

**APLICACIÓN DE NANOTECNOLOGÍA PARA REMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS**

MARY JULIETTE DÍAZ VILLANUEVA

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE ESPECIALISTA
EN GESTIÓN AMBIENTAL**

ORIENTADOR

HARVEY ANDRÉS MILQUEZ SANABRIA

MSC INGENIERÍA QUÍMICA

PHD ENERGÍAS RENOVABLES

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre del director

Firma del Director

Nombre

Firma del presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. mayo de 2022

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada Garcia-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macias Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICATORIA

Esta monografía va dedicada a Dios quien me ha permitido llegar hasta este punto, llenándome de sabiduría para poder culminar mis estudios y a mi mamá quien siempre ha estado en mi vida apoyándome en todo lo que me propongo, dándome motivación cada día para llegar a ser una gran persona en mi vida personal y laboral.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco por sobre todas las cosas a Dios quien me ha llevado de la mano en conocimiento y sabiduría para terminar esta etapa de mi vida, a mi mamá y a mi papá quienes me han motivado para llegar a ser la mujer que soy hoy en día, a mis hermanos que siempre han estado apoyándome cuando más lo necesito y a la Universidad de América la cual me ha visto crecer en mi carrera profesional como ingeniera de petróleos y ahora como especialista en gestión ambiental.

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

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVOS	13
Objetivo General	13
Objetivos Específicos	13
1. INTRODUCCIÓN A LAS CAUSAS Y PROCESO DE CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR HIDROCARBUROS	14
1.1 Causas de Contaminación por derrames de hidrocarburos	14
1.1.1 Corrosión o Falta de mantenimiento	14
1.1.2 Falla de Accesorios o Conexiones	15
1.1.3 Causas Naturales	15
1.1.4 Fallas de Construcción	16
1.1.5 Fallas Operacionales	16
1.1.6 Sabotaje de Terceros	16
1.2 Proceso de contaminación del suelo a causa del petróleo	18
1.2.1 Mecanismos de Desplazamiento de Contaminantes en el Suelo	18
1.2.2 Mecanismos de Transformación de Contaminantes en el Suelo	20
1.3 Degradación de Suelos	20
1.3.1 Consecuencias de la Degradación de Suelos	21
1.4 Degradación de Suelos por Hidrocarburos	22
1.4.1 Consecuencias de la Degradación del Suelo por Hidrocarburos	23
2. NANOTECNOLOGÍA Y SUS MÉTODOS DE APLICACIÓN EN SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS	24
2.1 Nanotecnología	24
2.2 Antecedentes	25
2.3 Nanopartículas	27
2.3.1 Técnicas de Síntesis	28
2.4 Técnicas para Remediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos Usando Nanotecnología	33
2.4.1 Aplicación de Nanocatalizadores	33
2.4.2 Aplicación de Nanohierro	35
2.4.3 Aplicación de Nanoemulsiones	37

2.4.4	<i>Aplicación de Micro-nanoburbujas</i>	40
3.	SELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE NANOTECNOLOGIA ADECUADA PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS	43
3.1	Comparación de Técnicas de Nanotecnología por Medio de Análisis DOFA	43
3.1.1	<i>Análisis DOFA para Aplicación de Nanocatalizadores</i>	43
3.1.2	<i>Análisis DOFA para Aplicación de Nanohierro</i>	45
3.1.3	<i>Análisis DOFA para Aplicación de Nanoemulsiones</i>	46
3.1.4	<i>Análisis DOFA para Aplicación de Micro-Nanoburbujas</i>	47
3.2	Método a Seleccionar	48
4.	CONCLUSIONES	49
	BIBLIOGRAFÍA	50

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Descripción del Proceso de Ablación con Láser.	29
Figura 2. Esquema del Proceso de Deposición Química en Fase Vapor (CVD).	30
Figura 3. Descripción del Método Deposición Física de Vapor.	31
Figura 4. Descripción del proceso de la técnica sol-gel.	32
Figura 5. Descripción de remediación de suelos de manera in situ por medio de nanocatalizadores.	34
Figura 6. Procesos de reducción/oxidación (reacción redox).	36
Figura 7. Tamaños de Gotas en Emulsiones (Micro, nano y macro).	37
Figura 8. Comportamiento de burbujas según su tamaño.	41
Figura 9. Análisis DOFA de Aplicación de Nanocatalizadores	44
Figura 10. Análisis DOFA de Aplicación de Nanohierro	45
Figura 11. Análisis DOFA de Aplicación de Nanoemulsiones	46
Figura 12. Análisis DOFA de Aplicación de Micro-Nanoburbujas	47

RESUMEN

En el presente documento se realizó una investigación descriptiva sobre los diferentes métodos que existen para aplicar nanotecnología en los suelos contaminados por la industria petrolera, debido a que esta última es una de las más criticadas a nivel mundial por su contribución al daño de la flora y la fauna. Para llegar al objetivo principal de esta investigación se llevó a cabo una descripción del proceso de contaminación a causa de los hidrocarburos, para posteriormente mencionar las diferentes técnicas de síntesis las cuales son importantes para el planteamiento de cada nanopartícula y finalmente se mostraron los diferentes métodos que se han implementado en los últimos 10 años usando la nanotecnología como actor principal para ayudar a la remediación de suelos contaminados por los hidrocarburos, las cuales ayudaron a través de análisis DOFA a la selección del mejor método, el cual se trata de las nanoemulsiones con aceite esencial de cascara de naranja dejando resultados de remoción de un 97.5%, se evidenció que es un método con respuestas rápidas, en comparación con la técnica de micro-nanoburbujas la cual deja un valor de remoción de contaminantes de tan solo el 49%, siendo esta la menos efectiva en la eliminación de hidrocarburos en los suelos. Sin embargo, el método de aplicación de nanocatalizadores al igual que el de nanoemulsiones dejó estándares altos en cuanto a los resultados de remoción mostrando valores mayores al 95% en tiempos cortos una vez se desarrolla la técnica.

Palabras Claves: Degradación de Suelos, nanoemulsiones, nanopartículas y técnicas de síntesis.

INTRODUCCIÓN

La industria petrolera, después del textil, es uno de los sectores más criticados por su impacto en el medio ambiente, debido al proceso por el que tiene que pasar el crudo para llegar a convertirse en fuentes de energía como lo son la gasolina o diésel. Por esta razón algunos científicos como el nombrado Auke Hoekstra trata de responder el interrogante “¿hasta qué punto la obtención de gasolina y diesel puede llegar a contaminar?” por lo que este apoyándose en estudios sobre la producción mundial de petróleo comprobó que la extracción de un barril de este recurso genera emisiones de aproximadamente 63 kg de dióxido de carbono, lo que equivale a 10.3 gramos de dióxido de carbono por MJ. Sin embargo, no solo el aire como lo mencionamos anteriormente sale afectado, ya que, según Greenpeace de México, (2012) declaró que la contaminación de hidrocarburos es generada de manera accidental o deliberada, por lo que se estima que 3 mil 800 millones de litros entran cada año a los océanos como resultado de estas actividades, es decir, solo el 8% se debe a fuentes naturales, aproximadamente el 22% a descargas operacionales intencionales de los barcos, el 12 % a derrames por parte de los buques y por ultimo el 36 % a las descargas de aguas residuales. Estos datos dejan ver el gran impacto negativo que puede llegar a tener la extracción, producción y comercialización del petróleo, como lo son la daño de ecosistemas terrestres y marinos, la afectación de la salud humana, la muerte de nuevos organismos, la cantidad de emisiones que se estancan en el aire y por lo que se desarrolla este documento que no es menos importante, la contaminación de los suelos.

Sin embargo, a medida que pasa el tiempo se han venido creando nuevos y mejorados métodos para su posterior aplicación en lo referente a la remediación ambiental.

En los últimos tiempos se ha acudido a una gran variedad de procesos para tratar de remediar la contaminación que se presenta por desarrollos industriales, como lo es la excavación y traslado de estos suelos a otros lugares, actividad que aún deja consecuencia, debido a que no desaparece la contaminación, sino que simplemente se transfiere a otra ubicación.

Por lo anterior mencionado en este documento se constatará lo que es la aplicación de nanopartículas o nanotecnología, ya que esta permite una flexibilidad en la descontaminación, esto a partir de procesos *in situ*, es decir, sin la grave necesidad de remover el suelo; adicionalmente, la implementación de estos trae consigo grandes ventajas en la sostenibilidad de la remediación en los suelos por medio de reacciones químicas inertes que consienten la inmovilización de los contaminantes en suelos degradados, tal y como se hablará en este caso, por los hidrocarburos.

Los hidrocarburos son un recurso natural que viene siendo considerablemente relevante en el mundo a partir de su gran número de aplicaciones para el sector energético, de plásticos e incluso hasta estético. Este gran crecimiento también ha traído consigo graves consecuencias para la parte ecológica a nivel mundial, esto a causa de los derrames en aguas, suelos y demás; la industria petrolera ha ido degradando fauna y flora. Así mismo, “la contaminación por hidrocarburos de petróleo ejerce efectos adversos sobre las plantas indirectamente, generando minerales tóxicos en el suelo disponible para ser absorbidos, además, conduce a un deterioro de la estructura del suelo; pérdida del contenido de materia orgánica; y pérdida de nutrientes minerales del suelo, tales como potasio, sodio, sulfato, fosfato, y nitrato” (Serrano *et al*, 2013).

En razón de lo antes expuesto, se busca informar por medio del presente documento los distintos avances y desarrollos en los que se han venido trabajando en los últimos años a nivel industria, con respecto a la aplicación de nanopartículas para mitigar el impacto ambiental en consecuencia de los derrames de hidrocarburos.

OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Determinar los tratamientos para la aplicación de nanopartículas en la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar las causas y el proceso de contaminación de los suelos por hidrocarburos.
- Describir los métodos de implementación de nanopartículas en los suelos contaminados por hidrocarburos.
- Seleccionar el método más adecuado para la aplicación de nanotecnología en suelos contaminados por hidrocarburos.

1. INTRODUCCIÓN A LAS CAUSAS Y PROCESO DE CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR HIDROCARBUROS

Alrededor del mundo se lleva a cabo la actividad exploratoria y productiva de la industria petrolífera, lugares los cuales pueden llegar a estar rodeados de flora, fauna e incluso comunidades. Por lo que existe una gran posibilidad de que estos últimos salgan afectados de manera negativa a causa de estas labores, desarrollando un daño grave en los suelos en donde se presentan alteraciones fisicoquímicas y biológicas que al pasar el tiempo pueden afectar a la sociedad. No obstante, es importante resaltar que no todas estas consecuencias se deben directamente a la industria petrolera, ya que pueden presentarse acciones externas que terminan afectando la vegetación y las comunidades. El objetivo de este capítulo se basa en determinar algunas de las más importantes causas por las que existen suelos contaminados por hidrocarburos y el proceso de contaminación de estos mismos.

