ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias de la Tierra

"Aplicación de Procesos Biológicos como medida Remediación
para recuperar suelos
Limo-Arcillosos contaminados con Gasolina"

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentado por:

Bella Karina Toledo Morán

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2009

AGRADECIMIENTO

Primero que nada a Dios porque sin el no hubiera sido posible terminar la tesis, a mi familia y amigos por su apoyo incondicional y a todas las personas que de una u otra modo colaboraron en la realización de este trabajo y especialmente a mi Director de Tesis, el Ing. Francisco Torres por su paciencia, orientación, guía y al Dr. David Matamoros por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA

A mis padres Galo y Piedad, a mis hermanos Fabricio y Sandra forjadores de mi vida, a mis amigos.

TRIBUNAL DE GRADUACION

Ing. Gastón Proaño
SUBDECANO FICT
PRESIDENTE

Msc. Ing. Francisco Torres
DIRECTOR DE TESIS

Dr. David Matamoros
VOCAL

Ing. Alby Aguilar
VOCAL

DECLARACION EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”

Bella Karina Toledo Morán

RESUMEN

Siendo el Ecuador un país petrolero, la contaminación por hidrocarburos esta considerada como una emergencia sanitaria por las secuelas que ha dejado y sigue dejando en el medio ambiente y en la salud pública.

La presente tesis tiene como objetivo principal fomentar el estudio y la aplicación de las técnicas de Biorremediación de suelos; las mismas que son logística y económicamente mas convenientes en el momento de diseñar y de llevar a cabo los proyectos de remediación.

En su primera parte se revisan y definen los fundamentos teóricos de los procesos de remediación, para su posterior aplicación en el campo en un medio controlado pudiendo observar de manera clara los cambios durante todo el proceso.

INDICE GENERAL

RESUMEN .....………………………………………………………...... I
ÍNDICE GENERAL ……………………………………………………….. II
INDICE DE FIGURAS ………………………………………………………. VI
INDICE DE TABLAS ………………………………………………………… VII
INDICE DE GRAFICOS ……………….……………………………………….. X
INDICE DE FOTOS …………………………………………………………….. XI
ABREVIATURAS ………………………………………………………….. VIII
UNIDADES ………………………………………………………………… IX

Pag.

CAPITULO I

1 INTRODUCCIÓN ……………………………………………………………. 1
1.1 Antecedentes …………………………………………………………… 2
   1.1.1 Suelos contaminados…....……………………………………….. 5
   1.1.2 Principales causantes de la contaminación de suelos ……….... 7
   1.1.3 Origen y composición del petróleo ……………………………….. 11
      1.1.3.1 Clasificación del petróleo según su Gravedad API ….... 14
   1.1.4 Contaminación de suelos por hidrocarburos …………………… 14
   1.1.5 Impacto ambiental en Ecuador producto de la contaminación de suelos por hidrocarburos ….…………………………………...…… 19
1.2 Definición del problema …………………………………………………... 22
1.3 Objetivos ……………………………………………………………….. 23
   1.3.1 Objetivo general ………………………………………………… 23

1.3.2 Objetivos específicos …… 23
1.4 Justificación …… 24
1.5 Estructura de la Tesis …… 25

CAPITULO 2

2 GENERALIDADES TEÓRICAS

2.1 Técnicas de remediación de suelos …… 27
2.1.1 Extracción por fluidos …… 28
2.1.2 Tratamiento electroquímico …… 29
2.1.3 Inyección de aire …… 30
2.1.4 Enjuague del suelo …… 31
2.1.5 Extracción con solventes …… 34
2.1.6 Incineración …… 35
2.1.7 Fitorremediación …… 37
2.1.8 Biorremediación …… 39
2.1.9 Tratamiento térmico …… 40
2.1.10 Atenuación natural …… 41
2.1.11 Solidificación o estabilización …… 42
2.2 Selección de las técnicas de remediación …… 43
2.2.1 Características del contaminante …… 50
2.2.2 Localización y características del sitio …… 52
2.2.3 Características del suelo …… 52
2.3 Factores que inciden en la eficiencia de una tecnología de remediación …… 53

CAPITULO 3

3 BIORREMEDIACION

3.1 Definición …… 55
3.2 Tipos de Biorremediación …… 57

3.2.1 Bioaireación …………………………………………………… 57
3.2.2 Bioestimulación ……………………………………………….. 58
3.2.3 Bioaumentación ……………………………………………… 58
3.2.4 Biolabranza ……………………………………………………. 58
3.2.5 Compostaje ……………………………………………………. 59
3.3 Desarrollo tecnológico de la Biorremediación ………………………….. 60
3.4 Fundamento Bioquímico de la Biorremediación ……………………….. 62
3.5 Factores que afectan en la efectividad de los procesos de Biorremediación ……………………………………………………….. 64
3.6 Diversidad microbiana en los sitios contaminados ……………..…... 67
3.7 Tipos de bacterias usadas en los procesos de Biorremediación …….. 68
3.8 Ventajas y desventajas de la aplicación de esta técnica ……………... 72

CAPITULO 4

4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Selección del tratamiento a aplicar ………………………………………. 74
4.2 Tipos de muestreo ………………………………………………………. 75
4.3 Obtención de la muestra ……………………………………………….. 76
4.4 Requerimiento de seguridad en el proceso de obtención de muestras …….. 80
4.5 Procedimiento de muestreo ……………………………………………. 81
4.6 Almacenamiento y transporte de la muestra …………………………… 82
4.7 Preservación de muestras ……………………………….…………….. 85
4.8 Ensayos de laboratorio y obtención de resultados ……….…………… 87

CAPITULO 5

5 APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO

5.1 Adecuación del lugar …………………………………………………….. 91
5.2 Manipulación y disposición del suelo contaminado …………………… 95
5.3 Proceso de Remediación ………………………………………………….. 99

5.4 Acondicionamiento nutritivo …………………………………………………… 101
Acondicionamiento nutritivo 1 ………………………………………………. 101
Acondicionamiento nutritivo 2 ………………………………………………. 107
5.5 Aplicación de la fitorremediacion …………………………………………… 111
5.6 Análisis e interpretación de los resultados ..………………………………. 115
5.6.1 Septiembre ………………………………………………………….. 116
5.6.2 Octubre ……..……………………………………………………….. 118
5.6.3 Noviembre ………………………………………………………….. 120
5.6.4 Diciembre ..………………………………………………………….. 122
5.6.5 Enero ……..………………………………………………………….. 125
5.6.6 Febrero …..………………………………………………………….. 127
5.6.7 Parámetros de VOC’s y TPH …..…………………………………….. 129

CAPITULO 6

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones ………………………………………………………………….. 131
6.2 Recomendaciones ……………………………………………………………. 134

BIBLIOGRAFIA 135

ANEXOS

ANEXOS A: CONTROL Y SEGUIMIENTO DE LAS CELDAS DE REMEDICIÓN

ANEXOS B: CRITERIOS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS

ANEXOS C: LÍMITES PERMISIBLES PARA LA IDENTIFICACIÓN Y REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS EN TODAS LAS FASES DE LA INDUSTRIA HIDROCARBURÍFERA

INDICE DE FIGURAS

		Pag.
Figura 1.1 Figura 1.2 Figura 1.3	Diversos tipos de contaminación de los recursos naturales. (PROFEPA,2006)	1
Figura 1.4	Río contaminado. (Microsoft Encarta, 2006).	3
Figura 1.5	Diagrama de la biomagnificación. (Toledo, 2009)	6
Figura 1.6	Manejo inadecuado de residuos peligrosos. (PROFEPA,2006)	8
Figura 1.7	Movimiento de tierra en Times Beach, Missouri después de detectar la presencia de Dioxina en el suelo. (The Washington Post)	10
Figura 1.8	Diagrama de una perforación para la extracción de petróleo. (Ganitz y Chamiza, 1994)	12
Figura 1.9	Suelo contaminado con hidrocarburos. (Fuente: globalexchange.org)	15
Figura 1.10	Piscina de desechos de petróleo. (Fuente: Selvas.org)	17
Figura 1.11	Contaminación en el Rió Cuyabeno Chico por una fuga en el oleoducto de Petroecuador. (Fuente: gfbv.it)	18
Figura 1.12	Desechos líquidos producidos en la extracción del petróleo. (Fuente: texacotoxico.org).	19
Figura 1.13	Contaminación de la selva amazónica. (Fuente: texacotoxico.org).	20
Figura 1.14	Río contaminado con hidrocarburos. (Fuente: texacotoxico.org)	21
Figura 2.1	Esquema del proceso de electroremediación. (X. Doménech, 1995)	29
Figura 2.2	Esquema del proceso de depuración de un	30

		Pag.
	suelo por aire. (X. Doménech, 1995)	
Figura 2.3	Sistema combinado de extracción de vapores del suelo y aspersión de aire. (EPA, 1996)	31
Figura 2.4	Esquema de una planta de enjuague de suelos. (E. de Miguel García, 1995)	32
Figura 2.5	Proceso de extracción con solventes. (EPA, 1996)	34
Figura 2.6	Esquema de incineración. (E. de Miguel GARCIA, 1995)	36
Figura 2.7	Proceso de Fitorremediación. (Cunningham y Ow,1996)	37
Figura 2.8	Métodos de Fitorremediación. (Singh et al, 2003)	39
Figura 2.9	Tratamiento microbiológico in situ. (X. Domenech, 1995)	40
Figura 2.10	Esquema del proceso de inyección de lechada de cemento bajo una mancha de contaminación (Esquema del proceso de inyección de lechada de cemento bajo una mancha de contaminación (Fuente:html.rincondelvago.com/000551542.jpg)	42
Figura 3.1	Proceso de Bioremediación *in situ* de agua y suelo (Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental, 2001).	56
Figura 3.2	Proceso de Bioremediación *ex situ* de agua y suelo (Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental, 2001).	57
Figura 3.3	Proceso de compostaje de suelo contaminado (Biosoil).	59
Figura 3.4	Biodegradación aerobia en suelos contaminados con hidrocarburos (Fuente: EPA, 1996).	60
Figura 3.5	Cladophialophora (Georg, 2007).	72

ÍNDICE DE TABLAS

		Pag.
Tabla 1.1	Impactos ambientales para grupos selectos de industrias. (Henry y Heinke, 1999).	4
Tabla 1.2	Clasificación de la contaminación de suelos y aguas. (Eweis, 199)	11
Tabla 1.3	Impactos ambientales en el suelo por el Petróleo. (Heinke, 1999)	16
Tabla 2.1	Métodos de Fitorremediación. (Heinke, 1999)	38
Tabla 2.2	Ventajas y desventajas de algunos métodos de remediación. (Heinke, 1999)	44 – 45
Tabla 2.3	Ventajas y desventajas de los métodos de remediación in situ y ex situ. (Volke y Velasco, 2002).	46
Tabla 2.4	Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, clasificadas de acuerdo con el tipo de tratamiento. (Volke y Velasco, 2002)	47
Tabla 2.5	Cronograma valorado de algunos métodos de remediación.	48
TABLA 3.1	Tipos de reacciones en los procesos de degradación aeróbicos y anaeróbicos. (Heinke, 1999)	63
Tabla 3.2	Tipos de bacterias más comunes usadas en los procesos de remediación. (Heinke, 1999)	70
Tabla 4.1	Mínimos de puntos de muestreo de acuerdo con el área contaminada (Fuente: Profepa, 2003)	76
Tabla 4.2	Materiales y recipientes para las muestras de suelo .	79
Tabla 4.3	Tiempo aproximado que puede mantenerse inalterada una muestra de suelo (a 4º C y en l oscuridad) en función de los parámetros a determinar. (Contaminación y depuración de suelos. Instituto tecnológico geominero de España)	82
Tabla 4.4	Condiciones para la muestra, transporte y conservación de la muestra. (Contaminación y depuración de suelos. Instituto tecnológico geominero de España)	84

		Pag.
Tabla 4.5	Recipientes para las muestras de suelo, temperatura de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro. (Contaminación y depuración de suelos. Instituto tecnológico geominero de España)	86
Tabla 4.6	Factores Indicativos de Contaminación. (Contaminación y depuración de suelos. Instituto tecnológico geominero de España)	88

ÍNDICE DE GRAFICOS

		Pag.
Grafico 2.1	Valoración grafica de los métodos de remediación expresados en dólares. (Toledo, 2009)	49
Grafico 5.1	Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de septiembre 2006. (Toledo, 2009)	117
Grafico 5.2	Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de octubre 2006	119
Grafico 5.3	Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de noviembre 2006. (Toledo, 2009)	121
Grafico 5.4	Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de diciembre 2006. (Toledo, 2009)	123
Grafico 5.5	Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de enero 2007. (Toledo, 2009)	126
Grafico 5.6	Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de febrero – marzo 2007. (Toledo, 2009)	128
Grafico 5.7	Tiempo vs. VOC’s, en un periodo de seis meses. (Toledo, 2009)	130
Grafico 5.8	Tiempo vs.TPH, en un periodo de seis meses. (Toledo, 2009)	131

ÍNDICE DE FOTOS

		Pag.
Foto 5.1	Apertura de las zanjas. (Toledo, 2009)	92
Foto 5.2	Compactación de la arcilla. (Toledo, 2009)	93
Foto 5.3	Colocación de la cal. (Toledo, 2009)	94
Foto 5.4	Colocación de vegetación seca de las especies nativas. (Toledo, 2009)	95
Foto 5.5 Foto 5.6	Excavaciones para observación de la contaminación en lugar donde se extrajo las muestras. (Toledo, 2009)	96
Foto 5.7	Material de muestra. (Toledo, 2009)	97
Foto 5.8	Valoración visual del gradote contaminación. (Toledo, 2009)	98
Foto 5.9	Colocación del material en las celdas de remediación. (Toledo, 2009)	98
Foto 5.10	Extracción de rocas. (Toledo, 2009)	99
Foto 5.11	Adicción de agua al material contaminado. (Toledo, 2009)	100
Foto 5.12	Mezcla y movimiento del suelo. (Toledo, 2009)	101
Foto 5.13	Adición de aserrín al material. (Toledo, 2009)	102
Foto 5.14	Preparación de las bacterias. (Toledo, 2009)	103
Foto 5.15	Colocación de las bacterias. (Toledo, 2009)	103
Foto 5.16	Protección de la celda, para mantener temperatura. (Toledo, 2009)	104
Foto 5.17	Inundaciones en la celda de remediación. (Toledo, 2009)	105
Foto 5.18	Presencia de babosas en el sitio. (Toledo, 2009)	105
Foto 5.19	Extracción del agua de las celdas. (Toledo, 2009)	106

Pag.

Foto 5.20 Presencia de vegetación en la celda. (Toledo, 2009) 107

Foto 5.21

Foto 5.22 Colocación de aserrín en la celda de remediación. (Toledo, 2009) 108

Foto 5.23 Mezcla del aserrín. (Toledo, 2009) 108

Foto 5.24 Colocación de vegetación viva y seca del árbol de Saman. (Toledo, 2009) 109

Foto 5.25 Colocación de vegetación de las especies nativas. (Toledo, 2009) 110

Foto 5.26 Presencia de *Actinomicetos*. (Toledo, 2009) 111

Foto 5.27 Presencia de microfauna. (Toledo, 2009) 112

Foto 5.28 Siembra de plantas en el material a remediar. (Toledo, 2009) 113

Foto 5.29 Presencia de hongos en el suelo remediado. (Toledo, 2009) 113

Foto 5.30 Leve deterioro en el estado de las plantas. (Toledo, 2009) 114

Foto 5.31 Colocación de vegetación seca para mantener la humedad en el suelo. (Toledo, 2009) 115

Foto 5.32 Crecimiento de las plantas. (Toledo, 2009) 116

Foto 5.33 Material contaminado con gasolina en la primeras etapas del proceso de remediación. (Toledo, 2009) 118

Foto 5.34 Comprobación visual del estado del suelo contaminado en el segundo mes de tratamiento. (Toledo, 2009) 120

Foto 5.35 Recuperación visible del suelo en el tercer mes de tratamiento. (Toledo, 2009) 122

Foto 5.36 Acondicionamiento nutritivo 1. (Toledo, 2009) 124

Foto 5.37 Inundación de la celda de remediación. (Toledo, 2009) 124

Foto 5.38 Suelo completamente saturado de agua. (Toledo, 2009) 125

Foto 5.39 Acondicionamiento nutritivo 2. (Toledo, 2009) 127

Foto 5.40 Crecimiento de plantas. (Toledo, 2009) 129

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Los problemas ocasionados por la contaminación sean estos en agua, suelo o aire han sido y serán motivos para que día a día el hombre busque la manera de contrarrestar dichos problemas de manera más eficiente, rápida y a más bajo costo.

Figuras 1.1, 1.2 y 1.3.- Diversos tipos de contaminación de los recursos naturales (PROFEPA,2006).

1.1 ANTECEDENTES

La desmedida cantidad de productos químicos usados para la agricultura después de la II Guerra Mundial, acompañada del vertido indiscriminado de residuos industriales y domésticos, provocó a mediados de la década de 1960, una creciente preocupación por la contaminación de los suelos (Microsoft Encarta, 2006).

Hoy en día el manejo inadecuado de los residuos peligrosos así también como el mal uso del suelo por parte de los seres humanos ha dado como origen un problema a nivel mundial debido a la relación que hay entre la contaminación del suelo y las fuentes de abastecimiento de agua potable, superficiales y subterráneas, ya que estas son fuente de vida para la humanidad.

Los derrames de petróleo han provocado serios problemas y aun hoy es un problema latente principalmente en los países productores de petróleo debido a que, ya sea en su extracción, refinación, almacenamiento y transporte a los lugares de destino, pueden surgir daños en las infraestructuras y producirse derrames.

Diversos países han establecidos políticas para prevenir el deterioro y la contaminación de los suelos, estableciendo leyes basadas en las evaluaciones y probabilidades de riesgos asociados a la contaminación de suelos, previniendo la descarga al medio ambiente de desechos peligros.

Figura 1.4.- Río contaminado (Microsoft Encarta, 2006).

TABLA 1.1 Impactos ambientales para grupos selectos de industrias (Henry y Heinke, 1999)

Consecuencias ambientales	Litosfera	Impactos humanos
Petroquímica	• Eliminación de sólidos y lodos rellenos de tierras. • Derrames accidentales durante el transporte y almacenamiento.	• Ciertos productos y desperdicios tóxicos para muchas formas de vida. • Perturbación del estilo de vida por emisiones a las tres esferas.
Metales	• Eliminación de escoria y productos de desecho del procesamiento.	• Efectos en la salud de los tóxicos liberados en aire y agua.
Minería	• Descarga de desechos de minas y residuos de procesamiento. • Trastorno de la agricultura, la silvicultura y la recreación por minas a cielo abierto.	• Peligro para la salud de los mineros (mercurio, asbesto, explotación de carbón).
Agricultura	• Erosión de la superficie del suelo. • Agotamiento de material orgánico, microorganismos necesarios del suelo.	• Peligro para la salud por pescado y mariscos contaminados con mercurio.
Pulpa y papel	• Degradación del ecosistema en áreas desmontadas. • Erosión de tierras no protegidas.	• Peligro para la salud por pescado y mariscos contaminados con mercurio.

1.1.1 Suelos contaminación

“La contaminación del suelo se define como la acumulación en éste de compuestos tóxicos persistentes, productos químicos, sales, materiales radiactivos o agentes patógenos, que tienen efectos adversos en el desarrollo de las plantas y la salud de los animales” (Microsoft Encarta, 2006).

La contaminación de los suelos se da principalmente por la acumulación de los metales pesados, que en pequeñas cantidades son beneficiosos y sirven como nutrientes del suelo, los metales pesados se encuentran principalmente en la actividad minera y en los procesos de combustión e incineración de las refinerías.

Cuando el detrimento de los suelos sobrepasa el límite de tolerancia del mismo, éste se sobresatura, deteriorándose y perdiendo su capacidad de auto regenerarse y sus propiedades, las cuales directa o indirectamente permiten la supervivencia de la flora y fauna y por ende de los seres humanos debido a la biomagnificación [1]

---

[1] Biomagnificación: Es la acumulación de sustancias tóxicas en la cadena alimentaria.

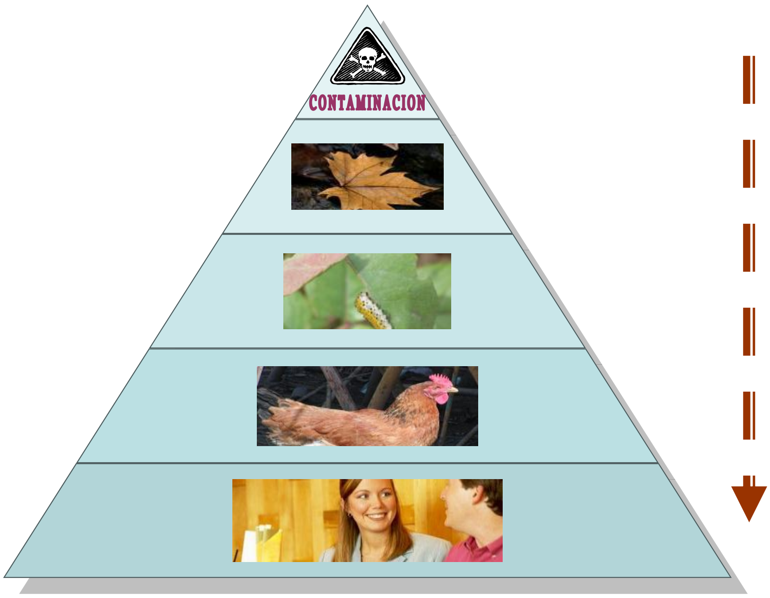


Figura 1.5.- Diagrama de la biomagnificación (Toledo, 2009).

