proceso de bioaumentación.

1.2 Descripción del Proyecto

Este proyecto tiene como objetivo principal evaluar y cuantificar al proceso aeróbico de biorremediación como sistema de tratamiento, a un suelo contaminado con hidrocarburos. Considerando para esto el uso de lodos activos de una planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS) como fuente de nutrientes y de inoculación. Para ello se realiza primero la construcción de 4 mesocosmos, los cuales tendrán diferentes proporciones de suelo, lodos y a 2 se les proporcionara oxígeno en forma de aire propulsado con extractores. Posterior un seguimiento y control de los factores que influyen en un proceso de biorremediación, tales como temperatura, humedad, pH y Electroconductividad.

Esta experiencia se realizará en la comuna de Cauquenes, durante la temporada de otoño-invierno del año 2018, con el propósito de obtener un porcentaje de remoción de contaminante en un periodo de 90 días y 120 (solo para el mesocosmo que desea obtener la curva de biorremediación) días, bajo condiciones ideales de laboratorio. Para simular las condiciones ideales de laboratorio se utilizará una carpa de cultivo de interior, de 80x80x200 [cm]. Ancho, largo y alto respectivamente, forrada con tela de mylar para evitar el paso de los rayos ultravioleta, lo que trae consigo una disminución de los agentes patógenos que son sensibles a la luz. Para regular la temperatura y no disminuya más de 20°C se colgará un foco infrarrojo de 150 (w) conectados a sensores de temperatura y humedad, también incorporará ventanas de flujo pasivo de aire. Los mesocosmos estarán fabricados de tablas de 10 cm de espesor de dimensiones 40x40x30 [cm] y contendrán 6 kg de suelo cada uno. Una vez transcurridos los 90 días, se procederá a realizar los análisis de hidrocarburos totales de petróleo mediante cromatografía de gases, en el laboratorio de fitoquímica

de la Universidad de Concepción (UDEEC), y compararlos con los análisis al comienzo de la experiencia, de tal forma de determinar el porcentaje de remoción de contaminante en la etapa experimental de cada mesocosmo y poder comparar que tan relevante es la aplicación de oxígeno, y así tener una noción de cuan efectivo y factible podría ser el tratamiento aerobio.

1.3 Objetivos del Proyecto

1.3.1 Objetivo general.

- Evaluar al proceso aeróbico de biorremediación como sistema de tratamiento en suelos contaminados con diésel, considerando el uso de lodos residuales como fuente de nutrientes.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Definir las proporciones de suelo-lodo a utilizar para los distintos escenarios de tratamiento.
- Ingeniar un sistema de aireación a utilizar.
- Comparar y cuantificar los distintos resultados, concluir cual es el mejor escenario de biorremediación.
- Establecer una curva que describa HTPs V/S TIEMPO de biorremediación aerobia de hidrocarburos utilizando lodos de aguas residuales de manera empírica y compararla con el modelo matemático de la misma.

2 CAPITULO II MARCO TEÓRICO.

2.1 Contaminación del Suelo con Hidrocarburos.

Los hidrocarburos en cualquier forma son generalmente los contaminantes más comunes que requieren una remediación debido a los riesgos que representan para la salud humana y las aguas controladas. Desgraciadamente nuestra economía depende de los hidrocarburos para casi todo. Por lo cual no es raro encontrar zonas contaminadas con este tipo de material.

Se sabe que la liberación de hidrocarburos de petróleo y sus derivados, ya sea accidental o deliberadamente al medio ambiente, plantea problemas de magnitud creciente en todo el mundo.

La contaminación de hidrocarburos en el medio ambiente es un problema muy serio ya sea que provenga de petróleo, pesticidas u otra materia y es toxico par todas las formas de vida.

En la actualidad existe interés por la contaminación del suelo con hidrocarburos, por parte de los países dedicados a la explotación de petróleo, organizaciones e instituciones afines al medio ambiente, debido a los riesgos directos que ocasionan a la salud humana y el entorno, además los altos costos que implican los procesos de limpieza y mitigación de los lugares afectados. Lo descrito anteriormente está direccionando las políticas hacia la disminución y la remediación de la contaminación por hidrocarburos.

La contaminación de suelo por hidrocarburos es dinámica, los componentes individuales pueden separarse de la mezcla original como se detalla a continuación:

- Los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) se evaporan.
- Algunos se solubilizan gracias a la polaridad de sus moléculas.
- Otros se absorben en la superficie de la fase sólida del suelo por reacciones químicas o debido a fuerzas físicas, (siendo la primera la que fija los contaminantes, limita el transporte y disminuye la biodisponibilidad para los microorganismos).
- Mientras otros son degradados por microorganismos en el suelo.

Como resultado de estas transformaciones los hidrocarburos se enriquecen en compuestos pesados, más difíciles de degradar.

En la Tabla 1 se presentan las principales acciones que generan contaminación del suelo por hidrocarburos.

Tabla 1. Industrias que generan contaminación de suelos con hidrocarburos.

	PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL SUELO
Industria petrolera	Hidrocarburos aromáticos y alifáticos.
Fábrica de gas	Alquitrán, benceno fenoles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, cianuros.
Industria textil	Hidrocarburos y metales pesados.
Estaciones de servicio	Hidrocarburos y derivados del petróleo.
Centrales termoeléctricas	Hidrocarburos, derivados del petróleo y metales pesados.
Minería	Hidrocarburos aromáticos, metales pesados, cianuro.
Industria agropecuaria	Hidrocarburos, pesticidas, plaguicidas.
Floricultura	Pesticidas, plaguicidas e hidrocarburos.

Fuente: (Gutiérrez Claudio, 2017)

2.1.1 Efectos de los hidrocarburos en el suelo.

Los efectos de los hidrocarburos tienen una variedad de escenarios potenciales, debido a la difusión lenta de los contaminantes, los cuales se redistribuyen por toda la superficie del suelo y hacia el interior de este. Cuando los hidrocarburos se filtran, se produce una separación natural de los distintos constituyentes, por la exposición de la fase no acuosa a las fases, sólida, gaseosa y acuosa del suelo, permaneciendo los compuestos de alto peso molecular cerca de la fuente, debido a que tienen menor movilidad, mientras que los compuestos más livianos migran hacia porciones profundas del perfil por su mayor solubilidad en agua.

Cuando la cantidad de hidrocarburos disminuye ya sea por disolución u otro mecanismo de remoción, se reduce la fracción del espacio poroso ocupado por los hidrocarburos, los conductos de comunicación entre los poros se tornan más pequeños y tortuosos, reduciendo la capacidad de la fase orgánica de desplazarse y cuando ya no existe suficiente volumen para que continúe la migración, la fase no acuosa en el suelo se denomina saturación residual. Los espacios degradados pierden algunas de sus funciones, características físico químicas y por lo tanto un manejo inadecuado de los hidrocarburos puede causar problemas de gran envergadura socio-ambiental.

Los principales efectos que los hidrocarburos causan en el suelo, dependen del tipo, volumen de hidrocarburo, características físicas, químicas y microbiológicas del suelo, y los factores

ambientales (humedad, temperatura, factores climatológicos), todas las variables en su conjunto definen el tamaño en la distribución de la contaminación en una zona específica, entre los efectos más perjudiciales que sufre el suelo tenemos:

- Disminución del rendimiento de los cultivos y pérdida de calidad de los productos obtenidos.
- Impide o retarda el crecimiento de la vegetación en el área contaminada.
- Alteraciones en la población microbiana del suelo.
- Contaminación de aguas superficiales a través de la escorrentía.
- Contaminación de aguas subterráneas a través de lixiviados.
- Contaminación del aire por combustión, evaporación, sublimación o arrastre por el viento.
- Envenenamiento a través de la cadena alimenticia.
- Cuando la concentración de los contaminantes sobrepasa la capacidad de aceptación del suelo, se produce una disminución o anulación de su poder autodepurante.
- Impacto paisajístico en el sector en que se encuentra la matriz contaminada.
- Se impide el intercambio gaseoso con la atmósfera iniciando una serie de procesos físicos químicos simultáneos.
- Los elevados desniveles de salinidad pueden destruir la estructura terciaria de las proteínas, desnaturalizar enzimas y deshidratar células.

Los hidrocarburos ligeros penetran más en el suelo llegando a las capas freáticas y resultan tóxicos para la micro flora del suelo, en cambio los más pesados son menos tóxicos a corto plazo, pero permanecen en el ambiente por mucho más tiempo. Los compuestos solventes se filtran y los sólidos, permanecen en la superficie o son llevados hacia tierras más bajas. En la siguiente tabla se presentan los parámetros que influyen en el transporte de los contaminantes.

2.1.2 Efectos de los hidrocarburos en los seres vivos.

Debido a la variedad de la composición de los hidrocarburos, los efectos en los seres vivos son muy diversos, y dependen de factores como, el tipo de compuesto químico, la cantidad vertida y el tiempo de exposición. Según el tipo de hidrocarburo se puede estimar la intensidad de los daños y efectos, así combustibles ligeros como la gasolina y el queroseno resultan más tóxicos que los medianos y pesados como el Diésel o Fuel Oil, debido a que contiene grandes cantidades de

hidrocarburos saturados y bajo contenido de compuestos polares, ya que su mayor volatilidad aumenta el contacto físico entre el contaminante y las células microbianas.

2.1.3 Efectos de la contaminación por hidrocarburos en el ser Humano.

Las vías de ingreso de los hidrocarburos al cuerpo de las personas pueden ser, por vía respiratoria cuando se los inhala y cuando se los ingiere con los alimentos (cadena trófica), a través del agua y por contacto directo. Cuando ingresan por vía dérmica los contaminantes son absorbidos más lentamente que cuando son inhalados o ingeridos. Luego de ingresar estos son ampliamente distribuidos por la sangre y se transforman rápidamente en compuestos químicos, pudiendo resultar más dañinos, así como menos peligrosos, esto en función de factores como el tipo, composición y la cantidad expuesta de hidrocarburos; la mayoría de los hidrocarburos abandonan el cuerpo a través de la orina o con el aire exhalado. Los constituyentes de los hidrocarburos, de bajo peso molecular (benceno, tolueno, xileno) afectan el sistema nervioso central, causan irritación de la piel, dolores de cabeza, náuseas, hormigueos en manos y pies, cuando la exposición es alta pueden provocar la muerte.

Los principales peligros provenientes de elevadas concentraciones de hidrocarburos en general, están relacionados a los hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) principalmente por sus efectos cancerígenos. Se ha demostrado que el benceno es responsable de causar cáncer (leucemia) en los seres humanos, además la gasolina y benzopirenos son considerados como cancerígenos para humanos. El *n*-hexano afecta el sistema nervioso central de una forma diferente, causando un desorden nervioso llamado “neuropatía periférica” caracterizada por el entumecimiento de las extremidades y en casos graves, parálisis. Cuando se ingiere gasolina y kerosene, se produce irritación en la garganta y estómago, depresión del sistema nervioso central, dificultad para respirar y neumonía. Compuestos como el Antraceno, Pireno, Fenantreno, benzopirenos, causan la irritación de la piel, cáncer de piel, testículos y pulmones, siendo los alcanos presentes en las gasolinas depresores del sistema nervioso central.

Los metales pesados (cadmio, cromo, plomo, magnesio, cobalto, cobre) pueden originar enfermedades diferentes cada uno, se bioacumulan en los seres vivos y entran a formar parte de las cadenas alimenticias, producen la irritación de piel, problemas reproductivos y cáncer. Es fundamental tener en cuenta los procesos de intemperización, ya que estos cambian la composición de los productos y pueden afectar los resultados, la capacidad para biorremediar y la toxicidad del producto liberado al ambiente. Según algunos estudios realizados en las poblaciones aledañas a

instalaciones petroleras y zonas donde existe contaminación por hidrocarburos en el Ecuador, se afirma que existe una relación directa entre la exposición a los hidrocarburos con una mayor prevalencia de enfermedades, las mismas que se pueden manifestar a corto y largo plazo en la población. A continuación, se presentan los estudios epidemiológicos realizados.