1.1 Causas de Contaminación por derrames de hidrocarburos

En un contexto general la principal causa por la que existen los suelos contaminados por hidrocarburos es por los derrames de petróleo, claro está que estos pueden originarse por muchas otras causas, entre estos los más importantes y significativos según la OSINERGMIN, (2016) son:

1.1.1 Corrosión o Falta de mantenimiento

El hecho más importante por el que los derrames de hidrocarburos se generan es por la falta de mantenimiento que tienen muchos de los oleoductos que por sus grandes longitudes pueden llegar a afectar a grandes zonas de vegetación, esto se debe a que al pasar el tiempo estas tuberías se van deteriorando internamente por las diferentes sustancias que pueden estar desplazándose por estas, generando así corrosión que a su vez crean fisuras lo que causa el derrame. Para prever estos hechos es necesario que las empresas operadoras tengan un control estricto sobre los tiempos de mantenimiento que se le deben realizar a todos los oleoductos.

Es importante de la misma manera destacar que a través de la falta de mantenimiento a las tuberías se pueden evitar otras posibles causas que pueden influir mayormente al derrame y a la contaminación de los suelos expuestos, lo que aumenta el riesgo de estas grandes consecuencias.

1.1.2 Falla de Accesorios o Conexiones

Según el *manual de mantenimiento y reparación de los oleoductos de operaciones Talara, (2012)*. Esta causa se genera igualmente por errores humanos y falta de mantenimiento, debido a que las diferentes válvulas, accesorios o conexiones requieren en un tiempo determinado atención por parte de personal calificado y con el suficiente conocimiento para realizar la adecuada inspección a estos equipos en oleoductos terrestres. Por lo que el reconocimiento del tipo de daño y los posibles daños que se pueden presentar posteriormente se pueden verificar en algunas guías técnicas como la EP- 003 de mantenimiento de válvulas, para de esta manera evitar futuros derrames.

1.1.3 Causas Naturales

Los oleoductos la mayoría de veces se encuentran ubicados en ecosistemas naturales, por lo que pueden estar sometidos a diferentes fenómenos que son causa de naturaleza, debido a esto las empresas operadoras se encargan de buscar las tuberías más adecuadas dependiendo del entorno en el que se quieren ubicar y por esto mismo adecuar el terreno lo mejor posible para evitar accidentes futuros. Sin embargo, existen grandes probabilidades que a raíz de dichos fenómenos se presenten eventualidades que causen daños en los oleoductos generando derrames. Muchos de estos pueden ser a causa de la lluvia, la cual puede llegar a ocasionar deslizamientos de la tierra creando daños en las tuberías.

1.1.4 Fallas de Construcción

Las afectaciones de la integridad de un oleoducto también se pueden presentar por fallas en la construcción de este, por lo que en un principio su diseño no se realizó con las especificaciones correctas. ¿a qué se debe esto? Todas las tuberías se realizan con un objetivo final, el cual es desplazar cualquier clase de sustancia, por esto mismo se deben tener en cuenta ciertos parámetros importantes como lo son la clase de fluido, la presión con la que viaja el fluido, la velocidad y demás con el fin de que el ciclo de vida de esta sea mucho más largo y se eviten futuros accidentes.

1.1.5 Fallas Operacionales

Como se mencionó anteriormente en el numeral 1.1.4 las tuberías se crean para ser sometidas a criterios específicos, por lo que si dichas especificaciones no son respetadas por los entes de operaciones estas pueden llegar a sufrir grandes daños, como lo son por ejemplo negligencia al momento de someter el oleoducto a presiones con las que no puede cargar o de la misma forma desplazar un fluido diferente para el cual no están hechas.

1.1.6 Sabotaje de Terceros

Finalmente, el sabotaje de terceros el cual es muy importante ya que es más recurrente de lo que se espera, esta causa de derrames de hidrocarburos se presenta en su mayoría de veces por los atentados que se le realizan a los diferentes oleoductos y pueden ser a raíz de muchos factores, como por ejemplo, el robo de estas sustancias para su posterior venta de manera ilegal o también como muy a menudo pasa en Colombia estos ataques se llevan a cabo por órdenes de grupos armados al margen de la ley como el ELN.

A continuación, se presentará la **Tabla 1** la cual mostrará algunas de las causas de derrame de petróleo en el respectivo periodo de tiempo (1997 – 2016) en el país de Perú.

Tabla 1

*Resumen de las causas de derrame de petróleo entre los años 1997
– 2016 en Perú.*

CAUSAS DE DERRAME (1997 - 2016)	
CAUSA	EVENTOS
Atentado	67
Corrosión	62
Falla en Accesorios o Conexiones	13
Causas Externas	7
Causas Naturales	18
Fallas de Construcción	5
Falla Operativa	4
En Investigación	6
Otros	8
TOTAL	190

Nota. Datos tomados de OSINERGMIN – Aplicaciones SYM, SFH Y SIGED, (2016).

Según Juan Carlos Ruíz Molleda, (2019) quien apoyándose en los anteriormente mencionados datos de la OSINERGMIN la totalidad de derrames ocasionados en el transcurso de los años entre 1997 – 2016 en el país de Perú fueron a raíz de varias circunstancias como ya se puso constatar, lo que queda por mencionar es que entre los 190 derrames, 67 fueron por sabotaje de terceros, lo que equivale a un valor del 35.2 %, 62 de estos fueron por corrosión o falta de mantenimiento, es decir, un valor del 32 o aproximadamente el 33% y solo 18 que equivale a un 9% fueron ocasionados por fenómenos naturales. Sin embargo, si se llegasen a sumar las causas que ocurren por corrosión, fallas de construcción, fallas operacionales y fallas de conexiones o accesorios se podría llegar a la conclusión de que la mayoría de estos derrames son ocasionados por errores humanos y falta de mantenimiento.

1.2 Proceso de contaminación del suelo a causa del petróleo

Como lo menciona la guía para la prevención de derrames de hidrocarburos, (2017) los efectos de un derrame dependen del tipo de hidrocarburo y las características del ambiente. El petróleo se evapora y transforma naturalmente por la acción de organismos naturales, en algunos casos el ambiente puede recuperarse rápidamente por sí solo, pero en otras ocasiones los efectos pueden permanecer por años (p.9).

Para entender el proceso de contaminación del suelo por hidrocarburos, es necesario tener en cuenta los diferentes mecanismos de transporte que podrían presentarse en el área afectada y a su vez los diferentes mecanismos de transformación que se presentan. De la misma manera es de destacar que estas dos clases de mecanismo también dependen en gran manera de factores físicos, químicos y microbianos.

1.2.1 Mecanismos de Desplazamiento de Contaminantes en el Suelo

1.2.1. a. Lixiviación. Este proceso tiene como actor principal al agua, el cual estará presente siempre en el suelo desplazando a la sustancia contaminante a lo largo de diferentes áreas. A su vez este dependerá de diferentes factores importantes como “la solubilidad, biodegradación, disociación, adsorción, volatilidad, precipitación y evapotranspiración” (Calderón Gómez, 2006, p. 3).

1.2.1. b. Advección. Esta clase de mecanismo según menciona Schnoor (1996), se basa en transportar una clase de masa, es decir, el soluto. El cual será desplazado por una corriente determinada de un punto específico a otro.

1.2.1. c. Difusión. Este proceso se puede clasificar en dos, los cuales pueden ser difusión turbulenta y difusión molecular.

- **Difusión turbulenta:**

La difusión turbulenta se refiere a la mezcla de sustancias disueltas y partículas finas causada por turbulencia a microescala. Es un proceso advectivo a nivel de microescala causado por fluctuaciones en un flujo de cortante turbulento. Los esfuerzos cortantes son suficientes para causar la mezcla. Este es mayor que la difusión molecular en varios órdenes de magnitud y es un factor que contribuye a la dispersión (Calderón Gómez, 2006, p. 4)

- **Difusión Molecular:**

Como lo menciona Yatte Garzón, *et al.* (2012). La difusión molecular es un mecanismo de transferencia de masa, que se rige por un gradiente de concentración en donde la materia tiene un movimiento de una alta concentración a una menor, es decir, la materia tenderá a desplazarse a donde tenga un mayor espacio y la concentración sea reducida (p. 8).

1.2.1. d. Dispersión. Este mecanismo se basa teniendo en cuenta la difusión turbulenta en donde con los cambios de velocidad causados van a generar un grado de mezcla mucho mayor, a esto se le va a llamar dispersión. (Schnoor, 1999). Igual que la difusión existen dos clases de dispersión las cuales son la dispersión mecánica y la dispersión hidrodinámica.

- **Dispersión mecánica:**

Como lo menciona Sánchez San Román en este mecanismo es generado por el desplazamiento de un fluido específico a través del medio poroso. Y puede ser provocado en dos sentidos de flujo, los cuales pueden ser longitudinal y transversal (p. 5).

- **Dispersión hidrodinámica:**

“Es la acción conjunta de la difusión y la dispersión mecánica; ambos fenómenos no pueden considerarse aisladamente” (Sánchez San Román, p. 6).

1.2.2 *Mecanismos de Transformación de Contaminantes en el Suelo*

1.2.2. a. Degradación. Según Calderón Gómez, (2006). La reacción química que poseen los suelos es de suma relevancia para la degeneración de los productos químicos orgánicos que se encuentran dentro de este, por lo que se pueden generar 5 reacciones diferentes, como lo son: hidrólisis, sustitución, eliminación, oxidación y reducción. Las más importantes de estas como lo menciona (Salinas, 2001) son: Oxidación y reducción. En donde la primera de estas se desarrolla en el suelo afectando a los compuestos químicos aromáticos y la segunda se basa en la transferencia de electrones.

1.2.2. b. Volatilización. Se trata de uno de los mecanismos más relevantes al momento de la remoción de contaminantes del suelo afectado. “Un compuesto puede estar distribuido entre las partículas sólidas del suelo y el agua de los poros presente en las partículas. La difusión en el agua ocurre, y algunas moléculas químicas eventualmente alcanzan la superficie del agua de los poros y se evaporan junto con las moléculas de agua.” (Calderón Gómez, 2006, p. 7).