La aplicación excesiva de fertilizantes como la úrea, el nitrato de calcio y el cloruro de potasio entre otros, producen alteraciones en los suelos, irónicamente algunas de técnicas usadas para la remediación de dichos suelos modifican también la estructura de los suelos.

Aunque el suelo puede contaminarse ante la presencia de cualquier residuo peligroso las propiedades químicas, como el pH, la textura y la materia orgánica del suelo juegan un papel importante en la absorción del contaminante.

La dispersión de los contaminantes es otro factor de consideración ya que las condiciones del terreno y el clima podrían hacer que la contaminación no sólo sea en el sitio afectado sino que podría repercutir grandes extensiones, la volatización de los contaminantes constituye una de las vías de contaminación atmosférica, los contaminantes acuosos por escorrentía y luego por infiltración puede transportar los contaminantes a las aguas subterráneas.

La mayoría de los compuestos vertidos en el suelo o agua sufren transformación en su metabolismo llevándolas a un estado menos contaminante, las bacterias autóctonas del suelo degradan los compuestos orgánicos en un lapso de tiempo relativamente corto dependiendo de las características del suelo, temperatura, la presencia de los nutrientes necesarios para su desarrollo.

1.1.2 Principales causantes de la contaminación de los suelos

Antes de que existieran las regulaciones referentes al manejo y disposición final de los desechos peligrosos era frecuente que las industrias acumularan los residuos peligrosos en sus instalaciones para luego depositarlos en tanques o contenedores cuando eran residuos líquidos y en caso de residuos sólidos los almacenaban generalmente a la intemperie sin protecciones (Eweis,1999).

Figura 1.6.- Manejo inadecuado de residuos peligrosos (PROFEPA,2006)

El almacenamiento de combustible bajo tierra se convirtió en una práctica habitual para ahorrar espacio y por seguridad de los habitantes pero al paso del tiempo siendo depósitos metálicos sufrieron corrosión ocasionando fugas y provocando contaminación en las áreas aledañas a los depósitos.

Los residuos industriales no tipificados como peligrosos depositados en tiraderos de basura y sitios no adecuados conllevaron a la contaminación de grandes extensiones de suelo y por consecuencia a los cuerpos hídricos.

Un ejemplo de contaminación por la mala disposición de los residuos considerados tóxicos es lo sucedido en la comunidad de Lathrop, California, donde vertieron el residuo obtenido al aclarar un depósito de fabricación del pesticida dibromocloro propano (DBCP) el cual según las investigaciones es cancerígeno y un esterilizador masculino (Eweis,1999).

Otro caso de contaminación es lo ocurrido en Times Beach, Missouri, donde se colocó una mezcla de lubricantes y residuos químicos en carreteras y caminos no pavimentados para contrarrestar el polvo y años después luego de la muerte de algunos animales se encontraron altas concentraciones de *Tetraclorodibenzo(p)dioxina* en el suelo, tomaron como medida de remediación retirar 15 centímetros de la superficie del suelo pero no fue suficiente y posteriormente tuvieron que evacuar el área (Eweis,1999).

Figura 1.7.- Movimiento de tierra en Times Beach, Missouri después de detectar la presencia de Dioxina en el suelo. (The Washington Post)

En Estados Unidos se han identificado más de 30 mil sitios contaminados tales como instalaciones de fábricas abandonadas, basureros, rellenos sanitarios mal diseñados por lo cual tuvieron que implementar metodologías para valorar la repercusiones al ambiente y a la salud pública (Eweis,1999).

Tabla 1.2 Clasificación de la contaminación de suelos y aguas (Eweis, 1999)

Tipos de compuestos	Procedencia habitual	Capacidad de dispersión	Efectos tóxicos
Compuestos químicos de la agricultura	Industrias manufactureras, distribuidores de compuestos químicos, granjas, aeropuertos destinados a vuelos de fumigación.	Generalmente baja	Enfermedades del sistema nervioso, cáncer
Gasolina y diesel	Estaciones de servicio, bases militares, refinerías.	De baja a moderada	Los compuestos cancerigenos se incluyen dentro de la gran variedad de compuestos del petróleo.
Pinturas	Vertederos municipales	De moderada a alta	Envenenamiento por metales pesados, daños al sistema nervioso, cáncer.
Disolventes	Industrias de la electrónica, talleres de automoción, bases militares.	De moderada a alta	Se incluyen los compuestos cancerígenos, daños a nervios, toxicidad.
Hidrocarburos policlínicos aromáticos (HPA)	Fabricación de gas de hulla	De baja a moderada	Cierto número de HPA son conocidos, o se sospecha que son cancerigenos.
PCB	Transformaciones eléctricos	Baja	Cáncer
Dioxinas	Fabricación de compuestos químicos, gases provenientes del escape de vehículos, combustión de residuos	Baja	Formación de tumores, acne debido a la exposición continuada a compuestos del cloro.

1.1.3 Origen y composición del petróleo

El petróleo es una sustancia oleosa, insoluble en agua y con una densidad que fluctúa entre 0.75 y 0.95 g/ml., compuesta exclusivamente por hidrógeno y carbono, motivo por el cual se lo denomina hidrocarburo. Se dividen en dos categorías: aromáticos y alifáticos.

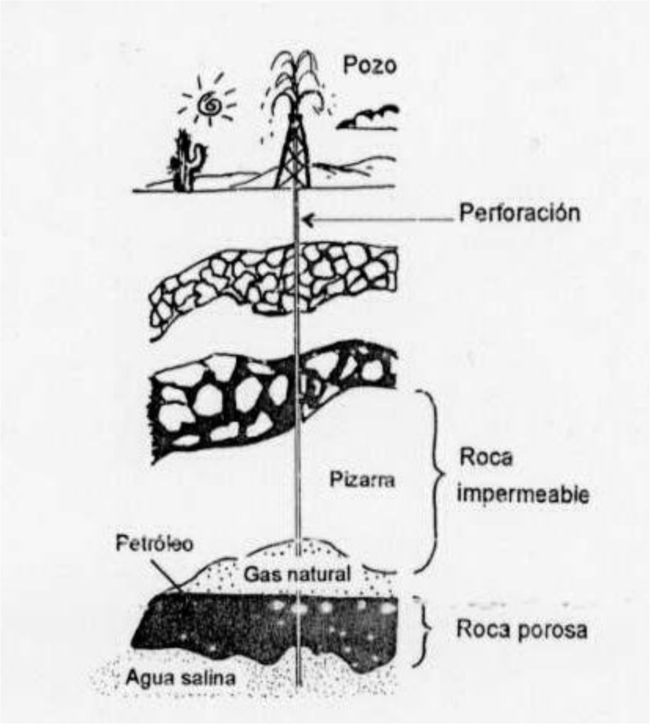


Figura 1.8.- Diagrama de una perforación para la extracción de petróleo (Ganitz y Chamiza, 1994).

Los aromáticos son estructuras de anillo simple o múltiple que contienen enlaces alternativos individuales o dobles. Los alifáticos contienen cadenas o anillos de carbono con o sin enlaces alternativos individuales o dobles. Los hidrocarburos alifáticos pueden ser alcanos, alquenos alquinos o sus derivados. Los hidrocarburos cloraros usados para producir pesticidas sintéticos han causado efectos desastrosos en el medio ambiente debido a su resistencia a la degradación, son pocos solubles en agua, se acumulan en los suelos y se adhieren a los tejidos de las plantas teniendo una vida media aproximada de tres años en los suelos cultivados.

La formación de los hidrocarburos ha sido un punto contradictorio para los científicos desde hace mucho tiempo, es sabido que la formación del petróleo está relacionada con la descomposición de organismos de origen vegetal y animal que posteriormente fueron cubiertos con capas de sedimentos y bajo los efectos de la presión, temperatura sumado a millones de años dieron como resultado los hidrocarburos. La relación carbono/hidrógeno depende del tipo de yacimiento y de la antigüedad, el promedio fluctúa entre 83 y 86% de carbono y de 11 a 13% de hidrógeno, mientras más carbón mayor es la cantidad de metales pesados. El petróleo no solo esta formado por hidrógeno y carbono, este tiene pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno, metales como níquel, cromo, hierro, vanadio y cobalto.

1.1.3.1 Clasificación del petróleo según su Gravedad API

El petróleo es clasificado en liviano, mediano, pesado y extrapesado, de acuerdo a su medición de gravedad API.

- **Crudo liviano:** es definido como el que tiene gravedades API mayores a 31.1 °API
- **Crudo mediano:** es aquel que tiene gravedades API entre 22.3 y 31.1 °API.
- **Crudo pesado:** es definido como aquel que tiene gravedades API entre 10 y 22.3 °API.
- **Crudo extrapesado:** es aquel que tiene gravedades API menores a 10 ° API. A estos crudos también se les denomina bitúmenes.

1.1.4 Contaminación de suelos por hidrocarburos

Los derrames de petróleo y sus derivados han provocado a nivel mundial una contaminación de suelos de proporciones todavía incalculables, no sólo por la contaminación provocada al medio ambiente sino porque los hidrocarburos están constituidos por compuestos tóxicos para los seres vivos ya que éstos son cancerígenos y mutagénicos.

Figura 1.9.- Suelo contaminado con hidrocarburos
(Fuente: globalexchange.org)

La contaminación por hidrocarburos tiene un efecto perjudicial en el suelo, cambiando sus propiedades físicas, químicas y biológicas con efectos momentáneos o duraderos dependiendo de la concentración y del tiempo de contacto del suelo con el contaminante, lo que retardaría o impediría el crecimiento de la vegetación y por ende de vida en el lugar afectado.

Tabla 1.3 Impactos ambientales en el suelo por el Petróleo (Heinke, 1999)

Ambiente	Exploración	Extracción, producción, procesamiento	Transmisión	Uso y eliminación
Litósfera	Estallidos y derrames en tierra	Estallidos y derrames. Eliminación de lodos	Construcción de tuberías y vertederos Daños al permafrost	Eliminación de aceites usados

C

Cuando los suelos son arcillosos o rocosos la contaminación es menor, porque el hidrocarburo penetra a poca profundidad lo cual facilita las actividades de limpieza, en el caso que los suelos sean arenosos penetra con mayor rapidez, a mayor profundidad y en los suelos con gran contenido de materia orgánica se adhiere fuertemente a las partículas y a los restos vegetales tal es el caso de los manglares o pantanos.

Los accidentes de contaminación por hidrocarburos son hasta cierto punto inevitables en la industria petrolera por la gran cantidad de hidrocarburos que se manejan. Las fuentes de contaminación son varias pero las más frecuentes son:

- Tuberías corroídas.
- Piscinas de desechos de petróleo.

Figura 1.10.- Piscina de desechos de petróleo
(Fuente: Selvas.org)

Los derrames producidos por las tuberías corroídas es uno de los más frecuentes debido a que las mayorías de las refinerías existentes tienen más de cincuenta años de funcionamiento, algunos de los cuales están en zonas susceptibles a la contaminación como manglares, zonas pantanosas o selvas.

El Ecuador se ha visto afectado por innumerables focos de contaminación, como son las piscinas de desechos del petróleo en la amazonia, en los primeros años de la explotación petrolera no había regulaciones sobre estas descargas. El manejo inadecuado da como resultado infiltraciones y escurrimientos al medio ambiente.

Figura 1.11.- Contaminación en el río Cuyabeno Chico por una fuga en el oleoducto de Petroecuador
(Fuente: gfbv.it)

En los países de América Latina principalmente en Brasil, Venezuela, Argentina, México y Ecuador se han producido severas contaminaciones a causa de la extracción y manejo del petróleo provocando un deterioro considerable del suelo que va en aumento y afectando el abastecimiento de agua potable.

La conciencia ambiental en cuanto a los sitios contaminados por hidrocarburos ha sido recientemente intensificada al ver los daños a corto y largo plazo que estos causan al ambiente y a la población, pocos años atrás no existía conciencia en cuanto a las dificultades y costos de la remediación de suelos poniéndose en evidencia que es innegablemente más conveniente prevenir que remediar los problemas de contaminación.

1.1.5 Impacto ambiental en Ecuador producto de la contaminación de suelos por hidrocarburos

En 1965 cuando se descubrió el primer pozo productivo comenzaron los problemas para la amazonía ecuatoriana, afectando las comunidades indígenas radicadas en los alrededores de las estaciones petroleras al ser desplazados de su territorio o por la contaminación producida por las mismas (El Petróleo en el Ecuador,2002).

Figura 1.12.- Desechos líquidos producidos en la extracción del petróleo (Fuente: texacotoxico.org).

Figura 1.13.- Contaminación de la selva amazónica.
(Fuente: texacotoxico.org).

Los sectores más afectados son Orellana y Sucumbios que son zonas donde se extrae la mayor parte de las riquezas petroleras del país, en estas áreas se registra la más alta tasa de cáncer del país, los pobladores han sufrido la pérdida de sus animales y los cultivos, a más de no contar con agua optima para el consumo humano.

Las tribus de los Tetetes desapareció por completo en los primeros años de explotación petrolera, otras tribus como los Siona, Secoya, Huaorani, Cofán y Kichwa perdieron casi todos sus territorios ancestrales y son afectados por la contaminación de los ríos las cuales contaminan sus suministros de agua .

Aunque la industria petrolera ha impulsado la economía del país también ha provocado graves daños al medio ambiente, un ejemplo claro de esto es que, entre los años de 1972 y 1993 se vertieron mas de 114 mil millones de litros de desechos tóxicos y petróleo sin refinar en las tierras y vías fluviales de la Amazonia Ecuatoriana (Hurtig y San Sebastián, 2004).

Según análisis en el Ecuador en 1999 en los ríos cercanos a los campos petroleros se encontraron concentraciones elevadas de hidrocarburos de petróleo, en algunos de estos riachuelos las concentraciones de hidrocarburos eran más de 100 veces mayores al límite permitido por la Comunidad Europea.

Figura 1.14 Río contaminado con hidrocarburos
(Fuente: texacotoxico.org)

Los estudios realizados a las habitantes de la región amazónica de país comprobaron los graves trastornos en la salud con síntomas tales como cansancio, dolor de cabeza, ojos irritados; las mujeres tienen 2,5 veces mas probabilidades de aborto y la tasa de cáncer tanto en hombre como en mujeres aumentó significativamente en las zonas donde se había estado explotando petróleo por más de 20 años.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Siendo el Ecuador un país petrolero, la contaminación por hidrocarburos está considerada como una emergencia sanitaria por las secuelas que ha dejado y sigue dejando en el medio ambiente y en la salud pública. Puesto que el petróleo le otorga al estado un gran porcentaje del presupuesto, sólo fue hasta después de dos décadas de explotación que los problemas de contaminación se hicieron notorios y se vio en la necesidad de tomar medidas para preservar el entorno natural y humano de la Amazonia.

Por todos los problemas ambientales producidos por los derrames del petróleo o por la colación de residuos en lugares no adecuados para su contención, se volvió una prioridad implementar medidas para manejar de una manera más segura los desechos y para darles el tratamiento requerido a bajo costo, con rapidez y con mayor efectividad.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

La presente tesis tiene como objetivo principal fomentar el estudio y la aplicación de las técnicas de Biorremediación de suelos; las mismas que son logística y económicamente más convenientes en el momento de diseñar y de llevar a cabo los proyectos de remediación, siendo el costo y el tiempo de acción bajo las condiciones idóneas mucho menor que en la aplicación de otras técnicas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar, localizar y describir el sitio y fuente de contaminación.
- Establecer y determinar las alternativas de remediación a emplearse.
- Procesar la información obtenida en cada método.

- Establecer una comparación.
- Justificar científica y económicamente la eficacia de los procesos de remediación utilizando aserrín y plantas no invasivas obtenidas en el lugar de estudio.
- Demostrar la efectividad de suelos remediados para la agricultura.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Las técnicas de remediación estudiadas y aplicadas en la presente tesis serán una base fundamental para los estudiantes de ingeniería civil, puesto que los problemas ambientales producidos por los hidrocarburos se ha convertido en un problema latente, que hasta el día de hoy en algunas ocasiones se toman medidas que no solucionan el problema de raíz. La búsqueda de nuevos tratamiento de remediación se ha ido incrementando en los últimos años debido a la necesidad de realizar los trabajos de limpieza más rápido y con más bajos costos, ese es el desafío de todos los profesionales en el Ecuador quienes deben estar preparados para enfrentar los problemas que se presentan en este mundo competitivo.

Finalmente, la presente tesis permitirá aprovechar muchos materiales disponibles en los lugares contaminados para usarlos en los procesos de remediación, disminuyendo costos y minimizando el tiempo de remediación.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo de investigación fue estructurado en seis capítulos para un mejor desarrollo del tema, los mismos que se describen a continuación:

CAPITULO 2: GENERALIDADES TEÓRICAS

En este capitulo se trataran las diversas técnicas de remediación, las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de remediación y los factores de selección que inciden en la eficiencia de dichos procesos.

CAPITULO 3: BIORREMEDIACION

Se hace referencia en este capitulo los tipos de biorremediación, su desarrollo tecnológico así como los fundamentos bioquímicos y los factores que afectan en la aplicación de procesos de biorremediación.

CAPITULO 4: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Aquí se abordará la selección del tratamiento de biorremediación, el tipo de muestreo a realizarse, análisis del suelo y obtención de los parámetros requeridos para determinar la eficiencia del tipo de biorremediación seleccionado en el presente estudio.

CAPITULO 5: APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO

Finalmente se llevará a cabo la aplicación del tratamiento de biorremediación seleccionado en campo, además se realizarán periódicamente monitoreos fisicoquímicos del suelo para determinar el avance de remediación del mismo.

CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de realizar la investigación y obtener los datos se procede a realizar las recomendaciones y conclusiones.

CAPITULO 2

GENERALIDADES TEÓRICAS

2.1 Técnicas de remediación de suelos

Las técnicas de remediación de suelos implican cualquier operación que altera las características de los desechos peligrosos o contaminantes mediante la aplicación de procesos físicos, químicos y biológicos disminuyendo su toxicidad, volumen, o movilidad.

Los procesos de remediación pueden clasificarse como destructivos y no destructivos, los procesos destructivos como su nombre lo indica destruyen el contaminante, alterando su estructura química; los no destructivos reducen la concentración del mismo aprovechando sus propiedades físicas y químicas o sirven para inmovilizar los contaminantes evitando así que se dispersen.

Las técnicas de remediación in situ son aquellas que no requieren excavación y transporte del suelo, estas técnicas dependen mucho del tiempo necesario para descontaminar el área y del costo del tratamiento. Las ventajas de estos tratamientos son sus bajos costos y la posibilidad de tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar el material.

Los procesos de remediación ex situ consisten en extraer el contaminante para realizar el tratamiento de remediación en otro sitio en condiciones controladas pero con un costo mas elevado que el tratamiento in situ.

2.1.1 Extracción por fluidos

La extracción por fluidos consiste en separar los contaminantes mediante un fluido arrastrando el contaminante cuando se usa aire o lavándolo en el caso de utilizar agua, una vez arrastrado el contaminante a un lugar más accesible donde podrá ser depurado con las técnicas apropiadas.

En esta técnica los procedimientos son más sencillos, para que sean efectivos el contaminante debe tener movilidad y los suelos deben ser permeables, este método no es efectivo cuando el suelo tiene alta absorción.

2.1.2 Tratamiento electroquímico

Este tratamiento se basa en el desplazamiento del contaminante mediante la creación de campos eléctricos introduciendo unos electrodos en el suelo haciendo que los contaminantes se muevan de un electrodo a otro siguiendo las líneas del campo eléctrico.

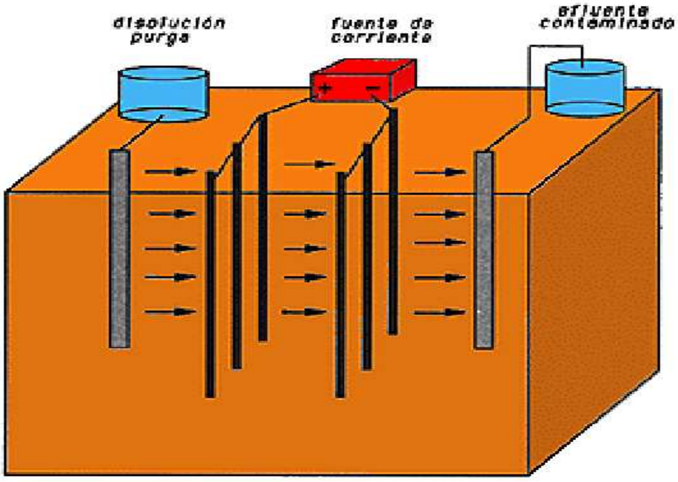


Figura 2.1.- Esquema del proceso de electroremediación. (X. Doménech, 1995).

