

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE
TRATAMIENTOS DE BIORREMEDIACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS**

GENNY PAOLA GONZÁLEZ TRUJILLO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2017**

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE
TRATAMIENTOS DE BIORREMEDIACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS**

GENNY PAOLA GONZÁLEZ TRUJILLO

Monografía para optar el título de Especialista en Producción de Hidrocarburos

DIRECTOR

EDISON ODILIO GARCÍA NAVAS
Ingeniero de Petróleos, M.Sc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA PETROLEOS
INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2017**

DEDICATORIA

A Dios, porque siempre ha estado a mi lado apoyándome y guiándome en cada paso que doy.

A mi familia que con su apoyo incondicional me ayudaron a culminar este trabajo.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	
1 GENERALIDADES	15
1.1 DEFINICIÓN DE RESIDUO / DESECHO	15
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS.....	17
1.2.1 Clasificación por estado.....	18
1.2.2 Clasificación por origen.....	18
1.2.3 Clasificación por tipo de tratamiento al que serán sometidos.....	18
1.2.4 Clasificación por los potenciales efectos derivados del manejo.....	19
1.3 RESIDUOS PELIGROSOS.....	19
1.3.1 Inflamabilidad	20
1.3.2 Corrosividad.....	20
1.3.3 Reactividad	21
1.3.4 Explosividad.....	21
1.3.5 Toxicidad.....	22
1.3.6 Clasificación general de los residuos peligrosos.....	22
1.3.7 Residuos peligrosos conforme la resolución 2309 de 1986 de Colombia	25
2 RESIDUOS ACEITOSOS	27
2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS	27
2.1.1 Clasificación según el origen de los residuos.....	27
2.1.2 Clasificación según la composición de los residuos.....	29
2.2 AGUA PRODUCIDA	30
2.3 RESIDUOS DE OPERACIÓN DE POZOS.....	30
2.4 OTROS RESIDUOS ASOCIADOS	30
2.5 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS	30
2.5.1 Agua Producida.....	31
2.5.2 Residuos de perforación, completamiento y reacondicionamiento de pozos	31
2.5.3 Residuos provenientes de operación de perforación.....	31
2.5.3.1 Cortes de perforación.....	31
2.5.3.2 Fluidos de perforación.....	32
2.5.3.3 Fluidos de completamiento y reacondicionamiento de pozos.....	32
2.5.3.4 Fluidos de tratamiento de pozo.....	33
2.5.4 Otros residuos Asociados.....	33
3 NORMATIVIDAD LEGAL VIGENTE	34

3.1 NORMAS AMBIENTALES DE LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA

34

3.2 LEYES Y DECRETOS PARA EL MEDIO AMBIENTE.....	36
3.2.1 Ley 99 de 1993.	36
3.2.2 Ley 99 de 1993 y decreto 2820 del 5 de agosto de 2010..	39
3.2.3 Decreto- Ley 2811 de 1974.....	40
3.3 NORMATIVIDAD EXTRANJERA COMO MODELO DE APLICACIÓN EN LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA.....	42
4 GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ACEITOSOS.....	44
4.1 TECNOLOGÍAS TIPO BIO.....	44
4.2 GENERALIDADES SOBRE BIORREMEDIACIÓN	46
4.2.1 Bioestimulación	47
4.2.2 Bioaumentación	47
4.2.3 Biolixiviación.....	47
4.2.4 Rizoestimulación	47
4.2.5 Bio-Inmovilización	47
4.3 REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS	49
4.3.1 Materias primas utilizadas en el proceso	50
4.3.2 Según el lugar de realización.	55
4.3.3 Según el organismo utilizado.	57
4.3.3.1 Remediación microbiana.....	57
4.3.3.2 Degradación enzimática.....	57
4.3.3.3 Fitorremediación.	57
4.3.4 Según la técnica utilizada.....	58
4.3.4.1 Bioaumentación.	58
4.3.4.2 Bioestipulación.	59
4.3.4.3 Inoculación.	60
4.3.4.4 Tratamiento de biosuspensión.	60
4.3.4.5 Inyección de aire a presión.	60
4.4 TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN	60
4.4.1 TRATAMIENTO BIOLÓGICO IN SITU.....	60
4.4.1.1 Bioaireación o bioventeo.....	60
4.4.1.2 Biorremediación.	64
4.4.1.3 Biorremediación mejorada.	64
4.4.1.4 Fitorremediación.	68
4.4.2 TRATAMIENTO BIOLÓGICO EX – SITU.....	71
4.4.2.1 Biopilas.....	71
4.4.2.2 Compostaje.....	73
4.4.2.3 Landfarming.	75

5	METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA SELECCIÓN DE PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN PARA RESIDUOS ACEITOSOS.....	78
5.1	TRATAMIENTO EN ÁREA DE LAND FARMING.....	84
6	CONCLUSIONES	86
7	RECOMENDACIONES	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	88

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Biorremediación del petróleo.	48
Figura 2. Tamaño comparativo de algunos microorganismos	51
Figura 3. Apariencias físicas generales de las bacterias	52
Figura 4. Aspecto de un moho	53
Figura 5. Aspecto de una levadura y una seta.....	53
Figura 6. Clasificación “In situ” y “ex situ”.	56
Figura 8. Esquema de un sistema típico de bioventeo.	61
Figura 9. Esquema general del proceso de biorremediación mejorada.	65
Figura 10. Esquema típico del sistema de biopilas.	71
Figura 11. Esquema de tratamiento de suelos por landfarming.....	76

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los residuos aceitosos.....	28
Tabla 2. Clasificación de los residuos según su composición	30
Tabla 3. Campos de acción de la Constitución Política Colombiana alusivos al medio ambiente y sus respectivos artículos.	35
Tabla 4. Principios ambientales de la ley 99/93 que trasciende a proyectos de la industria del petróleo.....	37
Tabla 5. Gestión y tratamiento de residuos aceitosos.	44
Tabla 6. Matriz de selección de biorremediación.....	45
Tabla 7. Bacterias y hongos más usados en biorremediación.....	54
Tabla 8. Ventajas y desventajas de la Biorremediación.....	55
Tabla 9. Procesos de fitodescontaminación y fitoestabilización.	58
Tabla 10. Costos estimados por el tratamiento de residuos por Bioventeo. (Costo en dólares).....	63
Tabla 11. Costos de remediación aplicando la Fitorremediación.....	70
Tabla 12. Costo derivado por el tratamiento de suelos por compostaje (costo en dólares).....	75
Tabla 13. Clasificación final de los residuos aceitosos	78
Tabla 14. Tecnología de biorremediación para los residuos aceitosos en Colombia.	81

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE TRATAMIENTOS DE BIORREMEDIACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS.*

AUTORES: GONZÁLEZ TRUJILLO Genny Paola.**

PALABRAS CLAVES: residuos, aceite, disposición final, tratamiento en tierra, contaminantes, biorremediación, operaciones, manejo de residuos.

Los residuos aceitosos de la industria de hidrocarburos son aquellos residuos que son generados en las actividades de extracción y producción del petróleo y que han contribuido a impactos ambientales negativos. Muchos de estos residuos no son tratados y son desechados directamente al medio ambiente, mediante la acción de rellenos o enterramientos causando graves daños al suelo. Este trabajo muestra la biorremediación como una tecnología amiga del medio ambiente, diversidad de aplicaciones a través de los más variados procesos, como lo son tratamiento en tierra (landfarming), compostaje y biopilas, que, al ser tecnologías económicas y de fácil aplicación, ayudan a la remediación de este tipo de residuos.

En este proyecto se realiza una descripción de los diferentes tipos de residuos aceitosos y de los procesos y tratamientos existentes para la disposición de los mismos, buscando que estos tengan la mínima cantidad de trazas para poder disponerlos de la mejor manera sin causar daño al medio ambiente acorde a las normatividades técnicas, legales y ambientales vigentes.

Con esta metodología se pretende realizar una revisión bibliográfica de la biorremediación y los métodos más conocidos de dicha técnica, teniendo en cuenta los factores que condicionan la biorremediación, ventajas, desventajas y características de cada uno de sus métodos, de tal forma que permita desarrollar una metodología que sirva como herramienta en la selección de tratamientos para el manejo y biorremediación de estos residuos.

* Monografía.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Especialización en Producción de Hidrocarburos. Director: M.Sc. Edison Odilio García Navas

SUMMARY

TITLE: DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR THE SELECTION OF BIOREMEDIATION TREATMENTS OF OILY WASTE.*

AUTHOR: GONZALEZ TRUJILLO Genny Paola.**

KEY WORDS: waste, oil, final disposal, ground treatment (landfarming), contaminants, bioremediation, operations, waste management.

The oily waste of the hydrocarbon industry are those residues that are generated in oil extraction and production activities that have contributed to negative environmental impacts. Many of these residues are not treated and are disposed directly to the environment, through the action of fills or burials generating serious damage to the soil. This work shows bioremediation as a technology friendly to the environment, diversity of applications through the most varied processes, such as ground treatment (landfarming), composting and biopilas, which are economical technologies and easy to implement, help the remediation of this type of waste.

In this project a description is made of the different types of oily waste and of the existing processes and treatments for the disposal of the same, ensuring that they have the minimum amount of traces to be able to dispose of them in the best way without causing damage to the environment according to the environmental regulations.

This methodology intends to carry out a bibliographic review of bioremediation and the most known methods of this technique, taking into account the factors that condition bioremediation, advantages, disadvantages and characteristics of each one of its methods, in such a way that it allows to develop a methodology that serves as a tool in the selection of treatments for the management and bioremediation of these residues.

* Monograph

** Physicochemical Engineering Faculty. Hydrocarbon Production Specialization. Director: M.Sc. Edison Odilio García Navas.

INTRODUCCIÓN

En todo campo petrolero, la extracción de crudo está ligada a la generación de residuos sólidos aceitosos, producto de los procesos de extracción, recolección, tratamiento y almacenamiento de fluidos, por tal motivo es necesario conocer las diferentes alternativas que permiten realizar el tratamiento y disposición final de estos.

Las experiencias realizadas utilizando bacterias para la degradación de hidrocarburos de petróleos en suelos son variadas. La biorremediación es una herramienta efectiva para mejorar la degradación de contaminantes en suelo y el tratamiento de residuos aceitosos, la cual está cogiendo fuerza por su efectividad y bajos costos al momento de implementarla.

El conocimiento de los factores que influyen en cada uno de los procesos, sus ventajas y desventajas técnicas y operativas, permitirán desarrollar una metodología de selección del proceso o tratamiento de residuos sólidos que se convertirá en una herramienta útil para los ingenieros de campo a la hora de revisar posibles soluciones para el manejo de estos residuos.

Inicialmente en el capítulo primero se podrá encontrar un diverso número de definiciones para residuos y normativas en cuanto a la legislación ambiental a nivel nacional e internacional.

En el capítulo dos se encuentra una clara descripción de cada uno de los residuos aceitosos generados en actividades de exploración y producción de hidrocarburos, con sus respectivas características fisicoquímicas.

En el capítulo tres trata de la normatividad ambiental nacional e internacional vigente respecto a residuos, las entidades encargadas de otorgar permisos, licencias a nivel nacional, además trata sobre las multas y sanciones a lo que se está expuesto por el incumplimiento de la ley.

En el capítulo cuarto hace claridad a la gestión y tratamiento de los residuos aceitosos, se nombra claramente cada una de las tecnologías de tratamiento y disposición existentes a nivel mundial basando dicha consulta en la FRT RT (Federal Remediation Technologies Round Table) ente estadounidense encargado de la investigación y desarrollo de todas las tecnologías allí nombradas.

Por último, en el capítulo quinto se realiza una metodología para la selección de procesos de biorremediación para los residuos aceitosos basado en la matriz de selección de biorremediación, que de acuerdo a los diferentes estudios realizados a nivel mundial se escoge el método apropiado para el tratamiento de dichos residuos.

1 GENERALIDADES

Antes de identificar y discutir acerca de los residuos aceitosos generados por la industria petrolera, se hace necesario definir qué es un residuo, debido a su afectación sobre el medio ambiente. A continuación se darán algunas definiciones sobre residuos y su clasificación general.

1.1 DEFINICIÓN DE RESIDUO / DESECHO¹

En primer lugar se iniciará analizando el significado de dos términos ampliamente utilizados en la bibliografía: "desecho" y "residuo", para establecer si es posible o no su uso como sinónimos. De acuerdo al diccionario de la Real Academia Española² se tienen las siguientes definiciones:

Desecho

- Aquello que queda después de haber escogido lo mejor y más útil de algo.
- Cosa que, por usada o por cualquier otra razón, no sirve a la persona para quien se hizo.
- Residuo, basura.

Residuo

- Parte o porción que queda de un todo.
- Aquello que resulta de la descomposición o destrucción de algo.
- Material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo.

De acuerdo a estas definiciones resulta claro que es posible utilizar ambos términos indistintamente. Al momento de establecer qué se considera "residuo", de la propia definición se entiende claramente que se trata de un término intrínsecamente subjetivo, pues depende de los actores involucrados. Uno de los ejemplos más claros de que se está frente a un término subjetivo es que quien decide si un determinado objeto continúa siendo útil o no es su propietario.

¹ Reciclaje de residuos industriales, Xavier Elías Castells. Ediciones Díaz de Santos, S.A. 2000.

² Diccionario de la Real Academia Española. Versión 2005.

Otro ejemplo es cuando existe posibilidad de reciclaje y por lo tanto el residuo deja de serlo, transformándose en materia prima de otro proceso. Se han hecho diversos intentos de adoptar una definición objetiva de "residuo", sin embargo aún hoy persiste cierto grado de incertidumbre. Por esta razón muchas legislaciones incluyen en su texto la definición de "residuo" por la que han optado.

A continuación se presentan ejemplos de definiciones adoptadas para el término "residuo" en distintos ámbitos y con diferentes alcances.

Organización de las Naciones Unidas³. Todo material que no tiene un valor de uso directo y que es descartado por su propietario.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente⁴. Incluye cualquier material descrito como tal en la legislación nacional, cualquier material que figura como residuo en las listas o tablas apropiadas, y en general cualquier material excedente o de desecho que ya no es útil ni necesario y que se destina al abandono.

Convenio de Basilea⁵. Las sustancias u objetos a cuya eliminación se procede, se propone proceder o se está obligado a proceder en virtud de lo dispuesto en la legislación nacional.

Programa Regional de Manejo de Residuos Peligrosos del CEPIS⁶. Todo material que no tiene un valor de uso directo y que es descartado por su propietario.

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)⁷. Todo material (sólido, semisólido, líquido o contenedor de gases) descartado, es decir, que ha sido abandonado, reciclado o considerado inherentemente residual.

Normatividad Colombiana. Cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. Los residuos sólidos se dividen en

³ Organización de las naciones unidas.

⁴ Programa de las naciones unidas para el medio ambiente.

⁵ Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. NACIONES UNIDAS – 1989.

⁶ Programa Regional de Manejo de Residuos Peligrosos del CEPIS.

⁷ Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)

aprovechables y no aprovechables. Igualmente, se consideran como residuos sólidos aquellos provenientes del barrido de áreas públicas

Se debe tener en cuenta que cuando los residuos se aprovechan para otro fin diferente del inicial, se habla de subproductos. El uso y aprovechamiento de estos subproductos es de vital importancia a la hora de establecer una producción respetuosa con el medio ambiente que minimice los residuos y contribuya al desarrollo sostenible⁸

Según el principio tres de la declaración de Rio⁹ sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en 1992 “el derecho al desarrollo debe ejercerse en forma tal que responda equitativamente a las necesidades de desarrollo y ambientales de las necesidades actuales y futuras”.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS¹⁰

Todos los residuos deben ingresar a un sistema de gestión que incluye manejo, tratamiento, transporte, disposición final y fiscalización. El sistema de gestión depende del tipo de residuo que se considere, debiéndose prestar especial atención a la gestión de los residuos peligrosos por su capacidad inherente de provocar efectos adversos. Es por esta razón que debe quedar clara la clasificación de residuos utilizada, a fin de minimizar los riesgos derivados de un residuo peligroso. Los residuos pueden ser clasificados utilizando diferentes criterios, así se tiene por ejemplo: estado, origen, tipo de tratamiento al que serán sometidos o potenciales efectos derivados del manejo.

⁸ Tratamiento y gestión de residuos sólidos. Francisco José Colomer Mendoza y Antonio Gallardo Izquierdo. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.2006.

⁹ Declaración de Rio sobre el medio ambiente y el desarrollo en 1992

¹⁰ Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos – Fundamentos. Capítulo 2. Págs. 16-18.

1.2.1 Clasificación por estado. En este caso un residuo es definido de acuerdo al estado físico en que se encuentra, los grupos que pertenecen a este caso son: sólidos, semisólidos, líquidos y gaseosos. Muchas veces en la categoría de líquidos se incluyen únicamente los acuosos diluidos y no otros como los aceites usados, solventes orgánicos, ácidos o álcalis, los cuales suelen incluirse dentro de la categoría de residuos sólidos. Esto responde a un tema de gestión, ya que los residuos acuosos diluidos generalmente serán tratados en una planta de tratamiento de efluentes líquidos, mientras que el resto tendrá un tratamiento particular.

1.2.2 Clasificación por origen. Se refiere a una clasificación sectorial y no existe límite en cuanto a la cantidad de categorías o agrupaciones que se pueden realizar. A continuación se mencionan algunas categorías:

- Domiciliarios, urbanos o municipales
- Industriales
- Agrícolas, ganaderos y forestales
- Mineros
- Hospitalarios o Centros de Atención de Salud
- De construcción
- Portuarios
- Radiactivos

Una denominación de uso frecuente es asimilable a la de residuo urbano que se utiliza para los residuos generados en cualquier actividad y tiene características similares a los residuos urbanos y por lo tanto pueden ser gestionados como tales.

1.2.3 Clasificación por tipo de tratamiento al que serán sometidos. Este criterio de clasificación es útil para orientar la gestión integral de residuos de un país y particularmente útil cuando el objetivo es definir la infraestructura que se necesita para el tratamiento y la disposición final de los residuos. Es así que se pueden definir entre otros:

- Residuos asimilables a residuos urbanos y que por lo tanto se pueden disponer en forma conjunta.
- Residuos para los cuales la incineración es el tratamiento idóneo.
- Residuos que se deben disponer en rellenos de seguridad.

- Residuos generados en grandes cantidades y que por lo que requieren tratamiento particular.
- Residuos pasibles de ser sometidos a un proceso de valorización.

1.2.4 Clasificación por los potenciales efectos derivados del manejo.

- **Residuos peligrosos.** Son aquellos residuos que por su naturaleza son inherentemente peligrosos, produciendo efectos adversos para la salud o el ambiente. Estos residuos serán motivo de un análisis minucioso que se desarrollará posteriormente.
- **Residuos peligrosos no reactivos.** Son residuos peligrosos que han sufrido algún tipo de tratamiento por medio del cual han perdido su naturaleza reactiva.
- **Residuos inertes.** Son los residuos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas.

1.3 RESIDUOS PELIGROSOS¹¹

Un residuo peligroso se define como "Un residuo en cualquier estado físico que, debido a su cantidad, concentración y sus características físicas, químicas o infecciosas puede:

- Causar o contribuir significativamente a incrementar la mortalidad o las enfermedades serias, irreversibles o que produzcan incapacitación.
- Poseer un peligro substancial o potencial para la salud humana o el ambiente cuando son tratados, almacenados, transportados o dispuestos inadecuadamente.

De acuerdo a la Norma Técnica Ecológica 001/, se identifican como residuos peligrosos, cualquier residuo que presente una o más de las siguientes características:

- Inflamabilidad
- Corrosividad
- Reactividad

¹¹ www.gobernacion.gob.mx.

