

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

ESTUDIO DE DOS TRATAMIENTOS A ESCALA PILOTO PARA LA BIODEGRADACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS POR EL MÉTODO DE LANDFARMING

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO**

MARCELO FABIÁN CABRERA JARA
marcelofabian_cabrerajara@yahoo.com

DIRECTORA:
INGENIERA LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS
lucia.montenegro@epn.edu.ec

Quito, diciembre 2013

© Escuela Politécnica Nacional (2013)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Marcelo Fabián Cabrera Jara, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.


La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Marcelo Fabián Cabrera Jara

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Marcelo Fabián Cabrera Jara, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'L.M.A.', with a horizontal line underneath it.

Ing. Lucía Montenegro A.
DIRECTORA DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero de la empresa INCINEROX CIA. LTDA.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar gracias a Dios, porque sin Él nada es posible y gracias a sus bendiciones he podido culminar esta etapa de mi vida, que a pesar de todas las dificultades presentadas en el camino, al final, Dios siempre cumple su palabra al manifestar “Porque yo sé muy bien los planes que tengo para ustedes, planes de bienestar y no de calamidad, a fin de darles un futuro y una esperanza” (Jeremías 29, 11).

También agradezco a mis padres, porque con su amor, respeto y sus consejos, me han sabido guiar por el camino del bien, y gracias a su incansable apoyo tanto moral como económico, hoy vemos con alegría culminar mi vida universitaria. Agradezco también a mis hermanas y mi hermano, a mis sobrinos y sobrinas, que gracias a todo su apoyo en los momentos oportunos, ya sea con una palabra de ánimo, una sonrisa, un juego, un consejo, me han ayudado a crecer como persona.

Agradezco a mi mejor amiga, Gaby Pérez, ya que con su apoyo incondicional, su valiosa amistad y su gran cariño me han enseñado a seguir adelante siempre y no rendirse nunca, a pesar de todos los problemas por los que se pase a diario. Con su ejemplo de constancia me ha enseñado a seguir siempre de la mano de Dios.

Agradezco también a la ingeniera Lucía Montenegro, que más que mi directora de tesis, es una amiga quien me ayudó mucho para la culminación del proyecto. A todas las personas de INCINEROX, Sr. Román, Pedro Mantilla, Iván Tapia, Humberto Hermida, Roberto de Meza, entre otras, que de una u otra manera me han ayudado para desarrollar mi proyecto de titulación y culminarlo con éxito, dando todas las facilidades tanto en Shushufindi, como en Quito.

Finalmente agradezco a todas las personas que formaron parte del desarrollo de este proyecto, a todos mis amigos y compañeros que estuvieron presentes en mi vida universitaria. De corazón, muchísimas gracias a todos.

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación quiero dedicárselo en primer lugar a Dios, ya que Él me dio la inteligencia y la fuerza necesaria para seguir siempre adelante y no dejarme solo en ningún momento de mi vida; a Él sea toda la gloria y la honra.

Le dedico también este proyecto a mis padres, quienes me han guiado siempre y me han ayudado incondicionalmente en todas las etapas de mi vida. Los amo con todo mi corazón y con mucho cariño les dedico todo este esfuerzo realizado.

A mis hermanas Charito, Giovy y a mi hermano Carlitos, a mis sobrinos Mateo, Nicky y Angelito, y mis sobrinas Karen, Dome y Nahir. Sin ellos mi vida no sería la misma y están muy dentro de mi corazón, aunque Angelito se adelantó en el camino de la vida, me hubiera encantado conocerte y verte crecer, pero sé que estás junto a Dios.

Finalmente, le dedico este trabajo también a mi mejor amiga, Gaby, gracias por todos tus consejos, por todo el apoyo recibido, por ser una verdadera amiga única e incondicional. Gracias por ser como eres. Te quiero mucho amiga mía.

INDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
ABREVIATURAS	XIV
RESUMEN	XVI
INTRODUCCIÓN	XVIII
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Derrames de petróleo	1
1.1.1. Generalidades del petróleo	1
1.1.2. Principales características físicas del petróleo	2
1.1.2.1. Gravedad específica	3
1.1.2.2. Viscosidad	3
1.1.3. Composición química del petróleo	4
1.1.3.1. Hidrocarburos	4
1.1.3.2. Compuestos de azufre	5
1.1.3.3. Compuestos de oxígeno	5
1.1.3.4. Compuestos de nitrógeno	6
1.1.3.5. Asfaltenos	6
1.1.3.6. Resinas	7
1.1.3.7. Otros compuestos	7
1.1.4. Procesos de producción del petróleo y su impacto al medio ambiente	7
1.1.4.1. Exploración petrolera	8
1.1.4.2. Perforación de pozos	8
1.1.4.3. Extracción y transporte del petróleo	9
1.1.4.4. Transporte del petróleo	10
1.1.4.5. Refinación del petróleo	12
1.1.4.6. Almacenamiento y distribución de los derivados del petróleo	15
1.1.5. Derrames de petróleo en el Ecuador	15
1.1.6. Legislación ambiental	21
1.2. Biorremediación	23
1.2.1. Biorremediación in situ	24
1.2.1.1. Bioestimulación	24
1.2.1.2. Bioventeo o inyección de aire	25
1.2.1.3. Difusión de aire o Biosparging	26
1.2.1.4. Extracción de vapores del suelo	26
1.2.1.5. Biobarreras	26
1.2.2. Biorremediación ex situ	27
1.2.2.1. Compostaje	28
1.2.2.2. Tratamiento en lechos (landfarming)	29
1.2.3. Otros métodos de tratamiento de suelos contaminados	29
1.2.3.1. Métodos fisicoquímicos	30
1.2.3.2. Incineración	30
1.2.3.3. Depósitos de seguridad	31

1.3.	Biodegradación	31
1.3.1.	Influencia de las variables físicas	34
1.3.1.1.	Composición del suelo	34
1.3.1.2.	Humedad del suelo	35
1.3.1.3.	Condiciones ambientales	36
1.3.1.4.	Oxigenación del suelo	37
1.3.2.	Influencia de las variables químicas	37
1.3.2.1.	Potencial de hidrógeno (pH)	37
1.3.2.2.	Nutrientes del suelo	38
1.3.3.	Influencia de los microorganismos en la biodegradación	38
1.3.3.1.	Crecimiento microbiano	38
1.3.3.2.	Bacterias encargadas de la biodegradación	41
1.3.4.	Biodegradación de los hidrocarburos	42
1.3.5.	Movilización de metales pesados en la biodegradación	43
2.	PARTE EXPERIMENTAL	45
2.1.	Objetivos	45
2.2.	Materiales	45
2.2.1.	Adecuación del terreno	45
2.2.2.	Análisis físicos del suelo	45
2.2.2.1.	Tamaño de partícula	45
2.2.2.2.	Densidad relativa	46
2.2.3.	Análisis de pH del suelo	46
2.2.4.	Control de la biodegradación	47
2.2.4.1.	Determinación del número de unidades formadoras de colonia	47
2.2.4.2.	Determinación del contenido de aceites y grasas	47
2.2.4.3.	Determinación del perfil de TPH por cromatografía de gases	47
2.3.	Consideraciones en la infraestructura para la biodegradación por landfarming	48
2.3.1.	Diseño de las hileras	48
2.3.2.	Adecuación del terreno	50
2.3.3.	Técnica de muestreo	51
2.4.	Análisis físicos, químicos y microbiológicos del suelo	52
2.4.1.	Análisis FÍSICOS	52
2.4.1.1.	Tamaño de partícula	52
2.4.1.2.	Densidad relativa	54
2.4.1.3.	Humedad	55
2.4.2.	Análisis químicos	56
2.4.2.1.	pH	56
2.4.2.2.	Nutrientes	57
2.4.3.	Análisis microbiológico de las tierras contaminadas con petróleo	58

2.5.	Elaboración del abono natural	58
2.6.	Análisis de la biodegradación al usar bacterias nativas	60
2.6.1.	Temperatura ambiente y humedad relativa	60
2.6.2.	Siembra a profundidad para determinar el número de unidades formadoras de colonias de bacterias presentes en las muestras	61
2.6.2.1.	Preparación de medio de cultivo	61
2.6.2.2.	Preparación de muestras	61
2.6.3.	Contenido de aceites y grasas	63
2.6.4.	Análisis de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) por infrarrojo	64
2.6.5.	Análisis del perfil de hidrocarburos totales de petróleo por cromatografía de gases	64
2.6.6.	Análisis de metales pesados	66
2.6.7.	Análisis de lixiviados	66
2.7.	Análisis de la biodegradación al usar bacterias comerciales con las bacterias nativas	67
2.8.	Análisis del costo – beneficio del proyecto	67
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
3.1.	Análisis del suelo a biodegradar	69
3.2.	Análisis físicos, químicos y microbiológicos del suelo	70
3.2.1.	Análisis físicos	70
3.2.1.1.	Tamaño de partícula	70
3.2.1.2.	Humedad	72
3.2.2.	Análisis químicos	73
3.2.2.1.	pH	73
3.2.2.2.	Nutrientes	74
3.2.3.	Análisis microbiológico de las tierras contaminadas con petróleo	75
3.3.	Elaboración del abono natural	76
3.4.	Análisis de la biodegradación al emplear bacterias nativas y comerciales y bacterias nativas	80
3.4.1.	Temperatura ambiente y humedad relativa	80
3.4.2.	Siembra a profundidad para determinar el número de unidades formadoras de colonias de bacterias presentes en las muestras	84
3.4.3.	Contenido de aceites y grasas	85
3.4.4.	Hidrocarburos totales de petróleo por infrarrojo	87
3.4.5.	Análisis del perfil de hidrocarburos totales de petróleo por cromatografía de gases	90
3.4.6.	Análisis de metales pesados	100
3.4.6.1.	Cadmio (Cd)	100
3.4.6.2.	Plomo (Pb)	102
3.4.6.3.	Níquel (Ni)	104

3.4.7. Análisis de lixiviados	106
3.5. Disposición final de la tierra y lixiviados	108
3.6. Análisis del costo – beneficio del proyecto	110
3.6.1. Parámetros generales	110
3.6.2. Costos por materia prima	111
3.6.3. Costos por materiales indirectos	112
3.6.4. Costos por terrenos y construcciones	116
3.6.5. Costos por equipos y muebles de oficina	117
3.6.6. Costos por consumo de suministros	118
3.6.8. Costos por maquinaria y equipos	119
3.6.9. Costos por nómina de fuerza laboral	120
3.6.10. Costos de operación	122
3.6.11. Inversiones	125
3.6.12. Ingresos	126
3.6.13. Punto de equilibrio	127
3.6.14. Otros indicadores económicos	131
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	136
4.1. Conclusiones	136
4.2. Recomendaciones	140
BIBLIOGRAFÍA	142
ANEXOS	150

INDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla I.1.	Características de los lodos contaminados con petróleo provenientes de diferentes campos con su respectivo análisis de TPH, HAP y metales pesados	xix
Tabla 1.1.	Límites permisibles para la identificación y remediación de suelos contaminados, según lo normado por el RAOHE	22
Tabla 1.2.	Límites permisibles para el monitoreo ambiental de aguas en las descargas líquidas, según lo normado por el RAOHE	23
Tabla 1.3.	Numeración y abertura de tamices	35
Tabla 2.1.	Numeración y abertura de tamices normalizados para el análisis del tamaño de partícula	46
Tabla 2.2.	Dimensiones de las hileras A y B	49
Tabla 2.3.	Composición del medio de cultivo para la siembra a profundidad en la determinación del número de unidades formadoras de colonias de bacterias	61
Tabla 2.4.	Condiciones de operación del cromatógrafo de gases para determinar el perfil de hidrocarburos totales de petróleo	65
Tabla 3.1.	Resultados obtenidos del análisis de densidad relativa de la muestra original	69
Tabla 3.2.	Análisis de tamaño de partícula de la tierra a procesar	70
Tabla 3.3.	Resultados del análisis de los nutrientes del suelo y cascarilla de arroz	74
Tabla 3.4.	Cuantificación de Nutrientes en cada una de las hileras	75
Tabla 3.5.	Resultados del análisis de Nitrógeno Total en la muestra de abono	76
Tabla 3.6.	Resultados del balance de masa de los nutrientes y relación NPK en el suelo a biodegradar con diferentes cantidades de abono elaborado	77
Tabla 3.7.	Relación Carbono – Nitrógeno para la muestra de suelo que se añadió cascarilla de arroz, estiércol de ganado y el abono elaborado	80

Tabla 3.8.	Resultados obtenidos del análisis del perfil de hidrocarburos de la muestra estándar bajo las condiciones de la Tabla 2.4	91
Tabla 3.9.	Resultados del análisis de cadmio en las muestras de suelo contaminado con hidrocarburos	100
Tabla 3.10.	Resultados del análisis de plomo en las muestras de suelo contaminado con hidrocarburos	102
Tabla 3.11.	Resultados del análisis de níquel en las muestras de suelo contaminado con hidrocarburos	104
Tabla 3.12.	Cantidad de lixiviados recogidos de las hileras A y B	107
Tabla 3.13.	Resultados finales de los lixiviados de las hileras A y B	107
Tabla 3.14.	Parámetros generales económicos del proyecto de biodegradación por el método de landfarming para la hilera A y B	110
Tabla 3.15.	Parámetros de mantenimiento de los equipos en el proyecto de biodegradación por el método de landfarming para la hilera A y B	111
Tabla 3.16.	Parámetros de seguros en el proyecto de biodegradación por el método de landfarming para la hilera A y B	111
Tabla 3.17.	Parámetros de amortizaciones en el proyecto de biodegradación por el método de landfarming para la hilera A y B	111
Tabla 3.18.	Costos de materia prima necesarios para el proceso de la hilera A	112
Tabla 3.19.	Costos de materia prima necesarios para el proceso de la hilera B	112
Tabla 3.20.	Costos de reactivos adquiridos para el análisis de laboratorio en el control del proceso de biodegradación en la hilera A	113
Tabla 3.21.	Costos de reactivos adquiridos para el análisis de laboratorio en el control del proceso de biodegradación en la hilera B	113
Tabla 3.22.	Costos de análisis de laboratorio para el control del proceso en la hilera A	114
Tabla 3.23.	Costos de análisis de laboratorio para el control del proceso en la hilera B	115

Tabla 3.24.	Costos por materiales indirectos anuales en cada una de las hileras	116
Tabla 3.25.	Costos de terreno y construcciones para el desarrollo del proyecto	117
Tabla 3.26.	Costos de equipos y muebles de oficina usados en el proyecto	118
Tabla 3.27.	Costos de suministros tanto para la hilera A como para la hilera B	118
Tabla 3.28.	Costos de maquinaria y equipos utilizados en la hilera A	119
Tabla 3.29.	Costos de maquinaria y equipos utilizados en la hilera B	120
Tabla 3.30.	Nómina de fuerza laboral para el desarrollo del proyecto tanto en la hilera A como en la hilera B	121
Tabla 3.31.	Costos de operación en el proceso de la hilera A	123
Tabla 3.32.	Costos de operación en el proceso de la hilera B	124
Tabla 3.33.	Inversiones para el desarrollo del proyecto en la hilera A	125
Tabla 3.34.	Inversiones para el desarrollo del proyecto en la hilera B	126
Tabla 3.35.	Ingresos por tratamiento de los suelos contaminados en la hilera A	127
Tabla 3.36.	Ingresos por tratamiento de los suelos contaminados en la hilera B	127
Tabla 3.37.	Valores para determinar el punto de equilibrio económico del proceso en la hilera A	128
Tabla 3.38.	Valores para determinar el punto de equilibrio económico del proceso en la hilera B	128
Tabla 3.39.	Valores determinados para el flujo de caja, inversión total y TIR para la biodegradación en la hilera A	131
Tabla 3.40.	Valores determinados para el flujo de caja, inversión total y TIR para la biodegradación en la hilera B	132
Tabla 3.41.	Utilidad neta anual generada en el proceso de la hilera A	134
Tabla 3.42.	Utilidad neta anual generada en el proceso de la hilera B	134

Tabla AII.1.	Humedad de la tierra de la hilera A durante el proceso de biodegradación	152
Tabla AII.2.	Humedad de la tierra de la hilera B durante el proceso de biodegradación	155
Tabla AIII.1.	pH de la tierra de la hilera A durante el proceso de biodegradación	159
Tabla AIII.2.	pH de la tierra de la hilera B durante el proceso de biodegradación	160
Tabla AVI.1.	Balance de masa de los nutrientes NPK para 100 kg de abono elaborado	169
Tabla AVII.1.	Temperatura ambiente y humedad relativa en la cual se desarrolló el proyecto	170
Tabla AVIII.1.	Concentración de bacterias presentes en las muestras de la hilera A	172
Tabla AVIII.2.	Concentración de bacterias presentes en las muestras de la hilera B	173
Tabla AIX.1.	Concentración de AyG para las muestras de la hilera A	174
Tabla AIX.2.	Concentración de AyG para las muestras de la hilera B	174
Tabla AX.1.	Concentración de TPH para cada una de las muestras de las hileras A y B durante el proceso de biodegradación	182

INDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Flujo de petróleo en el mundo, en millones de toneladas, para el año 2010	11
Figura 1.2.	Cantidad de crudo bombeado por el SOTE y OCP, para el año 2011	16
Figura 1.3.	Esquema de Biorremediación in situ mediante bioestimulación	25
Figura 1.4.	Esquema de los elementos principales para la biodegradación por el método de landfarming	32
Figura 1.5.	Curva de crecimiento típica para una población bacteriana	39
Figura 1.6.	Esquema de biodegradación de alcanos	43
Figura 2.1.	Hileras implementadas para el desarrollo del proyecto	48
Figura 2.2.	Diseño de las hileras para la biodegradación por el método de landfarming	49
Figura 2.3.	Puntos de muestreo en las hileras A y B.	52
Figura 2.4.	Abono elaborado.	59
Figura 3.1.	Diferencias entre la hilera A y la hilera B debido a la permeabilidad por el uso de cascarilla de arroz en la hilera B	71
Figura 3.2.	Humedad de la Tierra contaminada con hidrocarburos de las hileras A y B en función del tiempo comparadas con los valores mínimo y máximo	72
Figura 3.3.	pH de la Tierra contaminada con hidrocarburos de las hileras A y B en función del tiempo comparadas con los valores mínimo y máximo	74
Figura 3.4.	Relación de la cantidad de fósforo presente en la tierra en función de la cantidad de abono a utilizar	78
Figura 3.5.	Relación de la cantidad de potasio presente en la tierra en función de la cantidad de abono a utilizar	78
Figura 3.6.	Monitoreo de la temperatura ambiente en el lugar donde se desarrollan las bacterias, al compararlas con los valores: mínimo, máximo y óptimo para su crecimiento	82

Figura 3.7.	Medidas de humedad relativa en el lugar donde se desarrollan las bacterias	83
Figura 3.8.	Concentración de microorganismos de las hileras A y B en función del tiempo y comparándolas con el valor mínimo requerido	85
Figura 3.9.	Concentración de Aceites y grasas de las hileras A y B en función del tiempo	86
Figura 3.10.	Concentración de TPH para la hilera A y B en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE	88
Figura 3.11.	Concentración de TPH para la hilera A en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE	88
Figura 3.12.	Concentración de TPH para la hilera B en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE	89
Figura 3.13.	Cromatograma obtenido de la mezcla de hidrocarburos estándares	91
Figura 3.14.	Curva de calibración obtenida para la interpretación de resultados en el análisis cromatográfico de las muestras de tierra contaminada con hidrocarburos	92
Figura 3.15.	Cromatograma obtenido de la muestra inicial de tierra contaminada con hidrocarburos	93
Figura 3.16.	Cromatograma obtenido de la muestra de tierra contaminada con hidrocarburos de la hilera A a los 2 meses de proceso	94
Figura 3.17.	Cromatograma obtenido de la muestra de tierra contaminada con hidrocarburos de la hilera A a los 4 meses de proceso	96
Figura 3.18.	Cromatograma obtenido de la muestra de tierra contaminada con hidrocarburos de la hilera B a los 2 meses de proceso	97
Figura 3.19.	Cromatograma obtenido de la muestra de tierra contaminada con hidrocarburos de la hilera B a los 4 meses de proceso	99
Figura 3.20.	Disminución de la concentración de cadmio para la hilera A y B durante 2 meses de biodegradación	101
Figura 3.21.	Variación de la concentración de plomo para la hilera A y B durante 2 meses de biodegradación	103

Figura 3.22.	Variación de la concentración de níquel para la hilera A y B durante 2 meses de biodegradación	105
Figura 3.23.	Disposición final de los suelos contaminados con hidrocarburos provenientes de las hileras A y B	109
Figura 3.24.	Punto de equilibrio del proceso de biodegradación en la hilera A, según la masa de tierra a descontaminar al año	129
Figura 3.25.	Punto de equilibrio del proceso de biodegradación en la hilera B, según la masa de tierra a descontaminar al año	130
Figura 3.26.	Flujo acumulado de efectivo para el proceso en la hilera A	133
Figura 3.27.	Flujo acumulado de efectivo para el proceso en la hilera B	133
Figura AI.1.	Ficha técnica de las bacterias comerciales AWT – B350 utilizadas para la biodegradación en la hilera A	151
Figura AIV.1.	Informe presentado por el CICAM de la EPN sobre análisis de NPK para la muestra de cascarilla de arroz	163
Figura AIV.2.	Informe presentado por el CICAM de la EPN sobre análisis de NPK para la muestra de suelo contaminado con hidrocarburos	164
Figura AIV.3.	Informe presentado por el CICAM de la EPN sobre análisis de carbono orgánico total para la muestra de suelo contaminado con hidrocarburos	165
Figura AIV.4.	Informe presentado por el CICAM de la EPN sobre análisis de nitrógeno total para la muestra de abono elaborado	166
Figura AV.1.	Informe presentado por DISerLAB de la PUCE sobre análisis de identificación de bacterias presentes en la muestra de suelo contaminado	167
Figura AX.1.	Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH y metales pesados de la muestra inicial de suelo contaminado con hidrocarburos	175
Figura AX.2.	Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH y metales pesados de la muestra A a los dos meses de iniciado el proceso de biodegradación	176
Figura AX.3.	Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH y metales pesados de la muestra B a los dos meses de iniciado el proceso de biodegradación	177

Figura AX.4.	Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH de la muestra A a los cuatro meses de iniciado el proceso de biodegradación	178
Figura AX.5.	Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH de la muestra B a los cuatro meses de iniciado el proceso de biodegradación	179
Figura AX.6.	Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH de la muestra de agua residual de la hilera A acumulada de durante todo el proceso	180
Figura AX.7.	Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH de la muestra de agua residual de la hilera B acumulada de durante todo el proceso	181
Figura AX.8.	Concentración de cadmio para la hilera A en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE	182
Figura AX.9.	Concentración de cadmio para la hilera B en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE	183
Figura AX.10.	Concentración de plomo para la hilera A en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE	183
Figura AX.11.	Concentración de plomo para la hilera B en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE	184
Figura AX.12.	Concentración de níquel para la hilera A en función del tiempo, comparándola con el valor norma del RAOHE	184
Figura AX.13.	Concentración de níquel para la hilera B en función del tiempo, comparándola con el valor norma del RAOHE	185

INDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I. Ficha técnica de las bacterias AWT – B350	151
ANEXO II. Determinación de la humedad en la tierra contaminada con hidrocarburos	152
ANEXO III. Resultados de análisis de pH de las muestras	159
ANEXO IV. Resultados del CICAM sobre los análisis de nutrientes en el suelo contaminado y cascarilla de arroz	163
ANEXO V. Resultados de análisis de identificación de bacterias en el suelo	167
ANEXO VI. Balance de masa de nutrientes para la adición de abono elaborado naturalmente	169
ANEXO VII. Temperatura y humedad relativa del ambiente donde se desarrolló el proyecto	170
ANEXO VIII. Concentración de bacterias en las muestras tomadas	172
ANEXO IX. Análisis de aceites y grasas	174
ANEXO X. Resultados de ANNCY sobre análisis de TPH y metales pesados a muestras de suelo	175

ABREVIATURAS

ρ:	Densidad relativa de la tierra a biodegradar
σ:	Desviación estándar
γ_s:	Densidad de las partículas sólidas
γ_w:	Densidad del agua a la temperatura de ensayo
%H:	Porcentaje de humedad
% RM:	Porcentaje retenido en las diferentes mallas
APHA:	American Public Health Association
API:	American Petroleum Institute
ASTM:	American Section of the International Association for Testing Materials
AWT:	Andean Water Treatment
AyG:	Aceites y grasas
C:	Concentración de microorganismos en las muestras
C:N:	Carbono – nitrógeno
C:N:P:	Carbono – nitrógeno – fósforo
C_{ag}:	Concentración de aceites y grasas
Cd:	Cadmio
CICAM:	Centro de Investigaciones y Control Ambiental
COV's:	Compuestos orgánicos volátiles
Ctp:	Centipoises
d:	Factor de dilución
EPA:	Environmental Protection Agency
EPN:	Escuela Politécnica Nacional
FDA:	Flujo Acumulado de Efectivo
GPS:	Global Positioning System
HAP's:	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
HC:	Hidrocarburos
HR:	Humedad Relativa
M:	Masa de muestra de tierra contaminada en la determinación de concentración de bacterias
m/o:	Microorganismo
M_{a T°x}:	Masa del picnómetro más el agua a la temperatura de ensayo

M_c:	Masa de crisol tarado en el análisis de humedad de las muestras
M_{dt}:	Masa de tierra en cada una de las hileras
M_f:	Masa de balón con grasa
M_f:	Masa final de la muestra seca para determinación de humedad
M_i:	Masa de balón tarado
M_m:	Masa de muestra en la determinación de aceites y grasas
M_{m'}:	Masa del picnómetro más la muestra y el agua a la temperatura de ensayo
M_{m''}:	Masa inicial de muestra para determinación de humedad
MM:	Masa de muestra para la determinación de ufc/g
MRM:	Masa retenido en cada malla
M_s:	Masa seca de la muestra de ensayo de densidad de suelo
Mt:	Masa total de la muestra seca en el análisis de tamaño de partícula
n:	Número de unidades formadoras de colonias
Ni:	Níquel
NPK:	Nitrógeno – Fósforo – Potasio
OCP:	Oleoducto de crudos pesados
Pb:	Plomo
pH:	Potencial de hidrógeno
PUCE:	Pontífice Universidad Católica del Ecuador
RAOHE:	Reglamento Sustitutivo al Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador
SOTE:	Sistema de Oleoducto Transecuatoriano
T:	Temperatura
TIR:	Tasa Interna de Retorno
TPH:	Total Petroleum Hydrocarbons
TULSMA:	Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio Ambiental
ufc:	Unidades formadoras de colonias
ufc/g:	Unidades formadoras de colonia por cada gramo de muestra
V:	Volumen total de cada una de las hileras
VAN:	Valor Actual Neto
VTn:	Volumen de muestra empleado en la dilución n en el análisis de ufc/g

RESUMEN

Los derrames de petróleo en el Ecuador han ocurrido desde el momento de su extracción, a partir de los años 30. A lo largo del tiempo se han dado varios incidentes con la exploración, explotación, transporte y manejo del petróleo y sus derivados; en el 2004 se reportó el mayor número de derrames, 178 en total (Guaranda, 2010).

Dada esta problemática ambiental se ha desarrollado el presente proyecto, en Incinerox (planta Shushufindi), a fin de analizar dos procedimientos a escala piloto para la biodegradación en suelos contaminados por hidrocarburos mediante el método de landfarming.

Para esto se dispuso de un terreno de 200 m² dividido en dos partes donde se construyó dos cubetos de aproximadamente 20,0 m de largo, 2,5 m de ancho y 0,5 m de profundidad; a cada cubeto se le denominó hilera A y B. En estas hileras se desarrollaron los dos procedimientos: uno con el uso de bacterias comerciales (AWT – B350) destinadas para la hilera A, y otro con la estimulación de bacterias nativas para la hilera B. Para el primer caso, se siguieron las instrucciones de uso especificadas en la ficha técnica AWT, mientras que para el segundo caso se añadió: 4,2 % de cascarilla de arroz, 0,8 % de estiércol de ganado y 900 kg de abono orgánico elaborado con cascarilla de arroz y estiércol de ganado en una relación 2:1.

La tierra contaminada tuvo una concentración de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) de 16 230 ppm y se trató 10,20 y 12,70 toneladas de tierra en las hileras A y B, respectivamente.

La biodegradación duró cuatro meses y durante este tiempo se monitorearon parámetros indispensables para la biodegradación, los cuales estuvieron dentro de los valores recomendados por Eweis *et al.* (1999). El pH del suelo estuvo entre 7,21 y 7,90, la temperatura ambiente entre 22 y 40 °C, la humedad relativa entre 20 y 98 %, la humedad del suelo entre 14,90 y 31,83 %, la concentración de

microorganismos presentes en la tierra entre $4,03E+05$ y $8,52E+05$ ufc/g y la concentración de nutrientes (relación nitrógeno-fósforo-potasio) óptima de 30,00:6,03:25,33.

Además, se monitorearon las concentraciones de los contaminantes en el suelo, las mismas que cumplieron con la reglamentación que exige el RAOHE para uso industrial. En la hilera A se obtuvieron concentraciones de 3 170 ppm de TPH, 0,433 ppm de cadmio, 17,0 ppm de níquel y 6,51 ppm de plomo; mientras que en la hilera B se obtuvieron concentraciones de 3 736 ppm de TPH, 0,608 ppm de cadmio, 16,1 ppm de níquel y 11,80 ppm de plomo. Las bacterias que degradaron los hidrocarburos en los suelos contaminados fueron de los siguientes tipos: *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus cereus*.

La disposición final que se dio para los suelos tratados fue de base para construcciones que se efectúan en INCINEROX. Por su parte, como consecuencia del proceso, se recolectaron 1 325,10 litros de lixiviados de la hilera A con una concentración de TPH de 1,0 mg/L, mientras que para la hilera B se recolectaron 830,03 litros de lixiviados con una concentración de TPH de 0,4 mg/L. Con ello se dispuso que los lixiviados generados sean utilizados como material de construcción dentro de la empresa INCINEROX.

El proceso desarrollado en la hilera A tuvo una inversión inicial de \$ 17 885,10, mientras que la inversión en la hilera B fue de \$ 20 738,31. Para ambos casos, se consideró un precio para el proceso de biodegradación de \$ 1,00 por kg de suelo a tratar para cada uno de los métodos antes mencionados con base en la inversión total generada. Con esto se obtuvo una tasa interna de retorno del 23,51% con una utilidad neta en operaciones de \$ 6 448,11 en 5 años en la hilera A; y una tasa interna de retorno del 12,27% con una utilidad neta en operaciones de \$ 5 791,42 en 5 años en la hilera B.

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador las actividades petroleras son consideradas como acciones de alto riesgo ambiental debido a que existe una contaminación de agua y suelo, por lo que es muy importante adoptar medidas necesarias para su adecuado manejo, así como también se deben desarrollar políticas y programas ambientales encaminados hacia una mejora continua en las operaciones y producción, con el fin de reducir los riesgos de contaminación así como un mejor manejo de residuos (Schmidt, 2005).

Como consecuencia de la problemática ambiental, el sector petrolero debe tomar conciencia de la necesidad de modificar sus procesos con el objetivo de reducir el uso de recursos naturales y disminuir la contaminación de los mismos. Uno de los métodos más utilizados para contrarrestar la contaminación ambiental, especialmente en suelos, es el biológico, debido a que constituye una de las técnicas más eficaces y económicas. Los contaminantes provenientes del petróleo son degradados fácilmente por la acción de microorganismos en condiciones adecuadas de oxígeno, nutrientes, temperatura, humedad y pH. (Riser, 1992, pp. 4-9).

Debido a esta problemática y dada la creciente demanda para el tratamiento de suelos contaminados con petróleo, INCINEROX CIA LTDA, empresa ecuatoriana especializada en la gestión integral y tratamiento de desechos industriales, ha tomado la iniciativa de incursionar en el campo de remediación de suelos al utilizar microorganismos para el tratamiento de tierras contaminadas con petróleo y sus derivados.

La empresa incinera los suelos contaminados por derrames de petróleo desde el 2001, pero debido a los altos costos de operación se ha propuesto realizar investigaciones sobre la factibilidad de implementar el proceso de biodegradación por el método de landfarming y las mejores condiciones de biodegradación de los hidrocarburos, con el fin de obtener suelos que se encuentren dentro de la normativa ambiental vigente y que sean aplicables para futuros procesos de

biodegradación, para lo cual se desea implementar una planta piloto para el proceso de biodegradación con el uso de bacterias nativas y bacterias comerciales con bacterias nativas.

El presente proyecto pretende evaluar las condiciones para que en un futuro se pueda biodegradar una piscina de 1 800 m³ ubicada en las instalaciones de INCINEROX de la ciudad de Shushufindi, la cual fue llenada durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2010 con lodos contaminados provenientes de diferentes pozos petroleros del Oriente Ecuatoriano, con las características detalladas en la Tabla I.1:

Tabla I.1. Características de los lodos contaminados con petróleo provenientes de diferentes campos con su respectivo análisis de TPH, HAP y metales pesados

Pozo	TPH (mg/kg)	HAP (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)
Yuca	534 400	84,6	< 0,100	9,11	0,79
Cononaco	293 600	54,6	0,100	19,10	68,90
Victoria	232 000	55,2	0,227	86,70	77,90
Secoya 1	684 800	28,2	< 0,100	7,42	< 0,50
Cuyabeno	266 400	48,6	0,207	20,80	55,10
Cuyabeno VHR	287 200	86,7	0,195	47,90	301,00

(Incinerox, 2010)

Estos datos corresponden a los suelos contaminados que llegaron a la empresa Incinerox; sin embargo, durante varios años en todo el país se han suscitado derrames en el oriente ecuatoriano, que es donde se produce la mayor cantidad de incidentes, como por ejemplo el derrame en el 2008 en los límites de la Reserva Nacional Yasuní (Guaranda, 2010) o en el 2010 en el Bloque 21, cerca a la ciudad del Tena (Molina y Robles, 2012).

Además existe contaminación por petróleo en diversas partes del país como Esmeraldas, Ambato, Papallacta, Reventador, Quito, etc., especialmente por

donde circula el crudo, es decir, por el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) y el Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE) (Guaranda, 2010).

Es incalculable la cantidad de toneladas de suelos contaminados ya que no todos los derrames han sido reportados (Guaranda, 2010). Las principales causas por las que no se actúa frente a un problema ambiental de este tipo es la falta de planificación ante un derrame, así como también la falta de conciencia ambiental de muchas empresas petroleras que lamentablemente acabaron con el suelo ecuatoriano, como es el caso de lo sucedido con Texaco, y otras empresas tanto nacionales como extranjeras (Vogliano, 2009, p.2).

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. DERRAMES DE PETRÓLEO

1.1.1. GENERALIDADES DEL PETRÓLEO

Según Vian (2006), la palabra petróleo proviene del latín “petroleum” o “petros” que significa piedra, y de “oleum” que significa aceite, por lo tanto significa *aceite de piedra*, ya que es una mezcla de varios compuestos orgánicos en estado sólido, líquido y gaseoso provenientes de yacimientos naturales, (p. 294).

Hasta la fecha, es muy difícil determinar el verdadero origen del petróleo, ya que a lo largo de la historia se han generado diversas teorías sobre su génesis. Entre las principales teorías sobre el origen del petróleo cabe citar las que tienen origen inorgánico, como la llamada hipótesis cósmica, propuesta por Sokolov en 1892, en la cual se dice que los hidrocarburos (HC) formados durante la generación de la Tierra fueron absorbidos por el magma, luego atravesaron la corteza terrestre y durante su enfriamiento se consolidó lo que hoy se conoce como crudo (Proskuriakov y Dabkin, 1984, pp. 40-42).

Existen varias teorías de origen orgánico que hablan sobre la procedencia del petróleo; según López (2002), el petróleo tendría su origen en la descomposición de diferente materia orgánica que existía en la Tierra hace millones de años. Esta materia orgánica muerta se veía cubierta de diferente material inorgánico como arena y arcilla, lo cual generaba, a lo largo del tiempo (entre 10 y 100 millones de años), una gran presión, así como también una elevada temperatura, que con la intervención de bacterias anaerobias, formó el petróleo (p. 4).

Durante largos años, el petróleo ha formado parte de las fuentes primarias de energía, al igual que la hidráulica, eólica, nuclear, biomasa, solar, entre otras. Las principales fuentes de energía del actual mundo industrial son los combustibles fósiles: el carbón, el petróleo y el gas. Esto se debe a la relativa facilidad y la

cantidad con la que se obtienen; sin embargo, existe la desventaja de que son recursos no renovables, es decir se agotan con el tiempo, así como también generan una gran cantidad de contaminantes hacia la atmosférica debido a su combustión. (CICEANA, 2010).

Hasta la actualidad, se ha encontrado petróleo en todos los continentes del planeta, con excepción de la Antártida. Sin embargo, la distribución mundial de los yacimientos no es uniforme, ya que esta se concentra básicamente en siete zonas petrolíferas, muchas de las cuales se encuentran en el mar (CICEANA, 2010):

- América del Norte, que incluye los Estados Unidos y Canadá (17%).
- América Central y del Sur, con México, Venezuela, Argentina y Brasil como principales países productores (12%).
- África del Norte, con Libia, Argelia y Egipto (5%).
- Resto de África, con Nigeria (3%).
- Irán, Irak y Emiratos Árabes Unidos (20%).
- Extremo Oriente, que incluye Indonesia, China e India (20%).
- Europa del Mar del Norte, con Gran Bretaña y Noruega como grandes productores (6%).

Además, se cree que existen zonas de origen sedimentario en las que se supone que puede haber yacimientos todavía por explotar como en el Ártico, Alaska, Canadá o Groenlandia. De acuerdo con estudios recientes, si la humanidad consume petróleo al mismo ritmo que hasta ahora lo ha hecho y no se descubren más yacimientos, se prevé que los recursos petrolíferos se agoten en unos 75 a 100 años (CICEANA, 2010).

1.1.2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL PETRÓLEO

El petróleo, al ser una mezcla de diversos compuestos químicos, posee características físicas diferentes entre uno y otro yacimiento, es decir, depende del lugar del que se obtuvo dicho crudo (Proskuriakov y Dabkin, 1984, p. 59).

Según Dubois (2005), las principales características físicas que permiten identificar al petróleo son (p. 36):

- Gravedad específica
- Viscosidad
- Cenizas
- Punto de escurrimiento y enturbamiento
- Residuo carbonoso
- Destilación ASTM – TBP

Para el proceso de biodegradación, es importante conocer básicamente la gravedad específica y la viscosidad del petróleo para de esta manera poder caracterizar de mejor manera a la tierra contaminada.

1.1.2.1. Gravedad específica

Se refiere al peso específico del petróleo (ó sus derivados) comparándolo con el agua a la misma temperatura. La unidad que se utiliza para medir la gravedad específica son los grados API (American Petroleum Institute). Mientras mayor sean los °API, menor será la densidad (Dubois, 2005, p. 37). Según Monroy, (2008), el petróleo puede ser catalogado como (p. 5):

- Crudo liviano o ligero: tiene gravedad específica mayor a 31,1 °API.
- Crudo medio o mediano: tiene gravedad específica entre 22,3 y 31,1 °API.
- Crudo pesado: tiene gravedad específica entre 10 y 22,3 °API.
- Crudo extrapesado: tiene gravedad específica menor a 10 °API.

1.1.2.2. Viscosidad

Se define como la resistencia interna que tiene un fluido al moverse; esto se da debido al rozamiento que se tiene entre las sucesivas capas del fluido. La viscosidad del petróleo es importante conocerla para determinar la posibilidad de bombeo a través de los conductos. Se mide por lo general en centipoises (ctp) y

está influido por la temperatura y por la gravedad específica, es decir, a mayor temperatura, el petróleo disminuirá su viscosidad, y viceversa; además, mientras mayor sean los °API de un petróleo, menor será su viscosidad (Dubois, 2005, p. 38; Proskuriakov y Dabkin, 1984, pp. 63-66).

1.1.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL PETRÓLEO

Existen una gran cantidad de compuestos químicos presentes en el petróleo de los cuales se pueden citar los siguientes:

1.1.3.1. Hidrocarburos

Son la base de la composición del petróleo, ya que en su mayoría están conformados por cadenas de carbono e hidrógeno. Existen diversos tipos de hidrocarburos (HC), debido a que el átomo de carbono puede unirse consigo mismo mediante enlaces simples, dobles, triples; y forma cadenas lineales o cíclicas (Wauquier, 2004, p. 1).

Según Muñoz R. y Muñoz F. (2004), los HC se pueden clasificar en: (pp. 18, 25-26, 47-48, 53-69)

- Hidrocarburos alifáticos saturados, como: metano, etano, propano, butano, octano, etc.
- Hidrocarburos cíclicos saturados, como: ciclo propano, ciclo butano, ciclo hexano, decalina, etc.
- Hidrocarburos alifáticos insaturados, como: etileno, propileno, buteno, etc.
- Hidrocarburos aromáticos, como benceno, tolueno, xileno, etc.

Según la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial del Gobierno de Canarias (2005), la facilidad de degradación de los HC está directamente relacionada con el nivel de saturación; así, mientras más insaturada es una

cadena carbonatada más lenta será su degradación; de igual manera si se tiene hidrocarburos de cadena larga, serán más resistentes a la biodegradación (p.7).

1.1.3.2. Compuestos de azufre

El azufre es el compuesto más abundante que está presente en el petróleo, luego del carbono y del hidrógeno, ya que puede existir entre un 0,1 % y un 8 % en peso del total del petróleo (Wauquier, 2004, p.10). Por lo tanto, este elemento influye directamente en la densidad del petróleo ya que un alto contenido en azufre vuelve al petróleo más denso. Además, el azufre permite clasificar al petróleo en dulces (< 1% en peso) y agrios (>1%). Según Dubois, (2005), un alto contenido de azufre provoca un decremento en el precio del petróleo (p. 26).

Wauquier (2004) afirma que el azufre puede estar presente en el petróleo de las siguientes maneras (p. 10):

- Azufre elemental (S).
- Sulfuro de carbonilo (COS).
- Ácido sulfhídrico (H₂S).
- Tioles o mercaptanos (tiofenol).
- Tiofenos, como el dibenzotiofeno.
- Forma parte de la cadena de saturada, en forma de sulfuro, como el propil pentil sulfuro.

1.1.3.3. Compuestos de oxígeno

En general, los crudos que se extraen de los diferentes yacimientos del mundo, contienen menor porcentaje en peso de oxígeno que de azufre, y no llega a ser mayor al 2% (Wauquier 2004, p. 11). Dubois, (2005), asegura que los efectos adversos por el contenido de este elemento son (p. 26):

- Reducción de la estabilidad en algunos productos como lubricantes.
- Problemas de corrosión.
- Envenenamiento de catalizadores.

- Formación de gomas en la separación de los combustibles pesados como el fuel oil.

Wauquier (2004) manifiesta que el oxígeno puede estar presente en el petróleo en los siguientes tipos de compuestos (p. 11):

- Fenoles, ésteres como el benzoato de metilo
- Furanos y benzofuranos, como el dibenzofurano.
- Ácidos carboxílicos, como el ácido naftoico.

1.1.3.4. Compuestos de nitrógeno

La concentración del nitrógeno en el petróleo oscila entre el 0,1% y el 2% y se encuentra especialmente en fracciones del petróleo cuyos puntos de ebullición es superior a 250°C (Wauquier 2004, p. 11). Según Dubois (2005) los efectos adversos son similares a los compuestos del oxígeno, citados en la sección 1.1.3.3., además incrementan la contaminación ambiental (p. 26). Wauquier (2004), manifiesta que los principales compuestos del petróleo que presentan nitrógeno son los siguientes (p. 12):

- Aminas, como la dimetanoamina.
- Amidas, como la etanoamida.
- Carbazoles, como el dibenzopirrol.
- Piridina y sus derivados.
- Quinoleina y sus derivados.
- Indol y sus derivados.

1.1.3.5. Asfaltenos

Estos compuestos están presentes en las fracciones más pesadas del petróleo, se caracterizan por ser sólidos negros, brillantes, con un peso molecular

comprendido entre 1 000 y 100 000 g/mol. En este tipo de compuestos se concentra la mayor cantidad de elementos como el azufre, nitrógeno, níquel y vanadio, los cuales ocasionan diversos problemas en la industria petrolera y problemas ambientales (Wauquier, 2004, pp. 13-14).

1.1.3.6. Resinas

Este tipo de compuestos, al igual que los asfaltenos, están presentes en las fracciones pesadas del petróleo y se caracterizan por tener un alto contenido de compuestos aromáticos derivados del nitrógeno, oxígeno, azufre, níquel y vanadio; su masa molecular oscila entre los 500 y los 1 000 g/mol (Wauquier, 2004, p. 15). Según Barrios (2011), los hidrocarburos saturados suelen ser más susceptibles a la degradación que los aromáticos y estos más que las resinas y asfaltenos. Los alcanos son los más propensos a la oxidación, luego están los isoalcanos, aunque los HC muy ramificados y los que contienen carbonos cuaternarios son poco biodegradables (p. 63).

1.1.3.7. Otros compuestos

Son sales metálicas, especialmente de hierro, níquel, plomo, cadmio, vanadio, zinc, aluminio y magnesio; estos compuestos tienen efecto sobre el funcionamiento de catalizadores, además tienen un efecto directo sobre la corrosión. (Dubois, 2005, p. 26; Wauquier, 2004, p.13).

1.1.4. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DEL PETRÓLEO Y SU IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE

Los principales procesos que conlleva la actividad petrolera son: exploración en el campo, extracción, tratamiento, transporte y almacenamiento del petróleo y sus derivados.

1.1.4.1. Exploración petrolera

El propósito de la exploración del petróleo consiste en identificar y localizar áreas sedimentarias que pueden contener hidrocarburos; esto se lo realiza sobre la base de investigaciones de tipo geológico y cuencas sedimentarias, que son aquellas zonas extensas en las que geológicamente se divide el territorio de un país y donde se supone dichas áreas (CICEANA, 2010).

El petróleo se puede localizar en distintos lugares, ya sea en el lugar donde se forman los sedimentos; o en su defecto, en lugares lejano a ellos, debido a que el petróleo tiene la capacidad de filtrarse a través de los poros y/o fracturas de las capas subterráneas; pero en ambos casos, los mantos de roca sedimentaria deben estar sellados por rocas arcillosas que impermeabilizan e impiden la filtración del petróleo para que se quede atrapado allí (López, 2002, p. 6). Todos estos trabajos de exploración tienen impactos ambientales, los mismos que Patiño (2009), los clasifica de la siguiente manera (pp. 5-6):

- Alteraciones fisicoquímicas del suelo, que generan procesos erosivos debido a la remoción de la capa superficial de los mismos.
- Generación de desechos líquidos y sólidos debido a la actividad humana en el lugar de investigación.
- Cambios visibles del paisaje por la introducción de elementos y acciones exógenas de su entorno.
- Desplazamiento de la fauna silvestre debido al ruido generado por las diferentes actividades.

1.1.4.2. Perforación de pozos

Luego de haber realizado la exploración de los yacimientos se procede a la perforación para verificar si en el lugar existe petróleo. La profundidad que debería tener el pozo petrolero varía con la zona y la estructura geológica, pero por lo general está entre los 2 000 y 25 000 pies (Monroy, 2008, p. 7).

El tiempo que toma la perforación de un pozo depende de la profundidad programada y de las condiciones geológicas del suelo, se estima que en promedio puede durar entre dos a seis meses. Durante la perforación es importante la circulación permanente de un lodo (o fango) de perforación, lo que permite dar consistencia a las paredes del pozo, enfriar la broca y extraer a la superficie el material triturado (CICEANA, 2010).

De igual manera, para evitar derrumbes, filtraciones o cualquier otro problema propio de la perforación, se adhieren a las paredes del pozo, tubos de revestimiento con un cemento especial que se inyecta a través de la misma tubería y se desplaza en ascenso por el espacio anular, donde se solidifica. Con esto, se facilita la extracción del petróleo en la etapa de producción (CICEANA, 2010).