Este procedimiento tiene como ventaja que la textura y la permeabilidad del suelo tienen una influencia ínfima en la aplicación de este tratamiento debido a que se trata del transporte masivo del contaminante a través de los poros grandes y pequeños. Esta técnica de remediación proporciona buenos resultados en el caso de metales pesados y compuestos orgánicos.

2.1.3 Inyección de aire

La inyección de aire consiste en inyectarle aire u/y oxigeno a presión al suelo a través de pozos de inyección lo cual provoca la degradación de los hidrocarburos por volatilización y por biodegradación, debido a que se estimula la actividad bacteriana al aumentar la oxigenación del suelo.

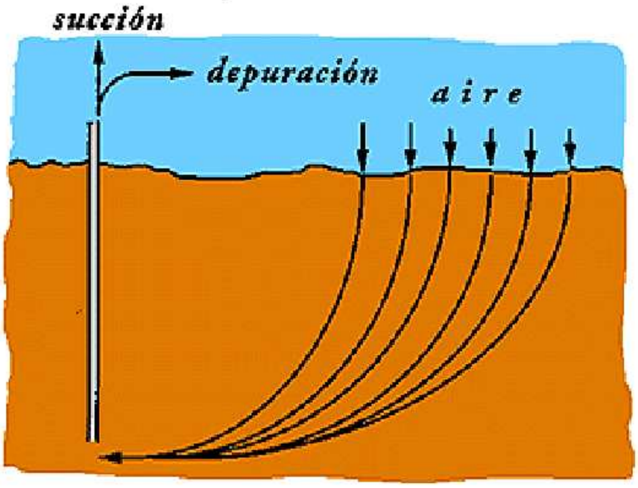


Figura 2.2.- Esquema del proceso de depuración de un suelo por aire. (X. Doménech, Ed. Miraguano, 1995).

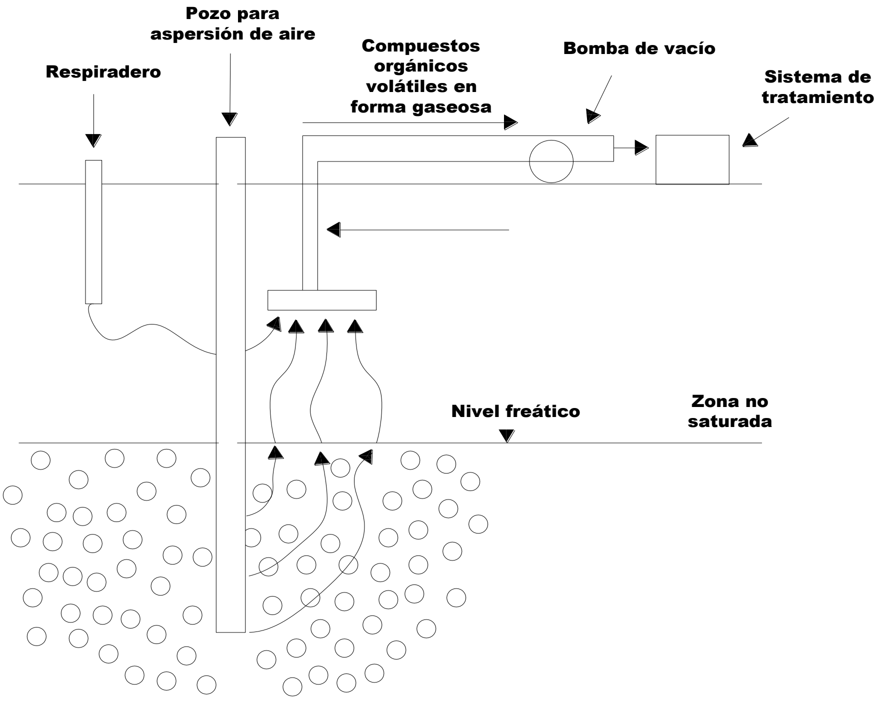


Figura 2.3.- Sistema combinado de extracción de vapores del suelo y aspersión de aire. (EPA, 1996).

Hay que tener en cuenta que las moléculas más pequeñas se degradaran más fácilmente, es un proceso lento y los contaminantes son devueltos a la atmósfera sin sufrir depuración sin embargo estos compuestos tienden a degradarse rápidamente.

2.1.4 Enjuague del suelo

Esta técnica consiste en inundar el suelo con una solución que transporta los contaminantes hasta un sitio donde puedan extraerse, el tipo de solución va a depender del contaminante a tratar y por lo general consiste en agua sola o con aditivos como ácidos, hidróxidos.

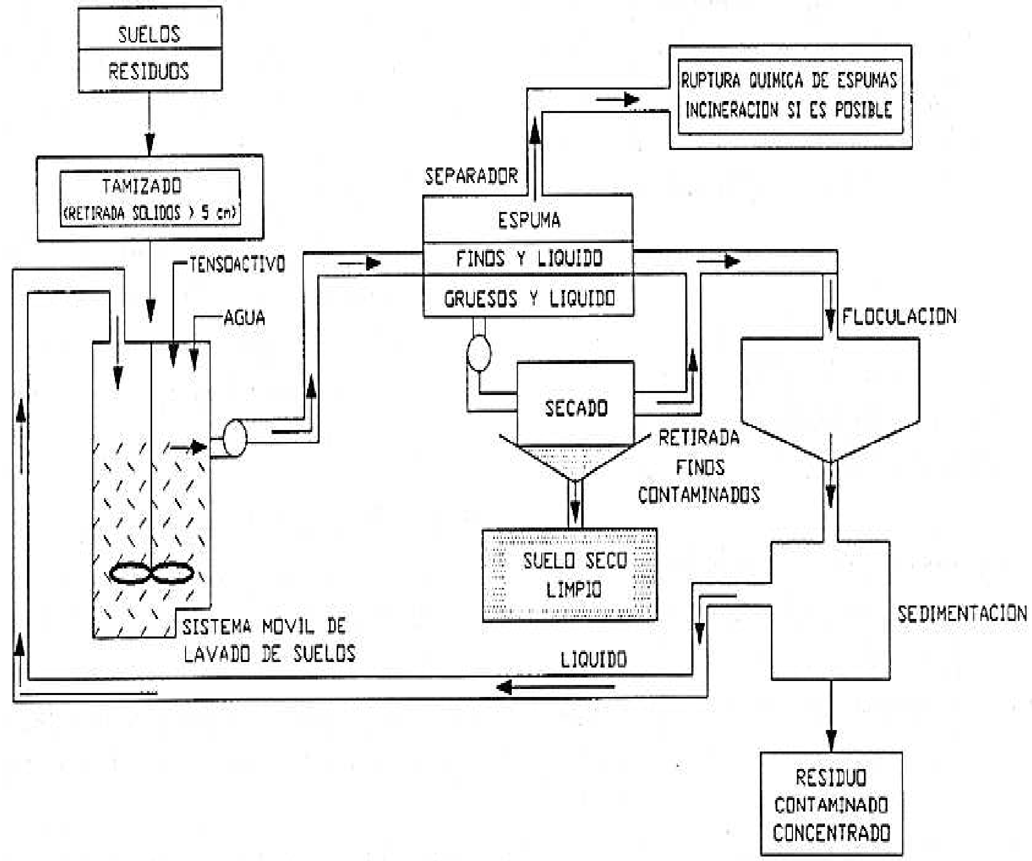


Figura 2.4.- Esquema de una planta de enjuague de suelos
(E. de Miguel García, 1995).

Cuando los contaminantes son fáciles de disolver se usa solamente agua, en el caso que sean metales y contaminantes orgánicos los cuales se encuentran por lo general en el reciclaje de baterías o en los procesos de cromado industrial se deben usar las soluciones ácidas, las soluciones básicas se usan para tratar los fenoles (alcohol) y ciertos metales.

En lugares donde hay arcilla o limo los resultados no son óptimos debido a que la solución de enjuague no puede desplazarse libremente y no entra en contacto fácilmente con el contaminante, otro inconveniente es que en ocasiones el enjuague contiene aditivos que si no se retiran completamente pueden contaminar el agua subterránea.

Cuando hay varias sustancias peligrosas como metales y aceites este tratamiento no es eficaz debido a que es difícil hacer un enjuague que sirva para retirar varios contaminantes a la vez.

Se utiliza para tratar principalmente contaminantes como metales, gasolina, plaguicidas y fuel oil, este tratamiento tiene varias ventajas a más de ser un tratamiento que se puede realizar en el sitio, crea un sistema que no es afectado por las condiciones externas y siendo el costo bajo puede usarse como tratamiento preliminar.

2.1.5 Extracción con solventes

Este tratamiento consiste en utilizar solvente para separar o retirar los contaminantes inorgánicos peligrosos, no destruyéndolos sino concentrándolos para poder reciclarlos o eliminarlos con mayor facilidad.

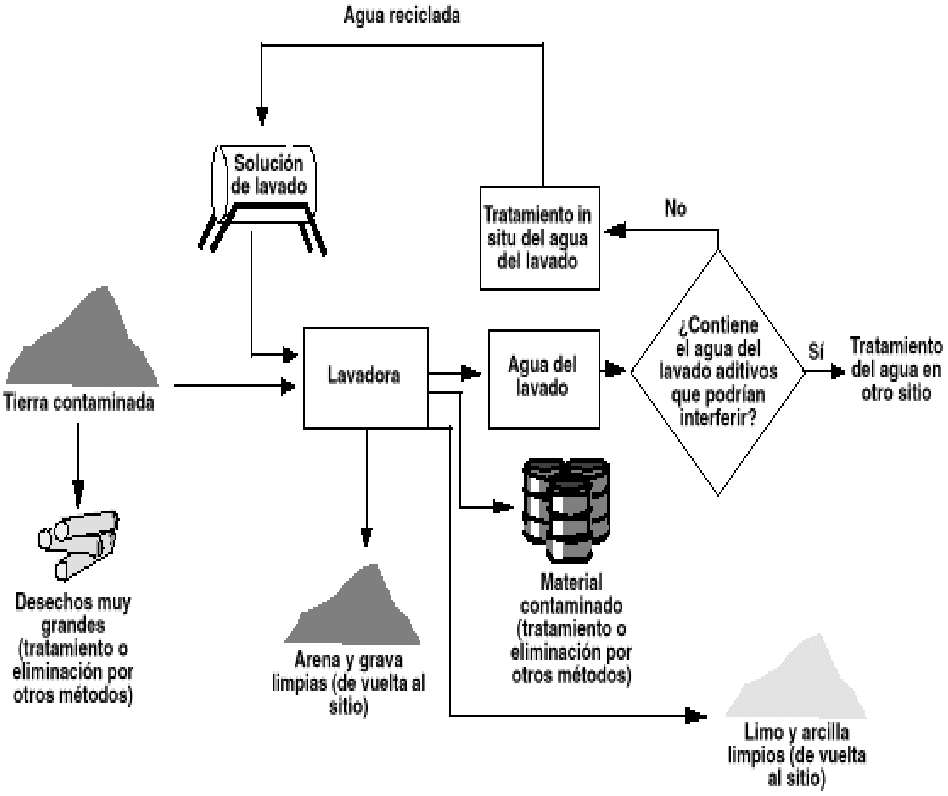


Figura 2.5.- Proceso de extracción con solventes (EPA, 1996)

Los solventes utilizados principalmente para la extracción con solventes son:

- Dióxido de carbono liquido

- Butano
- Propano
- Acetona
- Metanol
- Éter dimetílico

Al poner en contacto la tierra contaminada con el solvente dentro de un tanque, ésta se dividirá en tres elementos: agua, sólido y solventes con contaminantes disueltos, cada uno de estos componentes pueden ser tratados de manera individual; este método es eficaz para tratar fangos residuales, suelo con contaminantes orgánicos y desechos de petróleo, no es recomendable para contaminantes inorgánicos puesto que en la mayoría de los solventes estos materiales no se disuelven fácilmente.

2.1.6. Incineración

La incineración es utilizada para destruir sustancias orgánicas y en algunos casos hasta para transformar ciertas sustancias inorgánicas en condiciones controladas en sólidos inertes y gases. Este proceso transforma los metales pesados en sus óxidos los cuales son menos tóxicos, también ha sido utilizada en la eliminación de compuestos procedentes de plaguicidas con óptimos resultados.

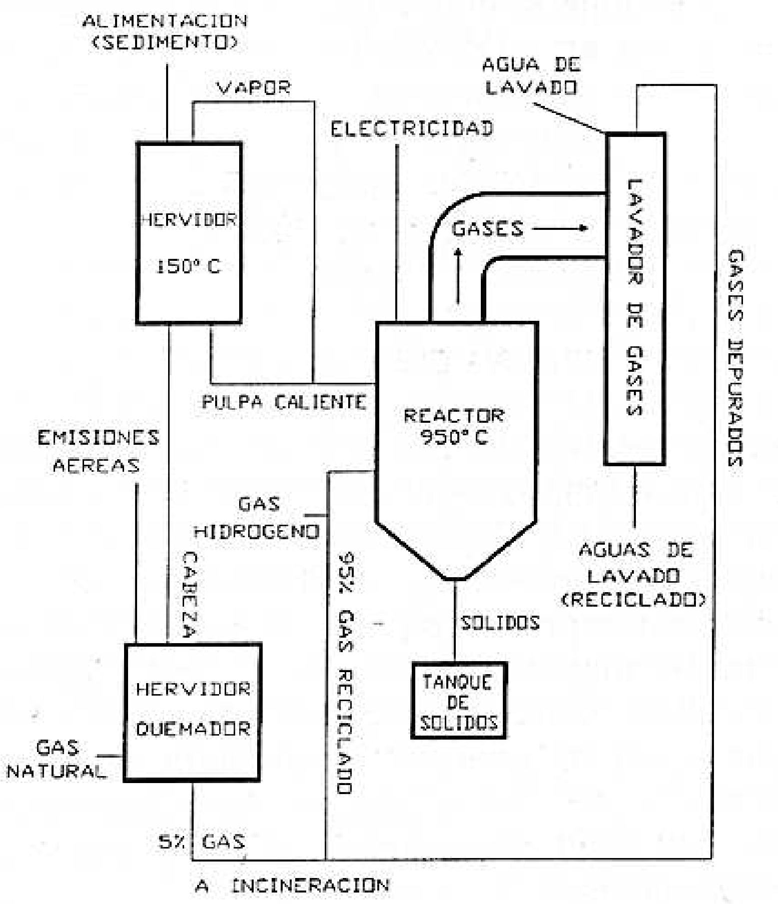


Figura 2.6.- Esquema de incineración
(E. de Miguel GARCIA, 1995).

2.1.7 Fitorremediación

La Fitorremediación utiliza plantas capaces de crecer en suelos contaminados, este tratamiento puede asimilar, inmovilizar o extraer los contaminantes, también acelera la degradación de los compuestos orgánicos en los contaminantes por medio de plantas con la capacidad fisiológica y bioquímica para descontaminar suelos. Pueden usarse para limpiar solventes, compuestos radioactivos, plaguicidas, metales pesados, petróleo crudo, hidrocarburos y lixiviados.

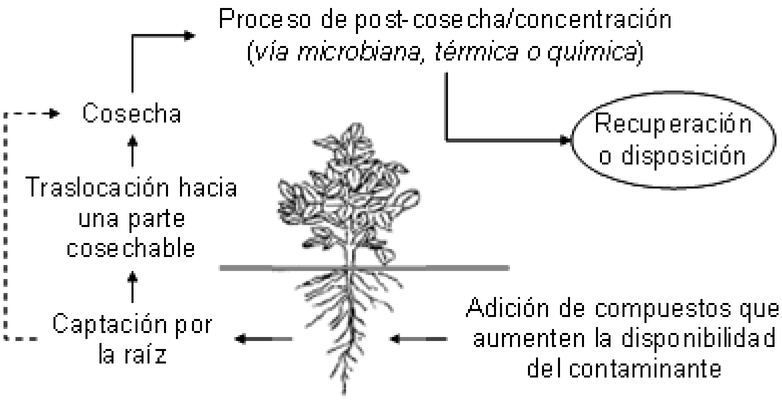


Figura 2.7.- Proceso de Fitorremediación (Cunningham y Ow,1996).

Las medidas fitocorrectivas son tratamientos mucho más lentos que otras y la profundidad de acción es hasta donde llegan las raíces, es recomendable usarlo para extraer los restos de contaminantes que hayan quedado al usar otras técnicas de remediación y en lugares donde las concentraciones de los contaminantes sean bajas.

Tabla 2.1 Métodos de Fitorremediación

Tipo	Proceso Involucrado	Contaminación Tratada
Fitoextracción	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (principalmente, la parte aérea)	Cadmio, cobalto, cromo, niquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc
Rizofiltración	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos	Cadmio, cobalto, cromo, niquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc isótopos radioactivos, compuestos fenólicos
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire.	Lagunas de deshecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc
Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)
Fitodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenceno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

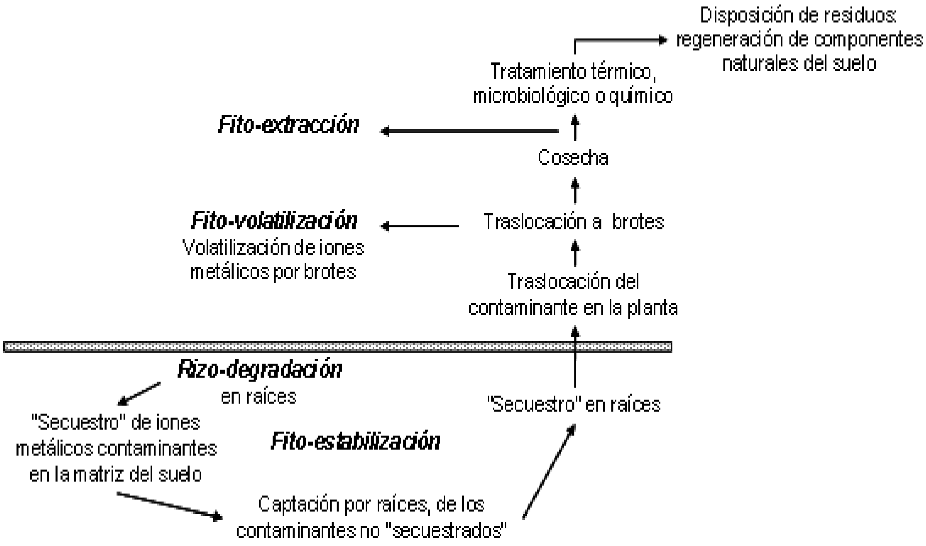


Figura 2.8.- Métodos de Fitorremediación (Singh et al, 2003).

2.1.8 Biorremediación

La biorremediación consiste en usar microorganismos (hongos, bacterias) para acelerar la tasa de degradación natural de los contaminantes para descomponerlas o degradarlas en sustancia menos toxicas o no toxicas obteniendo un suelo útil para la agricultura por el uso de nutriente.

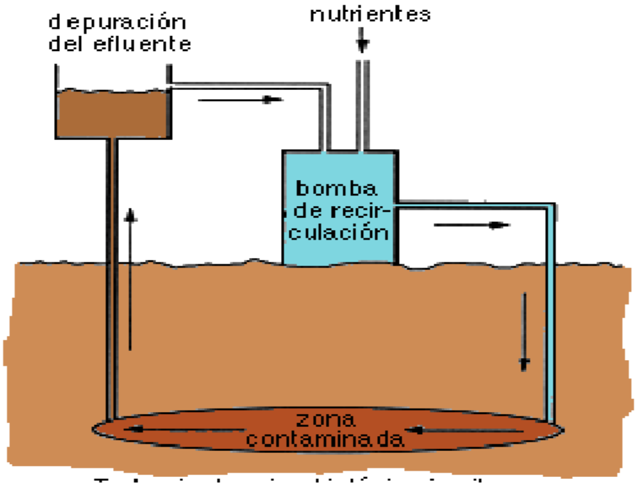


Figura 2.9.- Tratamiento microbiológico in situ
(X. Domenech, 1995)

Algunos microorganismos se comen las sustancias orgánicas obteniendo de éstas los nutrientes y la energía que requieren para sobrevivir, los microorganismos descomponen los contaminantes dando como resultado principalmente dióxido de carbono y agua. Al degradarse todos los contaminantes es decir al acabarse la fuente de alimentación de los microorganismos la población de los mismos disminuye hasta desaparecer.

2.1.9 Tratamiento térmico

Esta técnica consiste en suministrar calor al sitio afectado, sometiendo el suelo a altas temperaturas (entre los 1000º C) se produce la desintegración de los contaminantes, se realiza en dos fases, en la primera se oxida la mayor parte de los contaminantes y en la segunda fase se elimina el contaminante por completo los contaminantes y los gases manteniendo el suelo a altas temperaturas. Este tratamiento es comúnmente usado para eliminar la contaminación producida por hidrocarburos poliaromáticos.

En algunos casos se somete el suelo a temperaturas mas bajas (entre 250 y 550 ºC) consiguiendo con esto la desorción de los contaminantes en lugar de la destrucción de los mismos, es muy usada para remediar suelos contaminados con lubricantes, aceites minerales, gasolinas y en ciertos casos metales pesados como el mercurio.