- Explosividad
- Toxicidad

1.3.1 Inflamabilidad. La inflamabilidad es la característica utilizada para definir como peligroso, aquellos residuos que pudieran causar un incendio, durante el transporte, almacenamiento o disposición. Ejemplos de residuos inflamables incluyen residuos de aceites y solventes gastados. Según el art 25 de la resolución 2309 se considera un residuo inflamable si una muestra representativa del mismo tiene alguna de las siguientes propiedades:

- Es un líquido que en solución acuosa contiene más del 24% en volumen de alcohol y tiene una temperatura de inflamación inferior a 60 grados Centígrados (140 grados Fahrenheit).
- No es un líquido, pero es capaz de causar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (bajo presiones y temperaturas normales).
- Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes (USEPA, 1990).

1.3.2 Corrosividad. La corrosividad indicada por el pH, se escogió como característica de identificación de un residuo peligroso debido a que los residuos con alto o bajo pH pueden reaccionar peligrosamente con otros residuos o causar contaminantes tóxicos que migren de ciertos residuos. Ejemplos de residuos corrosivos incluyen residuos ácidos y salmuera usada en la manufactura del acero. La corrosión del acero es un primer indicador de un residuo peligroso ya que un residuo capaz de corroer el acero puede escapar de los tambores y liberar otros residuos.

Un residuo presenta la característica de corrosividad si una muestra representativa del mismo tiene cualquiera de las siguientes propiedades:

- Es acuoso y tiene un pH menor o igual a 2 o mayor o igual a 12.5
- Es un líquido y corroe el acero (SAE 1020) a velocidades mayores de 6.35 mm (0.250 pulgadas) por año a una temperatura de prueba de 55 grados Celsius (130 grados Fahrenheit) (USEPA, 1990).

1.3.3 Reactividad. La reactividad es una característica de residuo peligroso, ya que los residuos inestables pueden poseer un problema explosivo en cualquier estado del ciclo del manejo del residuo. Ejemplos de residuos reactivos incluyen el agua proveniente de las operaciones de trinitrotolueno y los solventes gastados de cianuro.

Un residuo presenta la característica de reactividad si una muestra representativa del mismo tiene cualquiera de las siguientes propiedades:

- Normalmente inestable y presenta fácilmente cambios violentos sin detonación.
- Reacciona violentamente con agua y cuando se combina con ella forma mezclas potencialmente explosivas, genera vapores, gases o humos tóxicos en cantidades suficientes para provocar desequilibrio ecológico y daños al ambiente.
- Contiene cianuros o sulfuros, el cual cuando es expuesto a condiciones de pH entre 2 y 12.5 puede generar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades suficientes para presentar un daño a la salud humana o al ambiente.
- Es capaz de descomponerse fácilmente por detonación o reaccionar a presión y temperaturas normales.
- Es capaz de presentar reacciones de detonación si se somete a una fuente poderosa de iniciación o si se calienta bajo confinamiento (USEPA, 1990).

1.3.4 Explosividad. Un residuo presenta la característica de explosividad si una muestra representativa del mismo tiene cualquiera de las siguientes propiedades (Art 24 resolución 2309/86):

- Es más sensible a golpes o fricción que el di nitrobenceno.
- Puede producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25 grados Centígrados y una atmósfera de presión (Norma técnica ecológica 001/88).

1.3.5 Toxicidad. Se denomina a la propiedad que tiene una sustancia, elemento o compuesto de causar daños en la salud humana o la muerte de un organismo vivo (artículo 16 del Decreto 1594 de 1984¹² del Ministerio de Salud).

Un residuo tóxico en contacto con un organismo viviente es capaz de producir la muerte, herir o en alguna forma dañar al organismo. Estas sustancias tóxicas son peligrosas dependiendo de la exposición al riesgo y la manera en la cual tal desecho se maneje (USEPA, 1990).

Efectos adversos tales como carcinogenicidad, mutagenicidad y teratogenicidad son generalmente contraídos por el contacto con sustancias tóxicas. Estas propiedades intrínsecas definen los materiales tóxicos. Sin embargo, los términos "tóxico" y "peligroso" no son intercambiables. Las sustancias peligrosas pueden tener propiedades intrínsecas y extrínsecas. Por ejemplo, las propiedades extrínsecas de explosividad, inflamabilidad y reactividad no están referidas a la toxicidad química. En suma, la "toxicidad" denota la capacidad de una sustancia para producir daño, mientras "peligroso" denota la probabilidad de que el daño resultará del uso o contacto con una sustancia (USEPA, 1990).

Se puede causar un daño agudo a los humanos o a los animales cuando los residuos tóxicos son inhalados, ingeridos o por el contacto por la piel. La toxicidad aguda es generalmente medida en términos de concentración de dosis letal (LD50) en el cual el 50% de la población de prueba morirá debido a la exposición de una sustancia en particular bajo la condición prescrita (USEPA, 1990). Un residuo presenta la característica de toxicidad si una muestra representativa del mismo tiene la siguiente propiedad:

- Posee un peligro substancial o potencial para la salud humana o el ambiente cuando son tratados, almacenados, transportados o dispuestos inadecuadamente.

1.3.6 Clasificación general de los residuos peligrosos¹³

¹² Decreto 1594 de 26 de junio de 1984 del Ministerio de Agricultura. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

¹³ Residuos sólidos. Héctor Collazos Peñaloza y Ramón Duque Muñoz. Asociación colombiana de ingeniería sanitaria y ambiental ACODAL. Quinta edición. 1998.

1. Residuos inorgánicos. A este tipo de residuos pertenecen:

a) Ácidos y álcalis. Se encuentran entre los componentes principales de la cantidad total de los residuos peligrosos generados por diversos sectores de la industria, aunque en términos de cantidad, los residuos ácidos provienen principalmente de la preparación de superficies y acabado de metales. El principal peligro de los ácidos y álcalis está en su acción corrosiva, complicada en algunos casos, por la presencia de constituyentes tóxicos.

b) Residuos de Cianuro. Se generan principalmente en la industria del acabado de metales y en el tratamiento a altas temperaturas de ciertos aceros. El peligro asociado con los residuos del cianuro es su toxicidad aguda.

c) Residuos de asbestos. Normalmente surgen de los residuos de recubrimientos, estaciones de energía, plantas de manufactura industrial, fábricas de gas, astilleros, hospitales y establecimientos educacionales. Los materiales que contienen asbestos pueden también aparecer como residuos provenientes de la demolición o reconstrucción de locomotoras y vagones ferroviarios y de la construcción y demolición de sitios.

d) Otros residuos sólidos. Se generan de una variedad de fuentes de las cuales las más importantes son la fundición y refinamiento de metales. Los polvos y lodos generados de estos procesos contienen en su mayoría metales tóxicos incluyendo níquel, arsénico, zinc, mercurio, cadmio y plomo.

e) Residuos aceitosos. Los residuos aceitosos se generan principalmente del proceso, uso y almacenamiento de aceites minerales. Algunos ejemplos son residuos de lubricación y fluidos hidráulicos, lodos de fondos de tanques de almacenamiento de aceites. En algunos casos estos materiales pueden contaminarse con metales tóxicos (por ejemplo, tanques de almacenamiento de gasolina con plomo, etc.)

Residuos orgánicos. A este tipo de residuos pertenecen:

2. Residuos Inorgánicos.

a) Solventes halógenos. Se generan primordialmente de operaciones de limpieza en seco, limpieza de metal en la industria ingenieril y en una cantidad mucho menor, de los procesos de desengrasado y en las industrias textil y de curtiduría. El peligro

de estos residuos está asociado con su toxicidad, movilidad y la relativa alta persistencia en el ambiente.

b) Residuos de solventes no halogenados. Comprenden un gran número de hidrocarburos e hidrocarburos oxigenados. Algunos de los más utilizados son el tolueno, metanol, isopropanol y etanol. Estos encuentran una amplia aplicación a lo largo de la industria en la producción de pinturas, tintas, adhesivos, resinas, preservativos de madera hechos a base de solventes, saborizantes de alimentos, cosméticos, así como en la limpieza de equipo y plantas.

c) Residuos de policloruros de Bifenilo (PCBs). Se generan de la manufactura de PCBs y del equipo en que fueron utilizados, principalmente como fluidos dieléctricos en transformadores y capacitores, también como fluidos hidráulicos y de transferencia de calor. El peligro principal de los PCBs está asociado con su alto potencial de bio-acumulación.

d) Residuos de pinturas y resinas. Se generan de una variedad de formulaciones y otros procesos químicos terciarios, así como de la aplicación de pinturas y resinas a productos terminados. Generalmente, son combinaciones de solventes y materiales poliméricos incluyendo en algunos casos metales tóxicos.

e) Residuos de biocidas. Se generan tanto en la manufactura como en la formulación de biocidas y en el empleo de estos compuestos en la agricultura, horticultura y en otras industrias.

f) Residuos orgánicos putrescibles. Los residuos orgánicos putrescibles son aquellos residuos de la producción de aceites comestibles, desperdicios de rastros y otros productos provenientes de animales. El manejo apropiado de residuos putrescibles es de particular importancia en el desarrollo de países donde las condiciones climatológicas extremas pueden incrementar el posible riesgo a la salud asociado con estos residuos orgánicos.

g) Residuos poco peligrosos o de gran volumen. Estos residuos incluyen aquellos residuos que con base en sus propiedades intrínsecas presentan una relativa baja peligrosidad, pero pueden presentar problemas debido a sus grandes volúmenes. Algunos ejemplos son: lodos de las perforaciones provenientes de la extracción de petróleo y gas, cenizas finas del combustóleo quemados en plantas de energía, desechos de minas o escorias metalíferas.

h) Residuos diversos. En adición a las clases de residuos descritas anteriormente existen un número de otros tipos de residuos que no han sido agrupados. Estos incluyen residuos infecciosos con afección a tejidos humanos o animales, compuestos químicos redundantes que pueden haberse deteriorado o excedido su período de almacenamiento y provienen de tiendas de menudeo, almacenes comerciales y tiendas gubernamentales e industriales. Aun cuando estos residuos no presentan una gran proporción del total de la generación de residuos peligrosos, se deben llevar a cabo medidas especiales para asegurar una disposición adecuada.

1.3.7 Residuos peligrosos conforme la resolución 2309 de 1986 de Colombia¹⁴

a) Residuos Especiales. Objetos, elementos o sustancias que se abandonan, botan, desechan, descartan o rechazan y que sean patógenos, tóxicos, combustibles, inflamables, explosivos, radiactivos o volatilizables y los empaques y envases que los hayan contenido, como también los lodos, cenizas y similares. Quedan incluidos en esta denominación, los residuos que en forma líquida o gaseosa se empaquen o envasen.

b) Residuo patógeno o infectocontagioso. Se entiende por residuo patógeno o infectocontagioso, aquel que por sus características físicas, químicas o biológicas puede causar daño a la salud humana o animal por ser reservorio o vehículo de infección.

c) Residuo Tóxico. Aquel que por sus características físicas o químicas, dependiendo de su concentración y tiempo de exposición, puede causar daño a la salud humana o al medio ambiente.

d) Residuo combustible. Se entiende por residuo combustible, aquel que puede arder por acción de un agente exterior, como chispa o cualquier fuente de ignición.

e) Residuo inflamable. Se entiende por residuo inflamable, aquel que puede arder espontáneamente bajo ciertas condiciones de presión y temperatura.

f) Residuo explosivo. Se entiende por residuo explosivo, aquel que genera grandes presiones en su descomposición instantánea.

¹⁴ Resolución 2309 del 24 de febrero de 1986 del Ministerio de Salud.

g) Residuo radiactivo. Se entiende por residuo radiactivo, aquel que emita radiaciones en niveles superiores a las radiaciones naturales de fondo.

h) Residuo volatilizable. Se entiende por residuo volatilizable, aquel que por su presión de vapor se evapora o volatiliza a temperatura ambiente.

i) Residuos incompatibles. Aquellos que, cuando se mezclan o entran en contacto, pueden reaccionar produciendo efectos dañinos que atentan contra la salud humana, contra el medio ambiente o contra ambos.

2 RESIDUOS ACEITOSOS

En las operaciones que se llevan a cabo en la industria del petróleo y gas, específicamente en la búsqueda y producción del recurso energético, se generan ciertos desechos los cuales son denominados como residuos especiales. Estos desechos no son tratados como cualquier desecho más, puesto que contienen altos compuestos tóxicos, que generan impactos que comprometan seriamente el ambiente y por consiguiente a los individuos inmersos en él.

Como resultado de las operaciones a pozo tales como reacondicionamiento de pozos, perforación incluso en las operaciones de producción, se generan desechos denominados residuos aceitosos, estos son todos aquellos lodos, salmueras, polímeros, geles, espumas, emulsiones, grasas, aguas, y borras o fondo de tanques de almacenamiento, que contienen trazas de aceites provenientes de formación.

2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS¹⁵

Existen dos maneras de clasificar los residuos aceitosos, la primera por su origen y la segunda por su composición.

2.1.1 Clasificación según el origen de los residuos. Esta clasificación se puede ver en la tabla 1.

¹⁵ CARDONA, V.; RODRÍGUEZ, N. "Propuesta para el diseño e implementación de un esquema de manejo, tratamiento integral y recuperación de crudo, aguas para reinyección y salmueras para reutilización, de los residuos aceitosos (contaminados con hidrocarburo), generados por la operación del campo petrolero ubicado en el corregimiento el centro, municipio de Barrancabermeja, Santander". UIS, 2011.

Tabla 1. Clasificación de los residuos aceitosos

Tipo de Residuo	Descripción del Residuo	Actividad de generadora del residuo
1. Fluidos residuales Aceitosos de la operación y/o de Workover (Reacondicionamiento de pozos)	Fluidos residuales base aceite contaminados con ripio, sólidos y emulsiones, tales como arranques de pozo "postdrilling", fluidos de sumtanks, skimmers y/o trampas de grasa, contrapozos, entre otros. Residuos generados durante la reactivación de pozos. Salmueras para operaciones de control a pozos contaminadas.	Operación y producción
2. Geles, polímeros, espumas de limpieza, gomas y sus derivados y píldoras viscosas.	Retornos de trabajos de estimulación a pozos, basados en sustancias poliméricas sintéticas de medio y alto peso molecular, así como espumas siliconadas.	Producción trabajos de pozos
3. Suelo contaminado con alto contenido de hidrocarburo.	Suelo (tierras) proveniente de contaminaciones con hidrocarburo durante perforaciones a pozos y trabajos de estimulación y reacondicionamiento de pozo. (estimulación a pozos)	Producción y reacondicionamiento de pozos (Workover)
4. Fluidos aceitosos de producción contaminados con sólidos y emulsiones estables	Fluidos de producción provenientes, principalmente de saturaciones de la interface gumbarrel y otras vasijas, tales como FWKO's.	Producción
5. Borrás o fondos provenientes de la limpieza de vasijas en facilidades de producción	Sólidos y depósitos de fondo en vasijas que hacen parte de las facilidades de producción, tales como separadores, tanques de prueba, desnatadores (skimmers), lechos de secado de plantas de inyección de agua, decantadores, gunbarrel, entre otras vasijas.	Producción
6. Aguas aceitosas de lavado de vasijas.	Residuos líquidos aceitosos producto del lavado de vasijas como fractanks, catchtanks, tanques escuadra, tanques cilíndricos, entre otros, en esta clasificación se incluyen las aguas aceitosas que provienen de los contrapozos y contiene sólidos.	Producción, reacondicionamiento de pozos y Perforación.
7. Medios filtrantes provenientes de la limpieza de filtros de las plantas de inyección de agua	Material filtrante contaminado con sólidos e hidrocarburo.	Producción
8. Emulsiones, crudo sucio y Lodo	Emulsión parafínica con alto contenido de sólidos que forma un nata y proviene de la interfase de los tratadores térmicos.	Producción

2.1.2 Clasificación según la composición de los residuos. Esta clasificación considera la composición de los residuos y por tanto su respectivo tratamiento.

Grupo 1. Residuos aceitosos en los cuales predomina la presencia de agua.

a) Fluidos acuosos contaminados con hidrocarburos. Se consideran dentro de esta categoría todos los fluidos que tengan las siguientes características:

- Agua 90-99%.
- Sólidos + Aceite Max 10%.

b) Fluidos acuosos con alto contenido de cloruros contaminados con crudo provenientes de las actividades de reactivación y servicio a pozos. Dentro de esta categoría se encuentran todos los fluidos con las siguientes características:

- Contenido de agua: 80% a 95%.
- Sólidos + Aceite Max 20%

Grupo 2. Fluidos aceitosos, emulsiones y lodos. Dentro de esta categoría se encuentran todos los fluidos que tengan las siguientes características:

- Contenido de aceite: 20% a 80%.
- Contenido de agua: 0% a 80%.
- Contenido de sólidos: 0% a 25%.

Grupo 3. Borrás y sólidos con igual o más del 10% de aceite. Dentro de esta categoría se encuentran todos los residuos que tengan las siguientes características:

- Contenido de aceite: 10% a 60%.
- Contenido de agua: 0% a 20%.
- Contenido de sólidos: 25% a 80%.

Grupo 4. Residuos sólidos con contenido menor al 10% de hidrocarburo. Suelo contaminado. Dentro de este grupo se consideran los residuos con las siguientes características

- Contenido de aceite: Menor a 10%.
- Contenido de agua: 0% a 60%.
- Contenido de sólidos: 30% a 90%.

Tabla 2. Clasificación de los residuos según su composición

Tipo de residuo	Recuperación de crudos o aceites	Origen
Grupo 1: Fluidos acuosos	Máximo 10%	Producción
Grupo 2: Fluidos aceitosos emulsiones y lodos	Entre 20% y 80%	Perforación
Grupo 3: Borrás y sólidos	Entre 10% y 60%	Facilidades de producción
Grupo 4: Residuos sólidos	Menor al 10%	Derrames

2.2 AGUA PRODUCIDA

El agua de producción se extrae con el petróleo o el gas producido. Este es el mayor volumen de residuos generados por la industria petrolera y del gas. En Colombia, el agua producida es principalmente dispuesta para inyección al subsuelo en operaciones en tierra.

2.3 RESIDUOS DE OPERACIÓN DE POZOS

El segundo gran volumen de residuos generado por la industria proviene de la perforación, completamiento y operaciones de reacondicionamiento de pozos. Estos residuos incluyen cortes y lodos de perforación. Los lodos de perforación pueden ser base agua, base aceite, sintéticos o con agua salada para mejorar su desempeño.

2.4 OTROS RESIDUOS ASOCIADOS

Estos residuos incluyen fondos de tanques, lodos de separadores, desechos aceitosos, arena producida, suelos contaminados, fluidos de reacondicionamiento de pozos, etc.

2.5 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS

2.5.1 Agua Producida. El agua producida se refiere al agua que viene con el hidrocarburo durante la extracción, puede incluir agua de formación, agua de inyección y cualquier químico adicionado en el pozo o durante el proceso de separación aceite / agua. El agua siempre contiene aceite soluble y disperso. El agua de la mayoría se campos petrolíferos contiene una variedad de componentes orgánicos e inorgánicos disueltos, sólidos suspendidos y aceite disperso.

Los mayores constituyentes inorgánicos solubles son: sodio, calcio, magnesio cloruros, carbonato, bicarbonato y sulfato. El ion más común es el cloruro. La concentración de cloruros está en el rango de menor a 10000 mg/l a más de 200000 mg/l, cationes tales como Potasio, Estroncio y Bario pueden estar presentes en concentraciones mayores a 10 mg/l.

2.5.2 Residuos de perforación, completamiento y reacondicionamiento de pozos. Los residuos generados por las operaciones de perforación incluyen: fluidos de perforación (lodos) y sólidos, cemento, agua salada, aceite, cortes de perforación (tales como shale, cal, sal, dolomita) el volumen de estos desechos dependen del diámetro del pozo, la profundidad, del sistema y lodo utilizado y otros factores de operación.

En operaciones de off-shore el agua es tratada y el aceite disperso es removido para disponerse sobre borda de acuerdo a las normas establecidas. En la mayoría de operaciones en tierra en Colombia, el agua es tratada e inyectada o dispuesta para operaciones de inyección de agua en recobro secundario. En off- shore estas opciones no son viables económicamente, esto es debido a la gran complejidad en el tratamiento del agua y sus sistemas.