1.2.2.c. Adsorción. De la misma forma que la volatilización es una reacción importante para los contaminantes que se encuentran en el suelo. “El término adsorción indica un número de posibles mecanismos para retirar agentes contaminantes a partir de la fase acuosa e inmovilizarlos en las partículas del medio poroso.” (Schnoor, 1999).

1.3 *Degradación de Suelos*

La degradación de los suelos ha ido en crecimiento debido a la gran cantidad de materiales con alto grado de contaminación y toxicidad, esto es algo que ha generado múltiples preocupaciones, debido a que puede traer al pasar el tiempo grandes consecuencias que se mencionan más adelante.

Este concepto se define según la secretaría de medio ambiente y recursos naturales de México (SEMARNAT) como: “La degradación de los suelos se refiere básicamente a los procesos desencadenados por las actividades humanas que reducen su capacidad actual y/o futura para

sostener ecosistemas naturales o manejados” (SEMARNAT, 2017). La degradación se puede presentar por distintos tipos ya sea, por químicos, aguas subterráneas e incluso el aire.

Las erosiones más comunes que afectan la degradación del suelo se realizan por parte del agua y el aire, pero la principal de estas se trata de la erosión hídrica que consiste en la remoción del suelo bajo la acción del agua. Esto afecta tanto a las zonas de las cuales se retira el sustrato como a aquellas que son sepultadas por el depósito de sedimentos.” (SEMARNAT, 2017). A pesar de que el agua es un factor muy relevante al momento de hablar sobre la degradación del agua, los mecanismos llevados a cabo por parte del ser humano no se quedan atrás, debido al gran crecimiento industrial, que puede asimismo uno de los más relevantes temas por el cual existe contaminación en los suelos subterráneos.

Se dice que usualmente los países con mayores riesgos de degradación de suelos suelen ser los más desarrollados, esto se debe a que poseen un mayor grado de industrialización y por consiguiente población. Uno de los factores más hablados por la sociedad a lo largo de los años es el indiscutible daño que los derrames de hidrocarburos causan en los suelos, y es el motivo principal por el que se realizó el presente estado del arte, por lo que se dará una breve descripción de los suelos contaminados por hidrocarburos.

1.3.1 Consecuencias de la Degradación de Suelos

La degradación al suelo puede llevar consigo grandes consecuencias que no solo afectan a la fauna y flora, sino también a la vida del ser humano, esto debido a la liberación de tóxicos que al pasar el tiempo se acumulan y así mismo llegan a los órganos del hombre. Se puede llegar a tener múltiples efectos como lo son la pérdida de capa convirtiéndose en un suelo infértil, se puede generar poca retención por parte de los líquidos que se desplazan en los suelos subterráneos, la acumulación de fosforo, causar toxicidad por parte del Aluminio y lo más relevante el impacto que tiene la degradación de los suelos sobre el ser humano.

Se puede llegar a decir que este suceso puede generar grandes consecuencias, como lo son incluso la devastación de poblaciones enteras, ya que como se presentó con la cultura Maya, “entre las causas de la decadencia hacia el año 900 d.C., se menciona la drástica degradación que sufrieron sus suelos, ocasionando una grave disminución de la productividad agrícola” (Rojas A.,

Ibarra, J.). Con base a lo anterior es importante resaltar que el suelo hace parte de las grandes bases de la economía.

1.4 Degradación de Suelos por Hidrocarburos

Es importante resaltar que la industria petrolera ha llegado a ser debidamente criticada por su contribución al deterioro del medio ambiente, por lo que de diferentes formas ha sido protagonista del daño a ecosistemas, por su trabajo en exploración y producción de hidrocarburos. Sin embargo, existen asimismo diferentes respuestas del porque sucede esto y no todo es a causa de un fallo humano por parte de la industria petrolera, ya que se pueden llegar a presentar incluso hasta atentados contra la infraestructura que se usa por parte de este sector industrial, los cuales dejan grandes consecuencias si no se tratan a tiempo.

Con base a lo anterior mencionado se puede destacar la contribución que la industria de hidrocarburos hace a la contaminación de los suelos por lo que según Hreniuc, *et al.* (2015):

En el suelo, los hidrocarburos de petróleo pueden afectar las propiedades físicas del suelo, como la textura del suelo, compactación, estado estructural, resistencia a la penetración, conductividad hidráulica saturada y propiedades químicas del suelo como minerales, concentración y contenido de metales (p.4).

Existen grandes razones por las cuales existen estos grandes impactos, pero siempre se va a llegar a las mismas consecuencias. Una de las más juzgadas es la filtración de petróleo al momento de realizar exploraciones en el interior del mar “a través de las cuales los contaminantes de hidrocarburos de petróleo ingresan al suelo y al medio marino donde este último sirve como el depósito más grande y el receptor final de contaminantes (Varjani, 2017; Ron y Rosenberg, 2014).

Igualmente se realizan varios estudios e investigaciones para saber el nivel de contribución a la degradación de los suelos por parte del sector de hidrocarburos como lo son “el informe de Inventario de Emisiones Tóxicas de la EPA (2005) indica que la industria del petróleo crudo se encuentra entre las principales fuentes de liberación de contaminantes de hidrocarburos de petróleo en el medio ambiente.” (Ossai, I., Ahmed, A., & Hassan, A. 2020).

Y de la misma forma registros estadísticos que demuestran la validez de lo previamente mencionado, debido a que “Se estimó que entre 1,7 y 8,8 millones de toneladas métricas de hidrocarburos de petróleo se liberan anualmente en el medio marino a nivel mundial con un 90% atribuidos accidentes debidos a fallas humanas y liberación de accidentes de petroleros en el mar” (Dadrasnia et al., 2013; Zhu et al., 2001)

1.4.1 Consecuencias de la Degradación del Suelo por Hidrocarburos

Debido a la gran cantidad de compuestos que conforman el petróleo o sus mismos derivados, se llegan a generar las consecuencias que existen por parte de su acumulación en el suelo, afectando así a fauna, flora y seres humanos. “Los hidrocarburos de petróleo suelen ser tóxicos y letales según la naturaleza química, composición y propiedades de las fracciones compuestas, modo de exposición, nivel de exposición y tiempo de exposición.” (Ossai, I., Ahmed, A., & Hassan, A. 2020).

Los compuestos que estos lo conforman pueden incluir igualmente gran cantidad de contaminantes que son perjudiciales para los seres humanos y los animales. Para el primero de estos se pueden generar varias enfermedades, incluida la hemotoxicidad (destrucción de rojos células sanguíneas), carcinogenicidad (capacidad o tendencia a inducir cáncer), genotoxicidad (capacidad de inducir daño de ADN no transmisible), mutagenicidad (capacidad de incitar mutaciones genéticas transmisibles), teratogenicidad (inducción de malformaciones de embrión o feto), citotoxicidad (capacidad de ser tóxico para las células), neurotoxicidad (daño al cerebro y al sistema nervioso), inmunotoxicidad (capacidad para reprimir el sistema inmunológico), nefrotoxicidad (daño al riñón), hepatotoxicidad (capacidad de provocar daño en el hígado), cardiotoxicidad (capacidad de causar daño a los músculos del corazón) y toxicidad ocular.” (Lawal, 2017; Gutzkow, 2015; Azeez et al., 2015; Ogunneye et al., 2014; Zheng et al., 2014; Sriramet al., 2011; Omoti y col., 2008; Cajaraville y col., 1991; OMS, 1986)

2. NANOTECNOLOGÍA Y SUS MÉTODOS DE APLICACIÓN EN SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS

En esta sección del documento se incluirá la profundización de la aplicabilidad que tiene la nanotecnología en el ámbito ecológico, que en este caso se centra en la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos, mencionando así mismo el concepto de nanotecnología, técnicas de síntesis, las consecuencias que se presentan por acumulaciones de petróleo en el suelo, etc.

2.1 Nanotecnología

Sin duda alguna la palabra nanotecnología es un concepto que al pasar los años ha tomado potencia, y esto se debe al gran número de aplicaciones que esta tiene, en el caso de este documento se hablará de su uso para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos, debido a que la industria del petróleo es una de las más cuestionadas con respecto a su contribución con el daño al medio ambiente.

Con el fin de comprender el concepto de nanotecnología correctamente se tiene que hablar en primera instancia de la palabra nanociencia, el cual es un término que va ligado en gran manera a la nanotecnología y se puede definir como: “Nanociencia es el estudio de los fenómenos y la manipulación de materiales a escala nanométrica.” (Mendoza Uribe, G., & Rodríguez López, J, 2007). Asimismo, esta se centra en estudiar distintos factores, sus propiedades y la práctica de la materia a un grado nanométrico, habitualmente comprendido entre 0.1 – 100 nm teniendo en cuenta que 1nm equivale a 1×10^{-9} m. La aplicación de este estudio se enfoca en el desarrollo y práctica de los átomos y moléculas a un nivel mucho más pequeño, que al emplearse da como resultados unas propiedades distintas a las de los materiales regulares.

Con base a lo anteriormente mencionado, ¿Qué es la nanotecnología? Debido a que este concepto encierra en si un gran número de métodos y aplicaciones, se puede precisar como: “es el diseño, caracterización y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas complejos mediante el control de la forma, el tamaño y las propiedades de la materia a escala nanométrica.” (Royal Society, UK National Academy of Science and the Royal Academy of Engineering, 2004.)

2.2 Antecedentes

La historia de la nanotecnología se remonta desde hace muchos años, cuando los romanos comenzaron a conocer algunos beneficios que se presentaban con materias de tamaños nanométricos e incluso se ve con algunos filósofos que determinaban este concepto relacionándolo con los átomos. Sin embargo, no fue sino hasta los años 60 que el concepto de nanotecnología se escuchó con más fuerza debido al físico Richard Feynman, quien habló de este término en una conferencia llamada “Hay mucho espacio en el fondo” la cual estaba fuertemente relacionada en el área de la nanotecnología y mencionaba: “la posibilidad de manipular materiales a escala atómica y molecular” (Mendoza Uribe, G., & Rodríguez López, J, 2007). Posteriormente a esto, en el año de 1974 el Profesor Norio Taniguchi perteneciente a la universidad de ciencias de Tokio, creó el concepto de nanotecnología el cual la definía como: “La nanotecnología consiste en el procedimiento de separación, consolidación y deformación de materiales átomo por átomo o molécula por molécula” (Taniguchi, N, 1974).

Aunque se relacionó este concepto en la conferencia de Richard Feynman, ya desde la antigüedad se trabajaba de manera empírica la creación de nanopartículas, sin embargo, no se le daba el nombre de nanotecnología, ni se había profundizado en esta nueva tecnología.