2.1.10 Atenuación natural

Aunque no esta considerada como una técnica de remediación está incluida en las técnicas in situ de bajo costo, consiste en la biotransformación natural es decir utiliza los procesos físico-químicos que se dan entre el suelo y el contaminante de forma natural.

Estos procesos reducen la concentración de los contaminantes por medio de la dispersión, volatización, dilución, biodegradación y todas las reacciones que ayuden a la degradación del contaminante.

2.1.11 Solidificación o estabilización

Esta técnica se encarga de inmovilizar el contaminante reduciendo la generación de los lixiviados, es especialmente útil para residuos altamente peligrosos que no son posibles de destruir como es el caso de los compuestos inorgánicos.

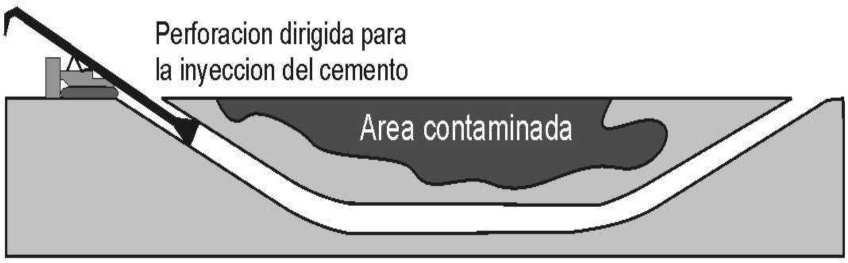


Figura 2.10.- Esquema del proceso de inyección de lechada de cemento bajo una mancha de contaminación
(Fuente: http://html.rincondelvago.com/000551542.jpg).

Este tratamiento tiene un origen muy antiguo, al observar la eficiencia de la mezclas de suelo-cemento en la construcción de los terraplenes se adopto esta técnica a la remediación de suelos.

2.2 Selección de las técnicas de remediación

Antes de seleccionar una técnica de remediación es necesario recopilar información sobre:

- ✓ Características del contaminante.
- ✓ Características ambientales, geográficas, demográficas, hidrológicas y ecológicas del sitio.
- ✓ Características del suelo.
- ✓ Disponibilidad de capital.

La adecuada selección del tratamiento determinara el éxito del mismo, siendo aconsejable hacer un estudio para determinar la efectividad de la técnica, dicho estudio se hace con muestras extraídas del sitio, el estudio se puede realizar en tres partes, en el laboratorio para obtener información del contaminante y para aplicar un tratamiento de remediación las muestras para determinar la eficiencia, y en el campo con una planta piloto para corroborar la eficacia del tratamiento in situ.

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas de algunos métodos de remediación. (Heinke, 1999)

Métodos de Remediación	**Ventajas**	**Desventajas**
Extracción por fluidos	❧ El procedimiento es sencillo.	❧ Solo funciona en suelos permeables. ❧ No es efectivo en suelos con alta absorción.
Tratamiento electroquímico	❧ Proporciona buenos resultados en el caso de metales pesados y compuestos orgánicos. ❧ La textura y la permeabilidad del suelo tienen una influencia ínfima en la aplicación de este tratamiento. ❧ El contaminante puede separarse con facilidad del suelo, incluso en forma pura.	❧ Costos elevados en cuanto a equipos. ❧ El suelo tratado pierde ligeramente su fertilidad. ❧ Es necesario hidratar el suelo 24 horas antes de la aplicación del tratamiento.
Inyección de aire	❧ Bajo presupuesto económico.	❧ Procedimiento lento.
Enjuague del suelo	❧ Su proceso y efectividad no son afectados por las condiciones externas. ❧ Siendo el costo bajo puede usarse como tratamiento preliminar. ❧ Efectivo para tratar suelos arenosos o muy permeables.	❧ En arcilla o limo los resultados no son óptimos debido a que la solución de enjuague no puede desplazarse libremente y no entra en contacto fácilmente con el contaminante. ❧ En ocasiones el enjuague contiene aditivos que si no se retiran completamente pueden contaminar el agua subterránea. ❧ Cuando hay varias sustancias peligrosas como metales y aceites este tratamiento no es eficaz debido a que es difícil hacer un enjuague que sirva para retirar varios contaminantes a la vez.

Métodos de Remediación	Ventajas	Desventajas
Extracción con solventes	❧ Es eficaz para tratar contaminantes orgánicos,	❧ No es aplicable para extraer contaminantes inorgánicos debido a que estos materiales no se disuelven fácilmente en la mayoría de los solventes.
Incineración	❧ Se pueden tratar grandes volúmenes en tiempo cortos	❧ Emisiones gaseosa. ❧ Alto costo de los incineradores.
Fitorremediación	❧ Se requiere un mínimo mantenimiento y el manejo de materiales es mínimo. ❧ Pueden eliminar los últimos restos de contaminantes atrapados en el suelo que a veces quedan con las técnicas mecánicas de tratamiento. ❧ El suelo queda fértil y puede crecer nueva vegetación.	❧ Las medidas fitocorrectivas son tratamientos mucho más lentos que otras y la profundidad de acción es hasta donde llegan las raíces. ❧ Aplicable para sitios con concentraciones bajas de contaminantes. ❧ Los contaminantes acumulados en las hojas puede liberarse al ambiente. ❧
Tratamiento térmico	❧ Permite tiempos rápidos de limpieza	❧ La principal desventaja de utilizar este método es que el suelo queda desprovisto de toda la materia orgánica imposibilitándolo así para su posterior utilización.
Atenuación natural	❧ Una vez remediado el suelo no se altera la estructura físico-químico del suelo. ❧ Son mínimas la transferencia de los contaminantes hacia otros sitios. ❧ Los costos son menores que otros costos de remediación.	❧ Tiempos de remediación considerablemente largos. ❧ Se requiere monitoreos a largo plazo.
Solidificación o estabilización	❧ Bajo costos en equipos.	❧ Solo se retiene el contaminante.

Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de los métodos de remediación clasificadas de acuerdo a su aplicación in situ y ex situ (Volke y Velasco, 2002).

	In Situ	**Ex Situ**
Ventajas	• Permite tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar. • Potencial disminución en costos.	• Menor tiempo de tratamiento. • Más seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogenizar y muestrear periódicamente.
Desventajas	• Mayores tiempos de tratamiento. • Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo. • Dificultad para verificar la eficacia del proceso.	• Necesidad de excavar el suelo. • Aumento de costos e ingeniería para equipos. • Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante.

Tabla 2.4 Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, clasificadas de acuerdo con el tipo de tratamiento (Volke y Velasco, 2002).

	Ventajas	**Desventajas**
Tratamientos biológicos	• Son efectivos en cuanto a costos. • Son tecnologías mas benéficas para el ambiente para el ambiente. • Los contaminantes generalmente son destruidos. • Se requieren un mínimo o ningún tratamiento posterior. • No requieren grandes cantidades de energía. • No produce dióxido de azufre ni otras emisiones dañinas. •	• Requieren mayores tiempos de tratamiento. • Es necesario verificas la toxicidad de intermediarios y/o productos. • No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano.
Tratamientos fisicoquímicos	• Son efectivos en cuanto a costos. • Pueden realizarse en periodos cortos. • El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería.	• Los residuos generados por técnicos de separación, deben tratarse o disponerse aumentando en costos y necesidades de permisos. • Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes, requiriendo un sistema de recuperación.
Tratamientos térmicos	• Permite tiempos rápidos de limpieza.	• Es el grupo de tratamientos más costoso. • La principal desventaja de utilizar estos métodos es que el suelo queda desprovisto de toda la materia orgánica imposibilitándolo así para su posterior utilización.

Tabla 2.5 Cuadro comparativo de costos de algunas técnicas de remediación (Fuente: www.ine.gob.mx, *Folleto de campo de experiencia del Ingeniero Francisco Torres).

Métodos de Remediación	**Cronograma valorado**		
	Tiempo de ejecución	**Costo de la remediación (Mano de obra, equipos y materiales)**	**Observaciones**
Extracción por fluidos	2 a 6 meses	238 $/m3	
Tratamiento electroquímico	Una cuantas semanas hasta 6 u 8 meses	350 $/m3	Varían según la extensión del terreno, el material de los electrodos, conductividad el suelo, los costos de energía.
Inyección de aire*	1 a 2 meses	25 $/m3	Solo fracciones livianas de petróleo
Lavado del suelo*	2 a 4 meses	35 $/m^3	
Fitorremediación*	Superior a 6 meses	120 $/m^3	Puede requerir varios ciclos de cultivo
Biorremediación*	Superior a 6 meses	150 $/m^3	
Solidificación o estabilización	Dependiendo el volumen en una horas hasta algunas semanas	110 $/m^3	

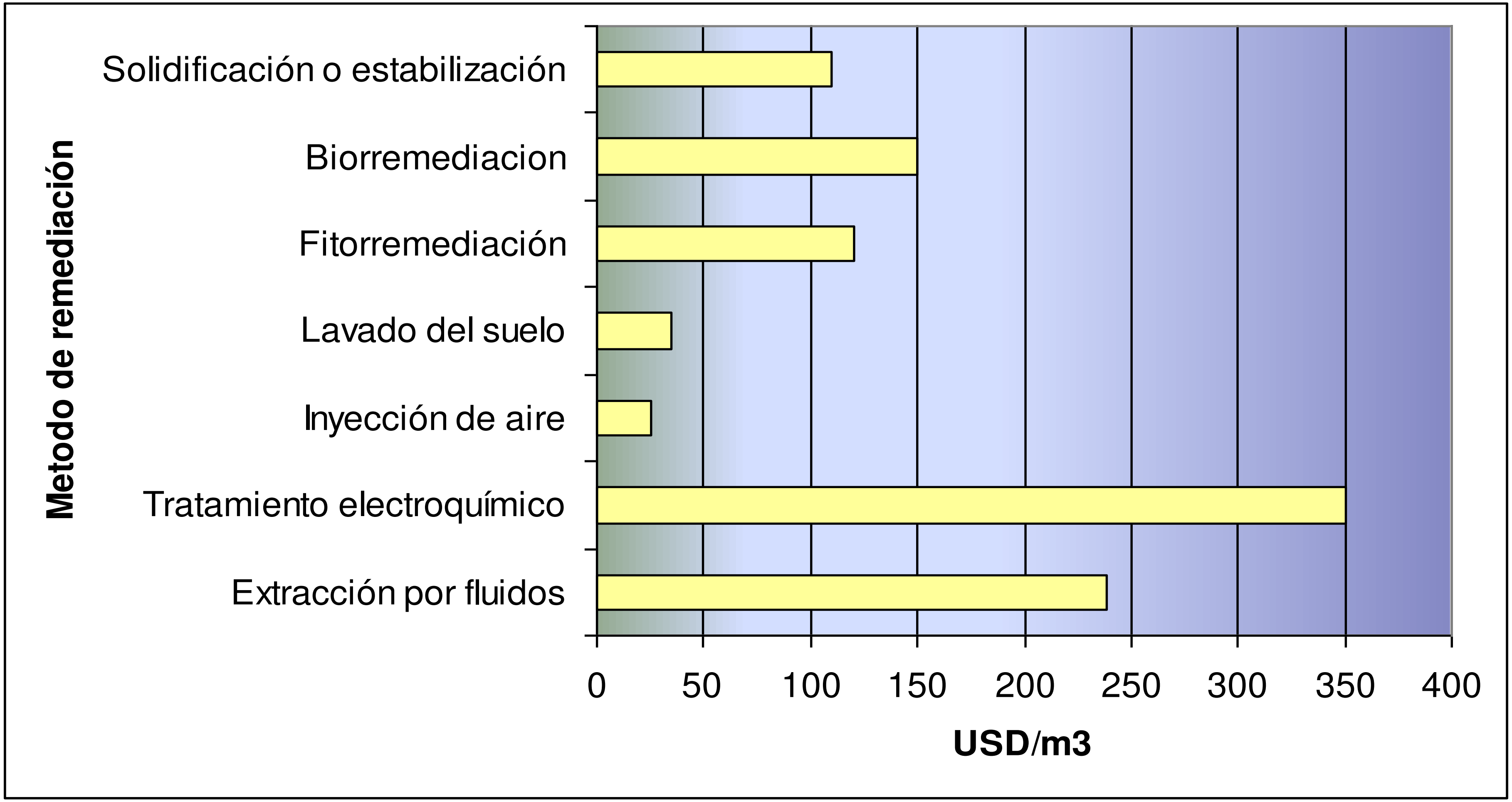


Grafico 2.1.- Valoración grafica de los métodos de remediación expresados en dólares. (Toledo, 2009)

2.2.1 Características del contaminante

Previo a la selección de una técnica de remediación es importante obtener información del contaminante así como el tipo de contaminante (orgánico e inorgánico) la concentración, toxicidad, movilidad dentro del medio, etc. Algunas de las características del contaminante son:

Estructura del contaminante.- Todos los compuestos químicos tienen características únicas que establecen el grado de movimiento y la capacidad de degradarse, su estructura química determina su solubilidad, volatilidad, polaridad, y la capacidad de reacción.

Toxicidad.- La toxicidad para los seres vivos es un factor importante para decidir el tipo de tratamiento de remediación, aunque el contaminante en sí no sea toxico, algunos de sus componentes pueden ser tóxicos para ciertos microorganismos, retardando o impidiendo la biodegradación.

Concentración.- La concentración determina si el suelo contaminado puede remediarse con el uso de tratamientos biológicos o si se requiere utilizar tratamientos térmicos o fisicoquímicos.

Solubilidad.- Esta característica determina la disponibilidad de los compuestos en su fase liquida es decir la cantidad del compuesto que puede disolverse en agua por lo tanto la biodegradabilidad de un compuesto depende de la solubilidad.

Difusión.- Está definida como la capacidad de movimiento que tiene el contaminante a través del suelo, la difusión determina el grado de degradación.

Volatización.- Es el proceso en el que una sustancia pasa de su estado liquida a su estado sólido o gaseoso, la volatización depende del tipo de contaminante, contenido de humedad, temperatura, concentración y porosidad del suelo.

Densidad.- La densidad determina la tendencia del contaminante a quedarse en la superficie del suelo o de penetrar en el mismo.

Biodegradabilidad.- Es la predisposición de una sustancia para ser transformado por medio de mecanismos biológicos, los microorganismos del suelo oxidan con mayor rapidez los compuestos no tóxicos.

2.2.2 Localización y características del sitio

Estos dos factores tienen una gran incidencia en el momento de elegir una técnica de remediación de suelos para asegurar la efectividad del trabajo de limpieza. Estos dos factores determinan el equipo que se podrá emplear y la capacidad tecnológica a utilizarse varía ampliamente.

2.2.3 Características del suelo

El suelo representa un sistema de minerales no consolidados y de partículas orgánicas meteorizadas por la acción del viento, agua y aire. Debido a que su matriz está conformada por minerales, agua, aire, materia orgánica y organismos vivos, las cuales son características propias del terreno, limitan las opciones en el momento de seleccionar una técnica de remediación. Algunos datos como lo son el tamaño de la partícula, la densidad aparente, permeabilidad, pH, contenido de materia orgánica, humedad, pueden obtenerse fácilmente y son factores que determinan la eficiencia de la tecnología de remediación. El tamaño de partículas establece el grado de contaminación que habrá, siendo los suelos arenosos y de gravas finas más fáciles de ser remediados; si el terreno es muy heterogéneo no serán factibles los tratamientos in situ por lo tanto los suelos arenosos tiene un mayor grado de dificultad.

La característica que determina la efectividad en los tratamientos in situ es la permeabilidad mientras que la humedad establece el tipo de tecnología puesto que si hay mucha humedad, está, puede impedir el paso del aire a través del suelo afectando el proceso de biorremediación.

2.3 Factores que inciden en la eficiencia de una tecnología de remediación

La efectividad de una tecnología de remediación está determinado por varios factores que interactúan de forma compleja y están supeditadas a las características del contaminante así como las del suelo. Para la selección de una tecnología de remediación es imprescindible conocer las propiedades del suelo y del contaminante.

Entre los factores a considerar están:

- ✓ Procesos físicos (sorción, advección, dispersión, difusión, volatización y solubilidad)
- ✓ Procesos químicos (reacciones de hidrólisis, oxidación, reducción, fotólisis)
- ✓ Procesos biológicos (biodegradación, biotransformación y toxicidad)

Para facilitar la elección se debe obtener una descripción detallada de los siguientes aspectos:

- ✓ Tipo de instalación que dio origen a la contaminación.
- ✓ Magnitud de la contaminación
- ✓ Ubicación geográfica
- ✓ Uso del suelo afectado
- ✓ Formas de acceso al sitio
- ✓ Ubicación de poblaciones y cuerpos de agua
- ✓ Características ecológicas

A menudo se realiza un estudio de tratabilidad con la finalidad de determinar si la técnica seleccionada tendrá éxito en el momento de su aplicación, dicho estudio se realiza tomando muestras representativas del suelo contaminado.

CAPITULO 3

BIORREMEDIACION

3.1 Definición

La Biorremediación consiste en el uso de microorganismos tales como: enzimas, levaduras, hongos o bacterias, para descomponer o degradar sustancias peligrosas. Los microorganismos así como los seres humanos se alimentan de sustancias orgánicas, estando éstas formadas por átomos de carbono y de hidrogeno, de las cuales obtienen nutrientes y energía, siendo esta técnica menos agresiva para la naturaleza ya que es 100% natural y de mas bajo costo que las otras técnicas de remediación.

La utilización de los microorganismos en los procesos ambientales se viene dando desde finales de 1950 y comienzos de 1960, se comenzaron a utilizar principalmente para la limpieza de aguas residuales. La biorremediación se desarrolló entre las décadas de los 80 y 90, se ha aplicado exitosamente en suelos contaminados con hidrocarburos cuando las condiciones de biodegradación son óptimas, aunque el tiempo que requiere para completar el proceso de limpieza es mayor que otras técnicas (Osorio,2003).

El tratamiento biológico tiene un alto grado de efectividad en remediar los suelos a un bajo costo de operación, la factibilidad de tratar el suelo in situ y ex situ lo hace la opción más usada para tratar suelos contaminados con hidrocarburos. Dichos procesos se pueden dar en dos condiciones: aerobias (en presencia de oxigeno) o anaerobias (no hay oxigeno presente) aunque hay microorganismos facultativos, es decir que pueden sobrevivir sin o con la presencia del oxigeno.

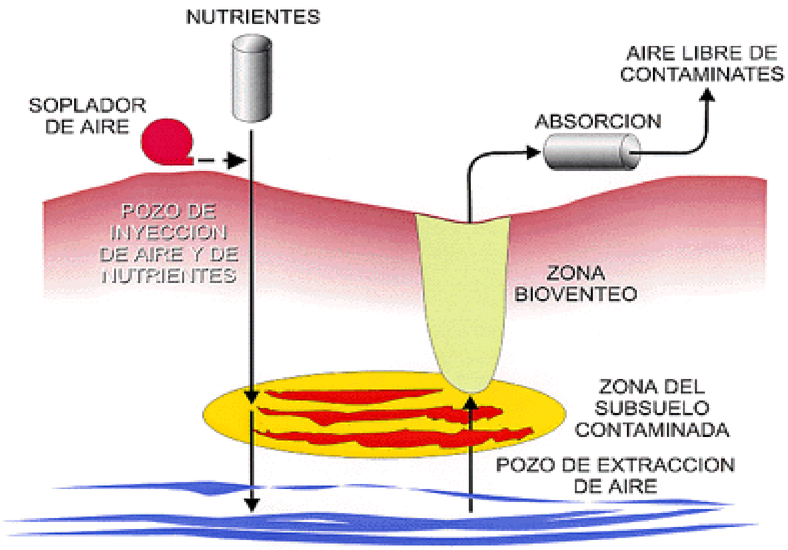


Figura 3.1.- Proceso de Bioremediación *in situ* de agua y suelo (Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental, 2001).

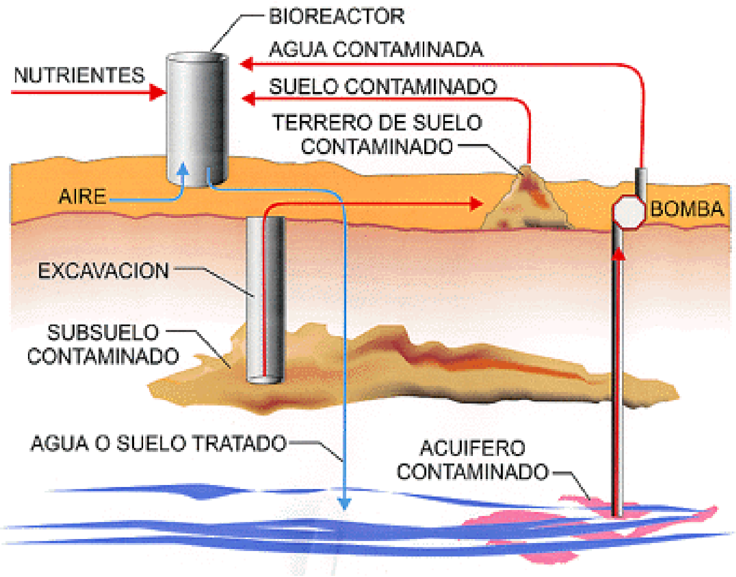


Figura 3.2.- Proceso de Bioremediación *ex situ* de agua y suelo (Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental, 2001).