2.1.4 Daños a la fauna y flora.

La contaminación por hidrocarburos afecta a los animales desde los mamíferos, aves, peces, las almejas, los moluscos e insectos, cuando los derrames de petróleo son sobre cursos de agua afectan de manera especial a la aves y fauna acuática, impidiéndoles nadar, alimentarse y con frecuencia volar. Numerosos estudios realizados tanto en animales (de laboratorio y animales libres) demuestran que la exposición al petróleo causa lesiones en distintos órganos, cáncer, defectos en la reproducción e incluso su muerte, en los estudios realizados a los animales se presentan los siguientes efectos.

- En las aves se ha presentado efectos negativos sobre la capacidad reproductiva.
- En estudios realizados en patos que han ingerido crudo se ha observado anemia hemolítica
- Algunos estudios en ratas han confirmado la presencia de tumores en la piel, por la exposición al crudo, además se han presentado cambios funcionales en las células hepáticas de las ratas.

También se produce destrucción de los hábitats, de especies endémicas, pérdida de la diversidad de las comunidades faunísticas que habitan cerca de lugares contaminados con hidrocarburos. En cuanto a la afeción a la flora se producen los siguientes daños:

- Efectos negativos en la reproducción y propagación de la flora. □
- Destrucción de las fuentes alimenticias de las especies superiores.
- Incorporación de carcinógenos en la cadena alimentaria.
- La fauna puede verse afectada por varios factores: la persistencia de una mancha de crudo limita el paso de la luz y por tanto reduce la actividad fotosintética de muchas plantas, si la mancha las cubre dificulta también su función reproductora y la fijación.
- Pérdida de parajes con valor natural, recreativo o vacacional.

2.2 El Petróleo y sus Hidrocarburos

El petróleo es un combustible natural compuesto de varios tipos de hidrocarburos, es decir, de moléculas que contienen básicamente, carbono e hidrógeno. Estas moléculas pueden estar formadas de cadenas de átomos de carbono largas o cortas y que pueden adoptar diferentes estructuras. Los hidrocarburos del petróleo pueden dividirse en cuatro categorías de compuestos:

- I. **Los saturados:** los alcanos como el hexano, el octano, el decano, el hexadecano, los isoalcanos y los cicloalcanos como el ciclohexano.
- II. **Los aromáticos:** benceno, tolueno, xileno y naftaleno agrupados también bajo la apelación BTEX y los poliaromáticos o PAHs (Rittman, 1994).
- III. **Las resinas:** sólidos polares amorfos disueltos que contienen nitrógeno, azufre y oxígeno.
- IV. **Los asfáltenos:** grandes moléculas polares coloidales sin disolver que son más resistentes a la biodegradación (Balba; Al-Awadhi; Al-Daher, 1998).

En términos generales, de un 70 a un 97% de los hidrocarburos del petróleo es degradable (la fracción de hidrocarburos saturados y aromáticos) y el resto representa los asfáltenos y las resinas esencialmente inertes (Prince *et al.*, 1999).

Cada una de las categorías agrupa compuestos con características de solubilidad, volatilidad y toxicidad propias. Desde un punto de vista de biodegradabilidad, los hidrocarburos pueden ordenarse de mayor a menor biodegradabilidad en: alcanos lineales > alcanos ramificados > aromáticos ligeros > alcanos cíclicos > aromáticos pesados > compuestos polares (Olson, et al., 1999; Harris, 1997).

2.3 Composición por Familias de Hidrocarburos.

El estudio más detallado de los hidrocarburos de un crudo de petróleo agrupa estos compuestos en las siguientes familias:

Parafinas volátiles: Representan hasta un 30% del crudo de petróleo. Son n –alcanos e isoprenoides (alcanos ramificados) de un tamaño C1 a C106. Es la fracción más volátil del crudo y por lo tanto la más susceptible de pérdidas abióticas por volatilización. La fracción gas natural contiene, principalmente C1 a C5. Los isoprenoides volátiles, están representados principalmente por el isobutano e isopentano. Los isoprenoides volátiles también pueden llegar hasta C10 (2,6 dimetil octano) (Howe-Grant, 1996).

Parafinas no volátiles: Se definen como aquellos n –alcanos e isoprenoides entre C11y C40. Los n-alcanos oscilan entre C11y C40, aunque se han descrito cadenas más largas y pueden constituir entre el 15 y 20% de crudos no degradados; mientras que los isoprenoides varían de C12 a C22 y constituyen entre 1-2% del crudo, llegando a 15% en crudos degradados. Los componentes entre C11 y C15 son de volatilidad intermedia.

Naftenos: Esta familia está compuesta por las cicloparafinas o cicloalcanos. Los compuestos más abundantes de esta familia son los ciclopentanos alquilados (fundamentalmente metilados), que pueden llegar a representar un 31% del crudo. Los compuestos mono y dicíclicos corresponden entre el 50 y 55% de esta fracción, los tricíclicos al 20% y los tetracíclicos al 25%. Esta familia engloba a los hopanos.

Oleofinas: Son alquenos, los cuales están poco presentes en el crudo de petróleo, encontrándose en concentraciones traza. Adquieren importancia en los productos resultantes del refinado, ya que se generan durante el proceso de cracking, existiendo hasta un 30% en gasolinas y un 1% en fueles.

Aromáticos: El crudo de petróleo contiene una mezcla muy compleja de hidrocarburos aromáticos. Esta fracción la componen moléculas que contienen uno o varios anillos bencénicos en su estructura. Así se encuentran hidrocarburos monoaromáticos (un anillo bencénico), diaromáticos (2 anillos bencénicos) y poliaromáticos (HAPs, con más de dos anillos bencénicos).

- **Hidrocarburos monoaromáticos:** Se encuentran el benceno y sus alquilados (monoalquilados como el tolueno y dialquilados como los xilenos), formando la familia de los BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) de gran importancia ambiental debido a su volatilidad y toxicidad.
- **Hidrocarburos poliaromáticos:** Entre los hidrocarburos diaromáticos, encontramos el naftaleno y sus alquilados (mono, di, tri y tetrametilnaftalenos). Constituyen la familia mayoritaria de hidrocarburos aromáticos presentes en un crudo.

Entre los hidrocarburos poliaromáticos de tres anillos, encontramos el fenantreno, antraceno, fluoreno, y sus derivados alquilados. El fenantreno y los metilfenantrenos, representan los componentes mayoritarios de los triaromáticos.

Entre los hidrocarburos poliaromáticos de más de tres anillos, encontramos el fluoranteno (3 anillos bencénicos y uno no bencénico), pireno y criseno (4 anillos aromáticos), pireno y benzo(a) pireno (5 anillos aromáticos) y coroneno (un HAP pericondensado con 6 anillos).

Resinas y asfáltenos: Se trata de mezclas complejas, integradas por núcleos policíclicos o naftenoaromáticos. Contienen cadenas hidrocarbonadas con heteroátomos de oxígeno, nitrógeno y azufre (componentes NOS del petróleo) y a veces están asociadas con pequeñas concentraciones de metales como el vanadio y el níquel. Constituyen entre un 10% en crudos poco degradados o ligeros, hasta un 60% en crudos muy degradados. Es la fracción que presenta una mayor recalcitrancia de un crudo de petróleo.

Se trata de agregados de piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfóxidos, amidas, HAP, sulfuros, ácidos nafténicos, ácidos grasos, metaloporfirinas y fenoles polihidratados. (Howe-Grant, 1996).

La estructura química de diferentes componentes mayoritarios de un crudo de petróleo se puede apreciar en la siguiente Figura n° 1.

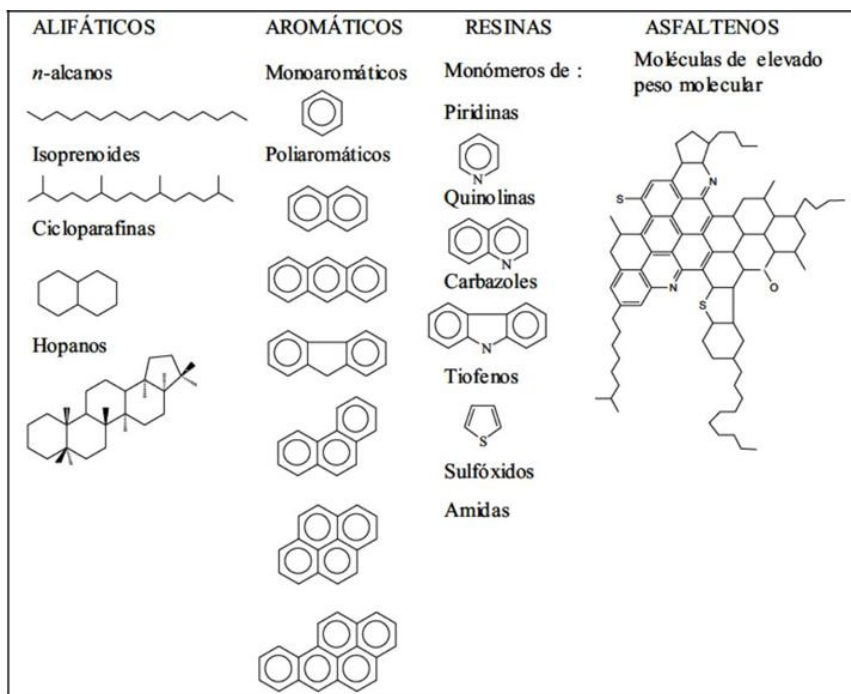


Figura 1: Estructuras químicas de diferentes componentes mayoritarios de un crudo de petróleo.

(Fuente: Marc Viñas Canals)

Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP): El término HTP se usa para describir a un grupo de sustancias químicas, derivadas del petróleo crudo, debido al gran número de hidrocarburos involucrados generalmente no es práctico medir cada uno de ellos, sin embargo, es útil medir la cantidad total del conjunto de hidrocarburos que se encuentran en una muestra de suelo contaminada que sirve como indicador general del tipo de contaminación. Uno de los factores que limita la eliminación de los hidrocarburos contaminantes es la transferencia de masa. Los tratamientos de limpieza del suelo utilizan usualmente métodos que permitan el arrastre de los hidrocarburos, pero deben vencer para ello, las fuerzas de absorción sobre las partículas del suelo por modificación de temperatura, de las interacciones químicas (extracción, emulsificación) o de la tensión de vapor. En el caso de la contaminación con hidrocarburos, se proponen tratamientos físicos, químicos y biológicos que pueden ser utilizados en complementariedad (Thomassin-Lacroix *et al.*, 2002).

2.4 Biorremediación

La biorremediación es una biotecnología que estimula la actividad microbiana y en consecuencia acelera el proceso natural de degradación del compuesto contaminante. Puede ser definida como el uso de organismos vivos, componentes celulares y enzimas libres, con el fin de realizar una mineralización, es decir, que el compuesto se transforme en CO₂, H₂O y otras formas inorgánicas. Por tanto, se refiere a la transformación química de los contaminantes mediante el uso de microorganismo que satisfacen sus requerimientos nutricionales y energéticos contribuyendo a la desintoxicación del ambiente por mineralización o co-metabolismo [EPA 2003]. Explicado de forma más simplificada, los microorganismos descomponen los contaminantes dando como resultado principalmente dióxido de carbono y agua. Al degradarse todos los contaminantes, se acaba la fuente de alimentación de los microorganismos y la población de los mismos disminuye hasta desaparecer.