2.5.3 Residuos provenientes de operación de perforación.

2.5.3.1 Cortes de perforación. Estos consisten en fragmentos de roca inerte, y otros materiales sólidos provenientes de la formación e incluye cemento curado llevado a la superficie con el fluido de perforación. El fluido de perforación proveniente del pozo se descarga a la zaranda donde los cortes son separados del fluido. La separación del lodo y los cortes con los equipos no es completa. Típicamente los cortes húmedos generados por operaciones de perforación pueden contener 30% en volumen de líquidos.

2.5.3.2 Fluidos de perforación. **Estos fluidos son utilizados para: a) proveer presión hidrostática en el pozo para prevenir que fluidos provenientes de la formación entren al pozo. b) llevar los cortes a superficie. c) lubricar la sarta de perforación. d) enfriar y limpiar la broca y e) estabilizar el pozo.**

Los lodos de perforación contienen cuatro partes esenciales:

- Líquidos – agua, aceite, materiales sintéticos o varias combinaciones
- Sólidos Activos - viscosificantes a menudo bentonita.
- Sólidos inertes – densificantes a menudo barita.
- Otros aditivos para el control químico, físico, y propiedades biológicas del lodo.
- Además materiales condicionantes que pueden incluir polímeros, almidones, material lignítico y otros químicos.

Los fluidos de perforación pueden ser divididos en tres categorías: base agua, base aceite, y base sintética. Los base agua están hechos de agua fresca o salada y son usados en la mayoría de perforaciones. A menudo consisten en una fase continua de agua con sales disueltas, varios aditivos, polímeros y dispersantes. Los base aceite son emulsiones agua en aceite. En los lodos sintéticos, el aceite es sustituido con varias cadenas de ésteres, éteres, acetales e hidrocarburos sintéticos.

Los base aceite y los base sintéticos tienen unas ventajas operacionales sobre los base agua debido a su baja fricción y buena tolerancia a la temperatura, e inertes a las arcillas. Los lodos base sintética fueron desarrollados en respuesta a los requerimientos comparables a fluidos base aceite pero sin las implicaciones ambientales adversas de éstos. Una vez las operaciones de perforación han terminado nuevamente el pozo perforado debe ser completado, antes de empezar la producción.

2.5.3.3 Fluidos de completamiento y reacondicionamiento de pozos.

Típicamente son soluciones salinas, salmueras, polímeros y varios aditivos usados para prevenir el daño en el pozo durante operaciones las cuales preparan al pozo para producción. Los residuos de completamiento y reacondicionamiento de pozos incluyen fluidos hidráulicos, aceites usados, filtros, material pesante, surfactantes, lodos, agua producida ácidos, geles, y solventes.

2.5.3.4 Fluidos de tratamiento de pozo. **Son usados para mejorar o restaurar químicamente o físicamente la productividad, alterando la formación después que el pozo ha sido completado. Estos fluidos incluyen ácidos, solventes etc. Las operaciones de servicio al pozo incluyen un amplio rango de operaciones, desde el remplazo de bombas, preparación y limpieza del pozo antes de la producción.**

2.5.4 Otros residuos Asociados. Estos residuos son generados por el procesamiento del gas y las facilidades de producción, e incluye un amplio rango de residuos a menudo producidos en pequeñas cantidades. Estos residuos incluyen: desechos aceitosos, filtros, suelos contaminados, arenas producidas, fondos de tanques, lodos de separadores, residuos de unidades deshidratación y endulzamiento, emulsiones no tratadas, solventes y limpiadores utilizados.

El fondo de tanques y lodos de separadores pueden estar contaminados con aceite y grasas, cloruro de sal, metales pesados (tales como carbonato de calcio sulfato de calcio, sulfato de bario etc.) productos de corrosión, tratamientos químicos.

3 NORMATIVIDAD LEGAL VIGENTE

En este capítulo se da a conocer algunos aspectos legales como leyes, decretos, resoluciones, normas, relacionadas con el manejo de residuos a nivel nacional y convenios internacionales.

En Colombia, la Constitución Política de 1991¹⁶, dio un paso definitivo hacia la modernización del régimen del medio ambiente, consagrando derechos individuales y colectivos en cabeza de los ciudadanos y de las empresas, relacionadas con la protección de los recursos naturales y creando entes de vigías para el cumplimiento de las normas en pro de la preservación, restauración y defensa del medio ambiente.

NORMAS AMBIENTALES DE LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA

En la estructura de la Constitución Colombiana, los artículos alusivos al medio ambiente se agrupan en seis campos de acción, los cuales se pueden observar en la tabla 3.

¹⁶ Constitución política de Colombia de 1991.

Tabla 3. Campos de acción de la Constitución Política Colombiana alusivos al medio ambiente y sus respectivos artículos.

CAMPOS DE ACCIÓN DE LA CONSTITUCIÓN COLOMBIANA ALUSIVOS AL MEDIO AMBIENTE	ARTÍCULOS APLICABLES
Medio Ambiente como derecho colectivo, fundamental y principio rector del Estado.	7, 8, 49, 67, 79, 80, 81, 82,95 y 215
Medio Ambiente como derecho colectivo social o fundamental	79,88 y 330
Medio Ambiente como paradigma de un nuevo modelo de desarrollo estableciendo un vínculo entre el medio ambiente y desarrollo	333, 334, 339, 340 y 36
Medio Ambiente como condicionante de la propiedad privada, la economía y las empresas	58, 63 y 66
Medio Ambiente como componente de la política internacional	226
Medio Ambiente en relación con la estructura organizativa y funcional del Estado	267, 268, 277, 282, 289, 298, 310, 313, 317, 330 y 331
Fiscalización y Control de la Gestión Ambiental, función encomendada las Contralorías y dentro de la cual se incluye el ejercicio de control financiero, de gestión y de resultados	267 y 268

Fuente: Constitución política de Colombia

3.1 LEYES Y DECRETOS PARA EL MEDIO AMBIENTE

A continuación, se citan y describen brevemente las leyes y decretos de mayor relevancia respecto al tema de medio ambiente.

3.1.1 Ley 99 de 1993¹⁷. Fundamentada en la concepción del desarrollo sostenible y apoyado en los conceptos de la Cumbre de Río de Janeiro, la gestión ambiental sufrió un vuelco radical, quedando estructurada de la siguiente manera:

- Principios ambientales, la tabla 2 recoge algunos de tales principios en la medida en que trascienden a proyectos de la industria del petróleo.
- Sistema Nacional Ambiental –SINA.
- Planificación y Gestión (Instrumentos económicos–Tasas, Instrumentos de gestión, Licencias).
- Licencias Ambientales (Estudios de Impacto Ambiental y Planes de Manejo Ambiental).
- Participación ciudadana (Derecho de intervención, Audiencias Públicas, Consultas obligatorias).
- Control y Vigilancia.

¹⁷ Ley 99 de del 22 de diciembre de 1993 Por el cual se crea el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, se reordena el Sector Publico encargado de la gestión y conservación de medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental- SINA y se dictan otras disposiciones.

Tabla 4. Principios ambientales de la ley 99/93 que trasciende a proyectos de la industria del petróleo.

PRINCIPIO	COMENTARIOS
El proceso de desarrollo económico y social se orientará según los principios del desarrollo sostenible (Declaración de Río de Janeiro).	Reconoce la necesidad de utilizar recursos del ambiente para el desarrollo económico y social, pero establece el uso racional ya que los recursos son finitos.
Las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial.	En la práctica estas áreas están vedadas a la actividad industrial o exploratoria.
En la utilización de los recursos hídricos, el consumo humano tendrá prioridad sobre cualquier otro uso.	Obliga, en los proyectos, a estudiar usos del agua para decidir sobre captaciones.
Principio de precaución.	La adopción de medidas para evitar la degradación ambiental no requiere certeza científica.
El paisaje, por ser patrimonio común, deberá ser protegido.	La afectación del paisaje debe ser analizada en los proyectos.
El EIA será el instrumento básico para la toma de decisiones	Define el peso de la variable ambiental en la toma de decisiones sobre los proyectos.
El manejo ambiental del país será descentralizado, democrático y participativo.	Reafirma la participación ciudadana en las decisiones ambientales relacionadas con la ejecución de proyectos que puedan afectar el medio ambiente.

Fuente: Ley 99 de 1993

Esta ley establece como competencia de las autoridades ambientales y de los organismos fiscalizadores, vigilar que toda actividad se desarrolle bajo el concepto del Desarrollo Sostenible, haciendo indispensable que en todo proceso de planeación de actividades se tenga en cuenta medidas o acciones contempladas en los respectivos Estudios de Impacto Ambiental - EIA, Planes de Manejo Ambiental - PMA, Requerimientos Ambientales y Planes de Gestión Ambiental Institucional.

La Licencia Ambiental entendida como la autorización mediante acto administrativo

que otorga la autoridad ambiental competente a una persona natural o jurídica para la ejecución de un proyecto, obra o actividad que conforme a la Ley y a los reglamentos, puede producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje; en ella se establecen los requisitos, obligaciones y condiciones que el beneficiario debe cumplir para prevenir, mitigar, corregir, compensar y manejar los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizada. Esta norma establece dos aspectos importantes con relación al agua: Tasas retributivas y compensatorias por vertimientos (Art. 42) y Tasas por utilización de las aguas superficiales y subterráneas (Art. 43).

Los Planes de Manejo Ambiental-PMA son una alternativa de manejo ambiental para proyectos y/o actividades que no ocasionan mayores daños o impactos al medio ambiente (proyectos de bajo y mediano impacto), mediante los que se establece de manera detallada las acciones que se requieren para prevenir, mitigar, controlar, compensar y corregir, los posibles efectos o impactos ambientales negativos causados en desarrollo de un proyecto, obra o actividad; incluyendo además los planes de seguimiento, evaluación, monitoreo y contingencia.

Se puede concluir que los Planes de Manejo Ambiental son estudios o documentos que, basados en un diagnóstico de la situación actual de los recursos naturales y sociales (línea base), punto de partida para establecer los posibles impactos generados por el desarrollo de un proyecto, obra o actividad humana, que definen las acciones y actividades de preservación, mitigación, corrección y compensación por los posibles impactos o efectos del proyecto, obra o actividad sobre el entorno natural o medio ambiente.

El incumplimiento de cualquiera de estas fases, aprobadas previamente por la autoridad ambiental, puede dar lugar a graves efectos, no sólo en la salud humana sino en el entorno natural, que pueden valorarse a fin de cuantificar monetariamente los daños en la salud humana (costos evitados) o en los recursos naturales, patrimonio del Departamento (costo de oportunidad).

3.1.2 Ley 99 de 1993 y decreto 2820 del 5 de agosto de 2010¹⁸. En Colombia, la ley 99/93, en su artículo 1, estableció los principios generales que rigen la política Ambiental colombiana y que, por tanto, orientan la gestión ambiental de las actividades industriales.

El Decreto 2820 del 5 de agosto de 2010 emitido por el **MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL** “Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales”

A continuación nos permitimos transcribir un aparte de dicho decreto.

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA, En ejercicio de sus facultades constitucionales, en especial de lo establecido en el numeral 11 del artículo 189 de la Constitución Política y en desarrollo de lo previsto en los artículos 53 y siguientes de la Ley 99 de 1993.

DECRETA

TÍTULO II

COMPETENCIA Y EXIGIBILIDAD DE LA LICENCIA AMBIENTAL

ARTÍCULO 8.- COMPETENCIA DEL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL.

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, otorgará o negará de manera privativa la Licencia Ambiental para los siguientes proyectos, obras o actividades:

1. En el sector hidrocarburos:

- a). Las actividades de exploración sísmica que requieran la construcción de vías para el tránsito vehicular y las actividades de exploración sísmica en las áreas marinas del territorio nacional cuando se realicen en profundidades inferiores a 200 metros;
- b). Los proyectos de perforación exploratoria, por fuera de campos de producción de hidrocarburos existentes, de acuerdo con el área de interés que declare el peticionario;
- c). La explotación de hidrocarburos que incluye las instalaciones propias de la

¹⁸ Decreto 1220 de 2005

actividad y obras complementarias incluidas el transporte interno del campo por ductos y su almacenamiento interno, las vías y demás infraestructura asociada y conexas;

d). El transporte y conducción de hidrocarburos líquidos y gaseosos que se desarrollen por fuera de los campos de explotación que impliquen la construcción y montaje de infraestructura de las líneas de conducción con diámetros iguales o superiores a 6 pulgadas (15.24cm), incluyendo estaciones de bombeo y/o reducción de presión y la correspondiente infraestructura de almacenamiento y control de flujo; salvo aquellas actividades relacionadas con la distribución de gas natural de uso domiciliario, comercial o industrial;

e). Los terminales de entrega y estaciones de transferencia de hidrocarburos líquidos, entendidos como la infraestructura de almacenamiento asociada al transporte por ductos;

f). La construcción y operación de refinerías y los desarrollos petroquímicos que formen parte de un complejo de refinación.

El análisis de riesgos involucra el conocimiento de los sistemas involucrados en el proyecto, los productos o sustancias a manejar (crudo, agua, gas, etc.), y sus principales características como medio de predecir su comportamiento.

3.1.3 Decreto- Ley 2811 de 1974¹⁹. Contiene las normas técnicas de manejo, uso, aprovechamiento, explotación, conservación, preservación, protección y restauración de los recursos naturales renovables, armoniza la normatividad en materia de aguas, suelos, bosques y fauna buscando de esta manera un manejo integral de los recursos naturales. Dentro de su contenido se tienen: antecedentes, definiciones, política ambiental, normas generales, asuntos ambientales de ámbito internacional, medios de desarrollo de la política ambiental, normas de preservación del ambiente por disposición de residuos y desechos químicos, tóxicos y radioactivos; propiedad, uso e influencia ambiental de los recursos naturales renovables, dominio de los recursos naturales renovables, modos de adquirir el derecho al uso (Permisos, concesiones, autorizaciones y licencias), limitaciones al dominio; reglamento para el control y la protección de la calidad del aire; reglamentación de las aguas y modos de manejo, así mismo establece que la utilización del agua con fines lucrativos por personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, dará lugar al cobro de tasas retributivas y compensatorias (Art. 159).

A continuación se mencionan algunos de los artículos más relevantes respecto al tema de desechos.

¹⁹ Decreto- Ley 2811 del 18 de diciembre de 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

Artículo 3: De acuerdo con los objetivos enunciados, el presente Código regula: en el numeral 1, los residuos, basuras, desechos y desperdicios.

Artículo 34: En el manejo de residuos, basuras, desechos y desperdicios, se observarán las siguientes reglas:

a). Se utilizarán los mejores métodos, de acuerdo con los avances de la ciencia y la tecnología, para la recolección, tratamiento, procesamiento o disposición final de residuos, basuras, desperdicios y, en general, de desechos de cualquier clase.

b). La investigación científica y técnica se fomentará para:

- Desarrollar los métodos más adecuados para la defensa del ambiente, del hombre y de los demás seres vivos.
- Reintegrar al proceso natural y económico los desperdicios sólidos, líquidos y gaseosos, provenientes de industrias, actividades domésticas o de núcleos humanos en general.
- Sustituir la producción o importación de productos de difícil eliminación o reincorporación al proceso productivo.
- Perfeccionar y desarrollar nuevos métodos para el tratamiento, recolección, depósito y disposición final de los residuos sólidos, líquidos o gaseosos no susceptibles de nueva utilización.

Artículo 35: Se prohíbe descargar, sin autorización, los residuos, basuras y desperdicios, y, en general, desechos que deterioren los suelos o, causen daño o molestia a individuos o núcleos humanos.

Artículo 36: Para la disposición o procesamiento final de las basuras se utilizarán, preferiblemente, los medios que permitan:

- a). Evitar el deterioro del ambiente y de la salud humana.
- b). Reutilizar sus componentes.
- c). Producir nuevos bienes.
- d). Restaurar o mejorar los suelos.

Artículo 38: Por razón del volumen o de la calidad de los residuos, las basuras, desechos o desperdicios, se podrá imponer a quien los produce la obligación de recolectarlos, tratarlos o disponer de ellos, señalándole los medios para cada caso.

Artículo 39: Para prevenir y para controlar los efectos nocivos que puedan producir en el ambiente el uso o la explotación de recursos naturales no renovable, podrán señalarse condiciones y requisitos concernientes a:

- a). El uso de aguas en el beneficio o el tratamiento de minerales, de modo que su contaminación no impida ulteriores usos de las mismas aguas, en cuanto estos fueren posibles.
- b). El destino que deba darse a las aguas extraídas en el desagüe de minas.
- c). El uso de aguas en la exploración y explotación petrolera, para que no produzca contaminación del suelo ni la de aguas subterráneas.
- d). El uso de aguas utilizadas para la recuperación secundaria de yacimientos de hidrocarburos o gases naturales, para que no produzcan riesgos o perjuicios ambientales.

3.2 NORMATIVIDAD EXTRANJERA COMO MODELO DE APLICACIÓN EN LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA.

En Colombia las normas pertinentes al manejo ambiental están basadas en la norma estadounidense Louisiana 29-B²⁰. Esta norma estadounidense es la pionera de los de las reglamentaciones dadas a todas las actividades industriales que afectan el medio ambiente. Específicamente en el reglamento de Louisiana en su título 43, parte XIX, orden estatal 29B.

En el Capítulo 3 están contemplados todos aquellos criterios y parámetros tenidos en cuenta para el manejo y disposición final de todos los residuos ocasionados por actividades de la industria, pertinentes al control de la contaminación, almacenamiento in situ, tratamiento y disposición de residuos de las actividades de exploración y producción petrolera que se generan en la perforación y producción de petróleo y gas.

En Louisiana, las fosas que contienen residuos no peligrosos en campos petroleros se pueden enterrar mediante la mezcla de suelo con los residuos, siempre y cuando el material a ser enterrado cumpla con los siguientes criterios descritos por el Estado de Louisiana en la Orden 29-b, del 20 de Octubre de 1990.

- pH 6-9
- Contenido total de metales (ppm) en los residuos mezclados con la tierra no excederá:

²⁰ Title 43 NATURAL RESOURCES Part XIX. Office of Conservation- General Operations.Subpart 1.Statewide Order No.29-B

- Arsénico 10 ppm
 - Cadmio 10 ppm
 - Cromo 500 ppm
 - Plomo 500 ppm
 - Mercurio 10 ppm
 - Plata 200 ppm
 - Selenio 10 ppm
 - Zinc 500 ppm
-
- Contenido de humedad inferior al 50% en peso

 - Conductividad eléctrica <12 mmohm/cm

 - Crudo y grasas <3% en peso

 - El tope de la mezcla se debe enterrar mínimo 5 pies bajo el nivel del suelo y luego ser cubierta con 5 pies de tierra nativa.

 - La parte inferior de la fosa debe estar por lo menos 5 pies por encima de la lámina de agua en época de lluvias.

4 GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ACEITOSOS

En la actualidad el sector petrolero genera una serie de residuos aceitosos, una adecuada gestión de los residuos comprende las etapas de generación, manejo, acondicionamiento, recolección, transporte, almacenamiento, reciclaje, tratamiento y disposición final de los mismos, de manera segura, sin causar impactos negativos al medio ambiente, y con un costo reducido.

En relación al tratamiento externo de residuos o desechos peligrosos, se destacan los residuos de la corriente de mezclas y emulsiones de agua e hidrocarburos o aceites y agua como la tratada externamente en mayor proporción 64,3% del total tratado en 2013.

En cuanto al aprovechamiento externo de residuos o desechos peligrosos, se encuentra que las mezclas y emulsiones de aceite y agua o hidrocarburos y agua fue la corriente que presentó el mayor aprovechamiento y/o valorización externa de residuos peligrosos en el año 2013, acorde a que fue la corriente de residuo más generada en el país durante dicho año, con el 45,4% de la generación total nacional.

Tabla 5. Gestión y tratamiento de residuos aceitosos.