Bravo (2007), manifiesta que los impactos ambientales generados durante la perforación de pozos petroleros, son similares a los de exploración de yacimientos, con la adición de que se genera una gran cantidad de desechos sólidos provenientes de los lodos de perforación, ya sean de tipo lodos base de agua o lodos base de aceite, estos pueden generar contaminación al medio ambiente debido en parte a los aditivos que se pueden añadir, o a su vez, a la descarga que se realiza al lodo luego de que cumple su función durante la operación (pp. 7-10).

1.1.4.3. Extracción y transporte del petróleo

El petróleo que se extrae mediante tuberías o simplemente ayudado por la presión de gases subterráneos, generalmente está acompañado de sedimentos, agua y gas natural, por lo que es necesaria la separación previa al transporte del mismo (CICEANA, 2010).

A pesar de los avances tecnológicos alcanzados, no es posible extraer todo el petróleo que se encuentra en un yacimiento, ya que sólo se logra obtener el 60%

de su totalidad. Luego es transportado el crudo hacia los tanques de almacenamiento y oleoductos que lo llevarán a las refinerías (CICEANA, 2010).

Uno de los problemas ambientales más importantes durante la extracción de petróleo, es el agua salobre (o agua de formación) presente en los yacimientos. Esta agua de formación se caracteriza por tener altos niveles de salinidad (por ejemplo, 30 000 ppm de cloruro de sodio en los campos de Petroecuador), es extraída a temperaturas elevadas (entre 35 y 75 °C) y posee una alta concentración de HC (hasta un 6% en peso), cianuro, metales pesados (como cadmio, arsénico, cromo, plomo, mercurio, vanadio, zinc, níquel); por estas razones, estas aguas afectan directamente a la vida animal y vegetal de la zona donde se efectúa la extracción (Bravo, 2007, pp. 13-14).

En el año 2003, un estudio realizado por la API demuestra que además de todos estos contaminantes, las aguas de formación poseen compuestos radioactivos gamma (Bravo, 2007, p. 13). Adicionalmente, se puede tener una contaminación debido al uso de químicos para el proceso de extracción, muchos de los cuales son altamente tóxicos y otros de toxicidad desconocida. Existe además contaminación debido al uso de biocidas que se utilizan para controlar la presencia de bacterias reductoras de sulfatos, ya que pueden producir ácido sulfhídrico (H₂S), que es un compuesto muy corrosivo (Bravo, 2007, pp. 14-16).

Finalmente, se puede tener problemas de corrosión en las tuberías del transporte de crudo, lo que ocasionaría grandes derrames de petróleo, no solo en tierra, sino también en el agua, especialmente cuando las plataformas de explotación se construyen en lechos marinos (CICEANA, 2010).

1.1.4.4. Transporte del petróleo

El crudo proveniente de los pozos, es transportado hacia las refinerías con el objetivo de obtener productos útiles para el consumo humano, ya que el petróleo como tal no tiene aplicación industrial y si se usara como combustible, su

eficiencia sería mucho menor, ya que es una mezcla de varios compuestos (Monroy, 2008, p. 8).

Monroy (2008) manifiesta que el petróleo es transportado por (p. 9):

- Vía marítima, en buque-tanques que pueden llegar a transportar hasta 500 000 toneladas.
- Vía terrestre a través de oleoductos o *pipe-lines*, que son conductos que poseen más de un metro de diámetro y varios kilómetros de longitud.

La Figura 1.1 muestra el flujo de petróleo en el mundo para el año 2010:

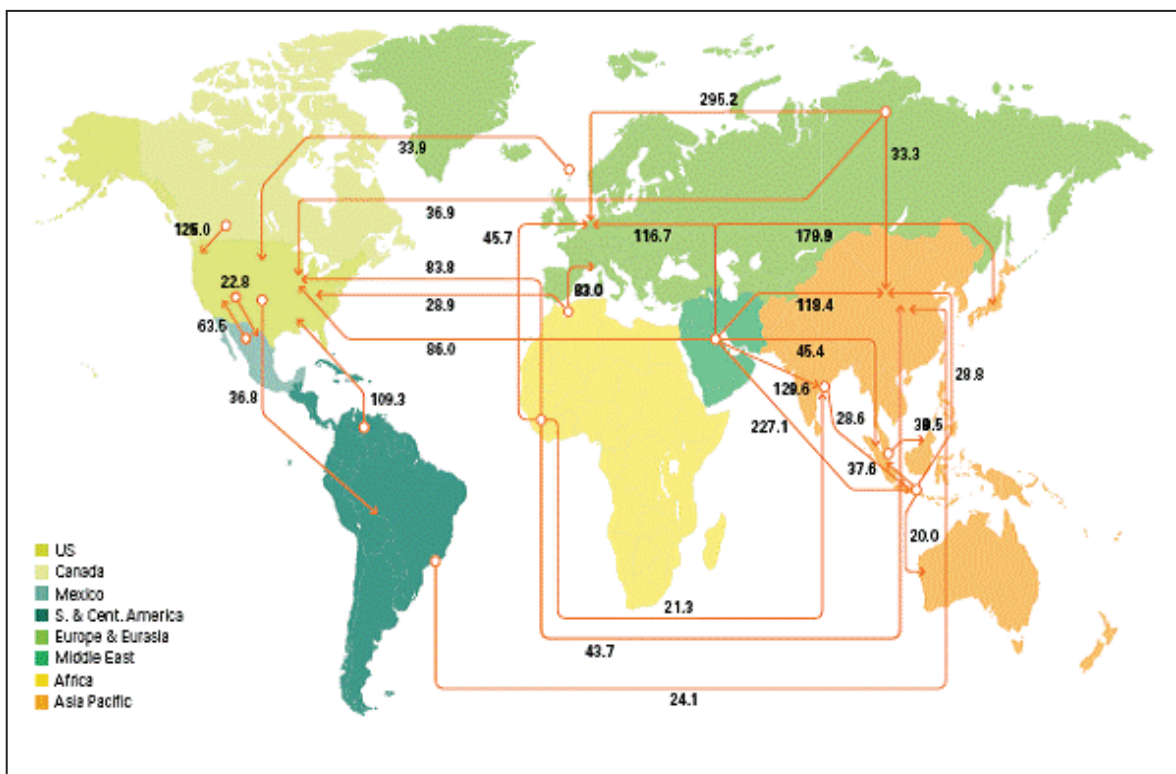


Figura 1.1. Flujo de petróleo en el mundo, en millones de toneladas, para el año 2010 (BP Statistical Review of World Energy, 2011)

En el Ecuador, el petróleo extraído en el Oriente es transportado mediante dos sistemas: Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE) que fue construido en 1970 y el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) que fue construido en el 2001 (Soltani *et al.*, 2001, pp. 3-4).

Estos sistemas recorren varias provincias de las tres regiones del Ecuador: oriente, costa y sierra, lo que generan varios problemas ambientales, especialmente los relacionados a derrames de crudo en todo su trayecto.

Las principales causas que conllevan a los derrames en los sistemas de transporte SOTE y OCP en el país son:

- Deterioro de las tuberías que transportan el crudo por efecto del tiempo de operación, así como también por la corrosión de las mismas (Guaranda, 2009).
- Gran parte de los derrames ocurridos se han debido a la ineficiencia en los planes de contingencia que debería tener cada sistema lo que ha ocasionado incrementar el área de contaminación (Arroba, 2009, p. 5).
- Existen causas debido a fenómenos naturales, como lo ocurrido cuando erupcionó el volcán Reventador en el año 2002, lo que ocasionó ruptura en varias zonas del OCP cercanos al volcán y por lo tanto generan derrames en las zonas aledañas (Weemaels, 2002).

1.1.4.5. Refinación del petróleo

Dentro de los diferentes procesos físicos y químicos a los cuales es sometido el petróleo para su refinación, está en primer lugar un calentamiento hasta unos 360 °C para que se realicen los diferentes tratamientos de separación (Dubois, 2005, p. 99). Los procesos más importantes dentro de la refinación del petróleo son la destilación, el craqueo térmico y el craqueo catalítico:

- **Destilación**

Se refiere al proceso por el cual se separan los diferentes productos presentes en el petróleo mediante la diferencia de puntos de ebullición, por lo cual el crudo debe ser precalentado previamente. Posterior a ello, cada uno de los productos

obtenidos deben ser condensados mediante enfriamiento para su transporte y almacenamiento. Dentro de la industria petrolera, la destilación fraccionada es la más común, ya que se desea separar los diferentes compuestos del petróleo (Dubois, 2005, pp. 99-100).

La destilación puede ser desarrollada en dos tipos de condiciones:

- La destilación atmosférica se da cuando se calienta el crudo a unos 350 °C y se produce la separación de sus componentes por diferencia de puntos de ebullición de los mismos, a presión atmosférica (Dubois, 2005, pp. 100-103).
- La destilación al vacío en cambio se da debido a que si se incrementara la temperatura del crudo, éste empezaría a descomponerse. Por tal motivo, para poder separar más componentes del petróleo, es necesario disminuir la presión de operación; para ello, se coloca eyectores de vapor y condensadores intermedios para la generación de vacío dentro de la columna de destilación (Dubois, 2005, pp. 103-111).
- **Cracking térmico**

Este proceso se lleva a cabo con el objetivo de aumentar el rendimiento de la destilación anteriormente descrita. Las partes más pesadas del crudo se calientan a altas temperaturas bajo presión, esto divide (craquea) las moléculas grandes de HC en moléculas más pequeñas, lo que incrementa la cantidad de gasolina producida (Monroy, 2008, p. 4).

La eficiencia del proceso es limitada ya que, debido a la elevación de la temperatura (hasta unos 850 °C) y de la presión, se deposita una gran cantidad de combustible sólido y poroso en los reactores. Esto determina que se deba emplear temperaturas y presiones aún más altas para craquear el crudo. Tiempo después se desarrolló un proceso en el cual recirculan los fluidos; este proceso

funciona adecuadamente con una acumulación de combustibles sólidos mucho menor que el proceso anterior (Monroy, 2008, p. 4).

- **Cracking catalítico**

Es un proceso que se basa en la descomposición térmica de los componentes del petróleo en presencia de un catalizador, con el fin de fraccionar hidrocarburos pesados cuyo punto de ebullición es mayor a 315 °C, y los convierte en hidrocarburos livianos de cadena corta con un punto de ebullición menor a los 221 °C. Los catalizadores más empleados son: óxido de silicio (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3). Con este proceso se puede obtener naftas e HC aromáticos de alto octanaje (Monroy, 2008, p.6).

- **Impactos Ambientales debido a la refinación del petróleo**

Según Bravo (2007), los impactos ambientales que se generan durante el proceso de refinación son, principalmente, de las emisiones gaseosas, descargas de efluentes, desechos sólidos, ruido, olor y efectos visuales o estéticos (pp. 16-20).

Las emisiones gaseosas contribuyen en gran porcentaje a la contaminación ambiental durante la refinación del petróleo, ya que se generan contaminantes como material particulado, HC, CO, SO_2 , NO_x , compuestos orgánicos volátiles (COV's) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's). Estos contaminantes provienen de los diferentes procesos que constituyen una refinería (Bravo, 2007, pp. 16-17).

Además, para los diferentes procesos se emplean grandes cantidades de agua, con lo cual ésta se contamina principalmente por aceites y grasas, amoniaco, compuestos fenólicos, sulfuros, ácidos orgánicos, y metales pesados. Adicionalmente, existe la contaminación de agua superficial, suelo y agua freática debido a fugas o derrames de las materias primas o productos obtenidos. Existen

contaminantes sólidos, especialmente debido a las partículas catalíticas de las unidades de desintegración, finos de coque, sulfuros de hierro, y diferentes lodos de la limpieza de los tanques, separadores de aceite y agua, y sistemas de tratamiento de las aguas servidas (Bravo, 2007, pp. 17-20).

Muchos de estos contaminantes sólidos, líquidos o gaseosos generan olores que afectan al entorno, así como también existe una contaminación debido al ruido que generan los diferentes procesos de refinación (Bravo, 2007, p. 20).

1.1.4.6. Almacenamiento y distribución de los derivados del petróleo

El almacenamiento de los productos obtenidos durante la refinación garantiza el abastecimiento continuo y regular a los consumidores. Debido a que existe una gran cantidad de productos obtenidos del petróleo, ha sido necesario desarrollar una completa red de sistemas de distribución para ponerlos al alcance del usuario, por lo que los gastos de distribución son superiores a los de refinación (López, 2002, p. 11). Bravo (2007) manifiesta que los principales problemas de contaminación debido al almacenamiento y distribución de los derivados tiene que ver con posibles derrames, ya sea en suelos o en aguas, según el medio de transporte a utilizar (p. 17).

1.1.5. DERRAMES DE PETRÓLEO EN EL ECUADOR

Los derrames ocurridos en el país a lo largo de la historia datan desde el momento en el que se extrajo petróleo del suelo, esto es en la provincia de Santa Elena en el año 1925. Desde allí, han existido innumerables derrames, ya sea por perforación, transporte, almacenamiento o refinación del crudo ecuatoriano (EP Petroecuador, 2010, pp. 2-65). El Ecuador posee, en función de su calidad y cantidad dos tipos de crudo: Crudo Oriente con 24 °API y 1,20 % de S y Crudo Napo con 19 °API y 2,03 % de S, localizados en la Región Amazónica. (EP Petroecuador, 2010, pp. 105-108).

La principal fuente de derrames petroleros en el país es el generado por el transporte que se tiene por los dos sistemas: Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE) que fue construido en 1970, recorre las tres regiones continentales del país y conecta varias provincias del Ecuador, y el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) que fue construido en el 2001 y conecta la cabecera de recepción de crudo de Nueva Loja con el terminal marítimo de Balao (EP Petroecuador, 2010, pp. 89-93).

La Figura 1.2 muestra las cantidades de crudo bombeado por el SOTE y OCP para el año 2011:

 CRUDO BOMBEADO POR LOS OLEODUCTOS TRANSECUTORIANO Y DE CRUDOS PESADOS Cifras en barriles netos Año 2011										
Mes	TRANSECUTORIANO (SOTE) (a)			OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS (OCP)			TOTAL = SOTE + OCP		Participación %	
	API° Prom./mes	VOLUMEN	Prom/día	API° Prom./mes	VOLUMEN	Prom/día	VOLUMEN	Prom/día	SOTE	OCP
ENERO	24,5	11.371.516	366.823	19,1	3.062.885	98.803	14.434.401	465.626	78,8	21,2
FEBRERO	24,8	10.408.457	371.731	19,1	4.036.430	144.158	14.444.887	515.889	72,1	27,9
MARZO	24,6	10.983.716	354.313	19,1	4.202.567	135.567	15.186.283	489.880	72,3	27,7
ABRIL	24,3	10.453.542	348.451	19,2	3.772.263	125.742	14.225.805	474.194	73,5	26,5
MAYO	24,3	10.770.845	347.447	19,3	4.079.500	131.597	14.850.345	479.043	72,5	27,5
JUNIO	24,3	10.162.433	338.748	19,2	3.856.766	128.559	14.019.199	467.307	72,5	27,5
JULIO	24,3	10.374.932	334.675	19,2	3.853.864	124.318	14.228.796	458.993	72,9	27,1
AGOSTO	24,3	10.666.619	344.084	19,4	4.191.616	135.213	14.858.235	479.298	71,8	28,2
SEPTIEMBRE	24,4	10.113.350	337.112	19,3	3.984.463	132.815	14.097.813	469.927	71,7	28,3
TOTAL	24,5	95.305.410	349.104	18,2	35.040.355	128.353	130.345.765	477.457	73,1	26,9
Ene - Sep/2010	24,0	94.709.860	346.923	19,0	30.191.301	110.591	124.901.161	457.513	75,8	24,2
Var. % 11/10		0,6	0,6		16,1	16,1	4,4	4,4	-3,6	11,2
Nota: a) El SOTE bombea tres tipos de crudo: para exportación de 24,0 °API, bacheo para Ref. Esmeraldas 25,5 °API y para Ref. La Libertad de 28,2 °API Fuente: Subgerencia de Oleoducto, Dirección Nacional de Hidrocarburos Elaboración: Coordinación General de Planificación y Control de Programas - Planificación Estratégica, PETROECUADOR										

Figura 1.2. Cantidad de crudo bombeado por el SOTE y OCP, para el año 2011 (EP Petroecuador, 2012, p. 21)

Un caso representativo de derrames ocurridos en el país es el que ocasionó la empresa Texaco, que estuvo en el país 28 años, perforó 339 pozos en un área que actualmente alcanza las 442 965 hectáreas. Contaminó al ambiente con cinco millones de galones diarios de desechos de producción, quemó 10 millones de pies cúbicos de gas diariamente, derramó 16,8 millones de barriles de crudo y causó la deforestación de más de un millón de hectáreas de bosque húmedo tropical. Además, sus operaciones afectaron a los pueblos indígenas Cofán,

Siona, Secoya, Huaorani, Kichwa y colonos; así como también aceleró el proceso de extinción de los pueblos Tetete y Sansahuari (Vogliano, 2009, pp. 2-4).

En 1992 finalizó el contrato con Texaco y todas las operaciones pasaron a manos de EPPetroecuador. Luego de ello se inició un juicio en contra de EEUU para exigir la reparación social y ambiental de las zonas afectadas, valorado en 6 000 millones de dólares (Vogliano, 2009, pp. 4-6).

Aunque Texaco contaminó tanto suelo, agua y aire del territorio ecuatoriano, no es la única responsable de los derrames ocurridos en el país, ya que desde 1994 hasta junio del 2002 se produjeron 779 derrames de petróleo; ocasionó incendios, deforestación, contaminación de agua, aire, suelos, flora y fauna nativa, daños a la agricultura y ganadería, enfermedades a las personas y daños a las comunidades aledañas (Vogliano, 2009, p. 6).

Según Almeida (2010), los derrames más relevantes ocurridos en el país hasta el año 1999 son los siguientes:

- En noviembre de 1989 se contaminaron las lagunas del Cuyabeno por un derrame al romperse un dique de una de las piscinas petroleras y el crudo se derramó en la parte superior de la laguna; la contaminación se extendió a 12 lagunas interconectadas de la zona (Obando *et al.*, 1992, p. 53).
- En el mismo año se derramaron 294 000 galones de petróleo al río Napo, afectó a la comuna quichua de San Carlos y a otras comunidades cercanas al río; mientras que en 1990 ocurrió un derrame en el pozo Amo 2, del Bloque 16, que causó contaminación en el territorio huaorani.
- En febrero del 1992 existió un derrame de tóxicos en el río Napo por parte de la compañía Santa Fe, mientras que en julio del mismo año hubo un derrame de petróleo en el mismo río, durante dos noches y un día, sin control alguno por parte del campo Sacha Norte 1.

- En enero de 1993, la piscina de la estación Secoya se derramó en una extensión de 2 km y destruyó los cultivos de los campesinos; mientras que en el límite del Parque Nacional Yasuní se derramaron 7 000 barriles en el pozo Ishpingo 1, y para mediados de ese año se derramaron en el río Tiputini 300 quintales de químicos de perforación altamente tóxicos que iban al campo Tivacuno.
- En marzo de 1995 existió un derrame en el río Tetete por la rotura de una línea de flujo de Petroproducción; en mayo de ese año existió un derrame en el río Sabalero, en la estación Sansahuari y Cuyabeno por falla de la válvula de control; y en noviembre se derramaron 40 barriles de crudo en la estación de bombeo Lumbaqui que afectó a los ríos Manantial y Coca, así como también a extensas zonas de bosques.
- En el año 1997 existieron derrames en la carretera que llega a la Joya de los Sachas por parte de Petroecuador, en el campo Yuca que afectó al río Aguarico, y en la ciudad de el Coca existió un derrame debido al exceso de presión en la línea principal de transporte del crudo.
- Para enero de 1998, existió un derrame de 100 barriles en el oleoducto enterrado, en el km 70 de la vía Pindo que afectó al río Tiputini. En febrero del mismo año existió un incendio y derrame en la provincia de Esmeraldas; el incendio avanzó por el río Esmeraldas y quemó varias casas de la zona. En julio existió un derrame de 100 barriles en el río Maduro Grande, campo Gacela, Bloque 7 por parte de la compañía ORYX.
- En mayo de 1999, hubo un derrame en el km 9 de la vía Lago Agrio – Tarapoa debido a una rotura del oleoducto enterrado de la compañía CITY, mientras que en octubre del mismo año se derramaron varios barriles de crudo sobre el río Rumuyacu por la rotura de la tubería en el campo Auca, y en noviembre existió un derrame por la rotura del SOTE en la comunidad Chiriboga.

Los derrames petroleros en el país a partir del año 2000 han sido numerosos con pérdidas incalculables. En el 2003 existieron 138 derrames (2,8 semanales, en promedio), en el 2004 esa cifra llegó a 178 (3,7 semanales). En el 2005, bajaron el número de derrames a 169 (3,5 por semana), en comparación con el año 2004 (Guaranda, 2010). Los principales derrames ocurridos en el país a partir del año 2000 hasta el 2012 son los que se detallan a continuación:

- El 3 de Noviembre del 2002 erupcionó el volcán Reventador, ubicado en las faldas de la Cordillera Oriental, a unos 85 kilómetros de Quito. Los flujos de lava y lodo arrastraron y destruyeron 870 metros del OCP. En varias partes, el tubo fue doblado por la presión de los flujos. En uno de los cortes, la extremidad rota se desplazó 100 metros, se dobló y pasó por encima del SOTE. En otros lugares cercanos al volcán, existieron pedazos de tubo del SOTE que quedaron enterrados bajo la lava y el lodo (Weemaels, 2002).
- El 8 de abril del 2003 una rotura del SOTE generó un derrame de crudo en la reserva Cayambe-Coca, en el sector de San Juan Loma, donde el SOTE cruza el río Suco; además contaminó los ríos San Juan, Tambo y Cachilarca, estos últimos desembocan en la Laguna de Papallacta ubicada a 4,3 kilómetros del lugar del incidente, por lo que esta laguna también fue contaminada por este derrame; se estimó que se extendieron alrededor de 13 000 barriles de crudo en todas estas zonas (Weemaels, 2003).
- El 18 de agosto de 2006 se registró un derrame de petróleo de aproximadamente 600 barriles que contaminaron al río Cuyabeno, lugar de inmenso valor biológico por poseer 14 ecosistemas únicos en el Ecuador, de los cuales 8 son únicos en el mundo (Almeida, 2008).
- El 1 de febrero de 2008, se reportó un derrame de petróleo en los límites de la Reserva Natural Yasuní causado por Repsol YPF, en donde se contaminó parte del parque Nacional Yasuní y afectó a la flora y fauna,

así como también a los recursos naturales existentes en la zona. En un inicio Repsol había engañado al Estado ya que manifestó que el derrame era de pequeñas proporciones, sin embargo se pudo constatar que el derrame era de varios cientos de barriles, lo que generó una mayor multa y la consecuente obligación de la empresa Repsol a solucionar este problema de contaminación a la zona protegida (Guaranda, 2010).

- El 3 de marzo de 2008 debido a las intensas lluvias ocurridas en el país, un alud arrasó un tramo del SOTE, en el sector de El Reventador, a unos 60 kilómetros al este de Quito. El derrame de aproximadamente 4 000 barriles de crudo producto de la rotura del SOTE y de un poliducto paralelo, por el que circulan gasolinas, contaminó un pantano y el río Quijos. Este derrame contaminó al río Coca y sobrepasó los 500 Km de contaminación al continuar por el río Napo. Por este desastre, el cantón Coca estuvo varios días sin agua potable, por lo que el abastecimiento tuvo que realizarse a través de un sistema opcional dispuesto por el Ministerio de Minas y Petróleos, que consistía en tomar agua del río Payamino, de por sí contaminado por desechos de petróleo de la compañía Perenco. Otra opción fue tomar el agua desde el cantón Loreto (Guaranda, 2010).
- El 22 de enero de 2012 se produjo un derrame de crudo en el Bloque 21 (Tena), operado por la empresa Petroamazonas, que contaminó la cabecera del río Canambu, además afectó el consumo de agua de las poblaciones Kichwa y Waorani, pero la cantidad de crudo derramado no fue reportado (Molina y Robles, 2012).

Como se puede observar, son varios los reportes que se tienen de derrames, ya sean de gran magnitud o de pequeña magnitud, pero todos siempre afectan al medio ambiente. Es importante recalcar que en esta sección solo se detallaron los derrames más importantes ocurridos en el Ecuador a lo largo de la historia, ya que, según EP Petroecuador (2012), muchos de los derrames de baja intensidad no han sido reportados para evitar las multas e investigaciones ambientales.

1.1.6. LEGISLACIÓN AMBIENTAL

Desde los años 30, la extracción del petróleo en el país ha estado regida por una normativa ecuatoriana. Sin embargo, esta ley no protegía el medio ambiente, sino que únicamente permitía la exploración del petróleo por parte de empresas extranjeras a cambio de que el Estado recibiera ingresos como derechos superficarios, regalías, usos de agua, minerales y otros (EP Petroecuador, 2010, pp. 117-120).

Debido a los continuos problemas ambientales que generan las actividades petroleras, a lo largo del tiempo se han realizado dar varias reformas a la Ley de hidrocarburos con el fin de preservar el medio ambiente. El 1 de Marzo de 1987 se expide por primera vez el Reglamento de Operaciones Hidrocarburíferas que regula la actividad de las operadoras en todo lo referente a la contaminación ambiental, preservación del patrimonio nacional, seguridad e higiene industrial. De igual manera, este reglamento ha sufrido varios cambios a lo largo del tiempo, hasta que el 24 de agosto de 1995 se publica el Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador (RAOHE) (EP Petroecuador, 2010, pp. 120-127).

En la Constitución Política de la República del Ecuador del 2008, se reconoce a las personas el derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado y libre de contaminación. La promulgación de la Ley de Gestión Ambiental de 1999 confirmó que el Ministerio del Ambiente, creado en 1996, es la autoridad nacional ambiental y estableció un Marco general para el desarrollo y aprobación de la normativa ambiental, dentro de los principios de desarrollo sustentable, establecidos en la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo y ratificados en la Constitución Política de la República (Albán *et al.*, 2011, pp. 20-35).

Por tal motivo, el 13 de Febrero del 2001, mediante Registro Oficial N° 265, el entonces presidente de la República del Ecuador, el abogado Gustavo Noboa, expidió el Reglamento Sustitutivo del Reglamento Ambiental para las Operaciones

Hidrocarburíferas en el Ecuador (RAOHE) con el objetivo de disponer de un instrumento eficiente, de fácil comprensión y ágil manejo para los mecanismos de regulación, control y monitoreo de la gestión ambiental en lo referente a las actividades hidrocarburíferas (Albán *et al.*, 2011, pp. 35-43).

En la tabla 6 del RAOHE se detallan los límites permisibles para la identificación y remediación de suelos contaminados en todas las fases de la industria hidrocarburífera, incluida las estaciones de servicio. Estos valores se han compilado en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1. Límites permisibles para la identificación y remediación de suelos contaminados, según lo normado por el RAOHE

Parámetro	Unidad	Uso del suelo		
		Agrícola	Industrial	Ecosistemas Sensibles
pH	---	6 – 9	6 – 9	6 – 9
Concentración de TPH	mg/kg	< 2 500	< 4 000	< 1 000
Concentración de cadmio	mg/kg	< 2	< 10	< 1
Concentración de níquel	mg/kg	< 50	< 100	< 40
Concentración de plomo	mg/kg	< 100	< 500	< 80

(Noboa, 2001, pp. 36)

Existen parámetros que regulan la contaminación del agua en los diferentes procesos de la industria hidrocarburífera y que, al igual que el recurso suelo, existe la normativa ambiental correspondiente y cuyos valores máximos permisibles se encuentran en la tabla 4, literal a. del RAOHE (Noboa, 2001, pp. 34).

En la Tabla 1.2 se muestran algunos de los parámetros a evaluar en el análisis de aguas contaminadas:

Tabla 1.2. Límites permisibles para el monitoreo ambiental de aguas en las descargas líquidas, según lo normado por el RAOHE

Parámetro	Unidad	Destino de descarga	
		Continente	Mar abierto
pH	---	5 – 9	5 – 9
Concentración de TPH	mg/l	< 20	< 30
Concentración de plomo	mg/l	< 0,5	< 0,5

(Noboa, 2001, pp. 34)

1.2. BIORREMEDIACIÓN

Dada la alta cantidad de contaminación que se tiene especialmente en el recurso suelo, la biorremediación se convierte en una de las técnicas modernas más utilizadas (Rodríguez y Sánchez, 2003, p. 11).

Según Rodríguez y Sánchez (2003), la biorremediación es una técnica de remediación que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos (bacterias, hongos y/o levaduras) para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples poco o nada contaminantes (p. 12).

A mediados del siglo XX se iniciaron las primeras investigaciones sobre la posibilidad de usar microorganismos para biodegradar contaminantes. Años después, en la década de los 70, se realizaron diferentes patentes sobre remediación y a partir de esos años se desarrollaron investigaciones para determinar varias técnicas de biorremediación, que incluyen el tratamiento de hidrocarburos simples, hidrocarburos clorinados, hidrocarburos aromáticos, metales pesados, etc.; diferentes tipos de ambientes y localidades, que dependen del tipo de derrame ocurrido (Rodríguez y Sánchez, 2003, pp. 17-18).

Las técnicas de biorremediación usadas en la actualidad pueden ser en el sitio mismo donde se produjo la contaminación (in situ) o se puede realizar fuera del

mismo (ex situ); cada una de ellas tiene ventajas y desventajas y depende de la aplicación que se le dé posteriormente al suelo.

1.2.1. BIORREMEDIACIÓN IN SITU

Esta técnica es la recomendada cuando se tiene suelos y aguas subterráneas contaminadas, ya que su transporte hacia otro lugar implicaría la extracción de terreno no contaminado e incrementaría el costo de operación. El principal problema que se tiene al usar esta técnica de biorremediación es que la mayoría de microorganismos son aerobios, por lo tanto, el suministro de oxígeno será la limitante del proceso (Eweis, Ergas, Chang y Schroeder, 1999, pp. 149-150).

Las técnicas de la biorremediación in situ que se realizan a menudo son:

1.2.1.1. Bioestimulación

Esta técnica consiste, como su nombre lo indica, en la estimulación de las poblaciones microbianas existentes en el suelo propias del medio mediante la adición de diversos nutrientes, control de pH, temperatura, humedad del suelo, etc. El agua subterránea es transportada a la superficie por medio de tuberías en forma de pozos de extracción y es almacenada en un reactor, como muestra la Figura 1.3. Al reactor se añade nutrientes, oxígeno, microorganismos previamente seleccionados y adaptados para que al ingresar nuevamente el agua, se estimule la degradación de los contaminantes del subsuelo y del acuífero. En algunas ocasiones, se añade bio-surfactantes para ayudar al lavado de contaminantes del suelo (Manacorda y Cuadros, 2005, pp. 4-5).

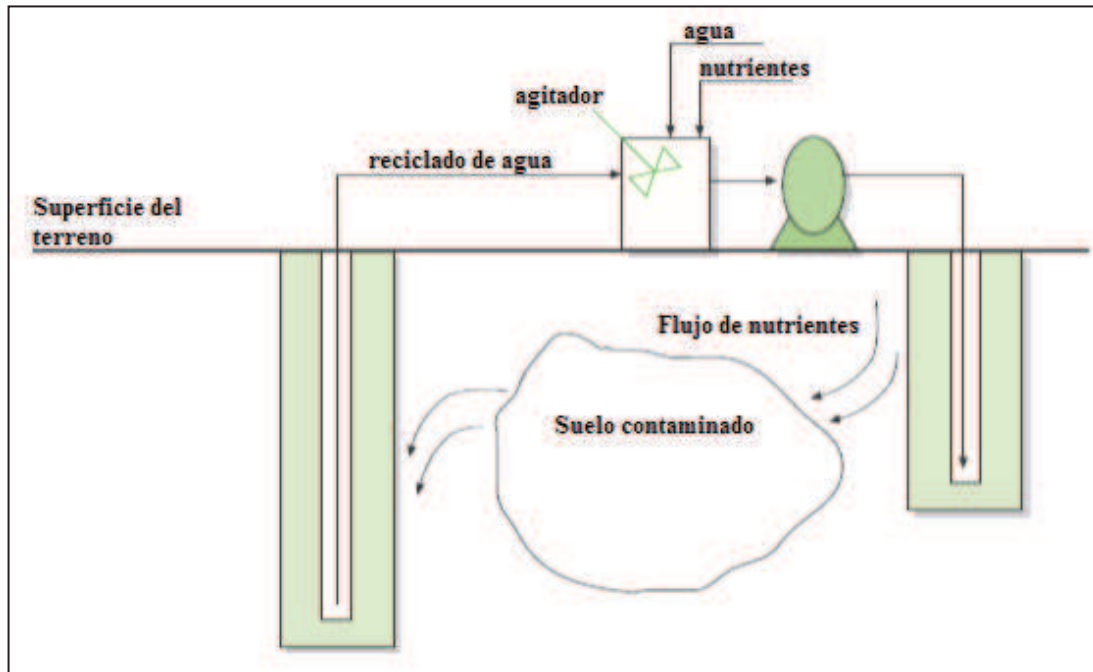


Figura 1.3. Esquema de Biorremediación in situ mediante bioestimulación
(Manacorda y Cuadros, 2005, p. 5)

La ventaja de usar esta técnica radica en que se puede utilizar para grandes zonas de terreno contaminado, donde no es posible parar el proceso operativo que se tenga en dicha zona. Su principal desventaja es que para tener altos rendimientos, los suelos deben ser lo más homogéneos posibles, es decir, que estructuralmente sean del mismo tipo (Rodríguez y Sánchez, 2003, p. 14).

1.2.1.2. Bioventeo o inyección de aire

Esta técnica consiste en la inyección a presión de aire a baja velocidad de flujo en la zona no saturada de oxígeno del suelo, a través de pozos de inyección. Con esto se tiene dos efectos de degradación que son la estimulación microbiana ya que se añade oxígeno al suelo y la volatilización de contaminantes más livianos, a pesar de su baja velocidad de flujo. La principal ventaja es que los tiempos de actuación de las bacterias son muy cortos, ya que se pueden añadir nutrientes, mientras que su desventaja es que no es aplicable para suelos arcillosos y su costo es relativamente alto ya que requiere de un tratamiento del aire de salida (Rodríguez y Sánchez, 2003, pp. 14-15).

1.2.1.3. Difusión de aire o Biosparging

Esta técnica consiste en inyectar aire a presión en la parte inferior de la zona contaminada para desplazar el agua de los espacios intersticiales de la matriz del suelo. Con esto, el aire inyectado absorbe gran cantidad de HC volátiles que están en el agua y en el suelo contaminado, así como también eleva los niveles de oxígeno del agua para mejorar la biorremediación. Su principal desventaja es el costo de suministro de aire a la zona de contaminación, así como también su técnica de aplicación depende del tipo de contaminantes (Eweis *et al.*, 1999, pp. 161-163).

1.2.1.4. Extracción de vapores del suelo

Esta técnica consiste en la generación de vacío en pozos de extracción con lo que se favorece la evaporación y arrastre de contaminantes volátiles y/o semivolátiles, poco solubles en agua. La circulación de aire favorece la biodegradación de contaminantes pesados y el vacío generado depende de la profundidad con la que se trabaja. Su principal ventaja es que es una técnica que se puede aplicar a suelos compactos, mientras que su principal desventaja es que es eficiente cuando los contaminantes son volátiles, y además requiere de un sistema de tratamiento de los gases de salida, para evitar el traspaso de los contaminantes hacia la atmósfera (Eweis *et al.*, 1999, pp. 167-169).

1.2.1.5. Biobarreras

Las barreras biológicas consisten en una “trinchera” rellena con materiales que estimulan la actividad biológica de los microorganismos del suelo (nutrientes y sustratos). Sus principales ventajas es que carecen de partes móviles y no contaminan por ruido ni emanación de gases, bajo costo de operación y mantenimiento, son de funcionamiento fácil y pasivo, es decir, que utilizan biosensores bacterianos que permiten medir los niveles de toxicidad en el suelo.

Sus principales desventajas es que dependen de la velocidad de flujo del agua subterránea y básicamente se limita a suelos arenosos (Manacorda y Cuadros, 2005, p. 6).

1.2.2. BIORREMEDIACIÓN EX SITU

Esta técnica es usada luego de la excavación del suelo contaminado y transportado a otro lugar con el objetivo de optimizar los parámetros microbiológicos, así como el control del proceso. En contraposición, se incrementa el costo de operación (Rodríguez y Sánchez, 2003, p. 18). Dentro de las técnicas más empleadas de biorremediación ex situ, se pueden citar dos categorías:

- Biorrecuperación por vía sólida. Las técnicas empleadas son: por tratamiento en lechos y mediante compostaje (Rodríguez y Sánchez, 2003, p. 18), las cuales se detallarán en la sección 1.2.2.1. y 1.2.2.2.
- Tratamiento por suspensión. Su fundamento está basado en el transporte de los suelos contaminados a un reactor, se trabaja bajo condiciones de saturación acuosa para mejorar el contacto microorganismo (m/o) con los contaminantes y de esta manera controlar mejor los parámetros microbiológicos y de proceso. Sus ventajas son que requieren poco espacio y por lo general los tiempos de operación son cortos, así como el control del proceso es más eficiente; sin embargo, las principales dificultades está en el costo de operación y mantenimiento, así como la combinación de diferentes pretratamientos para un correcto funcionamiento, además no es recomendable para suelos con alto contenido de HC volátiles (Eweis *et al.*, 1999, pp. 225-227, 253).

Las técnicas de biorremediación ex situ por vía sólida son básicamente de dos tipos: mediante compostaje y el tratamiento en lechos, los cuales son descritos a continuación:

1.2.2.1. Compostaje

Esta técnica consiste en estimular la actividad microbiológica aerobia propia de la zona, bajo condiciones de temperatura que permitan transformar los contaminantes en sustancias inofensivas. Se obtiene un producto estable y parecido al humus, rico en materia orgánica, que se denomina compost. Se trata suelo contaminado mezclado con residuos biodegradables (abono, estiércol, paja, cascarilla de arroz, aserrín, etc.) que proporcionan una porosidad óptima, así como también de nutrientes para obtener un balance adecuado de carbono y nitrógeno. El calor generado metabólicamente queda atrapado dentro del compost, lo que da lugar a la elevación de la temperatura; pero una vez que se ha completado la descomposición, se produce un enfriamiento por el descenso de la actividad microbiana (Eweis *et al.*, 1999, pp. 201-210).

La eficiencia del proceso radica en el control de la temperatura, que es de máximo 60°C para bacterias termófilas; contenido de oxígeno, el cual debe tener una aireación continua, al menos 3 veces a la semana; y contenido de humedad que debe estar alrededor del 60%, para ello, en ocasiones es recomendable cubrir el compostaje con plástico para evitar el ingreso de agua de lluvia o la emanación excesiva de HC (Eweis *et al.*, 1999, pp. 211-213).

Dentro de las ventajas que se tienen al usar esta técnica se puede citar: bajas necesidades de energía, tolerancia a altas concentraciones de metales pesados, tiempos de degradación cortos, pequeñas extensiones de terreno, reducción de problemas de contaminación del agua, relativamente baratos (Eweis *et al.*, 1999, pp. 213-214).

Sus principales desventajas es que existe una constante emanación de gases a la atmósfera, así como también un estricto control de la humedad para mantener la actividad microbiana adecuada, debido a que se trabaja con temperaturas elevadas; además, tanto el agua como el aire que circula en el compost afecta directamente al crecimiento microbiano, por lo tanto en la eficiencia del proceso (Eweis *et al.*, 1999, pp. 215-218).

1.2.2.2. Tratamiento en lechos (landfarming)

También conocido como landfarming, es uno de los métodos más sencillos de biodegradación de contaminantes, ya que básicamente consiste en esparcir el suelo contaminado en un espacio de terreno adecuado y realizar técnicas de laboreo, es decir, agitación continua del suelo, adición de agua, nutrientes, abono, etc. (Eweis *et al.*, 1999, pp. 185-186).

Para un adecuado control del crecimiento microbiano se deben monitorear parámetros como: pH, temperatura, humedad, cantidad de nutrientes, cantidad de microorganismos, los cuales se verán en detalle en la sección 1.3. Dentro de las principales ventajas de usar esta técnica, son los bajos costos de inversión y operación, comparándola con otras técnicas de remediación de suelos contaminados. (Eweis *et al.*, 1999, pp. 186-187).

Su principal desventaja es la necesidad de grandes espacios de terreno, puesto que se necesita de la labranza continua de la tierra contaminada. En ocasiones es recomendable el uso de estructuras tipo invernaderos para mejorar el control de temperatura y humedad del suelo, así como también controlar la volatilización de HC livianos, sin embargo, esto incrementaría notablemente el costo de la inversión de esta técnica. (Eweis *et al.*, 1999, p. 199).

Los detalles de esta técnica de biorremediación se explican en la sección 1.3, puesto que es la técnica en la cual se sustenta este proyecto; dicha sección se la denominó simplemente biodegradación para diferenciarla del resto de técnicas anteriormente caracterizadas.

1.2.3. OTROS MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS

Existen diferentes técnicas para remediar suelos contaminados, de los cuales se pueden citar: fisicoquímicos, incineración y depósitos de seguridad, los cuales son detallados a continuación:

1.2.3.1. Métodos fisicoquímicos

Estas técnicas son las más usadas cuando se tienen contaminantes inorgánicos. Su principal ventaja es que además de eliminar sustancias tóxicas permite conservar y reciclar recursos (Domènech y Peral, 2006, p. 183).

Según Domènech y Peral (2006), los principales métodos fisicoquímicos para el tratamiento de contaminantes son los siguientes (pp. 183-201):

- Solidificación, alteración física del residuo para obtener un material sólido.
- Estabilización, reducción de la toxicidad de un residuo.
- Neutralización, adición de reactivos neutralizantes (ácidos o bases) a un efluente de carácter tóxico para ajustar el pH a niveles aceptables.
- Precipitación, transformación de un contaminante disuelto en un sólido insoluble y facilitar su remediación mediante sedimentación o filtración.
- Absorción, mezcla de un sólido de gran superficie específica por el cual ingresa líquido contaminante mediante capilaridad.
- Encapsulación, aislamiento de los residuos en una matriz que evite su exposición a los posibles agentes que puedan facilitar su dispersión.
- Vitricación, mezcla de los contaminantes con sílice, se funde la mezcla y se enfría, de tal manera que el residuo forma una masa vítrea.

1.2.3.2. Incineración

Mediante esta técnica térmica es posible la eliminación de los contaminantes, generalmente con recuperación del calor en forma de energía de los desechos sólidos, líquidos o gaseosos. Este proceso se basa en someter los residuos contaminantes a altas temperaturas (superiores a los 900°C) en un medio oxidante. Su principal ventaja es que los contaminantes se reducen significativamente en peso y volumen; pero esta técnica posee varias desventajas, como por ejemplo la generación de cenizas, escorias y gases; además, no todos los contaminantes se pueden incinerar de la misma manera, ya

que cada uno de ellos tiene sus propias normas de seguridad; además, el costo de esta técnica es muy superior a las técnicas anteriormente mencionadas (Domènech y Peral, 2006, pp. 203-206).

1.2.3.3. Depósitos de seguridad

A pesar de las diferentes técnicas de remediación o disposición final de los contaminantes, existen ocasiones en las cuales se imposibilita seguir algún proceso; por tal motivo, estos contaminantes son almacenados en determinados reservorios industriales para desechos tóxicos y peligrosos con el fin de que las propiedades nocivas de estos no afecten a la naturaleza ni a la salud humana durante algún tiempo. Esta técnica se debería optar únicamente cuando el contaminante sea muy peligroso mantenerlo al ambiente, como por ejemplo con desechos radioactivos. Además, el uso de esta técnica debe estar ligado a un adecuado seguimiento de normas de seguridad y protección al medio ambiente (Domènech y Peral, 2006, pp. 211-214).

1.3. BIODEGRADACIÓN

En esta sección se indican las características que conlleva la aplicación de la técnica de biorremediación ex situ mediante el tratamiento en lechos, lo que se conoce con el nombre de biodegradación por el método de landfarming (Eweis *et al.*, 1999, p. 187).

Para usar esta técnica de biodegradación, el suelo es excavado y extendido en parcelas adecuadas, de gran extensión, en ocasiones junto al lugar donde se realiza la recuperación o puede llevarse a cabo en otro lugar donde las condiciones de operación sean las más adecuadas. La altura del suelo contaminado no debe exceder los 61 cm, pero se recomienda no exceder los 30 cm de altura, y si se trata de suelos arcillosos, no exceder los 23 cm debido a la limitación en la permeabilidad del suelo (Eweis *et al.*, 1999, pp. 188-189).

Eweis *et al.* (1999), manifiesta que para la construcción de un sistema de biodegradación efectivo, se requieren de seis componentes principales (pp. 189-192): capa impermeable, red de drenaje, zona de tratamiento, montículos o terraplenes, sistema de almacenamiento de agua y control del proceso, tal y como se muestra en el esquema de la Figura 1.4.

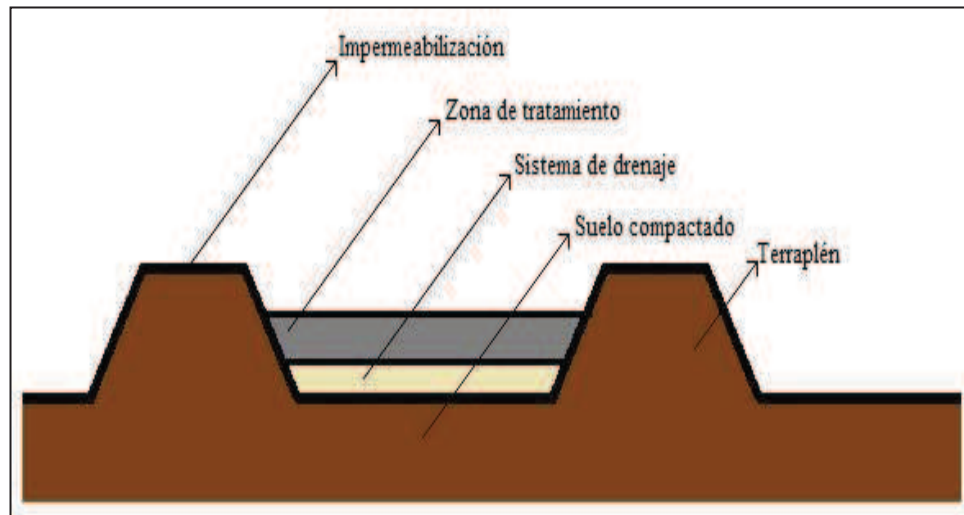


Figura 1.4. Esquema de los elementos principales para la biodegradación por el método de landfarming
(Eweis *et al.*, 1999, p. 190)

- **Capa Impermeable**

Es necesario su uso para impedir la infiltración de los lixiviados al terreno no contaminado y posteriormente a aguas subterráneas. Por lo general se usan plásticos de polietileno de alta densidad (geomembrana) de 1,5 a 2,0 mm de espesor, arcilla compactada de 60 a 90 cm de espesor, y/o pavimento (Eweis *et al.*, 1999, pp. 189-190).

- **Red de drenaje**

Importante para la recolección de los lixiviados generados en el proceso; por lo general se usan tubos perforados en un lecho de arena con un cierto grado de

inclinación para la alimentación al sistema de almacenamiento de lixiviados (Eweis et al., 1999, p. 190)

Existen diversas formas de la recolección de los lixiviados provenientes de agua de riego o de agua de lluvia, los cuales son aplicados según la forma en la que se realice el proceso (Eweis et al., 1999, p. 190).

- **Zona de tratamiento del suelo**

En esta zona se coloca la tierra a tratar, se recomienda un tamizado previo para evitar las piedras de gran tamaño que dificultan las labores de volteo. Además se recomienda una inclinación de las paredes laterales para mejorar la transferencia de agua por toda la zona, como se mostró en la Figura 1.4 (Eweis et al., 1999, pp. 190-191).