Su ámbito de aplicabilidad es muy amplio, pudiendo considerarse como objeto cada uno de los estados de la materia (Atlas y Unterman, 1999):

- **Sólido.** Con aplicaciones sobre medios contaminados como suelos o sedimentos, o bien directamente en lodos, residuos, etc.

- **Líquido.** Aguas superficiales y subterráneas, aguas residuales.
- **Gases.** Emisiones industriales, así como productos derivados del tratamiento de aguas o suelos.

También se puede realizar una clasificación en función de los contaminantes con los que se puede trabajar (Alexander, 1999; Eweiset al., 1999):

- Hidrocarburos de todo tipo.
- Hidrocarburos clorados.
- Compuestos nitroaromáticos.
- Metales pesados. Estos no se metabolizan por los microorganismos de manera apreciable, pero pueden ser inmovilizados o precipitados.
- Otros contaminantes. Compuestos organofosforados, cianuros, fenoles, etc.

Es conocido que los microorganismos indígenas tienen la capacidad de adaptarse y eventualmente degradar cualquier compuesto orgánico natural sin asistencia del hombre; sin embargo, esta adaptación requiere la presencia de condiciones óptimas apropiadas tales como el pH, temperatura, el aceptor final de electrones (que en procesos aeróbicos es el oxígeno), concentraciones de contaminante no tóxicas para los microorganismos y adecuadas condiciones de humedad y conductividad del medio, entre las más importantes. La ausencia de alguna o varias de las anteriores condiciones puede limitar parcial o totalmente la actividad biológica y es cuando la mano del hombre juega un papel fundamental en la optimización del proceso, ya sea mejorando estas condiciones para aumentar la población de microorganismos (bioaumentación) y/o manipulando genéticamente los microorganismos para la degradación específica de algunos compuestos químicos (bioestimulación).

Tabla 2. Ventajas y desventajas de la biorremediación.

	Ventajas	Desventajas
Biorremediación	<ul style="list-style-type: none"> - Son efectivos en cuanto a costos. - Son tecnologías más benéficas para el ambiente - Los contaminantes generalmente son destruidos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren mayores tiempos de tratamiento. - Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos.

	- Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior.	- No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano.
--	---	--

Fuente: Elaboración propia.

2.5 Fundamentación Bioquímica de la Biodegradación

El fundamento bioquímico de la biorremediación se basa, principalmente, en la serie de reacciones de óxido-reducción (cuyo fin es la obtención de energía) que se producen en la cadena respiratoria, o transportadora de electrones de las células. 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.

Tabla 3. Tipos de reacciones en los procesos de degradación aeróbicos y anaeróbicos.

Reacción aerobia:
Reacción
<hr/> Sustrato + O₂ → CO₂ + H₂O + biomasa <hr/>
Reacción anaerobia:
<hr/> Sustrato + NO₃⁻ + H⁺ → CO₂ + 2N₂ + H₂O + biomasa <hr/>
<hr/> Sustrato + Fe(OH)₃ + H⁺ → CO₂ + Fe²⁺ + H₂O + biomasa <hr/>
<hr/> Sustrato + SO₄²⁻ + H⁺ → CO₂ + HS⁻ + H₂O + biomasa <hr/>
<hr/> Sustrato → CH₃COOH → CH₄ + CO₂ + biomasa <hr/>

Fuente: Elaboración propia.

2.6 Factores Físicoquímicos que Condicionan la Biorremediación de un Suelo.

Para que las bacterias puedan eliminar de forma eficaz, las sustancias químicas de un ecosistema contaminado, este debe tener unas condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de la actividad microbiana. Esas condiciones óptimas permitirán que las bacterias crezcan, se multipliquen, y asimilen las sustancias químicas. Cuando las condiciones no son las adecuadas, las bacterias crecen lentamente, mueren, o incluso pueden originar sustancias químicas más tóxicas [Higueras et al. 1991]. Es así como la concentración y composición de la comunidad microbiana y la tasa de transformación de contaminantes está influenciada por factores físicoquímicos y biológicos [Maroto et al. 2001; Martínez et al. 2005]. A continuación, se describen algunos factores.

2.6.1. 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 (Sorkohet al., 1993).

2.6.2. 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.

2.6.3. 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.

2.6.4. 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 Ca^{2+} , Na^{+} , Fe^{2+} y SO_4^{2-} 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; Chaineau 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).

Por otra parte, los lodos residuales contienen grandes concentraciones de nitrógeno inorgánico, fósforo y materia orgánica, lo que los hace ideales para estimular la actividad microbiana del suelo. Los lodos residuales pueden ser usados como fuente alterna de macro y micro nutrientes y al estimular la actividad microbiana se logrará una mayor degradación de los hidrocarburos presentes en el suelo, siempre y cuando la concentración de patógenos, metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos sea baja (Rivera-Espinoza y Dendooven 2003). Dicha práctica resulta benéfica para el ambiente, dándole un uso a lo que comúnmente se ha venido manejando como un desecho

2.6.5. Oxígeno.

La cantidad de oxígeno disponible determinará si un sistema es aerobio o anaerobio. La degradación de HCs se da mejor en los sistemas aerobios y para ello los microorganismos deben utilizar O₂ como aceptor de electrones como el oxígeno (O₂) ya que los procesos de oxidación de los HCs requieren de enzimas oxigenasas. Sin embargo, la presencia de otros aceptores de electrones como nitrato (NO₃⁻), sulfato (SO₄⁻²) o hierro (Fe⁺³) permiten la biodegradación de HCs en ambientes anaerobios (Atlas, 1981; Heitzer y Sayler, 1993; Alexander, 1999; Roberts, 2000).

En los procesos de biorremediación el oxígeno es proporcionado por el uso de aire, oxígeno puro, peróxido de hidrógeno u ozono a través de bombas, propulsores, agitadores, vaporizadores y chorros, aunque también se puede suministrar el oxígeno de forma manual mediante el arado directo del sistema (Levin y Gealt, 1997; EPA, 2000).

2.6.6. Microorganismos.

La capacidad metabólica de utilizar HCs está ampliamente distribuida entre diversas poblaciones bacterianas (Atlas, 1981). Las transformaciones biológicas de los hidrocarburos se llevan a cabo

por la acción de enzimas adecuadas para esa transformación. Las enzimas son específicas con relación al compuesto que atacan y a las reacciones que catalizan, generalmente más de una enzima es requerida para degradar una sustancia orgánica y los microorganismos que poseen las enzimas están presentes ya en el suelo (Atlas, 1981; Rittman y McCarty, 2001).

La densidad de microorganismos en el suelo es un factor primordial en el proceso de biorremediación. Se requiere una concentración mayor de 1×10^3 UFC/g para que se alcance una aceptable actividad biodegradativa por los microorganismos (EPA, 1994; Leahy y Colwell, 1990; EPA, 2000). En ecosistemas no contaminados las comunidades degradadoras de hidrocarburos constituyen menos del 0.1% y en ecosistemas contaminados forman el 85% de microorganismos viables, estas diferencias se dan por el grado de exposición y por la adaptabilidad de los microorganismos a los hidrocarburos del ambiente (Levin y Gealt, 1997; Sylvia *et al.*, 1999; Roberts, 2000).

2.6.7. Estructura del suelo.

La estructura del suelo (granulometría y textura) puede afectar directamente la entrada efectiva de aire, agua, nutriente y la movilidad del contaminante durante la biodegradación (Atlas, 1981; Vidali, 2001).

Un suelo con baja permeabilidad impedirá los movimientos de agua, nutrientes y oxígeno al formarse complejos húmicos de arcilla disminuyendo la disponibilidad para los microorganismos, de la misma forma esto contribuye a la formación de residuos persistentes en el ambiente (Eweis *et al.*, 1999).

El contaminante puede ser absorbido en las partículas del suelo formando agregados los cuales son difícilmente transportados hasta las células que los degradan con lo cual aumenta la concentración de la contaminación (Bouwer y Zehnder, 1993).

2.6.8. Estructura del contaminante.

La estructura molecular del contaminante, 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.

La concentración de los hidrocarburos en el ambiente también afecta considerablemente las tasas de biodegradación:

- Si las concentraciones presentes en el suelo son muy bajas los compuestos presentes no suministran la energía suficiente para el mantenimiento de los microorganismos.
- Si las concentraciones de HCs son altas pueden ser tóxicos para las células al generar cambios en la estructura y función de la membrana celular.

2.7. Beneficios de los Lodos de Aguas Residuales

2.7.1. Contenido orgánico.

Los lodos poseen un alto contenido orgánico debido a que son el resultado de una biodegradación por microorganismos de compuestos químicos, que están presentes en las aguas residuales tales como; proteínas, grasas, aceites y compuestos orgánicos sintéticos. Los valores de materia orgánica de lodos varían normalmente entre 25 a 60 % peso seco.

2.7.2. Contenido de nitrógeno (N).

En los lodos encontramos nitrógeno orgánico, amoníaco (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-). Estas concentraciones van a variar dependiendo de cómo se manejen algunos procesos de la depuración del agua residual. El nitrógeno orgánico está asociado a la parte sólida de los lodos y por ello los niveles de nitrógeno orgánico no cambian con los procesos de espesamiento y deshidratación de los lodos. No es así el caso del nitrógeno inorgánico (nitratos y amoníaco), los cuales son solubles en agua y su concentración varía con los procesos de deshidratación mecánica. Cuando se trata de otros procesos de tratamiento de aguas servidas, como lo son las lagunas facultativas, el nitrógeno de los lodos puede ser perdido a través de la volatilización del amoníaco, mientras los niveles de nitrato en estos sistemas permanecen inalterables. El nitrógeno como ion está disponible para las plantas, sin embargo, una aplicación excesiva de lodos al suelo puede producir lixiviación y contaminar aguas subterráneas. Los nitratos por ejemplos son muy móviles y se desplazan libremente con la humedad del suelo.

2.7.3. Contenido de fósforo (P).

El fósforo en los lodos se presenta en su mayor porcentaje como compuesto orgánico. La aplicación de los lodos al suelo basado en las concentraciones de nitrógeno trae como resultado tasas más altas de fósforo. Para evitar incrementos notables de fósforo en el suelo, se sugiere que la aplicación de los fangos está basada en las tasas de consumo de este, ya que el fósforo es el reactivo limitante en estos procesos. Una alta tasa de fósforo puede provocar procesos de eutrofización.

2.7.4. Contenido de potasio (K).

Los lodos presentan potasio en forma orgánica y como K_2O . En si el potasio no presenta mayores problemas sobre la salud o el medio ambiente.

2.7.5. Contenido de agua.

Los lodos que se obtienen en el tratamiento de lodos activos tienen un alto contenido de humedad por sobre el 99%. Esto trae consigo el movimiento de grandes masas de lodos, pero a la vez permite un mejor transporte por tuberías y ductos. El agua esta retenida en los lodos por dos formas:

- Agua libre que fácil de ser eliminada por filtración o decantación
- Agua ligada, más fácil de ser eliminada debido a que está contenida en las moléculas químicas, sustancias coloidales y materia orgánica, que solo puede ser eliminada por calor.

2.7.6. Presencia de agentes patógenos.

Los lodos se producen por decantación de microorganismos biodegradados que están presentes en las aguas residuales, por este motivo los lodos tienen agentes patógenos. Sin embargo, estos agentes pueden ser reducidos en gran medida dependiendo de distintos procesos que se puedan aplicar a los lodos luego de su deshidratación. Para la estabilización de la materia orgánica existen distintos procesos que permiten una reducción significativa de patógenos como digestión aeróbica de lodos, digestión anaeróbica de lodos, secado al aire y compostaje entre otras.