En la década de los 80 este reciente progreso dio un gran giro en el área de investigación, debido al descubrimiento de nuevos métodos con la capacidad de crear nanoestructuras. “Un ejemplo de esto ocurre en el año de 1981 cuando se desarrolló un método para obtener cúmulos metálicos mediante un láser concentrado que permitiera vaporizar metales y formar plasma” (Gutiérrez Alonso, B, J, *et al.* 2015).

Algunas nanopartículas que se comenzaron a crear a partir de lo anterior mencionado, fue lo llamado fullereno, la cual tenía grandes expectativas por parte de la comunidad científica por el impacto que iba a ocasionar en la vida cotidiana y posteriormente se crearon los nanotubos que fueron rápidamente reemplazados por el gran estudiado grafeno.

Uno de los actores principales en el progreso y crecimiento de esta nueva tecnología también fue el académico del MIT, el Dr. K. Eric Drexler, quien al igual que Feynman mencionaba la posibilidad de manipular los átomos y las moléculas. A inicio de los años 80 centró su investigación “en el ensamblaje molecular imaginando pequeños robots, construidos a escala microscópica, capaces de manipular y colocar átomos en un lugar adecuado dentro de la estructura

atómica del material” (Gutiérrez Alonso, B, J, *et al.* 2015). Igualmente fue el primer autor al escribir sobre esta temática con su libro llamado “Motores de la creación: Llega la era de la nanotecnología” publicado en 1986. Su nombre es así bastante reconocido debido a los previamente mencionados hechos en donde podemos incluir también la creación del primer curso de educación superior de nanotecnología en la Universidad de Stanford.

Llegando a la década de los 90 y a lo largo de esta, como lo menciona Brenda Alonso, *et al.* (2015). se realizaron gran cantidad de demostraciones en donde se lograron investigaciones con altas expectativas en esta área, ya que se desarrollaron nanopartículas a partir de Xenón, creando lamina de metal cristalino el cual tiene capacidades que contribuyen enormemente a la comunidad científica, asimismo el gran descubrimiento de los nanotubos de carbono el cual fue realizado por Sumio Iijima. También cabe resaltar la publicación del primer informe por parte de la casa blanca en el que se centra la nanociencia, lo cual fue un gran estímulo para grandes investigaciones que se vendrían a partir de este año.

Según Brenda Alonso, *et al.* (2015). Desde los años 90 hasta la actualidad se han venido desarrollando grandes descubrimientos e investigaciones sobre la nanociencia y nanotecnología que deja por destacar su crecimiento en varias áreas científicas e igualmente su aplicación en sectores médicos, estéticos, de ingenierías y claro está que no menos importante en las técnicas usadas en suelos contaminados, debido a ya varios trabajos experimentales que dejan ver el gran potencial que existe al usar nanopartículas para degradar o separar los contaminantes de la materia orgánica de suelos y aguas.

2.3 Nanopartículas

A lo largo de los años se ha visto que existen distintos tipos de nanopartículas o nanomateriales que a raíz de su aplicación en una respectiva área se crea o se desarrolla, están se clasifican en un primer lugar por su composición o el material principal que la conforme.

“Nanopartículas son sinónimo de un subgénero del amplio campo de la nanotecnología” (A. Thomas, E. Torres Tapia, A. Ramírez, A. Zehe, 2015). Que como lo venimos hablando a lo largo de este documento tienen un tamaño específico que los caracteriza, por lo que “pueden contener unos cien átomos o moléculas en arreglo unidimensional (nanoalambres, alambres cuánticos), dos-dimensional (capas ultradelgadas), o tres-dimensional (nano polvos, moléculas supramoleculares funciones)” (A. Thomas, E. Torres Tapia, A. Ramírez, A. Zehe, 2015).

El uso de nanopartículas a escala nanométrica desarrolla comportamientos diferentes en paralelo con materiales a escalas mucho más grandes así contengan la misma composición, generando cambios en algunas propiedades de tipo fisicoquímicas lo que ayuda en su aplicación respecto a algún área específica. Cabe resaltar que “debido a su tamaño diminuto, su comportamiento energético ya llega a ser controlado por las leyes de la mecánica cuántica.” (A. Thomas, E. Torres Tapia, A. Ramírez, A. Zehe, 2015).

Esta última es una de las más importantes características que debe poseer una nanopartícula, sin embargo, se puede mencionar la llamada “razón de superficie a volumen” la cual a partir de investigaciones se ha declarado que depende a esta se pueden llegar a generar nuevas propiedades y de la misma manera efectos.

La física de los nanomateriales es bastante particular, debido a que las nanoestructuras son por lo regular semiconductoras, que si lo vemos en comparación con los pozos cuánticos restringen el desplazamiento de los electrones de la sección de conducción, y de los espacios en la banda de valencia en las coordenadas espaciales. “El tamaño de la nanopartícula determina sus propiedades ópticas referente a absorción y emisión de radiación, es decir, con una irradiación externa de suficiente energía fotónica nanopartículas emiten luz discretamente en todo el rango del espectro.” (A. Thomas, E. Torres Tapia, A. Ramírez, A. Zehe, 2015).

2.3.1 Técnicas de Síntesis

En esta parte del documento entraremos a profundizar las diferentes maneras de desarrollar una nanopartícula, ya que no solo existe un método para la formulación de un nanomaterial. A medida que se profundiza más en la investigación de la nanotecnología se han venido creando diferentes técnicas para el diseño de esta por lo que se genera dependiendo a lo que se quiera llegar, ya sea propiedades físicas, químicas o así mismo su aplicación en un correspondiente ámbito.

Como lo menciona Borja, (2020). Estos procedimientos son importantes debido a la obtención de nanopartículas de forma que contengan en si cristalinidad y pureza.

A continuación, se presentarán los dos principales métodos por los que se pueden crear los nanomateriales y sus respectivas técnicas según: (A. Thomas, E. Torres Tapia, A. Ramírez, A. Zehe, 2015)

“Enfoque de técnicas descendentes (“top-down approach”)

- Ablación con Láser
- Litografía (tecnología híbrida)
- Descarga de arco eléctrico
- Electro-erosión
- Molienda mecánica

Enfoque de técnicas ascendentes (“bottom-up approach”)

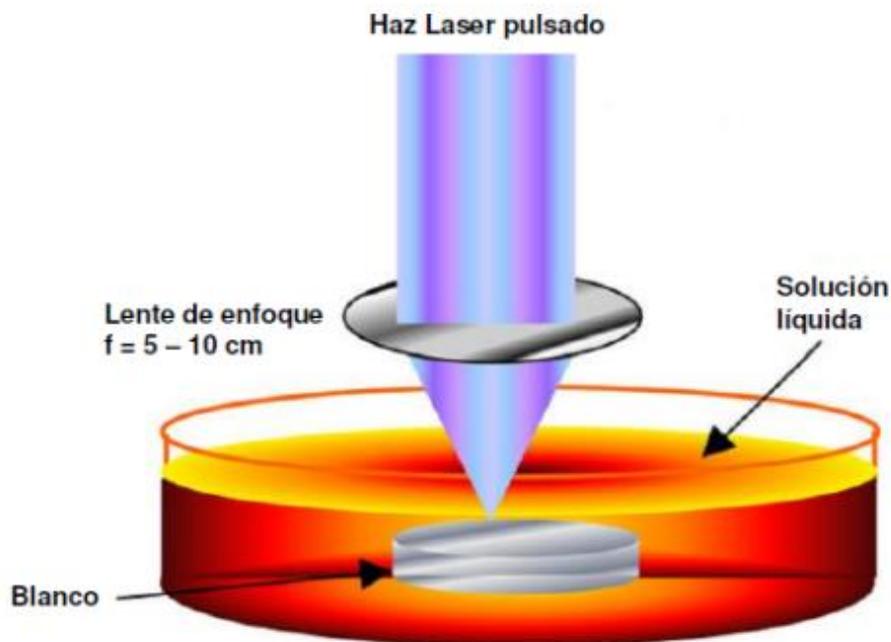
- Técnica de Sol-Gel
- Deposición de vapores químicos
- Condensación Molecular
- Electrospinning
- Autoensamble
- Proceso basado en aerosol”

Algunas de las técnicas más importantes y más utilizadas se describirán posteriormente:

2.3.1. a. Ablación Con Láser. Según Rivera, J.M, (2016). Consiste en utilizar un haz de láser como se muestra en la **Figura 1**. el cual vaporiza material específico de la sección superficial de un objeto. La energía potenciada por el láser es absorbida por la zona de incidencia, por lo cual se genera una separación de los enlaces químicos en esta misma zona. Posteriormente, un conjunto de átomos específicos pertenecientes a esta sección se libera y se adhieren a la zona superficial a la que tienen contacto creando nanomateriales de diferentes tamaños.

Figura 1.

Descripción del Proceso de Ablación con Láser.



Nota. La figura muestra el proceso descriptivo de uno de los enfoques de técnicas descendentes, el cual el actor principal es el haz de láser pulsado. Fuente: J. M Rivera., E.V Mejía. (2016). Reconfiguración de nanopartículas de plata obtenidas por ablación laser en líquido. Universidad Nacional de Huancavelica. México.

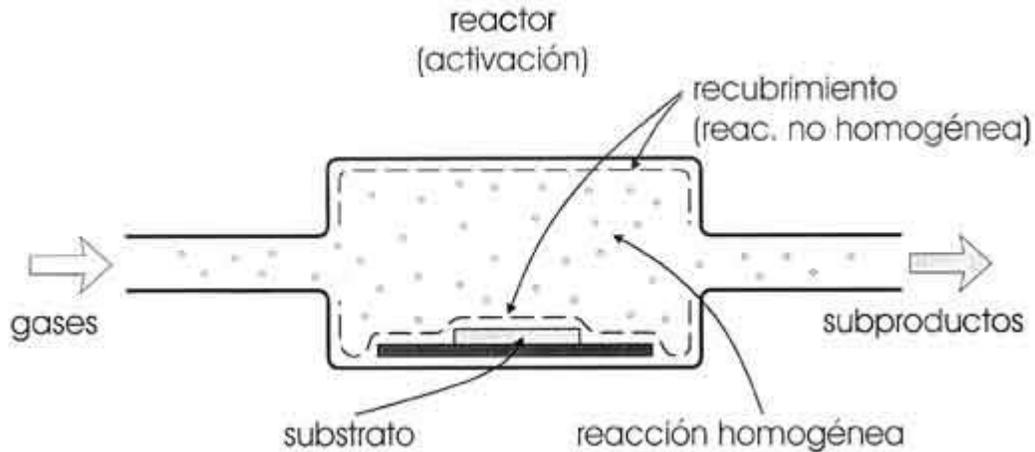
2.3.1. b. Deposición de Vapores Químicos. Este proceso según Borja, (2020):

Es un método de fácil control a través del cual se obtienen nanomateriales a base de carbono con una elevada cristalinidad y pureza, entre los más comunes tenemos los carbonos nano alótopos (CNA). En los cuales se incluyen los fullerenos, nano-diamantes, grafenos, carbón nanotubos (CNT), entre otros.