- **Terraplenes**

O también llamados montículos, son necesarios para la protección contra la contaminación cruzada entre unidades de tratamiento o pérdidas al suelo no contaminado. Además son útiles para que no ingrese agua de lluvia que se desliza por la parte lateral de la unidad de tratamiento (Eweis et al., 1999, p. 191).

- **Sistema de almacenamiento de agua**

La red de drenaje debe conducir a tanques de almacenamiento de lixiviados, que pueden servir como suministro de agua para épocas secas, o de almacenamiento para un posterior tratamiento cuando existe gran cantidad de precipitaciones, ya que los contaminantes tienen características hidrófobas, por lo que el agua no arrastra este tipo de contaminantes (Eweis et al., 1999, p. 191-192).

- **Control del proceso**

Su uso es de vital importancia para poder obtener resultados eficientes al menor costo, además existen normas ambientales que regulan los diferentes parámetros de control de biodegradación; estos parámetros pueden ser físicos, químicos o microbiológicos. Para un adecuado proceso de biodegradación por el método de landfarming, es necesario controlar estos parámetros (Eweis et al., 1999, p. 192).

1.3.1. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES FÍSICAS

1.3.1.1. Composición del suelo

Los suelos contaminados por lo general provienen de diferentes zonas, por lo tanto estructuralmente son diferentes, por ello el tratamiento se torna complicado, especialmente en el momento del laboreo de la tierra contaminada cuando se trabaja con suelos arcillosos, ya que debido al tamaño de partícula de este tipo de suelos, se forma una pasta cuando la tierra está saturado de humedad (Eweis et al., 1999, p. 204).

Por tal motivo es importante conocer la distribución del tamaño de partícula de los suelos a tratar, con base en el análisis granulométrico (Martín, García y Maza, 2006, pp. 325-326). En la Tabla 1.3 se indica los diferentes tamices que se pueden usar para la identificación del tipo de suelo a tratar:

Tabla 1.3. Numeración y abertura de tamices

Tamiz (ASTM)	Tamiz (mm)	Abertura real (mm)	Tipo de suelo
3 in.	80	76,12	Grava
$\frac{3}{4}$ in.	20	19,05	
N° 4	5	4,76	
N° 10	2	2,00	Arena
N° 20	0,90	0,84	
N° 40	0,50	0,42	
N° 60	0,30	0,25	Limo
N° 140	0,10	0,105	
N° 200	0,08	0,074	
< N° 200	< 0,08	< 0,074	Arcilla

(Martín, García y Maza, 2006, p. 326)

Para mejorar la permeabilidad del suelo, especialmente cuando se trabaja con suelos arcillosos, se recomienda usar agentes esponjantes para incrementar la porosidad y accesibilidad del oxígeno al suelo. Este esponjante debe ser absorbente de humedad, resistente a la compactación y a la degradación. Se recomienda el uso de: paja, heno, cascarilla de arroz, compost, viruta, entre otra vegetación fibrosa (Eweis *et al.*, 1999, p. 204).

1.3.1.2. Humedad del suelo

La humedad del suelo influye directamente en la actividad microbiológica del mismo, y por tanto, en la eficiencia de la biodegradación. La concentración óptima de humedad para un adecuado proceso de biodegradación oscila entre 12 y 30 % en peso. Para ello se puede usar el agua de lluvia, pero se debe controlar que no exista un exceso de la misma; se recomienda cubrir la zona a tratar. De igual manera, se puede utilizar riego artificial por aspersion, cuando la zona donde se desarrolla la biodegradación posee pocas precipitaciones (Eweis *et al.*, 1999, pp. 34-35, 196).

1.3.1.3. Condiciones ambientales

- **Temperatura (T)**

La temperatura ambiental afecta directamente a la temperatura del suelo el cual influye en el crecimiento microbiano y por lo tanto a la función de biodegradación de los suelos contaminados. Por lo general, las bacterias crecen en intervalos de temperatura reducidos, es por ello que su clasificación se da en: *psicrófilas* crecen a temperaturas menores a 20°C, *mesófilas* entre 20°C y 45°C, y las *termófilas* que crecen entre 45°C y 65°C. (Eweis *et al.*, 1999, pp. 94-95).

En general, la T óptima de crecimiento bacteriano para procesos de biodegradación es de 30°C; a temperaturas superiores a los 40°C el crecimiento bacteriano decrece debido a la desnaturalización de enzimas y proteínas que necesitan los microorganismos para su desarrollo. Además, se prefiere temperaturas bajas en lugar de elevadas, ya que en el primer caso las bacterias tienden a encapsularse, mientras que en el otro caso, se puede llegar a la T letal, que es a la cual las bacterias mueren (Eweis *et al.*, 1999, pp. 196-197).

Se recomienda el uso de cubiertas para controlar la temperatura ambiental, ya que en el día puede llegar a ser muy caluroso y por las noches muy frío. El agua de riego, ya sea natural o artificial, también ayuda a controlar la T del suelo (Eweis *et al.*, 1999, p. 197).

- **Humedad Relativa (HR)**

Figueredo y Giovagnoli (2006), define a la humedad relativa como la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en cierta masa de aire y el que éste contendría si estuviese saturado de humedad a la misma temperatura. Por lo tanto, la humedad relativa indica las precipitaciones que pueden existir en la zona, puesto que a una elevada HR, existe gran cantidad de lluvias (p.p. 3-4). Para el oriente ecuatoriano, específicamente la ciudad de Shushufindi, se puede

considerar una HR mayor al 85% para que existan precipitaciones (Vogliano, 2009, p. 1)

1.3.1.4. Oxigenación del suelo

Para proveer de oxígeno al suelo es necesario realizar un laboreo (o volteo) del mismo, el cual además incrementa el contacto entre los microorganismos, los nutrientes y los contaminantes del suelo. La profundidad con la que se realiza el volteo del suelo influye en la eficiencia del proceso; por tal motivo, se recomienda profundidades de suelo no mayores a los 30 cm (Eweis *et al.*, 1999, pp. 193-194).

Además se debe realizar un volteo del suelo de manera continua, al menos 2 veces a la semana y cuando está relativamente seca tierra; demasiado volteo del suelo puede originar una compactación de las capas inferiores de la zona (Eweis *et al.*, 1999, p. 195).

1.3.2. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES QUÍMICAS

1.3.2.1. Potencial de hidrógeno (pH)

Un correcto control del pH en el proceso garantiza un ambiente adecuado para el desarrollo de las bacterias. El rango de pH para el trabajo microbiano oscila entre 6,0 y 8,0; en caso de tener valores fuera de este rango, se recomienda el uso de óxido de calcio, hidróxido de calcio o carbonato de calcio o magnesio para incrementar el pH, o el uso de sulfatos de hierro o aluminio para disminuir el pH del suelo (Eweis *et al.*, 1999, p. 197).

El pH además ayuda a la fijación del fósforo a la tierra, solo para valores de pH comprendidos entre 6,5 y 7,5; cuanto mayor es el valor del pH mayor es la fijación; se pueden provocar fuertes carencias de fósforo cuando el pH es inferior a 5,0 (Benavides, 2005, p. 248).

1.3.2.2. Nutrientes del suelo

El suelo contaminado por lo general carece de nutrientes necesarios para que los microorganismos se desarrollen con normalidad; por tal motivo, muchas de las veces es necesario la adición de nutrientes inorgánicos para compensar la ausencia de nitrógeno o fósforo en el suelo natural (Benavides, 2005, p. 247).

Benavides (2005), recomienda una relación de C:N:P de 100:10:1 a 300:10:1 (p. 248), o lo que resulta una mejor relación propuesta por Eweis *et al.*, (1999) en la que recomienda una relación de C:N de 20:1 a 25:1 (p. 201).

Por lo general se usan nutrientes inorgánicos como fosfato ácido de amonio o de potasio, nitrato de amonio o de potasio; pero también se puede utilizar nutrientes orgánicos como estiércol de animales (ganado vacuno, porcino, avícola) o un compost; con éstos últimos se disminuyen los costos de inversión (Eweis *et al.*, 1999, pp. 195-196).

1.3.3. INFLUENCIA DE LOS MICROORGANISMOS EN LA BIODEGRADACIÓN

1.3.3.1. Crecimiento microbiano

El crecimiento de microorganismos, según Madigan, Martinko, y Parker (2003), se define como un aumento en el número de células microbianas de una población, o un incremento de su masa celular. La tasa de crecimiento celular depende del medio de cultivo empleado y de las condiciones de incubación, pero es característica de cada microorganismo (p. 142).

Es necesario conocer el número de poblaciones microbianas (unidades formadoras de colonias, ufc) que están presentes en un medio determinado; para los procesos de biodegradación este es el parámetro más importante ya que un descenso en la concentración de m/o conllevaría a un deficiente proceso. Se

recomienda trabajar con una concentración de por lo menos 1×10^5 ufc/g (Eweis et al., 1999, p. 103).

El crecimiento como tal es solo una parte del tiempo en el que las poblaciones de microorganismos permanecen vivas. Para un completo análisis es necesario estudiar las diferentes etapas que conforman la curva de crecimiento microbiano. (Madigan, Martinko, y Parker, 2003, p. 144).

La Figura 1.5 muestra dichas etapas:

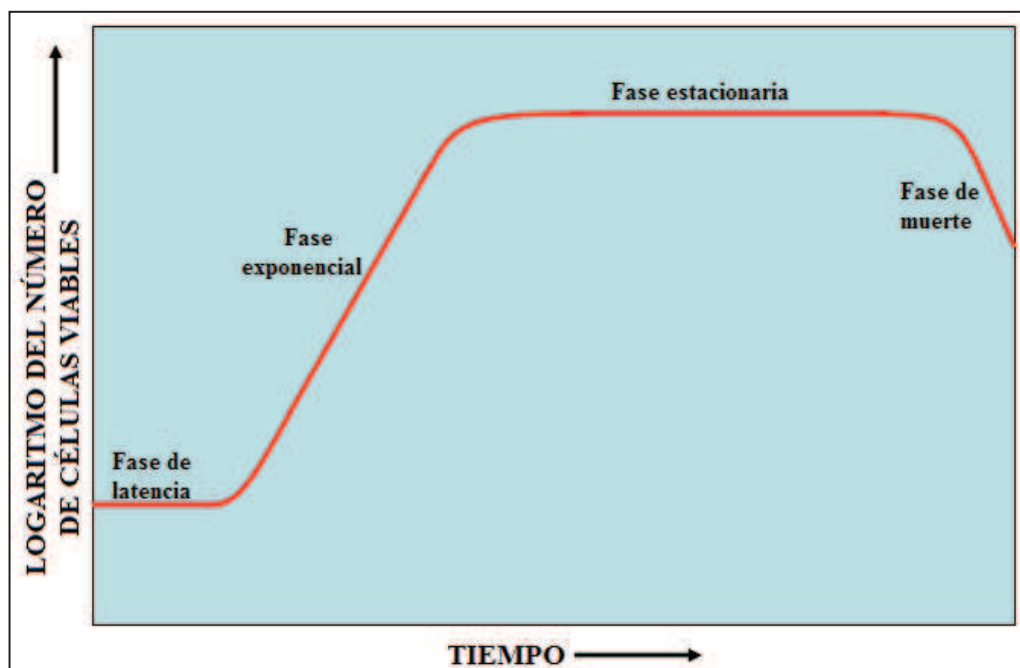


Figura 1.5. Curva de crecimiento típica para una población bacteriana (Madigan, Martinko, y Parker, 2003, p. 144)

- **Fase de latencia**

También llamada fase de adaptación; aquí el microorganismo reconoce el medio en el cual se va a desarrollar y se adapta a él. El tiempo que se tarda en adaptarse el microorganismo al ambiente depende del tipo de m/o, así como también del medio en el cual se desarrollará (Madigan, Martinko, y Parker, 2003, p. 144).

- **Fase exponencial**

Es la consecuencia lógica de que cada célula se divide en dos para iniciar su proceso de crecimiento, ya que cada una se volverá a dividir en dos y así sucesivamente, y como resultado se tiene el crecimiento exponencial (Madigan, Martinko, y Parker, 2003, p. 144).

Para el crecimiento microbiano influyen las variables físicas y químicas del ambiente en donde se desarrollarán, y su velocidad dependerá de las condiciones a las que esté el medio (Madigan, Martinko, y Parker, 2003, p. 145).

- **Fase estacionaria**

Luego de que los microorganismos crecen de manera exponencial, existe luego de un tiempo un freno en su desarrollo, por lo que se mantiene constante su crecimiento; esto se debe especialmente a que los nutrientes que requiere el m/o empiezan a ser limitante para su consumo; además, en ocasiones, existe una acumulación de productos de desecho hasta niveles inhibitorios que impiden un crecimiento exponencial del m/o (Madigan, Martinko, y Parker, 2003, p.145).

En esta fase, no existe ni incremento ni decrecimiento del número de células en el medio debido a que alcanzó el equilibrio entre la velocidad de crecimiento y la velocidad de muerte del microorganismo (Madigan, Martinko, y Parker, 2003, p.145).

- **Fase de muerte**

Esta fase se da debido a que la concentración de los nutrientes en el medio disminuye drásticamente y por lo tanto las poblaciones microbianas empiezan a morir, con una velocidad mucho mayor que la de crecimiento, pero posee la misma tendencia exponencial (Madigan, Martinko, y Parker, 2003, p.145).

1.3.3.2. Bacterias encargadas de la biodegradación

Existe en la naturaleza varios tipos de microorganismos que pueden biodegradar compuestos, especialmente provenientes del petróleo; pero por lo general una especie predomina sobre otra cuando existe una ventaja competitiva debido a condiciones ambientales, disponibilidad de nutrientes o facilidad de adaptación del microorganismo (Evans y Fuchs, 1988, pp. 168-170).

Dentro de los tipos de microorganismos que se encargan de la biodegradación de HC, se tienen hongos, levaduras y bacterias, pero son estas últimas las que han logrado degradar un mayor porcentaje de HC en los suelos contaminados, según los resultados expuestos por Montenegro (1996), Zambrano (2002), Romero (2010) y Caiza (2012).

Las principales bacterias encargadas de la biodegradación son:

- **Pseudomonas fluorescens**

Este tipo de microorganismo pertenece a la rama de las proteobacterias. Es una bacteria gram-negativa aerobia y en ocasiones anaerobia facultativa, constituida por flagelos para movilización en medios acuosos y fimbrias para movilización en medios sólidos (Govan y Deretic, 1996, pp. 540-543). Sus necesidades nutricionales son mínimas por lo que se la puede encontrar en diferentes zonas, su temperatura óptima de crecimiento es de 35°C aunque puede desarrollarse a temperaturas superiores a los 42°C; su rango óptimo de pH para su crecimiento oscila entre 6,0 y 8,0. El tamaño está entre 1,0 a 5,0 µm de largo y entre 0,5 a 1,0 µm de ancho (Fuenmayor y Rodríguez, 1992, pp. 349-351).

Este tipo de bacterias se la puede encontrar en diferentes lugares ya que posee una gran capacidad de adaptación. Es muy utilizada en áreas ambientales ya que es capaz de degradar alcanos de cadena ramificada que provienen de biosurfactantes y catabolizar HC alifáticos y aromáticos (Chaineau, Morel y Oudot,

1995, p. 1616). Esta bacteria además es considerada como un agente patógeno, ya que puede producir infecciones debido al daño que ocasiona en los tejidos en los cuales se puede alojar (Murray, Baron, Pfaller, 1995, pp. 510-515).

- **Bacillus cereus**

La *Bacillus cereus* es una bacteria gram-positiva, perteneciente a la familia *Bacillaceae*, es aerobio o anaerobio facultativo. Posee flagelos que le dan una gran movilidad. Puede desarrollarse en un rango de temperatura entre 10°C y 48°C, pero su temperatura óptima está entre los 28°C y 40°C; su rango de pH es amplio, entre 4,9 y 9,3. Es ampliamente utilizada en el área ambiental debido a su facilidad de degradar contaminantes especialmente cadenas lineales de HC (Atlas y Bartha, 2002, p, 677). Estas bacterias son las causantes de la intoxicación emética, transmitida por los alimentos en los cuales se puede desarrollar, ocasiona vómito, infecciones en el intestino delgado; por lo que se recomienda tomar las debidas precauciones durante su análisis (Buesa, 1981, p. 124).

1.3.4. BIODEGRADACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS

Dentro de los HC más fáciles de biodegradar se encuentran los alcanos, ya que dentro del proceso de crecimiento de las bacterias se genera la enzima monooxigenasa la cual ataca al grupo metil de dichos compuestos y se forma un alcohol, este alcohol es oxidado hasta un aldehído y posteriormente a un ácido graso (Eweis *et al.*, 1999, pp. 131-132).

Estos compuestos son más fácilmente metabolizados por las bacterias y como producto de su desarrollo se genera dióxido de carbono, el cual es emanado a la atmósfera (Eweis *et al.*, 1999, p. 132).

La Figura 1.6 muestra un esquema de biodegradación de los alcanos:

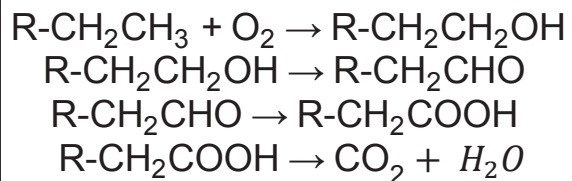


Figura 1.6. Esquema de biodegradación de alcanos

Conforme se incrementa el peso molecular de los contaminantes o se tiene HC cíclicos o aromáticos, el proceso de degradación se vuelve más complicado y por lo tanto los tiempos de degradación de suelos se incrementan (Eweis *et al.*, 1999, pp. 132-137).

1.3.5. MOVILIZACIÓN DE METALES PESADOS EN LA BIODEGRADACIÓN

Según Sauquillo *et. al.* (2003), los factores que influyen en la movilización de los metales pesados en el suelo son (pp. 152-159):

- Características del suelo, como: pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de cambio, presencia de carbonatos, materia orgánica, textura.
- Naturaleza de la contaminación, como el origen de los metales y la forma de deposición.
- Condiciones medioambientales, como la acidificación, los cambios en las condiciones redox y la variación de temperatura y humedad.

Alloway (1995) señala que los principales mecanismos de movilización que tienen los elementos traza de metales pesados en suelos contaminados son (pp. 285-298):

- Acidificación, que es el resultado de la oxidación de sulfuros minerales y precipitados de fertilizantes de NH^4 , por la fijación biológica de nitrógeno, por precipitación atmosférica ácida (SO_x y NO_x) sobre los suelos, por descomposición de materia orgánica y/o por lixiviación.

- Cambios en las condiciones redox que son las condiciones oxidantes y pueden causar la oxidación y disolución de sulfuros insolubles. Por el contrario, condiciones reductoras pueden conducir a la disolución de óxidos.
- Cambios en la composición iónica de la solución del suelo que pueden tener un efecto en la adsorción de elementos traza y su incorporación en complejos inorgánicos solubles e insolubles. Sus efectos pueden ser:
 - Competición por los sitios de adsorción (por ejemplo, Ca^{+2} y Zn^{+2} inhibiendo la adsorción de Cd^{+2})
 - Formación de complejos solubles (con aniones como Cl^- y SO_4^{-2})
 - Formación de compuestos insolubles como $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
 - Efectos de fuerza iónica, de manera que incrementos en la fuerza iónica de la solución del suelo como resultado de la contaminación, aplicación de fertilizantes o salinidad puede conducir a una adsorción reducida y a la desorción de metales de lugares de la superficie.

Según García y Dorronsoro (2005), de manera general, los metales pesados presentes en el suelo pueden seguir cuatro diferentes vías:

- Quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la fase acuosa del suelo, ocupando sitios de intercambio o específicamente adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo, asociados con la materia orgánica del suelo y/o precipitados como sólidos puros o mixtos.
- Ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas.
- Pasar a la atmósfera por volatilización.
- Movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. OBJETIVOS

- Analizar dos procedimientos a escala piloto para la biodegradación en suelos contaminados por hidrocarburos, por el método de landfarming.
- Analizar el uso de un tipo de bacteria comercial para la biodegradación de hidrocarburos.
- Analizar el uso de bacterias nativas para la biodegradación de los hidrocarburos del suelo contaminado.
- Realizar un análisis costo – beneficio de los procesos estudiados.

2.2. MATERIALES

2.2.1. ADECUACIÓN DEL TERRENO

- Bacteria AWT – B350.
- Cascarilla de arroz de la Piladora de arroz Santa Ana.
- Estiércol de ganado del Camal Municipal del Cantón Shushufindi.
- Geomembrana marca Aqualiner®.
- Tamiz de malla metálica cuadrada ondulada de abertura de 1 ½ in.
- Termohigrómetro marca DIGITAL THERMO-HYGROMETER (Temperatura: 0°C – 50°C, 0,1°C y Humedad: 20% – 95%, 1%).

2.2.2. ANÁLISIS FÍSICOS DEL SUELO

2.2.2.1. Tamaño de partícula

- Balanza digital marca Trooper OHAUS, modelo TR6RS, 6000 g, 0,1 g.
- Estufa marca P-Selecta ®, modelo 140 B, 0 – 500 °C precisión 1 °C.

- Agitador mecánico marca TYLER Ro-Tap® 8" RX-29, modelo B.
- Juego de tamices U. S. A. STANDARD TESTING SIEVE, marca VWR Scientific AVWR Company con número de malla mostrado en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1. Numeración y abertura de tamices normalizados para el análisis del tamaño de partícula

Tamiz (ASTM)	Tamiz (mm)
3 in	80,00
2 in	50,00
1 in	25,00
3/8 in	10,00
N° 4	5,00
N° 10	2,00
N° 40	0,50
N° 60	0,30
N° 200	0,08

2.2.2.2. Densidad relativa

- Ciclo Hexanona, 99%, BDH Laboratory reagents.
- Alcohol etílico, 99,6 %, J. T. Baker.
- Éter de Petróleo, grado Técnico, Mallinckrodt CHEMICALS.
- Balanza analítica marca DENVER, 210 g, 0,0001 g.
- Bomba de vacío Consolidated Vacuum Corporation marca EMERSON, modelo SA55JXGTD-4144, 1 725 rpm, 1/6 HP.

2.2.3. ANÁLISIS DE PH DEL SUELO

- Medidor de pH marca HANDYLAB 0,01.
- Soluciones Buffer (pH = 7,00 ± 0,01 a 25°C, pH = 4,01 ± 0,01 a 25°C), marca BECKMAN:

2.2.4. CONTROL DE LA BIODEGRADACIÓN

2.2.4.1. Determinación del número de unidades formadoras de colonia

- Trypticase Soy Agar, Difco™, Dickson and Company, referencia 236950.
- Balanza analítica DENVER, 210 g, 0,0001 g.
- Plancha de calentamiento, Barnstead Thermolyne, CIMAREC, modelo SP 131325, 5°C – 540°C, precisión 5 °C.
- Autoclave, New Brunswick Scientific Co. Modelo AE 15-10 2777, 0-30 psi, 30-135°C.
- Baño termostático Julabo modelo SW22.
- Cabina de flujo laminar Flow 85 H.
- Estufa marca P-Selecta ®, modelo 140 B, 0 – 500 °C precisión 1 °C.

2.2.4.2. Determinación del contenido de aceites y grasas

- Ciclo hexanona 99%, BDH Laboratory reagents.
- Sulfato de sodio anhidro, HiMedia Laboratories, ref 1037-500G 99,0%.
- Equipo de extracción Soxhlet, marca P-Selecta ®, modelo 0501509.
- Equipo de destilación, marca P-Selecta ®, modelo 0501510.
- Cartuchos de extracción 25 x 80 mm.

2.2.4.3. Determinación del perfil de TPH por cromatografía de gases

- Ciclo hexanona 99%, BDH Laboratory reagents.
- Sulfato de sodio anhidro, HiMedia Laboratories, ref 1037-500G 99,0%.
- Sílica gel 70/270 mallas, grado técnico.
- Cromatógrafo de gases, marca Varian Modelo 3 700, con columna empacada y con un detector de ionización de llama.
- Agitador mecánico New Bruswick Cientific, modelo G – 33

2.3. CONSIDERACIONES EN LA INFRAESTRUCTURA PARA LA BIODEGRADACIÓN POR LANDFARMING

2.3.1. DISEÑO DE LAS HILERAS

Para llevar a cabo el proceso de biodegradación por el método de landfarming se dispuso de un terreno de 20 m de largo y 5 m de ancho, ubicado en las bodegas de Incinerox, localizadas en el cantón Shushufindi, cuya ubicación exacta fue: Latitud: S 00° 11' 19,5", Longitud: WO 76° 39' 49,2", Elevación: 261 m, medido con un GPS Marca: Etrex Legend Garmin Ltda.

Este terreno fue dividido en dos partes aproximadamente iguales, cada una con 20,0 m de largo y 2,5 m de ancho, a las que se las denominó hilera A y B, como se puede observar en la Figura 2.1.

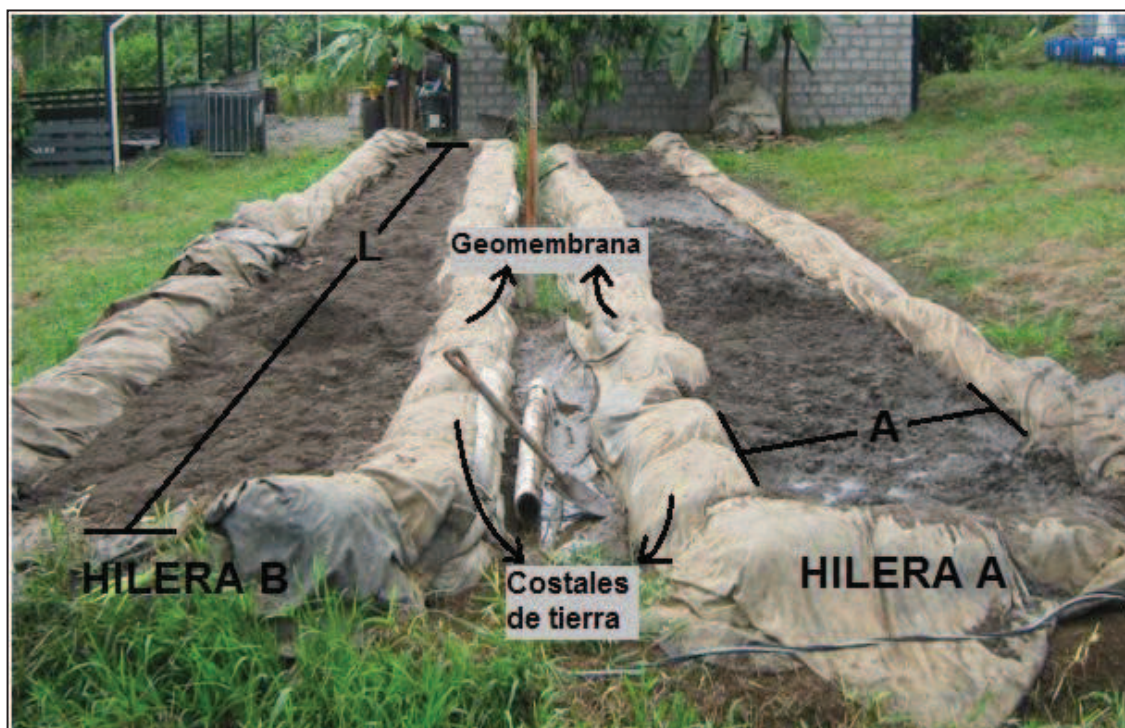


Figura 2.1. Hileras implementadas para el desarrollo del proyecto

Tanto la hilera A como la hilera B fueron diseñadas de similar forma, para lo que fue necesario considerar 3 dimensiones: largo, ancho y profundidad.

Este diseño se esquematiza en la Figura 2.2 en vista superior, frontal y lateral. En la vista superior las hileras fueron de forma rectangular, donde L era el largo y A el ancho superior de la hilera.

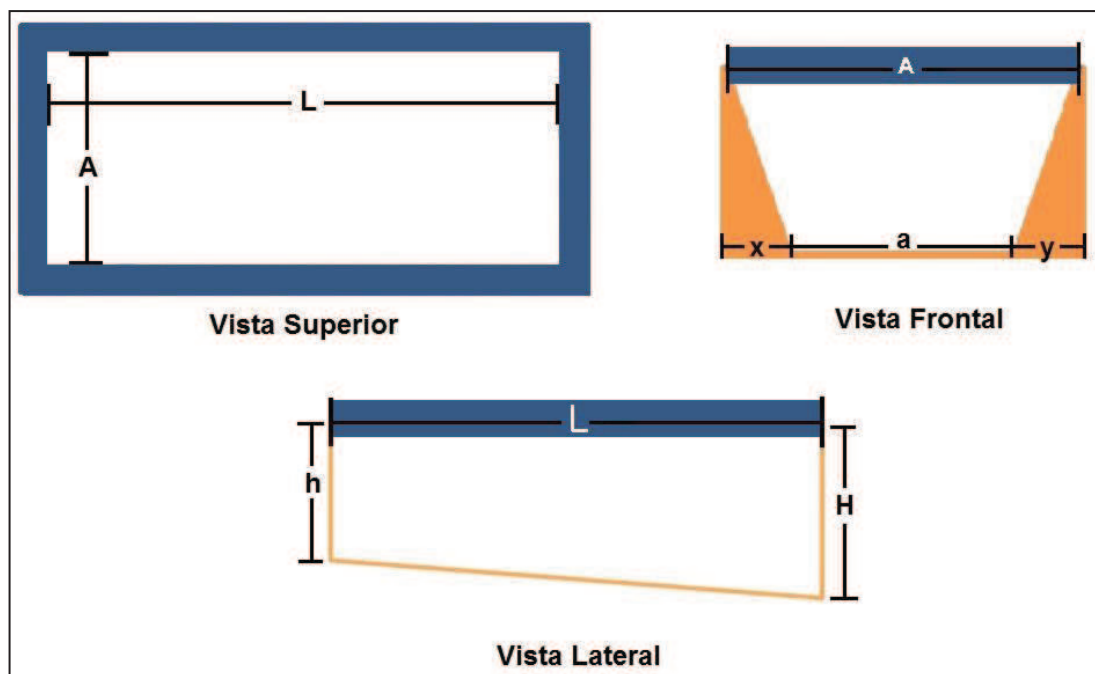


Figura 2.2. Diseño de las hileras para la biodegradación por el método de landfarming

En la vista frontal las hileras poseían forma de cono truncado para evitar la acumulación de agua de lluvia en las paredes de la misma. Finalmente, en la vista lateral poseían cierta inclinación para acumular los lixiviados en un solo sector de la misma.

Las dimensiones que tuvieron tanto la hilera A como la hilera B se detallan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Dimensiones de las hileras A y B

Dimensión	Hilera A (m)	Hilera B (m)	Dimensión	Hilera A (m)	Hilera B (m)
L	18,20	19,20	y	0,35	0,55
A	1,40	1,32	H	0,49	0,58
a	0,41	0,61	h	0,35	0,35
x	0,64	0,16	---	---	---

Cabe señalar que a fin de facilitar el proceso de mezclado y la instalación de una geomembrana se colocaron costales de tierra alrededor de cada una de las hileras, como se observa en la Figura 2.1.

Cada hilera estuvo provista de una geomembrana tanto en la parte inferior del suelo para evitar infiltraciones de contaminantes al suelo nativo, como en la parte superior para evitar el exceso del agua de lluvia. (Montenegro, 1996, p. 70).

2.3.2. ADECUACIÓN DEL TERRENO

Para determinar la cantidad de tierra que se sometería al proceso de biodegradación se aplicó la Ecuación [2.1], donde se empleó el volumen de la hilera (V) y la densidad relativa de la tierra (ρ).

$$M_{dt} = \rho * V \quad [2.1]$$

Donde:

M_{dt} : Masa de tierra en cada una de las hileras, Ton

V: Volumen de las hileras calculado con los datos de Tabla 2.2, m^3

ρ : Densidad relativa de la tierra, Ton/m^3

La cantidad de tierra contaminada que se obtuvo del cálculo mencionado se colocó en las hileras sin permitir que la altura de la misma sobrepasara los 50 cm con el objeto de mejorar su aireación al momento de la agitación. (Romero, 2010, p. 74). Debido a que la tierra a tratar provenía de diferentes sitios de la amazonía y para evitar heterogeneidades en el tamaño de partícula se la tamizó y mezcló previo al proceso de biodegradación. En la hilera A se colocaron las bacterias comerciales, mientras que en la hilera B se usaron bacterias nativas.

Cabe recalcar que, según Eweis, *et al.*, (1999) para el desarrollo de microorganismos en suelos se requiere de una relación de 30:10:10 de los

componentes nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), por lo que en el caso de la hilera B fue necesaria la adición de un abono compuesto por estiércol de ganado y cascarilla de arroz a la tierra previo a la biodegradación. (p. 202). Este abono no se requirió al trabajar con bacterias comerciales, ya que estas venían provistas por los nutrientes necesarios y serían activadas únicamente con la adición de agua, como se muestra en la ficha técnica de la Figura AI.1 en el ANEXO I.

A fin de determinar las condiciones ambientales en las que se desarrollaron las bacterias se monitoreó la temperatura ambiente y humedad relativa del lugar, para lo que se empleó el termohigrómetro digital descrito en la sección 2.2.1.

2.3.3. TÉCNICA DE MUESTREO

El muestreo empleado se realizó sobre la base de la ficha técnica de Buduba (2004). (pp.10-11). El fundamento de esta técnica se aplicó para realizar tres distintos conjuntos de análisis a diferentes etapas del proceso, los mismos que se detallan a continuación:

- Antes de colocar la tierra en las hileras se procedió a analizar el tamaño de partícula, la densidad relativa y los nutrientes en la tierra y en el abono. Para esto se tomó aleatoriamente ocho muestras de aproximadamente 0,5 kg cada una, se las homogenizó y cuarteó según lo indicado por Pope L. y Ward Ch., (1998) para su posterior análisis (pp. 2-5). Con estas muestras también se analizó la concentración inicial de: aceites y grasas, metales pesados, TPH por infrarrojo y caracterización por cromatografía de gases.
- Una vez colocada la tierra en las hileras se marcó aleatoriamente 4 puntos de muestreo en las mismas en forma de zigzag, para abarcar toda la hilera, como se observa en la Figura 2.3. En cada punto de muestreo se tomó aproximadamente 2 kg de tierra y para cada hoyo se homogenizó la muestra tomada y se la cuarteó para obtener una muestra final a la que se realizaron análisis de humedad, pH, cuantificación de microorganismos.

- Para el resto de análisis de la concentración de aceites y grasas, hidrocarburos totales de petróleo (TPH) por infrarrojo, metales pesados y cromatografía de gases, se tomó una muestra de tierra de aproximadamente 0,5 kg de cada hoyo que se muestra en la Figura 2.3 y se los homogenizó para obtener una muestra por cada hilera.



Figura 2.3. Puntos de muestreo en las hileras A y B.

2.4. ANÁLISIS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DEL SUELO

2.4.1. ANÁLISIS FÍSICOS

2.4.1.1. Tamaño de partícula

Este procedimiento se basó en la norma ASTM D 2488 - 75 y se aplicó exclusivamente la muestra inicial. Este análisis fue necesario para la caracterización del suelo a tratar, es decir, para identificar su naturaleza.

El análisis se inició con una homogenización, cuarteo y secado a 60°C de la muestra inicial. Para este secado se empleó aproximadamente 10 kg de muestra, la misma que se retiró de la estufa cada 30 minutos hasta obtener un peso constante, a este peso se lo denominó M_t .

Posteriormente, se depositó el material en la criba superior de un juego de tamices, los cuales estaban limpios, pesados y ordenados en forma decreciente según el número de malla que se puede observar en la Tabla 2.1. Este juego de tamices se agitó durante 10 minutos, luego de lo cual se añadió agua en el juego de tamices a fin de que el material fino se separe.

Al material retenido en los tamices se secó a 105°C durante 24 horas, luego de lo cual se enfrió las muestras y se las pesó, con lo que se pudo obtener el porcentaje de arcilla, limo y grava presente en la muestra original, en función de la Ecuación [2.2]:

$$\% \text{ RM} = \frac{\text{MRM}}{M_t} * 100 \quad [2.2]$$

Donde:

% RM: Porcentaje retenido en las diferentes mallas

MRM: Masa retenido en cada malla, g

M_t : Masa total de la muestra seca, g

Para obtener el material de tamaño de partícula menor a la malla N° 200 se sumó la masa retenida en cada uno de los tamices, a la cual se llamó M_f y se aplicó la Ecuación [2.3]

$$m_{< \text{malla N}^\circ 200} = M_t - M_f \quad [2.3]$$

Este procedimiento se realizó tanto para la muestra como para una paralela, a fin de estimar la desviación estándar y por ende la exactitud de los valores obtenidos.

2.4.1.2. Densidad relativa

El método a seguir fue llevado a cabo sobre la base de la norma ASTM C 127 y se aplicó exclusivamente a la muestra inicial; es decir, al suelo contaminado original sin ningún tipo de adiciones. Este análisis fue necesario para la determinación de la masa de suelo a tratar que se obtiene de la Ecuación [2.1].

Para el cálculo de la densidad relativa, se empleó 10 g de muestra, que debió ser previamente secada en una estufa a 105°C durante 2 horas, luego de lo cual se la pesó y posteriormente sumergió en 200 mL de agua destilada donde se dejó en reposo por 12 horas.

Se colocó la muestra en un picnómetro y se agregó agua destilada por las paredes del mismo para evitar la formación de burbujas de aire hasta alcanzar aproximadamente las 3/4 partes de su capacidad.

Después se extrajo el aire de la mezcla agua – suelo; para lo que se colocó en un baño maría al picnómetro con la muestra y se acopló una bomba de vacío y se la mantuvo encendida en intervalos de 3 minutos por 1 hora.

Luego se aforó al picnómetro y se procedió a extraer el aire de la misma forma por 6 ocasiones. Una vez que se terminó la remoción del aire atrapado se tapó el picnómetro con la muestra y se dejó enfriar a temperatura ambiente, se limpió y secó el exterior del mismo para poder determinar el peso del picnómetro más la muestra y el agua.

Finalmente, se determinó la temperatura de ensayo del agua, puesto que se requirió la densidad de la misma a dicha temperatura. Para poder determinar la densidad de las partículas sólidas, es decir, del suelo contaminado con hidrocarburos, se utilizó la Ecuación [2.4]:

$$Y_s = \frac{M_s}{M_s + M_{a\ T^\circ x} - M_m} * Y_{w\ T^\circ x} \quad [2.4]$$

Donde:

γ_s : Densidad de las partículas sólidas, g/cm^3

M_s : Masa seca de la muestra de ensayo, g

$M_{aT^\circ X}$: Masa del picnómetro más el agua a la temperatura de ensayo, g

M_m : Masa del picnómetro más la muestra y el agua a la temperatura de ensayo, g

γ_w : Densidad del agua a la temperatura de ensayo, g/cm^3

A fin de determinar la desviación estandar de esta densidad se realizó este procedimiento cuatro ocasiones.

2.4.1.3. Humedad

La técnica que se siguió para la determinación de la humedad estuvo basada en el método EPA 160,3. Esta prueba fue realizada al inicio y durante todo el proceso de la biodegradación, para lo que se tomaron cuatro muestras y sus paralelas cada 15 días tanto de la hilera A como de la hilera B, con lo que se obtuvo una humedad promedio para cada hilera por día de muestreo.

El objetivo de cuantificar la humedad en la tierra fue determinar si se encontraba dentro del rango de 12 y 30% recomendado por Eweis, *et al.*, (1999) para el crecimiento normal de microorganismos en suelos. (pp. 34-35, 196)

El proceso de determinación de la humedad se inició al tarar un crisol a una temperatura de 105°C durante una hora y se lo dejó enfriar dentro de un desecador, para pesarlo posteriormente.

En el crisol tarado y pesado se colocó aproximadamente 5 g de muestra de suelo homogenizado y se llevó a una estufa a 105°C durante 2 horas. Se dejó enfriar la muestra en el desecador y se pesó el crisol, con lo que se determinó el porcentaje de humedad por diferencia de pesos, como se indica en la Ecuación [2.5]:

$$\% H = \frac{M_c + M_m - M_t}{M_m} * 100 \quad [2.5]$$

Donde:

%H: Porcentaje de humedad, %

M_c: Masa de crisol tarado, g

M_m: Masa inicial de muestra, g

M_f: Masa final de la muestra seca, g

2.4.2. ANÁLISIS QUÍMICOS

2.4.2.1. pH

Con el fin de determinar el pH de la muestra se siguió un método con base en la norma ASTM D 2976-71, y se aplicó a cada una de las muestras tomadas durante el desarrollo del proyecto.

El objetivo de la medición del pH en el suelo fue controlar que esté dentro del rango de 6 a 8, recomendado por Eweis, *et al.*, (1999), caso contrario, se debería añadir al suelo algún tipo de reactivo que regule el pH sin alterar significativamente su actividad microbiana. (p.197)

Para determinar el pH de la muestra se pesó 40 g en una luna reloj y se colocó en un erlenmeyer de 250 mL, donde se añadió 40 mL de agua destilada y se agitó durante 30 segundos cada 3 minutos un total de 5 veces hasta tener una suspensión homogénea. Para evitar que el medidor de pH se dañara, se dejó reposar la mezcla hasta que los sólidos sedimenten y se tenga un líquido claro sobrenadante, del cual se tomó una muestra, se filtró y se midió el pH. Cabe señalar que la determinación del pH se realizó cada 15 días en 4 muestras por hilera y con el promedio de los datos obtenidos por día de muestreo se realizó una gráfica pH vs. tiempo.

2.4.2.2. Nutrientes

Según Montenegro, (1996), en suelos arcillosos es necesario mejorar la permeabilidad del mismo mediante la adición de cascarilla de arroz y estiércol de ganado en una relación de 4,2% y 0,8% en peso, respectivamente (p. 74). Esta adición se la efectuó únicamente en la hilera B, ya que las bacterias comerciales presentes en la hilera A eran capaces de desarrollarse aún en ambientes relativamente húmedos, según lo indicado por el proveedor.

La determinación de los nutrientes se realizó en la cascarilla de arroz mencionada anteriormente, en el suelo contaminado y en el abono. Tanto a la cascarilla de arroz como al suelo inicial se determinó el nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), mientras que al abono únicamente se determinó el contenido de nitrógeno. Estos análisis se realizaron a fin de establecer las relaciones entre los nutrientes y compararlas con las recomendaciones mencionadas de NPK (30:10:10) dadas por Eweis, *et al.*, (1999) (p. 202)

Con el fin de determinar la relación carbono-nitrógeno presente en el suelo al cual se añadió la cascarilla de arroz, el estiércol de ganado y el abono, se analizó la cantidad de carbono orgánico presente en dicha tierra y se realizó un balance de nitrógeno de las aportaciones de cada uno de los materiales añadidos.

Para la determinación de los nutrientes mencionados que conformaban el suelo contaminado con hidrocarburos, se tomó una muestra según la técnica descrita en la sección 2.3.3.

Las técnicas que se siguieron para la determinación de cada uno de los nutrientes se describen a continuación:

- Fósforo Total – Norma APHA 4500 - P C; técnica Colorimétrica; como macroelemento indispensable para el desarrollo de microorganismos.
- Nitrógeno Orgánico – Norma Nessler APHA 4500 – N B (Cascarilla); para la adición a la tierra contaminada.

- Potasio – técnica Colorimétrica & Absorción Atómica; como nutriente para microorganismos del suelo.
- Nitrógeno Total – Norma APHA 4500 – D NH₃, para la posterior relación carbono – nitrógeno que tenga el suelo.
- Carbono Orgánico Total – Norma APHA 5310 B; similar a la anterior.

2.4.3. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE LAS TIERRAS CONTAMINADAS CON PETRÓLEO

Para identificar y cuantificar los microorganismos aerobios presentes en la tierra contaminada con hidrocarburos se envió una muestra de la tierra inicial al Laboratorio DISerLAB, de la Pontífice Universidad Católica del Ecuador, el cual para la identificación de las bacterias se basó en el método de aislamiento en medios selectivos para la identificación de género y especie por pruebas bioquímicas, descrito por Novo, (2003). (p 23-24)

2.5. ELABORACIÓN DEL ABONO NATURAL

El abono natural empleado en la hilera B fue elaborado con cascarilla de arroz y estiércol de ganado en una proporción de 2:1. (Alfonso y Posadas, 2010).

Para la elaboración de este abono se colocó una geomembrana sobre una superficie plana para evitar que el suelo nativo absorbiera los nutrientes del abono; allí se colocó la cascarilla de arroz en forma de montículo. Posteriormente, se añadió el estiércol de ganado sobre la cascarilla de arroz, se añadió agua de manera paulatina y mezcló todo el material para una mejor distribución del estiércol, como se puede observar en la Figura 2.4.

Una vez elaborado el abono se lo mantuvo tapado con un plástico transparente durante 2 meses para evitar que el agua de lluvia arrastre los nutrientes y las bacterias presentes. El ingreso de aire al abono se realizó a través de 5

mangueras de PVC ubicadas en varios puntos de tal manera que conecte el centro del montículo con el medio exterior, con esto se garantizó que el proceso de degradación sea aerobio. (Alfonso y Posadas, 2010)



Figura 2.4. Abono elaborado.
a). Destapado. b). Tapado

Durante el proceso de formación del abono se lo removió constantemente para mejorar la aireación y se adicionó agua para mantenerlo húmedo. Una vez transcurridos los 2 meses, se tomó una muestra de dicho abono y se envió al CICAM, donde se identificó el nitrógeno total, mediante la norma NTE INEN 2 025:1998.

A fin de determinar la cantidad de abono que debería haber sido añadida a la hilera B para obtener la relación de NPK de 30:10:10 se realizó un balance de masa de dichos nutrientes. Para este balance se emplearon los resultados de los nutrientes de la tierra, cascarilla de arroz y abono obtenidos según lo descrito en la sección 2.4.2.2, estos resultados fueron interconectados con datos bibliográficos expuestos por Roberts, (2009), quien manifestó que por cada tonelada métrica de estiércol de ganado se tiene: 42 kg de nitrógeno total, 68 kg de P_2O_5 y 26 kg de K_2O ; además, de los resultados descritos por Irañeta, Sánchez, Malumbres, Torrecilla, y Díaz, (2010), quienes señalan que en un abono orgánico existe 25 kg de P_2O_5 y 13 kg de K_2O .

Cabe recalcar que para estimar la cantidad de abono a añadir a la tierra se empleó el método de prueba y error.

2.6. ANÁLISIS DE LA BIODEGRADACIÓN AL USAR BACTERIAS NATIVAS

El abono elaborado descrito en la sección 2.5, fue utilizado para mejorar las condiciones al suelo contaminado proveyendo de los nutrientes necesarios, ya que fue colocado de tal forma que se cumpla la relación 20:1 entre carbono-nitrógeno, según lo recomendado por Eweis *et. al.*, (1999) (p. 203).

Además, Montenegro (1996) recomienda que para mejorar la permeabilidad del suelo a tratar fue necesaria la adición de 4,2% en peso de cascarilla de arroz y 0,8 % en peso de estiércol de ganado (p. 74).

Durante todo el proceso que duró la biodegradación se removió la tierra 2 veces por semana para mejorar la aireación así como también se controló el ingreso de agua de lluvia, con esto se pudo ahorrar en el consumo de agua potable.

Cada semana se recolectó lixiviado proveniente de la acumulación de agua y se lo colocó en tanques de plástico para su posterior análisis y disposición final

2.6.1. TEMPERATURA AMBIENTE Y HUMEDAD RELATIVA

Con el fin de registrar las condiciones meteorológicas del ambiente en el cual se desarrollaron las bacterias encargadas de biodegradar el suelo contaminado, se midió la temperatura y la humedad relativa con un termohidrómetro.

Dicho equipo fue colocado cerca de las hileras, pero protegido del sol y de la lluvia. Su posición exacta fue: latitud: S 00° 11' 20,5", longitud: WO 76° 39' 46,7" y elevación: 271 m. Las medidas de temperatura ambiente y de humedad relativa

fueron tomadas cada hora, desde las 07:00 hasta las 18:00, con lo que se pudo monitorear las condiciones ambientales en las que se desarrollaron las bacterias.