La efectividad de este tratamiento depende de muchos factores: tipo y concentración del contaminante, concentración de nutriente, concentración de microorganismos, condiciones ambientales, etc.

3.2 Tipos de biorremediación

La Biorremediación dependiendo las necesidades y características del problema se subdivide en varias metodologías (Velasco y Volke, 2002):

3.2.1 Bioaireación: Consiste en estimular la biodegradación natural de los contaminantes de forma pasiva estimulando la actividad microbiana a través de gases, como el metano y oxigeno. Se utiliza principalmente para tratar suelos orgánicos semi volátiles o no volátiles.

3.2.2 Bioestimulación: Esta estrategia radica en adicionar soluciones acuosas que contengan nutrientes como el nitrógeno y fósforo para mejorar la biodegradación de contaminantes orgánicos o para la inmovilización de los inorgánicos. Se aplica en suelos contaminados con pesticidas y se ha comprobado buenos resultados con desechos de municiones.

3.2.3 Bioaumentación: Esta técnica se aplica cuando los microorganismos de la microflora son insuficientes para degradar los contaminantes y cuando se requiere el tratamiento inmediato del sitio contaminado, consiste en la adición de una alta concentración de microorganismos vivos capaces de degradar los contaminantes. Se ha usado para tratar suelos contaminados con insecticidas, herbicidas y con desechos con altas concentraciones de metales.

3.2.4 Biolabranza: Consiste en mezclar el suelo contaminado periódicamente con los nutrientes por medio del arado del mismo para favorecer la aereación, para optimizar la degradación las condiciones del suelo deben ser registradas constantemente. Se ha tratado con éxito los contaminantes como el diesel, lodos aceitosos, gasolina, algunos pesticidas.

3.2.5 Compostaje: Es un proceso biológico por medio del cual se trata los suelos contaminados mezclándolos con elementos orgánicos sólidos como paja, aserrín, estiércol y desechos agrícolas para regular la cantidad de nutrientes, aumentar la generación del calor y la aereación. Este proceso se utiliza principalmente en el tratamiento de residuos sólidos municipales, domésticos, de agricultura y fangos de depuradoras.

Figura 3.3.- Proceso de compostaje de suelo contaminado
(Fuente: Biosoil).

Las temperaturas altas que se producen en las pilas del compost fomentan la eliminación de algunos componentes peligrosos, las temperaturas generalmente superan los 55º C.

3.3 Desarrollo tecnológico de la Biorremediación

Durante los primeros años la industria petrolera de Estados Unidos utilizó esta técnica de manera rudimentaria debido a que nació de los conocimientos empíricos de los operadores de refinerías, colocando los lodos y otros residuos aceitosos como una capa delgada sobre el suelo en lugares cercanos a la refinería, dándose cuenta que al cabo de unos meses los residuos desaparecían, luego de estrictos estudios y una regulación y control del procedimiento, esta técnica pasó a utilizarse como tratamiento de remediación. Los científicos comprobaron que ciertos microorganismos, especialmente las bacterias son capaces de utilizar el hidrocarburo del petróleo como alimento y fuente de energía, las bacterias oxidan el petróleo transformándolo en dióxido de carbono, agua y energía.

Figura 3.4.- Biodegradación aerobia en suelos contaminados con hidrocarburos (Fuente: EPA, 1996).

Posteriormente las investigaciones determinaron cuáles eran las condiciones óptimas para que se pueda dar y acelerar el proceso de Biorremediación, la necesidad de mantener el suelo húmedo fue una de las primeras conclusiones a la que llegaron, otro descubrimiento importante fue el mantener el suelo en condiciones aerobias, haciendo más rápido el proceso.

La adición de nutrientes orgánicos, principalmente nitrógeno y fósforo estimulan en proceso, debido a que los hidrocarburos de petróleo son casi exclusivamente hidrogeno y carbón conteniendo pocos elementos esenciales para las bacterias como lo son el nitrógeno, fósforo, potasio entre otros.

La mayoría de los descubrimientos sobre la biodegradación de los hidrocarburos se dieron en los laboratorios, fueron las personas que se encontraban trabajando en la industria petrolera los cuales implementaron los descubrimientos en el campo, usando membranas plásticas como fondo de las celdas y sistemas de drenaje para almacenar lixiviados para no contaminar el suelo nativo.

Algunos microorganismos debido a la presencia prolongada de contaminantes en los suelos han desarrollado la capacidad bioquímica para degradarlos, asimilando sustancias que son peligrosas para los seres humanos, tales como combustibles o solventes. Una vez degradados los contaminantes, la población de microorganismos se reduce al agotarse su alimento.

Las pequeñas poblaciones de los microorganismos que quedan no representan ningún riesgo ya que se quedan en el suelo formando parte de la materia orgánica del mismo. El proceso de Biorremediación normalmente ocurre en la naturaleza pero de manera lenta.

3.4 Fundamento Bioquímico de la Biorremediación

El proceso de biodegradación da inicio cuando los microorganismos transforman los contaminantes mediante reacciones químicas, los compuestos pueden ser orgánicos o inorgánicos y los procesos comprenden las reacciones de oxidación y reducción, absorción, intercambio de iones y reacciones de quelación.

El fundamento bioquímico esta basado en las reacciones de oxido-reducción que se producen en la cadena transportadora de electrones de las células la cual tiene por finalidad proveer de energía, los compuestos hidrocarburazos son los sustratos orgánicos que catalizan dichas reacciones actuando como donadores de electrones degradando así los contaminantes.

Los receptores de electrones más usados por los microorganismos son los nitratos, los sulfatos, el oxigeno, el hierro (III) y el dióxido de carbono. La respiración bacteriana se produce en condiciones aerobias cuando el oxigeno es utilizado como aceptor y cuando son usados los sulfatos o el dióxido de carbono las condiciones son anaerobias.

Tabla 3.1 Tipos de reacciones en los procesos de degradación aeróbicos y anaeróbicos.

Degradación aerobia:	Sustrato + O_2 → Biomasa + CO_2 + H_2O
Degradación anaerobia:	Sustrato + NO_3^- → Biomasa + CO_2 + N_2 Sustrato + SO_4^{2-} → Biomasa + CO_2 + S^{2+} Sustrato + Fe^{3+} → Biomasa + CO_2 + Fe^{2+} Sustrato + Mn^{4+} → Biomasa + CO_2 + Mn^{2+} Sustrato + CO_2 → Biomasa + CO_2 + CH_4

Biomasa: Se define como la materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen.
Sustrato: Es el lugar que sirve de asiento a una planta o a un animal fijo.

3.5 Factores que afectan en la efectividad de los procesos de Biorremediación

La efectividad de los procesos de biorremediación está sujeta a varios factores que interactúan de forma compleja dependiendo de las características del suelo y del contaminante entre otras. Los factores se pueden vivir en tres grupos: físicos, químicos y medioambientales.

- Factores físicos
  - Presencia de agua
  - Disponibilidad del contaminante para los microorganismos
  - Aceptor de electrones

- Factores químicos
  - Estructura química del contaminante
    - Solubilidad
    - Toxicidad
    - Volatización
    - Biodegradabilidad
    - Polaridad
    - Densidad

- Factores medioambientales
  - Temperatura
  - Humedad
  - pH
  - Nutrientes

El agua en los procesos de Biorremediación es uno de los factores importante, aunque los microorganismos obtienen los nutrientes de las soluciones, se requieren condiciones mínimas de humedad, un exceso de humedad provocaría la disminución de la concentración de oxigeno en el suelo inhibiendo así el crecimiento de los microorganismos con la aparición de zonas anaerobias, el rango de humedad para recuperar suelos está entre 150 y 250 gramos de agua por kilo de terreno seco (Eweis,1999).

Algunas veces los microorganismos no pueden estar en contacto con los contaminantes porque muchos no son solubles en agua concentrándose en las partículas sólidas, algunos pueden acumularse en intersticios menores a 1 μm evitando el crecimiento de las colonias microbianas. Hay varios aceptores electrones que se pueden emplear para promover la respiración microbiana tales como el 7, NO_2^-, SO_4^{2-}, Fe^{3+}, CO_2 pero sigue siendo el oxigeno el más usado en terrenos no saturados.

Los microorganismos son extremadamente sensibles a los cambios de las condiciones físicas, químicas y medioambientales, por ejemplo algunas bacterias crecen a temperaturas que varían entre 0º hasta 25º C o 30º C, mientras que otras bacterias pueden crecer a temperaturas de hasta 99º C. (Henry y Heinke, 1996).

El pH más adecuado para el crecimiento de las bacterias oscila en un rango de 6.5 a 7.5 teniendo como límites 4 y 10, en cambio los mohos y levaduras efectúan mejor su función en medios ácidos (pH entre 0 y 7). El rango para el mejor desarrollo de los microorganismos es entre 6 y 9, siendo entre 7 y 8 el rango óptimo para su crecimiento.

Los nutrientes son una necesidad imprescindible para el crecimiento y la supervivencia de los organismos, los nutrientes deben estar disponibles para que los microorganismos los asimilen y sinteticen. Los nutrientes principalmente son el fósforo y el nitrógeno. En algunos casos los microorganismos se encargan de producir los nutrientes que necesitan a partir de otros.

Los microorganismos metabolizan la materia orgánica de dos maneras diferentes:

- En la fermentación se producen reacciones de oxido-reducción sin la presencia de un aceptor de electrones externo, la materia orgánica cumple las funciones de dador y receptor de electrones a la vez. En el proceso de fermentación no se oxidan todos los átomos de carbono por lo cual no se desprende toda la energía potencial bajando así el rendimiento, siendo éste el motivo por el que no es muy usado este proceso.

- En la respiración interviene un aceptor de electrones mientras que la materia orgánica funciona como dador de electrones, cuando el aceptor de electrones es el oxígeno el proceso es aerobio y cuando se trata de compuestos como el NO_3^- o el SO_4^{2-} se produce un proceso anaerobio, los microorganismos que emplean el oxígeno como aceptor de electrones desprenden mayor energía que aquellos que utilizan los nitratos o sulfatos entre otros, en los procesos aerobios los microorganismos se reproducen con mayor rapidez haciendo este proceso más conveniente que los procesos anaeróbicos.

3.6 Diversidad microbiana en los sitios contaminados

Las poblaciones microbianas que predominan en los suelos contaminados son aquellas capaces de sobrevivir y de reproducirse en un medio lleno de toxicidad, alimentándose de los contaminantes si las condiciones externas se prestan para esto. Los suelos contaminados contienen una gran cantidad de microorganismos entre bacterias y hongos que representan aproximadamente 104 o 106 células por gramo de suelo. Las bacterias de la clase de las *Pseudonomas* son usualmente encontradas en los suelos contaminados y en los suelos en procesos de remediación. Dentro de las especies de las *Pseudomonas* tenemos las *Aeruginosa, Cepacia, Putida y la Stutzeri*. Hay algunos tipos de *Pseudomonas Putida* capaces de metabolizar el tolueno.

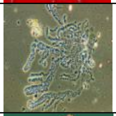
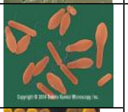
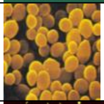
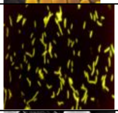
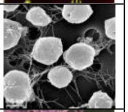
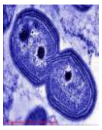
Varias especies de hongos como la *Aspergillus fumigatus* y la *Absidia corymberifera* entre otros han sido encontradas en suelos contaminados con pesticidas, en el caso de los suelos contaminados con hidrocarburos la diversidad microbiana es reducida pero contienen más microorganismos que los suelos no contaminados, las bacterias *Pseudomonas y Methanobacterias s*e desarrollan prósperamente en los suelos contaminados con hidrocarburos.

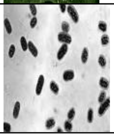
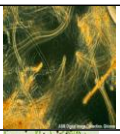
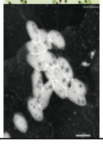
3.7 Tipos de bacterias usadas en los procesos de Biorremediación

Existen una gran variedad de bacterias usadas en la recuperación de suelos contaminados, como por ejemplo la bacteria *Deinococcus radiodurans* siendo un *extremofilo* resiste condiciones extremas como: la radiación, compuestos mutagénicos, radiación, sequedad, por esa razón es comúnmente usado para eliminar compuestos radioactivos en el suelo.

Algunas bacterias usan a los hidrocarburos como fuente de carbono para su crecimiento, solo algunas especies son capaces de degradar hidrocarburos gaseosos, mientras un mayor numero de bacterias es capaz de degradar hidrocarburos parafínicos. Existen más de 25 clases de bacterias y hongos capaces de degradar hidrocarburos. En la tabla 3.2 se incluyen bacterias que degradan hidrocarburos entre otros:

Tabla 3.2 Tipos de bacterias mas comunes usadas en los procesos de remediación.

Grupo de bacterias	Genero		Importancia ambiental
Bacterias de descomposición	Pseudomonas		Degrada compuestos orgánicos
	Flavobacterium		Degrada proteína
	Zooglea		Organismo formador de floculos en plantas de lodos activados
	Clostridium		Producen ácidos grasos a partir de materia orgánica en un digestor anaerobio
	Micrococcus		
	Methanobacterium		Producen metano gaseoso a partir de ácidos grasos en un digestor anaerobio
	Methanococcus		
	Methanosarcina		
Bacterias nitrificantes	Nitrobacter		Oxidan compuestos nitrogenados inorgánicos
	Nitrosomonas		
Bacterias desnitrificantes	Bacillus Pseudomonas		Reducen nitratos y nitritos a nitrógeno gaseoso u oxido nítrico
Bacterias degradadoras de cloro	Pseudumonas transgenicas		Degradan compuestos tóxicos que contienen cloro (como el vinilcloruro) en compuestos menos nocivos
Bacterias fijadoras de nitrógeno	Azobacter Beijerinckia		Capaces de fijar el nitrógeno atmosférico en NH3

Grupo de bacterias		Genero		Importancia ambiental
Bacterias reductoras de sulfatos		Desulfovibrio		Interviene en la corrosión de tuberías de hierro
Bacterias fotosintéticas		Chlorobium		Reducen sulfuros a azufre elemental
		Chromatium		
Bacterias férricas	Filamentosas	Sphaerotilus		Dan volumen a los lodos en las plantas de lodos activados
	Oxidantes del hierro	Leptothrix		Oxidan el hierro ferroso
Bacterias degradadoras de hidrocarburos		Pseudomonas Arthrobacter Actinomyces Aerobacter Flaviobacterium Corynebacterium Sphingomonas Micrococcus	 	Degradan hidrocarburos

Existen también algunos tipos de hongos capaces de degradar contaminantes, pero a diferencia de las bacterias son las raíces de los hongos las que se incuban, pueden ser plantados sobre los suelos contaminados o pueden sembrarse en medios líquidos para luego ser rociados. El Cladophialophora es un tipo de hongo usado frecuentemente en la degradación del tolueno, etilbenzeno y xileno.

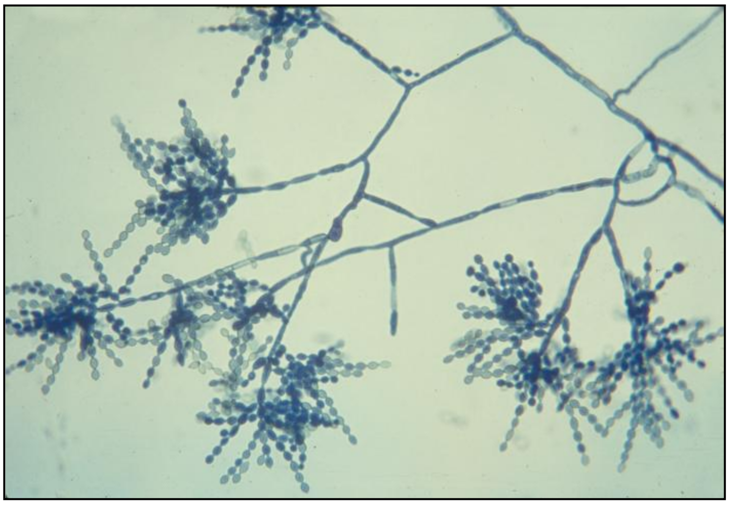


Figura 3.5.- Cladophialophora (Georg, 2007).

3.8 Ventajas y desventajas de la aplicación de esta técnica

Las ventajas en la aplicación de la Biorremediación sobre otras técnicas radica en que es menos costosa, elimina los contaminantes en su totalidad, el proceso se adapta fácilmente al medio y el suelo puede ser reutilizado, los microorganismos mueren una vez finalizado el proceso y es 100% natural lo que resulta muy conveniente tomando en cuenta que las otras antes mencionadas sobre trasladar los contaminantes de un lugar a otro, son más costosas y más complicadas en su aplicación.

Uno de los puntos negativos en los procesos de Biorremediación es la dificultad de aplicar el tratamiento en suelos arcillosos por su alta permeabilidad, también el tiempo de acción es largo dependiendo del tipo de contaminante.

Los microorganismos se pueden inhibir cuando hay grandes cantidades de contaminantes y tal vez la más importante desventaja es la dificultad de mantener las condiciones ambientales necesarias para la supervivencia de los microorganismos así como la cantidad necesaria de nutrientes para su crecimiento.

CAPITULO 4

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

4.1 Selección del tratamiento a aplicar

Para la selección de una técnica de bioremediación para un suelo determinado, contaminado con uno o más sustancias, los criterios de selección son los siguientes:

- Ubicación geográfica de la zona de contaminación.
- Planos hidrográficos del sitio estudiado.
- Geología y estudio geográfico del sector (hidrogeología, formaciones, propiedades del suelo, conductividad).
- Ubicación de las zonas urbanas colindantes al terreno contaminado.
- Características del contaminante.
- Estudio hidrogeológico de la zona.
- Flora y fauna de la zona.

Cuando la contaminación es reciente, se deberá investigar la cantidad aproximada y el tipo del contaminante para determinar el grado de contaminación, caso contrario se deberá analizar los sucesos que provocaron la contaminación.

4.2 Tipos de muestreo

Debido a la naturaleza compleja del suelo se requiere que el muestreo sea realizado meticulosamente, no sólo para determinar ciertas propiedades que son imposibles de observar en el campo sino también para observar características cuya determinación en el lugar de estudio es imprescindible, como las estructuras y consistencia de los agregados del suelo.

Al ser las muestras utilizadas para realizar diversos tipos de ensayos y análisis, la toma de la mismas es diferente, por ejemplo cuando se requiere análisis de materia orgánica, pH, cationes, el muestreo es de tipo general, lo que no ocurre con las características micromorfológicas y biológicas en donde es aconsejable no alterar mucho la estructura natural del suelo.

4.3 Obtención de la muestra

La muestra debe ser representativa, teniendo en cuenta el tiempo desde que se produjo la contaminación y la profundidad del mismo, acorde con la extensión del área contaminada y en base a la experiencia documentada, se muestra la siguiente tabla.

Tabla 4.1.- Cantidad minima de muestras (Fuente: Profepa, 2003)

Área Contaminada (ha)	**Punto de muestreo**
HASTA 0.1	4
0.2	8
0.3	12
0.4	14
0.5	15
0.6	16
0.7	17
0.8	18
0.9	19
1.0	20
2.0	25
3.0	27
4.0	30
5.0	33
10.0	38
15.0	40
20.0	45
30.0	50
40.0	53
50.0	**55**
100.0	**60**

Las muestras deben cubrir toda el área afectada y deberán ser representativas, tomando en cuenta que la profundidad de la toma de las mismas dependerá del grado de contaminación del sitio a estudiar así como de la entidad ambiental de control. Con la finalidad de garantizar la adecuada toma de muestras por cada 6 o 7 muestras se tomara unas muestras testigo, para la determinación de Compuestos Inorgánico Tóxicos.

Cuando la contaminación ha alcanzado profundidades menores de 80 centímetros, se tomara entre cinco y 20 muestras, cuando es mayor la profundidad el numero de muestras depende principalmente de la entidad ambiental de control y de la persona encargada de la toma de muestras.(Fuente: Efficacitas, Norma de suelo).

Para la toma y selección de muestras se trazara una cuadricula de 9 m^2. sobre el área afectada, tomando en cuenta que si la extensión del suelo contaminado es grande se tomaran muestras en los nudos de la cuadricula, en los casos que el área sea mínima o tenga forma irregular, el numero de muestras en cada cuadricula no debe tener menos de 5 muestras se optara por una de dos opciones:

- Trazar las cuadriculas en dimensiones mas pequeñas.
- Tomar las muestras al azar.

La adecuada toma de muestras es indispensable para garantizar las condiciones iniciales, es imprescindible que las muestras no sufran cambios significativos en sus propiedades físicas, químicas y biológicas por lo cual es necesario escoger cuidadosamente los recipientes adecuados para evitar la pérdida de cualquiera de sus propiedades.

Los recipientes para las muestras deben cumplir con ciertas características como: el ser nuevos, deberán ser compatibles con el o los contaminantes y con el tipo de prueba a realizarse. Estos deberán ser resistentes, herméticos, sellables y permitir un adecuado etiquetado.

En base a las características anteriores, las muestras de suelo suelen recolectarse en recipientes de vidrio o de plástico. Se podrán utilizar bolsas de plástico sólo cuando las muestras sean de naturaleza inorgánica y si se trata de compuestos orgánicos es preferible usar vidrio o metal.