2.7.7. Contenidos de metales o ETM (elementos traza metálicos).

Los lodos contienen variadas concentraciones de metales como son potasio, calcio, magnesio, sodio, cobre, fierro, zinc, cobalto. También encontramos metales pesados debido a que las aguas residuales generalmente reciben desechos de industrias y otros, la cuales se mezclan con las aguas residuales urbanas. En Chile los valores de metales pesados son muy inferiores a los encontrados en la norma E.P.A para EE.UU. y Comunidad Económica Europea (C.E.E). unos de los factores que influye en esto es el nivel de desarrollo de las ciudades, lo cual trae consigo más productos insolubles y menos material biodegradable, si el desarrollo es mayor (Leppe A y otros, 2011).

2.7.8. Estabilidad y Mineralización.

La estabilización del fango está relacionada con el nivel de mineralización de los lodos. La mineralización del fango está relacionada con los Sólidos Suspending Minerales (SSM), y el cociente entre SSM/SST nos da una idea del nivel de estabilidad de los lodos

Una de las grandes ventajas del régimen de operación por fangos activos es que los lodos tienen un alto nivel de estabilidad. En la aireación extendida se producen los lodos más estabilizados que en cualquier otro tipo de régimen.

La fase endógena estimula el canibalismo de los microorganismos, es decir, debido a la falta de sustrato ellos deben alimentarse de los microorganismos muertos, lo que trae por consecuencia que los primeros van a usar como sustrato la materia orgánica de material celular muerto, y con ello aumentará la población de microorganismos que posean alto porcentaje de células que básicamente son material mineral. Con esto se consigue aumentar la proporción mineral (SSM) y el nivel de estabilidad de los fangos (Cisterna, 2001).

2.7.9. Aumento de la porosidad.

Los lodos al aplicarlos al suelo modifican su estructura dejando más huecos entre las partículas de suelo. Esto ayuda a mejorar la permeabilidad del suelo. Las arcillas tienen velocidades de infiltración muy bajas, lo que ayuda a que las capas superficiales del suelo se saturen muy rápido apareciendo la escorrentía, lo cual se reduce con la aplicación de los fangos, por el aumento de la permeabilidad.

2.8 Desventajas de los Lodos de Aguas Residuales

2.8.1. Contaminación del medio acuático.

El arrastre por percolación a través del suelo, o por escurrimiento, produce una contaminación importante de las aguas subterráneas y superficiales, lo que es notorio en el nitrógeno y los microcontaminantes minerales. Existe el riesgo de transporte de microorganismos patógenos a través del agua superficial, lo cual no ocurre en las aguas subterráneas.

2.8.2. Contaminación del medio terrestre.

El suministro de nitrógeno, fósforo, metales pesados y la presencia de microorganismos patógenos e inofensivos modifican las condiciones biológicas del suelo. El suelo actúa como un filtro que retiene en su superficie contaminantes y microorganismos.

2.8.3. Contaminación al ambiente.

Este tipo de molestia se manifiesta principalmente con la proliferación de malos olores en el caso de condiciones anaerobias. Los gérmenes que se transportan por los aerosoles afecta principalmente al ambiente inmediato del trabajador que efectúa la aplicación por aspersión.

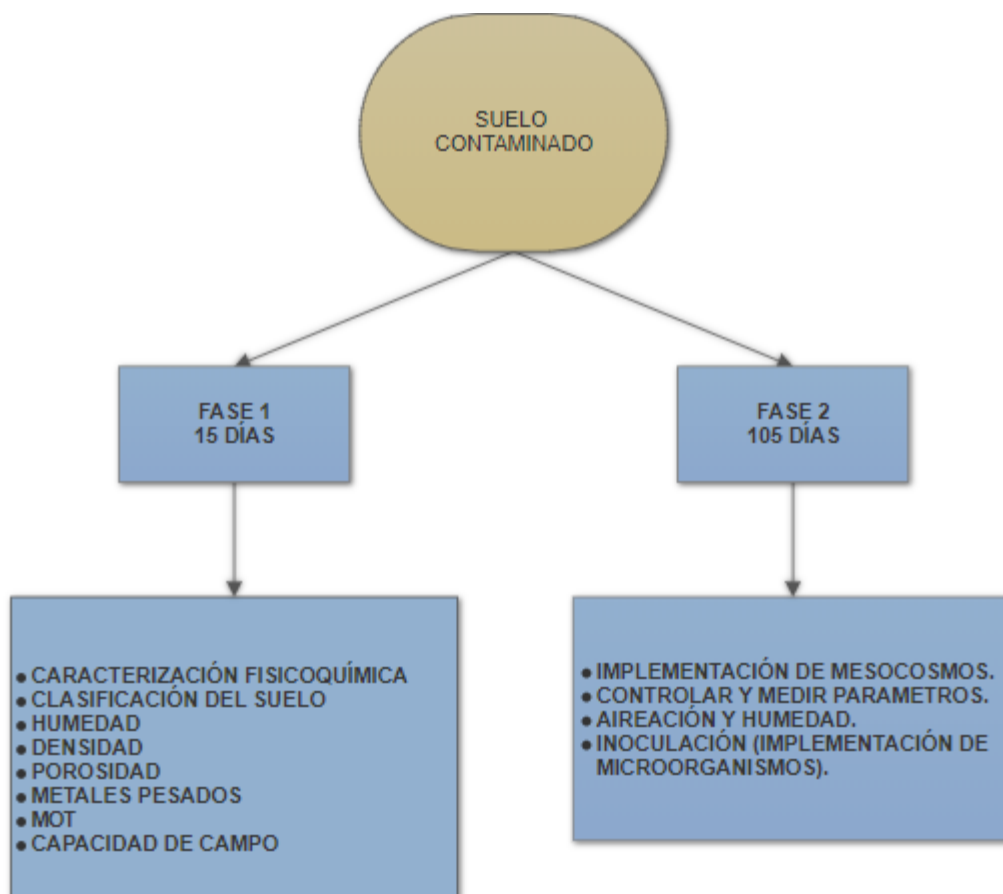
2.8.4. Contaminación de patógenos y en la cadena trófica.

Los suelos como los lodos poseen un número muy elevado de gérmenes inofensivos, pero junto a ellos están los microorganismos de origen fecal, que son dañinos para el hombre y los animales. Por otra parte, si algún metal persistente se incorpora en algún vegetal, este puede ser consumido por un animal herbívoro y luego por un carnívoro, ingresando a la cadena trófica. Es por ello que hay que tener mucho cuidado con los minerales persistentes.

3. CAPITULO III METODOLOGÍA.

La etapa experimental se llevó a cabo en dos instalaciones, una primera fase de caracterización físico química del suelo, realizada en laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la universidad del Bio-Bio, concepción. Luego una segunda fase de seguimiento, por un periodo de 120 días, al interior de un galpón ubicado en la comuna de Cauquenes. Los ensayos fueron

realizados en los meses de abril, mayo, junio y julio de 2018.



Esquema de proyecto: elaboración propia.

3.1. Preparación de la Experiencia

Para la preparación y el procesamiento de la experiencia es necesario definir los siguientes puntos: Fase I “Caracterización físico-química del suelo contaminado”, Fase II “Bioestimulación del suelo contaminado”, procedencia del suelo a tratar, procedencia de lodos a utilizar, relación suelo-lodo, concentración del contaminante.

3.1.1. Fase I

Es un estudio a corto plazo en el cual se caracteriza de forma físico-química el suelo. Después de extraerlo se lleva una muestra al departamento de fitología de la Universidad de Concepción (UDEEC) para que le realicen el análisis de HTPs, también se encarga a la facultad de agronomía e

ingeniería forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), el análisis de materia orgánica total y metales pesados presentes en el suelo a tratar. Posteriormente se determinarán la humedad de lodos y suelo, la granulometría, densidad, porosidad, Ph y capacidad de campo en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad del Bío-Bío.

3.1.2. Fase II:

Estudio a medio-largo plazo en mesocosmos con 6 kg de suelo, donde se evalúan distintos escenarios de bioestimulación, empleando lodos de aguas residuales e inyección de aire, midiendo y controlando los parámetros, humedad, pH, EC, temperatura.

3.1.3 Procedencia del suelo a tratar.

El suelo a remediar proviene de un sector cercano a la empresa nacional del petróleo (ENAP) de manera de representar de forma más cercana un suelo contaminado, específicamente es de la población emergencia perteneciente al municipio de Hualpén, octava región del Bio-Bio y corresponde al material subrasante de áreas verdes. El muestreo fue efectuado el día 24 de abril del 2018, posteriormente fue transportado hasta el laboratorio de suelos de ingeniería civil de la universidad del Bio-Bio, en la ciudad de Concepción para efectuar las pruebas antes mencionadas. La fotografía satelital con la ubicación se puede apreciar en la figura N°2.

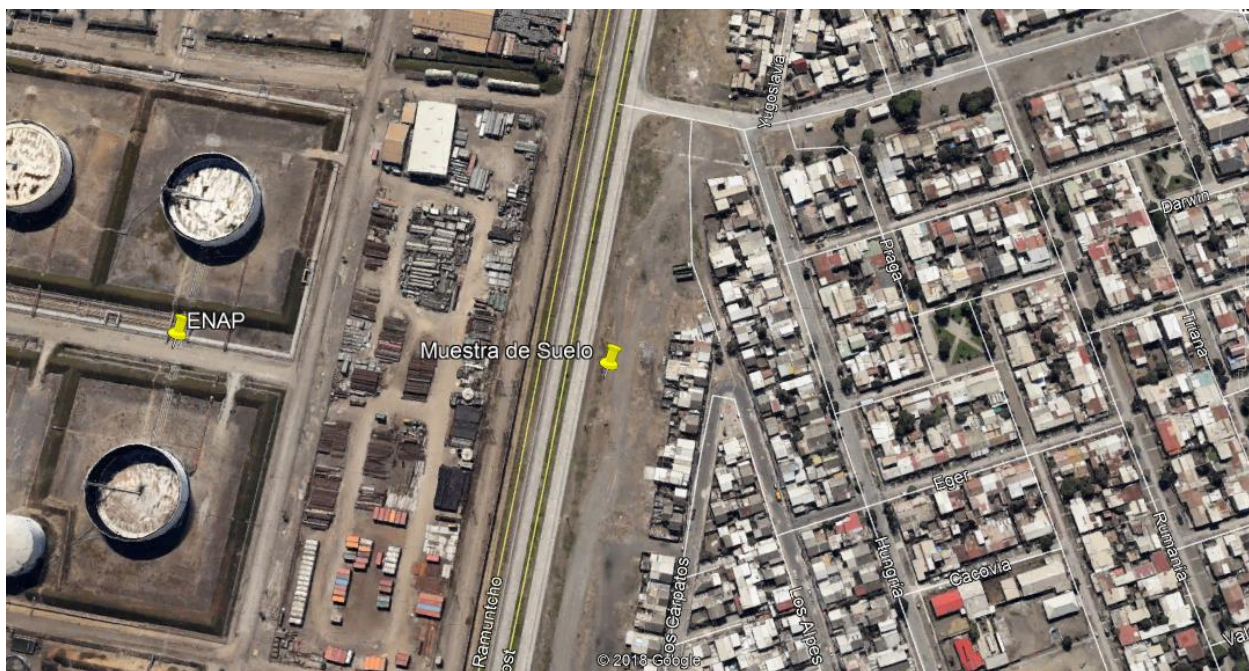


Figura 2: Ubicación de la muestra de suelos. (fuente: elaboración propia)

3.1.4 Procedencia de lodos a utilizar.

Los lodos empleados provienen de la planta PTAS ESSBIO Nacimiento, Octava región del Bío-Bío, Chile, como muestra la figura n°3. El muestreo fue efectuado el día 24 de abril de 2018 y corresponde a lodos activados estabilizados en base húmeda, a los cuales se les ha reducido los sólidos volátiles en un 38% como mínimo. Posteriormente fueron transportados hasta Cauquenes, VII Región del Maule, para ser dispuestos sin perder su humedad original (para no alterar la población microbiana por efectos de calor) en distintos escenarios en los mesocosmos previamente fabricados junto al suelo contaminado.