Producción	Gestores	Tratamiento	Cantidad tratada (toneladas)
Borras, Lodos aceitosos, Lodos con presencia de hidrocarburos y emulsiones de hidrocarburos con agua	PETROLABIN LTDA, ATP Ingeniería LTDA, GEOAMBIENTAL LTDA, PUJAR LTDA	Biológico	891,1
		Fisicoquímico	6.309,90
		Tecnologías Avanzadas	13.251,20
		Térmico	41.393,90
		Varios	4.555,70
		Otros	8.967,50

4.1 TECNOLOGÍAS TIPO BIO

A continuación, se presentan las tecnologías de tratamiento según la matriz de selección de biorremediación. Esta matriz es definida por en FRT RT (Federal Remediation Technologies Round Table) ente estadounidense encargado de la investigación y desarrollo de todas las tecnologías. Los costos dependen del país Ver tabla 6

Tabla 6. Matriz de selección de biorremediación

Rating Codes ● Above Average ○ Average ○ Below Average N/A - "Not Applicable" ID - "Insufficient Data" ◇ - Level of Effectiveness highly dependent upon specific contaminant and its application	Development Status	Treatment Train	Relative Overall Cost & Performance						Availability	Nonhalogenated VOC's	Halogenated VOC's	Nonhalogenated SVOC's	Halogenated SVOC's	Fuels	Inorganics	Radionuclides	Explosives
			O&M	Capital	System Reliability & Maintainability	Relative Costs	Time										
Soil, Sediment, Bedrock, and Sludge																	
3.1 In Situ Biological Treatment																	
4.1 Bioventing	●	●	●	●	●	●	○	●	●	○	●	○	●	○	○	○	○
4.2 Enhanced Bioremediation	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.3 Phytoremediation	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.2 In Situ Physical/Chemical Treatment																	
4.4 Chemical Oxidation	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.5 Electrokinetic Separation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.6 Fracturing	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.7 Soil Flushing	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.8 Soil Vapor Extraction	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.9 Solidification/Stabilization	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.3 In Situ Thermal Treatment																	
4.10 Thermal Treatment	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.4 Ex Situ Biological Treatment (assuming excavation)																	
4.11 Biopiles	●	●	●	●	●	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
4.12 Composting	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.13 Landfarming	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.14 Slurry Phase Biological Treatment	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.5 Ex Situ Physical/Chemical Treatment (assuming excavation)																	
4.15 Chemical Extraction	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.16 Chemical Reduction/Oxidation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.17 Dehalogenation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.18 Separation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.19 Soil Washing	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.20 Solidification/Stabilization	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.6 Ex Situ Thermal Treatment (assuming excavation)																	
4.21 Hot Gas Decontamination	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.22 Incineration	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.23 Open Burn/Open Detonation	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.24 Pyrolysis	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.25 Thermal Desorption	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.7 Containment																	
4.26 Landfill Cap	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.27 Landfill Cap Enhancements/Alternatives	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.8 Other Treatment																	
4.28 Excavation, Retrieval, Off-Site Disposal	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ground Water, Surface Water, and Leachate																	
3.9 In Situ Biological Treatment																	
4.29 Enhanced Bioremediation	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.30 Monitored Natural Attenuation	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.31 Phytoremediation	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.10 In Situ Physical/Chemical Treatment																	
4.32 Air Sparging	●	●	●	●	●	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
4.33 Bioslurping	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.34 Chemical Oxidation	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.35 Directional Wells (enhancement)	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.36 Dual Phase Extraction	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.37 Thermal Treatment	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.38 Hydrofracturing Enhancements	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.39 In-Well Air Stripping	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.40 Passive/Reactive Treatment Walls	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.11 Ex Situ Biological Treatment																	

Rating Codes ● Above Average ⦿ Average ○ Below Average N/A - "Not Applicable" I/D - "Insufficient Data" ◇ - Level of Effectiveness highly dependent upon specific contaminant and its application	Development Status	Treatment Train	Relative Overall Cost & Performance						Availability	Nonhalogenated VOC's	Halogenated VOC's	Nonhalogenated SVOC's	Halogenated SVOC's	Fuels	Inorganics	Radionuclides	Explosives
			O&M	Capital	System Reliability & Maintainability	Relative Costs	Time										
4.41 Bioreactors	●	●	⦿	○	⦿	●	⦿	●	●	●	●	◇	○	○	○	○	●
4.42 Constructed Wetlands	●	●	⦿	○	◇	⦿	◇	○	⦿	⦿	⦿	◇	⦿	○	○	○	●
3.12 Ex Situ Physical/Chemical Treatment (assuming pumping)																	
4.43 Adsorption/Absorption	●	●	○	⦿	⦿	○	○	●	⦿	⦿	⦿	⦿	○	●	◇	○	○
4.44 Advanced Oxidation Processes	●	⦿	○	⦿	⦿	○	○	●	●	●	●	●	●	◇	◇	○	●
4.45 Air Stripping	●	⦿	○	⦿	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
4.46 Granulated Activated Carbon/Liquid Phase Carbon Adsorption	●	⦿	○	⦿	⦿	⦿	○	●	●	●	●	●	●	◇	○	○	◇
4.47 Groundwater Pumping/Pump & Treat	●	⦿	○	○	○	○	○	○	⦿	⦿	⦿	◇	⦿	⦿	○	○	◇
4.48 Ion Exchange	●	⦿	○	○	●	⦿	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.49 Precipitation/Coagulation/Flocculation	●	⦿	⦿	○	⦿	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.50 Separation	●	⦿	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.51 Sprinkler Irrigation	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○
3.13 Containment																	
4.52 Physical Barriers	●	●	⦿	○	●	●	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○	○
4.53 Deep Well Injection	●	●	●	●	⦿	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.14 Air Emissions/Off-Gas Treatment																	
4.54 Biofiltration	○	N/A	●	●	◇	○	○	○	●	◇	◇	◇	●	○	I/D	○	◇
4.55 High Energy Destruction	○	N/A	I/D	I/D	○	⦿	I/D	⦿	●	●	●	●	●	○	I/D	○	○
4.56 Membrane Separation	○	N/A	I/D	I/D	○	⦿	I/D	⦿	●	●	●	●	●	○	I/D	○	○
4.57 Oxidation	●	N/A	●	●	●	○	I/D	●	●	●	●	●	●	○	I/D	○	○
4.58 Scrubbers	●	N/A	⦿	○	●	●	I/D	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.59 Vapor Phase Carbon Adsorption	●	N/A	●	●	●	●	I/D	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Factors	● Above Average	⦿ Average	○ Below Average	Other	
Development Status Scale status of an available technology	Implemented as part of the final remedy at multiple sites, well documented, understood, etc.	Has been implemented at full scale but still needs improvements, testing, etc.	Not been fully implemented but has been tested (pilot, bench, lab scale) and is promising	◇ Level of Effectiveness highly dependent upon specific contaminant and its application/design	
Treatment Train Is the technology only effective as part of the treatment train?	Stand-alone technology (not complex in terms of number of media/treatment technologies, maybe one "routine" technology in addition)	Relatively simple (two-car train or so), and well understood, widely applied, etc.	Complex (more technologies, media to be treated, generates excessive waste, etc.)		
Relative overall cost and performance	O&M Operation and Maintenance Intensive	Low degree of O&M intensity	Average degree of O&M intensity	N/A "Not Applicable" I/D "Insufficient Data"	
	Capital Capital Intensive	Low degree of capital investment	Average degree of capital investment		
	System Reliability /Maintainability The expected range of demonstrated reliability and maintenance relative to other effective technologies	High reliability and low maintenance	Average reliability and average maintenance		Low reliability and high maintenance
	Relative Costs Design, construction, and operations and maintenance (O&M) costs of the core process that defines each and pre-and post-treatment	Low degree of general costs relative to other options	Average degree of general costs relative to other options		High degree of general costs relative to other options
	Time Time required to clean up a "standard" site using the technology	Less than 1 year in situ soil Less than 0.5 year ex situ soil Less than 3 years groundwater	1-3 years 0.5-1 year 3-10 years		More than 3 years for in situ soil More than 1 year for ex situ soil More than 10 years for water
Availability Number of vendors that can design, construct, and maintain the technology	More than 4 vendors	2-4 vendors	Fewer than 2 vendors		
Contaminants Treated Contaminants are classified into eight groups: - Nonhalogenated VOCs - Halogenated VOCs - Nonhalogenated SVOCs - Halogenated SVOCs - Fuels - Inorganics - Radionuclides - Explosives	Effectiveness Demonstrated at Pilot or Full Pilot or Full Scale	Limited Effectiveness Demonstrated at Pilot or Full Scale	No Demonstrated Effectiveness at Pilot or Full Scale	Same as above	

Fuente: https://frtr.gov/matrix2/section3/table3_2.pdf

Esta matriz nos muestra las diferentes técnicas de biorremediación que existen en la actualidad, los avances en estudios de cada técnica presente, su aplicación, costos y el respectivo tratamiento y disposición de residuos.

4.2 GENERALIDADES SOBRE BIORREMEDIACIÓN

Algunos problemas de contaminación han encontrado solución en la biotecnología. Esto no es nuevo, pues se conoce que desde hace varias décadas se emplean microorganismos para limpiar cuerpos de agua o como filtros de emisiones a la atmósfera. La tecnología bajo este procedimiento se conoce como biorremediación y en el mundo está teniendo cada vez más aplicaciones, pues con el uso de métodos

biológicos puede darse una solución sin efectos secundarios y a costos considerablemente más bajos. Lo anterior va de la mano con las cada vez más estrictas restricciones por parte de las autoridades ambientales en contra de las empresas o instituciones que, por accidente o de manera intencional, arrojan sus residuos contaminantes a la atmósfera, cuerpos de agua o suelos. El objetivo de los tratamientos preventivos en biorremediación es aprovechar las capacidades de degradación de los microorganismos mediante la implementación de maneras que aumenten y acelerar el proceso natural de biodegradación.

En general, hay cinco posibilidades de utilización de los microorganismos en los tratamientos preventivos y biorremediación.

4.2.1 Bioestimulación. Consiste en estimular los microorganismos nativos del suelo adicionando nutrientes como nitrógeno o fósforo, se puede realizar in situ o ex situ.

4.2.2 Bioaumentación. Es la inoculación de una alta concentración de microorganismos en el suelo contaminado para facilitar la biodegradación. Como se van a inocular, estos microorganismos deben ser seleccionados del suelo que se desea tratar, frecuentemente utilizado en los biorreactores y sistemas ex situ.

4.2.3 Biolixiviación. La biolixiviación corresponde a la solubilización de microorganismos y a la lixiviación por arrastre en la fase acuosa de contaminantes (minerales, metales pesados, fósforo, etc.) fijos o atrapados en una matriz sólida.

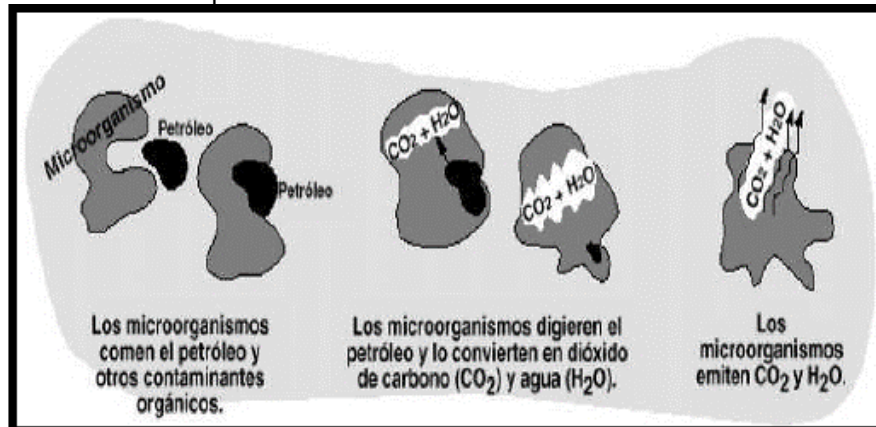
4.2.4 Rizoestimulación. Muchas plantas crecen en la presencia de un contaminante que puede extraer, acumular, transformar o eliminar (Pilon-Smits). En el caso de rizodegradación, el contaminante es degradado por enzimas liberadas por las raíces de las plantas o por fitoestimulación de microorganismos asociados a la rizosfera. (Gerhardt et al.)

4.2.5 Bio-Inmovilización. Es la capacidad de ciertos microorganismos (procariotas y eucariotas, principalmente hongos) para inmovilizar algunos contaminantes inorgánicos (radiactivos, residuos mineros) o los contaminantes orgánicos (hidrocarburos en la matriz de una estera microbiana) precipitando o atrapándolos en un mineral o matriz orgánica.

Las técnicas biológicas denominadas biorremediación, que cuentan con la participación de organismos vivos, producen menores costos de inversión y con resultados y tiempos más alentadores. Una ventaja más frente al implemento de

métodos fisicoquímicos es que la biorremediación es más "amigable" con el suelo a tratar, ya que no produce efectos secundarios. De este modo la existencia de algunos microorganismos (bacterias) tienen la capacidad de usar a los hidrocarburos contaminantes como fuente de carbono y energía, es decir, para alimentarse, y que una vez aprovechados son desechados en forma de CO₂ (bióxido de carbono) y agua. A continuación, en la figura 1 se observa cómo se da el proceso de biorremediación del petróleo.

Figura 1. Biorremediación del petróleo.



Fuente: Monitoreo de parámetros directos e indirectos durante la biorremediación, Victoria Eugenia Vallejo Q M.Sc., PhD.

Este proceso por lo general, consiste en la aplicación de fertilizantes nitrogenados y/o de fósforo, en ajustar el pH, mantener el contenido de agua necesaria, oxigenar, mantener las condiciones ambientales apropiadas tales como la temperatura, concentraciones de contaminantes no tóxicas para los microorganismos y adecuadas condiciones de humedad y conductividad del medio, entre las más importantes; y se acompaña a menudo con la adición de bacterias naturales o modificadas genéticamente para neutralizar sustancias tóxicas, convirtiéndolas en inocuas para el ambiente y la salud humana.

Su ámbito de aplicabilidad es muy amplio, pudiendo considerarse como objeto cada uno de los estados de la materia.

- **Sólido.** Con aplicaciones sobre medios contaminados como suelos o sedimentos, o bien directamente en lodos, residuos, etc.
- **Líquido.** Aguas superficiales y subterráneas, aguas residuales, mares y océanos.

- **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:

- Hidrocarburos de todo tipo (alifáticos, aromáticos, BTEX, PAHs).
- Hidrocarburos clorados (PCBs, TCE, PCE, pesticidas, herbicidas).
- Compuestos nitroaromáticos (TNT y otros).
- 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.

4.3 REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

Las estrategias para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos pueden ser físicas-químicas-biológicas, entre las más comunes se encuentran:

- **Físico-química:** Extracción con disolventes (lavado con agua y disolventes orgánicos, agentes tensoactivos, ciclo dextrinas, aceite vegetal), extracción con fluidos supercríticos, la extracción con fluido subcrítico.
- **Químico:** Oxidación química con diversos oxidantes (por ejemplo, el reactivo de Fenton, el ozono, peróxido – ácido, KMnO_4 , H_2O_2 , Per sulfato de sodio), la degradación fotocatalítica y la remediación electrocinética.
- **Físicos- Térmicos:** la incineración, desorción térmica, el suelo térmicamente mejorado con la extracción de vapor.
- **Biológico:** La biorremediación *in situ* como la biolabranza y el compostaje, tratamiento aeróbico, anaeróbico y la fitorremediación.

Las estrategias Físico- químicas, se pueden implementar fácilmente ya que el proceso se lleva a cabo a presión ambiente y temperaturas bajas, la ciclodextrinas y los aceites vegetales proporcionan alternativas no tóxicas, biodegradables y respetuosas con el medio ambiente a los convencionales disolventes. En comparación con el lavado convencional del suelo, las extracciones de fluido supercrítico y subcrítico son opciones "más verdes", pero éstas generen el uso de

equipos de alta presión, no obstante, la extracción con disolventes es solo un proceso de separación que transfiere los hidrocarburos, por lo tanto, se requiere de un el tratamiento secundario y/o adicional de los extractos. La oxidación química es capaz de degradar hidrocarburos, sin embargo, existe la preocupación de que se puedan formar subproductos tóxicos durante el tratamiento.

Tanto la degradación fotocatalítica y la remediación electrocinética, han sido aplicados recientemente para el tratamiento de suelos contaminados, pero el éxito en campo, debido a las extensiones requerirá una mayor optimización y estudios de factibilidad económica de estas estrategias. Las estrategias térmicas, por otro lado, pueden destruir eficazmente el hidrocarburo, pero implican altos costos debido a las altas temperaturas que se requieren y a la necesidad de un tratamiento de los gases producidos. La biorremediación y fitorremediación, por su parte, requieren un proceso de larga duración en comparación con todas las demás estrategias, las principales ventajas de estos procesos biológicos son el alto potencial de las estrategias in situ y que no se requiere de más tratamientos adicionales ya que los subproductos que se forman generalmente son dióxido de carbono, agua y biomasa²¹.

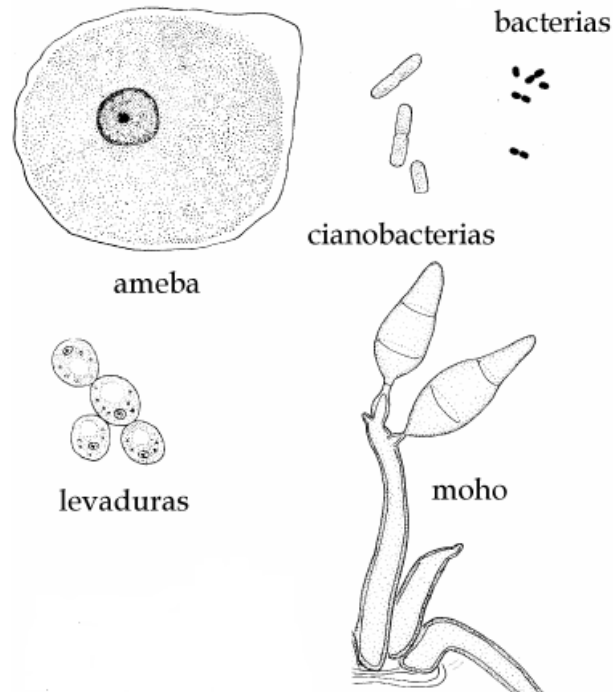
4.3.1 Materias primas utilizadas en el proceso. El factor microbiológico más importante en biorremediación es la transformación biológica de compuestos orgánicos, catalizada por la acción de las enzimas. Las enzimas son específicas en término de los compuestos que atacan y las reacciones que catalizan. Frecuentemente, los organismos que tienen las enzimas para degradar están presentes en el suelo.

Microorganismos en la biorremediación.

Existen varias clases de microorganismos: mohos, levaduras, bacterias, actinomicetos, protozoos, algas, virus. La Figura 2 muestra el tamaño comparativo de algunos microorganismos.

²¹ Ng H, Gan S E Lau, "Remediation of soils contaminated with,"Journal of Hazardous Materials Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), pp. 532-549. 2009.

Figura 2. Tamaño comparativo de algunos microorganismos



Fuente: Stanier R.Y. et al. Microbiología. 4° ed. Barcelona, Reverté. 1984. Pág 81

La biodegradación de hidrocarburos en diferentes ecosistemas (suelo y agua) requiere de la presencia de microorganismos (bacterias, hongos, algas) que, a través de la actividad bioquímica, oxiden los hidrocarburos. Algunas especies de microorganismos pueden metabolizar un número limitado de hidrocarburos, de manera que la presencia de poblaciones mixtas con diferentes capacidades metabólicas, es necesaria para degradar mezclas complejas de hidrocarburos como el crudo. La degradación de hidrocarburos se lleva a cabo principalmente por bacterias, seguidas por los hongos, levaduras y algas, entre otros.