2.6.2. SIEMBRA A PROFUNDIDAD PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE UNIDADES FORMADORAS DE COLONIAS DE BACTERIAS PRESENTES EN LAS MUESTRAS

Este análisis se realizó al inicio y durante todo el proceso, con el fin de determinar la concentración de microorganismos y verificar que se encuentren sobre el valor mínimo recomendado por Eweis *et al.*, (1999) que es de $1,0E+05$ ufc/g. (p. 103).

2.6.2.1. Preparación de medio de cultivo

La composición del medio de cultivo se presenta en Tabla 2.3:

Tabla 2.3. Composición del medio de cultivo para la siembra a profundidad en la determinación del número de unidades formadoras de colonias de bacterias

Medio	Composición	Volumen de medio
Trypticase Soy Agar	40,0 g/L	700 mL

A fin de evitar el crecimiento de otro tipo de microorganismos en el medio de cultivo, se lo esterilizó en un autoclave a 121°C y 20 psi, durante 15 minutos. Transcurrido ese tiempo se colocó el medio de cultivo en un baño termostático a 40°C para evitar su solidificación.

2.6.2.2. Preparación de muestras

Para este proceso fue necesario el uso de la cabina de flujo laminar a fin de evitar la contaminación de las muestras con otro tipo de microorganismo. Se pesó alrededor de 11 g de muestra de tierra contaminada y se la colocó en un frasco

que contenía 99 mL de agua triptona estéril y se agitó vigorosamente en un shaker, con lo que se obtuvo una dilución de 10^{-1} v/v. De esta dilución se tomó 1 mL para colocarla en un frasco con 99 mL de solvente con lo que se obtuvo una dilución de 10^{-3} v/v. De esta última dilución se tomó una alícuota de 1 mL, y se colocó en una caja petri; este procedimiento se repitió una vez más. Posteriormente se colocó el medio estéril hasta llenar aproximadamente la mitad de cada una de las cajas y se homogenizó el contenido para dispersar la muestra en el medio.

Además, de la dilución 10^{-3} v/v se tomó 1 mL de muestra y se la colocó en un tubo de ensayo que contenía 9 mL de agua triptona estéril para conseguir una dilución 10^{-4} v/v y de esta dilución se tomó 1 mL y se lo colocó nuevamente en 9 mL con lo que se obtuvo una dilución de 10^{-5} v/v. Con estas diluciones de 10^{-4} y 10^{-5} v/v se repitió el procedimiento de siembra en las cajas petri.

Finalmente, se llevaron las cajas petri a una estufa a 37°C por 48 horas. Luego se realizó el contaje de los microorganismos, donde se consideró contabilizar entre 30 y 300 unidades formadoras de colonia (ufc); se debió escoger la mejor dilución a la que se obtuvo estos valores. Para determinar la concentración de microorganismos se empleó la Ecuación [2.6]:

$$C = \frac{n}{d} \quad [2.6]$$

Donde:

- C: Concentración de microorganismos en las muestras, ufc/g
- n: Número de unidades formadoras de colonias, ufc
- d: Factor de dilución

El n se obtuvo mediante el promedio del recuento directo de los microorganismos a una dilución dada por dos ocasiones; mientras que para determinar el factor de dilución se empleó la Ecuación [2.7].

$$d = \frac{MM}{(MM+99) \text{ g de mezcla}} * \frac{1 \text{ g de mezcla}}{(1+99) \text{ mL de mezcla}} * \frac{1 \text{ mL de mezcla}}{(1+99) \text{ mL de mezcla}} * VT_n \quad [2.7]$$

Donde:

MM: Masa de muestra para la determinación de ufc/g

VTn: Volumen de muestra empleado en la dilución n

2.6.3. CONTENIDO DE ACEITES Y GRASAS

Este análisis es importante para obtener una medida indirecta de la concentración de HC totales del petróleo; con base en la norma APHA 5520 B, se aplicó a dos muestras por hilera, tomadas cada 15 días durante el desarrollo del proyecto.

En primer lugar, fue necesario tener balones etiquetados de fondo plano secos, para ello se llevaron dichos balones a una estufa a 105°C durante 2 horas, luego se pesaron y se los llevaron a un desecador. Posteriormente, se pesó 2 g de muestra y se colocó en el cartucho de extracción, se añadió además 2 g de sulfato de sodio anhidro.

Se sellaron las posibles fugas que tenga el solvente y por la parte superior del Soxhlet se vertió el solvente hasta que descienda por diferencia de presión a través del cuello del Soxhlet al balón. Se colocó el cartucho en la parte superior y se añadió el solvente hasta cubrir al cartucho.

Posteriormente se encendió la calefacción del equipo y se mantuvo en reflujo durante cuatro horas, transcurrido ese tiempo, se debió recuperar el solvente utilizado en el equipo de destilación. Con el fin de evaporar completamente el solvente, se llevaron los balones a una estufa y se mantuvieron allí a 156 °C durante 1 hora, Luego se llevaron los balones a un desecador para que se enfríen y posterior a esto se pesaron, con lo que se determinó la concentración de aceites y grasas por diferencia de pesos, según la Ecuación [2.8]:

$$C_{ag} = \frac{M_f - M_i}{M_m * 1000 * 1000} \quad [2.8]$$

Donde:

C_{ag} : Concentración de aceites y grasas, ppm

M_i : Masa de balón tarado, g

M_f : Masa de balón con grasa, g

M_m : Masa de muestra, g

2.6.4. ANÁLISIS DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) POR INFRARROJO

Las muestras para este análisis fueron enviadas a “Laboratorios ANNCY, Control Ambiental de Aguas y Suelos”, los cuales se basaron en la norma EPA 418.1: Petroleum Hydrocarbons (Spectrophotometric Infrared). Estos análisis fueron los que limitaron el tiempo del proceso, puesto que la normativa ambiental vigente (RAOHE) se basa en este parámetro para considerar un suelo descontaminado, según el uso posterior.

Las muestras tomadas para este análisis fueron:

- Al inicio del proceso, es decir, al suelo contaminado original.
- Las muestras luego de dos meses de proceso de biodegradación con el uso de bacterias comerciales con nativas y solo con bacterias nativas.
- Las muestras finales, es decir, luego de 4 meses de iniciados los procesos antes mencionados.

2.6.5. ANÁLISIS DEL PERFIL DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO POR CROMATOGRFÍA DE GASES

Con el fin de determinar el perfil de TPH para la caracterización cualitativa de las muestras y con base en el procedimiento descrito por Zambrano, (2002), se aplicó

dicha técnica a tres tipos de muestras: Al inicio del proceso, luego de dos meses de biodegradación y las muestras finales. (pp. 68-69).

Se pesó aproximadamente 30 g de suelo, luego se añadió 30 mL de ciclo hexanona y se mezcló la suspensión durante 40 minutos en un agitador mecánico; transcurrido ese tiempo, se separó la fase orgánica por decantación y se utilizó el papel filtro para retener el material sólido.

Al filtrado mencionado se agregaron 3 g de sílica gel de 70/270 mallas y se mantuvo nuevamente en agitación por 20 minutos. Se filtró nuevamente el extracto y se usó 1 g de sulfato de sodio anhidro como agente deshidratante y se colocó la muestra en un tubo de ensayo estéril.

Finalmente, la muestra fue inyectada al cromatógrafo de gases, cuyas condiciones de operación se detallan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Condiciones de operación del cromatógrafo de gases para determinar el perfil de hidrocarburos totales de petróleo

Equipo o Parámetro	Especificación
Cromatógrafo de gases	Varian Model 3 700
Columna	Empacada OV 101 3% Chromosorb – W – AW, 6 pies x 1/8 pulgada
Detector y gas portador	Ionización de llama y Nitrógeno
Volumen de muestra	1 μ L
Temperatura inicial de columna	120 °C
Razón de programación	8 °C/min
Temperatura final de columna	240 °C
Temperatura del inyector y detector	250 °C
Sensibilidad y presión de entrada	32E-11, 17 psi

Además, fue necesario el uso de una muestra estándar conformada por una mezcla de tres hidrocarburos: dodecano, tetradecano y hexadecano, para ser inyectada al cromatógrafo de gases bajo las mismas condiciones detalladas en la Tabla 2.4.

Del cromatograma de la muestra estándar se determinó los tiempos de retención de cada uno de los picos obtenidos, se calculó el logaritmo de estos valores y se procedió a graficar el logaritmo del tiempo de retención versus el número de carbono para obtener la curva de calibración. Esta curva permitió determinar cualitativamente los componentes de los cromatogramas de las muestras de tierra contaminada.

2.6.6. ANÁLISIS DE METALES PESADOS

Para la caracterización de los suelos contaminados con hidrocarburos que llegaron a INCINEROX, durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del 2010 que se mostraron en la Tabla I.1, se analizó únicamente plomo, cadmio y níquel al igual que en el trabajo realizado por Zambrano, (2002). (p. 53). Por tal motivo y por que el RAOHE regula estos metales, en la realización de este proyecto se analizaron los mismos parámetros.

Para este análisis fue necesario tomar una muestra adicional al inicio del proceso y dos muestras (una por cada hilera) transcurridos dos meses de biodegradación; en caso de que la concentración de los metales pesados (plomo, cadmio y/o níquel) hubiera estado sobre la norma que exige el RAOHE, detallado en la Tabla 1.1, se debería tomar una muestra al final del proceso.

El muestreo realizado fue descrito en la sección 2.3.3 y las muestras obtenidas fueron enviadas a “Laboratorios ANNCY” para su análisis, el cual se basó en la norma APHA 3120 B: Inductively Coupled Plasma (ICP) Method, el cual describe el procedimiento de análisis por plasma inductivamente acoplado.

2.6.7. ANÁLISIS DE LIXIVIADOS

Cada vez que se removía la tierra en tratamiento, se recogía del fondo de la misma cierta cantidad de lixiviados por cada hilera, los cuales eran almacenados

en tanques de plástico con tapa para su posterior análisis en la concentración de TPH. Al final del proceso se mezclaron los lixiviados provenientes de la hilera A así como también los lixiviados de la hilera B, con el objetivo de homogenizar a cada uno de ellos para su cuantificación y toma de muestra. Las dos muestras obtenidas - una por la hilera A y una por la hilera B - fueron enviadas a “Laboratorios ANNCY” para el análisis de la concentración de TPH, el cual se basó en la norma EPA 418.1: Petroleum Hydrocarbons (Spectrophotometric Infrared).

2.7. ANÁLISIS DE LA BIODEGRADACIÓN AL USAR BACTERIAS COMERCIALES CON LAS BACTERIAS NATIVAS

Una vez colocada la tierra contaminada con hidrocarburos, en la hilera A se colocó una libra de bacterias comerciales por cada metro cuadrado de terreno, según lo indicado por el proveedor de las cepas de microorganismos AWT – B350. Para ello, se disolvió el producto en 10 L de agua potable y se llevó a una fumigadora manual de espalda, para poder rociar el producto.

Se realizaron dos adiciones de microorganismos, tal y como lo recomendó el proveedor: una al iniciar el proceso y la siguiente a los tres días de la primera adición. Para el análisis de la biodegradación en esta hilera se realizaron las mismas pruebas descritas desde la sección 2.6.1 hasta la 2.6.7.

2.8. ANÁLISIS DEL COSTO – BENEFICIO DEL PROYECTO

Con el fin de determinar el costo – beneficio de cada uno de los procesos de biodegradación por el método de landfarming, fue necesario tener varios parámetros previos, propios de cada proceso; con ello fue factible realizar el análisis económico. Dichos parámetros se describen a continuación:

- Económicos, que incluye la inversión inicial, % de aportación al IESS de los trabajadores, duración de capital e impuestos.
- De mantenimiento de maquinaria y equipos, construcciones y reparaciones de maquinaria.
- De tasas de seguro de: transporte, maquinaria y equipo e inmuebles.
- De amortizaciones de: edificios, maquinaria y equipos, muebles de oficina y otros.

Luego se cuantificaron los costos que se tuvo para la ejecución de cada proceso de biodegradación; los cuales tuvieron un tiempo de duración de cuatro meses, pero se extrapoló a un año; estos costos son los generados por:

- Materia prima.
- Reactivos adquiridos.
- Análisis de laboratorio.
- Terreno y construcciones.
- Equipos y muebles de oficina.
- Suministros como agua potable, luz eléctrica y tanques de gas
- Maquinaria y equipos empleados.
- Nómina de fuerza laboral.

Para compensar todos los gastos generados en cada uno de los procesos de biodegradación, fue necesario el cobro por el tratamiento de los suelos. Para ello, se determinó un costo por cada kilogramo de tierra a biodegradar (el mismo para los dos procesos) y se determinó los ingresos percibidos por cuatrimestre y se extrapoló a un año por cada tipo de estudio realizado.

Con todos los valores establecidos, se realizó una matriz en MS ExcelTM para cada uno de los procesos de biodegradación y con ello se determinó la factibilidad de ellos sobre la base de los parámetros TIR y VAN. Además se estimó el punto de equilibrio en cada uno de los tratamientos que se realizaron en este proyecto, que es cuando los ingresos son iguales a los gastos totales; es decir, a partir de este valor se inicia a tener utilidad por el proyecto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ANÁLISIS DEL SUELO A BIODEGRADAR

A fin de determinar la cantidad de tierra a tratar se estimó la densidad relativa del suelo y el volumen final de las hileras.

Cabe indicar que el valor de la densidad relativa se obtuvo de cuatro muestras iniciales, pero para los cálculos únicamente se empleó el promedio de las mismas; dichos resultados se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos del análisis de densidad relativa de la muestra original

Código	Muestra (g)	Picnómetro + agua (g)	Picnómetro + agua + muestra (g)	Temperatura (°C)	Densidad agua (g/cm ³) ¹	Densidad muestra (g/cm ³)
M1	1,0493	14,4693	14,8747	15	0,9991	1,63
M2	0,9673	14,9382	15,2962	14	0,9992	1,59
M3	1,0984	14,5602	14,9372	15	0,9991	1,52
M4	1,0284	15,0003	15,4423	14	0,9992	1,75
PROMEDIO² (g/cm³)						1,62 ± 0,10

¹ Perry, R. H., Green, D. W. y Maloney, J. O., 2001, p. 2-98

² $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 4)

Como se puede observar en la Tabla 3.1, el valor de la desviación estándar es de 0,10 g/cm³, lo que indica que la dispersión en las cuatro muestras analizadas es muy baja, por lo que el valor de la densidad relativa (1,62 ± 0,10) g/cm³ es confiable.

Para el cálculo del volumen operacional de cada una de las hileras se emplearon los datos de la Tabla 2.2, con lo que se obtuvo que las hileras A y B tenían una capacidad de 6,29 m³ y 7,83 m³, respectivamente.

Con el dato de la densidad relativa promedio y el volumen operacional de cada hilera fue posible emplear la Ecuación [2.1] dada en la sección 2.3.2, con lo que

se obtuvo que la cantidad de tierra contaminada a tratar fue de 10,20 y 12,70 Ton en la hilera A y B, respectivamente, de esto se puede decir que con este proyecto fue posible biorremediar 22,90 Ton de suelos contaminados.

3.2. ANÁLISIS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DEL SUELO

3.2.1. ANÁLISIS FÍSICOS

3.2.1.1. Tamaño de partícula

Del análisis granulométrico de la muestra inicial se obtuvo que el suelo a tratar estaba compuesto por grava, arena, limo y arcilla, en los porcentajes descritos en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Análisis de tamaño de partícula de la tierra a procesar

Tipo de suelo	Tamiz ASTM	Porcentaje retenido en M1 (%)	Porcentaje retenido en M2 (%)	Promedio (%)	Porcentaje del Tipo de suelo ¹ (%)
Grava	3 in.	4,85	3,99	4,42	18,18 ± 0,81
	2 in.	2,86	2,05	2,45	
	1 in.	4,14	3,33	3,74	
	3/8 in.	4,00	4,61	4,31	
	N° 4	2,96	3,57	3,26	
Arena	N° 10	8,87	9,27	9,07	16,64 ± 1,06
	N° 40	7,47	7,66	7,57	
Limo	N° 60	13,92	14,20	14,06	30,16 ± 1,44
	N° 200	15,97	16,23	16,10	
Arcilla	< Malla N°200	34,96	35,08	35,02	35,02 ± 0,08

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 2)

De los resultados presentados en la Tabla 3.2, el limo y la arcilla suman 65,18%, más de la mitad de la composición total del suelo a tratar; por lo que se puede

decir que la tierra a biorremediar contenía en su mayoría partículas finas, lo que según Martín, García y Maza, (2006), permite considerar a esta tierra como un suelo cohesivo, con alta retención de agua y baja permeabilidad. (p. 328). Por esta razón y como se mencionó en la sección 2.6 fue necesaria la adición de cascarilla de arroz en la hilera B, para poder dar una textura más permeable al suelo. A la hilera A no fue necesaria la adición, puesto que el proveedor de las bacterias comerciales AWT – B350 expuso que dichas bacterias son capaces de trabajar sobre suelos relativamente húmedos. Durante el desarrollo del proyecto fue visualmente notoria la diferencia en la permeabilidad del suelo entre las dos hileras, ya que la hilera B poseía 4,2 % en peso de cascarilla de arroz y presentó una coloración más clara que la hilera A, como se observa en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Diferencias entre la hilera A y la hilera B debido a la permeabilidad por el uso de cascarilla de arroz en la hilera B

Como se puede observar en la Figura 3.1, la tierra de la hilera A presenta una coloración más oscura con respecto a la tierra de la hilera B debido a la mayor humedad que posee. Con ello, se confirma el uso de un agente esponjante, para evitar que el agua compacte el suelo. Es necesario acotar que el ensayo de humedad en el suelo se realizó para identificar las características de la tierra, sin ningún tratamiento previo, es decir, a la muestra original.

3.2.1.2. Humedad

Los resultados de la humedad para cada una de las muestras tomadas se presentan en el ANEXO II; mientras que en la Figura 3.2 se muestra el porcentaje de humedad de las hileras a lo largo del tiempo que duró el proyecto, comparado con los valores mínimo y máximo que recomienda Eweis *et al.*, (1999) para un adecuado desarrollo bacteriano en la biodegradación por el método de landfarming. (pp. 34-35)

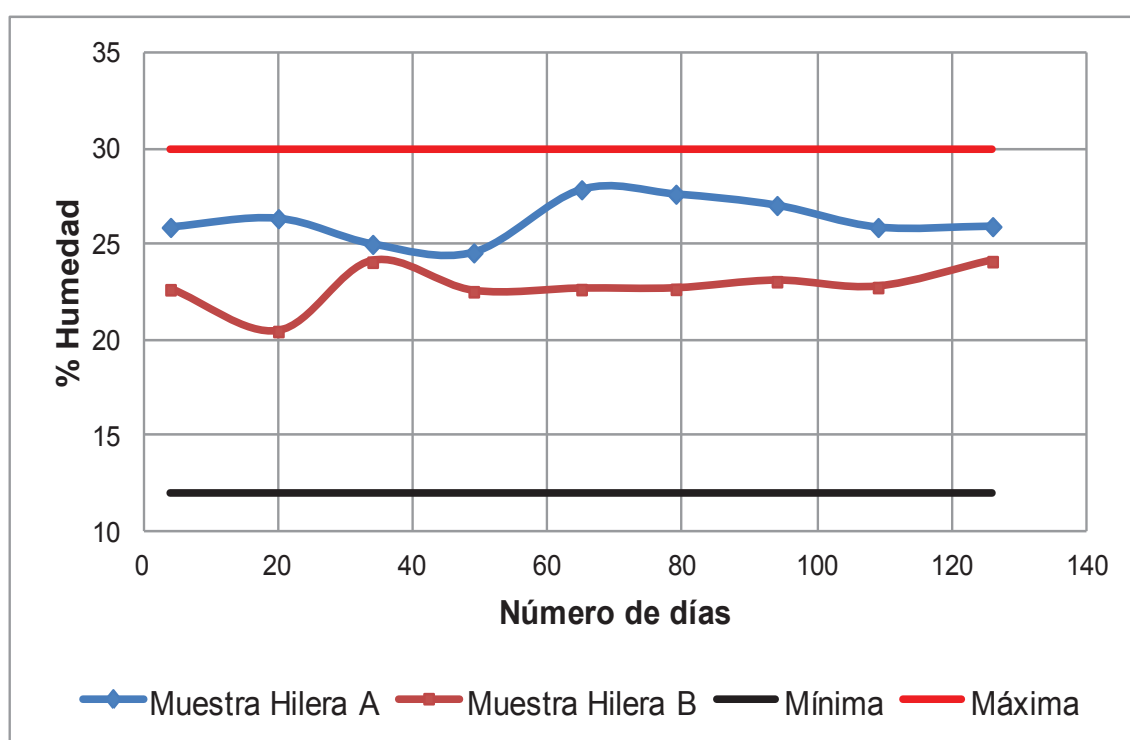


Figura 3.2. Humedad de la Tierra contaminada con hidrocarburos de las hileras A y B en función del tiempo comparadas con los valores mínimo y máximo

Como se puede observar en la figura anterior, durante todo el proceso de biodegradación la humedad de la tierra se mantuvo dentro del rango de 12% y 30%, que corresponde al recomendado por Eweis *et al.*, (1999) (pp. 34-35).

Además, como se puede visualizar en los valores presentados en dicha figura, la humedad de la hilera A fue mayor que la de la hilera B, lo que se debió a la presencia de un 4,2 % de cascarilla de arroz en la hilera B, que actuó como agente permeabilizante, lo que evitó que al agua se quedara retenida en el suelo.

Debido a que la hilera A solo contenía la tierra contaminada con hidrocarburos la permeabilidad del suelo fue muy limitada, lo que dificultó la evaporación del agua y permitió obtener mayor cantidad de lixiviados en comparación con los obtenidos de la hilera B.

Las desviaciones estándares presentadas en la Tabla All.1 y en la Tabla All.2 del ANEXO II oscilan entre 0,99 y 4,10% para la hilera A y entre 1,39 y 3,83% para la hilera B, lo que indica que el método de determinación de la humedad obtiene valores poco dispersos y confiables para las dos hileras.

3.2.2. ANÁLISIS QUÍMICOS

3.2.2.1. pH

Los resultados del pH para cada una de las muestras tomadas se presentan en la Tabla AIII.1 y en la Tabla AIII.2 del ANEXO III para la hilera A y B, respectivamente; mientras que en la Figura 3.3 se muestra la tendencia del pH de la tierra a lo largo de la biodegradación en comparación con los valores mínimo y máximo recomendados por Eweis *et al.*, (1999). (p. 197).

Como se puede observar en la Figura 3.3, el pH tanto de la hilera A como de la hilera B, se mantienen dentro del rango recomendado, por lo que en el desarrollo de este proyecto no fue necesaria la adición de sustancias que regulen el pH del suelo.

De los resultados presentados en la Tabla AIII.1 y en la Tabla AIII.2 del ANEXO III, se observa que la desviación estándar para cada una de las muestras tomadas es muy baja (entre 0,03 y 0,14 para la hilera A y entre 0,03 y 0,17 para la hilera B), por lo que se puede decir que los datos obtenidos son confiables.

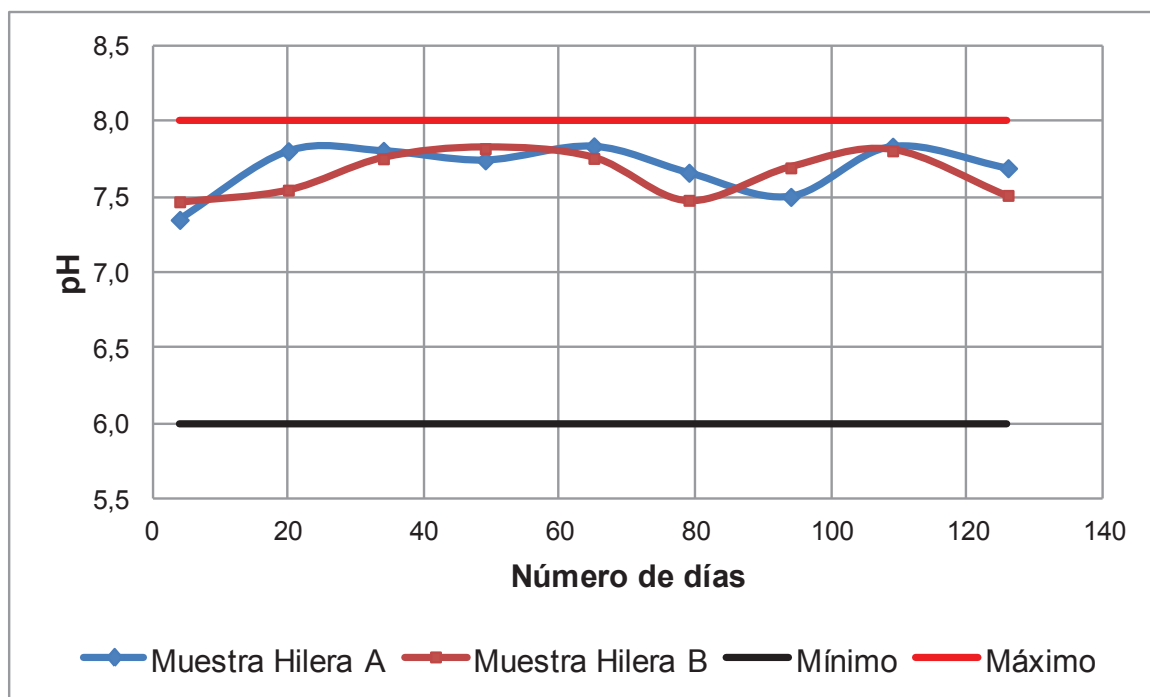


Figura 3.3. pH de la Tierra contaminada con hidrocarburos de las hileras A y B en función del tiempo comparadas con los valores mínimo y máximo

3.2.2.2. Nutrientes

Los resultados de los nutrientes del suelo y de la cascarilla de arroz realizados por el CICAM se presentan en el ANEXO IV y el compendio de los mismos se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados del análisis de los nutrientes del suelo y cascarilla de arroz

Muestra	Parámetro	Valor	Unidad	Procedimiento
Cascarilla de arroz	Fósforo Total	675,68	mg/kg	APHA 4500 - P C, Colorimétrico
	Nitrógeno Orgánico	76 396,00	mg/kg	Nessler APHA 4500 - N B
	Potasio	5,54	mg/kg	Colorimétrico/Absorción Atómica
Suelo contaminado	Fósforo Total	3,48	mg/kg	APHA 4500 - P C, Colorimétrico
	Nitrógeno Total	1 103,90	mg/kg	Procedimiento Interno CICAM
	Potasio	3 440,00	mg/kg	Colorimétrico/Absorción Atómica
	Carbono Orgánico Total	20,09	%	APHA 5310 B

Con estos resultados y con la cantidad de masa presente en cada una de las hileras (10,20 toneladas en la hilera A y 12,70 Toneladas en la hilera B) se estimó la cantidad de los nutrientes NPK, que se puede observar en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Cuantificación de Nutrientes en cada una de las hileras

Parámetro	Hilera A	Hilera B
Masa de Suelo contaminado, kg	10 198,044	12 703,261
Masa de Nitrógeno, kg	11,258	14,023
Masa de Fósforo, kg	0,035	0,044
Masa de Potasio, kg	35,081	43,699

Con los resultados presentados en la Tabla 3.4 se pudo determinar que la tierra contaminada poseía una relación de NPK de 3,20:0,01:10,00, con lo que se concluyó que dicha tierra tenía una deficiencia de nitrógeno, así como también de fósforo.

Debido a la deficiencia mencionada fue necesaria la elaboración de un abono para la hilera B, mientras que a la hilera A no se le hizo ninguna adición de nutrientes, puesto las bacterias comerciales AWT – B350 ya venían provistas de los nutrientes adecuados para su desarrollo.

3.2.3. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE LAS TIERRAS CONTAMINADAS CON PETRÓLEO

Los resultados obtenidos del análisis de la muestra de tierra original realizado por el laboratorio DISerLAB de la Pontífice Universidad Católica del Ecuador se presentan en el ANEXO V, donde se observa que las bacterias nativas predominantes en el suelo fueron del tipo *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus cereus*. Este tipo de bacterias son las más importantes para el desarrollo de la biodegradación según lo descrito por Atlas y Bartha, (2002) y Chaineau, Morel y Oudot, (1995). (p, 677; p. 1616)

3.3. ELABORACIÓN DEL ABONO NATURAL

Para compensar la deficiencia de nutrientes del suelo se elaboró 900 kg de abono según el método dado en la sección 2.5, para ello se empleó 600 kg de cascarilla de arroz (66,41%) y 303,5 kg de estiércol de ganado (33,59 %).

El nitrógeno total existente en este abono fue analizado por el CICAM, cuyo informe de laboratorio se presenta en el ANEXO IV y su resultado se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Resultados del análisis de Nitrógeno Total en la muestra de abono

Parámetro	Valor	Unidad	Procedimiento
Nitrógeno Total	7 565,10	mg/kg	Procedimiento Interno CICAM

A fin de determinar la cantidad de abono que debería haber sido añadida a la hilera B para obtener la relación de NPK de 30:10:10 se realizó un balance de masa de estos nutrientes, como se puede observar en el ejemplo del ANEXO VI.

Para este balance se emplearon los resultados presentados en la Tabla 3.3 y Tabla 3.5. Las relaciones de NPK que se obtendría en el suelo al añadir distintas cantidades de abono se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Resultados del balance de masa de los nutrientes y relación NPK en el suelo a biodegradar con diferentes cantidades de abono elaborado

Masa abono (kg)	Masa Tierra (kg)	Masa Nitrógeno (kg)	Masa Fósforo (kg)	Masa Potasio (kg)	Concentración Nitrógeno (mg/kg)	Concentración Fósforo (mg/kg)	Concentración Potasio (mg/kg)	Relación Nitrógeno	Relación Fósforo	Relación Potasio
0	13 338,42	59,05	3,42	45,89	4 427,17	256,55	3 440,79	30,00	1,74	23,32
100	13 438,42	59,81	4,51	46,97	4 450,52	335,87	3 495,46	30,00	2,26	23,56
200	13 538,42	60,56	5,61	48,05	4 473,53	414,01	3 549,32	30,00	2,78	23,80
300	13 638,42	61,32	6,70	49,13	4 496,20	491,01	3 602,39	30,00	3,28	24,04
400	13 738,42	62,08	7,79	50,21	4 518,54	566,89	3 654,68	30,00	3,76	24,26
500	13 838,42	62,83	8,88	51,29	4 540,55	641,67	3 706,23	30,00	4,24	24,49
600	13 938,42	63,59	9,97	52,37	4 562,25	715,38	3 757,03	30,00	4,70	24,71
700	14 038,42	64,35	11,06	53,45	4 583,64	788,04	3 807,11	30,00	5,16	24,92
750	14 088,42	64,73	11,61	53,99	4 594,22	823,98	3 831,88	30,00	5,38	25,02
800	14 138,42	65,10	12,15	54,52	4 604,73	859,67	3 856,48	30,00	5,60	25,13
850	14 188,42	65,48	12,70	55,06	4 615,16	895,11	3 880,90	30,00	5,82	25,23
900	14 238,42	65,86	13,25	55,60	4 625,52	930,30	3 905,15	30,00	6,03	25,33
950	14 288,42	66,24	13,79	56,14	4 635,81	965,24	3 929,23	30,00	6,25	25,43
1000	14 338,42	66,62	14,34	56,68	4 646,02	999,94	3 953,15	30,00	6,46	25,53

Los gráficos de la relación fósforo y relación potasio versus la cantidad de abono a añadir, se utilizaron para la determinación de su cantidad óptima. La Figura 3.4 y la Figura 3.5 muestran dichas relaciones.

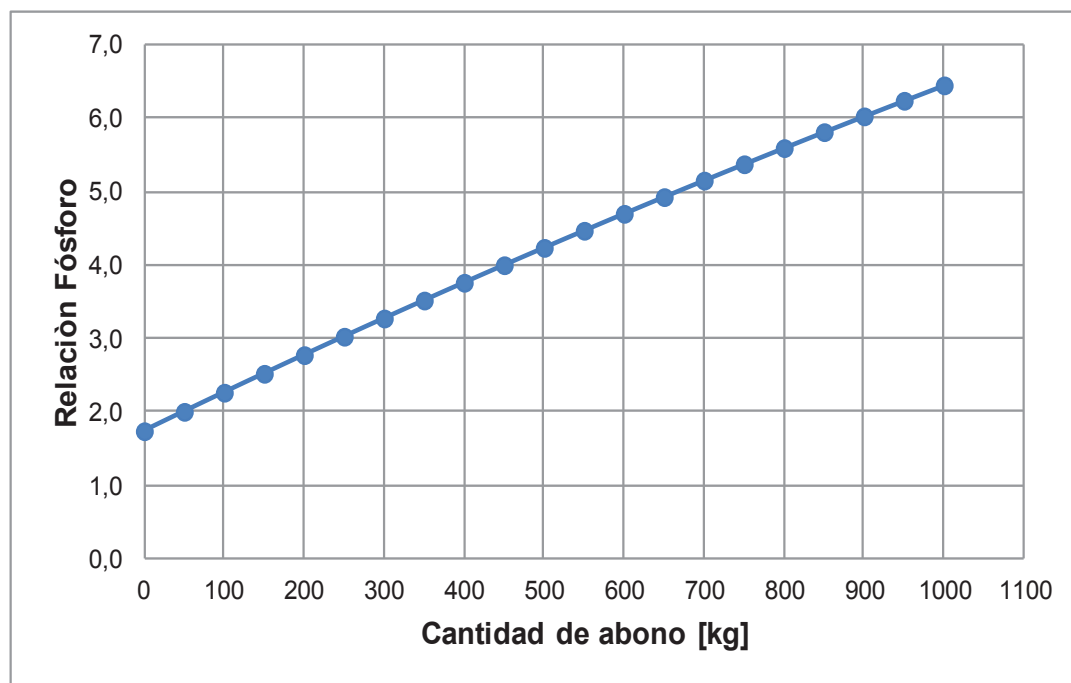


Figura 3.4. Relación de la cantidad de fósforo presente en la tierra en función de la cantidad de abono a utilizar

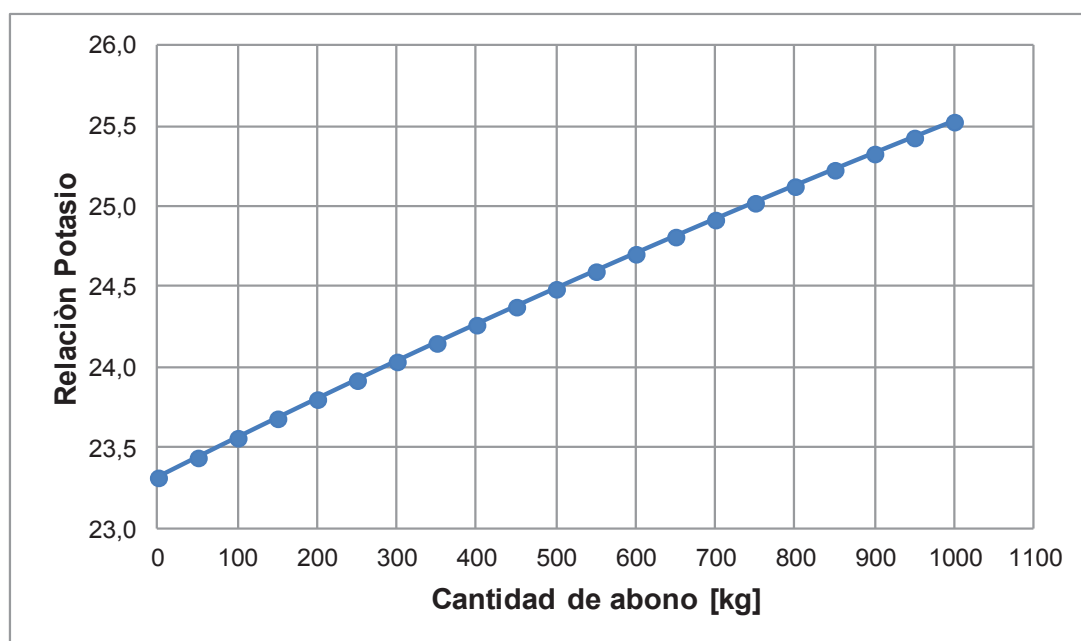


Figura 3.5. Relación de la cantidad de potasio presente en la tierra en función de la cantidad de abono a utilizar

Como se puede observar tanto en la Figura 3.4 como en la Figura 3.5, a mayor cantidad de abono utilizado, mayor es la relación obtenida, al mantener constante la relación de nitrógeno en 30, como se mostró en la Tabla 3.6.

Por lo tanto, no es posible determinar la cantidad óptima de abono ya que se obtendría una mayor relación de fósforo, pero la relación de potasio se incrementaría demasiado, es por eso que no existe una cantidad máxima de abono a utilizar para obtener las relaciones deseadas, ya que esto seguiría incrementando debido a que son directamente proporcionales y por lo tanto nunca se lograría llegar a una relación de nutrientes NPK de 30:10:10.

Con este argumento, se decidió utilizar todo el abono elaborado, es decir, los 900 kg, para evitar el desecho de abono elaborado; con ello, se pudo definir que la relación NPK para el suelo a tratar en la hilera B es de 30,00:6.03:25,33, como se mostró en la Tabla 3.6 marcado de color verde.

No se añadió mayor cantidad de fósforo debido a que el crecimiento microbiano se ve influido directamente por la cantidad de nitrógeno en el suelo, y el fósforo solo ayuda a que el nitrógeno sea absorbido de mejor manera por los organismos vivos presentes en los suelos (Irañeta, *et al.*, 2010); además, esto incrementaría la inversión y solo se utilizaría en caso de que la cantidad de microorganismos presentes descendieran.

Finalmente, con los resultados presentados en el ANEXO IV sobre la cantidad de carbono orgánico total, y con los resultados de la Tabla 3.6 sobre la cantidad de nitrógeno en la tierra, se pudo determinar una relación carbono – nitrógeno como se detalla en la Tabla 3.7.

Como se puede observar en dicha tabla, la relación C:N es de 45,14:1,00, superior a lo recomendado por Eweis *et al.*, (1999) en el cual señala que la relación óptima es entre 20:1 a 25:1 (p. 201). Aparentemente se tendría una deficiencia de nitrógeno, pero en caso de que las bacterias no se desarrollen con normalidad, se necesitará añadir mayor cantidad de nutrientes a la hilera. Esto no

se lo realizó ya que la concentración de microorganismos estuvo siempre dentro del rango recomendado por Eweis *et al.*, (1999, p. 103) que es de por lo menos 1×10^5 ufc/g, tal y como se detallará en la sección 3.4.2.

Tabla 3.7. Relación Carbono – Nitrógeno para la muestra de suelo que se añadió cascarilla de arroz, estiércol de ganado y el abono elaborado

Parámetro	Valor	Unidad
Concentración de Carbono	20,09	%
Masa de Carbono	2 699,78	kg
Masa de Nitrógeno	59,81	kg
Relación Carbono – Nitrógeno	45,14 : 1,00	

3.4. ANÁLISIS DE LA BIODEGRADACIÓN AL EMPLEAR BACTERIAS NATIVAS Y COMERCIALES Y BACTERIAS NATIVAS

3.4.1. TEMPERATURA AMBIENTE Y HUMEDAD RELATIVA

Este análisis fue necesario para la determinación de las condiciones ambientales en las cuales se desarrollaron las bacterias. El promedio de la temperatura y humedad relativa para cada día, así como su desviación se muestran en el ANEXO VII.

Como se puede observar en los resultados reportados en la Tabla AVII.1, la desviación estándar de la temperatura ambiente para cada día no es significativa ya que oscila únicamente entre $0,83^{\circ}\text{C}$ y $6,56^{\circ}\text{C}$.

Además, se puede observar que en el transcurso de los 126 días que duró el proyecto la temperatura ambiente varió entre 22°C y 40°C debido a las fluctuaciones propias del clima del oriente Ecuatoriano, que permitió tener fuerte incidencia de sol por las mañanas y grandes precipitaciones por las tardes.

Este efecto ocurrió de igual manera en la humedad relativa, como se muestra en la Tabla AVII.1. En este caso la variación de la desviación estándar es mayor y oscila entre 1,83% y 26,02%, puesto que la zona donde se realizó la biodegradación, en Shushufindi, al igual que todo el Oriente ecuatoriano, se caracteriza por tener una humedad relativa alta. Los descensos en dichos valores se dieron debido a que ciertos días incrementaba la incidencia solar y no existieron precipitaciones. Los rangos de humedad relativa medidos en los días en los cuales se estuvo en campo fueron entre 20 % y 98 %.

Para explicar mejor estas variaciones se tomaron dos valores específicos de la Tabla AVII.1:

- Cuando se tuvo una desviación estándar de humedad relativa elevada en un determinado día, como por ejemplo el 26/05/2011, en el cual la HR media fue de 58,67 % ($\sigma = 26,02\%$) y la temperatura ambiente fue de 33,06 °C ($\sigma = 6,46$ °C), se puede decir que en ese día existieron pocas precipitaciones, aunque la humedad se mantuvo oscilante.
- Al tomar como ejemplo el día 26/04/2011, en el cual la HR fue de 92,18 % ($\sigma = 1,83\%$) y la temperatura ambiente fue de 23,82 °C ($\sigma = 0,98$ °C), es notorio que ese día se tuvo precipitaciones durante todo el día.

Para un mejor análisis de la temperatura ambiente, la Figura 3.6 indica la tendencia de éste parámetro (en promedio) en función del tiempo en el cual se desarrolló el proyecto.

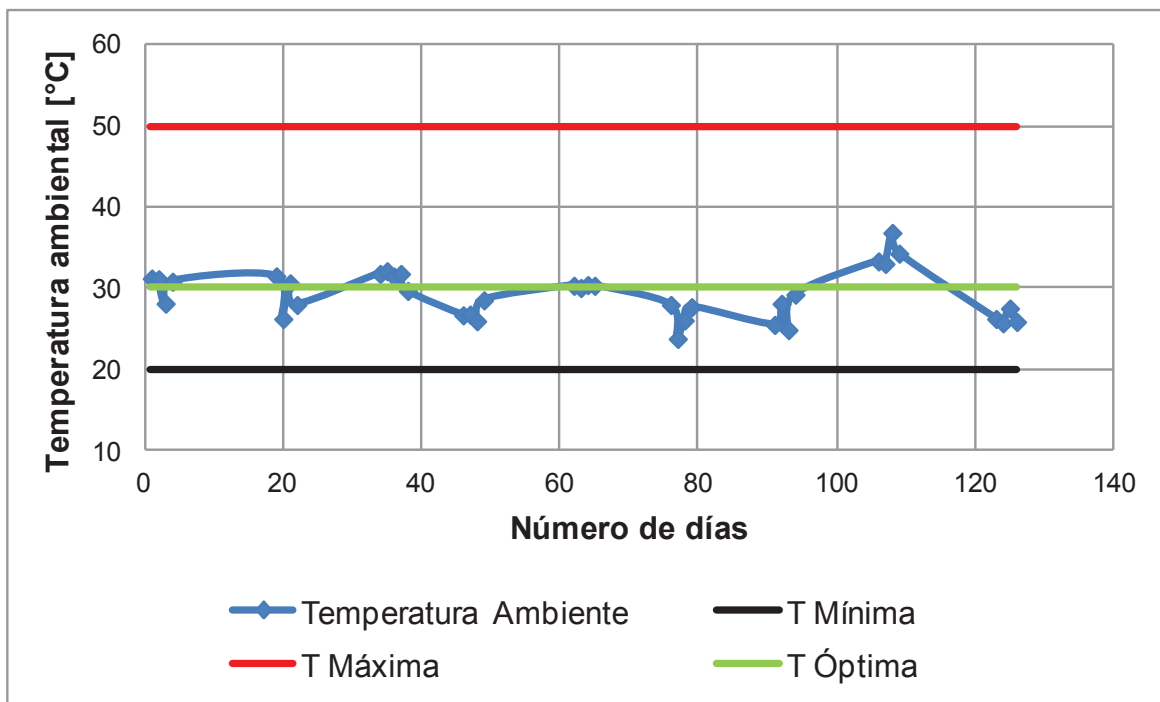


Figura 3.6. Monitoreo de la temperatura ambiente en el lugar donde se desarrollan las bacterias, al compararlas con los valores: mínimo, máximo y óptimo para su crecimiento

Como se puede observar en la Figura 3.6, la temperatura ambiente monitoreada está cercana al valor óptimo de temperatura ambiente para crecimiento bacteriano, recomendado por Eweis *et al.* (1999), que es de 30 °C. (p. 94). De igual manera, no se llega a los valores críticos para el crecimiento microbiano; es decir, no se sobrepasa los 50 °C así como tampoco se llega a 20°C. Para ello, fue muy importante tapar las hileras con la geomembrana por las noches, ya que de esta manera, además de haber evitado el ingreso de agua de lluvia nocturna, se evitó el descenso de la temperatura ambiente dentro de las hileras.

De igual manera, la Figura 3.7 muestra la tendencia que tiene la humedad relativa durante el periodo en el cual se dio la biodegradación.

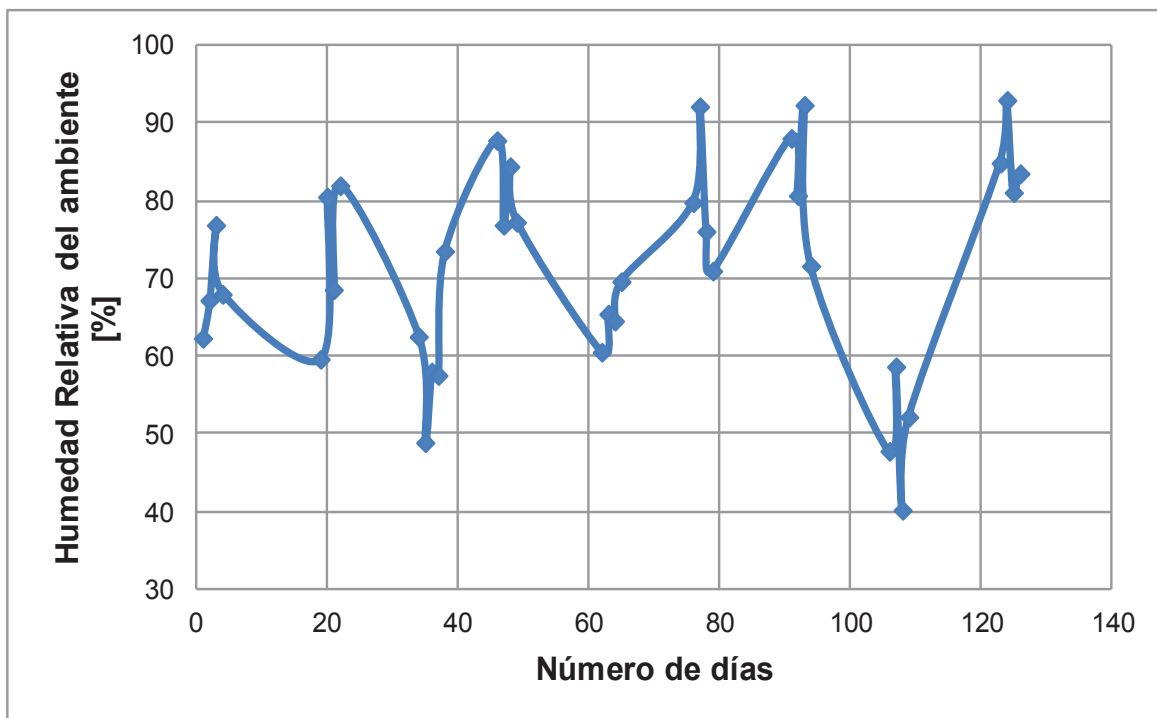


Figura 3.7. Medidas de humedad relativa en el lugar donde se desarrollan las bacterias

Como se puede observar en la Figura 3.7, la humedad relativa del lugar es muy variada y presenta oscilaciones muy marcadas. No obstante, este es un parámetro que no influye directamente sobre el crecimiento de las bacterias, por lo cual no existen valores mínimos ni máximos recomendados para la biodegradación; pero es muy importante su evaluación ya que permite tener una idea de las precipitaciones que existieron en la zona donde se desarrolló el proyecto, tal y como se discutió anteriormente con el porcentaje de HR y la temperatura ambiente.