3.1.5 Relación Suelo-Lodo.

Wan *et al.* (2001) realizaron un experimento en el cual mejoraron la degradación de hidrocarburos agregando materiales orgánicos, entre ellos lodos residuales. Ellos encontraron que la mejor relación suelo: lodo residual fue del 1:0.5 en base húmeda (sin tomar en cuenta la relación C: N), obteniendo una remoción superior al 98 %, mientras que para suelo solo, obtuvieron un 65 % de remoción.

Para este experimento se considerará utilizar la misma relación suelo-lodo, utilizando 6 kg de suelo y 3 kg de lodos activos, y un tratamiento de acuerdo al decreto supremo DS4 “Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas”. El cual establece un límite máximo de 90 ton/ha/año, no obstante, en este experimento no se considera la aplicación por unidad de área sino por cantidad de suelo.

3.1.7. Concentración del contaminante (HTPs).

Las concentraciones de hidrocarburos en los suelos utilizados para las pruebas, se encuentran en un intervalo [4,000 -25,000] mg / Kg de suelo, estas concentraciones son aceptables para la aplicación de un método de biorremediación (Gutiérrez y Santos, 2011).

El contaminante elegido para este experimento es diésel grado B-1, procedente de la empresa Copec, el cual detalla en sus especificaciones una densidad a 15°C de 0.85 [Kg/lt], por lo tanto, para una concentración promedio de HTPs igual 10,500 mg/Kg (6 Kg de suelo), agregamos 75 ml de diésel. Se agrega el contaminante en forma homogénea y mezcla junto con la muestra de suelo en forma continua durante 1 hora.

3.1.8 Modelo Matemático a utilizar para encontrar la curva de biorremediación aeróbica.

Como sabemos, un modelo matemático es una abstracción simplificada de una realidad más compleja y siempre existirá cierta discrepancia entre lo observado y lo previsto por el modelo.

La importancia de la realización de los modelos matemáticos radica principalmente en que, gracias a estos, se puede predecir el comportamiento de una de las variables en función del resto.

En este caso debido a lo acotado de los análisis empíricos de la experiencia es que se realizara un modelo sencillo basado principalmente en las variables tiempo (T) y la concentración de hidrocarburos totales presentes en el suelo a tratar. Posteriormente estimaremos un porcentaje de error.

Para poder describir nuestro modelo matemático necesitaremos la concentración inicial de hidrocarburos que presenta el suelo y la concentración al día 90 y así poder despejar la constante cinética de biorremediación que denominaremos (K), posteriormente para comprobar si la curva representa de manera cercana nuestro experimento es que también obtendremos empíricamente a través de laboratorio la concentración de HTP's al día 50 y 120 desde el comienzo de la experiencia.

La ecuación se conforma de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l}
 \text{-----} \rightarrow \quad \frac{dHTP}{dt} = -K * HTP \\
 \text{-----} \rightarrow \quad -\frac{dHTP}{dt} = K * HTP \\
 \text{-----} \rightarrow \quad -\frac{dHTP}{HTP} = K * dt \\
 \text{-----} \rightarrow \quad -\ln \frac{HTP}{HTP(0)} = K * t \\
 \text{Expresión final} \quad \text{-----} \rightarrow \quad \frac{\ln HTP(0)}{HTP} = K * t
 \end{array}$$

Grafico explicativo de la ecuación de biorremediación aerobia

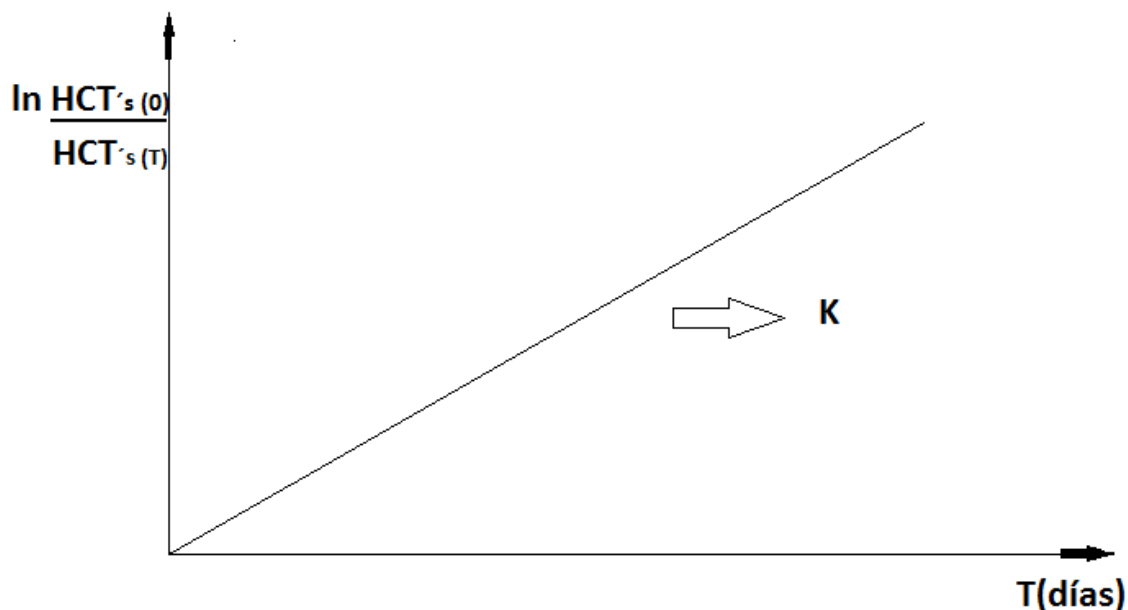


Figura 3 (Fuente: elaboración propia)

3.2. Variables a Investigar.

En el desarrollo de la parte experimental del presente estudio se identifica como variable fundamental la concentración de hidrocarburos totales de petróleo (HTPs). Sin embargo, existe una serie de variables asociadas a las condiciones óptimas en un proceso de biorremediación, tales como pH, electro conductividad (EC), humedad, capacidad de campo y temperatura.

La cuantía de las variables anteriormente señaladas se obtiene mediante ensayos estandarizados bajo normativas internacionales, tales como, granulometría, capacidad de campo, determinación de humedad, etc. Otros mediante mediciones directas con instrumentos específicos como medidor digital de pH, EC, termohigrometros, etc., y otros debido a su complejidad y requerimiento de equipos específicos y costosos, es más conveniente enviar muestras a analizar en laboratorios especializados en estos estudios, que emprender en forma particular. Otra observación importante es que debido a la experiencia del personal que trabaja en estos laboratorios, induce a un menor error en los resultados que podrían cometerse al aventurarse a hacerlos de forma propia. Tal como el caso de analizar HTPs, metales pesados, materia orgánica y otros elementos.

3.3. Sistema de aireación:

El sistema de aireación se diseñó de manera que el oxígeno se repartiera homogéneamente por todo el mesocosmo, para esto se realizó una red de tuberías hidráulicas de PVC (Policloruro de vinilo) las cuales fueron moldeadas con calor y/o codos, posteriormente se hicieron múltiples agujeros repartidos por toda el área de aplicación. Esta red fue conectada a 3 inductores en 3 direcciones distintas que propulsan el aire por las tuberías a una velocidad 0,5 m/S y funcionaban 16 horas diarias comandadas por un reloj/control. Cada 3 días se iba removiendo el suelo contaminado y limpiando las tuberías de modo que no se taparan los agujeros e impidiera el paso del aire a través de los poros. En las siguientes imágenes se puede ver el sistema:



3.4. Configuración de Mezclas y Mesocosmos.

Para la comparación del efecto de bioaumentación, atenuación natural y bioestimulación en los distintos escenarios se trabaja con 4 mesocosmos de madera de forma rectangular de dimensiones 0.4x0.4 [m]:

Mesocosmos N°1: (S: Suelo Natural).

- 6 Kg de suelo contaminado.
- Agua ajustada a PH y a capacidad de campo.

Mesocosmos N°2: (S+L: Suelo bioaumentado con lodos).

- 6 Kg de suelo contaminado.
- 3 Kg de lodos de aguas residuales.
- Agua ajustada a PH y capacidad de campo.

Mesocosmos N°3: (S+L+A: Suelo bioaumentado con lodos mas adición de aire).

- 6 Kg de suelo contaminado.
- 3 Kg de lodos de aguas residuales.
- Agua ajustada a PH y capacidad de campo.
- Sistema de aireación.

Mesocosmos N°4: (S+A: Suelo bioestimulado con aire).

- 6 Kg de suelo contaminado.
- Agua ajustada a PH y a capacidad de campo.
- Sistema de aireación.

3.5. Descripción de los Ensayos y Mediciones

La biorremediación emplea organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), puede realizarse in situ o ex situ, en condiciones aerobias o anaerobias (Eweis et al., 1998). Las técnicas de biorremediación aplicadas a la contaminación con hidrocarburos se encuentran limitadas en su aplicación, debido a las características físicas y químicas del suelo y la toxicidad ocasionada por la concentración. En contraste a la biorremediación, en el caso de la eficiencia de la biodegradación de hidrocarburos en el suelo, ésta puede estar limitada por los factores fisicoquímicos y biológicos, como nutrientes, pH, temperatura, humedad, oxígeno, las propiedades del suelo y la concentración de contaminante (Bradi et al., 2000). Para lograr evaluar claramente el efecto de degradación de hidrocarburos en suelos contaminados, necesariamente hay que realizar una serie de ensayos para poder establecer los parámetros de las variables que interfieren directamente en el estudio.

Los ensayos de caracterización del suelo comienzan inmediatamente después de extraer la muestra, este procedimiento busca obtener de forma más homogénea el material de tal manera que las granulometrías no se vean afectadas por el transporte o por sistema de acopio utilizado. Posteriormente comienzan las mediciones que describen e influyen en el proceso de biorremediación entre los cuales está la determinación de Ph, Humedad, y electro conductividad. La carpa de cultivo aislado estará montada previamente, equipada con un controlador de

temperatura conectado a un foco infrarrojo que se activara en caso de temperaturas bajas y un ventilador en caso de temperaturas altas, de manera de mantener los rangos óptimos al interior de la carpa, descritos en detalle en la tabla N°4.

Propiedad	Rango	Referencia
Temperatura (°C)	18° - 30°	Gómez, S., et al, 2008
pH (unidades)	6 - 9	Ríos, R., 2005
Humedad (% capacidad de campo)	20% - 75%	Gómez, S., et al, 2008

Tabla 4 (elaboración propia)

3.5.1. Método para determinar la granulometría.

Este método permite determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0,08mm, de una muestra de suelo que es tamizado mediante el procedimiento estandarizado por la norma NCh 165 of 77. El procedimiento del ensayo consiste, bajo un ordenamiento secuencial, en pesar toda la muestra a ensayar para luego cortar la totalidad de la muestra en el tamiz correspondiente al tamaño máximo absoluto y registrar las dos fracciones resultantes. Luego, con la fracción de material que paso por el tamiz correspondiente al tamaño máximo absoluto especificado, se realiza un nuevo corte de material, pero esta vez con el tamiz de abertura 5mm. Con la fracción que pasa por el tamiz 5mm se extrae una porción de 500 a 100g para luego practicar un lavado del material y con la fracción retenida se realiza el procedimiento de tamizado utilizando los tamices con abertura 150, 100, 80, 50, 40, 25, 10 y 5mm. Con la fracción que fue lavada se practica un tamizado con las mallas 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.08mm. Finalmente se registran los pesos retenidos en cada tamiz y se calculan los porcentajes retenidos y porcentajes que pasan para cada abertura de tamiz.