Igualmente, como lo menciona Borja, (2020). Este proceso se desarrolla por medio de un horno tubular estático, el cual es calentado a elevadas temperaturas que van aproximadamente desde los 100 a los 500 °C, en donde se introduce un gas que no reacciona por un intervalo de tiempo de 1 a 3 hrs. (este proceso se puede ver en la **Figura 2.**) Una vez pasa este periodo, se deja circular un agente precursor, ya sea, acetonitrilo o etileno gaseoso, para finalmente lavar el material obtenido y utilizarlo.

Figura 2.

Esquema del Proceso de Deposición Química en Fase Vapor (CVD).



Nota. La figura muestra el esquema del proceso de mezclas para realizar el proceso de uno de los enfoques de técnicas ascendentes. Fuente: C. Gómez-Aleixandre, J. M. Albella, F. Ojeda, F. J. Martí. (2011). Síntesis de Materiales Cerámicos Mediante Técnicas Químicas en Fase Vapor. Pp. 31.

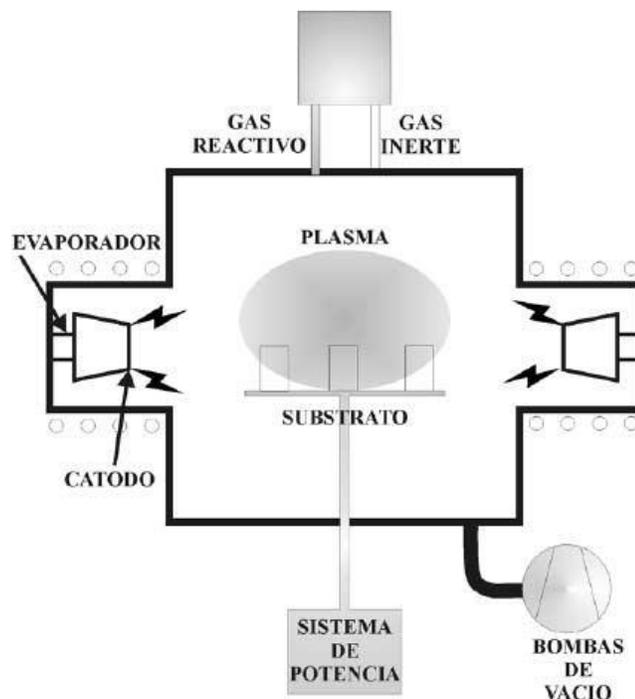
2.3.1. c. Deposición Física de Vapor. Según algunas investigaciones esta técnica de síntesis es una de las más simples de realizar o desarrollar como se puede evidenciar en la **Figura 3.** y además cuenta con una validez al momento de crear nanomateriales con diferentes propiedades. Como lo menciona Thierry Corporation, (2021). Este es un proceso que busca recubrir algunos materiales sólidos para posteriormente evaporarlos y que se creen partículas más pequeñas de este, de tal forma que se logre llegar a un nivel atómico.

Según Thierry Corporation, (2021). La deposición física de vapor tiene las siguientes características:

El PVD puede mejorar la dureza y la resistencia al desgaste, reducir la fricción de las piezas mecánicas y ralentizar el proceso de oxidación de las superficies metálicas. Es un proceso completamente físico. Se puede lograr mediante el uso de condensación y evaporación al vacío a alta temperatura.

Figura 3.

Descripción del Método Deposición Física de Vapor.



Nota. La figura muestra el equipo para realizar el proceso el cual se trata de un horno-tubo horizontal y cómo funciona internamente. Fuente: Alcaraz, V.S. (2018). P.V.D Deposición Física en Fase Vapor.

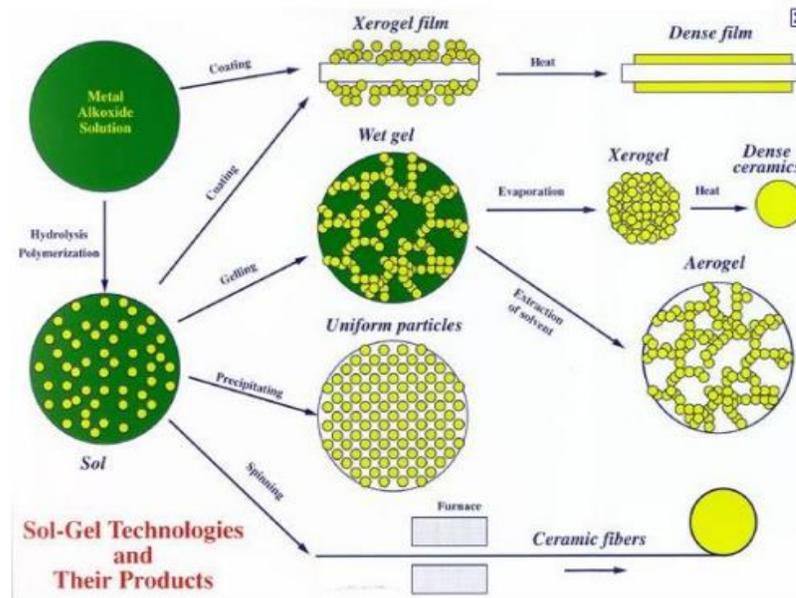
2.3.1. d. Método de Sol – Gel. Este proceso según de-Jong, (2009). Es un método químico en fase húmeda que se utiliza principalmente en la generación de nanomateriales. Se le llama a la parte de sol a la solución química que actúa como un precursor como, por ejemplo, una red de polímeros. Las soluciones químicas más comunes en este proceso suelen ser los alcóxidos metálicos y los cloruros metálicos. Normalmente estas sustancias se someten a reacciones de hidrólisis y policondensación que posteriormente forman una dispersión coloidal que formará un gel luego de desarrollarse una polimerización lenta. Este proceso se puede evidenciar en la **Figura 4**.

Como lo menciona de-Jong, (2009). Es un método importante para el sector tecnológico debido a que:

Ha sido usado en los últimos años para preparar una amplia variedad de materiales nanoestructurados. El método es atractivo porque involucra procesos a baja temperatura. También la alta pureza y homogeneidad son atribuibles a su forma de preparación en sistemas multicomponente.

Figura 4.

Descripción del proceso de la técnica sol-gel.



Nota. La figura muestra cómo se desarrolla la tecnología Sol – Gel y sus productos. Fuente: Jiménez González, A. E. (2018). Depósito químico sol-gel. Centro de Investigación de Energía UNAM.

2.4 Técnicas para Remediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos Usando Nanotecnología

Esta sección del documento se centrará más en el tema principal, el cual son los métodos o técnicas aplicando nanotecnología para mitigar el daño que ocasionan los hidrocarburos en el suelo, debido a su acumulación en este. Se nombrarán algunos de los métodos que se han desarrollado experimentalmente por algunos autores que de la misma forma se mencionarán a lo largo de esta parte del capítulo 2.

2.4.1 Aplicación de Nanocatalizadores

La aplicación de nanocatalizadores se puede incluir en el gran conjunto de tecnologías de remediación, el cual consiste usualmente “en llevar a cabo una oxidación química controlada de hidrocarburos en suelos y/o aguas subsuperficiales.” (López, G., Pagano, G., Tobías, H. 2007).

“El aspecto innovador es que, para garantizar la eficacia de la técnica, es esencial disponer de un catalizador que cumpla una serie de requisitos: 1) Ser amigable con el medio ambiente de manera que su empleo no origine impactos no deseables; 2) Alta eficiencia y velocidad de catálisis; 3) razonable independencia de las condiciones del terreno (pH, humedad, temperatura); 4) Subproductos inocuos” (López, G., Pagano, G., Tobías, H. 2007).

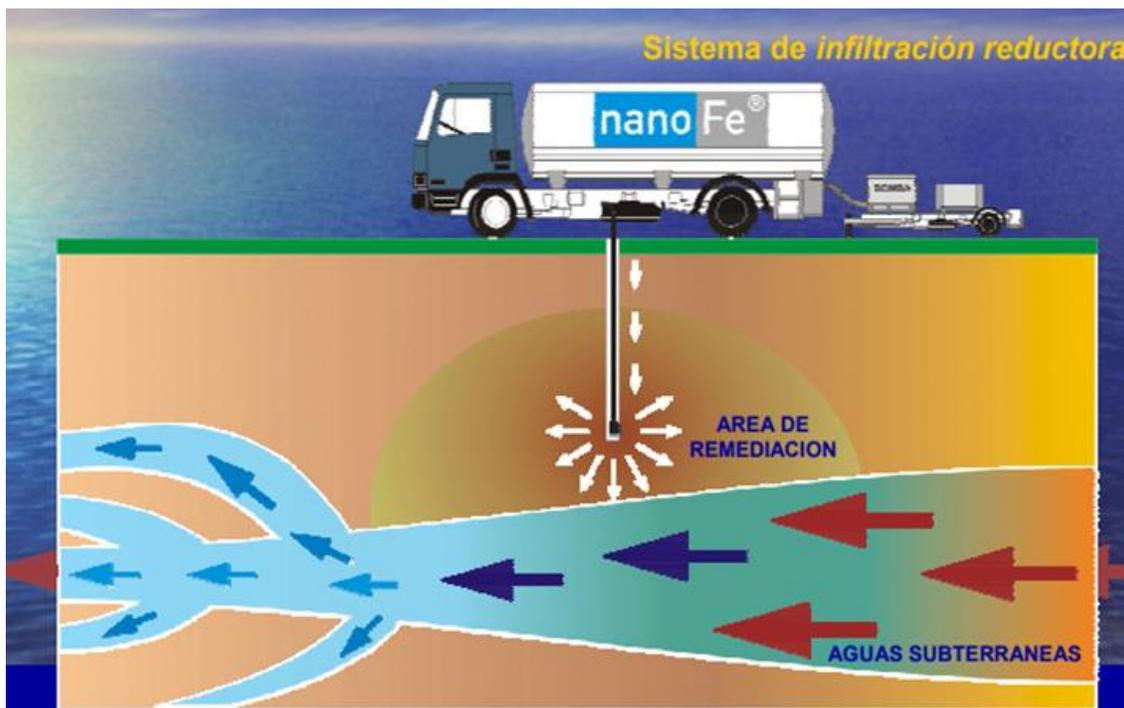
El método de la aplicación de nanocatalizadores de óxido-reducción consiste en “la destrucción de los hidrocarburos con formación de dióxido de carbono y agua como productos de reacción, mientras que el nanoFe^o se transforma en óxidos de hierro de estequiometría variable, pero todos ellos presentes naturalmente en la corteza terrestre.” (López, G., Pagano, G., Tobías, H. 2007). El procedimiento como se ve en la **Figura 5**, se basa en tratar el material contaminante en donde se enfoca “con una combinación de reactivos y nanocatalizadores en condiciones independientes del pH y a temperatura variable (incluso > 100 °C).” (Nanotek S.A. 2017).