Los reportes del porcentaje de bacterias y hongos presentes en suelos, varían de forma importante de entre 0.13% y 50% para bacterias, y de 6% a 82% para hongos, con respecto a la comunidad heterótrofa total del suelo. La proporción de hongos y bacterias dependerá de las condiciones del sitio. El número de microorganismos heterótrofos totales en suelo, considerado como típica se encuentra en una cuenta total de 10⁷ a 10⁹ UFC/g de suelo; para degradadoras potenciales en suelos no contaminados entre 10⁵ y 10⁶ UFC/g; y entre 10⁶ y 10⁸ UFC/g en suelos contaminados.

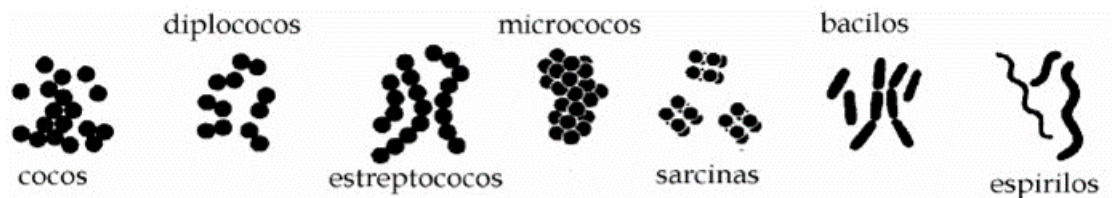
Bacterias: Las bacterias son el grupo de organismos más abundante en los suelos dichos organismos son un grupo diverso con variaciones extensivas en las

propiedades morfológicas, ecológicas y fisiológicas y son los principales degradadores de compuestos orgánicos naturales y geobióticos encontrados en el suelo. Las más comunes son *Pseudomonasaureginosas*, *Arthrobacter*, *Achromobacter*, *Micrococcus*, *Vibrio*, *Acinetobacter*, *Brevibacterium*, *Corynebacterium* y *Flavabacterium*²². Por su diversidad, las bacterias se encuentran regularmente en comunidades heterogéneas; algunas especies son degradadores primarios, es decir, ellas inician la degradación de la materia orgánica en el suelo; otras crecen en compuestos resultantes de la degradación parcial de complejos orgánicos o productos residuales de degradadores primarios. Las bacterias tienen tres apariencias físicas generales (figura 3)

- Esféricas (cocos)
- Forma de bastones (bacilos)
- Forma de espiras (espirilos)

Se clasifican usando sus características físicas, químicas, genéticas y metabólicas.

Figura 3. Apariencias físicas generales de las bacterias

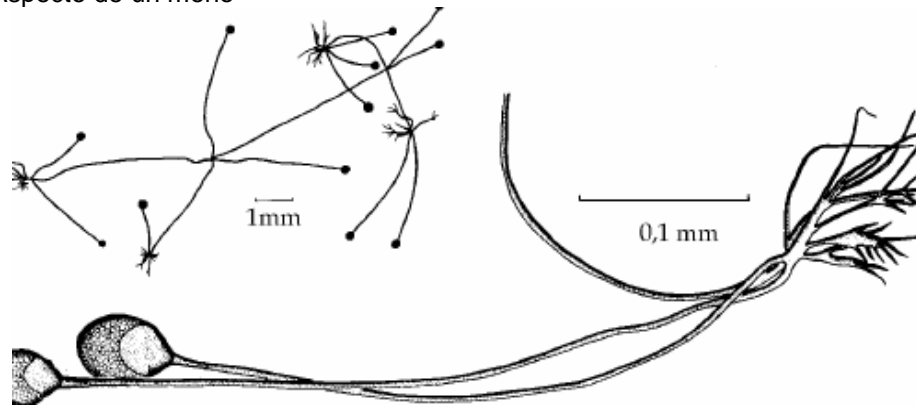


Fuente: SCHLEGEL, H., KOGUT, M. y SCHLEGEL, H.G. 1993. General Microbiology, 7ª edición. Cambridge University Press. Cambridge, MA. Pág 88

Hongos: Los hongos son altamente protistas, no tienen movimiento y emplean materia orgánica como fuente de carbono y energía. Algunos de los hongos mejor conocidos son mohos, levaduras y setas (ver Figura 4 y Figura 5).

²²Antonio López Lafuente:(2009) Biorremediación y fitorremediación en suelos contaminados.[Online]<https://www.analesranf.com/index.php/mono/article/viewFile/598/65>

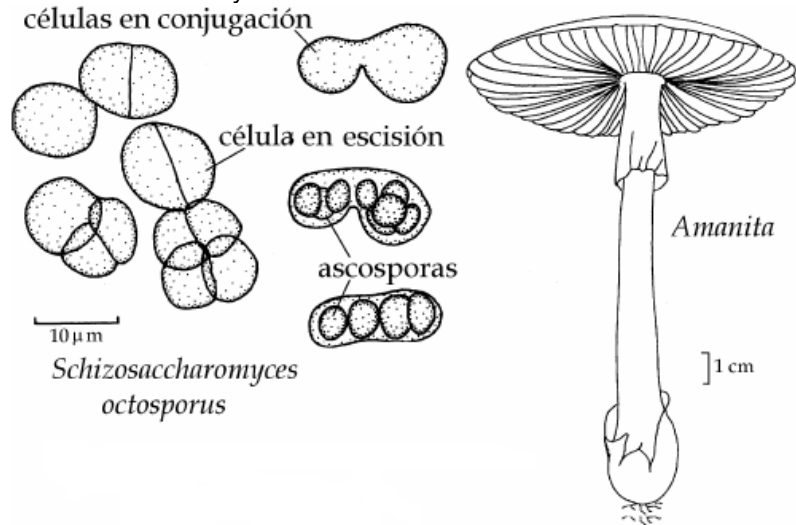
Figura 4. Aspecto de un moho



Fuente: Webster J. 1986. Introduction to Fungi. 2o ed. Cambridge University Press. Pág 71

En comparación con las bacterias, los hongos son menos numerosos y crecen a velocidades considerablemente bajas; además, los procesos metabólicos de éstos son menos diversos. Como grupo, los hongos tienden a ser más tolerantes a los ácidos que las bacterias (muchas especies crecen a un pH óptimo de 5 o menos) y son más sensibles a la variación en la humedad. La variedad de hongos encontrados en los suelos es muy grande, sin embargo, existe un hongo que tiene un considerable potencial en el tratamiento de compuestos orgánicos peligrosos, denominado *Phanerochaete chrysosporium*. Se ha encontrado que este organismo degrada una gran variedad de compuestos altamente clorados y recalcitrantes, incluyendo dioxinas. El uso de este hongo está limitado a suelos con carencia de nitrógeno, ya que este elemento en exceso impide la formación de peroxidasa.

Figura 5. Aspecto de una levadura y una seta



Fuente: Hawksworth et al., 1995; Webster, 1986. Fungal Biodiversity. Volumen I.

Microorganismos Concretos: Los microorganismos aislados en suelos poseen actividades de peroxidasas y oxigenasas, que permiten la oxidación de algunas fracciones del petróleo. Esta oxidación cambia las propiedades de los compuestos haciéndolos susceptibles a ataques secundarios y facilitando su conversión a bióxido de carbono y agua.

Tabla 7. Bacterias y hongos más usados en biorremediación.

Bacterias	Hongos
Achromobacter	Aspergillus
Actinomyces	Bitrytis
Alcaligenes	Candida
Bacillus	Cladosporium
Coryneforms	Fusarium
Erwinia	Hansenula
Flavobacterium	Oidiodendrum
Lactobacillus	Penicilium
Nocardia	Paecylomyces
Pectococcus	Saccharomyces
Pseudomonas	Rhodotorula
Sarcina	Torulopsis
Spirillum	Trichoderma
Streptomyces	Saccharomycopsis
Vibrio	Rhodosporidium
Xanthomyces	

Fuente: Ponce Contreras, Daniela. Biorremediación de suelos contaminados con Hidrocarburos. Facultad de Ingeniería .Concepción, Enero 2014.

Tabla 8. Ventajas y desventajas de la Biorremediación.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA BIORREMEDIACIÓN	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Mientras que los tratamientos físicos y buena parte de los químicos están basados en transferir la contaminación entre medios gaseoso, líquido y sólido, en la biorremediación se transfiere poca contaminación de un medio a otro.	La biodegradación incompleta puede generar intermediarios metabólicos inaceptables, con un poder contaminante similar o incluso superior al producto de partida y algunos compuestos contaminantes son tan resistentes que pueden incluso inhibir a biorremediación.
Es una tecnología poco invasiva y generalmente no requiere componentes estructurales o mecánicos que signifiquen una amenaza para el medio.	Es difícil predecir el tiempo de requerido para un proceso adecuado y el seguimiento y control de la velocidad y/o extensión del proceso es dispendioso.
Comparativamente, es económica viable y al tratarse de un proceso natural, suele tener aceptación por parte de la opinión pública.	

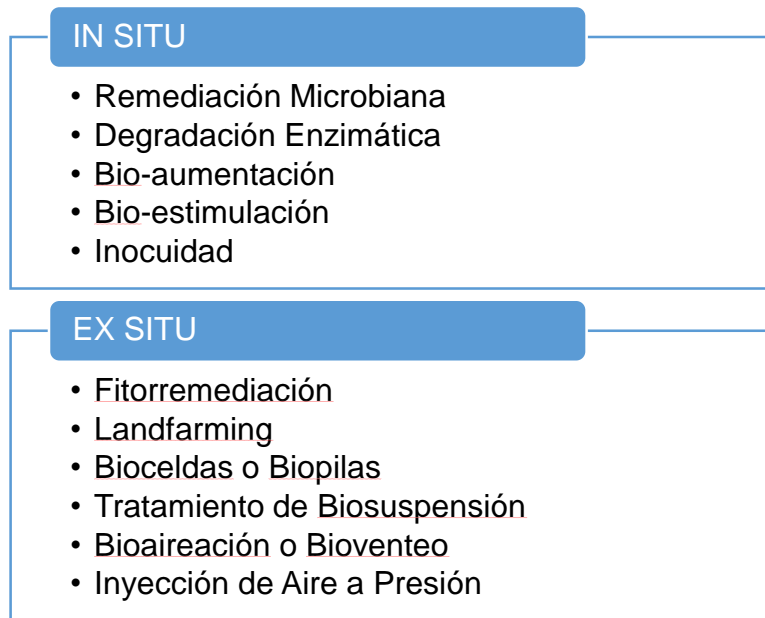
La biorremediación se aplica a cualquier sistema o proceso en el que se empleen métodos biológicos para transformar contaminantes riesgosos para el medio ambiente.

Existen parámetros que aumentan o disminuyen la probabilidad de obtener buenos resultados en el proceso de biorremediación en un medio contaminado por hidrocarburos. La técnica apropiada para llevar a cabo este proceso, debe ser el resultado de la valoración de una serie de variables y de características del sitio o del contaminante a tratar que se debe evaluar en una etapa previa de planificación.

La biorremediación se puede clasificar: según el lugar de realización, según el microorganismo empleado y según la técnica utilizada.

4.3.2 Según el lugar de realización. La biorrecuperación de estos suelos contaminados puede variar dependiendo la intervención que se haga en los mismos, las cuales pueden ser “in situ, en el lugar”, cuando el tratamiento del suelo se realiza sin excavar, y “ex situ, fuera del lugar” cuando se lleva a cabo la excavación del suelo. En la figura 6 se muestra la clasificación más importante de la biorremediación, mostrando las técnicas que pueden aplicarse a la misma.

Figura 6. Clasificación “In situ” y “ex situ”.



Biorremediación “in situ”: Esta técnica normalmente es la opción más adecuada para el tratamiento de desechos de lodos en base aceite, ya que no es necesaria la preparación y excavación del material contaminado. No obstante, antes de decidir el tipo de tratamiento debe tenerse en cuenta varios factores entre los que se destacan:

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

Biorremediación “ex situ”. Son los tratamientos que se distinguen cuando el procedimiento se realiza fuera del lugar donde está la contaminación: tratamiento por vía sólida y tratamiento por vía suspensión. La biorrecuperación vía sólida se puede realizar por dos métodos: tratamiento en lechos y tratamiento por compostaje. La diferencia fundamental entre ambos es el sistema de aireación,

mientras que en el primero sólo se pueden tratar las capas de suelo menos profundas, en el compostaje se requiere la formación de grandes apilamientos de material degradable. En el tratamiento vía suspensión se excava el material contaminado y se traslada a un reactor. La característica de este método es la suspensión en un medio acuoso del área a tratar, es decir, el tratamiento se lleva a cabo bajo condiciones de saturación de agua. La ventaja de estos procedimientos frente a los primeros radica en la posibilidad de optimizar mejor los parámetros microbiológicos, así como el control del proceso; a cambio, lógicamente, de un mayor costo.

4.3.3 Según el organismo utilizado.

4.3.3.1 Remedación microbiana. Es el uso de microorganismos diferentes en un área contaminada por hidrocarburos. Estos pueden existir en un sitio o provenir de otros ecosistemas, en cuyo caso deben ser inoculados en el sitio contaminado. Cuando no es necesario la inoculación de los mismos, suelen adicionárseles nutrientes como lo es el nitrógeno, con el fin de acelerar el proceso de degradación. Hay bacterias y hongos ya antes mencionados que pueden degradar con relativa facilidad el petróleo y sus derivados.

4.3.3.2 Degradación enzimática. Consiste en el empleo de enzimas en el área a tratar con el fin de degradar las sustancias nocivas. Estas se obtienen a partir de bacterias que las producen naturalmente, o por bacterias modificadas genéticamente que son comercializadas por las empresas biotecnológicas. La descontaminación se logra debido a la capacidad natural de estas enzimas para transformar moléculas orgánicas en sustancias más pequeñas, que resultan menos tóxicas.

4.3.3.3 Fitorremediación. Es el uso de plantas para limpiar ambientes contaminados y constituye una estrategia muy interesante debido a la capacidad que tienen algunas especies vegetales de absorber, acumular y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radiactivos.

Hoy en día, las investigaciones en fitorremediación se encaminan no sólo al tratamiento de contaminantes inorgánicos (metales, metaloides, haluros y radionucleidos), sino también al tratamiento de contaminantes orgánicos; algunas especies de plantas probadas con éxito en la fitorremediación de suelos

contaminados con hidrocarburos del petróleo son: *Zea mays* L., *Panicum maximum* Jacq., *Paspalum virgatum* L., *Echinochloa polystachya* H.B.K., *Sorghum vulgare* L., *Phaseolus vulgaris* L., *Phaseolus coccineus* L., *Chamaecrista nictitans* (L.) Moench., *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich) Stapf., *Triticum aestivum* L., *Hordeum vulgare* L., entre otras. (Revista Latinoamericana de Microbiología vol 48. Abril - Junio de 2006).

Tabla 9. Procesos de fitodescontaminación y fitoestabilización.

Fitoextracción	Es el proceso por el medio del cual las plantas absorben los contaminantes metálicos y orgánicos del suelo, que posteriormente son incorporados a su biomasa
Rizofiltración	Es el proceso por medio del cual las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos
Fitoestabilización	Es el proceso por medio de la cual las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje de napas subterráneas o al aire
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos que degradan (bacterias y hongos)
Fitovolatilización	Proceso por el cual las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración
Fitodegradación	Es el proceso por el medio del cual las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos

Fuente: Liliam Alexandra Camargo Baracada, Análisis para la reducción del impacto ambiental de los lodos generados en la perforación de pozos mediante la recuperación de lodos en base aceite y el proceso de biorremediación en Colombia. Ingenierías Físicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. 2013.

4.3.4 Según la técnica utilizada

4.3.4.1 Bioaumentación. Es el proceso en el cual se incrementa la población de bacterias nativas de un ecosistema con la adición de bacterias adaptadas selectivamente, las cuales han sido desarrolladas para aumentar los rangos de reducción orgánica o proporcionar la habilidad de degradar compuestos previamente considerados como difíciles o no biodegradables.

Dicha técnica no sustituye la población de bacterias existentes, pero aumenta su habilidad de responder a ciertas situaciones o degradar compuestos de la corriente de desechos, dando como resultados una mejora al tratamiento.

Esta técnica funciona en condiciones de laboratorio o birreactor, pero en ambientes externos (suelo o agua) su implantación depende de una serie de factores

(Alexander, 1999).

- Presencia de toxinas, nutrientes y condiciones ambientales, movilidad y/o distribución de los microorganismos y la presencia de abundante materia orgánica.
- Los microorganismos añadidos deben sobrevivir a los depredadores y competir con éxito con la población autóctona antes de ocupar los nichos potenciales.

4.3.4.2 Bioestipulación. En este sistema, el agua subterránea es conducida a la superficie por medio de un sistema de pozos de extracción, se acondiciona en un reactor para volverla a inyectar y estimular la degradación bacteriana de los contaminantes del subsuelo y del acuífero. En el reactor en superficie se agregan al agua: nutrientes, oxígeno, microorganismos previamente seleccionados y adaptados, y el efluente se retorna al subsuelo por medio de pozos de inyección, aspersores superficiales o galerías de infiltración distribuidas a lo largo y ancho del sitio que se requiere remediar. Algunas veces esta técnica utiliza biosurfactantes para ayudar al lavado de contaminantes del suelo (Zitrides, 1990); (Cole, 1994).

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

- Tipo de suelo. Los suelos deben ser lo más homogéneos posible, con un valor de porosidad y permeabilidad al aire adecuado ($> 10^{-10} \text{ cm}^2$).
- Deben existir unas condiciones óptimas de pH (6 y 8), de humedad (12-30% en peso), temperatura entre 0 y 40 °C y los nutrientes del suelo en relación N: P de 10:1.

Ventajas

Esta técnica es muy útil en el tratamiento de extensas zonas contaminadas de centros industriales donde no es posible o conveniente parar el proceso operativo para realizar el tratamiento requerido.

Desventajas

Esta tecnología no es recomendable para suelos arcillosos, altamente estratificados o demasiado heterogéneos, ya que pueden provocar limitaciones en la transferencia de O_2 .

4.3.4.3 Inoculación. Este método es una forma de tratamiento in situ. En este caso los minerales, nutrientes y a menudo los organismos son agregados dentro del suelo a través de los pozos, galerías de infiltración u otras formas, que facilitan que el proceso de degradación se realice en el sitio donde está la contaminación.

4.3.4.4 Tratamiento de biosuspensión. También conocido como sistema biorreactor o contacto líquido-sólido. El procedimiento consiste en excavar el suelo contaminado y luego introducirlo en un reactor añadiendo nutrientes, agua, y los cultivos microbianos adecuados para que se lleve a cabo la degradación. Se mezcla bien y se airea la suspensión hasta que las transformaciones de los compuestos seleccionados para su eliminación alcanzan el nivel deseado.

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

- El aire inyectado absorbe gran cantidad de los hidrocarburos volátiles presentes en el agua y el suelo.
- El aire eleva los niveles de oxígeno del agua mejorando la biodegradación de los contaminantes (Matthews, 1993).