3.5.2. Método para determinar el contenido de humedad.

El procedimiento se define bajo la norma NCh 1515 Of.79 y consiste en obtener una muestra de suelo húmedo, la cual es dispuesta en una cápsula con masa previamente medida. Luego se registra la masa de la muestra húmeda con correspondiente capsula. Seguido, se deja la muestra en un horno con temperatura $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta lograr masa constante. Se registra la masa de la muestra seca junto con su capsula y se determina la humedad según la diferencia de masa entre muestra húmeda y muestra seca. Mismo procedimiento para determinar la humedad presente en los lodos.

3.5.3. Método para determinar la capacidad de campo.

La capacidad de campo, es a la cantidad máxima de agua (expresada en valores de humedad) que es capaz de retener el suelo justo en el momento que llega al estado de saturación. Para su determinación es necesario saturar el suelo con agua, y eliminar el exceso de agua por gravedad. Finalmente, se determina el contenido de agua (humedad) del suelo cuando ya no se libera agua por escurrimiento. Para ello se emplean viales de plástico de 100 ml de capacidad nominal, que se perforan en su base (1 cm de separación entre poros) y se añade fibra de vidrio para evitar que se escape el particulado del suelo cuando se encuentre colmatado de agua. Luego se añaden 30 gramos de suelo secado 16h a 105°C, y se tara el conjunto. Posteriormente se colmata el suelo con agua y se deja que el exceso de agua se elimine por gravedad. Finalmente se determina la humedad del suelo saturado (cuando ya no pierde agua por gravedad), obteniéndose así la capacidad de campo del suelo.

3.5.4 Método para mantener la humedad en las muestras dispuestas en los mesocosmos.

Se dispondrá de un dispositivo que se utiliza normalmente en el cultivo de vegetales, es una estaca electrónica que en su extremo inferior posee un sensor que se entierra en la muestra, en el extremo superior tiene una luz que se activa cuando está por secarse y de esta manera avisar que la muestra necesita humedad, se puede ver una imagen en el anexo

3.5.5. Método para determinar pH.

El pH determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo (Alexander 1994). La solubilidad de muchos contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con altos valores de pH. La determinación del pH en suelo se realiza según el método de la pasta saturada en una suspensión de suelo: agua en proporción 1:2,5 (p/v). Para ello se suspenden 10 g de suelo en 25 ml de agua, se agita la mezcla durante 40 minutos y se mide el pH en un medidor digital calibrado según especificaciones del fabricante. La medición se realizó semanalmente en cada uno de los mesocosmos.

3.4.6. Método para determinar EC.

El método de la conductividad eléctrica se realiza por medio de un medidor digital sobre una muestra de agua o extracto de suelo. Para determinar la EC, se pesan 10 g de muestra y se mezclan

con 90 ml de agua purificada; la muestra se agita constantemente durante 40 min y posteriormente se realiza la medición de EC del extracto. Los medidores se calibran según las especificaciones del fabricante.

3.5.6. Método para determinar humedad y temperatura.

Para determinar humedad relativa y temperatura al interior de la carpa de cultivo, utilizaremos un termohigrómetro, el cual entrega en tiempo real los valores de cada uno.

Se consideraron los rangos óptimos de los factores que influyen en la degradación de hidrocarburos totales, descritos con más detalle en tabla mahshabfh en anexos. La cantidad de agua que se adiciona a cada mesocosmos para ajustarlos capacidad de campo, se determinara por diferencia de pesos en cada uno, descritos con más detalle en Tabla A5, en anexos.

Para mantener humedad y temperatura en rangos óptimos se utilizó un controlador de manera de automatizar conectando a un foco infrarrojo y a un ventilador para así hacer que los valores fluctúen entre los 20-30 grados Celsius de temperatura y a una humedad de 65 ± 10 %.

En cada muestreo es necesario ser lo más prolijo posible, utilizar guantes de látex, lavar los instrumentos (pala de jardinería, pH metro, medidor de ec) cada vez que se utilicen en un mesocosmos, y así evitar la contaminación cruzada. En el muestreo se saca sedimento de forma aleatoria de distintas partes del mesocosmos hasta alcanzar unos 150 (g), necesarios para los distintos análisis.

4. CAPITULO IV RESULTADOS.

4.1. Caracterización del Suelo.

El suelo contaminado sometido a tratamiento procedió de una sola muestra, los resultados se muestran a continuación.

4.1.1. Densidad y porosidad.

De acuerdo a ensayo detallado en anexos. Podemos caracterizar la muestra de suelo con una porosidad aproximada de un 40% y una densidad de 1,45 [gr/m³]

4.1.2. Granulometría.

De acuerdo a nuestro ensayo de granulometría realizado, la clasificación de suelo obtenida de acuerdo a normativa U.S.C.S corresponde a una arena limosa. Como la cantidad de finos que pasa por el tamiz 200 es menor al 30%, no podemos determinar plasticidad o más bien la muestra carece de plasticidad. El detalle de los pesos retenidos en cada tamiz se puede apreciar en la Tabla ++, en anexos.

4.1.3. Capacidad de campo.

De acuerdo al ensayo realizado, detallado en figura +++, en anexos. la capacidad de campo de cada mesocosmos equivale a un 35%, significa que, por cada 100 gr de suelo seco, se retiene 37 gr de agua.

4.1.4 Análisis de metales pesados y materia orgánica del suelo. (falta redactar los resultados)

4.2. Caracterización de Lodos Residuales

4.2.1 Análisis de lodos activos.

La muestra de suelo se envió a análisis a laboratorios ANAM, Santiago. La concentración de metales pesados cumple los valores que establece la norma NCh 2952c-2004 “requisitos y restricciones para la aplicación de lodos como enmienda de suelos”. Como se puede apreciar en “TABLA DE ANALISIS DE LODOS”, en anexos.

4.2.2 Humedad de lodos activos.

La muestra de Lodos permaneció durante 2 días en horno a $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$, se obtuvo una humedad del 74 % aproximadamente, lo cual guarda relación al momento de la recolección de los lodos, ya que estos estaban dispuestos en base humedad. El ensayo de humedad se realizó inmediatamente después de la recolección, para no influenciar la muestra a las temperaturas del ambiente, o el transporte. El detalle de los pesos se precisa en la tabla “DETERMINACION DE HUMEDAD EN LODOS, en anexos.

4.2.3. Medición de parámetros.

Las mediciones se realizaron los días lunes, miércoles y viernes, por un periodo de 120 días. Los valores de EC están en [$\mu\text{S}/\text{cm}$], el agua agregada se estandarizó en 200 [ml] debido a que las condiciones ambientales eran homogéneas.

En el pH se observó un incremento de aproximadamente 2 unidades (pH final entre 8 y 8.5) en todos los tratamientos con adición de lodos. El rango recomendado para una buena degradación aeróbica de hidrocarburos en el suelo oscila entre 6 y 9, con un óptimo de 7.

En relación a la EC, el tratamiento formulado con lodos presentó valores mayores que en los otros tratamientos (remediación natural y remediación natural +aire) esto debido a que hay más sales presentes.

En relación a la temperatura debido a que se controló ambientalmente el experimento, se registraron valores de $20^{\circ}\text{C} \pm 2$. El detalle de las mediciones se puede apreciar en “MEDICION DE CARACTERISTICAS FISICAS”, en anexos.

4.2.4. Degradación de HTPs.

Para determinar la degradación de hidrocarburos totales de petróleo, se enviaron las muestras asociadas a cada uno de los mesocosmos, al laboratorio de química de productos naturales de la Universidad de Concepción. Un análisis al comienzo de la experiencia y análisis al final del periodo de 90 días (para todos los mesocosmos) y una muestra posterior al día 50 y 120 solo para el mesocosmo con aireación y mezcla de suelo y lodos (ver figura anexos). Con el fin de realizar análisis de HTPs.

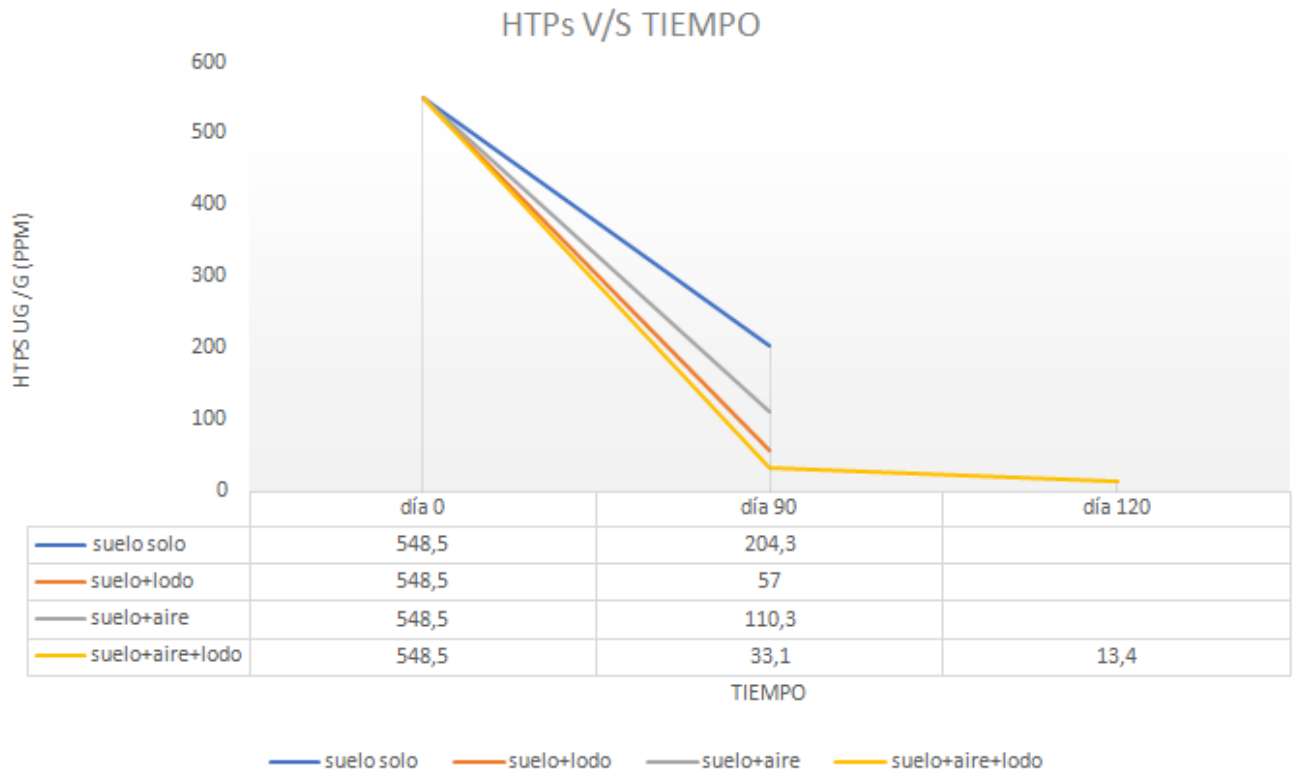
Los resultados de los análisis demuestran los porcentajes de remoción de contaminante en cada mesocosmos. En todos los tratamientos se registran porcentajes de degradación mayor al 60%, los cuales se detallan mejor en la siguiente tabla.

Concentraciones de HTPs en mesocosmos.

Mesocosmos	Concentración Inicial ug/g (ppm)	Concentración día 50 ug/g (ppm)	Concentración Final día 90 ug/g (ppm)	Concentración día 120 ug/g (ppm)	Remoción de contaminante día 90(%)	Remoción de contaminante día 120 (%)
Suelo Natural	548,5	-	204,3	-	62,75%	-
Suelo+Lodo	548,5	-	57,0	-	89,6%	-
Suelo+Aire	548,5	-	110,3	-	79,89%	-
Suelo+Lodo+Aire	548,5	158,3	33,1	13,4	93,9%	97,55%

Fuente: Elaboración propia

Las muestras fueron extraídas con solvente y luego analizadas por cromatografía de gas con detector de ionización de llama.



5. CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.6. Conclusiones

El desarrollo sostenible requiere de la implementación de un enfoque de gestión que implique innovación y desarrollo de nuevas tecnologías para el control de la contaminación del ambiente. La creciente demanda de la sociedad para la descontaminación de suelos industriales, materializada en restricciones cada vez más estrictas, ha impulsado, en la última década, la búsqueda de alternativas que contribuyan a solucionar estos problemas de carácter ambiental. Este experimento revela con cifras que la biorremediación, se ha convertido en una alternativa atractiva y prometedora a las tradicionales técnicas físico-químicas para la remediación de los compuestos que contaminan un determinado lugar, ya que ha demostrado ser más rentable y puede degradar selectivamente sin dañar flora y fauna.

El proceso de recuperación del suelo nativo contaminado con hidrocarburos de petróleo, a nivel laboratorio, alcanzó tasas de remoción del 62,75% solo con mantener el suelo a una humedad constante sin dejar que se secase por efecto de la temperatura, el cual es un gran resultado y económicamente muy asequible, y se posiciona como una buena alternativa cuando no existen plantas de tratamientos de aguas residuales cerca a los sitios contaminados, sin embargo el mejor tratamiento fue el que contenía lodos residuales (biosólidos) como fuente alterna de nutrientes, en razón 1:0.5 y a la vez era aireado con el sistema de ventilación, esto se puede explicar por la mayor disponibilidad de oxígeno para la respiración microbiana. La mineralización o madurez de los lodos influyó en la tasa de remoción de hidrocarburos, entre más frescos mayor remoción.

Mantener los suelos a capacidad de campo y con flujos de aireación es también un buen estimulante de la flora nativa y alcanzo un porcentaje de recuperación superior a un 79%.

Con base en un análisis de los resultados, se determinó que tanto la presencia de nutrientes presentes en los lodos, oxígeno y la cantidad de agua disponible, fueron factores que ayudaron a la remoción de los HTP; sin embargo, fue la mezcla de estos tres factores la que mejores resultados brindó, lográndose una remediación de un 94% al término de 3 meses y al finalizar el cuarto un 98%.

El empleo de lodos residuales, resulta una alternativa técnicamente factible, viable y sencilla que favorece la degradación de contaminantes orgánicos en suelos a través de procesos de composteo al aportar nutrientes a las poblaciones microbianas, pero para lograr mejores resultados es necesario

una inversión mayor para un sistema de aireación constante que proporcione oxígeno abundante por todo el suelo a tratar logrando un 15% de mayor efectividad.

Se demostró que era posible la provisión de oxígeno y era capaz de pasar a través de la zona vadosa del suelo, también que los microorganismos endógenos del lugar tienen capacidad para utilizarlo y de esta manera biodegradar en proporción aceptable los hidrocarburos

5.7. Recomendaciones

- I. El proceso de biorremediación aerobia de suelo contaminado con hidrocarburos es factible por ser una técnica económica amigable con el medio ambiente de acuerdo a la norma que controla las cantidades a utilizar y da buenos resultados en un mediano plazo.
- II. Es oportuno señalar que el valor de los resultados correspondientes a las mediciones de las características físicas, pueda variar, ya que el factor de precisión de los instrumentos a utilizar esta dado según la marca y modelos de estos, no se trabajó con certificaciones, sin embargo, fueron calibrados antes de ser usados.
- III. Se recomienda una línea investigativa in situ con un sistema de aireación industrial y que permita variar las condiciones ambientales de acuerdo a la zona en que se quiere implementar el método, ya que estos resultados son de acuerdo a un ambiente controlado y con aireación a nivel de escala.
- IV. Se recomienda determinar la conductividad hidráulica y la permeabilidad intrínseca para ver cuánto es la cantidad de oxígeno que necesitamos, en este estudio se proporcionó de manera igual a dos mesocosmos de manera de saber una proporción, pero no la cantidad necesaria en sí.

6. BIBLIOGRAFIA.

1. Garzón JM, Rodríguez-Miranda JP, Hernández-Gómez C (2016). Revisión del aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. Tesis de grado, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
2. Verónica Orosco y Mercedes Soria (2008). Biorremediación de Vegetación Contaminada con Petróleo por Derrames en el Campamento Guarumo. Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador.
3. Ing. Roxana Ángeles Torres (2015). Evaluación de la degradación de hidrocarburos en microcosmos de manglares utilizando la técnica de bioestimulación. Tesis de grado, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias Campus Tuxpan, Veracruz, Mexico.
4. Alejandra Zamora, Jesús Ramos y Marianela Arias (2012). Efecto de la contaminación por hidrocarburos sobre algunas propiedades químicas y microbiológicas de un suelo de sabana. Tesis de grado, Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela
5. Gloria Silva Bravo (2011). Biorremediación en habitats contaminadas por hidrocarburos. Tesis Doctoral, instituto Del agua ,departamento de microbiología, Universidad de Granada. Granada, España.
6. Miguel Cando (2011). Determinación y Análisis de un Proceso de Biorremediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos. Tesis de Grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
7. Katherine Torres y Tatiana Zuluaga (2009). Biorremediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos. Tesis de grado, Facultad de Minas e Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

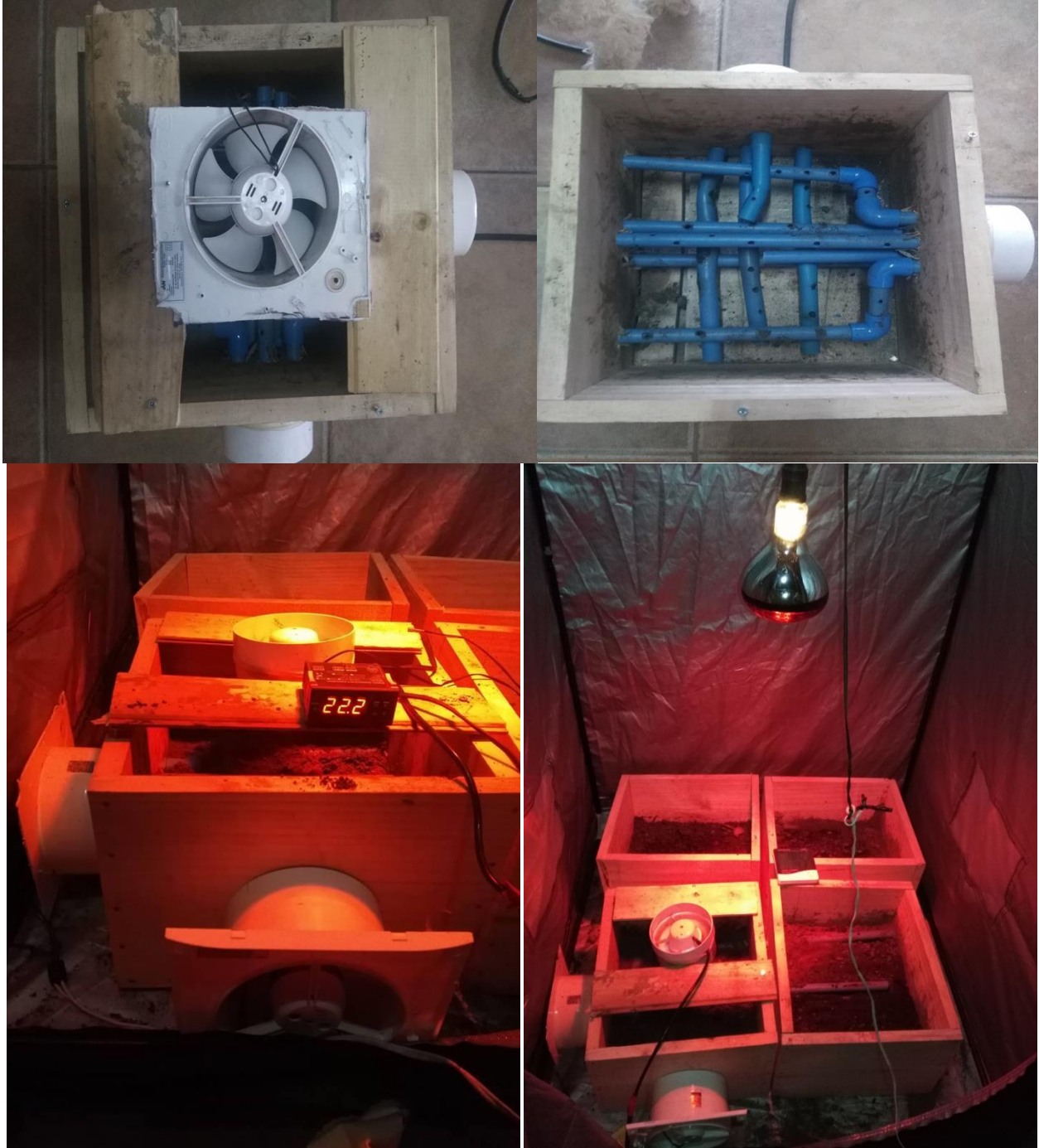
8. Elizabeth Samanez (2008). Biodegradación Bacteriana por Bioestimulación en Suelos Contaminados con Petróleo Crudo. Tesis de Grado, Facultad de Farmacia y Bioquímica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

9. María Mallea (2008). Remediación de Suelos Contaminados y Análisis de un Proyecto Piloto en Chile, en el Marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Tesis de Grado. Facultad de Química y Farmacia. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

ANEXOS.

Anexo. Realización de la Etapa Experimental

Construcción de mesocosmos y montaje de equipos.



Calibración de instrumentos



Anexo. Caracterización de materias primas.

. Determinación de densidad y porosidad del suelo.

Porosidad =0,4


Densidad=1,45

Masa total/volumen total= 4094/2811=1,45

Porosidad =V aire/V total= 1150/2811=0,4



Tabla. Granulometría del suelo.

Descripción de material: Población 18 de Septiembre, Sector la Emergencia, Hualpén				
Granulometría				
Peso muestra total seca a tamizar (g)				745,0
Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (g)	(%)	
20	3/4	0	0	100
10	3/8	3,5	0.1	99.9
5	4	15,7	2,1	97,8
2	10	67,3	9.0	88.8
0.5	40	294,4	39,5	49,3
0.08	200	212,7	28,5	20,8
	Residuo	151,4	20,3	
Clasificación AASHTO		Clasificación USCS		
Clasificación	A1-b	Clasificación	SM	
IG:	0	Arena Limosa; Lp=LL=0		
Humedad Natural				
Capsula	X5			
Tara	83,1	gr		
Peso húmedo más tara	459,8	gr		
Peso seco más tara	437,3	gr		
Peso húmedo	376,7	gr		
Peso seco	354,2	gr		
Peso agua	22,5	gr		
Humedad	6,3	%		

Fuente: Elaboración propia.

Figura. Determinación de capacidad de campo del suelo.

$V_t = 150 \text{ [cm}^3\text{]}$

Muestra _{seca} = 185,18 [gr]

Muestra _{húmeda} = 250 [gr]

$\Delta H_2O = 64,82 \text{ [gr]}$

Por lo tanto 185,18[gr] de suelo son capaz de almacenar 64,82[cm³] de H₂O , entonces por regla de 3 simples 6[kg] de suelo tienen una capacidad de campo de 2100[cm³]

Análisis de metales pesados y materia orgánica del Suelo.

ANALISIS	N° de Laboratorio	33265
	CUARTEL	BIORREMEDIACION
	Unidad	
pH susp	-	6,25
CE susp	mS/cm	0,08
M.O	%	2,02
Totales		
As	mg/kg	2,47
Cd	mg/kg	0,6
Cu	mg/kg	94,9
Cr	mg/kg	29,8
Fe	mg/kg	43725
Mn	mg/kg	975
Hg	mg/kg	<0,01
Mo	mg/kg	1,37
Ni	mg/kg	57,6
Pb	mg/kg	33,1
Se	mg/kg	0,02
Zn	mg/kg	224,4

Análisis de lodos Laboratorio.