En los recipientes correspondientes a toma de muestra de compuestos orgánicos se aplicará disolventes orgánicos para la adecuada limpieza de los mismos, en cuanto a los compuestos inorgánicos, se requerirá una limpieza con agua ionizada y en el caso de los metales será un enjuague con acido nítrico.

Tabla 4.2.- Materiales y recipientes para las muestras de suelo. (Contaminación y depuración de suelos. Instituto tecnológico geominero de España)

Materiales de los recipientes	**Muestras para la determinación de**		
	Metales	**Compuestos orgánicos**	**Otros compuestos y características**
Bolsa o frasco de plástico	✓	✗	✓
Frasco de cristal con tapón de PTFE u otro material polimérico	✓	✓	✓
Camisa metálica con tapa de plástico	✗	✓	✓
Camisa metálica con recubrimiento interior de plástico	✓	✗	✓
Camisa de plástico	✓	✗	✓

4.4 Requerimiento de seguridad en el proceso de obtención de muestras

Los sitios contaminados pueden tener concentraciones de materiales que son perjudiciales, para las personas cuyo trabajo es la obtención de muestras. A pesar de presentar concentraciones minimas de estos materiales, se requiere de un estricto control y protocolos de seguridad para evitar accidentes y proteger al personal técnico de una exposición innecesaria a químicos peligrosos.

Por ello, el equipo mínimo de seguridad debe incluir:

- Casco.
- Respiradores.
- Lentes de Seguridad.
- Botas de seguridad.
- Guantes e indumentaria contra materiales peligrosos.

Además de lo anterior descrito y en base al tipo de contaminante se adaptara la indumentaria de seguridad apropiada.

4.5 Procedimiento de muestreo

El procedimiento seguro de muestreo se sustenta en los siguientes pasos:

- Determinar la ubicación y el número de puntos de muestreo.
- Determinar el equipo y técnica de muestreo a emplearse.
- Establecer los tipos de recipiente, preservación y transporte de la muestra.
- Evitar el uso de equipos y recipientes que provoquen la pérdida de las propiedades de la muestra.
- Procurar tomar todas las medidas de seguridad para evitar la propagar la contaminación durante la extracción de las muestras.

En los casos que se sospeche la presencia de hidrocarburos ajenos al problema de contaminación que se esta analizando, se deberán tomar muestras para establecer niveles, base para los análisis y si es posible, obtener una muestra del mismo en su fase libre, que sirva para calibrar el equipo de análisis.

4.6 Almacenamiento y transporte de la muestra

Aparte de los casos en los que se requiera hacer los análisis in situ, las muestras deben ser almacenadas y transportadas al laboratorio, teniendo así, como prioridad, minimizar el tiempo entre la toma de la muestra y su análisis. Para tal efecto y tomando en cuenta varios contaminantes se propone usar la información de la siguiente tabla:

Tabla 4.3.- Tiempo aproximado que puede mantenerse inalterada una muestra de suelo (a 4º C y en l oscuridad) en función de los parámetros a determinar. (Contaminación y depuración de suelos. Instituto tecnológico geominero de España)

Parámetro químico a determinar	**Tiempo máximo de conservación (días)**
Aceite mineral	4
Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs)	4
Pesticidas organoclorados	10
Policlorobifenilos (PCBs)	10
Hidrocarburos organohalogenados extraíbles (EOX)	10
Compuestos orgánicos volátiles (VOCs)	1

Para muestras sensibles a cambios de temperatura, el tiempo de transporte no deberá superar aquel donde se asegure su refrigeración. Se debe tomar en cuneta que las muestras contenidas en recipientes de vidrio son mas susceptibles a daños por lo cual se tomara el debido cuidado en el momento de su manipulación.

Considerando los diferentes parámetros a analizar se presenta la tabla No. 4.4, donde se indica la toma, conservación y transporte de las muestras.

Tabla 4.4.- Condiciones para la muestra, transporte y conservación de la muestra. (Contaminación y depuración de suelos. Instituto tecnológico geominero de España)

Parámetro	**Toma de muestras**		**Conservación y transporte**	**Observaciones**
	Envase	**Limpieza**		
Humedad y peso seco	Vidrio	Agua destilada	4º C en oscuridad	
pH	Vidrio	Agua destilada	4º C en oscuridad	
Materia orgánica	Vidrio	Agua destilada	4º C en oscuridad	
Arcilla	Vidrio	Agua destilada	4º C en oscuridad	
Metales pesados	Polietileno	HNO3 + Agua destilada	4º C en oscuridad	
Cianuro	Vidrio opaca	Agua destilada	4º C en oscuridad Conservación máxima. (días): 4	Debido a su alta toxicidad manipular con gran cuidado, evitando su contacto por inhalación y/o ingestión.
Plaguicidas organoclorados	Vidrio opaco	Hexano	4º C en oscuridad Conservación máxima. (días): 4	Sustituible por acetona
Policlorobifenilos (PCB's)	Vidrio opaco	Hexano	4º C en oscuridad Conservación máxima. (días): 4	Sustituible por acetona
Hidrocarburos policilicos aromaticos (PAH's)	Vidrio opaco	Hexano	4º C en oscuridad Conservación máxima. (días): 4	Si en la muestra se ha de determinar naftaleno, parte de la misma deberá sufrir un tratamiento similar al requerido para el análisis de compuestos orgánicos volátiles.

4.7 Preservación de muestras

Las propiedades químicas del suelo suelen ser uno de los parámetros mas investigados en los análisis, por lo cual se necesita someter a las muestras a determinados procedimientos con la finalidad de minimizar los cambios producidos por la pérdida de compuestos volátiles, degradación microbiológica y reacciones químicas. La preservación de la muestra depende principalmente del objetivo de la investigación.

La preservación de la muestra de suelos sólo depende de refrigeración o congelación en lugares oscuros para evitar la pérdida de compuestos volátiles y de la activad microbiana. Sólo en los casos de determinación de compuestos orgánicos volátiles se requiere métodos químicos de preservación, tales como conservar la muestra en metanol.

En algunos casos, se podrá preservar las muestras en agua desionizada disueltos biocida previamente. Sin embargo, esto es utilizado únicamente cuando no se puede congelar la muestra o cuando no se pueden realizar los análisis inmediatamente después de tomada la muestra.

A continuación se presenta la tabla No. 4.5 donde se indica de acuerdo al parámetro o exámenes, el tipo de recipiente, temperatura de preservación y días de conservación de las muestras.

Tabla 4.5.- Recipientes para las muestras de suelo, temperatura de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro. (Contaminación y depuración de suelos. Instituto tecnológico geominero de España)

Parámetro	**Tipo de recipiente**	**Temperatura de preservación**	**Tiempo máximo de conservación**
Hidrocarburos Fracción ligera	Frasco de vidrio boca ancha, con tapa y sello de teflón (Cartucho con sello que asegure la representatividad de la muestra hasta su análisis)	4º C	14 Días
BTEX		4º C	7 Días
Hidrocarburos Fracción media		4º C	14 Días
Hidrocarburos Fracción pesada		4º C	14 Días
HAP		4º C	14 Días

Una vez sellada y etiquetada la muestra debe ser entregada inmediatamente al laboratorio para su análisis la información en la etiqueta deberá ser como mínimo la siguiente:

- Fecha y nombre del muestreo,
- Lugar de la muestra,
- Tipo de contaminación.

No se deberán analizar muestras selladas erróneamente o que sus sellos hayan sido violentados.

4.8 Ensayos de laboratorio y obtención de resultados

Los análisis de suelos permiten conocer el grado de contaminación del suelo, la concentración y su distribución en zonas saturadas y no saturadas. El o los posibles contaminantes determinan el análisis químico y biológico de los suelos, mientras que los parámetros físicos son generalmente los siguientes:

- pH
- Humedad
- Materia Orgánica (Carbono orgánico)
- Granulometría del suelo (tamaño de las partículas)
- Permeabilidad

Cuando no se puede aplicar la norma para algún parámetro, la entidad Ambiental de Control establecerá valores de referencia del parámetro en particular, determinando la concentración actual del mismo para luego hacer una comparación entre los valores de referencia y los valores obtenidos en toda el área de estudio, tomando en cuenta que si la concentración es tres veces mayor a los valores de fondo se deben tomar medidas de control inmediatamente. (ver tabla 4.6)

Tabla 4.6.- Factores Indicativos de Contaminación. (Contaminación y depuración de suelos. Instituto tecnológico geominero de España)

Factor de contaminación (Concentración presente/Valor de Fondo)	**Grado de perturbación**	**Denominación**
< 1.5	0	Cero o perturbación insignificante
1.5 – 3.0	1	Perturbación evidente
3.0 – 10.0	2	Perturbación severa
> 10	3	Perturbación muy severa

Los valores de referencia mas confiables son aquellos provenientes de las muestras tomadas en los alrededores del área de estudio, por ser considerada como no contaminada y deberán ser tomadas como mínimo cinco muestras y cuando se toman entre 5 y 20 muestras, el promedio de éstas será el valor de referencia.

Los ensayos más aplicados en casos de suelos contaminados con hidrocarburos son: el método EPA 418.1 para medir combustibles ligeros, aunque alrededor de la mitad de cualquier tipo de gasolina presente durante la manipulación y extracción puede ser detectado; y el método EPA 8260 para medir compuestos orgánicos volátiles. Otros ensayos para suelos contaminados con hidrocarburos son:

- Compuestos monoaromáticos volátiles: benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX); método EPA 8020, por cromatografía de gases o método EPA 8060 o EPA 8240 por espectrometría de masas.
- Hidrocarburos totales de gasolina y diesel, método EPA 8015
- Hidrocarburos polinucleoaromáticos: naftaleno, antraceno, fenantreno, benzopireno y otros, método EPA 8310
- Bifenilos policlorados, método EPA 8080
- Metales pesados: arsénico, bario, cadmio, cromo VI, níquel, mercurio, plata y selenio, de acuerdo con la NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993.
- Plaguicida de acuerdo con la NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993

CAPITULO 5

APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO

Se describe los tratamientos de remediación que se aplicó en muestras de suelo areno-arcillo-limoso del Abanico aluvial Mayor contaminados con gasolina proveniente de los tanques de almacenamiento de combustible de la Gasolinera, ubicada en Ave. 17 de Septiembre y Los Chirijos, ciudad de Milagro, Provincia del Guayas, cuyas coordenadas centrales UTM son: 656.350 E, 9’764.091 N y con una superficie o área de ocupación de 1396 m2.

La contaminación por este hidrocarburo se produjo debido a las filtraciones existentes en la cisterna de almacenamiento. El derrame comprometió una cantidad de suelo considerable de lo cual se extrajo 4 m^3 de material contaminado para su tratamiento de remediación en celdas ex -situ.

En estas celdas se realizaron varias actividades durante la ejecución de los procesos de recuperación del suelo, las mismas que se detallan a continuación:

5.1 Adecuación del lugar

El lugar donde se construyeron las celdas de remediación fue en un terreno vacío junto a las oficinas del Centro de Estudio del Medio Ambiente (CEMA) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral Campus “Gustavo Galindo”. A continuación se describe los pasos respectivos para la obtención de las celdas de remediación:

1. Apertura de dos zanjas para remediación, cuyas dimensiones son 2,50 m de largo; 0,80 m de ancho y 0,70 m de profundidad. Se dispusieron estas medidas para facilitar la remoción del material.

Foto 5.1.- Apertura de las zanjas

2. Colocación y compactación de una capa de arcilla de 5 cm, como sistema impermeabilizante en la parte inferior de las celdas.

Foto 5.2.- Compactación de la arcilla.

3. Adición de carbonato de calcio $CaCO_3$ .en forma de capa de 1 cm. de espesor, colocada sobre la arcilla. Este material tiene la función de estabilizar la arcilla, para evitar su erosión o transporte por procesos hidrogeológicos.

Foto 5.3.- Colocación de la cal.

4. Se colocó vegetación seca de las especies nativas (no invasivas) a las celdas para crear un ambiente orgánico óptimo en donde el proceso de descomposición bacteriano se adapte al sistema, haciendo que se descomponga con mayor facilidad las moléculas de hidrocarburos.

Foto 5.4.- Colocación de vegetación seca de las especies nativas

5.2 Manipulación y disposición del suelo contaminado

1. Se realizo la excavación en las inmediaciones de la gasolinera descrita previamente. Para tal efecto se hicieron huecos de 0.80x0,80 m.

Foto 5.5 y 5.6.- Excavaciones para observación de la contaminación en lugar donde se extrajo las muestras.

2. El material contaminado era una mezcla de arena, limo y arcilla que fue utilizado para relleno del predio. Se recolectó y transportó este material en sacos de yute hasta el sitio de estudio, en donde se extrajo pequeñas muestras para realizar las pruebas en el laboratorio.

Foto 5.7.- Material de muestra.

3. Se procedió a hacer una valoración visual del suelo que se transportó desde la gasolinera hasta el sitio de estudio, el mismo que presentaba una coloración negro verduzco y tenía un fuerte olor a gasolina sin presencia de vida animal o vegetal. Este material, dadas las condiciones del transporte y preservación presento las características originales del sitio donde se produjo el derrame.

Foto 5.8.- Valoración visual del gradote contaminación.

4. Se colocó el material en las celdas y se retiró de forma manual las rocas de tamaño mayores a 4 cm. y materiales extraños tales como fragmentos de hormigón, etc., dejando la celda con una configuración con borde libre de 20 cm.

Foto 5.9.- Colocación del material en las celdas de remediación

Foto 5.10.- Extracción de rocas

5.3 Proceso de Remediación

1. Para comenzar con los trabajos de remediación se procedió en primer lugar, a tomar la temperatura del suelo en dos puntos y a dos alturas diferentes, con la ayuda de un termómetro de punta. La medidas se realizaron a 5 cm. bajo la superficie y a 5 cm. sobre el fondo de la celda, posteriormente se le añadió agua.

Foto 5.11.- Adicción de agua al material contaminado

2. Al día siguiente se removió el suelo haciendo la respectiva toma de temperatura y colocación de agua después del registro de temperaturas. Este paso se lo efectuó 3 veces por semana y en ocasiones con más frecuencia dependiendo de la humedad existente y durante 5 meses.

Foto 5.12.- Mezcla y movimiento del suelo

5.4 Acondicionamiento nutritivo

5.4.1 Acondicionamiento nutritivo 1

1. Se añadió al material contaminado, aserrín. Luego se le agregó 1/4 de litro de bacterias diluidas en 10 galones de agua y 1/3 de taza de azúcar morena para activar las bacterias. Esto se mezcló para conseguir mayor uniformidad y se procedió a tapar la celda para mantener la temperatura menor de 75º C.

Foto 5.13.- Adición de aserrín al material.

Foto 5.14.- Preparación de las bacterias

Foto 5.15.- Colocación de las bacterias

Foto 5.16.- Protección de la celda, para mantener temperatura

2. Se realizó monitoreos de la celda en períodos de un día.

En este tiempo se pudo notar la presencia de micro fauna como cien pies, los cuales se alimentan de la materia en descomposición. En los días subsiguientes la microfauna desapareció por completo producto de precipitaciones itensas (485,1 mm) que ocasionó inundaciones en el sitio, provocando el deceso y transporte de los insectos a otros sitios y la aparición de nuevas formas de vida que se adaptaron mejor al nuevo medio, por ejemplo: Stylommatophora (babosas).

Foto 5.17.- Inundaciones en la celda de remediación.

Foto 5.18.- Presencia de babosas en el sitio.

3. Debido a las condiciones adversas (inundaciones), se procedió a evacuar el agua mediante baldes lo que produjo que las celdas estuviesen saturadas y su presentación evidenciara lodo y mezcla del material con suelo circundante.

Foto 5.19.- Extracción del agua de las celdas

4. Luego de dos semanas se pudo observar la presencia de vida vegetal.

Foto 5.20 y 5.21.- Presencia de vegetación en la celda.

Acondicionamiento nutritivo 2

1. A pesar de observar vida vegetal, no se observaba la micro fauna, se mezcló el material con aserrín para oxigenar el suelo y anular cualquier rastro de contaminante y humus enriquecido con nácaro como adición de microorganismos.

Foto 5.22.- Colocación de aserrín en la celda de remediación.

Foto 5.23.- Mezcla del aserrín.

2. Luego se adicionó vegetación viva y vegetación seca del árbol de *Saman*. Las primeras como aportación de hidrógeno y para evitar que se evapore el agua rápidamente ayudando así a oxigenar el suelo y las segundas para ser degradadas por los microorganismos.

Foto 5.24.- Colocación de vegetación viva y seca del árbol de Saman.

3. Se tapó las celdas con vegetación seca de las especies nativas (no invasivas) para retener la humedad.

Foto 5.25.- Colocación de vegetación de las especies nativas.

4. Se observo la presencian de *Actinomiceto* en grandes cantidades.

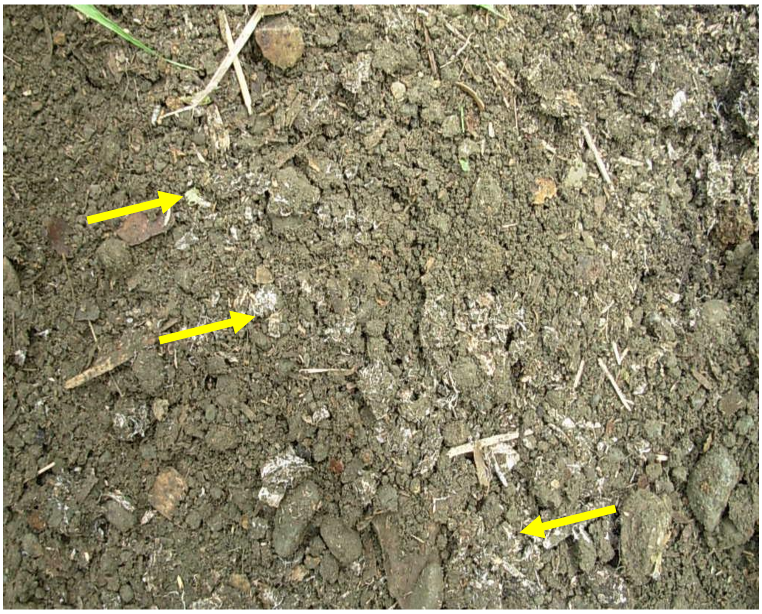


Foto 5.26.- Presencia de *Actinomicetos*.

5. Al cabo de dos semanas más, se observó la presencia en el suelo de Lombricus terrestres, con longitudes considerables, llegando a medir hasta 15 centímetros.

Foto 5.27.- Presencia de microfauna.

5.5 Aplicación de la Fitorremediación

1. Se dispuso el material remediado de las celdas en otra ubicación para su utilización como tierra de cultivo. Se mezcló el suelo con humus antes de sembrar sábila y dulcamara, también se sembró rábano y acelga en semilla pero no germinaron.

Foto 5.28.- Siembra de plantas en el material a remediar.

2. Se observó la presencia de hongos en el suelo.

Foto 5.29.- Presencia de hongos en el suelo remediado

3. En las primeras semanas, se evidenció un notorio deterioro en las plantas, no desarrollándose con normalidad y presentando una coloración morada y naranja, producto de los residuos de contaminación en el suelo que quedaban. El cultivo de plantas a más de demostrar si el trabajo de remediación fue exitoso tuvo la función de trabajo complementario de Fitorremediación.

Foto 5.30.- Leve deterioro en el estado de las plantas

4. Se procedió a cubrir con paja seca el suelo solo dejando expuestas las plantas para retener humedad y fomentar su crecimiento.

Foto 5.31.- Colocación de vegetación seca para mantener la humedad en el suelo.

5. En el transcurso de dos semanas se notaron cambios notorios y el crecimiento de las plantas se desarrolló con normalidad.

Foto 5.32.- Crecimiento de las plantas

5.6 Análisis e interpretación de los resultados

En base a la temperatura tomada de las celdas en el período de 6 meses tenemos como resultado gráficos comparativos de cómo cambió la misma con relación a la temperatura ambiental máxima y mínima, cuyos valores fueron proporcionados por el INAMHI.