El conocimiento de las precipitaciones existentes en el lugar fue muy importante, ya que esta agua de lluvia se permitió ingresar ciertos días a las hileras a fin de proveer la humedad necesaria en ellas economizando el agua potable y un desconocimiento de la cantidad de precipitaciones hubiera provocado que ingresara agua en exceso en las hileras, lo que podría haber lavado la tierra contaminada y arrastrar las bacterias presentes en ella.

La humedad relativa en su mayoría del tiempo fue elevada, a pesar de que se reportaron los valores promedio de HR tomados durante el día en que se

monitoreó este parámetro, como se muestra en la Tabla AVII.1 del ANEXO VII; esto indica que las precipitaciones fueron constantes durante todo el periodo que duró el proyecto, pero no necesariamente durante todo el día; esto corrobora la decisión de haber cubierto las hileras durante las noches y el tiempo en las cuales se presentaba las lluvias y no se requería ingreso de agua en la tierra.

Cabe señalar que la humedad relativa y la temperatura ambiente fueron monitoreadas únicamente cuando las hileras estaban destapadas.

3.4.2. SIEMBRA A PROFUNDIDAD PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE UNIDADES FORMADORAS DE COLONIAS DE BACTERIAS PRESENTES EN LAS MUESTRAS

Este es uno de los parámetros más importantes a ser evaluados, ya que el crecimiento microbiano permitió determinar si era necesario añadir más nutrientes al suelo para mejorar las condiciones de biodegradación. Por tal motivo, este fue uno de los controles más estrictos que se tuvo durante el proceso de biodegradación, para que en función de estos resultados y del avance de la biodegradación, se tomen decisiones para la mejora del proceso.

En el ANEXO VIII se muestran los resultados obtenidos de este análisis al seguir el procedimiento descrito en la sección 2.6.3, mientras que en la Figura 3.8 se muestra la tendencia del crecimiento microbiano en función del tiempo que tardaron las bacterias en biodegradar los contaminantes del suelo.

Como se puede observar en la Figura 3.8, la concentración de bacterias de la hilera A fue superior a la concentración de las bacterias de la hilera B, lo que se debió a que en la hilera A se adicionaron bacterias comerciales. A pesar de que la concentración de las bacterias de la hilera B fue menor en comparación con la obtenida en la hilera A, esta estuvo muy por encima del valor límite recomendado por Eweis *et al.* (1999), en el que señala una cantidad mínima de $1,0E+05$ ufc/g. (p. 103)

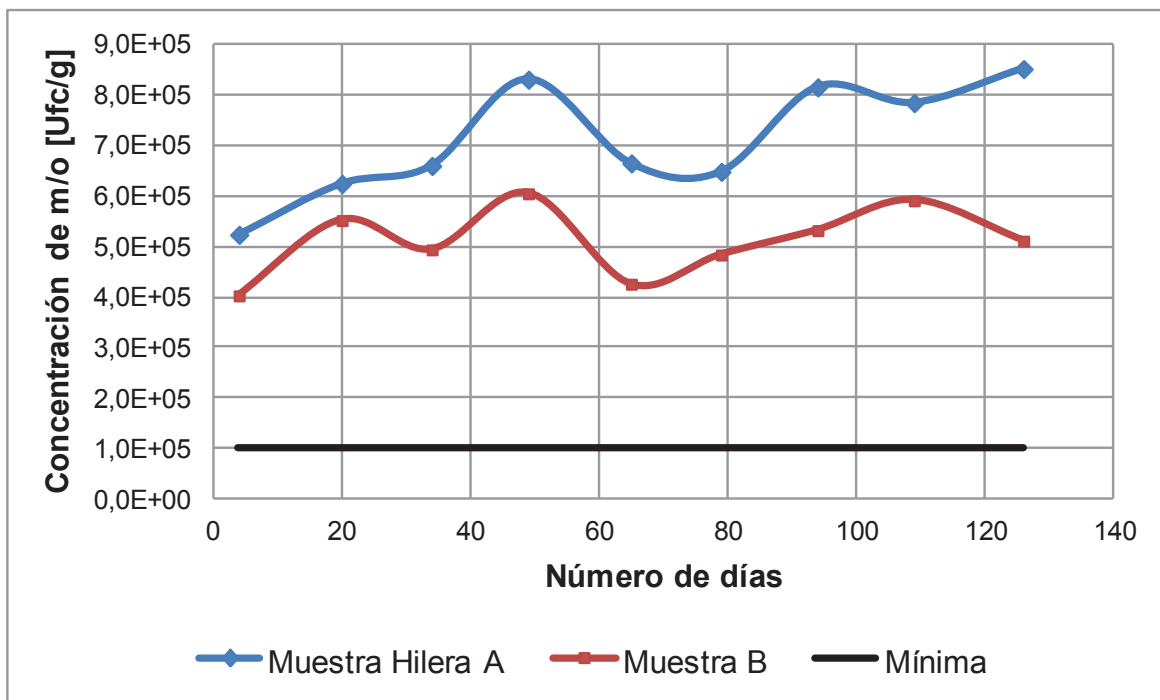


Figura 3.8. Concentración de microorganismos de las hileras A y B en función del tiempo y comparándolas con el valor mínimo requerido

Debido a que la concentración de bacterias presentes en las hileras A y B se mantuvieron sobre el valor recomendado durante todo el proyecto, se consideró que estas fueron suficientes para la biodegradación por el método de landfarming, y por lo tanto no fue necesaria la adición de mayor cantidad de nutrientes en la hilera B.

3.4.3. CONTENIDO DE ACEITES Y GRASAS

Este análisis fue muy importante realizarlo, ya que aunque en la normativa ambiental no existe un criterio para los límites permisibles de aceites y grasas, estos son una medida indirecta de la biodegradación y su determinación permite evaluar indirectamente la disminución de la concentración de TPH presente en las muestras

Los resultados del contenido de aceites y grasas presentes en las muestras obtenidos al seguir el procedimiento descrito en la sección 2.6.3 se presentan en

la Tabla AIX.1 y en la Tabla AIX.2 del ANEXO IX. Cabe señalar que este análisis se realizó dos veces por muestra, debido a que el uso del reactivo ciclo hexanona era limitado por su cantidad y costo, por lo que no se reportó desviación estándar en este procedimiento.

Para una mejor visualización del decrecimiento en la C_{ag} de las muestras, se presenta la Figura 3.9:

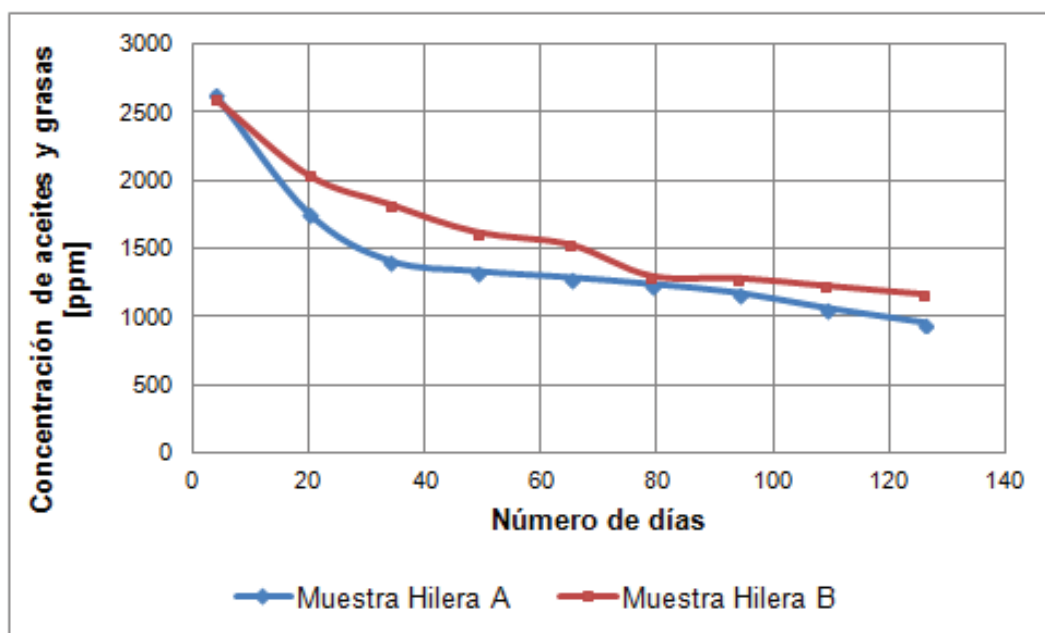


Figura 3.9. Concentración de Aceites y grasas de las hileras A y B en función del tiempo

Como se puede observar en la Figura 3.9 el descenso en la concentración de aceites y grasas durante el proceso fue exponencial, es decir, aproximadamente hasta los 60 días de iniciado el proceso la disminución de la concentración fue importante y pasado este tiempo la variación fue pequeña.

Sin embargo, fue necesario monitorear este parámetro durante todo el proyecto ya que permitió determinar cuando el decrecimiento en dicha concentración sería poco significativo.

Como se aprecia en la Figura 3.9, la disminución en la concentración de aceites y grasas fue poco importante a los 109 días de iniciado el proceso, es por eso que los dos últimos valores presentados en la Tabla AIX.1 y en la Tabla AIX.2 del

ANEXO IX fueron muy cercanos entre las hileras ($1060,43 \pm 27,63$ ppm para la muestra de la hilera A y $1228,28 \pm 26,66$ ppm para la muestra de la hilera B). Por esta razón, en la última muestra tomada, que fue a los 126 días de iniciado el proceso, se analizó el contenido de TPH para verificar si cumplía con la normativa ambiental referido a suelos contaminados con petróleos para uso industrial.

Como era de esperarse, la C_{ag} de las muestras de la hilera B fue mayor que la C_{ag} de las muestras de la hilera A, para la muestra final que fue a los 126 días de iniciado el proceso, la C_{ag} de las muestras de la hilera B fue mayor en un 17,07 % en comparación a las muestras de la hilera A. Esto se dio debido a que en la hilera A se añadieron bacterias comerciales diseñadas especialmente para degradar hidrocarburos.

3.4.4. HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO POR INFRARROJO

Este análisis fue uno de los más importantes dentro del proceso, ya que de éste dependió el tiempo en el cual se debió tratar a los suelos contaminados, puesto que la normativa ambiental vigente (RAOHE) se basa en este parámetro para considerar un suelo descontaminado, según el uso posterior que se le dé al mismo.

El informe de la concentración de TPH's presentes en el suelo se muestra en el ANEXO X, mientras que el resumen de dichos resultados en función de los días que duró el proyecto se muestra en la Tabla AX.1 del ANEXO X.

La Figura 3.10 muestra la tendencia de la concentración de TPH en las muestras de las hileras A y B, compararlos con los valores norma que regula el RAOHE en lo referido a un suelo industrial.

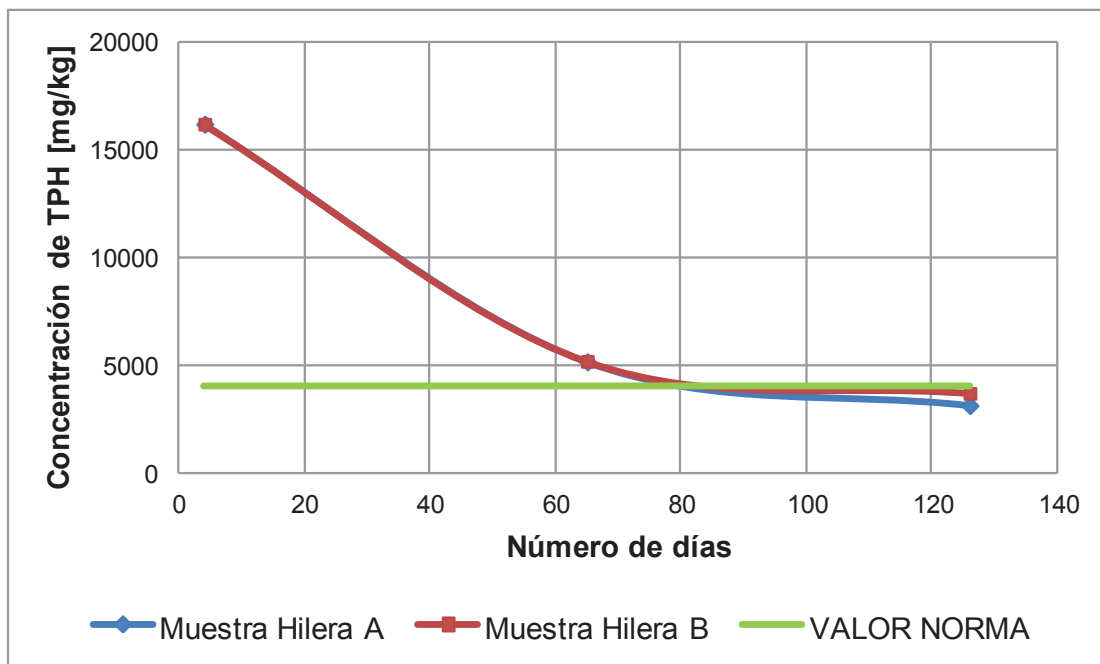


Figura 3.10. Concentración de TPH para la hilera A y B en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE

Como se puede observar, las curvas de concentración de TPH de las muestras de las hileras A y B son muy cercanas una de otra, por tal motivo se presentan dos gráficos, uno para cada una de las hileras:

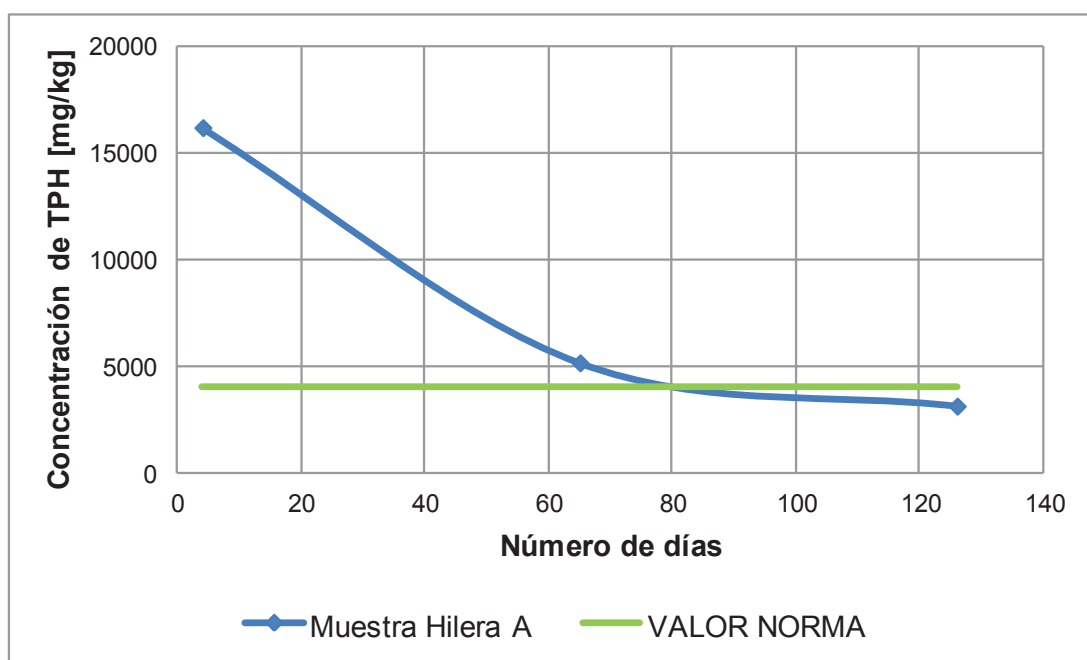


Figura 3.11. Concentración de TPH para la hilera A en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE

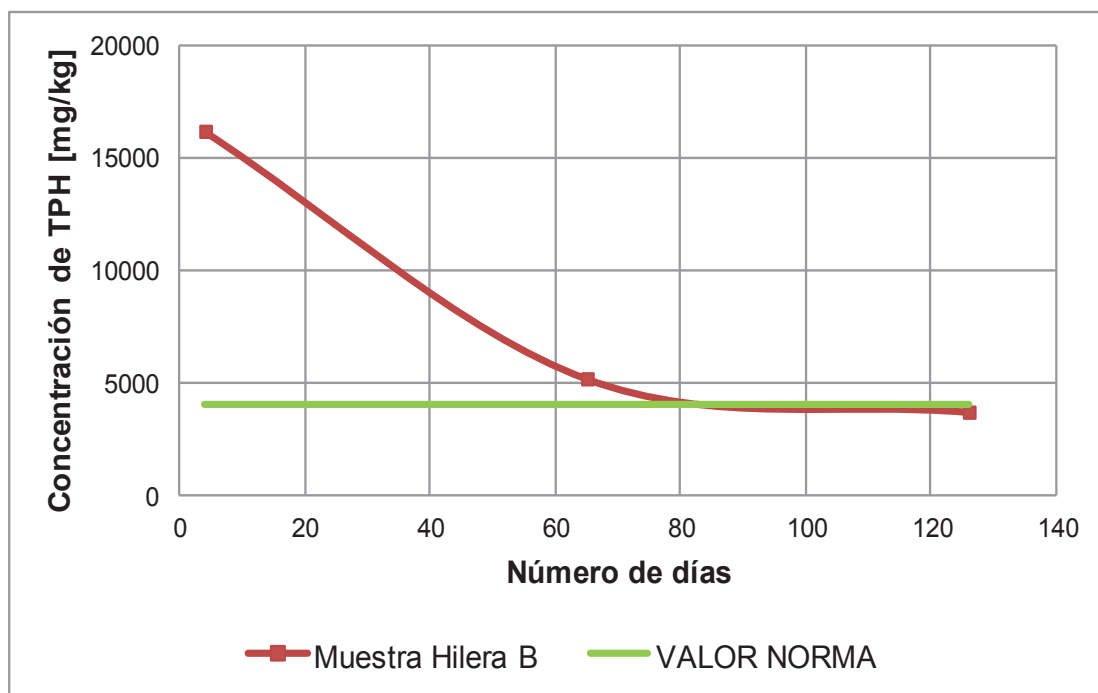


Figura 3.12. Concentración de TPH para la hilera B en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE

Como se observa en la Tabla AX.1 del ANEXO X, a los 65 días de desarrollo del proceso, las muestras presentaron valores muy cercanos de concentración de TPH (5 200 ppm para la hilera A y 5 220 para la hilera B); lo que muestra que las condiciones para la biodegradación en las dos hileras permitieron que se efectúe correctamente la biodegradación durante este tiempo.

Sin embargo de lo mencionado y debido a que aun no se cumplía el valor que exige la norma para suelos industriales contaminados con HC establecidos por el RAOHE, se mantuvo la biodegradación hasta completar los 4 meses que duró el proyecto (126 días), tiempo en el cual, las tierras contaminadas con hidrocarburos ya cumplieron con el valor de 4 000 ppm establecido por la norma RAOHE para suelos de uso industrial (3 170 ppm para la hilera A y 3 736 ppm para la hilera B).

Además, como se puede observar en la Figura 3.10, la curvas de disminución de la concentración de TPH en la tierra contaminada de las hileras A y B se superponen hasta aproximadamente los 80 días de iniciado el proceso, luego de lo cual el decremento en dicha concentración es mayor en la hilera A y al término

del proceso esta es 15,15 % menor a la concentración de TPH obtenida en la hilera B.

Cabe recalcar, que sin embargo de lo expuesto, en ambas hileras se alcanzó valores inferiores a los límites permisibles para suelos industriales establecidos por la RAOHE, por lo que se puede decir que las bacterias nativas fueron aptas para la biodegradación del suelo y el uso de bacterias comerciales no es imprescindible.

3.4.5. ANÁLISIS DEL PERFIL DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO POR CROMATOGRAFÍA DE GASES

Los resultados del perfil de hidrocarburos totales de petróleo obtenidos mediante cromatografía de gases al seguir la técnica descrita en la sección 2.6.5 se presentan en la Figura 3.15, Figura 3.16, Figura 3.17, Figura 3.18 y Figura 3.19. Mientras que el cromatograma de la mezcla de hidrocarburos estándares compuesto por dodecano, tetradecano y hexadecano se muestra en la Figura 3.13.

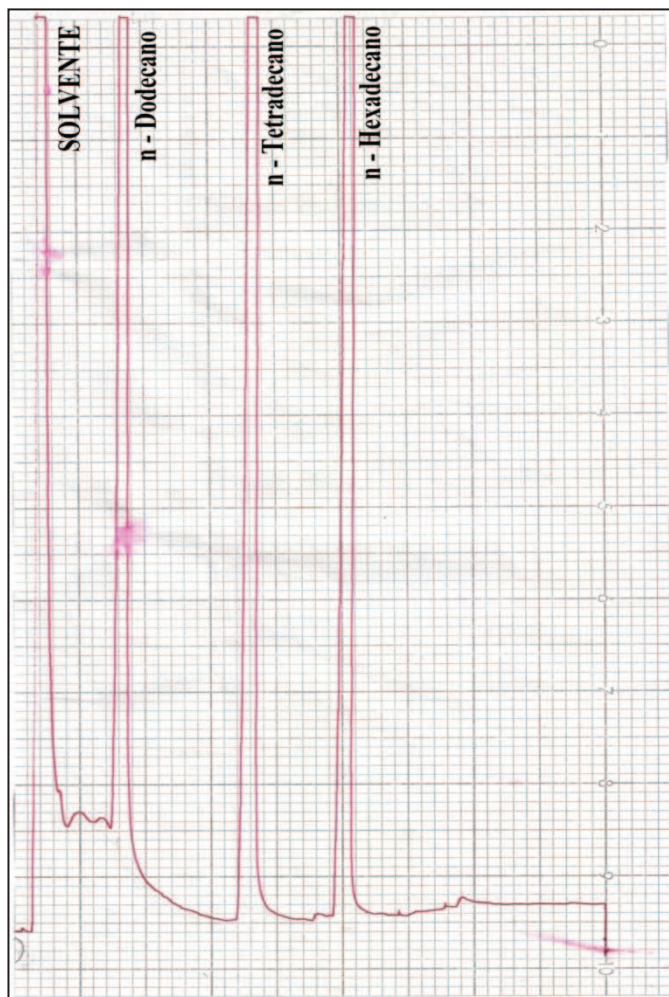


Figura 3.13. Cromatograma obtenido de la mezcla de hidrocarburos estándares

Con el cromatograma presentado en la Figura 3.13, fue posible determinar varios hidrocarburos en las diferentes muestras por analizar, mediante la elaboración de la curva de calibración mencionada en la sección 2.6.5. Al considerar que el inicio del tiempo de retención fue al iniciar el pico del solvente se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Resultados obtenidos del análisis del perfil de hidrocarburos de la muestra estándar bajo las condiciones de la Tabla 2.4

Nº Carbonos	Tiempo de Retención (mm)	Log (Tiempo de Retención)
12	21	1,3222
14	41	1,6128
16	65	1,8129

Al graficar los resultados obtenidos de la Tabla 3.8, se pudo determinar la curva de calibración para la determinación del perfil de hidrocarburos en las muestras analizadas.

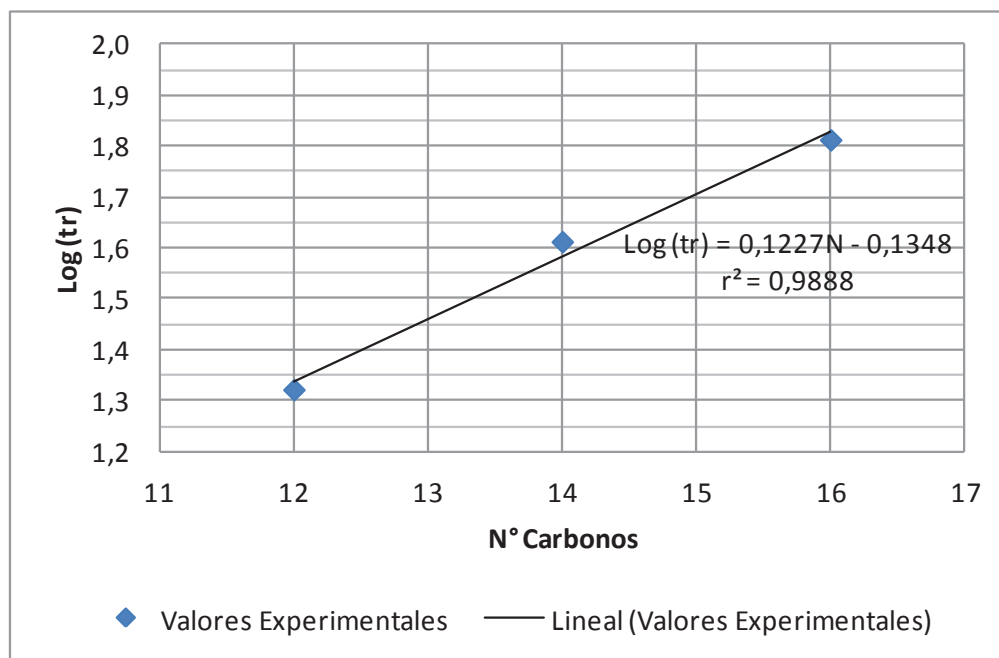


Figura 3.14. Curva de calibración obtenida para la interpretación de resultados en el análisis cromatográfico de las muestras de tierra contaminada con hidrocarburos

Como se puede observar en la Figura 3.14, la ecuación lineal obtenida posee un índice de correlación (r^2) cercano a 1, lo que indica que los valores obtenidos tienen tendencia directamente proporcional. Esta curva de calibración fue de vital importancia para la interpretación de los cromatogramas de las muestras de tierra contaminada con hidrocarburos a los diferentes tiempos de muestreo, ya que con esto, fue posible la caracterización cualitativa de los cromatogramas antes mencionados.

Cabe señalar que la caracterización cuantitativa se omitió, debido a que la normativa ambiental vigente solo exige valores máximos permisibles para concentración de TPH, más no para cada uno de sus componentes.

En la Figura 3.15 se muestra el resultado del análisis cromatográfico de la muestra obtenida al iniciar el proceso de biodegradación, sin ningún tipo de

aditivo como abono elaborado ni bacterias comerciales; a esta muestra se la denominó muestra inicial. El objetivo de este cromatograma es la identificación de la mayor cantidad de HC presentes en la muestra y verificar su biodegradación con los siguientes cromatogramas.

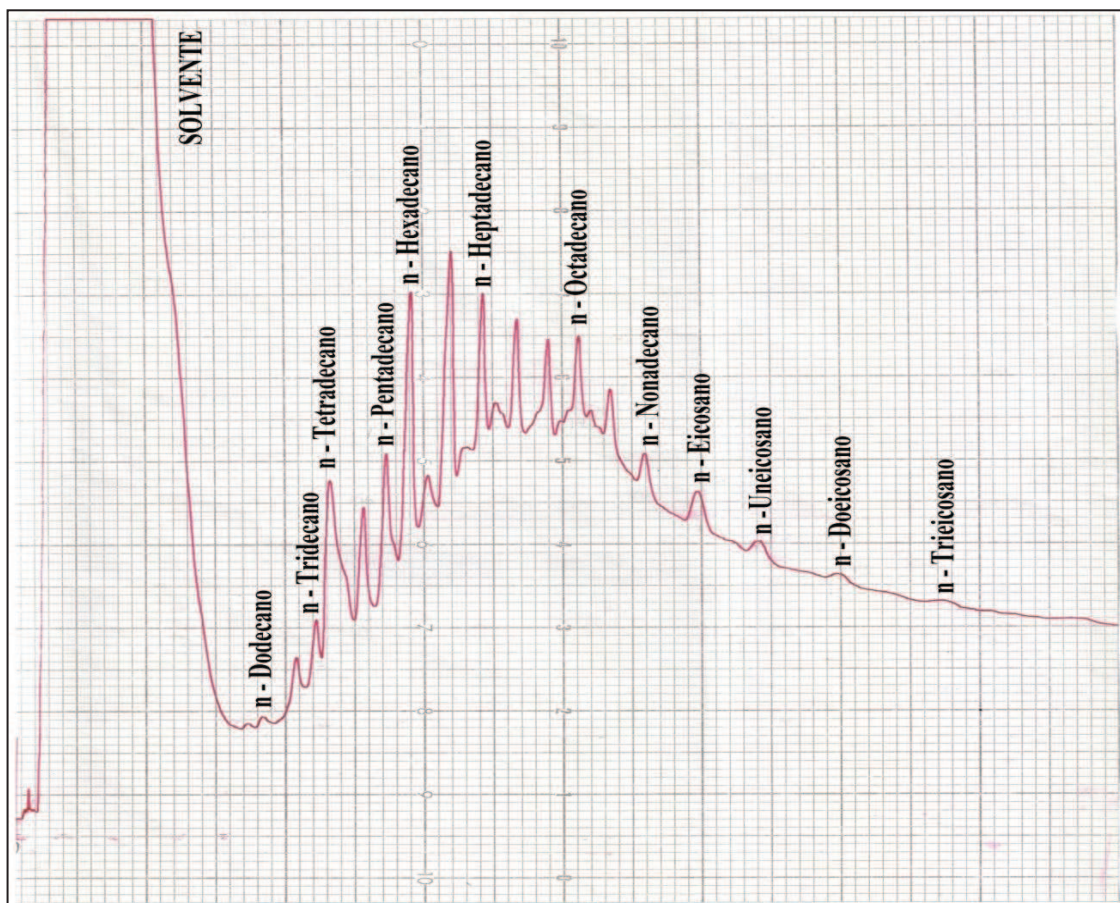


Figura 3.15. Cromatograma obtenido de la muestra inicial de tierra contaminada con hidrocarburos

Como se puede observar en la figura anterior, la muestra inicial contiene una gran cantidad de cadenas lineales de hidrocarburos identificados en la mayoría de los picos del cromatograma, las cadenas encontradas fueron desde n-dodecano (12 carbonos lineales) hasta n-tricosano (23 carbonos lineales). La tendencia de la línea base del cromatograma demuestra que existen una gran cantidad de HC pesados, como son los de naturaleza alifática y aromática.

Además, como era de esperarse, existen picos no identificados con el método de la curva de calibración; esto se da debido a que existen isómeros de cada una de

las cadenas de hidrocarburos, así como también otros compuestos difíciles de caracterizar; pero la mayoría de estos compuestos poseen una menor concentración como se ve en cada uno de los picos de la Figura 3.15. Debido a que no se inyectó una mayor cantidad de muestras estándares, los resultados obtenidos solo señalan una variedad limitada de cadenas de HC.

El cromatograma obtenido de la muestra de tierra contaminada con HC de la hilera A a los 2 meses de proceso se muestra en la Figura 3.16, y su análisis se lo debe realizar comparándolo con lo obtenido en el cromatograma de la muestra inicial, cuyo resultado se presentó en la Figura 3.15:

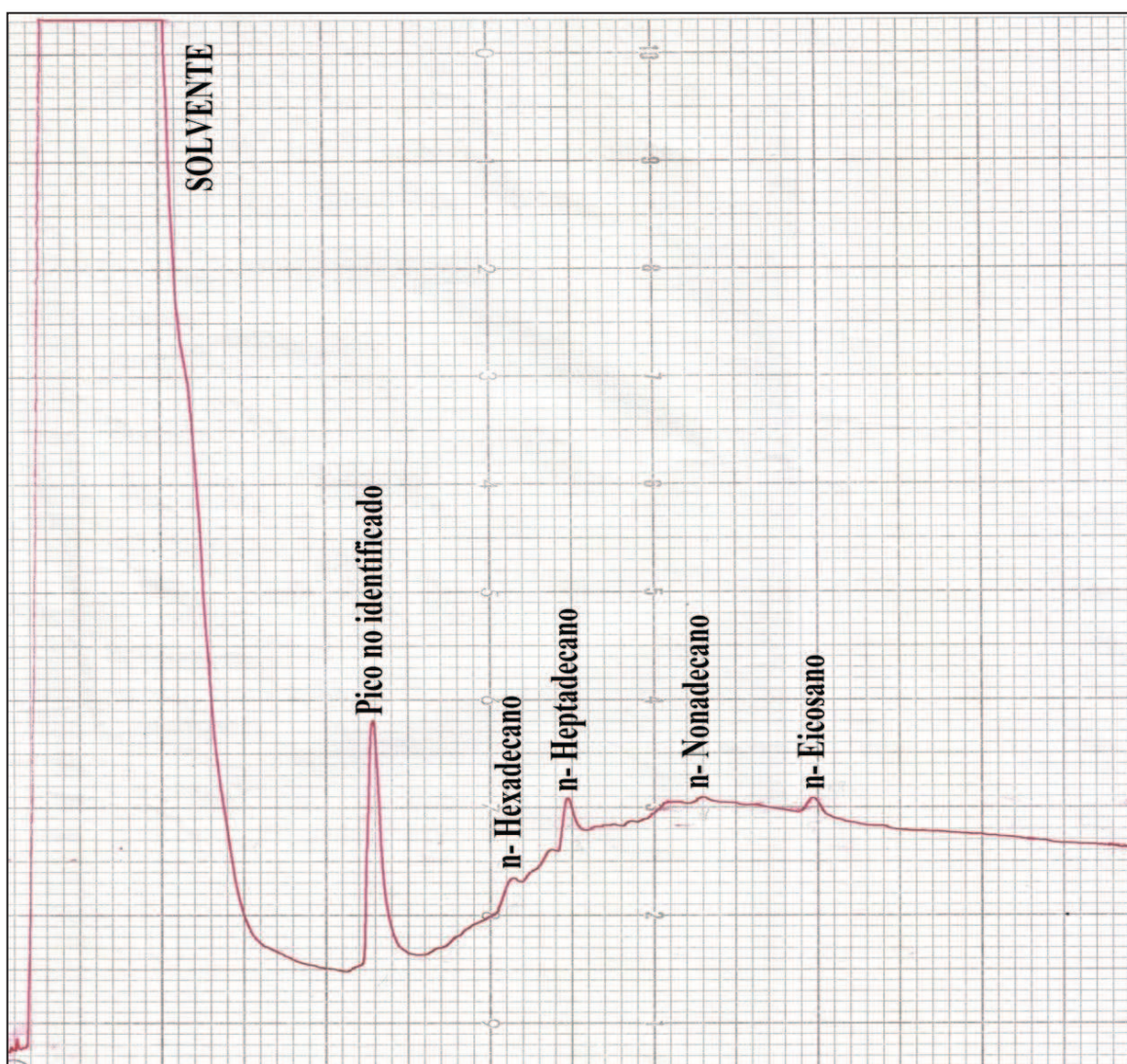


Figura 3.16. Cromatograma obtenido de la muestra de tierra contaminada con hidrocarburos de la hilera A a los 2 meses de proceso

Al analizar lo ocurrido entre la Figura 3.16 y la Figura 3.15, se puede notar claramente el descenso en la altura de los picos para cada una de las cadenas de hidrocarburos, muchas de ellas llegan a desaparecer y solo prevalecieron probablemente los picos correspondientes a los siguientes hidrocarburos: n-Hexadecano, n-Heptadecano, n-Nonadecano y n-Eicosano. Se dice que son estos picos de una manera probable, ya que se inyectó una muestra de estándares de solo tres HC, y para la identificación se utilizó la curva de calibración descrita en la Figura 3.14, que tal y como se mostró, su r^2 no es 1, por lo que el error en la interpretación incrementa.

Existe además un pico que no fue posible su identificación, ya que su tiempo de retención no correspondió a ningún HC de cadena lineal y probablemente corresponda a un HC aromático, ya que como se puede ver en la Figura 3.16, su altura es más elevada que los otros hidrocarburos identificados, por lo que se descarta la posibilidad de que sea lineal con menor número de átomos de carbono, debido a que la facilidad de biodegradación de cadenas de HC es inversamente proporcional al número de carbonos, es decir, a menor número de átomos de carbono, mayor facilidad de biodegradación.

El resultado cromatográfico corrobora lo expuesto en la Tabla AX.1 del ANEXO X, en la cual a los dos meses de proceso de biodegradación, la concentración de TPH en la muestra fue de 5 200 ppm, valor cercano al límite que exige el RAOHE. Es por eso que en los dos primeros meses de proyecto se evidenció la mayor cantidad de biodegradación, tanto en la concentración de TPH como en la identificación cualitativa de cada uno de los contaminantes presentes en las muestras.

En la Figura 3.17 se presenta el perfil de hidrocarburos al final del proceso de biodegradación para la muestra de la hilera A.

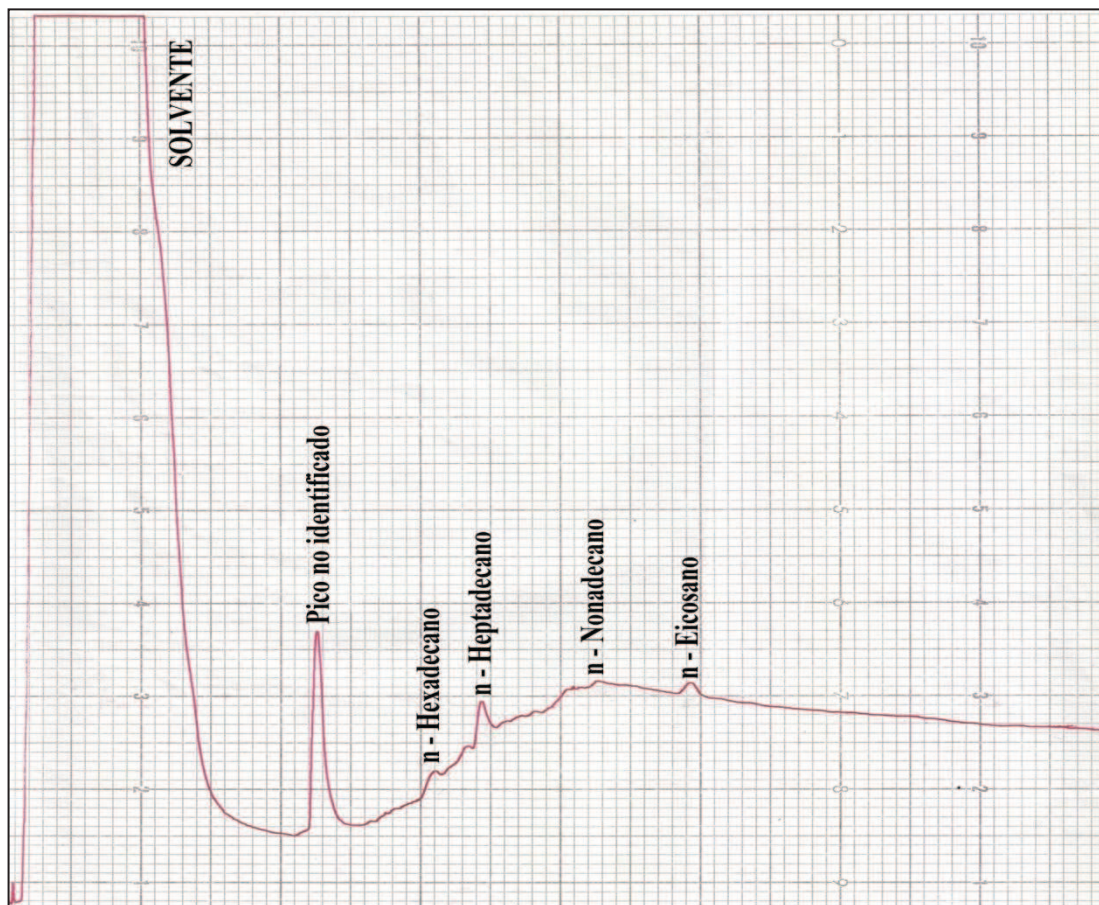


Figura 3.17. Cromatograma obtenido de la muestra de tierra contaminada con hidrocarburos de la hilera A a los 4 meses de proceso

Como se puede observar en la figura anterior y si se la compara con lo presentado en la Figura 3.16, se nota que prevalecen los mismos contaminantes en las muestras, la única diferencia radica en la altura de los picos, los cuales dan una idea cualitativa de la concentración de los mismos. Al igual que lo expuesto en la Tabla AX.1, la disminución en la concentración de TPH a los dos y cuatro meses de proceso es muy pequeña, lo mismo ocurre en el perfil de hidrocarburos.

Además, sobre la base de lo expuesto en la Figura 3.17, se puede decir que las cadenas de hidrocarburos, n-Hexadecano, n-Heptadecano, n-Nonadecano y n-Eicosano son los que limitaron el proceso de biodegradación ya que las bacterias AWT – B350 no pudieron degradar por completo estas cadenas de HC. Al igual que en lo que se puede observar en la Figura 3.16, la Figura 3.17 muestra un pico no identificado, el cual probablemente corresponda a un HC aromático, tal y como se explicó anteriormente.

En la Figura 3.18 se muestra lo ocurrido con el cromatograma de la biodegradación de la hilera B a los dos meses de proceso y se comparará con el cromatograma obtenido de la muestra inicial, es decir, con la Figura 3.15.

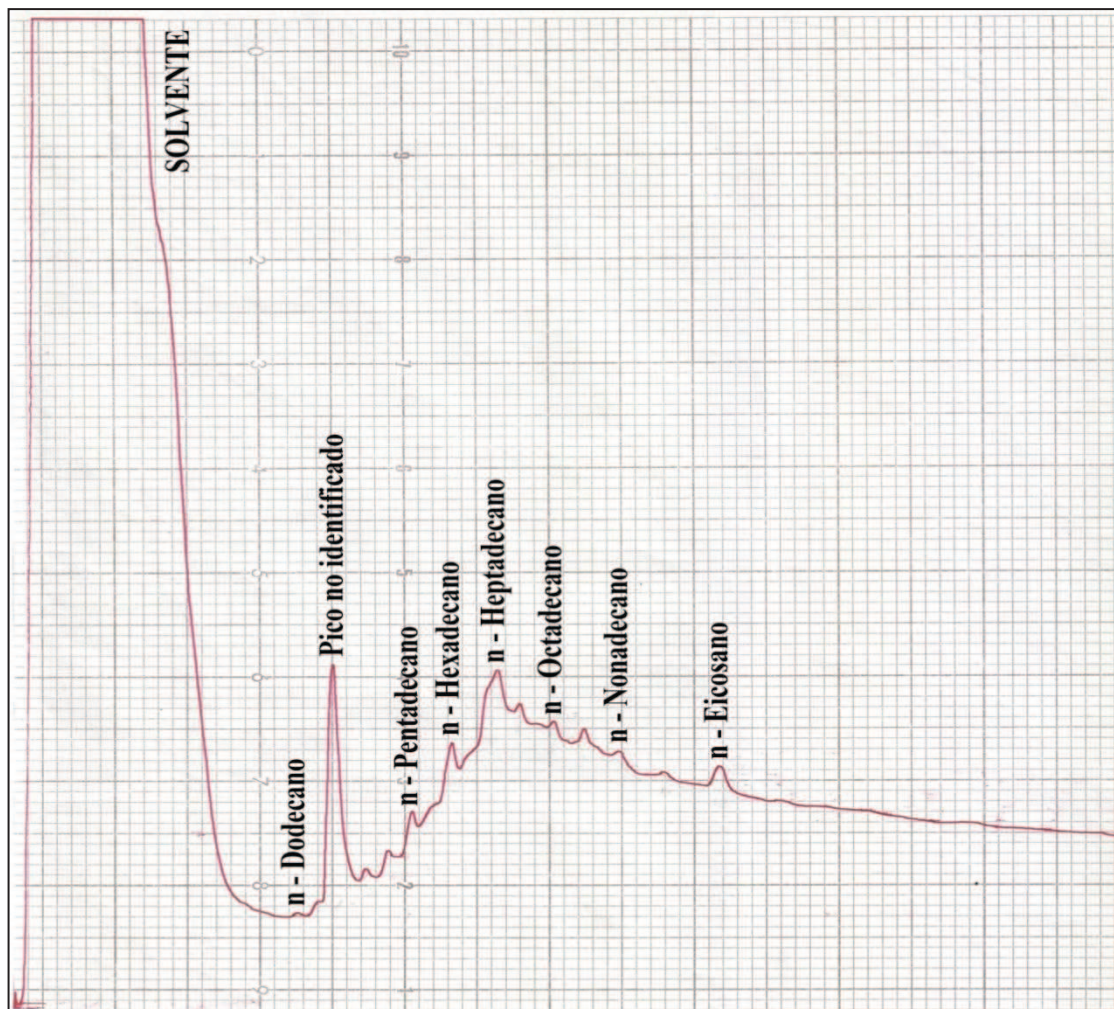


Figura 3.18. Cromatograma obtenido de la muestra de tierra contaminada con hidrocarburos de la hilera B a los 2 meses de proceso

En primer lugar, al analizar los resultados expuestos en la Figura 3.18 y en la Figura 3.15, se puede decir que existió biodegradación de algunas cadenas de hidrocarburos, como es el caso de n-Dodecano, n-Pentadecano, n-Hexadecano, n-Heptadecano, n-Octadecano, n-Nonadecano y n-Eicosano; así como también otras cadenas fueron biodegradadas casi en su totalidad, por lo que el pico correspondiente a esa cadena ya no es relevante en el resultado de la Figura 3.18, como es el caso de n-Tridecano, n-Tetradecano, n-Undecano, n-Dodecano y n-Tridecano.

Al analizar la Figura 3.18 con la Figura 3.16, en la cual se tiene el mismo tiempo de biodegradación, pero se compara los resultados de cada una de las muestras de las hileras A y B, se puede decir que el proceso para la muestra de la hilera B fue más limitada ya que el resultado del cromatograma presentado en la Figura 3.18 posee mayor cantidad de picos, es decir, mayor cantidad de cadenas de hidrocarburos sin biodegradar al compararla con el cromatograma de la Figura 3.16.

Por tanto, se puede afirmar que a las bacterias desarrolladas con el abono les tomó más tiempo en adaptarse al medio y poder degradar mayor cantidad de cadenas de hidrocarburos; pero la altura de los picos es menor en la muestra de la hilera B que los picos para la muestra de la hilera A. Es por esta razón que los resultados de la concentración de TPH mostrados en la Tabla AX.1 del ANEXO X no presentan mayor variación en los valores, ya que mientras en la hilera A se tiene una mayor biodegradación para las ciertas cadenas de hidrocarburos, la hilera B presenta mayor biodegradación para todas las cadenas.

Al igual que en los cromatogramas de la Figura 3.16 y de la Figura 3.17, en el resultado presentado en la Figura 3.18 existe un pico no identificado, con el mismo tiempo de retención que los resultados descritos. Con esto se puede ver que tanto las bacterias de la hilera A como de la hilera B no fueron capaces de biodegradar este tipo de compuesto.