Tabla. Determinación de humedad en lodos

		X5	
Capsula			
Tara		21,5	gr
Peso húmedo más tara		37,7	gr
Peso seco más tara		30,8	gr
Peso húmedo		16,2	gr
Peso seco		9,3	gr
Peso agua		6,9	gr
Humedad		74.19	%

Tabla de análisis de lodos

Muestra 3753060					
Análisis/Método	Fecha de ensayo	Resultado	Unidad	Requisito Normativo	Límite de Detección
Arsénico Total (As) M.S. SM 3120 B	Inicio 26/10/2016 13:50 Fin 27/10/2016 16:32	7,28	mg/Kg	-	1,2
Cadmio Total (Cd) M.S. SM 3120 B	Inicio 26/10/2016 13:50 Fin 27/10/2016 16:32	0,64	mg/Kg	-	0,1
Cobre Total (Cu) M.S. SM 3120 B	Inicio 26/10/2016 13:50 Fin 27/10/2016 16:32	421,50	mg/Kg	-	1,4
Coliformes Fecales St Met 9221 E	Inicio 14/10/2016 10:30 Fin 19/10/2016 17:22	1,60E+03	NMP/g	-	1,8
Conductividad Eléctrica TMECC 04.10-A	Inicio 14/10/2016 10:15 Fin 21/10/2016 11:53	5,78	dS/m	-	0,0005
Humedad SM 2540G (2012)	Inicio 14/10/2016 12:35 Fin 18/10/2016 11:36	82,71	%	-	-
Materia Orgánica TMECC 05.07	Inicio 17/10/2016 10:00 Fin 21/10/2016 09:26	70,48	%	-	0,28
Mercurio total (Hg) M.S. St Met 3112B	Inicio 18/10/2016 14:01 Fin 18/10/2016 14:22	1,12	mg/Kg	-	1
Niquel Total (Ni) M.S. SM 3120 B	Inicio 26/10/2016 13:50 Fin 27/10/2016 16:32	10,41	mg/Kg	-	1,2
pH TMECC 04.11-A	Inicio 14/10/2016 10:15 Fin 21/10/2016 12:03	7,2	unidad de	-	-
Plomo Total (Pb) M.S. SM 3120 B	Inicio 26/10/2016 13:50 Fin 27/10/2016 16:32	44,40	mg/Kg	-	1,2
Selenio Total (Se) M.S. SM 3120 B	Inicio 26/10/2016 13:50 Fin 27/10/2016 16:32	5,05	mg/Kg	-	0,9
Sólidos Totales St Met 2540G	Inicio 14/10/2016 12:35 Fin 18/10/2016 11:35	17,3	%	-	-
Sólidos Volátiles St Met 2540G	Inicio 14/10/2016 12:35 Fin 18/10/2016 12:15	68,1	%	-	0,003
Zinc Total (Zn) M.S. SM 3120 B	Inicio 26/10/2016 13:50 Fin 27/10/2016 16:32	1025,36	mg/Kg	-	2,8

Tabla. Análisis, métodos y frecuencia para medir características físicas.

ANÁLISIS	METODO	FRECUENCIA
Temperatura	Termo higrómetro	3 veces por semana
pH	Medidor digital	3 veces por semana
Electroconductividad	Medidor digital	3 veces por semana
Humedad	Termo higrómetro	3 veces por semana

Configuración de parámetros.

Tabla. Rangos óptimos para procesos de biorremediación

Propiedad	Rango	Referencia
Temperatura (°C)	18° - 30°	Gómez, S., et al, 2008
pH (unidades)	6 - 9	Ríos, R., 2005
Humedad (% capacidad de campo)	20% - 75%	Gómez, S., et al, 2008

Tabla. Cantidad de agua aplicada y volteos manuales por semana.

Días de la semana	Actividad	Cantidad de agua
Lunes	A todos los mesocosmos se les adiciona agua y volteo manual	A capacidad de campo
Miércoles		A capacidad de campo
Viernes		A capacidad de campo

Medición de características física

Periodo de medición= 120 días

Semana	Temperatura [°C]	Humedad [%]	pH-SN	EC-SN	pH-SN+L	EC-SN+L	pH-S+L+A	EC-S+L+A	pH-SN+A	EC-SN+A	Agua Agregada
1	20,0	74,0	6,0	0,1	7,0	5,81	7,1	5,82	6,0	0,10	200,0
2	20,0	80,0	6,3	0,2	7,3	5,90	7,2	5,94	6,3	0,30	200,0
3	21,0	77,3	6,3	0,3	7,4	5,99	7,5	6,06	6,4	0,30	200,0
4	22,0	70,0	6,4	0,4	7,4	6,08	7,6	6,18	6,4	0,47	200,0
5	21,3	85,7	6,4	0,5	7,5	6,17	7,6	6,30	6,4	0,50	200,0
6	20,5	78,5	6,4	0,6	7,6	6,26	7,7	6,42	6,5	0,70	200,0
7	23,3	71,3	6,4	0,7	7,7	6,35	7,8	6,54	6,6	0,76	200,0
8	18,4	77,0	6,5	0,7	7,7	6,44	8,0	6,66	6,6	0,90	200,0
9	20	74	6,5	0,83	7,9	6,53	8,1	6,78	6,6	0,95	200
10	18,9	81,2	6,5	0,9	7,9	6,62	8,2	6,90	6,7	1,03	200,0
11	20,5	80,2	6,5	1,0	8,0	6,71	8,2	7,02	6,8	1,10	200,0
12	21,0	81,0	6,5	1,1	8,1	6,80	8,3	7,14	6,9	1,34	200,0
13	20,0	81,0	6,5	1,2	8,3	6,89	8,5	7,26	6,9	1,40	200,0
14	22,0	85,0	6,5	1,3	8,3	6,98	8,5	7,38	7,0	1,41	200,0
15	21,0	75,0	6,5	1,3	8,3	6,98	8,5	7,40	7,0	1,40	200,0
16	19,0	74,1	6,5	1,3	8,3	7,00	8,5	7,40	7,0	1,43	200,0

* Valores Promediados en 3 días de mediciones a la semana

EC= [µs/cm]

Agua= [ml]

. Gráfico de variación de pH de los distintos escenarios.

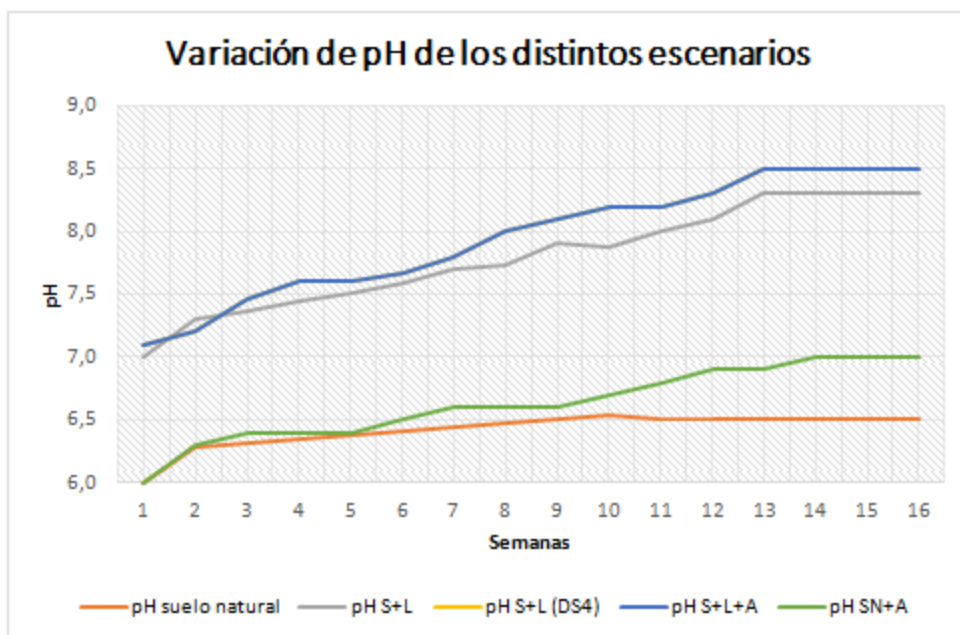


Gráfico de variación de hidrocarburos totales para el escenario de mezcla de suelo más aplicación de oxígeno y lodos residuales, obteniendo valores para 50 y 105 días al interpolar linealmente.

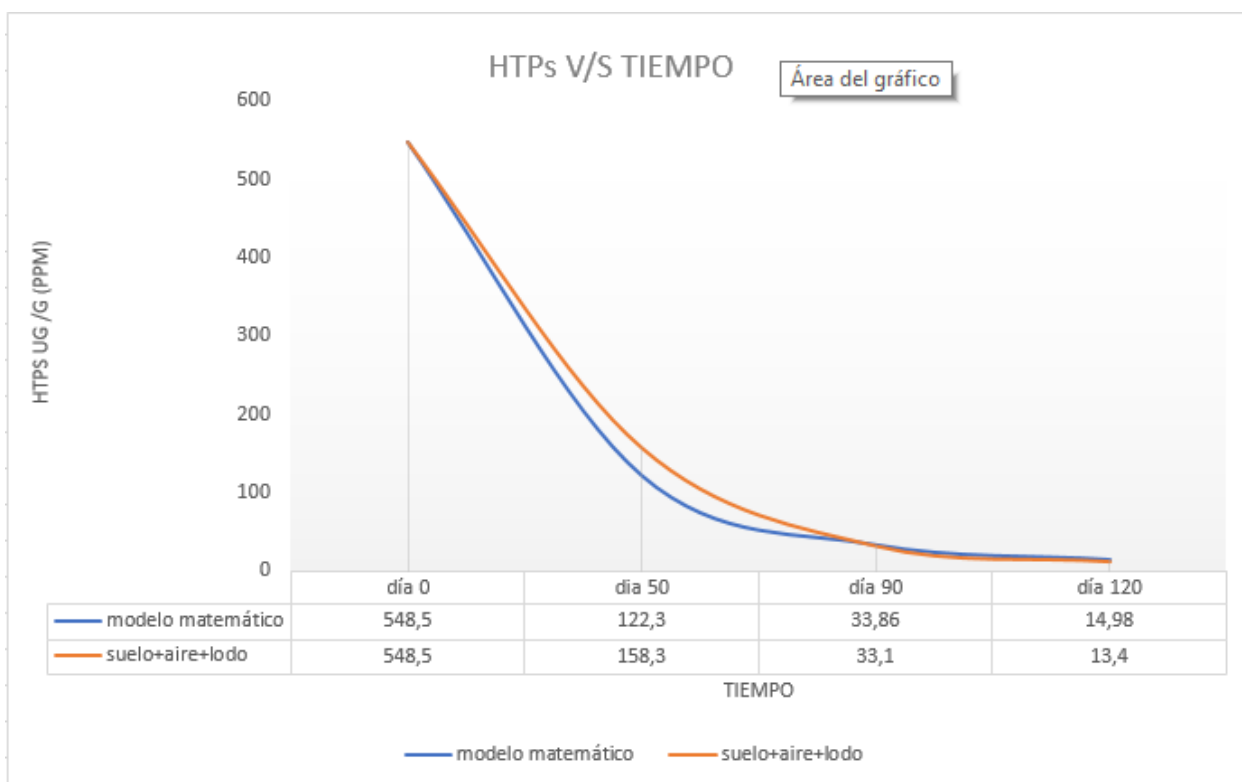


Figura A- 1. Recolección de muestras a analizar.