4.4 TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

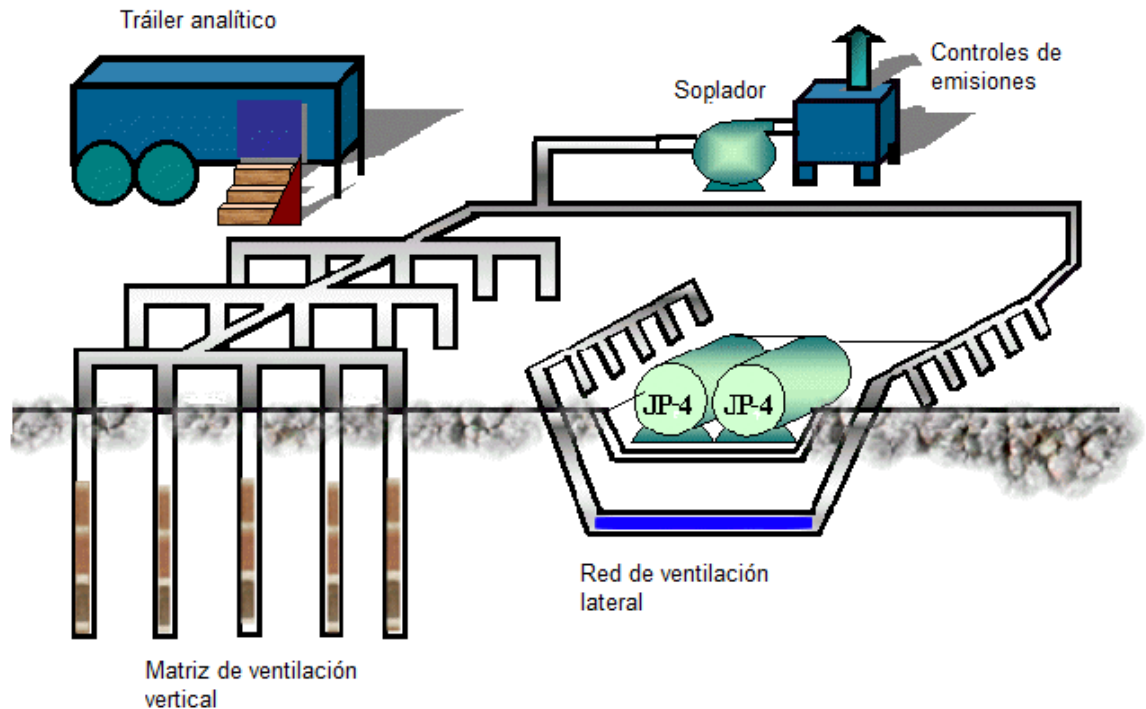
En esta sección se mencionarán algunas tecnologías para la remediación de los suelos contaminados con hidrocarburos.

4.4.1 TRATAMIENTO BIOLÓGICO IN SITU²³

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

²³ FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE. Technologic screening Matrix and reference guide, version 4.0. 3.1 In Situ Biological Treatment.

Figura 7. Esquema de un sistema típico de bioventeo.



Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-1.html>

En este proceso el oxígeno es llevado al suelo contaminado no saturado por el movimiento de aire forzado (ya sea extracción o inyección de aire) para aumentar las concentraciones de oxígeno y estimular la biodegradación.

El bioventeo es una tecnología nueva y prometedora que estimula la biodegradación natural in situ de compuestos degradables aeróbicamente en el suelo, proporcionando oxígeno a los microorganismos del suelo existentes. En contraste con la extracción al vacío de vapores del suelo, bioventeo utiliza las bajas tasas de flujo de aire para proporcionar sólo el oxígeno suficiente para mantener la actividad microbiana. El oxígeno es el elemento químico más comúnmente suministrado a través de inyección de aire para tratamiento de residuos en el suelo. Además de la degradación de los residuos de combustible, los compuestos volátiles se biodegradan en forma de vapores, que se mueven lentamente a través del suelo biológicamente activo. Bioventeo es una tecnología a largo plazo que varía desde algunos meses hasta varios años.

Aplicabilidad: Técnicas de bioventeo se han utilizado con éxito para remediar suelos contaminados por petróleo, solventes no clorados, algunos pesticidas, conservantes de la madera y otros productos químicos orgánicos. Mientras la

biorremediación no puede degradar los contaminantes inorgánicos, la biorremediación se puede utilizar para cambiar el estado de valencia de sustancias inorgánicas y causar la adsorción, captación, acumulación y la concentración de sustancias inorgánicas en micro o macro-organismos.

Estas técnicas, en gran parte experimentales, muestran una considerable promesa para estabilizar o retirar productos inorgánicos del suelo.

Limitaciones: Algunos factores que pueden limitar la aplicabilidad y efectividad del proceso son:

- Los vapores pueden acumularse en el basamento dentro del radio de influencia de los pozos de inyección de aire. Este problema puede aliviarse mediante la extracción de aire cerca de la estructura de interés.
- Muy bajo contenido de humedad del suelo puede limitar la biodegradación y la eficacia del bioventeo.
- Monitoreo de gases en superficie puede ser requerido.
- Las bajas temperaturas pueden retardar la remediación, a pesar de que se ha demostrado la remediación tiene éxito en climas extremadamente fríos.

Datos requeridos: Dos criterios básicos se deben cumplir para garantizar el éxito del bioventeo. Primero, el aire debe ser capaz de pasar a través del suelo en cantidades suficientes para mantener las condiciones aeróbicas. Segundo, los microorganismos naturales degradadores de hidrocarburos deben estar presentes en concentraciones lo suficientemente grandes para obtener tasas razonables de biodegradación. Las pruebas iniciales se han diseñado para determinar tanto la permeabilidad del suelo al aire y las tasas de respiración in situ.

Las tasas de degradación de hidrocarburos casi siempre son estimadas a partir de las tasas de utilización de oxígeno mediante una simple relación estequiométrica con el supuesto de que toda pérdida de oxígeno se debe a la mineralización de los hidrocarburos por los microbios. Sin embargo, simples relaciones estequiométricas no se tienen en cuenta para la producción de biomasa y las reacciones de oxidación de inorgánicos. El oxígeno sirve como terminal receptora de electrones no sólo en la degradación de materia orgánica, sino también en la oxidación y la reducción de

compuestos inorgánicos por microorganismos que obtienen energía mediante la oxidación química.

Comportamiento de los datos: El bioventeo es cada vez más común, y la mayoría de los componentes están disponibles. El bioventeo se muestra cada vez más y recibe una mayor aceptación por los consultores en el área de biorremediación. Como con todas las tecnologías biológicas, el tiempo para remediar un lugar utilizando bioventeo es altamente dependiente de especificaciones del suelo y propiedades químicas del medio contaminado.

Costos

Manejo de costos

- El área de superficie es el costo primario.
- El impacto del número de pozos inyección/extracción que son instalados.
- El número de pozos instalados incrementa con el área de superficie.
- Tipos de suelo que contienen arena y grava producen significativamente bajos costos por la reducción en el número de pozos inyección/extracción a ser instalados.

Análisis de costos: La tabla 9 representa los costos estimados para aplicar bioventeo en sitios que varían en tamaño y complejidad. Otros factores que afectan el costo de bioventeo incluyen el tipo de contaminante y su concentración, permeabilidad del suelo, número y espaciamiento de pozos. Tasa de bombeo, y tratamiento del gas de salida. No requiere equipos costosos y solo algunas personas están involucradas en la operación y mantenimiento del sistema de bioventeo.

Tabla 10. Costos estimados por el tratamiento de residuos por Bioventeo. (Costo en dólares)

Tecnología de Tratamiento		Bioventeo			
PARÁMETROS	escenario A	escenario B	escenario C	escenario D	
	Pequeño		Grande		
	Fácil	Difícil	Fácil	Difícil	
Costo por pie cúbico	\$26	\$27	\$2	\$3	
Costo por metro cúbico	\$928	\$970	\$79	\$109	

Fuente: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_1.html

4.4.1.2 Biorremediación. Las operaciones llevadas a cabo en la industria petrolera generan materiales tóxicos y lesivos al medio ambiente, debido a esto el hombre en su sabiduría ha llevado a cabo procesos para mitigar, controlar y arreglar los medios contaminados, estos procesos tienen como fin la biorremediación, la cual hace referencia al uso de sistemas biológicos para acelerar el proceso natural de biodegradación. Los sistemas más utilizados son microorganismos y plantas.

Estas degradaciones ocurren en la naturaleza; sin embargo, la velocidad de estas es muy baja. Mediante una adecuada manipulación, sistemas biológicos pueden ser optimizados para aumentar la velocidad de cambio o degradación y así emplearlos en sitios altamente contaminados. En general las manipulaciones involucran producción e inmovilización de enzimas en determinados soportes y cambios genéticos a algunas cepas bacterianas.

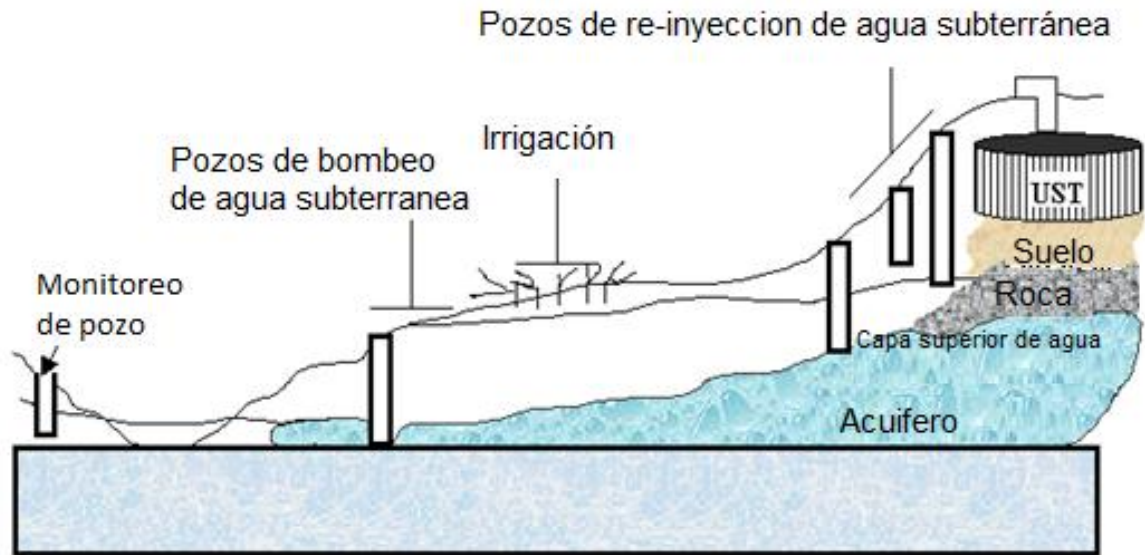
La biorremediación puede ser aplicada en dos técnicas:

- **Biorremediación in-situ:** acelerar el proceso en el mismo ambiente modificando las condiciones ambientales o por inoculación microbiana, esta última se está convirtiendo en un método de aplicación masivo por su menor costo referente a otros métodos de limpieza. Se trata de acelerar los procesos naturales de degradación mediante el suministro de oxígeno y nutrientes durante cierto periodo.
- **Biorremediación ex situ:** esta técnica consiste en extraer el contaminante y degradarlo en otro sitio en condiciones controladas de laboratorio.

Evidentemente este tipo de técnica genera un costo económico mayor, por lo cual muchas veces es sometida a evaluación para determinar su aplicación.

4.4.1.3 Biorremediación mejorada. La actividad de los microorganismos de origen natural se estimula mediante la circulación de soluciones a base de agua a través de los suelos contaminados para mejorar la degradación biológica in situ de los contaminantes orgánicos o inmovilización de los contaminantes inorgánicos. Nutrientes, oxígeno, u otras modificaciones se pueden utilizar para mejorar la biorremediación y desorción de contaminantes a partir de materiales del subsuelo.

Figura 8. Esquema general del proceso de biorremediación mejorada.



Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-2.html>

La biorremediación mejorada es un proceso en el cual micro-organismos nativos o inoculados (ejemplo, hongos, bacterias, y otros microbios) degradan contaminantes orgánicos que se encuentran en el suelo y / o aguas subterráneas, a productos finales inocuos. Nutrientes, oxígeno, u otras modificaciones se pueden utilizar para mejorar la biorremediación y desorción de contaminantes a partir de materiales del subsuelo.

Ambiente aerobio. En la presencia de suficiente oxígeno, y otros nutrientes, los microorganismos en última instancia, convierten a muchos contaminantes orgánicos a dióxido de carbono, agua y masa celular microbiana.

La biorremediación Mejorada del suelo normalmente implica la filtración o la inyección de agua subterránea. El agua no contaminada se mezcla y satura con nutrientes y oxígeno disuelto. En ocasiones los microorganismos aclimatados (bioaumentación) y / u otra fuente de oxígeno como el peróxido de hidrógeno también se agregan. Una gama de infiltración o riego por aspersión se utiliza normalmente para suelos contaminados superficialmente y los pozos de inyección se utilizan para los suelos contaminados profundamente.

Aunque tuvo éxito en procesos de biorremediación in situ, se ha demostrado en el clima frío, que la baja temperatura retarda el proceso de remediación. Para sitios con bajas temperaturas del suelo, se utilizan mantas de calor para incrementar la temperatura del suelo e igualmente la rata de degradación. La biorremediación Mejorada puede ser una tecnología de largo plazo en la cual se pueden tardar varios

años para la limpieza de una región.

Ambiente Anaeróbico. En la ausencia de oxígeno, los contaminantes orgánicos se metabolizan en última instancia en metano, cantidades limitadas de dióxido de carbono y algunas trazas de gas de hidrógeno. Bajo condiciones sulfato- reductoras, el sulfato se convierte en sulfuro o azufre elemental, y bajo condiciones nitrato reductoras el gas nitrógeno es producido en últimas instancias. A veces, los contaminantes pueden ser degradados a los productos intermedios o finales que pueden ser menores a los iniciales, igualmente, más peligrosos que los originales.

Aplicabilidad: Las técnicas de biorremediación han sido utilizadas con éxito en la remediación de suelos, lodos, y aguas subterráneas contaminadas con petróleo, solventes, pesticidas y otros químicos orgánicos. Estudios a escala han demostrado la efectividad de la degradación microbiana anaeróbica de nitrotoluenos en suelos contaminados con diferentes residuos. La biorremediación es especialmente efectiva para la remediación de bajos niveles de residuos y conjuntamente con remoción en la Fuente.

Los contaminantes tratados más a menudo son PAHs (Hidrocarburos Poli aromáticos), SVOCs (Componentes Orgánicos Semi-Volátiles) y BTEX (Bencenos, Toluenos, Etilenos y Xilenos). Por qué los dos grupos de contaminantes comúnmente tratados son SVOCs y PAHs, esto puede ser por la dificultad de tratarlos utilizando tecnologías que dependen de la volatilidad, tales como SVE (Extracción De Vapores del Suelo) Además, los tratamientos de biorremediación a menudo no requieren calor, relativamente requieren ingresos no muy costosos, como nutrientes, y usualmente no generan residuos que requirieran tratamiento adicional para disposición. Además cuando se lleva a cabo tratamientos in-situ estos no requieren excavación de contaminantes, comparado con otras tecnologías, tales como desorción térmica e incineración. Mientras la biorremediación no puede degradar contaminantes inorgánicos, la biorremediación puede ser utilizada para cambiar el estado de valencia de los inorgánicos y causar adsorción, inmovilización sobre partículas del suelo, precipitación, acumulación, y concentración de inorgánicos en micro o macro-organismos. Estas técnicas, aun son experimentales, son prometedoras para estabilizar y remover compuestos inorgánicos del suelo.

Limitaciones: Factores que pueden limitar la aplicabilidad y efectividad de estos procesos incluye:

- Los objetivos de limpieza no pueden alcanzarse si la matriz del suelo impide

el contacto entre contaminante-micro-organismo.

- La circulación de agua a través del suelo puede incrementar la movilidad del contaminante y necesitar tratamiento para aguas subterráneas.
- Alta concentración de metales pesados, largas cadenas de hidrocarburos, o sales inorgánicas pueden ser microorganismos tóxicos.
- La biorremediación es lenta a bajas temperaturas
- Concentraciones de peróxido de hidrógeno mayores a 100 o 200 ppm en aguas subterráneas inhibe la actividad de microorganismos.
- Sistemas de tratamiento en superficie, tales como air stripping o adsorción de carbón, pueden requerirse para tratar el agua extraída antes de reinyección o disposición.

Muchos factores pueden ser controlados con buenas prácticas de ingeniería. El tiempo necesario para el tratamiento está entre 6 meses a 5 años y depende de muchos factores específicos del lugar a tratar.

Información Requerida: Las características importantes de los contaminantes deben ser identificadas para la factibilidad de utilizar biorremediación mejorada y observar el potencial de lixiviación, su reactividad química y lo más importante, su biodegradabilidad. Características que se deben determinar incluyen la profundidad y el área de extensión contaminada; la concentración de los contaminantes, tipo de suelo y propiedades (ejemplo; contenido orgánico, textura, pH, permeabilidad, capacidad de retención de agua, contenido de humedad y nivel de nutrientes); competencia por oxígeno (ejemplo; potencial de redox); la presencia o ausencia de sustancias que son tóxicas para los microorganismos, y habilidad de los microorganismos en el suelo para degradar contaminantes.

Datos de rendimiento: La principal ventaja del proceso in situ es que permite que el suelo tratado no se excave ni transporte, resultando en menor perturbación en medio a tratar. Si la biorremediación mejorada puede llegar a la meta de limpieza en un periodo de tiempo compatible, contribuye a ahorrar costos significativos en los métodos que implican la excavación y el transporte. También, tanto agua subterránea y suelos contaminados pueden ser tratados simultáneamente,

proporcionando ventajas adicionales en costos. Procesos in-situ generalmente requieren largos periodos de tiempo, sin embargo, hay menos certeza sobre la uniformidad del tratamiento debido a la variabilidad inherente a las características del suelo, del acuífero y la dificultad en el seguimiento de los progresos.

Los Tiempos de remediación tardan a menudo años, dependiendo principalmente de la rata de degradación específica de los contaminantes, características del sitio, clima. Menos de un año puede ser necesario para limpiar algunos contaminantes, pero componentes con alto peso molecular puede tomar mucho tiempo para degradar.

Existe el riesgo de aumentar la movilidad de los contaminantes y la lixiviación de estos en las aguas subterráneas. La biorremediación mejorada ha sido seleccionada para remediar y responder a acciones de emergencia en un número creciente de sitios contaminados. Generalmente los hidrocarburos de petróleo pueden ser fácilmente remediados, a un relativo bajo costo.

Costos: Los costos típicos para biorremediación mejorada están en el rango de US\$ 30 a US\$ 100 por metro cubico. Algunos de los Factores que afectan el costo pueden derivar de la química y el tipo de suelo, tipo y cantidad de aditamentos utilizados, y tipo y extensión de la contaminación.

4.4.1.4 Fitorremediación. Fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, y destruir contaminantes en el suelo. Los contaminantes pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos. Los mecanismos de fitorremediación incluye el mejoramiento de la biodegradación de la rizosfera, fito-extracción, fito-degradación y fitoestabilización. Los mecanismos de fitorremediación incluye el mejoramiento de la biodegradación de la rizosfera, fito-extracción, fito-degradación y fitoestabilización.

Mejoramiento en la Biodegradación de la Rizosfera: El mejoramiento en la biodegradación de la rizosfera toma lugar inmediatamente alrededor de las raíces de las plantas. Sustancias naturales son liberadas de las plantas por sus raíces y sirven de nutrientes para los microorganismos, lo cual mejora la actividad biológica. Las raíces de las plantas se suavizan y luego mueren, siendo rutas de salida para el transporte de agua y para la aireación. Este proceso tiende a llevar agua a la superficie y secar las zonas bajas saturadas.

La flora más común en proyectos de fitorremediación son los Álamos.

Principalmente porque estos árboles son de crecimiento rápido y puede sobrevivir en un amplia gama de climas. Además, los álamos pueden sacar grandes cantidades de agua (en relación con otras especies de plantas), ya que pasa a través del suelo o directamente de un acuífero. Esto puede sacar la mayor cantidad de contaminantes disueltos en medios contaminados y reducir la cantidad de agua que puede pasar a través del suelo o de un acuífero. Reduciendo así la cantidad de contaminantes eliminados a través del suelo.

- **Fitoacumulación:** Fito-acumulación es la absorción de contaminantes por las raíces de la planta y acumulación de contaminantes en brotes de las plantas y las hojas.
- **Fitodegradación:** Fito-degradación es el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos vegetales. Las plantas producen enzimas, tales como dehalogenasa y oxigenasa, que ayuda a catalizar la degradación. Las investigaciones que se están llevando a cabo para determinar si los compuestos aromáticos y clorados alifáticos son susceptibles a la fito-degradación.
- **Fitoestabilización:** La fitoestabilización es el fenómeno de la producción de compuestos químicos por parte de la planta para inmovilizar los contaminantes de la interface de las raíces y el suelo.

Aplicabilidad de la fitorremediación: La fitorremediación puede ser aplicada para la remediación de metales, pesticidas, solventes, explosivos, petróleo, PAHs (Hidrocarburos Poli aromáticos), y lixiviados de rellenos sanitarios.