5.6.1 Septiembre

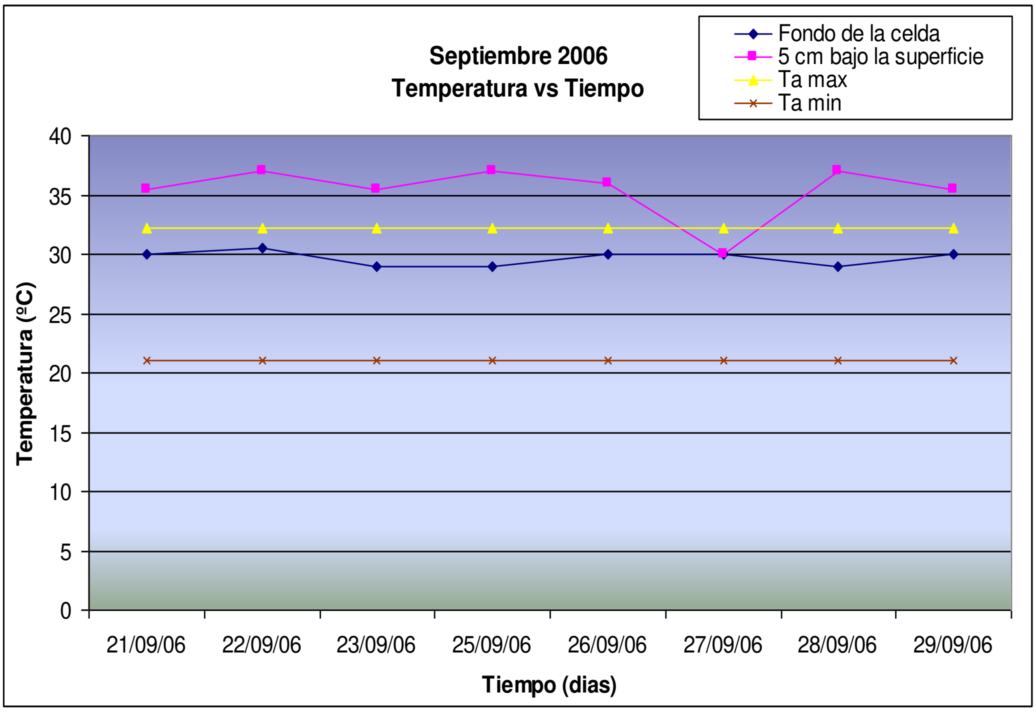


Grafico 5.1.- Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de septiembre 2006

En la primera semana se observaron temperaturas por encima de la temperatura ambiente máxima en la capa correspondiente a los primeros 5 cm. sobre la superficie, debido a la actividad bacteriana y a procesos de oxigenación y regeneración del suelo. Mientras que la temperatura correspondiente al fondo de la celda alcanzó valores casi iguales a la temperatura de ambiente máxima, lo que indica que hay un gradientetérmico entre la superficie de la celda y el fondo de la misma. En el gráfico se puede notar que la temperatura tomada el día 27 Septiembre tiene el mismo valor tanto para el fondo de la celda como en la superficie, debido a que se procedió a remover el suelo antes del registro de temperatura.

Foto 5.33.- Material contaminado con gasolina en la primeras etapas del proceso de remediación.

Octubre

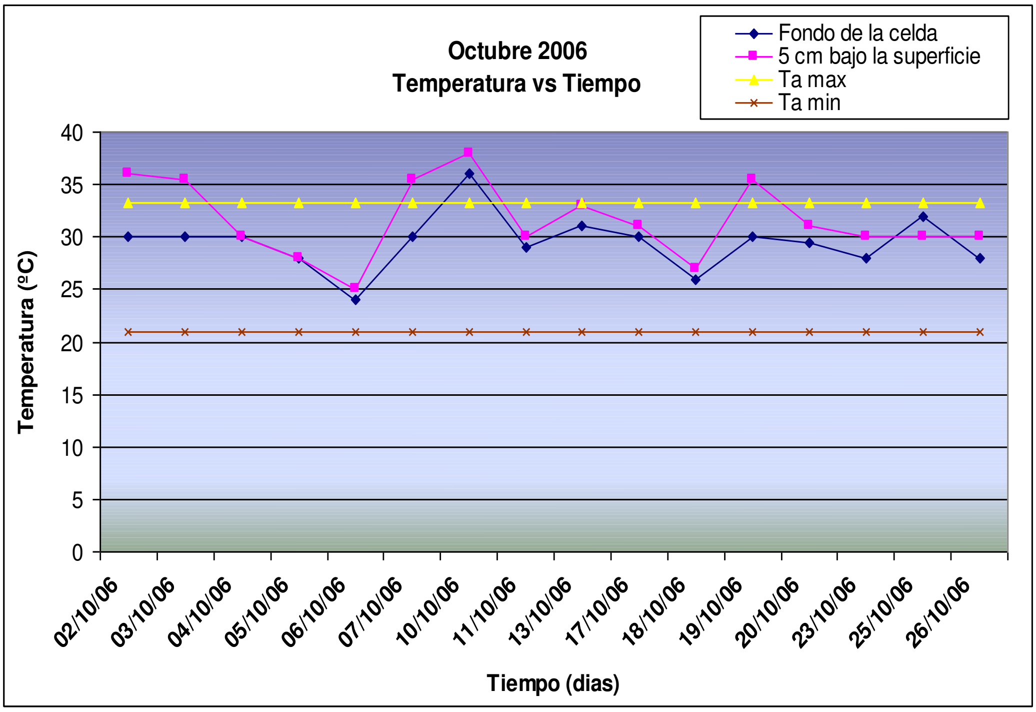


Grafico 5.2.- Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de octubre 2006

Desde el 4 de Octubre, se registró una temperatura menor a la ta max, debido a que el registro de las mismas se realizó en las mañanas con un cielo nublado, el 6 de Octubre, se llego a tener el mínimo valor registrado de temperatura, cuando se realizo la adicción de agua. A partir de esa fecha la temperatura varia dependiendo los días que se le adicionada agua y los que no.

Foto 5.34.- Comprobación visual del estado del suelo contaminado en el segundo mes de tratamiento.

Noviembre

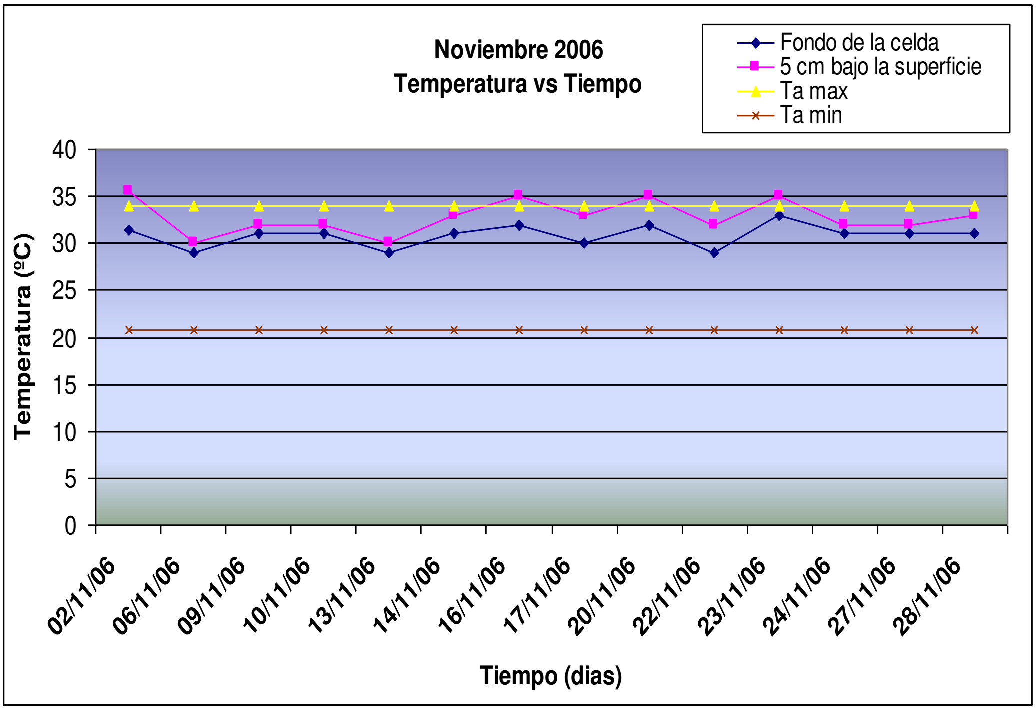


Grafico 5.3.- Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de noviembre 2006

En el mes de noviembre se tuvo temperaturas aproximadas en el fondo de la celda y en la superficie. Se produjeron cambios que estaban relacionados más con la hora de registro y las condiciones atmosféricas.

Foto 5.35.- Recuperación visible del suelo en el tercer mes de tratamiento.

Diciembre

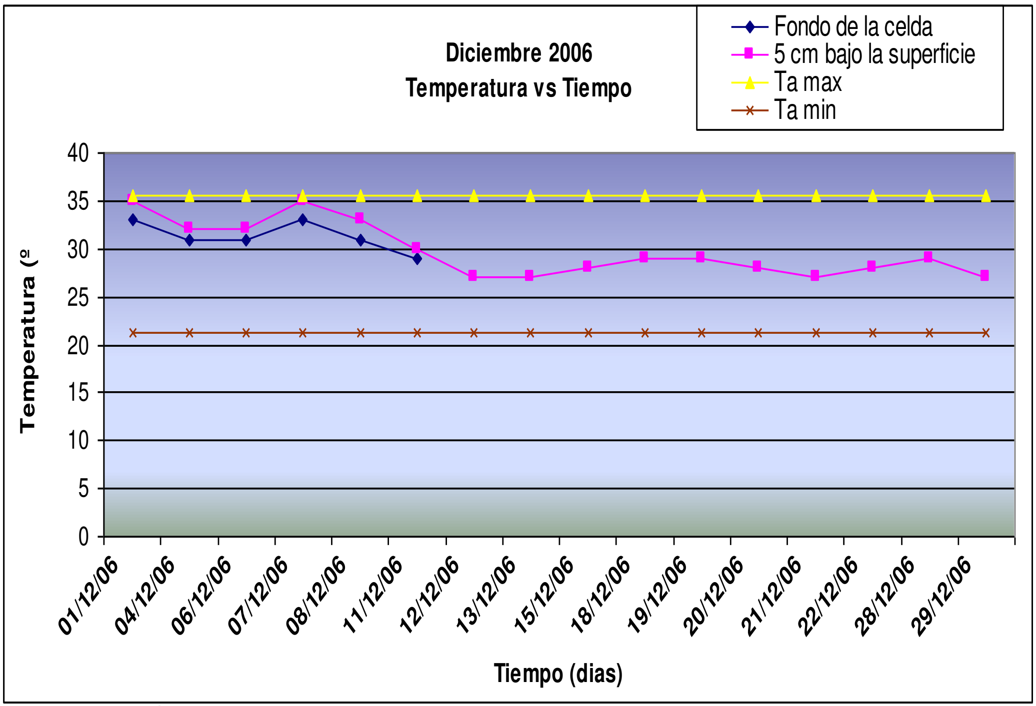


Grafico 5.4.- Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de diciembre 2006

En este gráfico es evidente que la colocación de agua en la celda juega un papel importante en la temperatura, pero la disminución de la misma se ve más afectada por las condiciones existentes en el ambiente que por la adición del líquido vital. El clima nublado sumado a las fuertes corrientes de aire constituye un sistema de enfriamiento natural que se había presentado en esos días. Luego del 12 de Diciembre no se pudieron realizar tomas de temperatura en el fondo de la celda por encontrarse llenas de agua por las precipitaciones que se produjeron en esos días que fueron alrededor de 98.3 mm.

Foto 5.36.- Acondicionamiento nutritivo 1.

Foto 5.37.- Inundación de la celda de remediación.

Foto 5.38.- Suelo completamente saturado de agua.

Enero

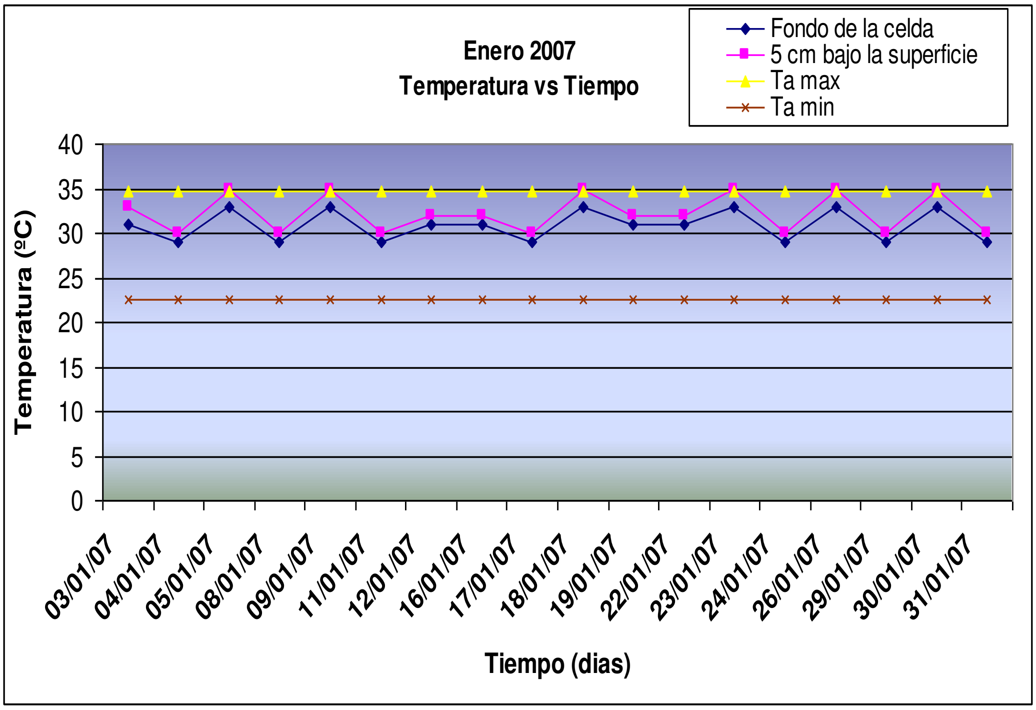


Grafico 5.5.- Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de enero 2007

En Enero, el gradiente de temperatura existente disminuyó considerablemente hasta llegar a una diferencia de 1º a 2º C, mientras que la temperatura en la celda sigue siendo afectada por las condiciones atmosféricas.

Foto 5.39.- Acondicionamiento nutritivo 2.

Febrero

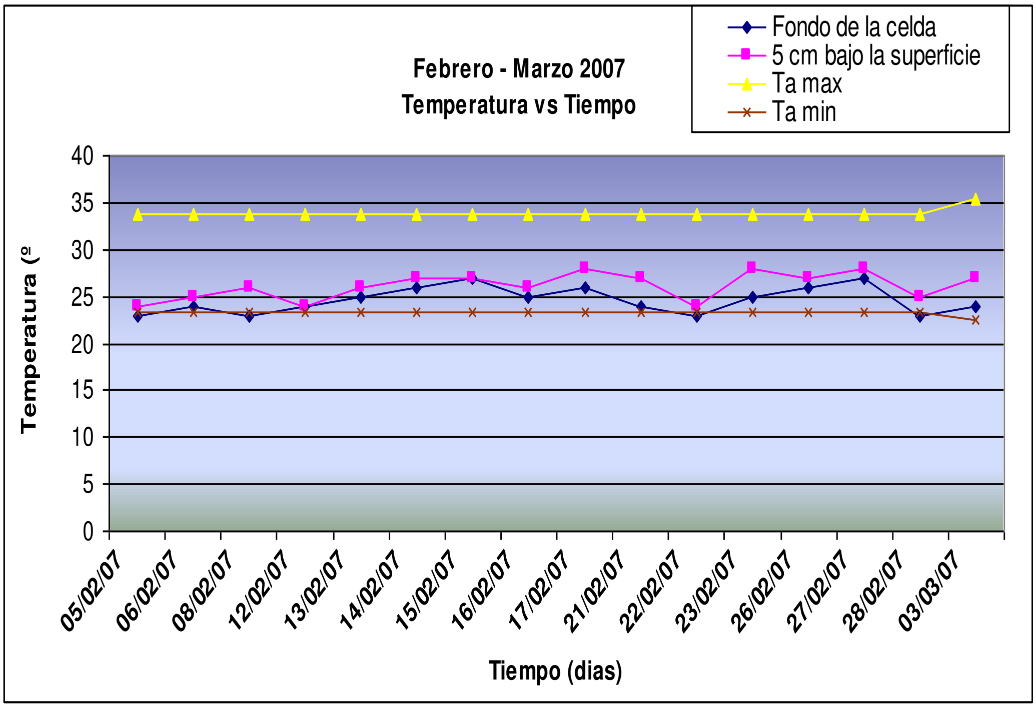


Grafico 5.6.- Temperatura vs. Tiempo, correspondiente al mes de febrero – marzo 2007

El gradiente de temperatura durante el mes de Febrero se mantuvo casi constante. Se noto una disminución de temperatura el día 13 de Febrero producto del acondicionamiento nutritivo con bacterias en las celdas de remediación, manteniendo luego de esto temperaturas por debajo del ta max.

Foto 5.40.- Crecimiento de plantas.

Parámetros de VOC’s y TPH

Los resultados obtenidos a partir del análisis de los otros parámetros se presentan en forma de gráficos y tablas en la información respectiva resumida.

Los resultados de los compuestos orgánicos volátiles (VOC) tuvieron un decrecimiento considerable, disminuyendo a valores menores que el 0.5%.

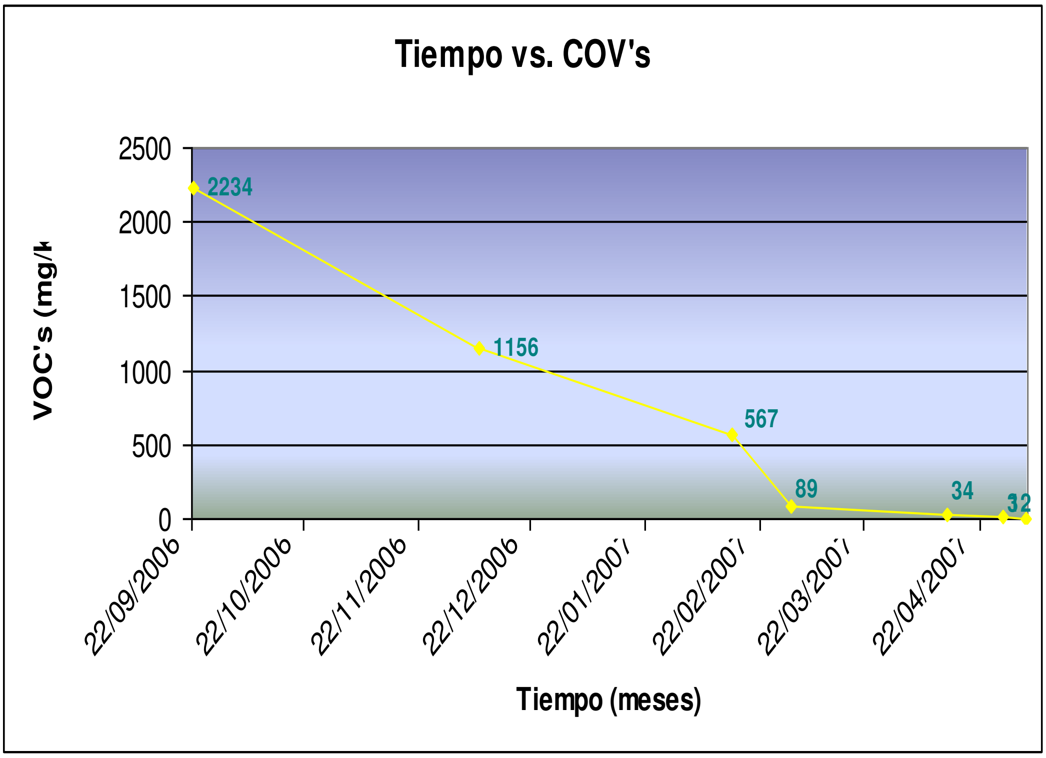


Grafico 5.7.- Tiempo vs. VOC’s, en un periodo de seis meses

Los valores de TPH muestra que una declinación lenta al principio pero luego se da un decrecimiento abrupto que coincidió con la aplicación de la fitorremediación.

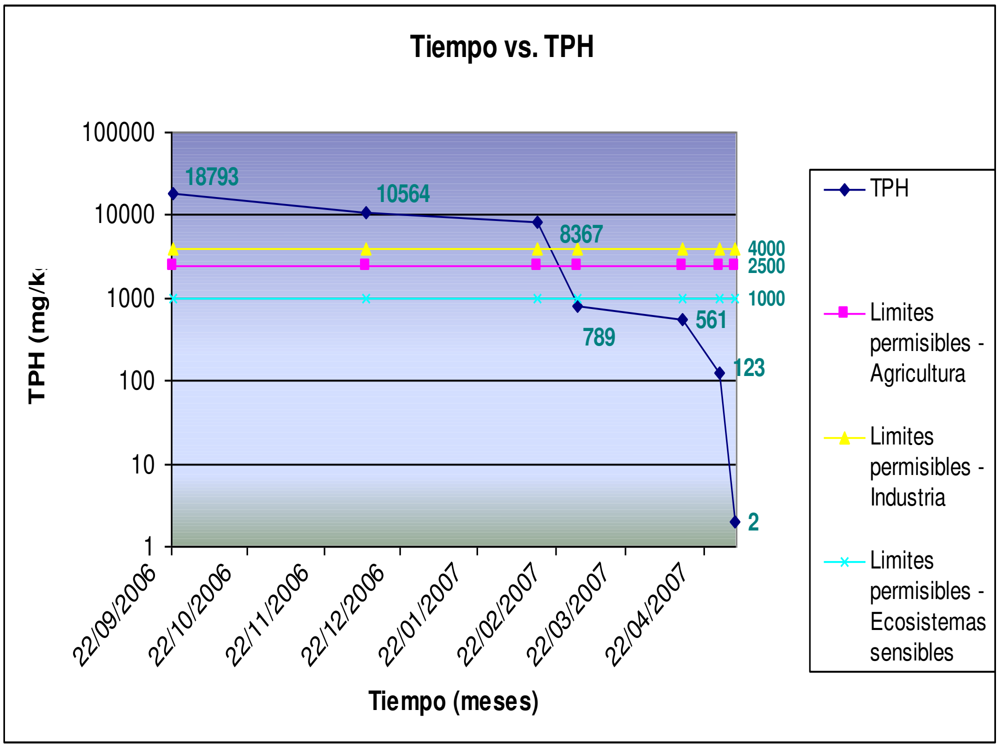


Grafico 5.8.- Tiempo vs.TPH, en un periodo de seis meses

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Una vez analizado los resultados, se puede concluir:

- Empleo de dos técnicas de remadiación de suelos: biorremediación (intervención de bacterias) y fitorremediación (uso de plantas).
- Al dejar el suelo sin tratar, es decir, permitir la atenuación natural, requeriría demasiado tiempo y dependiendo de las concentraciones y tipo de contaminante no se puede asegurar la recuperación del suelo puesto que algunos componentes no son degradables total o parcialmente.