Finalmente, se analiza el resultado del cromatograma de la muestra final de la hilera B sometido a la biodegradación con bacterias nativas y se presenta en la Figura 3.19:

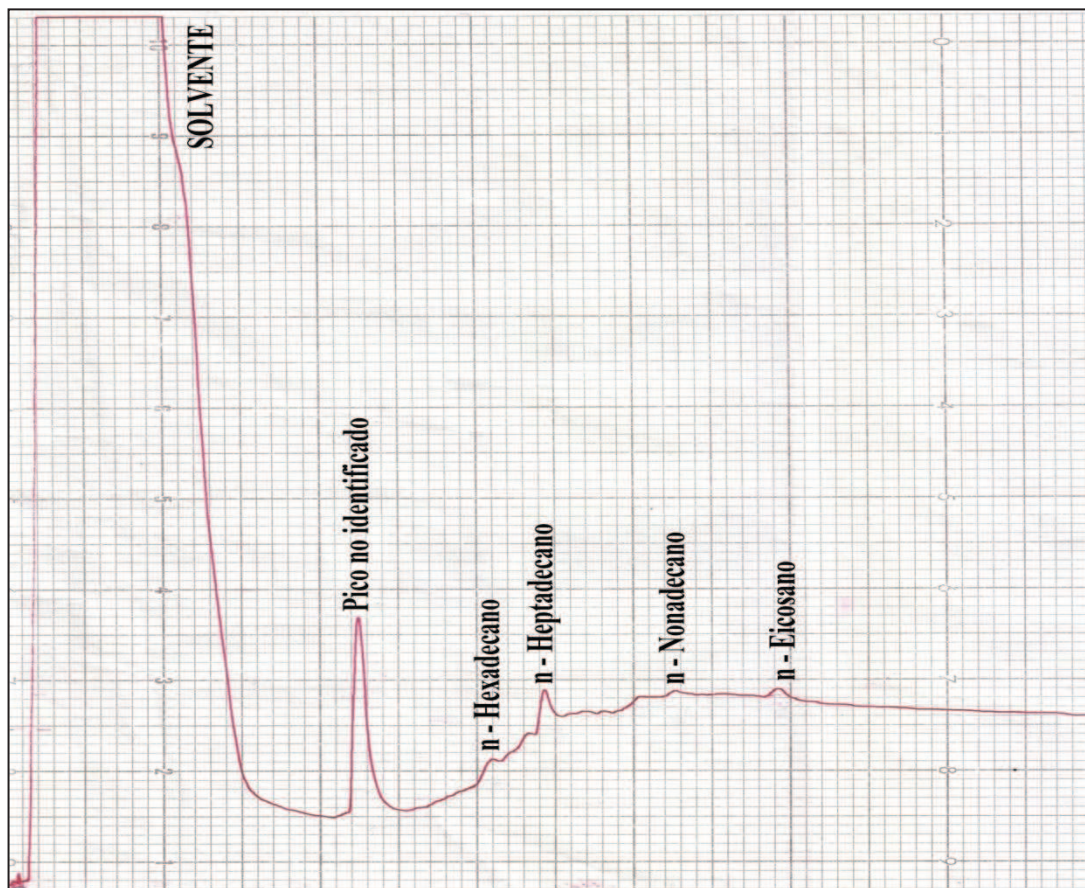


Figura 3.19. Cromatograma obtenido de la muestra de tierra contaminada con hidrocarburos de la hilera B a los 4 meses de proceso

Al comparar el resultado cromatográfico obtenido en la figura anterior con el resultado cromatográfico de la Figura 3.18, que corresponde a la biodegradación en la hilera B durante 2 meses de proceso, se puede observar una biodegradación de una mayor cantidad de cadenas de hidrocarburos, ya que al final del proceso la hilera B presenta básicamente los siguientes HC: n-Hexadecano, n-Heptadecano, n-Nonadecano y n-Eicosano, similar a lo obtenido en la hilera A de la Figura 3.17, incluido el pico no identificado.

Al analizar lo presentado en la Figura 3.19 que corresponde a la biodegradación en la hilera B al término del proceso, con el resultado obtenido en el cromatograma de la Figura 3.17 que corresponde a la biodegradación en la hilera A transcurridos 4 meses de procesos; se puede ver que en primer lugar se tiene las mismas cadenas de hidrocarburos, pero la altura de los picos de cada una de ellas es visiblemente diferente, es decir, los picos de la muestras de la hilera A

son mucho más pequeños que los picos de la muestra de la hilera B; esto corrobora lo mostrado en la Tabla AX.1 del ANEXO X, en la cual la concentración de TPH para la hilera A es menor.

3.4.6. ANÁLISIS DE METALES PESADOS

Los resultados del análisis de concentración de cadmio, plomo y níquel realizado por Laboratorios ANNCY según el método descrito en la sección 2.6.6 se presentan en el ANEXO X

Cabe señalar que los metales mencionados únicamente se analizaron al inicio del proceso y a los dos meses del mismo, ya que la concentración alcanzada de dichos metales en ambas hileras cumplió con la normativa que exige el RAOHE, tal y como se detalla en cada uno de los resultados para cada metal:

3.4.6.1. Cadmio (Cd)

Los resultados de la concentración de cadmio presente en el suelo inicial y a los dos meses de biodegradación presentados en el ANEXO X se condensaron en la Tabla 3.9, que se muestra a continuación:

Tabla 3.9. Resultados del análisis de cadmio en las muestras de suelo contaminado con hidrocarburos

Fecha	Día	Concentración Cd (ppm) – Muestra A	Concentración Cd (ppm) – Muestra B
12/02/2011	4	0,630	0,630
14/04/2011	65	0,433	0,608
Porcentaje de Variación (%)		- 31,27	- 3,49

Al analizar los resultados presentados en la Tabla 3.9 se puede ver que en la hilera A existe un decrecimiento en la concentración de cadmio en un 31,27 %,

mientras que para la hilera B tan solo el descenso es de un 3,49 %. Esto se da, como era de esperarse, debido a que en la hilera A además de las bacterias nativas, se trabajó con bacterias comerciales, especializadas en biodegradar suelos contaminados por petróleo, mientras que para la hilera B se trabajó únicamente con bacterias nativas, que debieron adaptarse a un medio provisto de hidrocarburos y emplearlo como sustrato para que se lleve a cabo la biodegradación.

Además, como se puede observar en la Figura 3.20, la pendiente de la gráfica de la disminución de la concentración de cadmio durante 2 meses para la hilera A es aproximadamente un 88% mayor que la que se obtiene para la hilera B, lo que indica que las bacterias comerciales no solo permiten biodegradar en mayor cantidad los hidrocarburos, como se observó en los cromatogramas de la Figura 3.16 y Figura 3.18, sino que también permiten que el cadmio forme una sal soluble en agua y por ende se desprenda del suelo a manera de lixiviados, o a su vez pasan a la atmósfera por volatilización, según lo descrito por García y Dorronsoro (2005).

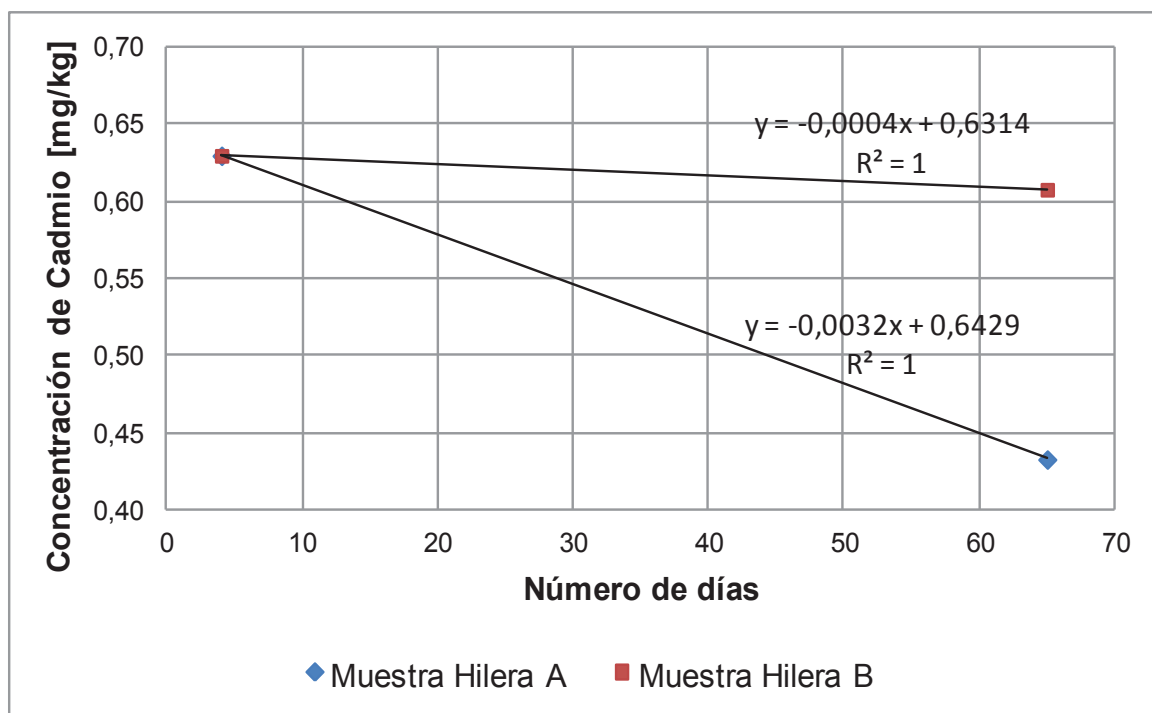


Figura 3.20. Disminución de la concentración de cadmio para la hilera A y B durante 2 meses de biodegradación

En la Figura AX.8 y la Figura AX.9 del ANEXO X se muestran las gráficas de la disminución de la concentración de cadmio, para la hilera A y B, respectivamente, comparadas con la normativa ambiental que exige el RAOHE para este metal pesado que es de 10 ppm en suelos de uso industrial contaminados con HC.

Como se puede observar en las figuras mencionadas, los valores experimentales para las muestras de las hileras A y B están muy por debajo del límite máximo que exige el RAOHE aún desde el inicio de la biodegradación, sin embargo se analizó la concentración de este metal a los dos meses del proceso con el fin de estimar la incidencia de las bacterias sobre los metales pesados en análisis.

3.4.6.2. Plomo (Pb)

Los resultados de la concentración de plomo presente en el suelo inicial y a los dos meses de biodegradación presentados en el ANEXO X se condensaron en la Tabla 3.10, que se muestra a continuación:

Tabla 3.10. Resultados del análisis de plomo en las muestras de suelo contaminado con hidrocarburos

Fecha	Día	Concentración Pb (ppm) – Muestra A	Concentración Pb (ppm) – Muestra B
12/02/2011	4	9,44	9,44
14/04/2011	65	6,51	11,80
Porcentaje de Variación (%)		- 31,04	+ 25,00

Al analizar los valores experimentales presentados en la Tabla 3.10, se nota que en la concentración de plomo de la hilera A existe un decrecimiento de 31,04 % a los dos meses de biodegradación. Esto corrobora lo expuesto en el análisis de cadmio en cuanto a la factibilidad de ayudar a los metales pesados a movilizarse ya sea dentro de la tierra contaminada, como hacia el exterior (a manera de lixiviados o por volatilización a la atmósfera).

Algo diferente ocurre con los resultados de la hilera B, ya que en lugar de tener una disminución en la concentración de plomo, existe un incremento en un 25,00 %, lo que podría haberse debido a una acumulación debido a la movilización de este metal pesado en la zona de muestreo. Por tal motivo, en este trabajo se consideró que para esta hilera la concentración de plomo permaneció constante, ya que los valores de concentración son muy pequeños, tal y como se puede visualizar en la Tabla 3.10.

Cabe señalar que el incremento mencionado no sobrepasó al valor exigido por el RAOHE que es de 500 ppm, ya que se llegó a tener una concentración de 11,80 ppm de plomo a los dos meses de biodegradación.

En la Figura 3.21, se puede observar que la pendiente de la recta de la disminución de la concentración de plomo para la hilera A es aproximadamente un 93% mayor que la pendiente de la recta de la disminución de concentración de cadmio presentada en la Figura 3.20. Esto indica que las bacterias comerciales empleadas en este proyecto ayudan a la movilización del plomo con aproximadamente el doble de facilidad que el cadmio.

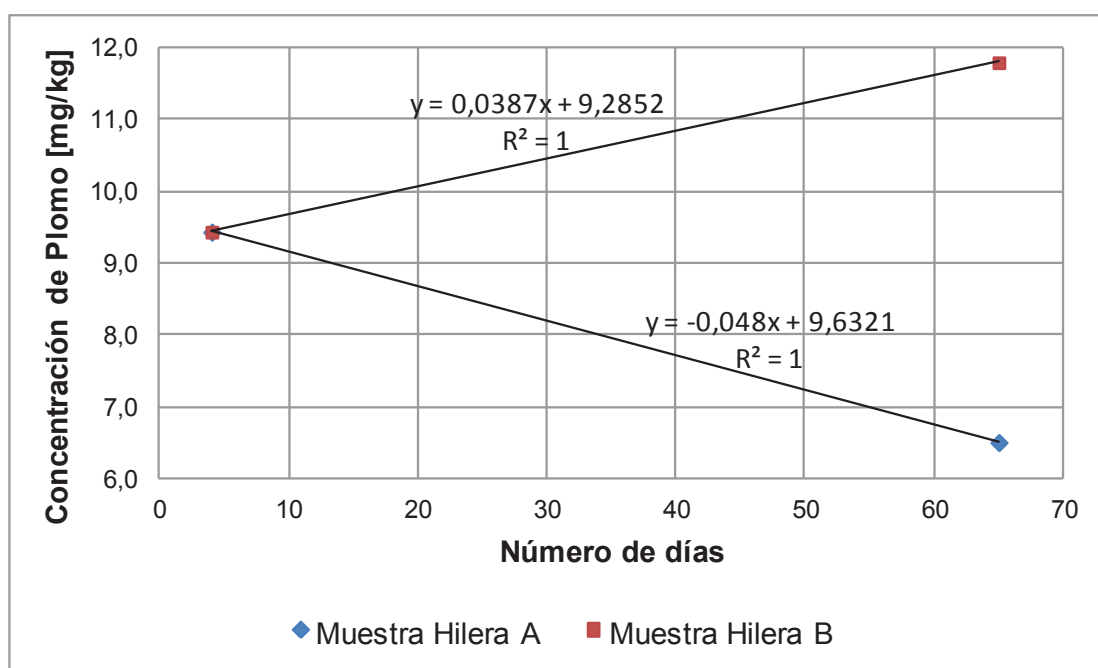


Figura 3.21. Variación de la concentración de plomo para la hilera A y B durante 2 meses de biodegradación

En la Figura AX.10 y Figura AX.11 del ANEXO X se muestra la variación de la concentración de Pb a lo largo del tiempo para la hilera A y B, respectivamente, comparada con la normativa que exige el RAOHE que es de 500 ppm. En estas figuras se puede observar claramente que tanto para la hilera A como para la hilera B, los valores de concentración de Pb están muy por debajo del límite exigido por el RAOHE para suelos de uso industrial contaminados por HC. Al igual que en el caso anterior del análisis de Cd, esta fue la razón por la que no se analizó la muestra final, es decir, a los 4 meses de proceso de biodegradación.

3.4.6.3. Níquel (Ni)

Los resultados de la concentración de plomo presente en el suelo inicial y a los dos meses de biodegradación presentados en el ANEXO X se condensaron en la Tabla 3.11, que se muestra a continuación:

Tabla 3.11. Resultados del análisis de níquel en las muestras de suelo contaminado con hidrocarburos

Fecha	Día	Concentración Ni (ppm) – Muestra A	Concentración Ni (ppm) – Muestra B
12/02/2011	4	16,9	16,9
14/04/2011	65	17,0	16,1
Porcentaje de Variación (%)		+ 0,59	- 4,73

Al analizar los valores presentados en la Tabla 3.11, se puede apreciar que en la hilera A existe un incremento en la concentración de níquel en un 0,59 %, lo que al igual que en el caso anterior se pudo deber a una acumulación de la concentración de níquel en el punto de muestreo debido a la movilización en la hilera; sin embargo, se puede considerar que en la hilera A se mantuvo constante la concentración de níquel durante los dos primeros meses de proceso. Esto indica que las bacterias AWT – B350 no ayudan significativamente a su movilización ni a la volatilización, a pesar de la baja concentración de níquel.

En contraparte con lo ocurrido en la hilera A, se puede observar que en la hilera B existe una disminución de la concentración de níquel en un 4,73 %, por lo que se puede inferir que las bacterias nativas tuvieron mayor facilidad para la movilidad y/o volatilización este metal que el plomo, el cual se consideró que permaneció constante durante todo el proceso.

Por otro lado, si se observa la pendiente de la Figura 3.22 y se la compara con la pendiente de la Figura 3.20 se puede notar que las bacterias nativas presentes en la hilera B mejoran la movilidad y/o la volatilización en aproximadamente un 97% mejor el níquel que el cadmio.

Sin embargo, y debido a los bajos porcentajes de disminución en la concentración de cadmio, plomo y níquel durante los dos meses de biodegradación, se puede decir que las bacterias presentes en la hilera B tuvieron dificultades para movilizar, volatilizar y/o solubilizar los metales pesados en los lixiviados, en comparación con las bacterias comerciales, a excepción de lo ocurrido con el níquel.

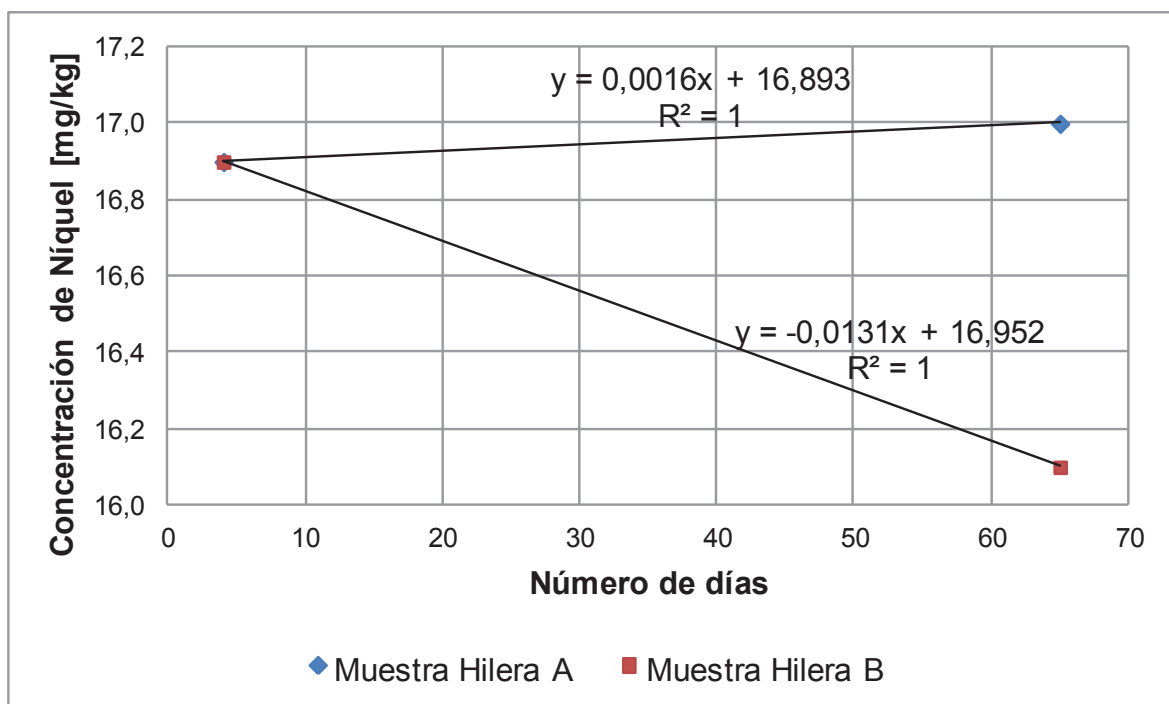


Figura 3.22. Variación de la concentración de níquel para la hilera A y B durante 2 meses de biodegradación

En la Figura AX.12 y Figura AX.13 del ANEXO X se muestra la variación de la concentración de níquel durante el proceso, comparada con el valor que exige el RAOHE que es de 100 ppm.

En estas figuras se puede ver que al igual que los metales pesados antes mencionados (cadmio y plomo), la concentración del níquel en las dos hileras cumple con el valor exigido por el RAOHE para suelos de uso industrial contaminados con hidrocarburos. Por esta causa, tampoco fue necesario analizar la muestra al finalizar el proceso de biodegradación.

3.4.7. ANÁLISIS DE LIXIVIADOS

La cantidad de lixiviados recogidos por hilera durante los 4 meses que duró el proceso de biodegradación mediante el método descrito en la sección 2.6.7, se muestran en la Tabla 3.12.

Como se puede observar en la Tabla 3.12, los lixiviados recogidos en la hilera A fue un 37,36 % superior a los de la hilera B. Esto corrobora a los análisis presentados sobre la humedad del suelo, mostrados en la Figura 3.2, donde se observa que la tierra de la hilera A era más húmeda que la tierra de la hilera B, debido a la ausencia de la cascarilla de arroz, que ayudaba a que el agua fuera eliminada con mayor facilidad por evaporación.

Tabla 3.12. Cantidad de lixiviados recogidos de las hileras A y B

Fecha	Día	Hilera A		Hilera B		Volumen Total (l)
		Altura (cm)	Volumen (l)	Altura (cm)	Volumen (l)	
12/02/2011	4	0	0,00	45	110,84	110,84
02/03/2011	22	27	66,50	35	86,21	152,71
17/03/2011	37	84	206,89	55	135,47	342,36
28/03/2011	48	88	216,74	36	88,67	305,41
13/04/2011	64	32	78,82	37	91,13	169,95
27/04/2011	78	74	182,26	55	135,47	317,73
12/05/2011	93	78	192,11	0	0,00	192,11
27/05/2011	108	70	172,41	0	0,00	172,41
13/06/2011	125	85	209,36	74	182,26	391,62
Total		---	1 325,10	---	830,03	2 155,13

Al término del proceso se recolectaron en total 2 155 litros de lixiviados provenientes de ambas hileras, a los cuales se realizó un análisis de TPH según el método descrito en la sección 2.6.7. Los informes de este análisis se adjuntan en el ANEXO X mientras que los valores condensados se presentan en la Tabla 3.13

Tabla 3.13. Resultados finales de los lixiviados de las hileras A y B

Parámetro	Hilera A	Hilera B
Volumen (l)	1 325,10	830,03
Concentración de TPH (mg/l)	1,0	0,4

Al analizar los resultados presentados en la Tabla 3.13, se puede notar que la concentración de TPH de la hilera A es superior a la concentración de TPH de la hilera B, lo que se debió a que en la hilera A existió mayor cantidad de lixiviados, los mismos que permitieron un mayor arrastre de los contaminantes. Sin embargo estas concentraciones de TPH, 1 mg/l para los lixiviados de la hilera A y 0,4 mg/l para los lixiviados de la hilera B, no fueron representativas ya que está muy por

debajo de los valores que exige el RAOHE para agua contaminada con hidrocarburos en descarga a continente, cuyo valor máximo es de 20 mg/l.

Cabe señalar que no se analizó la concentración de metales pesados como cadmio, plomo y níquel en las muestras de lixiviado debido a que la concentración de estos metales en el suelo inicial estaban muy por debajo del límite que exige el RAOHE, por lo que no existía el peligro de que al disminuir la concentración de estos metales en el suelo se contaminara el agua con valores no permisibles.

Por otro lado, si se comparan los resultados de la Tabla 3.13 con los de la Tabla AX.1 del ANEXO X, se puede notar que para la hilera A la concentración de TPH en el suelo al final del proceso fue de 3 170 ppm y en los lixiviados de 1,0 mg/l, mientras que para la hilera B la concentración de TPH en el suelo al término de la biodegradación fue de 3 736 ppm y 0,4 mg/l en los lixiviados. De esto se puede inferir que los lixiviados arrastraron el 0,03 % de la cantidad de TPH en el suelo para la hilera A y un 0,01 % para la hilera B. Por este motivo, y dada la baja concentración de TPH en los lixiviados, no fue necesario realizar un tratamiento de aguas previo a su disposición final.

3.5. DISPOSICIÓN FINAL DE LA TIERRA Y LIXIVIADOS

Sobre la base de los resultados presentados en la Tabla AX.1 del ANEXO X de la concentración de TPH de las muestras de suelos contaminados para los dos procesos, y dado a que para ambas hileras se cumplió con los valores que exige el RAOHE en lo referido a tierras contaminadas de uso industrial, se decidió colocar esta tierra como base para las diferentes construcciones que realiza INCINEROX en el lugar donde se desarrolló el proyecto.

Para ello solo fue necesaria la extracción de la geomembrana que separaba el suelo nativo de las tierras contaminadas, y se niveló el suelo con la ayuda de una gallineta. Como se muestra en la Figura 3.20, el terreno quedó en condiciones

para la elaboración de bodegas de material que recoge la empresa INCINEROX dentro de sus actividades cotidianas.



Figura 3.23. Disposición final de los suelos contaminados con hidrocarburos provenientes de las hileras A y B

En la Tabla 3.13 se observa que la concentración de TPH de los lixiviados de las muestras de las hileras A y B, estaba muy por debajo del valor norma de 20 mg/l, exigido por el RAOHE para agua contaminada con hidrocarburos en descarga a continente, por lo que a los 2 155,13 litros de lixiviado se empleó en las construcciones que se lleva a cabo en la empresa INCINEROX.

Cabe recalcar que tanto los suelos ya tratados por el método de landfarming como el agua proveniente de lixiviados del proceso, cumplen con las regulaciones que exige el RAOHE, por tanto, la disposición antes descrita fue solo una alternativa de solución que se dio a dicho material.

3.6. ANÁLISIS DEL COSTO – BENEFICIO DEL PROYECTO

3.6.1. PARÁMETROS GENERALES

Es necesario tener varias consideraciones previas para el análisis económico de los procesos desarrollados en cada una de las hileras, es por ello que en la Tabla 3.14 se detallan los parámetros generales económicos, donde la inversión inicial fue realizada por la empresa INCINEROX, auspiciante de este proyecto.

Tabla 3.14. Parámetros generales económicos del proyecto de biodegradación por el método de landfarming para la hilera A y B

Parámetro	Unidad	Valor
Inversión Inicial (Hilera A) ¹	\$	17 885,10
Inversión Inicial (Hilera B) ¹	\$	20 738,31
Aporte Patronal al IESS	% de valor sueldo o salario	11,15
Duración de capital de operación	meses	4
Impuesto a la renta sobre utilidades	%	45
Interés bancario por anualidad	%	10

¹ Las inversiones corresponden a lo relacionado con la adquisición de terreno y las construcciones, maquinaria y equipo utilizado, muebles de oficina y los costos de operación, que se detallan en la Tabla 3.33 y en la Tabla 3.34

Por otro lado, en la Tabla 3.15 se especifican los parámetros de mantenimiento de los equipos utilizados, en la Tabla 3.16 se cuantifican los parámetros de tasas de seguro y en la Tabla 3.17 se detallan los parámetros de amortizaciones que tienen los principales equipos con los que trabajó en cada una de las hileras.

Cabe indicar que la capacidad de procesamiento fue de la capacidad de cada una de las hileras diseñadas, es decir, 10,20 Ton de tierra contaminada para la hilera A y 12,70 Ton de tierra para la hilera B.

Tabla 3.15. Parámetros de mantenimiento de los equipos en el proyecto de biodegradación por el método de landfarming para la hilera A y B

Parámetro	Unidad	Valor
Mantenimiento de maquinaria y equipos	% valor de maquinaria y equipo	5
Mantenimiento de construcciones	% del valor de edificios	2
Número de turnos de trabajo	---	1
Reparación de maquinaria	% de Inversión en Maquinaria y Equipo	2

Tabla 3.16. Parámetros de seguros en el proyecto de biodegradación por el método de landfarming para la hilera A y B

Parámetro	Unidad	Valor
Tasa de seguro de transporte de mercaderías	Tantos por mil del valor asegurado	5
Tasa de seguro de Maquinaria y Equipo	Tantos por mil del valor asegurado	5
Tasa de seguro inmuebles	Tantos por mil del valor asegurado	5

Tabla 3.17. Parámetros de amortizaciones en el proyecto de biodegradación por el método de landfarming para la hilera A y B

Parámetro	Unidad	Valor
Amortización de edificios	años	10
Amortización de Maquinaria y Equipo	años	5
Amortización de Muebles y Equipo de oficina	años	5
Amortización de otros activos	años	5

3.6.2. COSTOS POR MATERIA PRIMA

Luego de haber establecido los parámetros sobre la cual se basa el análisis económico de cada una de las hileras, a continuación se especifican los diferentes costos que se tiene para la ejecución de este proyecto, tanto lo utilizado

en campo como lo utilizado en laboratorio; para esto se tomó una base de 4 meses, tiempo que duró el proceso y se extrapoló a 1 año para la posterior determinación de los indicadores económicos de manera anual:

En la Tabla 3.18 se especifican los costos de materia prima utilizados en el proceso de biodegradación en la hilera A, que incluye únicamente la compra de las bacterias comerciales AWT – B350.

Tabla 3.18. Costos de materia prima necesarios para el proceso de la hilera A

Designación de la materia prima	Costo de la Materia prima (\$/kg)	Cantidad de materia prima por cuatrimestre (kg)	Cantidad de materia prima por año (kg)	Costo de materia prima por año (\$)
Bacterias AWT - B350	20,00	20	60	1 200,00
TOTAL				1 200,00

En la Tabla 3.19 se especifican los costos de materia prima utilizados en el proceso de biodegradación en la hilera B, que incluye el uso de estiércol de ganado y cascarilla de arroz para la elaboración del abono.

Tabla 3.19. Costos de materia prima necesarios para el proceso de la hilera B

Designación de la materia prima	Costo de la Materia prima (\$/kg)	Cantidad de materia prima por cuatrimestre (kg)	Cantidad de materia prima por año (kg)	Costo de materia prima por año (\$)
Estiércol de ganado	5,00	406	1 217	6 082,50
Cascarilla de arroz	1,00	1 134	3 402	3 402,00
TOTAL				9 484,50

3.6.3. COSTOS POR MATERIALES INDIRECTOS

Los costos por materiales indirectos son los gastos que se realizan para adquirir reactivos y para los análisis de laboratorio durante el control de la biodegradación. En la Tabla 3.20 y en la Tabla 3.21 se detallan los costos por adquisición de reactivos para la hilera A y B, respectivamente.

Tabla 3.20. Costos de reactivos adquiridos para el análisis de laboratorio en el control del proceso de biodegradación en la hilera A

Reactivo	Cantidad de envases por año	Costo Unitario (\$)	Costo por año (\$)
Nutrient Agar	1	95,00	95,00
Tripticasa Soy Agar (500 g)	1	57,00	57,00
Ciclohexanona (2,5 l)	2	40,00	80,00
TOTAL			232,00

Tabla 3.21. Costos de reactivos adquiridos para el análisis de laboratorio en el control del proceso de biodegradación en la hilera B

Reactivo	Cantidad de envases por año	Costo Unitario (\$)	Costo por año (\$)
Nutrient Agar	1	95,00	95,00
Tripticasa Soy Agar (500 g)	1	57,00	57,00
Ciclohexanona (2,5 l)	2	40,00	80,00
TOTAL			232,00

Cabe señalar que estos reactivos se adquirieron al iniciar el proceso de biodegradación y se utilizará aproximadamente la tercera parte del total adquirido. Por este motivo, se asumió que los reactivos podían ser utilizados durante un año hasta que se terminen, ya que el tiempo de caducidad para los medios de cultivo es de 3 años, mientras que para la ciclohexanona su tiempo de caducidad es de 5 años; por tanto no existe el problema de trabajar con reactivos caducados.

En la Tabla 3.22 y en la Tabla 3.23 se detallan los gastos por análisis de laboratorio de las muestras tomadas en cada una de las hileras:

Tabla 3.22. Costos de análisis de laboratorio para el control del proceso en la hilera A

	Cantidad de muestras por cuatrimestre	Costo Unitario (\$)	Costo por cuatrimestre (\$)	Costo por año (\$)
Nitrógeno Total	1	22,40	22,40	67,20
Fósforo Total	1	16,80	16,80	50,40
Potasio	1	13,44	13,44	40,32
Tratamiento Nutrientes	1	13,44	13,44	40,32
TPH suelos	3	50,40	151,20	453,60
TPH aguas	1	39,20	39,20	117,60
Cadmio	2	13,44	26,88	80,64
Níquel	2	13,44	26,88	80,64
Plomo	2	13,44	26,88	80,64
Tratamiento Metales	2	16,80	33,60	100,80
Aislamiento bacterias	1	39,20	39,20	117,60
Identificación Bacillus	1	67,20	67,20	201,60
Cromatografía	3	134,40	403,20	1.209,60
Tamaño de partícula	1	10,00	10,00	30,00
Densidad de suelo	1	15,00	15,00	45,00
Humedad	9	10,00	90,00	270,00
pH	9	10,00	90,00	270,00
Contaje de microorganismos	9	20,00	180,00	540,00
Aceites y grasas	9	20,00	180,00	540,00
TOTAL ANÁLISIS DE LABORATORIO			1 445,32	4 335,96

Tabla 3.23. Costos de análisis de laboratorio para el control del proceso en la hilera B

Análisis	Cantidad de muestras por cuatrimestre	Costo Unitario (\$)	Costo por cuatrimestre (\$)	Costo por año (\$)
Nitrógeno Total	3	22,40	67,20	201,60
Fósforo Total	2	16,80	33,60	100,80
Potasio	2	13,44	26,88	80,64
Carbono Orgánico Total	1	16,80	16,80	50,40
Tratamiento Nutrientes	4	13,44	53,76	161,28
TPH suelos	3	50,40	151,20	453,60
TPH aguas	1	39,20	39,20	117,60
Cadmio	2	13,44	26,88	80,64
Níquel	2	13,44	26,88	80,64
Plomo	2	13,44	26,88	80,64
Tratamiento Metales	2	16,80	33,60	100,80
Aislamiento bacterias	1	39,20	39,20	117,60
Identificación Bacillus	1	67,20	67,20	201,60
Cromatografía	3	134,40	403,20	1.209,60
Tamaño de partícula	1	10,00	10,00	30,00
Densidad de suelo	1	15,00	15,00	45,00
Humedad	9	10,00	90,00	270,00
pH	9	10,00	90,00	270,00
Contaje de microorganismos	9	20,00	180,00	540,00
Aceites y grasas	9	20,00	180,00	540,00
TOTAL ANÁLISIS DE LABORATORIO			1 577,48	4 732,44

Los costos referidos a materiales indirectos es la suma de los costos de reactivos más los de análisis de laboratorio, estos resultados se muestran en la Tabla 3.24:

Tabla 3.24. Costos por materiales indirectos anuales en cada una de las hileras

COSTOS	HILERA A	HILERA B
Por reactivos	232,00	232,00
Por análisis de Laboratorio	4 335,96	4 732,44
TOTAL	4 567,96	4 964,44

3.6.4. COSTOS POR TERRENOS Y CONSTRUCCIONES

Para la determinación de estos costos, se consideró en primer lugar, el uso exclusivo que tuvo el proceso de biodegradación en las hileras A y B, es decir, 150 m² para cada una. El terreno total fue de 1 000 m², por lo que para la consideración del gasto en cada una de las hileras, se consideró el costo total repartido equitativamente en el análisis de cada una de ellas.

Además, fue necesaria la construcción de bodegas, oficinas y cuartos de alojamiento para el personal y jefe de proceso. Como el proyecto de biodegradación en cada una de las hileras se lo realizó a la par, la construcción fue única, por lo que el valor de estas construcciones realizadas fue considerado el 50 % del gasto total en la hilera A y el otro 50 % del gasto en la hilera B.

Se consideró un 10% del valor total de las construcciones para la amortización anual, con el fin de compensar la depreciación que experimentan ciertos elementos patrimoniales.

Por lo tanto, los costos referidos a terrenos y construcciones realizados en cada una de las hileras, fueron exactamente los mismos; por esta razón, en la Tabla 3.25 se representa los gastos referidos en este ítem:

Tabla 3.25. Costos de terreno y construcciones para el desarrollo del proyecto

Designación	Área (m ²)	Valor (\$/m ²)	Valor Total (\$)	Dividendo anual de Amortización (\$)
Terreno ¹	1 000	10,00	10 000,00	---
Construcciones ¹	700	14,29	10 000,00	1 000,00
Bodega	100	---	---	---
Cuartos de alojamiento para trabajadores	350	---	---	---
Cuarto de alojamiento para jefe de proceso	200	---	---	---
Oficinas	50	---	---	---
Total Terreno + Construcciones			20 000,00	1 000,00
Total Terreno + Construcciones en la hilera A (50% del Total)			10 000,00	500,00
Total Terreno + Construcciones en la hilera A (50% del Total)			10 000,00	500,00

¹ Considerado el 50% en los gastos de la hilera A y el otro 50 % en los gastos de la hilera B.

3.6.5. COSTOS POR EQUIPOS Y MUEBLES DE OFICINA

Los costos referidos a equipos y muebles de oficina son los adquiridos para los cuartos de alojamiento de los trabajadores y del jefe del proceso, así como también para las oficinas. Al igual que en el caso anterior, estos gastos fueron únicos para el proyecto, por tal razón, el gasto considerado para cada una de las hileras fue el 50% del total del costo.

En la Tabla 3.26 se detallan los costos totales realizados y el gasto considerado para el análisis económico para cada una de las hileras. Además, fue necesario asumir un 5% del valor total de cada ítem para el cálculo de la amortización anual:

Tabla 3.26. Costos de equipos y muebles de oficina usados en el proyecto

Denominación	Número de unidades	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)	Dividendo Anual de Amortización (\$)
Escritorio	2	250,00	500,00	100,00
Sillones para escritorio	2	100,00	200,00	40,00
Camas	4	250,00	1 000,00	200,00
Estanterías y repisas	3	50,00	150,00	30,00
Sillas	6	30,00	180,00	36,00
Mesa de conferencia	1	200,00	200,00	40,00
Total			2 230,00	446,00
Total costo en la hilera A (50% del Total)			1 115,00	223,00
Total costo en la hilera B (50% del Total)			1 115,00	223,00

3.6.6. COSTOS POR CONSUMO DE SUMINISTROS

Los gastos debidos al consumo de suministros fueron: agua potable, energía eléctrica y tanques de gas por parte del personal que laboró en INCINEROX.

En la Tabla 3.27 se especifican los gastos realizados en cada una de las hileras, ya que el gasto fue exactamente el mismo.

Tabla 3.27. Costos de suministros tanto para la hilera A como para la hilera B

Designación del suministro	Costo unitario (\$)	Unidad	Cantidad mensual	Costo Mensual (\$)	Costo anual (\$)
Agua	0,10	m ³	250	25,00	300,00
Gas (Propano/Butano)	2,50	Tanques de 15 kg	2	5,00	60,00
Energía eléctrica	0,08	Kw-h	750	60,00	720,00
TOTAL					1 080,00

3.6.8. COSTOS POR MAQUINARIA Y EQUIPOS

Estos costos son los referidos a:

- Geomembrana para protección del suelo nativo, en las hileras A y B
- Palas para remoción continua de la tierra de las hileras A y B
- Termohidrógrafo para control de temperatura ambiente y humedad relativa
- Tanques de almacenamiento de lixiviados provenientes de las hileras A y B
- Saquillos de yute para la elaboración de los terraplenes en el diseño de las hileras
- Fumigadora manual de espalda para dosificación de bacterias comerciales en la hilera A.

En la Tabla 3.28 se especifican los costos para la hilera A, mientras que en la Tabla 3.29 se detallan los gastos por maquinaria y equipos utilizados en la hilera B.

Tabla 3.28. Costos de maquinaria y equipos utilizados en la hilera A

Designación del equipo	Unidad Productiva	Número de unidades	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)	Dividendo de Amortización (\$)
Geomembrana	Diseño de hileras	100 m ²	2,00	200,00	40,00
Palas	Proceso	1	10,00	10,00	2,00
Termohidrómetro	Control del proceso	1	35,00	35,00	7,00
Tanques	Almacenamiento lixiviados	9	20,00	180,00	36,00
Saquillos de yute	Diseño de hileras	50	0,10	5,00	1,00
Fumigadora manual de espalda	Dosificación bacterias comerciales	1	50,00	50,00	10,00
TOTAL				875,00	175,00

Tabla 3.29. Costos de maquinaria y equipos utilizados en la hilera B

Designación del equipo	Unidad Productiva	Número de unidades	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)	Dividendo de Amortización (\$)
Geomembrana	Diseño de hileras	100 m ²	2,00	200,00	40,00
Palas	Proceso	1	10,00	10,00	2,00
Termohidrógrafo	Control del proceso	1	35,00	35,00	7,00
Tanques	Almacenamiento lixiviados	9	20,00	180,00	36,00
Saquillos de yute	Diseño de hileras	50	0,10	5,00	1,00
TOTAL				430,00	86,00

3.6.9. COSTOS POR NÓMINA DE FUERZA LABORAL

Para este rubro, se consideró 2 obreros, uno para que trabaje en la hilera A y otro para la hilera B, los cuales estaban a cargo del laboreo del suelo. Su sueldo estaba acorde al trabajo que desarrollaron, con un salario de \$ 400,00 cada uno.

Además, era necesario un jefe del proceso, que estaba a cargo de la supervisión del trabajo de los obreros, así como de tomar las muestras de suelo para el análisis posterior y control del proceso de biodegradación en las hileras A y B; su sueldo era de \$ 500,00 por el trabajo en ambas hileras, por lo que se consideró este gasto compartido equitativamente en los análisis económicos de la hilera A y B; por lo tanto el sueldo considerado para el análisis económico del jefe del proceso fue de \$ 250,00.

En la Tabla 3.30 se especifican los costos por nómina de fuerza laboral que se necesitó para el desarrollo del proyecto tanto en la hilera A como en la hilera B, ya que los gastos son exactamente los mismos.

Tabla 3.30. Nómina de fuerza laboral para el desarrollo del proyecto tanto en la hilera A como en la hilera B

Parámetro	Personal	Obreros	Jefe de proceso
Número de operador por turno		1	1
Salario mensual total (\$)		400,00	250,00
Aporte patronal al IESS (\$)		44,60	27,88
Total mensual, ex-bonificaciones (\$)		444,60	277,88
Total anual, ex- bonificaciones (\$)		5 335,20	3 334,50
Vacaciones (\$)		222,30	138,94
13er sueldo (\$)		444,60	277,88
14to sueldo (\$)		264,00	264,00
Fondo de reserva (\$)		444,60	277,88
Total anual (\$)		6 710,70	4 293,19
Total Nómina Fuerza Laboral (\$)		11 003,89	

Los turnos de trabajo para el personal eran de 8 horas al día, con una hora de almuerzo; es decir, existía un único turno. Dado que el objetivo general del proyecto era la biodegradación de suelos contaminados por el método de landfarming, mas no una propuesta económica para la implementación de una nueva planta, no fue necesario el personal administrativo, como secretarias, choferes, contadores, etc. (mano de obra indirecta); ya que INCINEROX cuenta con personas encargadas de dichas funciones tanto de la incineración de residuos sólidos, como de la biodegradación de los suelos contaminados mediante landfarming.

Además, dentro de los beneficios del trabajador, se debe considerar varios gastos adicionales referidos a: vacaciones, décimo tercer y décimo cuarto sueldo. El rubro por vacaciones se refiere a la remuneración correspondiente a la 24ta parte del sueldo percibido por el trabajador en un año.

La décima tercera remuneración es un monto equivalente a la doceava parte de las remuneraciones percibidas por el trabajador durante el año calendario

respectivo y la décima cuarta remuneración es una remuneración básica mínima unificada, vigentes a la fecha de pago, que para el año 2011 era de \$ 264,00.

3.6.10. COSTOS DE OPERACIÓN

Para la hilera A, en base a los resultados presentados en la Tabla 3.18, Tabla 3.20, Tabla 3.22, Tabla 3.25, Tabla 3.26, Tabla 3.27, Tabla 3.28 y Tabla 3.30 se presenta un resumen en la Tabla 3.31 de todos los gastos mencionados, así como los valores por depreciaciones, mantenimiento y seguros, caracterizados en la Tabla 3.14, Tabla 3.15, Tabla 3.16 y Tabla 3.17:

Mientras que para la hilera B, en base a los resultados presentados en la Tabla 3.19, Tabla 3.21, Tabla 3.23, Tabla 3.25, Tabla 3.26, Tabla 3.27, Tabla 3.29 y Tabla 3.30 se presenta un resumen en la Tabla 3.32 de todos los gastos descritos anteriormente, así como también los valores por depreciaciones, mantenimiento y seguros, caracterizados en la Tabla 3.14, Tabla 3.15, Tabla 3.16 y Tabla 3.17:

Tabla 3.31. Costos de operación en el proceso de la hilera A

Designación del rubro	Valor (\$)	Sub-Totales (\$)	Costos Fijos (\$)	Costos variables Unitarios (\$/Kg*año)	Contribución porcentual (%)	Capital de Operación para 4 meses
Materiales directos	1 200,00	12 203,89	---	0,04	6,36	400,00
Mano de obra directa	11 003,89		11 003,89	---	58,31	3 667,96
<u>Carga Fabril</u>						
Mano de obra indirecta	0,00	4 567,96	0,00	---	0,00	0,00
Materiales indirectos	4 567,96		---	0,15	24,21	1 522,65
<u>Depreciaciones</u>						
Construcciones	500,00	819,00	500,00	---	2,65	166,67
Maquinaria y equipo	96,00		96,00	---	0,51	32,00
Muebles y equipos de oficina	223,00		223,00	---	1,18	74,33
Otros Activos	0,00		0,00	---	0,00	0,00
<u>Mantenimiento</u>						
Maquinaria y Equipo	24,00	143,20	24,00	---	0,13	8,00
Repuestos para Maquinaria y Equipo	9,60		9,60	---	0,05	3,20
Construcciones	100,00		100,00	---	0,53	33,33
Reparación de maquinaria	9,60		9,60	---	0,05	3,20
<u>Suministros</u>						
Suministros	1 080,00	1 080,00	---	---	5,72	360,00
<u>Seguros</u>						
Transporte de materiales directos	6,00	56,24	---	0,00	0,03	2,00
Transporte de materiales indirectos	22,84		---	0,00	0,12	7,61
Construcciones	25,00		25,00	---	0,13	8,33
Maquinaria y Equipo	2,40		2,40	---	0,01	0,80
Total, costos anuales de producción	18 870,29	---	11 993,49	0,19	100,00	6 290,10

Tabla 3.32. Costos de operación en el proceso de la hilera B

Designación del rubro	Valor (\$)	Sub-Totales (\$)	Costos Fijos (\$)	Costos variables Unitarios (\$/Kg*año)	Contribución porcentual (%)	Capital de Operación para 4 meses
Materiales directos	9 484,50	20 488,39	---	0,25	34,39	3 161,50
Mano de obra directa	11 003,89		11 003,89	---	39,90	3 667,96
<u>Carga Fabril</u>						
Mano de obra indirecta	0,00	4 964,44	0,00	---	0,00	0,00
Materiales indirectos	4 964,44		---	0,13	18,00	1 654,81
<u>Depreciaciones</u>						
Construcciones	500,00	809,00	500,00	---	1,81	166,67
Maquinaria y equipo	86,00		86,00	---	0,31	28,67
Muebles y equipos de oficina	223,00		223,00	---	0,81	74,33
Otros Activos	0,00		0,00	---	0,00	0,00
<u>Mantenimiento</u>						
Maquinaria y Equipo	21,50	138,70	21,50	---	0,08	7,17
Repuestos para Maquinaria y Equipo	8,60		8,60	---	0,03	2,87
Construcciones	100,00		100,00	---	0,36	33,33
Reparación de maquinaria	8,60		8,60	---	0,03	2,87
<u>Suministros</u>						
Suministros	1 080,00	1 080,00	---	---	3,92	360,00
<u>Seguros</u>						
Transporte de materiales directos	47,42	99,39	---	0,00	0,17	15,81
Transporte de materiales indirectos	24,82		---	0,00	0,09	8,27
Construcciones	25,00		25,00	---	0,09	8,33
Maquinaria y Equipo	2,15		2,15	---	0,01	0,72
Total, costos anuales de producción	27 579,92	---	11 978,74	0,38	100,00	9 193,31

Como se puede ver en los resultados de la Tabla 3.31 la mayor inversión que se tiene que realizar es en la mano de obra directa (58,31% del total) y en los materiales indirectos, es decir, en los análisis de laboratorio y reactivos

empleados (24,21% del total). El resto de rubros son menores, pero necesarios para el buen funcionamiento del proceso, especialmente lo referido a mantenimiento, depreciaciones y seguros. Al analizar los resultados de la Tabla 3.32, la mayor inversión que se tiene que realizar es en la mano de obra directa (39,90% del total), en los materiales directos que son la materia prima (34,39% del total) y en los materiales indirectos (18,00 % del total).

Es notorio que al requerir más materia prima en la hilera B que lo que se usa en la hilera A, el rubro referido a materiales directos es considerable en dicho análisis, mientras que para la hilera A este gasto solo representa el 6,36% del total de la inversión, pero necesario para su desarrollo. Cabe señalar que el ítem “otros activos” se refiere a adquisiciones que se realizó para el desarrollo del proyecto, como por ejemplo vehículos para movilidad o trabajo de campo; que en este caso, no influyeron ya que la empresa contaba con dichos activos.