Al momento de realizar esta prueba experimentalmente se deben tener en cuenta ciertos parámetros que permiten la eficacia del procedimiento como lo son: “(velocidad y nivel de destrucción de los compuestos orgánicos contaminantes) minimizando efectos indeseados (en particular, tratándose de hidrocarburos en un medio enriquecido con un reactivo oxidante).” (López, G., Pagano, G., Tobías, H. 2007).

Por lo que los materiales, las técnicas, los procedimientos experimentales y resultados serán un pilar fundamental al momento de evaluar y analizar los resultados de estas prácticas.

Figura 5

Descripción de remediación de suelos de manera in situ por medio de nanocatalizadores.



Nota. En la figura se muestra el sistema utilizado para remediar suelos por medio de nanotecnología más específicamente nanocatalizadores de la empresa NANOTEK. Fuente: NANOTEK S.A. (2017). Remediación nanocatalizada de suelos con hidrocarburos. Argentina.

2.4.1. a. Efectos de Implementación. El nanocatalizador contiene en su conformación nanohierro de valencia cero, por lo que según Nanotek “es el cuarto elemento más abundante de la tierra, por lo que su difusión en suelos y napas no tiene impacto ambiental” (Nanotek S.A, 2017).

Este método logra ser eficiente en cuanto a sus resultados, ya que según investigaciones de la empresa NANOTEK S.A determinan lo siguiente: “Se alcanza una significativa degradación de los contaminantes orgánicos, una disminución de la toxicidad del efluente y, en muchos casos, una oxidación total de los compuestos orgánicos, transformándolos en sustancias inocuas y permitiendo su descarga en forma segura” (Nanotek S.A. 2017).

De la misma manera como lo menciona López, G. y Tobías H. (2017). Este nano proceso deja valores bastante optimistas ya que sus resultados de remoción de contaminantes son del 93.7%, dejando claro que no se realizó ningún tratamiento biológico previo.

2.4.2 Aplicación de Nanohierro

A comienzos de los años 2000 se comenzó a implementar este gran material el cual se trata del hierro cero Valente o también llamado por sus siglas ZVI, lo que según Envirotecnics es:

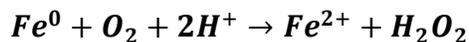
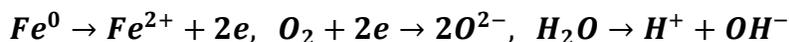
Es un polvo de hierro de alta calidad y pureza utilizado para el tratamiento o acondicionamiento del agua, barreras reactivas permeables y otras aplicaciones de remediación de suelo.

Así mismo, la aplicación de este elemento en la remediación ambiental, ha dejado un número de experimentos con resultados favorables, que dejó a este en un estándar sencillamente alto.

“ZVI (Fe^0) puede reemplazar los agentes oxidantes convencionales, ozono y peróxido de hidrógeno, ya que ZVI ha demostrado el potencial para generar peróxido de hidrogeno y reactivo Fenton a través de una serie de procesos de reducción /oxidación” (Alias, S., Omar, M., Hussain, NH y Abdul-Talib, S. 2012). Se puede dar validez de lo previamente mencionado a partir de la **Figura 6**. Con base a esto también se puede destacar que el uso de este material es beneficioso en muchos aspectos debido a que se puede rescatar de algunos desechos de diferentes áreas de fabricación de hierro que termina contribuyendo al momento de los costos, debido a que este es económico y lo más relevante es su eficiencia en los tratamientos con algunos materiales contaminantes.

Figura 6.

Procesos de reducción/oxidación (reacción redox).



Nota. En la figura se puede demostrar cómo funciona la reacción redox para este caso. Fuente: Alias, S., Omar, M., Hussain, NH y Abdul-Talib, S. (2012). Partículas de hierro Zero Valent para la degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelos contaminados. *Investigación de materiales avanzados*, 587, pp. 111-115.

Para llevar a cabo este experimento según lo menciona Salina Alias, *et al.* (2012). Se creó una arena artificial para posteriormente contaminarla con hidrocarburos aromáticos policíclicos. Este tipo de hidrocarburos citando a la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 1995. Se trata de:

Un hidrocarburo que contiene más de 100 sustancias químicas diferentes que se forman durante la combustión incompleta del carbón, petróleo y gasolina, basuras y otras sustancias orgánicas como tabaco y carne preparada en la parrilla.

Según lo menciona Salina Alias, *et al.* (2012). Una vez se logró la preparación de la arena contaminada, se dejó aislada para evitar la contaminación de organismos que estuvieran presentes en el área. Posteriormente a esto, se realizó la síntesis de partículas de ZVI utilizando el método expuesto por Wang y Zhang el cual mostró finalmente que el tamaño de partículas no fue homogéneo, teniendo como resultado un diámetro en el rango de nano micrómetro.

2.4.2. a. Efectos de Implementación Se pueden llegar a reportar tiempos mínimos y altamente satisfactorios, debido a que los tiempos en varias ocasiones se ven reflejados en costos. El procedimiento se basa en contactar el suelo con las partículas de ZVI en escalas nanométricas en solución acuosa lo que es factible igualmente, ya que, no genera grandes cambios en el pH y no requiere de cambios en este.

Asimismo, varias investigaciones han dejado ver que se puede llegar a reducir más del 70% de los contaminantes presentes, que en este caso son hidrocarburos, degradándolo en un

tiempo muy corto. “La eficiencia de eliminación aumenta linealmente con el aumento de hierro” (Alias, S., Omar, M., Hussain, NH y Abdul-Talib, S. 2012). Igualmente, un factor que se ha visto fundamental en este tipo de aplicaciones es “la adición de varias etapas de las partículas de hierro conducen a un mayor porcentaje de eliminación en comparación con la adición única de partículas de hierro.” (Alias, S., Omar, M., Hussain, NH y Abdul-Talib, S. 2012). Por lo que se puede llegar a concluir que el número de etapas se puede ver como un factor altamente relevante al momento de analizar el comportamiento que la nanopartícula toma al estar en contacto con el contaminante.

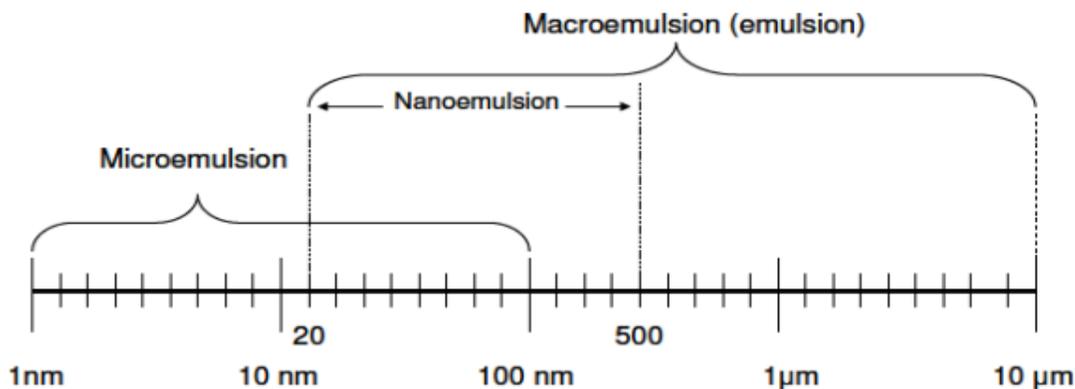
2.4.3 Aplicación de Nanoemulsiones

Con el fin de entender a profundidad el concepto de nanoemulsiones y su importancia en este documento es necesario definir lo que son las emulsiones en general, ya que, como lo menciona McClements, (2015) se trata de dos sustancias en su mayoría inmiscibles, las cuales una de estas se encontrará dispersa en gotas esféricas en la otra. El ejemplo más claro para sustentar la anterior idea es el agua y el aceite, “cuando la fase aceite está dispersa en la fase acuosa se forma una emulsión de aceite en agua, y viceversa.” (Alvarado, G. 2018).

Asimismo, según George Alvarado, (2018) las emulsiones son clasificadas basadas en el tamaño del diámetro de la partícula como se puede evidenciar en la **Figura 7.** y su estabilidad termodinámica.

Figura 7.

Tamaños de Gotas en Emulsiones (Micro, nano y macro).



Nota. La figura muestra los tamaños de partículas que se pueden obtener en las emulsiones y depende a esto se van a clasificar en micro, nano y macro. Fuente: Marino, (2010).

Para continuar con la profundización de esta parte, se mencionará como experimentalmente se llevó a cabo por parte de George Alvarado, (2018) el correspondiente desarrollo de nanoemulsiones en base aceite esencial de naranja y surfactante no iónico con el fin de utilizarlo en suelos contaminados por hidrocarburos.

Como lo menciona G. Alvarado, (2018). Las nanoemulsiones son una opción viable para su aplicación en la remoción de contaminantes, como el crudo en los suelos, debido a su poca complejidad al momento de crearlas, su acceso económico y no menos importante su impacto en el medio ambiente es mínimo. Cabe resaltar que la cantidad de elementos que se necesitan para el desarrollo de estas nanoemulsiones son mínimas, ya que, solo es necesario obtener cascara de naranja para posteriormente generar su correspondiente aceite, surfactante el cual es Tween 80 y por último un equipo que suministre calor para la respectiva síntesis de nanoemulsiones de la cual se hablará a continuación.