Algunas especies de plantas tienen la habilidad de almacenar metales en sus raíces. Estas pueden ser trasplantadas a sitios para filtrar los metales de las aguas residuales. Como las raíces llegan a saturarse con los contaminantes metálicos, ellas pueden ser cosechadas.

La hiper-acumulación de plantas puede ser viable para remover y almacenar cantidades significantes de contaminantes metálicos.

Limitaciones: Las limitaciones de la fitorremediación incluyen:

- La profundidad de la zona de tratamiento es determinada por las plantas utilizadas para la fitorremediación. En la mayoría de los casos, esto se limita a suelos poco profundos.
- Altas concentraciones de materiales peligrosos pueden ser tóxicos para las

- plantas.
- La toxicidad y biodisponibilidad de los productos de biodegradación no siempre se sabe.
 - Los productos pueden movilizarse a aguas subterráneas o bioacumularse en animales.
 - Aún está en fase de demostración.

Datos requeridos: Además, información detallada es requerida para determinar la clase de suelos para utilizar proyectos de fitorremediación. Movimiento del agua, concentración de oxígeno reducido, crecimiento de las raíces, y la estructura de la raíz, influyen en el crecimiento de las plantas y se debe considerar en la aplicación de la fitorremediación.

Costos: Factores clave de los costos.

- Escala de esfuerzo
- El área de contaminación es el factor primario
- Densidad de muestreo

Análisis de costos: La siguiente tabla muestra los costos estimados (como una unidad de medida común), para aplicar fitorremediación en lugares que varían en tamaño y complejidad.

Tabla 11. Costos de remediación aplicando la Fitorremediación.

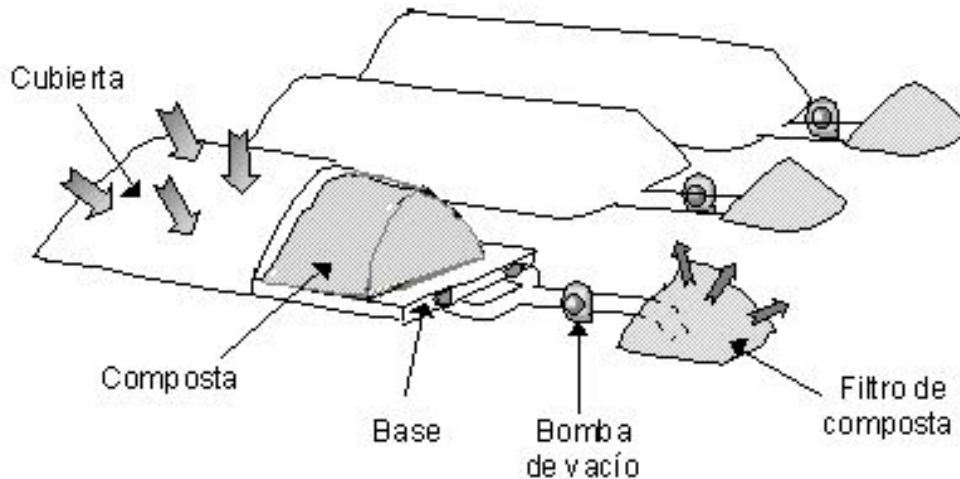
Tecnología de Tratamiento	Fitorremediación			
	escenario A	escenario B	escenario C	escenario D
	Pequeño		Grande	
	Fácil	Difícil	Fácil	Difícil
Costo por pie cuadrado	\$2	\$7	\$ 0.42	\$1
Costo por pie cúbico	\$18	\$66	\$4	\$14
Costo por metro cúbico	\$626	\$2.322	\$147	\$483

Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-3.html>

4.4.2 TRATAMIENTO BIOLÓGICO EX – SITU²⁴

4.4.2.1 Biopilas. Las biopilas constituyen una tecnología de biorremediación ex situ en la cual el suelo contaminado con hidrocarburos es extraído y dispuesto en un área de tratamiento o piscina previamente excavada para su descontaminación con microorganismos.

Figura 9. Esquema típico del sistema de biopilas.



Fuente: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/gacetitas/381/images/volke3.jpg>

Esta tecnología es empleada cuando la sustancia contaminante (residuos aceitosos líquidos) es demasiado volátil para ser tratado por la técnica de landfarming, ya que las emisiones gaseosas serían demasiado altas, y también es empleada cuando se desea acelerar el proceso de biorremediación, por medio del monitoreo y control de factores influyentes tales como el oxígeno y el pH.

La zona de tratamiento incluye sistemas de recolección de lixiviados y un sistema de aireación que cuenta con una serie de tuberías que son colocadas durante la construcción. Este sistema de tuberías está conectado a un soplador de presión negativa o de vacío, que fuerza al oxígeno presente en la atmósfera a pasar a través de la pila de suelo. También son controlables otros parámetros como la temperatura, el pH, los nutrientes y por su puesto la humedad. Existen en el mercado aditivos químicos específicos cuyas propiedades nutritivas pueden estimular el proceso de biorremediación. De esta manera se tiene un alto grado de control sobre el proceso y el medio.

²⁴ FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE. Technologic screening Matrix and reference guide, version 4.0. 3.4 Ex Situ Biological Treatment.

La implementación de las biopilas como mecanismo de tratamiento y disposición final de residuos aceitosos es una tecnología que se puede caracterizar como de corto plazo, la duración de las operaciones y el mantenimiento del proceso se pueden llevar a cabo en pocas semanas o pocos meses.

Las acumulaciones de material en el suelo no deben ser superiores a los 3 metros de altura, puesto que estas pilas deben ser cubiertas por impermeables para controlar la volatilización de los compuestos orgánicos más volátiles, que posteriormente deberán ser tratados antes de su emisión a la atmósfera.

El tratamiento de los residuos aceitosos y los suelos contaminados por hidrocarburos se aplica fundamentalmente para la eliminación de hidrocarburos que tiende a desprender sus componentes de mayor volatilidad.

Los primeros pasos en la preparación de un diseño para el tratamiento biológico de suelos contaminados por hidrocarburos son:

- Caracterización del sitio.
- Muestreo y caracterización del suelo.
- Caracterización de contaminantes.
- Estudios de tratabilidad de campo o laboratorio.
- Pruebas pilotos y demostraciones sobre el terreno.

La caracterización del sitio, del suelo y de los residuos aceitosos contaminantes será utilizado para:

- Identificar y cuantificar el contaminante
- Determinar los requerimientos para la excavación.
- Identificar los problemas de seguridad.
- Disposición de la maquinaria que realiza el tratamiento y manejo del residuo aceitoso.
- Los estudios de laboratorio y tratabilidad del residuo aceitoso en el campo son necesarios para identificar:
 - La proporción de nutrientes que promueven la actividad microbiana.
 - El potencial de los subproductos tóxicos de la degradación.
 - El porcentaje de reducción y el nivel más bajo de concentración de contaminantes posibles.

- La tasa de degradación.

Existen algunos factores que pueden limitar la aplicabilidad y efectividad en el proceso que pueden ser:

- Se requiere la excavación de los suelos contaminados por el residuo aceitoso (hidrocarburo).
- Los procesos de tratamiento estático pueden dar lugar a un trato menos uniforme que los procesos que involucran periodos de mezcla.
- Si no se realizan las pruebas de tratabilidad, no pueden determinarse las tasas adecuadas de biodegradabilidad del residuo aceitoso intervenido.

Los costos de empleo y desarrollo de este método de tratamiento dependen del volumen y tipo de contaminante, como principal ventaja es que no necesita de muchos operadores para su realización, el costo típico de este tratamiento esta por el orden de US\$130 a US\$ 260 por metro cúbico.

4.4.2.2 Compostaje. La biorremediación en filas de compostaje es una tecnología de remediación de suelos de superficie, que reduce concentraciones de los constituyentes de petróleo en suelo a través de la biorremediación. Esta tecnología usualmente involucra el esparcido en filas sobre la superficie, del suelo contaminado excavado y la estimulación de las actividades microbiana aeróbica presente en los suelos, a través de aireación y adición de minerales, nutrientes y humedad.

La mejora de la población microbiana resulta en la degradación del petróleo adsorbido a través del metabolismo de los microorganismos.

El suelo normalmente contiene un gran número de diversos microorganismos tales como, bacterias, algas, hongos, microorganismos unicelulares, y actinomicetes. En suelos con buen drenaje, los cuales son más apropiados para esta tecnología, estos organismos son generalmente aeróbicos. De éstos, las bacterias son las más numerosas y bioquímicamente más activas.

Durante el proceso es necesario mantener unas determinadas condiciones para obtener unos buenos resultados:

Aireación: Es un factor fundamental a controlar, ya que los microorganismos aerobios van a necesitar una tasa de oxígeno determinada para lograr la

biodegradación de los contaminantes. Se puede conseguir una buena aireación de diferentes formas en función del tipo de proceso de compostaje diseñado.

Temperatura: Se generaran condiciones termófilas debido al calor producido por los microorganismos en la degradación del material orgánico. El rango de temperatura óptimo de trabajo oscila entre 54°C y 65 °C.

Humedad: los microorganismos necesitan de una hidratación adecuada para su correcto desarrollo. Una excesiva hidratación del suelo restringe el movimiento el aire en el subsuelo y reduce la disponibilidad de oxígeno, el cual es sumamente necesario para los procesos metabólicos aeróbicos de las bacterias. El rango ideal de hidratación del suelo es de 20 a 30% en peso.

pH: las pilas de compostaje deben someterse en un rango de pH entre 6 y 8 para asegurar y mantener el crecimiento de la población bacteriana.

Nutrientes: los microorganismos requieren de una fuente de carbono para el crecimiento celular, lo pueden obtener del contaminante (hidrocarburo) o puede ser adicionado como aditivo.

Cantidad de microorganismos. Normalmente en la pila de suelo contaminado existen microorganismos suficientes para realizar el proceso, pero puede ser necesario inocularlos o añadir estiércol, esta adición garantiza el aumento de la población microbiana y la adición de nutrientes.

Existen tres diseños posibles del proceso de compostaje:

- **Pilas estáticas aireadas.** El suelo se apila en montones que se airean mediante soplantes o bombas de vacío que están distribuidas en el interior de las pilas.
- **Pilas mecánicamente agitadas.** El suelo se coloca en reactores donde se mezcla mecánicamente para conseguir la aireación.
- **Ventana de compostaje.** Es la alternativa más rentable y la más utilizada. El suelo se coloca en montones alargados que se mezclan periódicamente con equipos móviles.

Los siguientes factores pueden limitar la efectividad del proceso:

- La disponibilidad espacial es necesaria para el método de tratamiento.
- La excavación del suelo contaminado es necesaria y puede causar la liberación incontrolada de compuestos orgánicos volátiles.
- Aumento del volumen de material a tratar por la adición de nuevas capas, para acelerar y ratificar el proceso de degradación.

Aplicabilidad

Composting es aplicable a suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables. Proyectos piloto y en escala full han demostrado que el composting es capaz de reducir la concentración de explosivos como TNT a niveles aceptables. El composting termofílico aeróbico es aplicable a suelos contaminados con HAPs. Los costos de la implementación de este tratamiento de suelos que a su vez es un método para el tratamiento, descomposición y disposición final de material aceitoso dependen de la cantidad de material contaminante y principalmente del diseño empleado en el proceso.

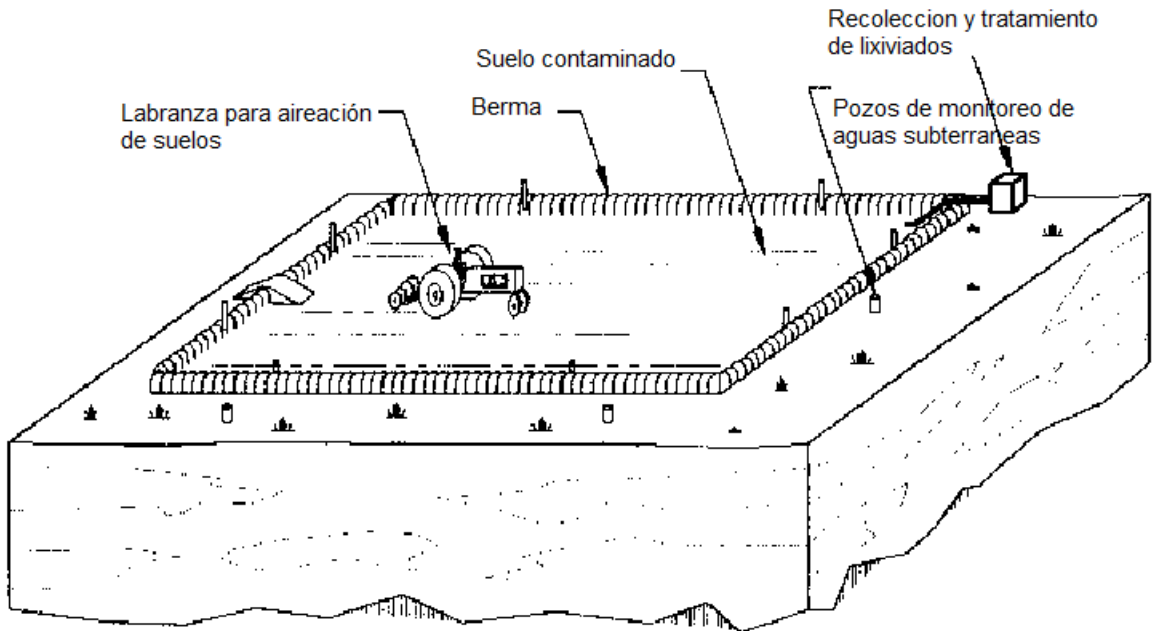
Tabla 12. Costo derivado por el tratamiento de suelos por compostaje (costo en dólares)

Tecnología de Tratamiento	Compostaje			
	escenario A	escenario B	escenario C	escenario D
	Pequeño		Grande	
	Fácil	Difícil	Fácil	Difícil
Cada 3 ft ³ procesados	13.000	13.000	24.000	24.000
Costo de compostaje por m ³	\$259	\$345	\$249	\$321
Costo total por cada m ³	\$489	\$578	\$481	\$555
Costo por 1000 yardas cúbicas	\$488,99	\$577,59	\$480,68	\$554,98

Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-4.html>

4.4.2.3 Landfarming. Esta tecnología consiste en extender el suelo contaminado sobre una geomembrana para evitar el escape de lixiviados, airearlo mediante volteo o arado para proporcionarles mecanismos y nutrientes. Se emplea para reducir niveles tóxicos en suelos altamente contaminados, la efectividad de estas metodologías depende de innumerables factores, entre ellos están las condiciones climáticas, las características agronómicas, topográficas y microbianas del suelo receptor, entre otras. Esta geomembrana está dispuesta sobre la superficie del terreno adyacente a la zona contaminada o en una pequeña piscina excavada cerca de esta zona y sobre la que se vierte el suelo a tratar. Además, el proceso cuenta con un sistema de drenaje para la recolección de lixiviados, que deberán recibir algún tratamiento posterior.

Figura 10. Esquema de tratamiento de suelos por landfarming.



Fuente: <https://frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-12.html>

La descontaminación se basa en la acción de los microorganismos presentes en el suelo, por lo que la utilidad de tratarlos ex situ reside en poder controlar fácilmente las condiciones óptimas de biodegradación de los compuestos orgánicos.

Fundamentalmente se controlan las siguientes condiciones:

- **Contenido en humedad:** se añade agua mediante un sistema de riego.
- **Aireación:** el suelo es volteado por métodos mecánicos periódicamente.
- **pH:** debe permanecer cerca de la neutralidad, por lo que se añadirán aditamentos de cal en caso de aumentar la acidez.
- **Otras aditamentos:** nutrientes, inoculación de microorganismos.
- Por lo general, los contaminantes son tratados en levantamientos de medio metro de espesor. Cuando se consigue el grado de depuración deseada se retira este suelo y se añade una nueva capa, aunque puede ser útil retirar sólo la parte superficial del primer montón y verter sobre el mismo nuevo residuo a tratar para que se aproveche la actividad microbiana existente.

El landfarming se usa satisfactoriamente en el tratamiento de lodos de refinería que contienen hidrocarburos del petróleo. Si existen compuestos muy volátiles en la

mezcla, éstos pueden ser emitidos a la atmósfera antes de ser degradados por los microorganismos. La tasa de degradación se reduce si:

- Los hidrocarburos son muy pesados.
- Los compuestos presentan anillos en su estructura química, como es el caso de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).
- Presentan cloro o nitrógeno.

Existen algunos factores que pueden limitar la efectividad de este método de tratamiento de residuos aceitosos y tratamiento de suelos y pueden ser:

- Se necesita una vasta extensión territorial, para la maquinaria e infraestructura empleada.
- Las condiciones como la temperatura incontrolada tienen efectos sobre la rata de degradación biológica, por consiguiente, conlleva al aumento de la longitud del tiempo para una recuperación completa del terreno.
- Los componentes inorgánicos que posea el contaminante no podrían ser eliminados por la biodegradación.

El landfarming ha sido empleado en numerosas operaciones de gran escala, en particular en el tratamiento para los lodos empleados en las operaciones de perforación en la industria petrolera, logrando transformar el contaminante en sustancias sin ningún tipo de peligro.

Los costos para este tratamiento pueden estar antes del tratamiento (independiente del volumen a tratar) y para estudios de laboratorio comprendiendo un rango entre \$25000 a \$50000 dólares y alrededor de US\$ 100000 dólares para pruebas piloto y/o demostraciones en campo.

La técnica más usada para la biorremediación de los lodos contaminados con hidrocarburos y de otros desechos de la industria petrolera es la denominada landfarming. Se realiza trasladando los contaminantes a un suelo no contaminado, el cual ha sido preparado con anterioridad.

5 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA SELECCIÓN DE PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN PARA RESIDUOS ACEITOSOS

En el capítulo 2 se describieron los tipos de residuos aceitosos generados durante los procesos implementados en la industria de los hidrocarburos. La descripción de estos residuos se hizo a través de dos clasificaciones diferentes, la primera dependiendo del origen del residuo y la segunda dependiendo de la composición de éste. El objetivo de este trabajo es seleccionar una técnica de biorremediación de los residuos aceitosos provenientes de las labores de producción de hidrocarburos. Para analizar este objetivo es necesario definir el tipo de residuo aceitoso a ser estudiado y su tratamiento primario que se realiza. Ver tabla 12.

Tabla 13. Clasificación final de los residuos aceitosos

Grupo	Tipo de Residuo	Descripción del Residuo	Manejo y Tratamiento	Disposición Final
Grupo 1	Reacondicionamiento de pozos (workover)	Agua Min 80% Sólidos + Aceite Max 20%	Físico – Químico - Mecánico	Biorremediación
	Fluidos acuosos contaminados	Agua Min 70% Sólidos + Aceite Max 30%	Físico – Químico - Mecánico	Biorremediación
Grupo 2	Fluidos Aceitosos, Emulsiones, crudo sucio y Lodo	Aceite entre 30 -80 % Agua entre 0-50% Sólidos entre 0 – 30 %	Térmico – Químico	Biorremediación
Grupo 3	Sólidos Aceitosos y Borrás.	Sólidos entre 30 – 80 % Aceite entre 20 -60 % Agua entre 0-25%	Térmico	Biorremediación
Grupo 4	Residuos sólidos con menor contenido de hidrocarburo.	Sólidos entre 30 – 90 % Aceite entre 0 – 10 % Agua entre 0-30%	Biologico	Biorremediación

De la tabla 12 se puede decir que cada grupo después del tratamiento primario va a generar aceite, agua y sólidos, este último va para su respectiva disposición final.

Se debe seleccionar una técnica apropiada para llevar a cabo este proceso, además hay que tener en cuenta el tipo de residuo a tratar, tipo de contaminante (orgánico o inorgánico), concentración y características fisicoquímicas, costo de las posibles

tecnologías elegidas, dependiendo de la matriz de selección de biorremediación. En la tabla 13 se muestra la metodología a seguir de acuerdo a la clasificación del residuo. En esta tabla, la primera columna representa la clasificación de los residuos aceitosos de acuerdo a su generación.