- Se comprobó que el proceso ex situ permite un mayor control de los procesos de remediación, mediante el movimiento de tierra los agregados se disgregaron, teniendo los microorganismos más probabilidad de entrar en contacto con el contaminante para la degradación del mismo.
- La Fitorremediación como tratamiento complementario es efectivo siempre y cuando se de un acondicionamiento nutritivo al suelo antes y durante la aplicación de dicho tratamiento y es conveniente su aplicación debido a que no presentan residuos sólidos, ni líquidos y las plantas sembradas ayudaron al crecimiento de especies nativas del lugar.
- Aunque el suelo estaba aparentemente en condiciones óptimas para el crecimiento de microflora, se comprobó que no cumplía con las condiciones necesarias para el desarrollo óptimo de la misma, al sembrar semillas de alfalfa, estas no germinaron.
- Se determinó que el agua es un factor importante en el proceso de remediación puesto que los microorganismos toman los nutrientes de la fase líquida. El aumento de agua que se produjo por las grandes precipitaciones provocaron una inhibición del flujo de aire, reduciendo así el suministro de oxígeno dando como consecuencia la muerte de los microorganismos.

- Se pudo comprobar que el método de Biorremediación por depender de microorganismos, los cuales son sensibles a varios factores externos se puede hacer una extrapolación entre los ensayos de laboratorio y las situaciones en el campo.
- Los parámetros de TPH y COV presentaron una disminución considerable luego de comenzar el proceso de fitorremediacion demostrando que con la adición de nutrientes y la adecuado oxigenación el proceso se realiza con una mayor efectividad y mucho mas rápido.
- La aportación del agua al suelo, disminuye la temperatura del mismo de manera significativa, disminuyendo el gradiente térmico, producto de las reacciones químicas de los procesos de descomposición y remediación que sufre el suelo. De esta manera el mismo se regula y permite su regeneración.
- Los compuestos orgánicos volátiles tienen la mayor disminución en este proceso el segundo mes. Su decrecimiento progresó en el tercero, atenuándose levemente. Demostrando la contaminación disminuyo a límites donde fue posible el crecimiento de microflora.
- Se puede deducir, basados en los parámetros de TPH que las plantas asimilaron el contaminante, de esta manera se justifica el deterioro de las plantas en las primeras semanas.

- Debido a que los sitios contaminados por lo general no presentan la actividad biológica necesaria para que se produzca la degradación de los contaminantes por lo que es conveniente, introducir al medio, microorganismos, cuya efectividad haya sido probada previamente.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda usar la flora y fauna del sector en donde se produjo la contaminación y procurar no usar especies del sector exsitu.
- Es necesario realizar los procesos de remediación en sitios en donde las condiciones atmosféricas se controlen de tal manera que no afectan al proceso de remediación.
- Se recomienda usar el método de fitorremediacion solo como técnica complementaria.

BIBLIOGRAFIA

- Contaminación y depuración de suelos. Instituto tecnológico geominero de España
- Gestión de residuos tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos, Michael D LaGrega, Phillip L. Buckingham, Jeffrey C. Evans, Editorial Mc. Graw Hill, Volumen I, 1996
- Gestión de residuos tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos, Michael D LaGrega, Phillip L. Buckingham, Jeffrey C. Evans, Editorial Mc. Graw Hill, Volumen II, 1996
- Contaminación del suelo: Estudios, tratamientos y gestion, Dr. Ing. De Montes, Mariano Seoánez Calvo, Ediciones Mundi-Prensa, 1999
- Petróleo en la cuenca amazónica del Ecuador produce una “emergencia sanitaria”.htm, Miguel San Sebastián y Anna-Karin Hurtig, 2004, Ecuador
- Ingenieria Ambiental , J. Glynn Henry, Gary Heinke, Segunda Edición, 1999, Mexico
- Biología, Meter Alexander, Ph. D., Mary Jean Bahret, Judith Chaves, Gary Courts, Naomi Skolky D’Alessio, Prentice Hall
- Tecnología de remediación de suelos contaminados, Tania Volke Sepúlveda, Juan Antonio Velasco Trejo, Instituto Nacional de Ecología, 2002, México.

- Principios de Biorrecuperacion, Juana B. Eweis, Janina J. Egas, Daniel P. Y. Chang, Edgard D. Schroeder, Mc Graw-Hill, España, 1999, 1era Edicion.
- Acondicionamiento del suelo." *Microsoft® Encarta®* 2006 [CD]. Microsoft Corporation, 2005.
- http://www.Sueloscontaminados_GeneralidadesMedio-AmbienteinfoElportaldelMedioAmbienteenEspañol,Noticias,Entrevistas,Masters,Cur.htm
- http://www.Emagister_com-La guía inteligente de formación_archivos\contaminacion-hidrocarburos.htm
- http://www.revisar2\5% DEL FEIREP PARA LA REPARACIÓN AMBIENTAL - Acción Ecológica Ecuador.htm
- http://www.La explotación del petróleo en la cuenca amazónica del Ecuador produce una “emergencia sanitaria”.htm
- Revista "Vida y Futuro", Maria Julia Osorio Michel, 2003, Ecuador
- www.selvas.org/foto/Ecuador/oilpit2.JPG
- www.globalexchange.org/tours/774.html
- www.gfbv.it/2c-stampa/2006/060905es.html
- www.texacotoxico.org/img/frontpage/FDA49.jpg
- http://www.texacotoxico.org/index.php?option=com_zoom&Itemid=75&catid=3&PHPSESSID=b80a588d0040eec7a494fe9a3ec3f6c6

ANEXO A

CONTROL Y SEGUIMIENTO DE LAS CELDAS DE REMEDICIÓN

Control y seguimiento de las celdas de remedición

Se realizo un control diario a las celdas de remediación por un periodo de nueve meses, efectuando anotaciones de temperatura. y de los procesos realizados y cambios observados en el suelo de estudio.

Tipo de suelo: Arena, arcilla, grava
Tipo de contaminante: Gasolina
Adecuación del terreno: 10 cm de arcilla compactada, cal, 5 cm de aserrin

Fecha	Observaciones
21/09/2006	Colocación del material, se retiro las piedras, se desmenuzaron los grumos, coloración: negro verduzco, fuerte olor a gasolina.
22/09/2006	Movimiento del suelo, redujo considerablemente el olor y el color, paso a un gris Verduzco.
23/09/2006	Colocación de nuevo material en las mismas condiciones, retiraron piedras, desmenuzaron grumos, negro verduzco, olor fuerte a gasolina, se mezclo con el material anterior, toma de temperatura. en la noche.
25/09/2006	Movimiento del suelo, redujo considerablemente el olor y el color, pasó a un gris verduzco.
26/09/2006	Movimiento del suelo, se redujo considerablemente el olor y el color.
27/09/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura después de la remoción.
28/09/2006	Movimiento del suelo, toma de temperatura. por la mañana.
29/09/2006	Movimiento del suelo, redujo considerablemente el olor, color plomo verdoso en la parte superior, a unos 4 cm el color es mas oscuro.
02/10/2006	Movimiento del suelo, toma de temperatura. en la mañana.
03/10/2006	Movimiento del suelo.
04/10/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura (mañana, nublado).
05/10/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura (mañana, nublado).
06/10/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura (mañana), coloco agua.
07/10/2006	Movimiento del suelo, no tome temperatura., se agrego agua al suelo.
10/10/2006	Movimiento del suelo, toma de temperatura.
11/10/2006	Movimiento del suelo, tomo temperatura.
13/10/2006	Movimiento del suelo, tomo temperatura.
17/10/2006	Movimiento del suelo, tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
18/10/2006	Movimiento del suelo, toma de temperatura., se agrego agua al suelo
19/10/2006	Movimiento del suelo, no se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
20/10/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
23/10/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.

Fecha	Observaciones
25/10/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
26/10/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
01/11/2006	Movimiento del suelo, se se agrego agua al suelo.
02/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
06/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
09/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
10/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
11/11/2006	Movimiento del suelo, no se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
13/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
14/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
16/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
17/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
20/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
22/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo
23/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
24/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
27/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
28/11/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
01/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
04/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
06/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
07/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
08/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
11/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
12/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura, en la superficie de la celda.
13/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura, en la superficie de la celda.
15/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura, en la superficie de la celda.
18/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
19/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura, en la superficie de la celda.
20/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura, en la superficie de la celda.
21/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura, en la superficie de la celda.
22/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura, en la superficie de la celda.
28/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura, en la superficie de la celda.
29/12/2006	Movimiento del suelo, se tomo temperatura, en la superficie de la celda.
03/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
04/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
05/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
08/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
09/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
11/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
12/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
16/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
17/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
18/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
19/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.

Anexo A.1

Fecha	**Observaciones**
22/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
23/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
24/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
26/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
29/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
30/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
31/01/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
05/02/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
06/02/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
08/02/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura.
12/02/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se agrego agua al suelo.
13/02/2007	Movimiento del suelo, mezclo con aserrin (2 sacos de aserrin). Se mezclo 1/4 de litro de bacterias con 10 galones de agua y 1/3 taza de azúcar morena para activar las bacterias, luego se mezclo uniformemente el suelo con la mezcla y se procedió a tapar la celda, se deberá mantener la temperatura. menor de 75º C, si sube las bacterias se mueren (bacterias que tienen simbiosis con árboles, bacterias naturales de suelos, *clostridium*, bosques húmedos tropicales)
14/02/2007	Movimiento del suelo, se tomo temperatura., se noto la presencia de organismos.
15/02/2007	Se removió, se tomo temperatura, se redujo la presencia de organismos
16/02/2007	Se removió, se tomo temperatura
17/02/2007	Se removió, se tomo temperatura
21/02/2007	Se removió, se tomo temperatura
22/02/2007	Se removió, se tomo temperatura
23/02/2007	Se removió, se tomo temperatura
26/02/2007	Se removió, se tomo temperatura
27/02/2007	Se removió, se tomo temperatura
28/02/2007	Se removió, se tomo temperatura
03/03/2007	Se removió, se tomo temperatura

Anexo A.1

Mediciones de temperatura

Fecha	Temperatura (° C)							
	Sitio 1		**Promedio**		**Sitio 2**		**Medio Ambiente**	
	Fondo	**Superficie (5 cm)**	**Fondo**	**Superficie (5 cm)**	**Fondo**	**Superficie (5 cm)**	**Tmax**	**Tmin**
21-Sep	31	36	30	35,5	29	35	32,2	21
22-Sep	30	37	30,5	37	31	37	32,2	21
23-Sep	30	35	29	35,5	28	36	32,2	21
25-Sep	28	37	29	37	30	37	32,2	21
26-Sep	30	36	30	36	30	36	32,2	21
27-Sep	30	30	30	30	30	30	32,2	21
28-Sep	28	37	29	37	30	37	32,2	21
29-Sep	31	36	30	35,5	29	35	32,2	21
02-Oct	30	36	30	36	30	36	33,2	20,9
03-Oct	31	36	30	35,5	29	35	33,2	20,9
04-Oct	30	30	30	30	30	30	33,2	20,9
05-Oct	28	28	28	28	28	28	33,2	20,9
06-Oct	25	26	24	25	23	24	33,2	20,9
07-Oct	31	36	30	35,5	29	35	33,2	20,9
10-Oct	36	38	36	38	36	38	33,2	20,9
11-Oct	29	30	29	30	29	30	33,2	20,9
13-Oct	31	33	31	33	31	33	33,2	20,9
17-Oct	30	31	30	31	30	31	33,2	20,9
18-Oct	26	27	26	27	26	27	33,2	20,9
19-Oct	31	36	30	35,5	29	35	33,2	20,9
20-Oct	29	31	29,5	31	30	31	33,2	20,9
23-Oct	28	29	28	30	28	31	33,2	20,9
25-Oct	27	30	32	30	37	30	33,2	20,9
26-Oct	28	30	28	30	28	30	33,2	20,9
02-Nov	31	34	31,5	35,5	32	37	34	20,7
06-Nov	29	30	29	30	29	30	34	20,7
09-Nov	31	32	31	32	31	32	34	20,7
10-Nov	31	32	31	32	31	32	34	20,7
13-Nov	29	30	29	30	29	30	34	20,7
14-Nov	31	33	31	33	31	33	34	20,7
16-Nov	32	35	32	35	32	35	34	20,7
17-Nov	30	33	30	33	30	33	34	20,7
20-Nov	32	35	32	35	32	35	34	20,7
22-Nov	29	32	29	32	29	32	34	20,7
23-Nov	33	35	33	35	33	35	34	20,7
24-Nov	31	32	31	32	31	32	34	20,7
27-Nov	31	32	31	32	31	32	34	20,7
28-Nov	31	33	31	33	31	33	34	20,7

Anexo A.1

01-Dic	33	35	33	35	33	35	35,6	21,3

Fecha	**Temperatura (° C)**							
	Sitio 1		**Promedio**		**Sitio 2**		**Medio Ambiente**	
	Fondo	**Superficie (5 cm)**	**Fondo**	**Superficie (5 cm)**	**Fondo**	**Superficie (5 cm)**	**Tmax**	**Tmin**
07-Dic	33	35	33	35	33	35	35,6	21,3
08-Dic	31	33	31	33	31	33	35,6	21,3
11-Dic	29	30	29	30	29	30	35,6	21,3
12-Dic	33	35	33	35	33	35	35,6	21,3
13-Dic		35		35		35	35,6	21,3
15-Dic		30		30		30	35,6	21,3
18-Dic		30		30		30	35,6	21,3
19-Dic		33		33		33	35,6	21,3
20-Dic		35		35		35	35,6	21,3
21-Dic		35		35		35	35,6	21,3
22-Dic		33		33		33	35,6	21,3
28-Dic		32		32		32	35,6	21,3
29-Dic		32		32		32	35,6	21,3
03-Ene	31	33	31	33	31	33	34,7	22,5
04-Ene	29	30	29	30	29	30	34,7	22,5
05-Ene	33	35	33	35	33	35	34,7	22,5
08-Ene	29	30	29	30	29	30	34,7	22,5
09-Ene	33	35	33	35	33	35	34,7	22,5
11-Ene	29	30	29	30	29	30	34,7	22,5
12-Ene	31	32	31	32	31	32	34,7	22,5
16-Ene	31	32	31	32	31	32	34,7	22,5
17-Ene	29	30	29	30	29	30	34,7	22,5
18-Ene	33	35	33	35	33	35	34,7	22,5
19-Ene	31	32	31	32	31	32	34,7	22,5
22-Ene	31	32	31	32	31	32	34,7	22,5
23-Ene	33	35	33	35	33	35	34,7	22,5
24-Ene	29	30	29	30	29	30	34,7	22,5
26-Ene	33	35	33	35	33	35	34,7	22,5
29-Ene	29	30	29	30	29	30	34,7	22,5
30-Ene	33	35	33	35	33	35	34,7	22,5
31-Ene	29	30	29	30	29	30	34,7	22,5
05-Feb	32	33	32	33,5	32	34	33,8	23,3
06-Feb	32	33	32	33	32	33	33,8	23,3
08-Feb	33	35	33	35	33	35	33,8	23,3
12-Feb	32	33	32	33	32	33	33,8	23,3
13-Feb	29	30	29	30	29	30	33,8	23,3
14-Feb	30	30	30	30	30	30	33,8	23,3
15-Feb	29	33	29,5	32	30	31	33,8	23,3
16-Feb	31	33	31	33	31	33	33,8	23,3
17-Feb	31	31	31	31	31	31	33,8	23,3
21-Feb	31	32	31	32	31	32	33,8	23,3

Anexo A.1

22-Feb	31	32	31	32	31	32	33,8	23,3
Fecha	**Temperatura (° C)**							
	Sitio 1		**Promedio**		**Sitio 2**		**Medio Ambiente**	
	Fondo	**Superficie (5 cm)**	**Fondo**	**Superficie (5 cm)**	**Fondo**	**Superficie (5 cm)**	**Tmax**	**Tmin**
27-Feb	29	30	29	30	29	30	33,8	23,3
28-Feb	29	30	29	30	29	30	33,8	23,3
03-Mar	31	32	31	32	31	32	35,4	22,5

ANEXO B

LÍMITES PERMISIBLES PARA LA IDENTIFICACIÓN Y REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS EN TODAS LAS FASES DE LA INDUSTRIA HIDROCARBURÍFERA

Decreto Ejecutivo
215

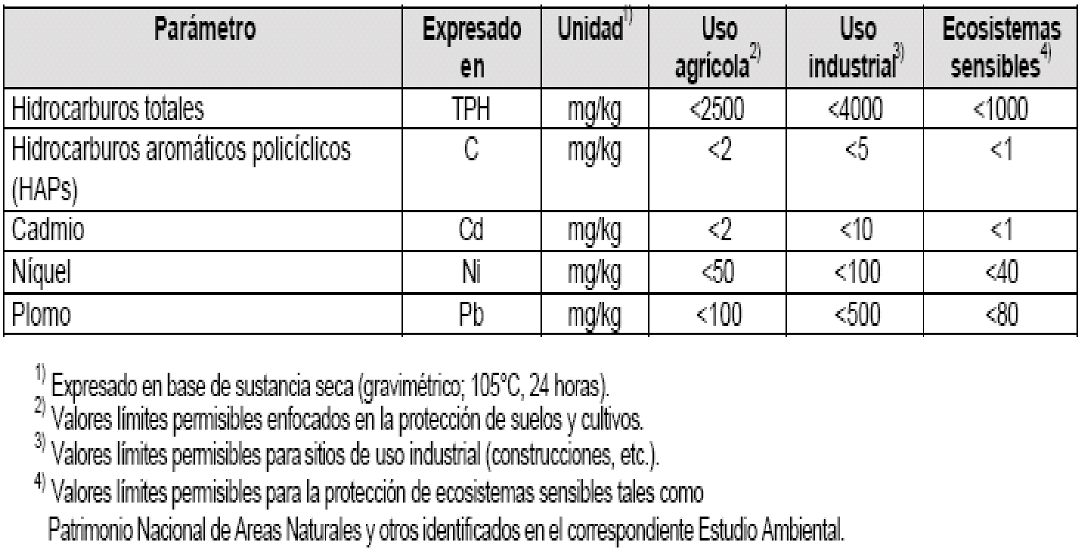
Gustavo Noboa Bejarano
PRESIDENTE CONSTITUCIONAL DE LA REPÚBLICA

Tabla 6: Límites permisibles para la identificación y remediación de suelos contaminados en todas las fases de la industria hidrocarburífera, incluidas las estaciones de servicios.

Los límites permisibles a aplicarse en un proyecto determinado dependen del uso posterior a darse al suelo remediado, el cual constará en el respectivo Programa o Proyecto de Remediación aprobado por la Subsecreta ría de Protección Ambiental.

De presentar los suelos naturales (no contaminados) del área concentraciones superiores a los límites establecidos, se pueden incrementar los valores del respectivo parámetro hasta este nivel, siempre que se haya comprobado este fenómeno estadísticamente a través de un monitoreo de suelos no perturbados ni influenciados en el mismo área.

El monitoreo consistirá de una caracterización inicial del sitio y/o material a remediarse, un monitoreo de por lo menos un muestreo con los respectivos análisis cada seis meses, y una caracterización final una vez concluidos los trabajos. Dependiendo de la tecnología de remediación aplicada, la frecuencia del monitoreo será mayor, conforme al Programa o Proyecto de Remediación aprobado por la Subsecretaría de Protección Ambiental



Parámetro	Expresado en	Unidad 1)	Uso agrícola 2)	Uso industrial 3)	Ecosistemas sensibles 4)
Hidrocarburos totales	TPH	mg/kg	<2500	<4000	<1000
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)	C	mg/kg	<2	<5	<1
Cadmio	Cd	mg/kg	<2	<10	<1
Níquel	Ni	mg/kg	<50	<100	<40
Plomo	Pb	mg/kg	<100	<500	<80

1) Expresado en base de sustancia seca (gravimétrico; 105°C, 24 horas).
2) Valores límites permisibles enfocados en la protección de suelos y cultivos.
3) Valores límites permisibles para sitios de uso industrial (construcciones, etc.).
4) Valores límites permisibles para la protección de ecosistemas sensibles tales como Patrimonio Nacional de Areas Naturales y otros identificados en el correspondiente Estudio Ambiental.