La técnica de síntesis que eligió el autor es llamado Temperatura de Inversión de fase o punto PIT. Según Shinoda, K y Arail, H. (1964):

La temperatura de inversión de fases es la temperatura en la cual cambia la afinidad del tensoactivo no-iónico, del agua al aceite o viceversa. Con exactitud, la PIT es la temperatura a la cual la afinidad predominante de un surfactante no-iónico se cambiaba del agua al aceite por la deshidratación de la cadena poli-óxido de etileno al aumentar la temperatura. (p. 68)

Como ya se mencionó anteriormente se utilizará una fuente de calor la cual, según Alvarado, (2018) tendrá la ventaja de generar partículas de tamaños muy pequeños con la ayuda de esta técnica de emulsificación y al usar el surfactante no-iónico (Tween 80) en la aplicación de los suelos contaminados tendrá un efecto inocuo en la química de estos.

Posteriormente, se llevaron a cabo varias muestras las cuales se basaban en variar el porcentaje de concentraciones en aceite esencial de cascara de naranja (% p/p): 5 y 20; simultáneamente, otra variable que se alteró fue la concentración del surfactante Tween 80 las cuales fueron (%p/p): 10 y 12 y por último el tiempo al que se sometió cada muestra, esto con el fin de que la variable dependiente la cual es el radio de gota en el tiempo (nm) mostrará un tamaño de partícula adecuado para que a su vez presentara estabilidad.

El autor G. Alvarado, (2018). Al diseñar las respectivas muestras, se alternaron la concentración de aceite esencial de cascara de naranja con la concentración del surfactante como se muestra a continuación:

Tabla 2

Diseño de los experimentos para las pruebas de estabilidad.

No EXP	Concentración de aceite esencial de naranja	Concentración de Tween 80
	% p/p	% p/p
1	5	10
2	5	12
3	20	10
4	20	12

Nota. Datos tomados de *Desarrollo y evaluación de nanoemulsiones en base a aceite esencial de naranja y surfactante no iónico para la aplicación en remediación de suelos contaminados con hidrocarburos*, (2018).

Finalmente, George Alvarado, (2018). Llegó a la conclusión que al evaluar las estabilidades de cada muestra y su aplicación en los suelos contaminados por hidrocarburos los mejores resultados fueron los siguientes:

La nanoemulsión conteniendo 20% de aceite esencial y 10% de Tween 80 presentó una mejor estabilidad en comparación a las otras nanoemulsiones, siendo estable por un tiempo de 10 días; así mismo presentó un tamaño de partícula igual a 98.42 nm a las 0 horas de preparación. (p. 75)

2.4.3. a. Efectos de Implementación. Una vez se hace la aplicación de este tipo de nanoemulsiones se logran ver resultados bastantes satisfactorios, debido a su gran efectividad. Como lo menciona el autor George Alvarado, (2018). En este experimento, la nanoemulsión que dio una mejor respuesta fue el que está compuesto por un 20% de aceite esencial y 10% del surfactante Tween 80, el cual fue utilizado para la restauración de una arena específica que contenía en su sistema diésel. Posteriormente, esta técnica mostró que la “eficiencia de remoción del diésel fue del 97.5% a 24 horas de acción de la nanoemulsión.” (G. Alvarado, 2018). De la misma manera, es importante resaltar que un efecto de la aplicación de esta nanoemulsión es según el autor, una opción viable,

debido a su baja inversión económica y que igualmente es una técnica amigable con el ambiente en comparación a otros métodos de remoción de contaminantes como los hidrocarburos.

2.4.4 Aplicación de Micro-nanoburbujas

Las micro-nanoburbujas son un sistema que se ha manejado en diferentes aplicaciones para la mejora de algunos sectores del medio ambiente, como, por ejemplo, el tratamiento de aguas residuales domesticas como lo menciona C. Hernández, (2019). La mejora de aguas residuales hospitalarias según la investigación de Menéndez Ortiz, (2017) y algunas otras aplicaciones generales como el tratamiento en aguas residuales industriales como lo especifica el autor Valverde, (2016).

Según Mynor Pineda, (2015). Las micro-nanoburbujas son burbujas finas, las cuales están compuestas de aire atmosférico cuyo diámetro puede oscilar entre 1 a 100 micrones y una de sus características principales a excepción de su tamaño es que, al entrar en relación con el agua, se puede transferir oxígeno, dióxido de carbono y ozono, como lo menciona el autor Castagnino, (2013).

Actualmente, empresas como Kran Spa, están desarrollando nuevas tecnologías que involucran este tipo de burbuja, también llamada Burbuja Ultra Fina (BUF), con el fin de implementar nuevas soluciones innovadoras y sostenibles como lo dejan a resaltar en su página web principal.

De la misma manera, la revista de ciencia y tecnología Río Negro, (2018). Mencionan que la definición de una burbuja ultra fina es:

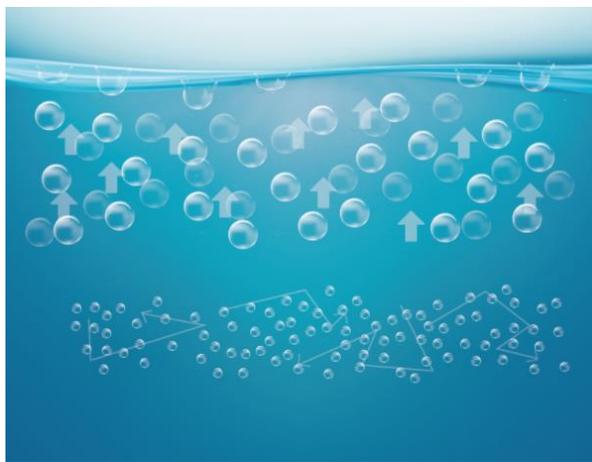
Termino que se emplea para aquellas burbujas inferiores a los mil nanómetros (o menos de una micra). Entre una y cien micras de burbujas finas. En términos prácticos cuando una burbuja presenta un tamaño de 15 micras (o menor) cambian muchas propiedades físico-químicas de la burbuja.

Lo anterior mencionado, puede indicar que la calidad y estabilidad de las nanoburbujas se rigen con respecto a su tamaño, ya que, cambiará su estructura química y por lo tanto física.

La revista Río Negro, (2018). También menciona el logro que ha alcanzado la compañía Kran Spa, debido a que sus equipos han generado burbujas de tamaños mínimos como 200 nanómetros o 0.2 micras, las cuales presentan propiedades diferentes a las de una burbuja normal. Una de las características que tienen es su movimiento particular, lo que conlleva a que se comporten como moléculas independientes o también llamado flotabilidad neutra lo que según KRAN SPA, (2018). Puede permitir que las nanoburbujas permanezcan en un mismo lugar por semanas o meses. Este comportamiento se puede evidenciar en la **Figura 8**.

Figura 8.

Comportamiento de burbujas según su tamaño.



Nota. La figura muestra como se pueden comportar las burbujas dependiendo su tamaño y como en las nanoburbujas se evidencia una flotabilidad neutra. Fuente: KRAN SPA, (2018).

Para profundizar más en el tema de las micro-nanoburbujas se mencionará la investigación de C. Trinidad, (2017). por la cual se realiza esta sección del documento. Teniendo en cuenta que su estudio se llevó a cabo con el fin de la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando micro-nanoburbujas de aire-ozono.

Este método requiere diferentes herramientas a nivel laboratorio, que pueden evidenciar costos elevados para la aplicación de este método, debido a que principalmente se requiere de un generador de micro-nanoburbujas y un equipo de tratamiento que contenga la motobomba, el generador de ozono y una compresora.

En la respectiva investigación experimental C. Trinidad, (2017). Tomó 10 Kg de suelo, el cual lo dividió en 4 muestras iguales de 2000 gramos cada una, seguido a esto cada muestra se sometió a diferentes volúmenes de petróleo, por lo que después de 48 horas se realizó el debido proceso de tratamiento con las micro-nanoburbujas. Posteriormente se tomaron medidas de parámetros específicos con el fin de determinar que muestra tuvo el mejor resultado de hidrocarburos totales, dejando a la muestra 3, la cual contenía un volumen de petróleo de 400 ml como la muestras con más éxito, concluyendo que se obtuvo un valor de 49% de concentración de petróleo en la recuperación del suelo.

2.4.4. a. Efectos de Implementación. Esta técnica como se puso evidenciar anteriormente cumplió con su propósito que es el de la remoción de hidrocarburos del suelo, claro está que no presenta una eficiencia muy acertada en comparación con las anteriores técnicas, solo dejando como resultado un 49% de remoción, sin embargo, algunos parámetros físicos y químicos del suelo se mantuvieron constantes, como, por ejemplo, el pH y la conductividad eléctrica se redujo como lo menciona Trinidad, (2017) en su investigación.

De la misma manera, este tipo de nanotecnología tiene muchas ventajas que a su vez será a fin con la ayuda al medio ambiente, ya que, según Castagnino, (2013) presenta algunas características que confirman lo anterior mencionado, lo puede evidenciar su efectividad para capturar contaminantes a través de su sistema en el que penetran espacios porosos diminutos que continuarán con un proceso de descontaminación envolviendo al residuo y obligándolo a desplazarse hacia la superficie o bien sea hacía el lugar al que se desea mover.

3. SELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE NANOTECNOLOGIA ADECUADA PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

En esta sección del documento evaluaremos los pros y los contras que maneja cada método anteriormente expuesto, a través de análisis DOFA, con el fin de llegar a una conclusión técnica sobre cual es la opción más optima para la aplicación de nanotecnología en suelos contaminados por hidrocarburos entre los métodos estudiados en este documento.

3.1 Comparación de Técnicas de Nanotecnología por Medio de Análisis DOFA

3.1.1 Análisis DOFA para Aplicación de Nanocatalizadores

En esta parte del documento se realizará un breve análisis teniendo en cuenta las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas que existen en la aplicación de nanocatalizadores, lo que se muestra en la **Figura 9**.

Figura 9.

Análisis DOFA de Aplicación de Nanocatalizadores



Nota. La figura muestra las debilidades, las oportunidades, las fortalezas y las amenazas que se concluyeron debido a la información de esta nanotecnología en el capítulo 2 de este documento.

3.1.2 Análisis DOFA para Aplicación de Nanohierro

A continuación, se mostrará en la **Figura 10**. El análisis DOFA correspondiente a la aplicación de nanohierro, con el fin de enfocarnos más en los pros y contras de esta técnica, ya explicada anteriormente en el capítulo 2 de este documento.

Figura 10.

Análisis DOFA de Aplicación de Nanohierro



Nota. La figura muestra las debilidades, las oportunidades, las fortalezas y las amenazas que se concluyeron debido a la información de aplicación de nanohierro en el capítulo 2 de este documento.