3.6.11. INVERSIONES

En la Tabla 3.33 se presenta un resumen total de las inversiones necesarias para el desarrollo del proyecto de biodegradación en la hilera A, mientras que en la Tabla 3.34 se muestran las inversiones realizadas en la hilera B:

Tabla 3.33. Inversiones para el desarrollo del proyecto en la hilera A

Denominación	Valor (\$)	Contribución porcentual (%)
<u>Inversión fija</u>		
Terreno y construcciones	10 000,00	55,91
Maquinaria y equipo	480,00	2,68
Equipo y muebles de oficina	1 115,00	6,23
Otros activos	0,00	0,00
<u>Capital de operación</u>		
Capital de operación	6 290,10	35,17
TOTAL INVERSIONES	17 885,10	100,00

Tabla 3.34. Inversiones para el desarrollo del proyecto en la hilera B

Denominación	Valor (\$)	Contribución porcentual (%)
<u>Inversión fija</u>		
Terreno y construcciones	10 000,00	48,22
Maquinaria y equipo	430,00	2,07
Equipo y muebles de oficina	1 115,00	5,38
Otros activos	0,00	0,00
<u>Capital de operación</u>		
Capital de operación	9 193,31	44,33
TOTAL INVERSIONES	20 738,31	100,00

Como se puede observar en la Tabla 3.33 y Tabla 3.34, la mayor inversión que se genera en el desarrollo de la biodegradación usando bacterias comerciales y usando bacterias nativas, es la que se refiere a la adquisición del terreno y su adecuación, con un 55,91 % del total (\$ 17 885,10) para la hilera A y un 48,22% del total (\$ 20 738,31) para la hilera B.

3.6.12. INGRESOS

Para compensar todos los gastos generados en cada uno de los procesos, es necesario el cobro por tratar los suelos contaminados con hidrocarburos. Para ello, se determinó un costo de \$ 1,00 por cada kilogramo de suelo a tratar, sin importar el método que se realice. Este valor no contempla los costos que generan el transporte del mismo, ya que en la mayoría de casos, el cliente es quien asume dichos gastos adicionales.

En la Tabla 3.35 se muestran los ingresos generados por el tratamiento de los suelos contaminados mediante la biodegradación por landfarming usando bacterias comerciales (AWT – B350) con bacterias nativas; mientras que la Tabla 3.36 muestra los ingresos al tratar los suelos contaminados mediante el uso de bacterias nativas con la adición de abono:

Tabla 3.35. Ingresos por tratamiento de los suelos contaminados en la hilera A

Cantidad de tierra por descontaminar al cuatrimestre (kg)	Cantidad de tierra por descontaminar al año (kg)	Precio de proceso (\$/kg)	Ingresos anuales por ventas (\$)
10 184,04	30 594,13	1,00	30 594,13

Tabla 3.36. Ingresos por tratamiento de los suelos contaminados en la hilera B

Cantidad de tierra por descontaminar al cuatrimestre (kg)	Cantidad de tierra por descontaminar al año (kg)	Precio de proceso (\$/kg)	Ingresos anuales por ventas (\$)
12 703,26	38 109,78	1,00	38 109,78

La cantidad de tierra por descontaminar, como se pudo observar en los resultados del análisis de concentración de TPH, tardó 4 meses en llegar a valores norma; por lo tanto, se tiene un año con 3 periodos de proceso. Cabe señalar que la descarga de la tierra tratada no toma más allá de 1 día, por lo que no interfiere significativamente en los tiempos considerados en el presente análisis económico, Además, la cantidad en masa de la tierra a procesar en cada hilera fue determinada por la densidad que posee el material y el volumen de las hileras.

3.6.13. PUNTO DE EQUILIBRIO

Es necesaria la determinación del punto de equilibrio con el fin de encontrar la cantidad mínima a procesar para considerar a cada uno de los procesos económicamente viable.

La Tabla 3.37 muestra los diferentes costos anuales que genera tratar una cierta cantidad de tierra contaminada en la hilera A, mientras que la Tabla 3.39 muestra las cantidades de suelo por tratar en la hilera B:

Tabla 3.37. Valores para determinar el punto de equilibrio económico del proceso en la hilera A

Masa de tierra por descontaminar al año (kg)	Costos fijos anuales (\$)	Costos variables (\$)	Costos totales (\$)	Ingresos (\$)
0,00	11 993,49	0,00	11 993,49	0,00
3 059,41	11 993,49	579,68	12 573,17	3 059,41
6 118,83	11 993,49	1 159,36	13 152,85	6 118,83
9 178,24	11 993,49	1 739,04	13 732,53	9 178,24
12 237,65	11 993,49	2 318,72	14 312,21	12 237,65
15 297,07	11 993,49	2 898,40	14 891,89	15 297,07
18 356,48	11 993,49	3 478,08	15 471,57	18 356,48
21 415,89	11 993,49	4 057,76	16 051,25	21 415,89
24 475,30	11 993,49	4 637,44	16 630,93	24 475,30
27 534,72	11 993,49	5 217,12	17 210,61	27 534,72
30 594,13	11 993,49	5 796,80	17 790,29	30 594,13

Tabla 3.38. Valores para determinar el punto de equilibrio económico del proceso en la hilera B

Masa de tierra por descontaminar al año (kg)	Costos fijos anuales (\$)	Costos variables (\$)	Costos totales (\$)	Ingresos (\$)
0	11 978,74	0,00	11 978,74	0,00
3 810,98	11 978,74	1 452,12	13 430,86	3 810,98
7 621,96	11 978,74	2 904,24	14 882,97	7 621,96
11 432,93	11 978,74	4 356,36	16 335,09	11 432,93
15 243,91	11 978,74	5 808,47	17 787,21	15 243,91
19 054,89	11 978,74	7 260,59	19 239,33	19 054,89
22 865,87	11 978,74	8 712,71	20 691,45	22 865,87
26 676,85	11 978,74	10 164,83	22 143,57	26 676,85
30 487,83	11 978,74	11 616,95	23 595,69	30 487,83
34 298,80	11 978,74	13 069,07	25 047,80	34 298,80
38 109,78	11 978,74	14 521,18	26 499,92	38 109,78

Con estos valores, es posible encontrar el punto de equilibrio al graficar los costos y las ventas en función de la cantidad de tierra a descontaminar al año, como se muestran en la Figura 3.24 y Figura 3.25:

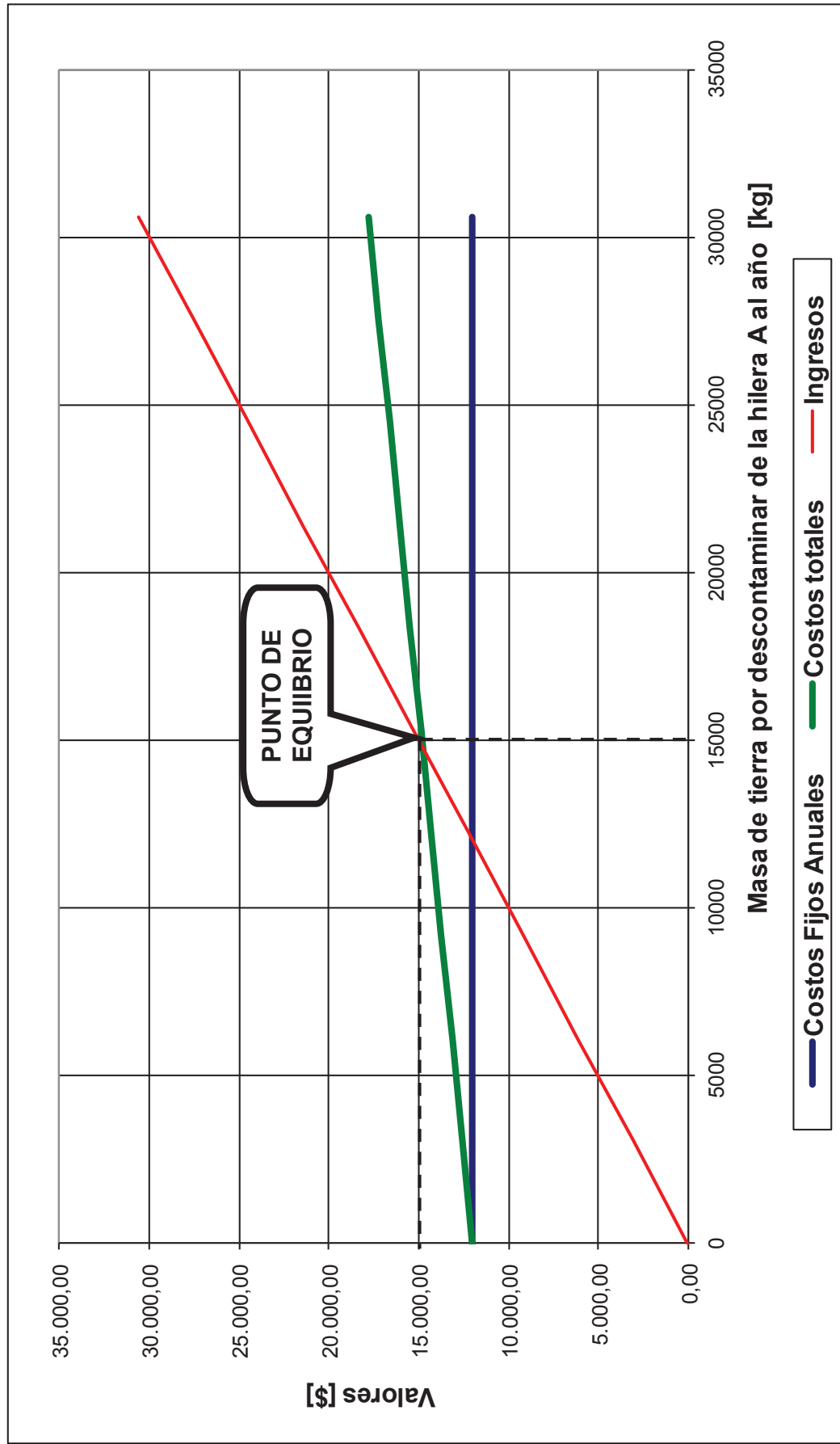


Figura 3.24. Punto de equilibrio del proceso de biodegradación en la hilera A, según la masa de tierra a descontaminar al año

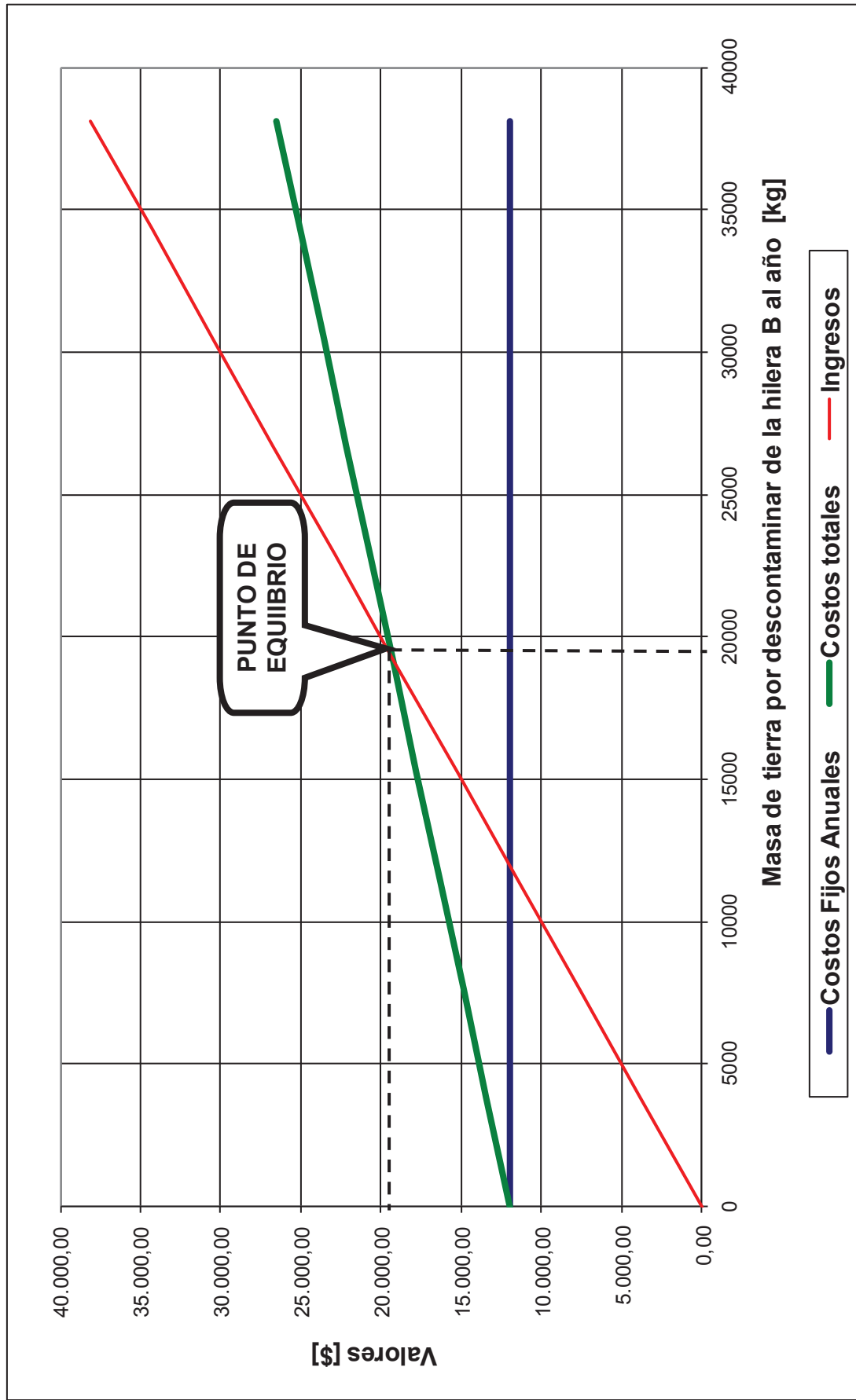


Figura 3.25. Punto de equilibrio del proceso de biodegradación en la hilera B, según la masa de tierra a descontaminar al año

El punto de equilibrio se da cuando los costos totales igualan a los ingresos; en la Figura 3.24 se puede observar que esto ocurre al tratar 15 000 kg de tierra contaminada en la hilera A y generan ingresos por \$ 15 000,00. En la Figura 3.25, el punto de equilibrio se da al tratar 19 400 kg de tierra contaminada en la hilera B y generan ingresos de aproximadamente \$ 19 400,00.

3.6.14. OTROS INDICADORES ECONÓMICOS

Otros indicadores económicos para identificar la viabilidad del proyecto es la determinación de la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN); para ello, en la Tabla 3.39 se muestra el flujo de caja para los 5 primeros años de proceso en la hilera A, mientras que en la Tabla 3.40 se muestra el flujo de caja para el mismo tiempo pero lo obtenido en la hilera B:

Tabla 3.39. Valores determinados para el flujo de caja, inversión total y TIR para la biodegradación en la hilera A

Designación	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión inicial (\$)	17 885,10	---	---	---	---	---
Ventas (\$)	---	30 594,13	30 594,13	30 594,13	30 594,13	30 594,13
(-) Costo de Producción (\$)	---	18 870,29	18 870,29	18 870,29	18 870,29	18 870,29
Flujo bruto (\$)	---	11 723,84	11 723,84	11 723,84	11 723,84	11 723,84
Flujo antes de impuestos (\$)	---	11 723,84	11 723,84	11 723,84	11 723,84	11 723,84
(-) Impuesto a la renta (\$)	---	5 275,73	5 275,73	5 275,73	5 275,73	5 275,73
Flujo después de impuestos (\$)	---	6 448,11	6 448,11	6 448,11	6 448,11	6 448,11
Flujo Acumulativo (\$)	---	- 11 436,98	- 4 988,87	1 459,25	7 907,36	14 355,47
Inversión total (\$)	17 885,10					
TIR (%)	23,51					

Tabla 3.40. Valores determinados para el flujo de caja, inversión total y TIR para la biodegradación en la hilera B

Designación	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión inicial (\$)	20 738,31	---	---	---	---	---
Ventas (\$)	---	38 109,78	38 109,78	38 109,78	38 109,78	38 109,78
(-) Costo de Producción (\$)	---	27 579,92	27 579,92	27 579,92	27 579,92	27 579,92
Flujo bruto (\$)	---	10 529,86	10 529,86	10 529,86	10 529,86	10 529,86
Flujo antes de impuestos (\$)	---	10 529,86	10 529,86	10 529,86	10 529,86	10 529,86
(-) Impuesto a la renta (\$)	---	4 738,44	4 738,44	4 738,44	4 738,44	4 738,44
Flujo después de impuestos (\$)	---	5 791,42	5 791,42	5 791,42	5 791,42	5 791,42
Flujo Acumulativo (\$)	---	- 14 946,88	- 9 155,46	- 3 364,04	2 427,38	8 218,81
Inversión total (\$)	20 738,31					
TIR (%)	12,27					

Donde, el flujo bruto (o utilidad bruta) se refiere a las ventas totales menos los costos de producción; el impuesto a la renta se refiere al porcentaje sobre las utilidades, que según los parámetros señalados en la Tabla 3.14 equivale al 45% de la utilidad bruta, esto es \$ 5 275,73 para la hilera A y \$ 4 738,44 para la B.

Se tiene un flujo de capital luego de los impuestos de \$ 6 448,11 al año, con una tasa interna de retorno del 23,51%, tal y como se mostró en la Tabla 3.39. Por su parte, en el tratamiento en la hilera B, se tiene un flujo de capital luego de los impuestos de \$ 5 791,42 anuales, con una tasa interna de retorno del 12,27%, como se indicó en la Tabla 3.40.

Por tal motivo, como se puede visualizar, el tratamiento de biodegradación por el método de landfarming al usar bacterias comerciales (AWT – B350) es más rentable que el uso de las bacterias nativas con la adición del abono como fuente de nutrientes.

Para una mejor interpretación de los resultados, la Figura 3.26 muestra la tendencia del flujo acumulado de efectivo (FDA) para la hilera A, mientras que la Figura 3.27 indica el FDA para la hilera B:

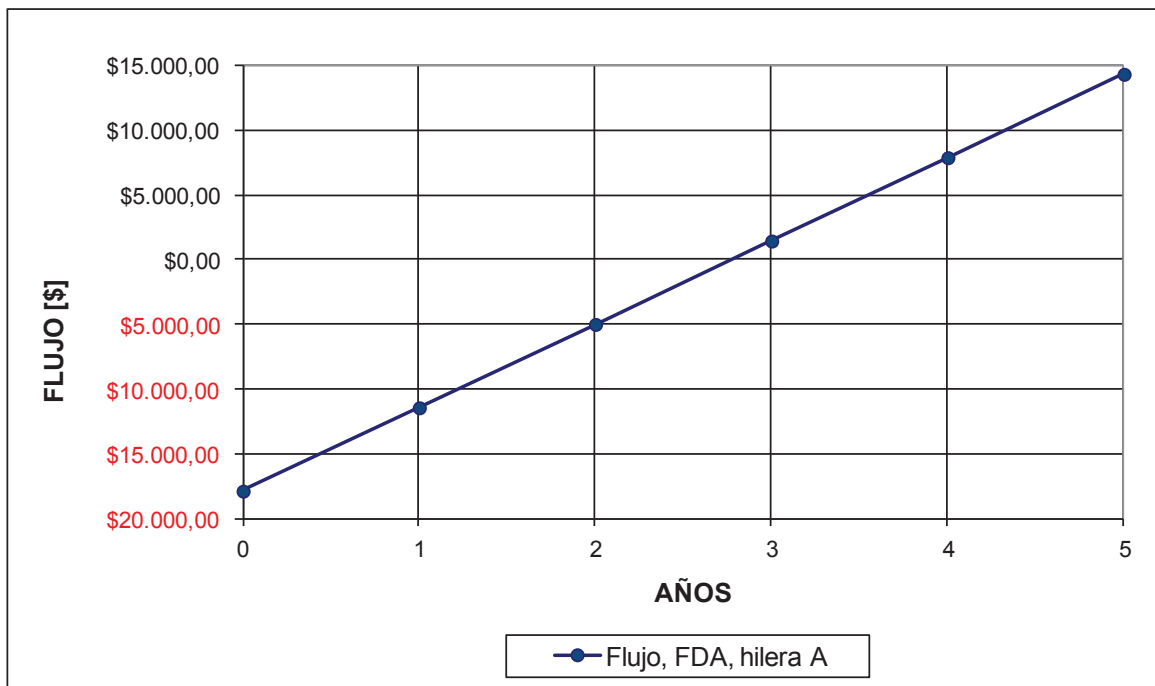


Figura 3.26. Flujo acumulado de efectivo para el proceso en la hilera A

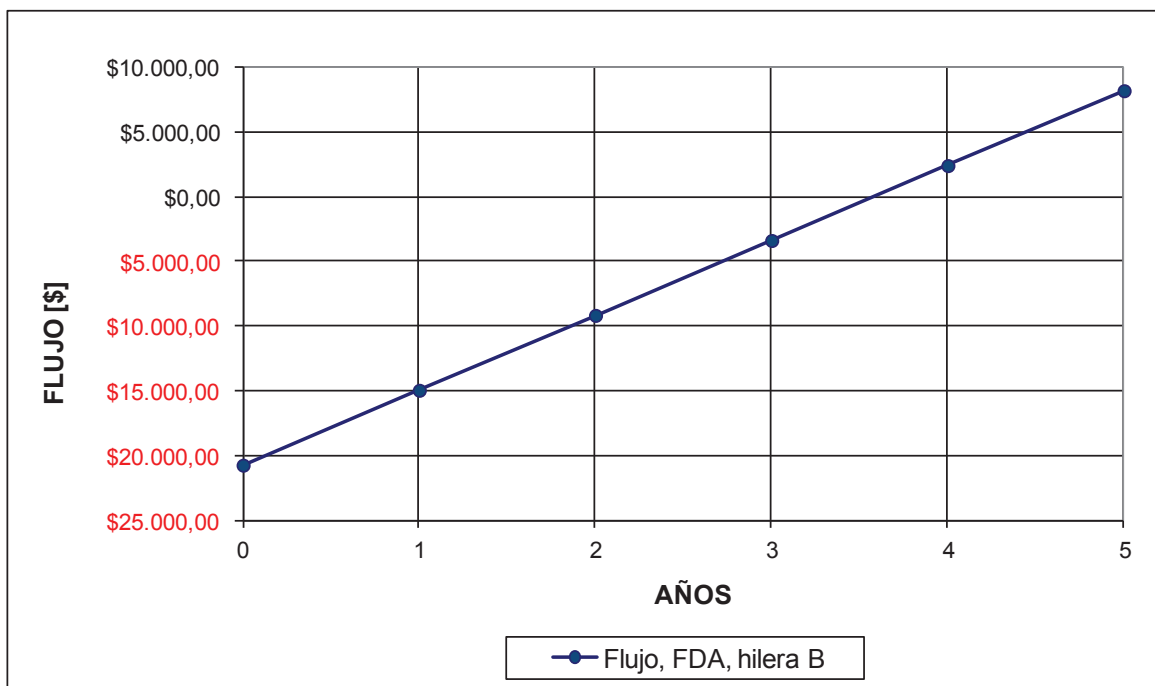


Figura 3.27. Flujo acumulado de efectivo para el proceso en la hilera B

Como se puede observar en lo obtenido de la Figura 3.26, aproximadamente al tercer año del proceso de biodegradación usando bacterias comerciales (AWT – B350) se recupera la inversión que se tiene al iniciar la investigación, esto es \$ 17 885,10; de ahí en adelante las ganancias generadas serán mayores. De igual manera, al analizar lo obtenido en la Figura 3.27, aproximadamente a mediados del cuarto año de iniciado el proceso de biodegradación usando bacterias nativas y el abono elaborado, se recupera la inversión de \$ 20 738,31.

Finalmente, en la Tabla 3.41 se presentan los valores de la utilidad neta anual para la hilera A, en función de los parámetros antes mencionados; y en la Tabla 3.42 se indica la utilidad neta generada en la hilera B:

Tabla 3.41. Utilidad neta anual generada en el proceso de la hilera A

Designación	Valor (\$)	Porcentaje sobre ventas (%)
<u>Ventas</u>	30 594,13	100,00
(-) Costos de producción	18 870,29	61,68
Utilidad bruta por ventas	11 723,84	38,32
(-) Gastos por ventas	0,00	0,00
Utilidad neta por ventas	11 723,84	38,32
(-) Gastos de administración	0,00	0,00
Utilidad bruta en operaciones	11 723,84	38,32
(-) Impuesto a la renta	5 275,73	17,24
Utilidad neta en operaciones	6 448,11	21,08

Tabla 3.42. Utilidad neta anual generada en el proceso de la hilera B

Designación	Valor (\$)	Porcentaje sobre ventas (%)
<u>Ventas</u>	38 109,78	100,00
(-) Costos de producción	27 579,92	72,37
Utilidad bruta por ventas	10 529,86	27,63
(-) Gastos por ventas	0,00	0,00
Utilidad neta por ventas	10 529,86	27,63
(-) Gastos de administración	0,00	0,00
Utilidad bruta en operaciones	10 529,86	27,63
(-) Impuesto a la renta	4 738,44	12,43
Utilidad neta en operaciones	5 791,42	15,20

Como se puede observar en la Tabla 3.41, el proceso de biodegradación usando bacterias comerciales (AWT – B350) genera una utilidad neta anual de \$ 6 448,11, que equivale al 21,08 % del total de las ventas, es decir, de los ingresos obtenidos por biodegradar la tierra contaminada con hidrocarburos.

Mientras tanto, como se muestra en la Tabla 3.42, la biodegradación usando bacterias nativas y el abono elaborado genera una utilidad neta anual de \$ 5 791,42, equivalente al 15,20 % del total de las ventas generadas al usar este tipo de proceso.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

1. La tierra con la que se trabajó contuvo 64,85 % de partículas finas (limo y arcilla), por lo que se la consideró como un suelo cohesivo, con alta retención de agua y baja permeabilidad. El 35,15 % restante correspondió a partículas gruesas provenientes de grava y arena.
2. En la hilera A se biodegradó 10,20 Ton de tierra contaminada con hidrocarburos al usar las bacterias comerciales AWT – B350, mientras que en la hilera B se logró tratar 12,70 Ton, al usar un abono orgánico elaborado con cascarilla de arroz y estiércol de ganado.
3. La humedad del suelo se mantuvo en los rangos establecidos para una biodegradación por el método de landfarming (entre 12 y 30 %), y fue más notoria la humedad de la hilera A, puesto que para este proceso no se colocó un agente esponjante como cascarilla de arroz, por recomendación del proveedor.
4. El pH de la tierra proveniente de las muestras de las hileras A y B se mantuvieron entre 7,0 y 8,0; por lo tanto, el proceso se desarrolló bajo las condiciones recomendadas para la biodegradación por el método de landfarming y no fue necesaria la adición de sustancias que permitan regular el pH hasta dichos valores.
5. La tierra contaminada tuvo una relación NPK de: 3,20:0,01:10,00, por tal motivo, fue necesaria la adición a la hilera B de 900 kg de abono, hecho con 534 kg de cascarilla de arroz y 102 kg de estiércol de ganado, con lo que se llegó a obtener una relación NPK de 30,00:6,03:25,33; además no fue necesaria la adición de fósforo a la tierra de esta hilera puesto que las bacterias se desarrollaron con normalidad. A la tierra de la hilera A no fue

necesaria ninguna adición de nutrientes, puesto que el proveedor de las bacterias comerciales AWT – B350 indicó que dichas bacterias se desarrollan bajo cualquier condición de suelo.

6. Las principales bacterias presentes en las muestras de tierra fueron del tipo *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus cereus*, este tipo de m/o fueron las principales fuentes de biodegradación, ya que además la tierra presentó alto contenido de hongos y levaduras, que se evidenció al momento de la siembra para la identificación de ufc/g.
7. La relación C:N en la tierra de la hilera B fue de 45,14:1,00, superior a lo recomendado por fuentes bibliográficas. Tampoco fue necesaria la adición de nitrógeno, ya que el crecimiento microbiano se desarrolló dentro de los parámetros establecidos para una adecuada biodegradación.
8. La temperatura ambiente monitoreada estuvo dentro de los valores mínimo (20 °C) y máximo (50 °C) recomendados, se trabajó cerca a la temperatura ambiente óptima para crecimiento bacteriano que es de 30 °C. Para ello, fue muy importante tapar las hileras con la geomembrana por las noches, ya que temperatura ambiente osciló entre valores de 22 °C y 40 °C.
9. La humedad relativa del lugar donde se desarrolló el proyecto fue muy variada y presentó oscilaciones muy marcadas, ya que los valores estaban entre 20 % y 98 %, debido a que se trabajó en Shushufindi que, al igual que todo el Oriente ecuatoriano, se caracteriza por tener una humedad relativa alta. Este parámetro permitió tener una idea de las precipitaciones que tuvo la zona; y éste si es un parámetro importante ya que el exceso de agua puede lavar la tierra contaminada y arrastrar las bacterias presentes en las hileras.
10. Tanto en la hilera A como en la hilera B, la concentración de bacterias presentes estuvieron sobre los valores recomendados para la

biodegradación por el método de landfarming ($1,0E+05$ ufc/g). Por tal motivo, por un lado se comprueba experimentalmente la eficiencia de las bacterias comerciales AWT – B350, ya que se adaptaron fácilmente al medio en las que se mantuvieron; y por otro lado, no fue necesaria la adición de mayor cantidad de nutrientes en la hilera B, ya que las bacterias presentes en dicha hilera se desarrollaron con normalidad, aunque su concentración fue menor que en la hilera A.

11. El análisis de C_{ag} permitió tener una medida indirecta del consumo de hidrocarburos presentes en las tierras a biodegradar. Su decrecimiento del contenido de AyG fue exponencial y a los 109 días de iniciado el proceso la bidegradación ya fue más limitada.
12. La C_{ag} de las muestras de la hilera B son mayores a las de la hilera A, ya que en la hilera A se trabajó con bacterias especializadas en degradar hidrocarburos, mientras que en la hilera B se trabajó con bacterias que se acoplaron a degradar los hidrocarburos.
13. Se cumplió con el objetivo de biodegradar los suelos contaminados con hidrocarburos desde 16 230 ppm de TPH hasta valores que cumplan lo que exige el RAOHE que es 4 000 ppm para suelos industriales, tanto en la hilera A (3 170 ppm) como en la hilera B (3 736 ppm).
14. La muestra original presentó 16 cadenas de hidrocarburos lineales diferentes, se inició en dodecano (12 carbonos) hasta tricosano (23 carbonos). Conforme avanzó el proceso de biodegradación, algunas de las cadenas desaparecieron por completo y otras llegaron a disminuir en su concentración, se llegó a tener al final del proceso solo 4 cadenas de hidrocarburos lineales diferentes: n-Hexadecano, n-Heptadecano, n-Nonadecano y n-Eicosano.
15. Las muestras de la hilera A y B cumplen desde un inicio con la normativa ambiental que exige el RAOHE para suelos contaminados con

hidrocarburos para uso industrial en la concentración de los siguientes metales pesados: cadmio, plomo y níquel. Por tal motivo, las muestras tomadas a la mitad del proceso también lo cumplen y como consecuencia no se analizó la concentración de los metales antes mencionados al final del proceso.

16. Tanto en la tierra de la hilera A como de la hilera B, existió variación en la concentración de los metales pesados: cadmio, plomo y níquel a lo largo del proceso de biodegradación. Esta variación se debió a la movilidad existente en la tierra, a la volatilización a la atmósfera y/o al arrastre en los lixiviados debido a que pueden generarse sales solubles en agua.
17. Se recolectaron 1 325,10 litros de lixiviados de la hilera A con una concentración de TPH de 1,0 mg/l, mientras que para la hilera B se recolectaron 830,03 litros de lixiviados con una concentración de TPH de 0,4 mg/l. Con ello se dispuso que los lixiviados generados sean utilizados como material de construcción.
18. Dada las concentraciones de TPH de los suelos contaminados por hidrocarburos y de los lixiviados de los procesos desarrollados en las hileras A y B, los cuales cumplen con las regulaciones que exige el RAOHE (< 4 000 ppm de TPH para suelos y < 20 mg/l de TPH para lixiviados), la disposición que se dio para los suelos y el agua fue de base para construcciones que se efectúan en las instalaciones de INCINEROX, ésta solo una alternativa ya que se pudo dar cualquier solución para los materiales antes mencionados.
19. El desarrollo del presente proyecto tuvo diversos costos tanto de materia prima, materiales indirectos, equipos y muebles, terreno y construcciones, suministros, maquinaria y equipos; los cuales estuvieron a cargo de un jefe de proceso y dos operadores, uno para cada hilera. El mayor porcentaje de los costos de operación para la hilera A es para la mano de obra directa del personal con un 58,31 % del total, mientras que para la

hilera B se tiene distribuido entre la mano de obra (con el 39,90 % del total) y los materiales directos que fueron la cascarilla de arroz y estiércol de ganado (con el 34,39 % del total).

20. En lo referido a la inversión de capital, el mayor porcentaje tanto para la hilera A como para la hilera B, se da en la adquisición del terreno y las construcciones para bodega, vivienda para los trabajadores y oficina, esto es de \$ 10 000,00 para cada hilera. Estos valores corresponden al 55,91 % de la inversión total (\$ 17 885,10) en la hilera A; y al 48,22 % de la inversión total (\$ 20 738,31) en la hilera B.
21. Se ha considerado un precio para el proceso de biodegradación por el método de landfarming, tanto en la hilera A como en la hilera B, de \$ 1,00 por cada kg de suelo a tratar. Con ello, para el análisis económico del proceso en la hilera A, se obtiene una tasa interna de retorno del 25,51 % y una utilidad neta en operaciones de \$ 6 448,11 anuales; mientras que para la hilera B se tiene una tasa interna de retorno del 12,27 % con una utilidad neta en operaciones de \$ 5 791,42 anuales.
22. Con el uso de baterías comerciales AWT – B350 se mejoró el proceso de biodegradación puesto que los valores de concentración de TPH obtenidos fueron menores a los obtenidos con el uso del abono; además, es más rentable el uso de las bacterias comerciales, ya que generan una menor inversión en el proyecto.

4.2. RECOMENDACIONES

1. A pesar de que varios autores recomiendan el uso de invernaderos para el control de la temperatura y evitar el ingreso excesivo de agua de lluvia, no se recomienda su uso para la zona donde se desarrolló el proyecto, ya que las excesivas lluvias que se tienen en el Oriente ecuatoriano pueden destruir el invernadero.

2. Se recomienda el uso de bacterias comerciales para la biodegradación, puesto que son más eficientes y el proceso es económicamente más rentable que si se usan las bacterias nativas con la adición del abono.
3. Es recomendable disponer de una gran extensión de terreno para la adecuada disponibilidad de las actividades de biodegradación, tal y como se dispuso para el desarrollo de este proyecto.
4. Se recomienda el uso de un agente esponjante para el suelo el que se encuentre en mayor cantidad en la zona donde se desee realizar el proyecto, para evitar incrementar costos de transporte del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Albán, M. A., Barragán, M. D., Bedón, R. C., Crespo, R. L., Echeverría, H. J., Hidalgo, M. E., Muñoz, G. V. y Suárez, S. M. (2011). Ecuador Ambiental 1996-2011 – Un recorrido propositivo. *Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental* (1), 1-138.
2. Alfonso, J. A. y Posadas, E. B., (2010). *ELABORACIÓN DE ABONO ORGÁNICO*. Recuperado de <http://www.gotaverde.org/userfiles/file/D17i%20-%20FHIA%20Manual%20Elaboracion%20de%20abono%20organico%20a%20partir%20de%20cascarrilla%20de%20pinon.pdf> (Diciembre, 2010).
3. Alloway, B., (1995). *The Mobilization of Trace Elements in Soils* (sin edición). París, Francia: INRA.
4. Almeida, A., (2008). *Derrame de petróleo en la reserva Cuyabeno - Ecuador*. Recuperado de http://www.alisupay.org/web/index.php?option=com_content&task=view&id=65&Itemid=2.pdf (Abril, 2013).
5. Almeida, A., (2010). *Reseña sobre la historia ecológica de la Amazonía ecuatoriana*. Recuperado de http://www.amazoniaporlavida.org/es/files/descargas/ecuador_post_petroero.pdf (Abril, 2013).
6. APHA 5520 B, (1997). *5520 B. Partition-Gravimetric Method*. Recuperado de http://www.norweco.com/html/lab/test_methods/5520bfp.pdf (Febrero, 2011).
7. Arroba, E. (2009). Investigaciones a OCP y SOTE. *Universidad de Especialidades Espíritu Santo Guayaquil*. 1 (1), 1-51.

8. ASTM, (2004). *ASTM D2976 - 71(2004) Standard Test Method for pH of Peat Materials*. Recuperado de <http://enterprise1.astm.org/DOWNLOAD/D2976.1093127-1.pdf> (Septiembre, 2012).
9. ASTM, (2009). *ASTM D2488 - 09a Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)*. Recuperado de <http://enterprise1.astm.org/DOWNLOAD/D2488.1093127-1.pdf> (Septiembre, 2012).
10. ASTM, (2012). *ASTM C127 - 12 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. Recuperado de <http://enterprise1.astm.org/DOWNLOAD/C127.1093127-1.pdf> (Septiembre, 2012).
11. Atlas, R. y Bartha R., (2002). *Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental* (cuarta edición). Madrid, España: Pearson Educación.
12. Barrios, Y. (2011). Biorremediación: una herramienta para el saneamiento de ecosistemas marinos contaminados con petróleo. *Biotecnología Aplicada*, 28(2), 60-68.
13. Benavides, J. L. (2005). Efecto de la adición de fertilizantes inorgánicos (nitrógeno y fósforo) sobre la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados con petróleo en mesocosmos. *Revista científica de la Universidad de La Salle, Bogotá, D.C., Colombia*, 5 (2), 247-258.
14. BP Statistical Review of World Energy, (2011). *Flujos comerciales de petróleo en el mundo para el año 2010*. Recuperado de <http://www.foronuclear.org/minisite/energia2012/cap.4/04.15.htm> (Diciembre, 2012).
15. Bravo, E., (2007). *Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad*. Recuperado de

http://www.inredh.org/archivos/documentos_ambiental/impactos_explotacion_petrolera_esp.pdf (Diciembre, 2012), 1-61.

16. Buduba, C. (2004). Muestreo de suelos, criterios básicos. *Patagonia Forestal*(1), 9-12.
17. Buesa, M. (1981). *Bacillus cereus*: epidemiología, patogenicidad y patogenia. *Revista Cubana de Medicina Tropical*. 33 (2), 121-127.
18. Caiza, M. (2012). *Tratamiento biológico de lodos de limpieza procedentes de los fondo de los tanques de crudo, residuos y combustibles blancos de la Refinería La Libertad*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
19. Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América A. C. – CICEANA, (2010). *El Petróleo*. Recuperado de <http://www.ciceana.org.mx/recursos/Petroleo.pdf> (Diciembre, 2012).
20. Chaîneau, C., Morel, H, y Oudot, J. (1995). Microbial degradation in soil and water microcosmos of fuel oil hydrocarbons from drilling cuttings. *Env. Sci. Technol.* 29 (3), 1615-1621.
21. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial del Gobierno de Canarias. (2005). Biorremediación. *Plan específico de contaminación marina accidental de Canarias (PECMAR)*, 3(10), 1-22.
22. Domènech, X. y Peral, J., (2006). *Química Ambiental de Sistemas Terrestres* (primera edición). Barcelona, España: Revereté.
23. Dubois, R. A., (2005). *Introducción a la refinación del petróleo: Su historia, la tecnología y su desarrollo, los productos y sus mercados, combustibles*

alternativos, su economía (primera edición). Buenos Aires, Argentina: Eudeba.

24. EP Petroecuador, (2010). *El petróleo en Ecuador*. Recuperado de <http://www.eppetroecuador.ec/idc/groups/public/documents/archivo/001138.pdf> (Diciembre, 2012).
25. EP Petroecuador, (2012). *Informe cifras petroleras período Enero – Septiembre 2011*. Recuperado de <http://www.eppetroecuador.ec/idc/groups/public/documents/archivo/001133.pdf> (Diciembre, 2012).
26. EPA, (1999). *Residue, Total (Gravimetric, Dried at 103-105°C)*. Recuperado de <http://www.caslab.com/EPA-Methods/PDF/EPA-Method-1603.pdf> (Enero, 2011).
27. Evans M. y Fuchs J. (1988). Persistence of oiling in mussel beds after the Exxon Valdez oil spill. *Marine Environmental Research*, 51 (2), 167-190.
28. Eweis, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P. y Schroeder, E. D., (1999). *Principios de Biorrecuperación* (primera edición). Madrid, España: Mc Graw Hill.
29. Figueredo, H. A. y Giovagnoli, F. A., (2006). *Aire Húmedo*. Recuperado de <http://www.frsn.utn.edu.ar/frsn/departamentos/mecanica/subircat/images%5C177%5CAire%20H%C3%BAmedo.pdf> (Enero, 2013).
30. Fuenmayor, S. y Rodríguez, V. (1992). Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons degradative soil Pseudomonas. *Acta Científica Venezolana*. 43 (4), 349-354.
31. García, I., Dorronsoro, C., (2005). *Contaminación por metales pesados*. Recuperado de <http://edafologia.ugr.es/conta/tema15/introd.htm> (Agosto, 2013).

32. Govan J. y Deretic V. (1996). Microbial pathogenesis in cystic fibrosis: mucoid *Pseudomonas aeruginosa* and *Burkholderia cepacia*. *Microbial rev.* 60 (1), 539-574.
33. Guaranda, W., (2009). *Explotación petrolera en el Ecuador*. Recuperado de <http://www.inredh.org/archivos.pdf> (Abril, 2013).
34. Guaranda, W., (2010). *Acciones judiciales por derrames de petróleo*. Recuperado de http://www.inredh.org/index.php?option=com_content&view=article&id=151%3Aac.pdf (Abril, 2013).
35. Incinerox Cia. Ltda. (2010). "Datos proporcionados por el Ing. Pedro Mantilla, Jefe Comercial de INCINEROX".
36. Irañeta, J. P., Sánchez, L. M., Malumbres, A. C., Torrecilla, J. F. y Díaz, E. M., (2010). *Abonos: Tipos y usos*. Recuperado de <http://www.navarraagraria.com/n185/arvulne3.pdf> (Febrero, 2011).
37. López C., (2002). *El petróleo: el recorrido de la energía* (primera edición). Madrid, España: E.I.S.E. Domènech, S.A..
38. Madigan, M. T., Martinko, J. M. y Parker, J., (2003). *Brock, Biología de los microorganismos* (décima edición). Madrid, España: Pearson Prentice Hall.
39. Manacorda, A. M. y Cuadros D. A., (2005). *Microbiología Ambiental: Técnicas de Remediación Biológicas*. Recuperado de http://faciasweb.uncoma.edu.ar/academica/materias/microbiologia_ambiental/tecnicas_de_remediacion_biologicas.pdf (Enero, 2013).

40. Martín, V. J., García, F. M. y Maza, A. J. (2006). *Ingeniería de ríos: Origen y propiedades de los sedimentos* (segunda edición). Barcelona, España: UPC.
41. Molina, T., Robles, L., (2012). *Quinto derrame de hidrocarburos en Ecuador en el 2012*. Recuperado de <http://www.oilwatch.org/doc/paises/ecuador/ecuadorderrames2012.pdf> (Abril, 2013).
42. Monroy, C. (2008). Tecnología Industrial: El Petróleo. *IES* (1), 1-8.
43. Montenegro, L. (1996). *Tratamiento de derrames de petróleo en suelos*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
44. Muñoz, R. y Muñoz F., (2004). *Nomenclatura de Química Orgánica* (primera edición). Quito, Ecuador: Casa del Estudiante.
45. Murray, P., Baron, M., Pfaller, F., (1995). *Brock, Manual of Clinical Microbiology* (sexta edición). Washington D.C., Estados Unidos: Tenover & R.H.Yolken.
46. Noboa, G. (2001). *Reglamento Sustitutivo del Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador*. Capítulo XII – Límites permisibles, Art. 86 – Parámetros, Anexo 2, Tabla 6, Decreto No. 1215, publicado en el Registro Oficial No. 265.
47. Novo, R., (2003). *Manual de Microbiología Agrícola*. (sin edición). La Habana, Cuba.
48. Obando, G., Trujillo, B., Aguilar, R., (1992). *ECOLOGÍA POLITICA DE CUYABENO: El desarrollo no sostenible de la Amazonia* (primera edición). Quito, Ecuador: ABYA-YALA.

49. Perry, R. H., Green, D. W. y Maloney, J. O., (2001). *Manual del Ingeniero Químico: Volumen I* (cuarta edición en español). Madrid, España: Mc Graw Hill.
50. Pope, L. R. y Ward, Ch. W., (1998). *MANUAL ON TEST SIEVING METHODS* (cuarta edición). West Conshohocken, Estados Unidos de Norte América: ASTM.
51. Proskuriakov, V. A. y Dabkin, A. E., (1984). *Química del petróleo y del gas* (sin edición). Moscú, Rusia: Mir Moscú.
52. Riser, E., (1992). *Bioremediation of petroleum contaminated sites* (primera edición). Washington D. C., Estados Unidos: C.K. SMOLEY.
53. Roberts, T. L., (2009). *Breves Agronómicas: El estiércol, almacén de nutrientes para las plantas*. Recuperado de [http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/\\$webindex/EB95D4ED6A97949506256AE80060EB08/\\$file/Breves+El+Estiercol.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/$webindex/EB95D4ED6A97949506256AE80060EB08/$file/Breves+El+Estiercol.pdf) (Febrero, 2011).
54. Rodríguez, J. L. y Sánchez, J. M. (2003). Industria y Minería - Biorremediación: Fundamentos y aspectos microbiológicos; Aspectos tecnológicos y aplicación al vertido del Prestige. *Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas* (351), 12-21.
55. Romero, S. (2010). *Propuesta de desarrollo del agroturismo para uso de suelos biorremediados, en el Campo Sacha, provincia de Sucumbíos, por Pepda-Petroproducción*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Agroindustrial no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
56. Sauquillo, A., Rigol, A. y Rauret, G., (2003). Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in

- contaminated soils and sediments. *Trends in Analytical Chemistry*, (22), 152-159.
57. Schmidt, W., (2005). *Suelos contaminados con hidrocarburos: la biorremediación como una solución ecológicamente compatible*. Recuperado de <http://www.uhu.es/masteria/master/material/405.pdf> (Octubre, 2010).
 58. Soltani A., Schowe L., Koenig K., Lloyd J., Meltzer D. (2001). El nuevo oleoducto de crudos pesados en Ecuador. *Amazon Watch Alerta de Mega-Proyectos* (1), 1-16.
 59. Vian A. D., (impresión digital 2006). *Introducción a la química industrial* (sin edición). Barcelona, España: Reverté.
 60. Vogliano, S. (2009). Conflictos Socioecológicos, Combustibles fósiles: Ecuador – Extracción petrolera en la Amazonia. *FUHEM* (22), 1-6.
 61. Wauquier, J. P., (2004). *El refino del petróleo* (sin edición). Madrid, España: Diaz de Santos.
 62. Weemaels, N., (2002). *Erupción reventador afecta OCP*. Recuperado de <http://www.accionecologica.org/petroleo/crudos-pesados/ocp/184-erupcion-reventador-afecta-ocp.pdf> (Abril, 2013).
 63. Weemaels, N., (2003). *Derrame SOTE en Papallacta*. Recuperado de <http://www.accionecologica.org/petroleo/crudos-pesados/ocp/181-derrame-sote-en-papallacta.pdf> (Abril, 2013).
 64. Zambrano, M. (2002). *Tratamiento biológico de los lodos depositados en los tanques de almacenamiento de combustibles en el terminal El Beaterio*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

ANEXOS

ANEXO I

FICHA TÉCNICA DE LAS BACTERIAS AWT – B350

AWT 1972

Aguas y Suelos contaminados con Hidrocarburos

B 350

B350 es un compuesto de microorganismos premezclados con todos los nutrientes necesarios para su uso inmediato en remediación de suelos y tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos y otros elementos orgánicos.