Los pasos para la selección del tratamiento utilizando la Tabla 13 son:

1. Como primer paso debemos saber el método a emplear, este método se selecciona de acuerdo a los factores que ya fueron evaluados de acuerdo a la matriz de selección de biorremediación como es el estado de desarrollo, operación y mantenimiento, el costo, la fiabilidad, tiempo y disponibilidad.
2. Como segundo paso se debe definir por parte del operador, si el tratamiento de biorremediación se va hacer in Situ o Ex situ, también se genera con los factores antes mencionados. Estas características se toman de acuerdo al estudio que realizó el autor en la matriz de selección de biorremediación, dado estadísticamente si está por encima del promedio, en un valor promedio, por debajo del promedio u otras, se escoge el que aplique que está por encima del promedio para así poder seleccionar el método más apropiado.
3. Como tercer paso se revisa el tema de los costos y rendimiento de la tecnología escogida, para esto se revisa la O&M que nos dice el costo de mantenimiento y operación, además también está la siguiente casilla que es el capital, cual va hacer la inversión, si está por encima de la media representa un rango bajo de inversión ,si está en un valor promedio representa un grado medio de inversión y por ultimo por debajo del promedio representa un alto grado de inversión, en este caso se escoge la de bajo grado de inversión, luego aparece una nueva casilla que es el sistema de fiabilidad y mantenimiento, en esta casilla también se escoge la que esté por encima del promedio que es alta fiabilidad y bajo mantenimiento. En los costos relativos que son los costos del proceso básico que define cada pre y post tratamiento, se selecciona el valor que está por encima de la media que son bajos nivel de gastos.
4. Otra de las variables a revisar es el tiempo, también se da en función del tiempo requerido para limpiar un sitio estándar usando la tecnología seleccionada, por lo general si está por encima del promedio es menos de 0.5 años si es ex situ. La disponibilidad siempre debe estar por encima del

promedio, nos muestra la cantidad de proveedores que manejan la tecnología escogida, para el caso de esta metodología se presentaron cuatro proveedores.

De esta manera es como se utiliza la tabla 13 para la selección de la tecnología para cada tipo de residuo a tratar. Es importante mencionar que el tratamiento completo de un residuo aceitoso tipo borra, es decir incluida su disposición, implica más de una técnica de tratamiento específica, toda vez que por su composición natural los residuos aceitosos tienen tres fases como los son agua, sólidos y aceite, y como tal el tratamiento de cada uno de los mismos exige métodos diferentes.

Teniendo en cuenta lo anterior, no se puede decir que un método es más o menos efectivo para el tratamiento de los residuos aceitosos, sino más bien que los esfuerzos de su tratamiento terminan enfocándose en buscar la combinación de métodos o técnicas que a la final den la mejor disposición para dicho proceso. Como es el caso de este proyecto.

Tabla 14. Tecnología de biorremediación para los residuos aceitosos en Colombia.

TECNOLOGÍA DE BIORREMEDIACIÓN PARA RESIDUOS ACEITOSOS EN COLOMBIA																									
ITEM	Métodos					Tratamiento Biológico In Situ			Tratamiento Biológico Ex Situ			Otros	Estado de desarrollo	Tren de Tratamiento	En general relativa Costo y Rendimiento					Disponibilidad					
	Bioestimulación	Bioaumentación	Biolixiviación	Rizoestimulación	Bioinmovilización	Bioventilación.	Biorremediación mejorada	Fito remediación	Biopilas	Compostaje	Landfarming	Excavación, Recuperación, Eliminación fuera de sitio			O&M	Capital	Sistema Fiabilidad y mantenibilidad	Costos relativos	Tiempo						
Acuoso, aceitosos, emulsiones, lodos, borras y residuos sólidos																									
1. Reacondicionamiento de pozos (workover) y fluidos acuosos contaminados	▲	●	▲	▲	▲	■	■	▲	●	●	●	●	●	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2. Fluidos aceitosos, emulsiones , crudo sucio y lodo	▲	●	▲	▲	▲	■	■	▲	●	●	●	●	●	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3. Sólidos aceitosos y borras	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲	●	●	●	●	●	●	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4. Residuos sólidos con menor menor contenido de hidrocarburo	▲	●	▲	▲	▲	■	■	▲	●	●	●	●	●	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Continuación Tabla 13. Tecnología de biorremediación para los residuos aceitosos en Colombia

TECNOLOGÍA DE BIORREMEDIACIÓN PARA RESIDUOS ACEITOSOS EN COLOMBIA																				
ITEM	Métodos					Tratamiento Biológico In Situ			Tratamiento Biológico Ex Situ			Otros	Estado de desarrollo	Tren de Tratamiento	En general relativa de costos y mantenimiento					Disponibilidad
	Bioestimulación	Bioaumentación	Biolixiviación	Rizoestimulación	Bioinmovilización	Bioventilación.	Biorremediación mejorada	Fitorremediación	Biopilas	Compostaje	Landfarming	Excavación, Recuperación, Eliminación fuera del sitio			O&M	Capital	Sistema Fiabilidad y mantenibilidad	Costos relativos	Tiempo	
Acuoso, aceitosos, emulsiones, lodos, borras y residuo sólidos																				
1. Fluidos Residuales Aceitosos (Workover)	♦	♦	♦	♦	♦	▬	▬	▲	●	●	●	●	●	●	●	●	▬	●		
2. Geles, polímeros, espumas de limpieza.	♦	♦	♦	♦	♦	▲	▲	▲	▲	●	●	●	●	●	●	●	▬	▬		
3. Suelo contaminado con alto contenido de hidrocarburo.	♦	♦	♦	♦	♦	▲	▲	▲	●	●	●	●	▬	●	●	●	▬	●		
4. Fluidos aceitosos de producción contaminados con sólidos y emulsiones estables	♦	♦	♦	♦	♦	▬	▬	▲	●	●	●	●	●	●	●	●	▬	●		
5. Borras o fondos provenientes de la limpieza de vasijas en facilidades de producción.	♦	♦	♦	♦	♦	▲	▲	▲	●	●	●	●	●	●	●	●	▬	●		
6. Aguas aceitosas de lavado de vasijas.	♦	♦	♦	♦	♦	▲	▲	▲	▲	●	▲	▲	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		
7. Medios filtrantes provenientes de la limpieza de filtros.	♦	♦	♦	♦	♦	▲	▬	▲	▲	●	●	●	●	▬	●	●	▬	▬		
8. Emulsiones, crudo sucio y Lodo.	♦	♦	♦	♦	♦	▬	▬	▲	●	●	●	●	●	▬	●	●	▬	●		

Continuación Tabla 13. Tecnología de biorremediación para los residuos aceitosos en Colombia

TECNOLOGÍA DE BIORREMIEDIACIÓN PARA RESIDUOS ACEITOSOS EN COLOMBIA						
FACTORES		POR ENCIMA DEL PROMEDIO ●	PROMEDIO —	POR DEBAJO DEL PROMEDIO ▲	OTROS ◆	
Estado de desarrollo Estado de escala de una tecnología disponible		Implementado como parte del recurso final en múltiples Sitios, bien documentado, entendido, etc.	Se ha aplicado a escala completa, pero aún necesita Mejoras, pruebas, etc.	No se han aplicado plenamente, pero ha sido probado (piloto, banqueta, a escala de laboratorio) y es prometedor.		
Tren de tratamiento Es la tecnología efectiva solamente como parte del tren de tratamiento?		Tecnología independiente (no complejas en términos de Numerosos medios de comunicación y las tecnologías de tratamiento, quizás Una "rutina" la tecnología además).	Relativamente simple (tren de dos coches o algo así), y bien Entendido, ampliamente aplicado, etc.	COMPLEJO(más tecnologías, medios para ser Tratados, genera un exceso de residuos, etc.).		
Relacion en general costos y rendimiento	O&M(operacion y mantenimiento) Operacion y mantenimiento intensivo		Bajo grado de intensidad O&M	Alto grado de intensidad O&M	Nivel de Eficacia Altamente dependientes en determinadas Contaminantes y Su aplicación/Diseño N/A "No aplicable" I/D "Datos insuficientes"	
	Capital Capital intensivo		Bajo grado de inversión de capital	Alto grado de inversión de capital		
	La fiabilidad del sistema/mantenimiento El rango esperado de demostrada fiabilidad y mantenimiento en relacion a otras tecnologías eficaces		Alta fiabilidad y bajo mantenimiento	Promedio promedio de fiabilidad y mantenimiento		Baja fiabilidad y alto mantenimiento
	Costos relativos Diseno, construction, y opercion y mantenimiento (O&m) costos del proceso basico que define cada pre and post tratamiento.		Bajo nivel de gastos generales en relación a otras opciones	Grado medio de gastos generales relativas a Otras opciones		Alto grado de costos generales en relación a otros OPCIONES
	Time El tiempo requerido para limpiar un sitio estandar usando la tecnología	Suelo in situ	Menos de 1 año	1-3 años		Más de 3 años in situ para suelo
		Suelo ex situ	Menos de 0.5 años	0.5 - 1 año		Más de 1 año para el ex-situ de suelos
Aguas subterranas		Menos de 3 años	3-10 años	Más de 10 años por agua		
Disponibilidad El número de proveedores que pueden diseñar, construir y mantener la tecnología		Mas de 4 proveedores	2-4 proveedores	Menos de 2 Proveedores		
Contaminates tratados Los contaminantes estan clasicado en 8 grupos Nonhalogenated COV - Combustibles - COV halogenados - inorgánicos - Nonhalogenated SVOCs - radionucleidos - SVOCs halogenados - los explosivos		Eficacia demostrada en piloto o Full Piloto o de escala completa	Poca Eficacia demostrada en piloto O escala completa	No se ha demostrado su eficacia en Piloto o de escala completa	Igual que el anterior	

Fuente: Modificado de https://frtr.gov/matrix2/section3/table3_2.pdf

Caso tipo.

Se tiene una cantidad de residuos aceitosos provenientes de limpiezas de vasijas, crudo emulsionado, sólidos aceitosos y borras, estos residuos se deben tratar en dos etapas una de Homogenización donde sea recirculado y se le adicionen los químicos necesarios (rompedores de emulsión, aglutinantes o dispersores de parafinas, entre otros).

Seguidamente debe pasar a la segunda etapa un tanque de proceso en el cual se le aplica calor indirectamente con el fin de usar la temperatura como catalizador de la química adicionada para romper la emulsión, luego se pasa por una tricanter donde termina el proceso de separación de las fases, donde el agua es enviada a una piscina donde se le realiza el proceso de clarificación, el crudo si está dentro de parámetros menor del 5% de BS&W y un porcentaje de 2% de sólidos es enviado a la línea de venta , las sub borras son recolectadas y son tratadas por la técnica de Land Farming por Biorremediación.

5.1 TRATAMIENTO EN ÁREA DE LAND FARMING²⁵

- Se extiende el material recogido con maquinaria pesada (retroexcavadora), en el área de Land Farming.
- Se hace la remoción de los sólidos no biodegradables (trapos, plástico, metal, vidrio, etc), a medida que el material es extendido en el área.
- Se realiza un monitoreo preliminar del residuo en presencia de un funcionario de la CAM, monitoreando pH, conductividad, TPH, BTEX, HAPT. La muestra a analizar debe estar libre de cualquier químico para determinar así los catalizadores a aplicar.
- La muestra se debe recoger teniendo en cuenta las normas de seguridad para recolección de muestras. Por lo general se usan guantes, balde, pala, palín, bolsas plásticas con cierre hermético y papel aluminio.
- Luego de tener los resultados preliminares, se hace dilución del residuo con material de descapote de la misma área, el cual es rico en materia orgánica. La relación de mezcla del material es 1:1. Este material es mezclado con la retroexcavadora.

²⁵ CHAVEZ FONSECA Diego Fernando. Implementación del sistema ambiental para el manejo de los residuos aceitosos proveniente de la industria petrolera, Universidad de Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.

- Se hace la homogenización del residuo, tratando de dejar una capa de material de 0.30 m.
- Una vez extendido y homogenizado el material, se aplica agua hasta obtener un porcentaje de humedad entre el 60 y 80%. Además, se adicionan los catalizadores para que sea más rápida la efectividad del tratamiento.
- Semanalmente se hace un seguimiento y monitoreo al residuo que se está tratando, verificando parámetros como pH, TPH, BTEX, HATP del suelo. Estos parámetros se monitorean hasta que el residuo cumpla con los requerimientos exigidos por la CAM para la entrega de residuos a las compañías.
- A medida que se va haciendo el tratamiento, se realiza un proceso de oxigenación del residuo. Esto se hace con tractor utilizando discos, arándolo por un tiempo de 3 horas, una vez a la semana por 8 semanas.
- Al finalizar el tratamiento se hace otro muestreo con los funcionarios de la CAM para verificar el cumplimiento de la biodegradación del residuo.
- El tiempo de finalización del tratamiento depende del tipo de residuos y la eficacia del producto aplicado.

La técnica más usada para la biorremediación de los lodos contaminados con hidrocarburos y de otros desechos de la industria petrolera es la denominada landfarming²⁶. Se realiza trasladando los contaminantes a un suelo no contaminado, el cual ha sido preparado con anterioridad para evitar su contaminación y la de las aguas subterráneas con sustancias que puedan producirse durante el tratamiento. Para ello se efectúa el diseño del lugar donde se depositan los contaminantes, aislando el material de tratamiento del área no contaminada con una tela impermeable.

²⁶ VARGAS GALLEGO, Paola Andrea. CUÉLLAR, René Ricardo. DUSSÁN, Jenny. Biorremediación de residuos del petróleo.

6 CONCLUSIONES

La clasificación de los residuos peligrosos y no peligrosos, permite separar adecuadamente los residuos en la fuente generadora e impedir que otros residuos se vean contaminados por la mezcla de estos. Además, facilita identificar los residuos aprovechables, los peligrosos o especiales y los orgánicos.

Los cambios de características en los residuos aceitosos nos obligan a realizar la implementación diferentes tipos de procesos para poder tratar los residuos de manera adecuada y a su vez que pueda manejar cambios en la composición del fluido a tratar.

Para poder utilizar las técnicas de biorremediación en los residuos aceitosos se debe primero realizar un tratamiento primario al fluido para así poder tener una mejor eficiencia de la tecnología a aplicar.

Las tecnologías disponibles en Colombia para la disposición final de los residuos son Landfarming y compostaje, es utilizada por su bajo costo, fácil aplicación y se encuentra en la literatura suficiente información para poder aplicar esta técnica en los campos de operación, además existen varias empresas que puede prestar este tipo de servicio.

7 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar proyectos a escala piloto en los cuales se realice la implementación de las diferentes técnicas para el manejo de residuos aceitosos existentes en Colombia y comparar cómo está su nivel con los actualmente aplicados en otros países.

Realizar un estudio cuantitativo de la clase de residuos aceitosos generados en la industria de hidrocarburos en la etapa de producción, para poder así reutilizar dentro de lo posible los residuos o disponerlos sin efecto al medio.

BIBLIOGRAFÍA

CANASA, Adrián, Remediación de suelos contaminados en operaciones de perforación y manejo del petróleo crudo en la selva peruana, Lima- Perú, trabajo de tesis pregrado, Universidad nacional de ingeniería facultad de ingeniería de petróleo, gas natural y petroquímica. 2010.18p.

CANASA, Adrián, Remediación de suelos contaminados en operaciones de perforación y manejo del petróleo crudo en la selva peruana, Lima- Perú, trabajo de tesis pregrado, Universidad nacional de ingeniería facultad de ingeniería de petróleo, gas natural y petroquímica. 2010.18p.

CASTELL, Elías Xavier. Reciclaje de residuos industriales. Ediciones Díaz de Santos, S.A. 2000.p.15-37.

CASTELBLANCO, Iván Fernando y NIÑO, John Anderson. Manejo y tratamiento actual de residuos aceitosos en la industria petrolera colombiana. Trabajo de pregrado Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga.: UIS. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2011. 124p.

CHAVEZ FONSECA Diego Fernando. Implementación del sistema ambiental para el manejo de los residuos aceitosos proveniente de la industria petrolera. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental y Sanitario. Bogotá D.C.: Universidad de Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2005. 137p.

Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos fronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, acta Final. Programa de la Naciones Unidas para el medio ambiente, 1989.p.62-68.

COLOMER Mendoza, José y GALLARDO Izquierdo, Antonio. Tratamiento y gestión de residuos sólidos. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.2006. p.176

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE. Technologic screening Matrix and reference guide, version 4.0. 3.1 In Situ Biological Treatment. [Online] https://frtr.gov/matrix2/section3/3_1.html

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE. Technologic screening Matrix and reference guide, version 4.0. 3.2 In Situ Physical/Chemical Treatment. [Online] https://frtr.gov/matrix2/section3/3_2.html

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE. Technologic screening Matrix and reference guide, version 4.0. 3.3 In situ Thermal/ Treatment. [Online] https://frtr.gov/matrix2/section3/3_3.html

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE. Technologic screening Matrix and reference guide, version 4.0. 3.4 Ex Situ Biological Treatment. [Online] https://frtr.gov/matrix2/section3/3_4.html

GONCALVES, CANTANHEDE, Álvaro Luiz. Manejo de residuos peligrosos. Editor CEPIS. 1992. p 1.

Guía para la gestión integral de Residuos Peligrosos – Fundamentos. Capítulo I. Págs. 16-18.

Informe de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente y el desarrollo. (3-14 Julio, 1992). Declaración de RIO sobre el medio ambiente y el desarrollo. Rio de Janeiro 1992. Capítulo I.

LÓPEZ LAFUENTE, Antonio. Biorremediación y fitorremediación en suelos contaminados.2009.[Online]:<https://www.analesranf.com/index.php/mono/article/viewFile/598/615>

LOPEZ DE MEZA, J.; QUINTERO, G.; GUEVARA, A.; JAIMES, D.; RIAÑO, S.; GARCIA, J: Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. En NOVA - PUBLICACIÓN CIENTÍFICA, Enero 2006.

MINISTERIO DE AGRICULTURA. Decreto 1594 (26, junio,1984) Por el cual se reglamentara parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI- Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III-Libro I- del Decreto ley de 1974 en cuanto a los usos del agua y de residuos líquidos. Diario Oficial. Bogotá D.C., 1984. P.8-10.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto número 1220. (21, abril, 2005). Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. Diario Oficial no 45890.p.18-23

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Decreto- Ley 2811(18, diciembre, 1974). Por el cual dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección

al Medio Ambiente. Diario Oficial. Bogotá, D.C.1974.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Ley 99 (22, diciembre, 1993) Por el cual se crea el, se reordena el Sector Publico encargado de la gestión y conservación de medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental- SINA y se dictan otras disposiciones.

MINISTERIO DE SALUD. Resolución 2309 (24, febrero, 1986). Por la cual se dictan normas para el cumplimiento del contenido del Título III de la parte 4 del Libro 1 del decreto-Ley número 2811 de 1974 y de los Títulos I, III y XI de la ley de 1979, en cuanto a Residuos Especiales. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 1986.

Norma Louisiana 29B. Norma estadounidense. Por la cual se reglamentan todas las actividades industriales que afectan el medio ambiente. Titulo 43, parte XIX, orden estatal 29B. Capítulo 3 están contemplados todos aquellos criterios y parámetros tenidos en cuenta para el manejo y disposición final de todos los residuos ocasionados por actividades industriales.

PEÑALOZA, Héctor Collazos y MUÑOZ, Ramón Duque. Residuos sólidos. Asociación colombiana de ingeniería sanitaria y ambiental ACODAL. Quinta edición. 1998. p 78.

Principios fundamentales de la Constitución Política de la República de Colombia, 1991. Editorial LUPA, 1993.

VARGAS GALLEGGO, Paola Andrea; CUÉLLAR, René Ricardo; DUSSÁN, Jenny. Biorremediación de residuos del petróleo. [Online] <http://hipotesis.uniandes.edu.co/hipotesis/images/stories/ed04pdf/Biorremediacion.pdf>