3.1.3 Análisis DOFA para Aplicación de Nanoemulsiones

En esta parte del documento se evidenciarán las diferentes debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas que se presenta una vez se realiza la aplicación de nanoemulsiones como se puede ver en la **Figura 11**. Con el fin de profundizar en este método.

Figura 11.

Análisis DOFA de Aplicación de Nanoemulsiones



Nota. La figura muestra las debilidades, las oportunidades, las fortalezas y las amenazas que se concluyeron debido a la información de aplicación de nanoemulsiones en el capítulo 2 de este documento.

3.1.4 Análisis DOFA para Aplicación de Micro-Nanoburbujas

A continuación, se podrá ver en la **Figura 12**. El análisis DOFA correspondiente a la aplicación de micro-nanoburbujas, con el fin de enfocarnos más en los pros y contras de esta técnica, ya explicada anteriormente en el capítulo 2 de este documento.

Figura 12.

Análisis DOFA de Aplicación de Micro-Nanoburbujas



Nota. La figura muestra las debilidades, las oportunidades, las fortalezas y las amenazas que se concluyeron debido a la información de aplicación de micro-nanoburbujas en el capítulo 2 de este documento.

3.2 Método a Seleccionar

Teniendo en cuenta cada uno de los análisis DOFA realizados anteriormente se consideraron varios aspectos que se ven reflejados en esto, como lo son, porcentaje de remoción y amigabilidad con el medio ambiente.

Una vez desarrollados, se demostró que la técnica que tuvo uno de los mayores porcentajes de remoción fue el método de la aplicación de las nanoemulsiones, ya que, se obtuvo un valor del 97.5% de mitigación de contaminantes en un periodo de 24 horas, dejando solo en segundo lugar a la técnica de aplicación de nanocatalizadores con un valor del 95.7% de degradación de contaminantes, el cual muestra eficiencia y velocidad de catálisis una vez se hace la aplicación de esta. En tercer lugar, podemos ubicar a la técnica de nanohierro, esto debido a que tiene algo en común con el método de nanocatalizadores y es que su agente principal para la mitigación de contaminantes es el hierro cero Valente (ZVI), dejando resultados de remoción mayores al 70%. Se demostró que todas las técnicas son amigables con el medio ambiente, ya que, según las mismas investigaciones lo primero que se buscaba en el desarrollo de estas técnicas de nanotecnología era que no reaccionara de forma negativa con los suelos y así mismo no afectara sus propiedades fisicoquímicas como lo es el pH.

Por último, es importante resaltar que el método en el que menos herramientas se tienen que usar es en el de la aplicación de nanoemulsiones, debido a que solo se requiere una maquina que suministre calor para generar la nanoemulsión, igualmente en este los materiales son mínimos, ya que sus componentes principales son aceite de naranja el cual se extrae de la cascara de naranja y un surfactante.

Según lo anterior mencionado la mejor alternativa para la aplicación de nanopartículas que ayuden a la mitigación de contaminantes de hidrocarburos en los suelos y que cumple con los factores más importantes de elección serían las nanoemulsiones hechas con aceite esencial de cascara de naranja, sin embargo, el método de nanocatalizadores es igualmente uno muy apropiado debido a que también cumple con los factores más importantes que se evalúan en este capítulo.

4. CONCLUSIONES

- Se determinaron las causas por las que los suelos se contaminan por hidrocarburos, a través de diferentes factores que demuestran que el mayor porcentaje de estos es por errores humanos dejando más del 70% por fallo de accesorios, problemas operacionales y falta de mantenimiento.
- De acuerdo con el primer capítulo del documento se logró evidenciar los procesos que se presentan una vez se contaminan los suelos con hidrocarburos, por medio de los mecanismos de transformación de contaminantes y su respectivo desplazamiento en el suelo.
- Como se ha podido observar en el capítulo 2. Del presente documento se describieron algunos de los métodos que se pueden aplicar en los suelos contaminados con hidrocarburos usando la nanotecnología como actor principal con el fin de posteriormente escoger el más adecuado según algunos factores.
- Finalmente, se seleccionó el método apto para la remoción de contaminantes de hidrocarburos en los suelos, a través de un análisis DOFA para cada uno de las técnicas dejando así que el más apropiado según los factores de porcentaje de remoción y amigabilidad con el medio sería el de nanoemulsiones, debido a que, obtuvo como resultado un valor del 97.5% de remoción en 24 hrs, es amigable con el medio ambiente, ya que tiene en sus componentes agentes biodegradables como lo es la cascara de naranja.

BIBLIOGRAFÍA

- Thomas A., Torres E. Tapia, A. Ramírez, A. Zehe. (2015). Las nanopartículas – Nanomateriales de tantas aplicaciones asombrosas en nanomedicina y nanotecnología biomédica. 13, (01), PP. 2315-2326.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR]. (1995). *Reseña Toxicológica de los Hidrocarburos aromáticos policíclicos* (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.
- Alias, S., Omar, M., Hussain, NH y Abdul-Talib, S. (2012). Partículas de hierro Zero Valent para la degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelos contaminados. *Investigación de materiales avanzados*, 587, 111-115.
- Alonso Gutiérrez, B. J. *et al.* (2015). La nanotecnología a 40 años de su aparición: logros y tendencias. 18, (66)
- Alvarado López, G, M. (2018). *Desarrollo y evaluación de nanoemulsiones en base a aceite esencial de naranja y surfactante no iónico para aplicación en remediación de suelos contaminados con Hidrocarburos*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.
- Apul, O. G., Delgado, A. G., Kidd, J., Alam, F., Dahlen, P. (2016). Carbonaceous nano-additives augment microwave-enabled thermal remediation of soils containing petroleum hydrocarbons. *Environ. Sci.: Nano*, 2016,3, 997-1002.
- Borja, J. M. (2020). *Nanomateriales: métodos de síntesis*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba – Ecuador.
- Gómez-Aleixandre, J. M. Albella, F. Ojeda, F. J. Martí. (2011). *Síntesis de materiales cerámicos mediante técnicas químicas en fase vapor (CVD)*. Instituto Ciencia de Materiales, CSIC, Cantoblanco-Madrid.
- Calderón, S. M. (2006). *Contaminación de suelos con hidrocarburos y modelos THM*. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Callejo, A. (2020). *¿Cuánto contamina extraer petróleo y convertirlo en gasolina o diésel? Forococheseléctricos*.
- Carrillo González, R. (2014). *Nanotecnología en la rehabilitación de suelos degradados y contaminados*. México.

- Carrillo González, R., & González Chávez, M. del C. A. (2015). La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias Y Nanotecnología*, 2(2).
- Das, S., Sen, B. & Debnath, N. (2015). Tendencias recientes en aplicaciones de nanomateriales en el monitoreo y remediación ambiental. *Environ Sci Pollut Res* 22, 18333–18344.
- Encina, R. A., Ibarra, J. (2003). La degradación del suelo y sus efectos sobre la población. Pp, 5-10.
- Envirotecnicos. (2004). Hierro Cero Valente [ZVI]. Madrid, España.
- García Trinidad, C. S. (2017). Recuperación del suelo contaminado con petróleo utilizando Micro – nanoburbujas de aire-ozono a nivel laboratorio. Universidad César Vallejo. Lima – Perú.
- Greenpeace. (2012). Impactos Ambientales del Petróleo. México.
- Hernández, C. A. (2019). Efectos de Micro y Nano Burbujas en Tratamientos de Aguas Residuales Domésticas: El caso de Pasca, Cundinamarca. Universidad de Cundinamarca. Fusagasugá – Colombia.
- Hreniuc, M., Coman, M., Cioruta, B. (2015). Considerations regarding the soil pollution with oil products in Săcel – Maramureş. University of Cluj – Napoca. Baia Mare, Romania.
- Instituto de Defensa Legal [IDL]. (2020). La principal causa de los derrames de petróleo en el oleoducto Norperuano. Perú.
- Rivera, J. M., Mejía, E.V. (2016). Reconfiguración de nanopartículas de plata obtenidas por ablación laser en líquido. Universidad Nacional de Huancavelica. México.
- Jiménez González, A. E. (2018). Depósito químico sol-gel. Centro de Investigación de Energía UNAM.
- De Jong, K. P. (2009). *Synthesis of Solid*. WILEY – VCH. Utrecht University. The Netherlands.
- Kran Spa. (2021). Nanoburbujas. Los Condes, Santiago de Chile. Chile.
- López, G., Pagano, G., Tobías, H. (2007). Remediación nanocatalizada de suelos con hidrocarburos. 93. 39-50.
- Mendoza Uribe, G., & Rodríguez López, J. (2007). La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. Scielo, PP.161-186.
- Medina, M. E., Galván, L.E. y Reyes, R. E. (2015). Las nanopartículas y el medio ambiente. Universidad Simón Bolívar. Venezuela.

- Ming-Chin Chang, Hung-Yee Shu, Wen-Pin Hsieh y Min-Chao Wang (2005). Uso de hierro a nanoescala Zero-Valent para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos aromáticos policíclicos, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55: 8, 1200-1207.
- Molleda, J. C. (2019). ¿Cuál es la principal causa de los derrames de petróleo? Servindi.
- Nanomercosur. López, G. (2015). *Nanotecnología aplicada a la remediación ambiental*. Buenos Aires, Argentina.
- Nanotek S.A. (2017). *Remediación nanotecnológica de suelos con hidrocarburos en Ecuador*. Entre Ríos.
- Ossai, I., Ahmed, A., & Hassan, A. (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology & Innovation*. ScienceDirect.
- PETROPERU. (2011). *Manual de mantenimiento y reparación de los oleoductos de operaciones*. Talara. Talara – Perú.
- Pineda, M. (2015). Las micro – nanoburbujas y el cultivo de Tilapia. *Piscicultura Global*.
- ResiduosProfesional. (2019). *Nanotecnología para recuperar suelos contaminados*. España.
- Rio Negro, Ciencia tecnología y economía del conocimiento. (2018). Río Negro, pionera en el uso de nano burbujas para la producción de cultivos orgánicos. Río Negro- Argentina.
- Carrillo G, R. (2014). *Nanotecnología en la rehabilitación de suelos degradados y contaminados*. México.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). *Degradación del Suelo*. México.
- Thierry Corporation. (2021). *Deposición Física de Vapor*. EUA.
- Tratamientos Térmicos. Recubrimientos Avanzados. [TTC]. *Deposición Física en Fase Vapor*. España.
- Velázquez Arias, J. A. (2017). *Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación*. Universidad Nacional abierta y a distancia. Yopal, Casanare, Colombia.
- Zanella, R. (2012). *Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño*. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.