Para asegurar un desempeño óptimo de estos organismos bajo las más duras condiciones, son producidos y mezclados con nutrientes y estimulantes de "alta potencia".

B350 contiene organismos que degradarán un amplio rango de hidrocarburos, incluyendo: gasolina, diesel, petróleo, benceno, tolueno, etilbenceno, y xileno, tanto en suelos como en aguas residuales de procesos petroquímicos.

Por supuesto, todos los requerimientos variarán, dependiendo del suelo, las condiciones climáticas (humedad, temperatura, cantidad de lluvias), población bacteriana indígena, contaminantes involucrados, la concentración de esos contaminantes y la cantidad de tiempo permitida para limpiar el sitio.

Los beneficios que B350 ofrece son:

- Limpia profundamente suelos contaminados
- Aumenta los procesos naturales
- Elimina áreas antiestéticas
- Reduce DBO y DQO
- Reduce los costos de remediación
- Reduce depósitos de petróleo en tanques, alcantarillas, drenes y tanques de aireación.
- Acelera la ruptura de olores desagradables

Sitios de aplicación

- Suelos contaminados con HC
- Plantas de aguas residuales
- Drenes, desagües y tuberías
- Lagunas aerobias, anaerobias y facultativas

Especificaciones

Presentación **B**
 Color Azul o Café
 Nutrientes Biológicos y estimulantes
 No. Bacterias 7 billones por gramo
 No. Cepas 8

Condiciones de trabajo

pH 6-9
 Temperatura Hasta 50° C

Presentación

Fundas de 1 lb.
 Baldes de 20 lbs.

Abra el paquete y agregue las fundas de plástico soluble en agua, directamente en el sistema.

Dosificación

Plantas de Tratamiento

Caudal	Dosis inicial	Mantenimiento
Hasta 5.000 gpd	1.5 lbs	0.5 lbs / semana
Hasta 10.000 gpd	3 lbs	1 lb / semana
Hasta 20.000 gpd	5 lbs	1.5 lbs / semana
Hasta 50.000 gpd	7 lbs	2 lbs / semana
Hasta 100.000 gpd	10 lbs	3 lbs / semana
Hasta 200.000 gpd	15 lbs	4 lbs / semana

Tuberías, drenes y desagües

Diluir 1/2 libra en 20 litros de agua y luego dosificar 100 ml de la solución por cada 100 mm de diámetro de la tubería, dren o desagüe, todos los días.

Suelos Contaminados con HC

1 libra por cada metro cuadrado

Lagunas

Aerobias
 Igual que en plantas de tratamiento

Facultativas

Dosis inicial	Mantenimiento
20 lbs* durante 3 días	2 lbs* / día

*Por cada 5.000 m² de superficie

Anaerobias

<100.000 galones 1 lb, 2x por semana por 5.000 gal.
 >100.000 galones ½ lb, 1x por día por 5.000 gal.

10

Figura AI.1. Ficha técnica de las bacterias comerciales AWT – B350 utilizadas para la biodegradación en la hilera A

ANEXO II

DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD EN LA TIERRA CONTAMINADA CON HIDROCARBUROS

Al aplicar la Ecuación [2.5], para la determinación de la humedad presentes en las muestras de las hileras A y B, se obtuvieron los siguientes resultados parciales:

Tabla AII.1. Humedad de la tierra de la hilera A durante el proceso de biodegradación

Fecha	Día	Muestra	% Humedad	Promedio	Promedio Total ¹ (%)
12/02/2011	4	A1 - 1	28,53	27,89	25,92 ± 2,94
		A1 - 2	27,24		
		A2 - 1	27,81	27,93	
		A2 - 2	28,05		
		A3 - 1	21,24	21,43	
		A3 - 2	21,62		
		A4 - 1	25,19	26,42	
		A4 - 2	27,65		
28/02/2011	20	A1 - 1	25,29	22,82	26,37 ± 3,00
		A1 - 2	20,36		
		A2 - 1	24,77	25,70	
		A2 - 2	26,63		
		A3 - 1	26,77	27,47	
		A3 - 2	28,17		
		A4 - 1	29,73	29,50	
		A4 - 2	29,27		

¹ $\bar{X} \pm \sigma$ (n = 4)

Tabla AII.1. Humedad de la tierra de la hilera A durante el proceso de biodegradación
(Continuación)

Fecha	Día	Muestra	% Humedad	Promedio	Promedio Total ¹ (%)
14/03/2011	34	A1 - 1	23,32	27,07	25,03 ± 2,82
		A1 - 2	30,82		
		A2 - 1	26,74	25,60	
		A2 - 2	24,46		
		A3 - 1	23,09	22,83	
		A3 - 2	22,57		
		A4 - 1	26,31	24,63	
		A4 - 2	22,94		
29/03/2011	49	A1 - 1	26,69	24,25	24,59 ± 2,09
		A1 - 2	21,82		
		A2 - 1	21,75	22,82	
		A2 - 2	23,90		
		A3 - 1	24,67	24,50	
		A3 - 2	24,33		
		A4 - 1	26,40	26,77	
		A4 - 2	27,15		
14/04/2011	65	A1 - 1	26,18	27,22	27,88 ± 0,99
		A1 - 2	28,26		
		A2 - 1	29,37	28,98	
		A2 - 2	28,60		
		A3 - 1	27,55	28,02	
		A3 - 2	28,49		
		A4 - 1	27,33	27,31	
		A4 - 2	27,30		

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 4)

Tabla AII.1. Humedad de la tierra de la hilera A durante el proceso de biodegradación
(Continuación)

Fecha	Día	Muestra	% Humedad	Promedio	Promedio Total ¹ (%)
28/04/2011	79	A1 - 1	25,43	28,63	27,65 ± 4,10
		A1 - 2	31,83		
		A2 - 1	19,63	24,47	
		A2 - 2	29,31		
		A3 - 1	24,84	28,17	
		A3 - 2	31,49		
		A4 - 1	29,45	29,34	
		A4 - 2	29,24		
13/05/2011	94	A1 - 1	25,23	26,62	27,06 ± 1,24
		A1 - 2	28,01		
		A2 - 1	25,21	26,15	
		A2 - 2	27,10		
		A3 - 1	26,81	27,55	
		A3 - 2	28,28		
		A4 - 1	27,81	27,93	
		A4 - 2	28,05		
28/05/2011	109	A1 - 1	24,35	24,15	25,91 ± 2,05
		A1 - 2	23,94		
		A2 - 1	24,95	24,61	
		A2 - 2	24,27		
		A3 - 1	27,54	27,99	
		A3 - 2	28,44		
		A4 - 1	24,84	26,91	
		A4 - 2	28,98		

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 4)

Tabla AII.1. Humedad de la tierra de la hilera A durante el proceso de biodegradación
(Continuación)

Fecha	Día	Muestra	% Humedad	Promedio	Promedio Total ¹ (%)
14/06/2011	126	A1 - 1	22,36	22,58	25,96 ± 2,44
		A1 - 2	22,80		
		A2 - 1	27,08	27,51	
		A2 - 2	27,95		
		A3 - 1	29,18	27,84	
		A3 - 2	26,50		
		A4 - 1	27,11	25,90	
		A4 - 2	24,69		

¹ $\bar{X} \pm \sigma$ (n = 4)

Tabla AII.2. Humedad de la tierra de la hilera B durante el proceso de biodegradación

Fecha	Día	Muestra	% Humedad	Promedio	Promedio Total ¹ (%)
12/02/2011	4	B1 - 1	25,74	24,66	22,66 ± 1,67
		B1 - 2	23,58		
		B2 - 1	20,67	20,67	
		B2 - 2	20,66		
		B3 - 1	23,02	22,60	
		B3 - 2	22,18		
		B4 - 1	23,34	22,72	
		B4 - 2	22,11		

¹ $\bar{X} \pm \sigma$ (n = 4)

Tabla AII.2. Humedad de la tierra de la hilera B durante el proceso de biodegradación
(Continuación)

Fecha	Día	Muestra	% Humedad	Promedio	Promedio Total ¹ (%)
28/02/2011	20	B1 - 1	14,90	16,13	20,48 ± 3,83
		B1 - 2	17,35		
		B2 - 1	17,84	18,36	
		B2 - 2	18,89		
		B3 - 1	26,29	24,91	
		B3 - 2	23,52		
		B4 - 1	21,89	22,51	
		B4 - 2	23,12		
14/03/2011	34	B1 - 1	21,66	22,93	24,10 ± 1,39
		B1 - 2	24,20		
		B2 - 1	24,02	23,28	
		B2 - 2	22,54		
		B3 - 1	24,89	25,36	
		B3 - 2	25,83		
		B4 - 1	24,32	24,83	
		B4 - 2	25,33		
29/03/2011	49	B1 - 1	23,45	19,51	22,56 ± 3,27
		B1 - 2	15,57		
		B2 - 1	21,08	21,67	
		B2 - 2	22,26		
		B3 - 1	25,82	24,52	
		B3 - 2	23,22		
		B4 - 1	25,92	24,52	
		B4 - 2	23,13		

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 4)

Tabla AII.2. Humedad de la tierra de la hilera B durante el proceso de biodegradación
(Continuación)

Fecha	Día	Muestra	% Humedad	Promedio	Promedio Total ¹ (%)
14/04/2011	65	B1 - 1	19,38	20,71	22,67 ± 1,74
		B1 - 2	22,05		
		B2 - 1	21,48	21,87	
		B2 - 2	22,25		
		B3 - 1	24,72	24,27	
		B3 - 2	23,81		
		B4 - 1	23,49	23,84	
		B4 - 2	24,18		
28/04/2011	79	B1 - 1	23,82	23,35	22,68 ± 2,02
		B1 - 2	22,87		
		B2 - 1	21,19	21,77	
		B2 - 2	22,35		
		B3 - 1	19,37	22,84	
		B3 - 2	26,31		
		B4 - 1	22,22	22,78	
		B4 - 2	23,34		
13/05/2011	94	B1 - 1	17,52	18,47	23,08 ± 3,02
		B1 - 2	19,42		
		B2 - 1	25,74	24,66	
		B2 - 2	23,58		
		B3 - 1	23,97	24,98	
		B3 - 2	25,99		
		B4 - 1	24,68	24,21	
		B4 - 2	23,75		

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 4)

Tabla AII.2. Humedad de la tierra de la hilera B durante el proceso de biodegradación
(Continuación)

Fecha	Día	Muestra	% Humedad	Promedio	Promedio Total ¹ (%)
28/05/2011	109	B1 - 1	26,17	21,85	22,78 ± 3,23
		B1 - 2	17,54		
		B2 - 1	24,35	22,73	
		B2 - 2	21,10		
		B3 - 1	19,23	22,89	
		B3 - 2	26,55		
		B4 - 1	23,20	23,64	
		B4 - 2	24,08		
14/06/2011	126	B1 - 1	24,51	25,83	24,13 ± 2,27
		B1 - 2	27,15		
		B2 - 1	24,03	25,24	
		B2 - 2	26,44		
		B3 - 1	21,90	21,47	
		B3 - 2	21,05		
		B4 - 1	22,12	23,98	
		B4 - 2	25,84		

¹ $\bar{X} \pm \sigma$ (n = 4)

ANEXO III

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE pH DE LAS MUESTRAS

Al aplicar el procedimiento descrito en la sección 2.4.2.1 a cada una de las muestras, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla AIII.1. pH de la tierra de la hilera A durante el proceso de biodegradación

Fecha	Muestra	pH	Promedio Total ¹
12/02/2011	A1	7,37	7,35 ± 0,10
	A2	7,43	
	A3	7,21	
	A4	7,40	
28/02/2011	A1	7,82	7,81 ± 0,07
	A2	7,74	
	A3	7,77	
	A4	7,90	
14/03/2011	A1	7,86	7,81 ± 0,04
	A2	7,80	
	A3	7,77	
	A4	7,81	
29/03/2011	A1	7,75	7,75 ± 0,04
	A2	7,75	
	A3	7,79	
	A4	7,70	
14/04/2011	A1	7,81	7,84 ± 0,03
	A2	7,85	
	A3	7,88	
	A4	7,82	

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 4)

Tabla AIII.1. pH de la tierra de la hilera A durante el proceso de biodegradación
(Continuación)

Fecha	Muestra	pH	Promedio Total ¹
28/04/2011	A1	7,56	7,67 ± 0,08
	A2	7,76	
	A3	7,69	
	A4	7,65	
13/05/2011	A1	7,54	7,51 ± 0,14
	A2	7,32	
	A3	7,49	
	A4	7,67	
28/05/2011	A1	7,78	7,84 ± 0,07
	A2	7,90	
	A3	7,78	
	A4	7,89	
14/06/2011	A1	7,71	7,70 ± 0,07
	A2	7,70	
	A3	7,60	
	A4	7,77	

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 4)

Tabla AIII.2. pH de la tierra de la hilera B durante el proceso de biodegradación

Fecha	Muestra	pH	Promedio Total ¹
12/02/2011	B1	7,54	7,47 ± 0,07
	B2	7,45	
	B3	7,39	
	B4	7,51	

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 4)

Tabla AIII.2. pH de la tierra de la hilera B durante el proceso de biodegradación
(Continuación)

Fecha	Muestra	pH	Promedio Total¹
28/02/2011	B1	7,58	7,55 ± 0,06
	B2	7,46	
	B3	7,56	
	B4	7,60	
14/03/2011	B1	7,84	7,76 ± 0,07
	B2	7,80	
	B3	7,69	
	B4	7,70	
29/03/2011	B1	7,90	7,83 ± 0,05
	B2	7,81	
	B3	7,79	
	B4	7,80	
14/04/2011	B1	7,71	7,76 ± 0,04
	B2	7,79	
	B3	7,74	
	B4	7,80	
28/04/2011	B1	7,33	7,48 ± 0,15
	B2	7,54	
	B3	7,67	
	B4	7,39	
13/05/2011	B1	7,87	7,70 ± 0,17
	B2	7,77	
	B3	7,48	
	B4	7,67	

¹ $\bar{X} \pm \sigma$ (n = 4)


Tabla AIII.2. pH de la tierra de la hilera B durante el proceso de biodegradación
(Continuación)

Fecha	Muestra	pH	Promedio Total¹
28/05/2011	B1	7,78	7,81 ± 0,06
	B2	7,77	
	B3	7,79	
	B4	7,90	
14/06/2011	B1	7,55	7,52 ± 0,03
	B2	7,49	
	B3	7,50	
	B4	7,52	

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 4)


ANEXO IV

RESULTADOS DEL CICAM SOBRE LOS ANÁLISIS DE NUTRIENTES EN EL SUELO CONTAMINADO Y CASCARILLA DE ARROZ



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@server.epn.edu.ec
Quito – Ecuador



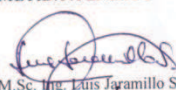


INFORME DE RESULTADOS

<p>Quito, 23 de marzo de 2010</p> <p>EMPRESA</p> <p>Solicitado por: INCINEROX</p> <p>Atención: Marcelo Cabrera</p> <p>Dirección: Av. Juan Selis N77-131 y Vicente Duque</p> <p>Identificación de la muestra (cliente):</p> <p>Fecha de recolección: 11 de marzo de 2010</p> <p>Responsable de toma de muestra: cliente</p> <p>LABORATORIO</p> <p>Número de ingreso al laboratorio: 369</p> <p>Fecha de ingreso al Laboratorio: 15 de marzo de 2010</p>	<p>No. IR10369</p> <p>Ref. ST10079</p> <p>Teléfono: 2481865</p> <p>Fax:</p> <p>Origen: cascarilla de arroz</p> <p>Tipo de muestra: puntual</p> <p>Tipo de envase: plástico</p> <p>Llegó refrigerada: no</p> <p>Se utilizó preservante: no</p>
--	---


PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	FECHA DEL ANÁLISIS	PROCEDIMIENTO
Fósforo total	mg/kg	675,68	16/03/2010	APHA 4500 - P C, Colorimétrico
Nitrógeno orgánico	mg/kg	76396	18/03/2010	Nessler APHA 4500-N B
Potasio	mg/kg	5,54	23/03/2010	Colorimétrico / Absorción atómica

NOTA: ESTE INFORME SOLO AFECTA A LA MUESTRA SOMETIDA A ENSAYO


 Realizado por: Ing. Carola Fierro RESPONSABLE TECNICO CICAM		 Revisado por: M.Sc. Ing. Luis Jaramillo S. DIRECTOR DE LABORATORIO
---	---	--

F-MC-23-01 Página 1 de 1

Figura AIV.1. Informe presentado por el CICAM de la EPN sobre análisis de NPK para la muestra de cascarilla de arroz



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL
 Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
 Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@server.epn.edu.ec
 Quito – Ecuador



INFORME DE RESULTADOS

Quito, 13 de septiembre de 2010

EMPRESA
 Solicitado por: INCINEROX
 Atención: Marcelo Cabrera
 Dirección: Av. Juan de Selis N77-131 y Vicente Duque

Identificación de la muestra (cliente): ninguna
 Fecha de recolección: 28 de agosto de 2010
 Responsable de toma de muestra: cliente


LABORATORIO
 Número de ingreso al laboratorio: 1072
 Fecha de ingreso al Laboratorio: 31 de agosto de 2010

No.IR101072
Ref. ST10238


Teléfono: 2481865
 Fax:
 Origen: tierra contaminada con petróleo, sector Shushufindi
 Tipo de muestra: compuesta
 Tipo de envase: plástico
 Llegó refrigerada: no
 Se utilizó preservante: no

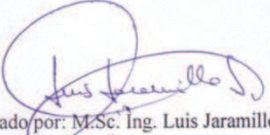
PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	FECHA DEL ANÁLISIS	PROCEDIMIENTO
Fósforo total	mg/kg	3,48	14/09/2010	APHA 4500 - P C, Colorimétrico
Nitrógeno total	mg/kg	1103,9	13/09/2010	Procedimiento interno
Potasio	g/kg	3,44	14/09/2010	Colorimétrico

NOTA: ESTE INFORME SOLO AFECTA A LA MUESTRA SOMETIDA A ENSAYO



Realizado por: Ing. Carola Fierro
 RESPONSABLE TECNICO CICAM





Revisado por: M.Sc. Ing. Luis Jaramillo S.
 DIRECTOR DE LABORATORIO

F-MC-23-01

Página 1 de 1

Figura AIV.2. Informe presentado por el CICAM de la EPN sobre análisis de NPK para la muestra de suelo contaminado con hidrocarburos



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@server.epn.edu.ec
Quito – Ecuador



INFORME DE RESULTADOS

Quito, 22 de febrero de 2011

EMPRESA

Solicitado por: INCINEROX

Atención:

Dirección: Av. Juan de Selis N77-131 y Vicente Duque

Identificación de la muestra (cliente): ninguna

Fecha de recolección: 13 de febrero de 2011

Responsable de toma de muestra: cliente

No. IR11293

Ref. ST11055

Teléfono: 2481865

Fax:

Origen: tierra contaminada

Tipo de muestra: puntual

Tipo de envase: plástico

Llegó refrigerada: no

Se utilizó preservante: no

LABORATORIO

Número de ingreso al laboratorio: 293

Fecha de ingreso al Laboratorio: 16 de febrero de 2011

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	FECHA DEL ANÁLISIS	PROCEDIMIENTO
Carbono Orgánico Total	%	20,09	21/02/2011	APHA 5310 B

NOTA: ESTE INFORME SOLO AFECTA A LA MUESTRA SOMETIDA A ENSAYO

Realizado por: Ing. Carola Fierro
RESPONSABLE TECNICO CICAM



Revisado por: M.Sc. Ing. Luis Jaramillo S.
DIRECTOR DE LABORATORIO

Figura AIV.3. Informe presentado por el CICAM de la EPN sobre análisis de carbono orgánico total para la muestra de suelo contaminado con hidrocarburos



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
Tel.: (00593-2) 2 507 144 Ext.: 623 • Telefax: (00593-2) 2 221 306 • Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@server.epn.edu.ec
Quito – Ecuador



INFORME DE RESULTADOS

Quito, 22 de febrero de 2011

No.IR11292

EMPRESA

Ref. ST11055

Solicitado por: INCINEROX

Atención:

Teléfono: 2481865 -

Dirección: Av. Juan de Selis N77-131 y Vicente Duque

Fax:

Identificación de la muestra (cliente): ninguna

Origen: cascarilla con estiercol en putrefacción

Fecha de recolección: 13 de febrero de 2011

Tipo de muestra: puntual

Responsable de toma de muestra: cliente

Tipo de envase: plástico

Llegó refrigerada: no

Se utilizó preservante: no

LABORATORIO

Número de ingreso al laboratorio: 292

Fecha de ingreso al Laboratorio: 16 de febrero de 2011

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	FECHA DEL ANÁLISIS	PROCEDIMIENTO
Nitrógeno total	mg/kg	7565,1	21/02/2011	Procedimiento interno

NOTA: ESTE INFORME SOLO AFECTA A LA MUESTRA SOMETIDA A ENSAYO

Realizado por: Ing. Carola Fierro
RESPONSABLE TECNICO CICAM





Revisado por: M.Sc. Ing. Luis Jaramillo S.
DIRECTOR DE LABORATORIO

Figura AIV.4. Informe presentado por el CICAM de la EPN sobre análisis de nitrógeno total para la muestra de abono elaborado

ANEXO V

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE IDENTIFICACIÓN DE BACTERIAS EN EL SUELO

  Av. 12 de Octubre y Patria
E-MAIL: diserlab@puce.edu.ec
RUC: 1790105601001
Telef: 2991727
Fax: 2991726
Quito - Ecuador

LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA AGRÍCOLA

INFORME DEL ENSAYO

MA-37-2011

NOMBRE DEL CLIENTE: Ing. Marcelo Cabrera

ENSAYO SOLICITADO: Aislamiento e Identificación de Bacterias ,
Aislamiento e identificación de *Bacillus* de suelo.
Método Referencial: Aislamiento en medios selectivos
Identificación de género y especie por pruebas bioquímicas

Tomado de: Manual Práctico de Microbiología del suelo, Universidad Agraria de La Habana,
2003, Dr Novo.

FECHA DE RECEPCIÓN: 17-06-2011
FECHA DE EJECUCIÓN: 20-06-2011
FECHA DEL REPORTE: 27-06-2011

MUESTRA N°: MA-37-2011:

Etiqueta: Análisis Bacterias Muestra B 14/06/11

TRANSCRITO POR: Lcda. Sandra Ortiz B.
VISTO BUENO: Lcda. Elena Granda M.

La información que consta en la etiqueta es enviada por el cliente y por tanto es de su exclusiva responsabilidad.

Página 1 de 2

Figura AV.1. Informe presentado por DISerLAB de la PUCE sobre análisis de identificación de bacterias presentes en la muestra de suelo contaminado

	 DISerLAB PUCE Diagnóstico, Investigación Servicios, Laboratorios	Av. 12 de Octubre y Patrija E-MAIL: diserlab@puce.edu.ec RUC: 1790105601001 Telef: 2991727 Fax: 2991726 Quito - Ecuador
---	--	--

RESULTADOS DE LA MUESTRA N°: MA-37-2011

Bacterias identificadas:

Pseudomonas fluorescens

Bacillus cereus

Resultado válido solo para la muestra analizada

Abreviaciones:

MA: Microbiología Agrícola
 PUCE: Pontificia Universidad Católica del Ecuador

INFORMACIÓN:

La muestra analizada, N° MA-37-2011 llega en funda de plástico con aproximadamente 2000 gramos de suelo.

RESPONSABLE ÁREA MICROBIOLOGÍA APLICADA Lcda. Elena Granda	SELLO DE LABORATORIO
 ANALISTA LABORATORIO Lcda. Sandra Ortiz	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR ESCUELA DE BIOANALISIS DISerLAB - PUCE </div>

Página 2 de 2

Figura AV.1. Informe presentado por DISerLAB de la PUCE sobre análisis de identificación de bacterias presentes en la muestra de suelo contaminado (Continuación)

ANEXO VI

BALANCE DE MASA DE NUTRIENTES PARA LA ADICIÓN DE ABONO ELABORADO NATURALMENTE

En la Tabla AVI.1 se muestra un ejemplo del cálculo de la relación NPK para 100 kg de abono elaborado. Para esta determinación se procedió a realizar un balance de masa de los nutrientes nitrógeno, fósforo y potasio. Las entradas serían la tierra sin procesar, cascarilla de arroz (4,2 % de la masa total), estiércol de ganado (0,8 % de la masa total) y el abono elaborado, cuya masa variará para determinar la cantidad óptima de la misma.

Tabla AVI.1. Balance de masa de los nutrientes NPK para 100 kg de abono elaborado

Fuente	Masa (kg)	Conc. Nitrógeno (mg/kg)	Masa Nitrógeno (kg)	Conc. Fósforo (mg/kg)	Masa Fósforo (kg)	Conc. Potasio (mg/kg)	Masa Potasio (kg)
Tierra inicial	12 703,26	1 103,90	14,02	3,48	0,04	3 440,00	43,70
Cascarilla de arroz	533,54	76 396,00	40,76	675,68	0,36	5,54	0,00
Estiércol de ganado	101,63	42 000,00	4,27	29 690,14	3,02	21 574,47	2,19
Abono	100,00	7 565,10	0,76	10 915,49	1,09	10 787,23	1,08
Tierra final	13 438,42	---	59,81	---	4,51	---	46,97
Relación nutrientes	---	---	30,00	---	2,26	---	23,56

ANEXO VII

TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DEL AMBIENTE DONDE SE DESARROLLÓ EL PROYECTO

Tabla AVII.1. Temperatura ambiente y humedad relativa en la cual se desarrolló el proyecto

Fecha	Día	Temperatura Promedio ¹ (°C)	Humedad relativa Promedio ¹ (%)
09/02/2011	1	31,26 ± 4,20	62,33 ± 19,31
10/02/2011	2	31,17 ± 1,94	67,22 ± 11,13
11/02/2011	3	28,16 ± 3,28	76,91 ± 13,73
12/02/2011	4	30,86 ± 5,39	68,00 ± 22,50
27/02/2011	19	31,53 ± 5,67	59,64 ± 21,21
28/02/2011	20	26,27 ± 1,71	80,55 ± 8,90
01/03/2011	21	30,67 ± 3,42	68,58 ± 13,12
02/03/2011	22	28,00 ± 3,61	82,00 ± 10,82
14/03/2011	34	31,82 ± 2,64	62,55 ± 12,43
15/03/2011	35	32,16 ± 4,31	48,89 ± 14,84
16/03/2011	36	31,50 ± 2,84	58,00 ± 9,01
17/03/2011	37	31,82 ± 3,68	57,55 ± 13,37
18/03/2011	38	29,73 ± 2,72	73,55 ± 9,18
26/03/2011	46	26,73 ± 2,00	87,82 ± 5,02
27/03/2011	47	26,82 ± 1,33	76,91 ± 14,10
28/03/2011	48	26,00 ± 1,73	84,45 ± 6,90
29/03/2011	49	28,57 ± 2,76	77,29 ± 10,56
11/04/2011	62	30,36 ± 1,86	60,55 ± 13,47
12/04/2011	63	30,09 ± 3,42	65,45 ± 16,31
13/04/2011	64	30,45 ± 3,11	64,55 ± 14,74

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 12)

Tabla AVII.1. Temperatura ambiente y humedad relativa en la cual se desarrolló el proyecto (Continuación)

Fecha	Día	Temperatura Promedio ¹ (°C)	Humedad relativa Promedio ¹ (%)
14/04/2011	65	30,36 ± 3,47	69,64 ± 13,99
25/04/2011	76	28,00 ± 1,95	79,82 ± 7,21
26/04/2011	77	23,82 ± 0,98	92,18 ± 1,83
27/04/2011	78	26,09 ± 2,17	76,09 ± 9,79
28/04/2011	79	27,73 ± 2,24	71,00 ± 10,84
10/05/2011	91	25,55 ± 1,69	88,09 ± 4,68
11/05/2011	92	28,14 ± 3,08	80,71 ± 9,66
12/05/2011	93	24,91 ± 0,83	92,36 ± 2,94
13/05/2011	94	29,27 ± 2,87	71,64 ± 11,74
25/05/2011	106	33,37 ± 3,86	47,78 ± 13,53
26/05/2011	107	33,06 ± 6,46	58,67 ± 26,02
27/05/2011	108	36,87 ± 6,56	40,18 ± 21,08
28/05/2011	109	34,32 ± 4,54	52,18 ± 20,06
11/06/2011	123	26,27 ± 1,42	84,91 ± 7,11
12/06/2011	124	25,75 ± 1,98	93,00 ± 2,73
13/06/2011	125	27,56 ± 2,74	81,11 ± 8,85
14/06/2011	126	25,91 ± 1,76	83,55 ± 7,71

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 12)

ANEXO VIII

CONCENTRACIÓN DE BACTERIAS EN LAS MUESTRAS TOMADAS

Al aplicar la Ecuación [2.6], para la determinación de la concentración de bacterias presentes en las muestras de las hileras A y B, se obtuvieron los siguientes resultados parciales:

Tabla AVIII.1. Concentración de bacterias presentes en las muestras de la hilera A

Fecha	Día	Peso muestra [g]	Dilución	Contaje	Concentración de bacterias [Ufc/g]	Promedio [Ufc/g]
12/02/2011	4	11,18	1,0E-05	53	4,74E+05	5,24E+05
		10,98	1,0E-05	63	5,74E+05	
28/02/2011	20	11,01	1,0E-05	77	6,99E+05	6,25E+05
		11,09	1,0E-05	61	5,50E+05	
14/03/2011	34	10,78	1,0E-05	55	5,10E+05	6,60E+05
		10,98	1,0E-05	89	8,11E+05	
29/03/2011	49	11,09	1,0E-05	100	9,02E+05	8,31E+05
		10,91	1,0E-05	83	7,61E+05	
14/04/2011	65	10,79	1,0E-05	78	7,23E+05	6,65E+05
		11,02	1,0E-05	67	6,08E+05	
28/04/2011	79	10,89	1,0E-05	64	5,88E+05	6,49E+05
		10,99	1,0E-05	78	7,10E+05	
13/05/2011	94	11,01	1,0E-05	86	7,81E+05	8,16E+05
		10,93	1,0E-05	93	8,51E+05	
28/05/2011	109	11,00	1,0E-05	101	9,18E+05	7,85E+05
		11,05	1,0E-05	72	6,52E+05	
14/06/2011	126	10,95	1,0E-05	89	8,13E+05	8,52E+05
		10,99	1,0E-05	98	8,92E+05	

Tabla AVIII.2. Concentración de bacterias presentes en las muestras de la hilera B

Fecha	Día	Peso muestra [g]	Dilución	Contaje	Concentración de bacterias [Ufc/g]	Promedio [Ufc/g]
12/02/2011	4	11,18	1,0E-05	38	3,47E+05	4,03E+05
		10,98	1,0E-05	49	4,59E+05	
28/02/2011	20	11,01	1,0E-05	55	4,99E+05	5,52E+05
		11,09	1,0E-05	67	6,05E+05	
14/03/2011	34	10,78	1,0E-05	65	5,86E+05	4,94E+05
		10,98	1,0E-05	45	4,03E+05	
29/03/2011	49	11,09	1,0E-05	81	7,51E+05	6,05E+05
		10,91	1,0E-05	51	4,59E+05	
14/04/2011	65	10,79	1,0E-05	45	4,03E+05	4,26E+05
		11,02	1,0E-05	51	4,50E+05	
28/04/2011	79	10,89	1,0E-05	51	4,69E+05	4,84E+05
		10,99	1,0E-05	56	4,99E+05	
13/05/2011	94	11,01	1,0E-05	63	5,60E+05	5,32E+05
		10,93	1,0E-05	55	5,05E+05	
28/05/2011	109	11,00	1,0E-05	75	6,68E+05	5,91E+05
		11,05	1,0E-05	56	5,14E+05	
14/06/2011	126	10,95	1,0E-05	59	5,32E+05	5,11E+05
		10,99	1,0E-05	54	4,91E+05	

ANEXO IX

ANÁLISIS DE ACEITES Y GRASAS

Al aplicar la Ecuación [2.8], para la determinación de la C_{ag} , se obtuvo:

Tabla AIX.1. Concentración de AyG para las muestras de la hilera A

Fecha	Día	Muestra A1 (ppm)	Muestra A2 (ppm)	Promedio ¹ (ppm)
12/02/2011	4	2626,37	2634,60	2630,48 ± 5,83
28/02/2011	20	1735,51	1785,54	1760,52 ± 35,38
14/03/2011	34	1415,53	1397,32	1406,43 ± 12,88
29/03/2011	49	1311,05	1348,58	1329,81 ± 26,54
14/04/2011	65	1298,70	1269,10	1283,90 ± 20,93
28/04/2011	79	1239,51	1231,70	1235,60 ± 5,53
13/05/2011	94	1165,50	1177,57	1171,53 ± 8,53
28/05/2011	109	1040,89	1079,97	1060,43 ± 27,63
14/06/2011	126	979,43	924,71	952,07 ± 38,69

¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 2)


Tabla AIX.2. Concentración de AyG para las muestras de la hilera B

Fecha	Día	Muestra A1 (ppm)	Muestra A2 (ppm)	Promedio ¹ (ppm)
12/02/2011	4	2610,22	2601,74	2605,98 ± 6,00
28/02/2011	20	2071,21	2016,22	2043,72 ± 38,88
14/03/2011	34	1816,84	1839,67	1828,26 ± 16,14
29/03/2011	49	1606,91	1637,92	1622,41 ± 21,93
14/04/2011	65	1514,00	1548,61	1531,31 ± 24,47
28/04/2011	79	1304,98	1294,76	1299,87 ± 7,23
13/05/2011	94	1285,59	1282,62	1284,11 ± 2,10
28/05/2011	109	1209,42	1247,13	1228,28 ± 26,66
14/06/2011	126	1181,10	1149,71	1165,41 ± 22,20


¹ $\bar{x} \pm \sigma$ (n = 2)

ANEXO X

RESULTADOS DE ANNCY SOBRE ANÁLISIS DE TPH Y METALES PESADOS A MUESTRAS DE SUELO



Laboratorio Anncy
CONTROL AMBIENTAL DE AGUAS Y SUELOS



ENSAYOS
N° OAE-LE 20-05-002

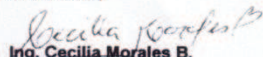
INFORME DE ENSAYOS No. 13267-03

NOMBRE DEL CLIENTE: INCINEROX CIA LTDA
DIRECCION: José Andrade OE1-512 y Joaquin Mancheno - Carcelen
DESCRIPCION DE LA MUESTRA: Suelo
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA: (Referencia dada por el Cliente)
 Código de Muestra: Muestra I
 Sitio de Muestreo: Shushufindi
 Fecha: 09-02-2011
FECHA DE RECEPCION: 28 de Junio del 2011
FECHA DE ANALISIS: Del 28 de Junio del 2011 al 6 de Julio del 2011
FECHA DE EMISION: 7 de Julio del 2011

Ensayo	Métodos Referencia - Laboratorio	Unidades	Límite de Cuantificación	Resultado
Hidrocarburos Totales (TPH)	EPA 8440 / EPA 418.1 - PEE/ANNCY/08	mg/kg	100	16230
Cadmio	APHA 3120 B - PEE/ANNCY/74	mg/kg	0.100	0.630
Niquel*	APHA 3120 B - PEE/ANNCY/74	mg/kg	0.200	16.9
Plomo*	APHA 3120 B - PEE/ANNCY/74	mg/kg	0.500	9.44

VALORES DE INCERTIDUMBRE DE USO DE ENSAYOS ACREDITADOS POR EL OAE

Ensayo	Rango	Incertidumbre
Hidrocarburos Totales (TPH)	100 - 80000	L ± 20% mg/kg K=2, nivel confianza 95.45%
Cadmio	0.100 - 5.00	L ± 10% mg/kg K=2, nivel confianza 95.45%

Atentamente,

Ing. Cecilia Morales B.
GERENTE ANNCY

NOTA:
 - Resultados en Base Seca
 - Método de Extracción del Suelo para metales EPA 3050 B / 3010 A
 - Suma de seis HAP's: Fluoranteno, B(b)F, B(k)F, B(a)P, B(ghi)P, IN(1,2,3-cd)PY
 - Los Ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE
 - L: resultado del análisis
 - El Informe sólo afecta a las muestras sometidas a ensayos
 - Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio.

Página 1 de 1

Gonzalo Benitez N54-45 y San Lorenzo Teléfono: 330 3413 Telefax: 330 3414 labanncy@uio.satnet.net • calidadanncy@cablemodem.com.ec

Figura AX.1. Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH y metales pesados de la muestra inicial de suelo contaminado con hidrocarburos


INFORME DE ENSAYOS No. 13008-01

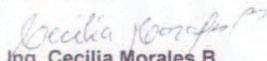

NOMBRE DEL CLIENTE: INCINEROX CIA LTDA
DIRECCION: Juan de Selis N77-131 y Vicente Duque (Carcelén)
DESCRIPCION DE LA MUESTRA: Suelo
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA: (Referencia dada por el Cliente)
 Código de Muestra: Muestra A
 Fecha: 14/04/2011
FECHA DE RECEPCION: 21 de Abril del 2011
FECHA DE ANALISIS: Del 21 de Abril del 2011 al 29 de Abril del 2011
FECHA DE EMISION: 4 de Mayo del 2011

Ensayo	Métodos Referencia - Laboratorio	Unidades	Límite de Cuantificación	Resultado
Hidrocarburos Totales (TPH)	EPA 8440 / EPA 418 1 - PEE/ANNCY/08	mg/kg	100	5200
Cadmio	APHA 3120 B - PEE/ANNCY/74	mg/kg	0.100	0.433
Niquel*	APHA 3120 B - PEE/ANNCY/74	mg/kg	0.200	17.0
Plomo*	APHA 3120 B - PEE/ANNCY/74	mg/kg	0.500	6.51

VALORES DE INCERTIDUMBRE DE USO DE ENSAYOS ACREDITADOS POR EL OAE

Ensayo	Rango	Incertidumbre
Hidrocarburos Totales (TPH)	100 - 80000	$L \pm 20\%$ mg/kg K=2, nivel confianza 95.45%
Cadmio	0.100 - 5.00	$L \pm 10\%$ mg/kg K=2, nivel confianza 95.45%

Atentamente,


Ing. Cecilia Morales B.
GERENTE ANNCY

NOTA:

- Resultados en Base Seca
- Método de Extracción del Suelo para metales EPA 3050 B / 3010 A
- Los Ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE
- L: resultado del análisis
- El Informe sólo afecta a las muestras sometidas a ensayos
- Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin el permiso escrito del Laboratorio.

Figura AX.2. Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH y metales pesados de la muestra A a los dos meses de iniciado el proceso de biodegradación

INFORME DE ENSAYOS No. 13008-02

NOMBRE DEL CLIENTE: INCINEROX CIA LTDA
DIRECCION: Juan de Selis N77-131 y Vicente Duque (Carcelén)
DESCRIPCION DE LA MUESTRA: Suelo
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA: (Referencia dada por el Cliente)
 Código de Muestra: Muestra B
 Fecha: 14/04/2011
FECHA DE RECEPCION: 21 de Abril del 2011
FECHA DE ANALISIS: Del 21 de Abril del 2011 al 29 de Abril del 2011
FECHA DE EMISION: 4 de Mayo del 2011

Ensayo	Métodos Referencia - Laboratorio	Unidades	Límite de Cuantificación	Resultado
Hidrocarburos Totales (TPH)	EPA 8440 / EPA 418.1 - PEE/ANNCY/08	mg/kg	100	5220
Cadmio	APHA 3120 B - PEE/ANNCY/74	mg/kg	0.100	0.608
Níquel*	APHA 3120 B - PEE/ANNCY/74	mg/kg	0.200	16.1
Plomo*	APHA 3120 B - PEE/ANNCY/74	mg/kg	0.500	11.8

VALORES DE INCERTIDUMBRE DE USO DE ENSAYOS ACREDITADOS POR EL OAE

Ensayo	Rango	Incertidumbre
Hidrocarburos Totales (TPH)	100 - 80000	L ± 20% mg/kg K=2, nivel confianza 95.45%
Cadmio	0.100 - 5.00	L ± 10% mg/kg K=2, nivel confianza 95.45%

Atentamente,

Cecilia Morales B.
Ing. Cecilia Morales B.
GERENTE ANNCY

NOTA:

- Resultados en Base Seca
- Método de Extracción del Suelo para metales EPA 3050 B / 3010 A
- Los Ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE
- L: resultado del análisis
- El Informe sólo afecta a las muestras sometidas a ensayos
- Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio.

Figura AX.3. Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH y metales pesados de la muestra B a los dos meses de iniciado el proceso de biodegradación



ENSAYOS
Nº OAE LE 20 05-002

INFORME DE ENSAYOS No. 13267-01

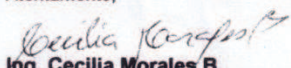
NOMBRE DEL CLIENTE: INCINEROX CIA LTDA
DIRECCION: José Andrade OE1-512 y Joaquin Mancheno - Carcelen
DESCRIPCION DE LA MUESTRA: Suelo
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA: (Referencia dada por el Cliente)
 Código de Muestra: Muestra A
 Sitio de Muestreo: Shushufindi
 Fecha: 14-06-2011
FECHA DE RECEPCION: 28 de Junio del 2011
FECHA DE ANALISIS: Del 28 de Junio del 2011 al 6 de Julio del 2011
FECHA DE EMISION: 7 de Julio del 2011

Ensayo	Métodos Referencia - Laboratorio	Unidades	Límite de Cuantificación	Resultado
Hidrocarburos Totales (TPH)	EPA 8440 / EPA 418.1 - PEE/ANNCY/08	mg/kg	100	3170

VALORES DE INCERTIDUMBRE DE USO DE ENSAYOS ACREDITADOS POR EL OAE

Ensayo	Rango	Incetidumbre
Hidrocarburos Totales (TPH)	100 - 80000	L ± 20% mg/kg K=2, nivel confianza 95.45%

Atentamente,


Ing. Cecilia Morales B.
GERENTE ANNCY

NOTA:

- Resultados en Base Seca
- Método de Extracción del Suelo para metales EPA 3050 B / 3010 A
- Suma de seis HAP's: Fluoranteno, B(b)F, B(k)F, B(a)P, B(ghi)P, IN(1,2,3-cd)PY
- Los Ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE
- L: resultado del análisis
- El Informe sólo afecta a las muestras sometidas a ensayos
- Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio.

Figura AX.4. Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH de la muestra A a los cuatro meses de iniciado el proceso de biodegradación


INFORME DE ENSAYOS No. 13267-02

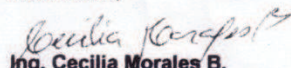
NOMBRE DEL CLIENTE: INCINEROX CIA LTDA
DIRECCION: José Andrade OE1-512 y Joaquin Mancheno - Carcelen
DESCRIPCION DE LA MUESTRA: Suelo
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA: (Referencia dada por el Cliente)
 Código de Muestra: Muestra B
 Sitio de Muestreo: Shushufindi
 Fecha: 14-06-2011
FECHA DE RECEPCION: 28 de Junio del 2011
FECHA DE ANALISIS: Del 28 de Junio del 2011 al 6 de Julio del 2011
FECHA DE EMISION: 7 de Julio del 2011

Ensayo	Métodos Referencia - Laboratorio	Unidades	Límite de Cuantificación	Resultado
Hidrocarburos Totales (TPH)	EPA 8440 / EPA 418.1 - PEE/ANNCY/08	mg/kg	100	3736

VALORES DE INCERTIDUMBRE DE USO DE ENSAYOS ACREDITADOS POR EL OAE

Ensayo	Rango	Incetidumbre
Hidrocarburos Totales (TPH)	100 - 80000	$L \pm 20\% \text{ mg/kg}$ $K=2$, nivel confianza 95.45%


Atentamente,


Ing. Cecilia Morales B.
GERENTE ANNCY


NOTA:

- Resultados en Base Seca
- Método de Extracción del Suelo para metales EPA 3050 B / 3010 A
- Suma de seis HAP's: Fluoranteno, B(b)F, B(k)F, B(a)P, B(ghi)P, IN(1,2,3-cd)PY
- Los Ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE
- L: resultado del análisis
- El Informe sólo afecta a las muestras sometidas a ensayos
- Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio.

Figura AX.5. Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH de la muestra B a los cuatro meses de iniciado el proceso de biodegradación



Laboratorio ANNCY
CONTROL AMBIENTAL DE AGUAS Y SUELOS



ENSAYOS
N° OAE L.E. 22.95-302

INFORME DE ENSAYOS No. 13266-01


NOMBRE DEL CLIENTE:	INCINEROX CIA LTDA
DIRECCION:	José Andrade OE1-512 y Joaquin Mancheno - Carcelen
DESCRIPCION DE LA MUESTRA:	Agua Residual
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA:	(Referencia dada por el Cliente)
Código de Muestra: Muestra A	
Sitio de Muestreo: Shushufindi	
Fecha: 14-06-2011	
FECHA DE RECEPCION:	28 de Junio del 2011
FECHA DE ANALISIS:	Del 28 de Junio del 2011 al 29 de Junio del 2011
FECHA DE EMISION:	30 de Junio del 2011

Ensayo	Métodos Referencia - Laboratorio	Unidades	Límite de Cuantificación	Resultado
Hidrocarburos Totales (TPH)	EPA 418.1 - PEE/ANNCY/01	mg/l	0.2	1.0

VALORES DE INCERTIDUMBRE DE USO DE ENSAYOS ACREDITADOS POR EL OAE

Ensayo	Rango	Incertidumbre
Hidrocarburos Totales (TPH)	0.2 - 5000	L ± 25% mg/l K=2, nivel confianza 95.45%

Atentamente,



Ing. Cecilia Morales B.
GERENTE ANNCY

NOTA:

- Los Ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE
- L: resultado del análisis
- El Informe sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo
- Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio

Página 1 de 1

Gonzalo Benítez N54-45 y San Lorenzo Teléfono: 330 3413 Telefax: 330 3414 labanncy@uio.satnet.net • calidadanncy@cablemodem.com.ec

Figura AX.6. Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH de la muestra de agua residual de la hilera A acumulada de durante todo el proceso

INFORME DE ENSAYOS No. 13266-02

NOMBRE DEL CLIENTE: INCINEROX CIA LTDA
DIRECCION: José Andrade OE1-512 y Joaquin Mancheno - Carcelen
DESCRIPCION DE LA MUESTRA: Agua Residual
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA: (Referencia dada por el Cliente)
 Código de Muestra: Muestra B
 Sitio de Muestreo: Shushufindi
 Fecha: 14-06-2011
FECHA DE RECEPCION: 28 de Junio del 2011
FECHA DE ANALISIS: Del 28 de Junio del 2011 al 29 de Junio del 2011
FECHA DE EMISION: 30 de Junio del 2011

Ensayo	Métodos Referencia - Laboratorio	Unidades	Límite de Cuantificación	Resultado
Hidrocarburos Totales (TPH)	EPA 418.1 - PEE/ANNCY/01	mg/l	0.2	0.4

VALORES DE INCERTIDUMBRE DE USO DE ENSAYOS ACREDITADOS POR EL OAE

Ensayo	Rango	Incertidumbre
Hidrocarburos Totales (TPH)	0.2 - 5000	$L \pm 25\%$ mg/l K=2, nivel confianza 95.45%

Atentamente,

Cecilia Morales B.
Ing. Cecilia Morales B.
GERENTE ANNCY

NOTA:

- Los Ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE
- L: resultado del análisis
- El Informe sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo
- Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio

Figura AX.7. Informe presentado por ANNCY sobre análisis de TPH de la muestra de agua residual de la hilera B acumulada de durante todo el proceso

En resumen, los resultados de Laboratorios ANNCY reportados para la concentración de TPH se muestran en la Tabla AX.1.

Tabla AX.1. Concentración de TPH para cada una de las muestras de las hileras A y B durante el proceso de biodegradación

Fecha	Día	Concentración Hilera A (ppm)	Concentración Hilera B (ppm)
12/02/2011	4	16 230	16 230
14/04/2011	65	5 200	5 220
14/06/2011	126	3 170	3 736

Mientras que el resumen de los resultados del análisis de metales pesados reportados por Laboratorios ANNCY se muestran en las siguientes figuras:

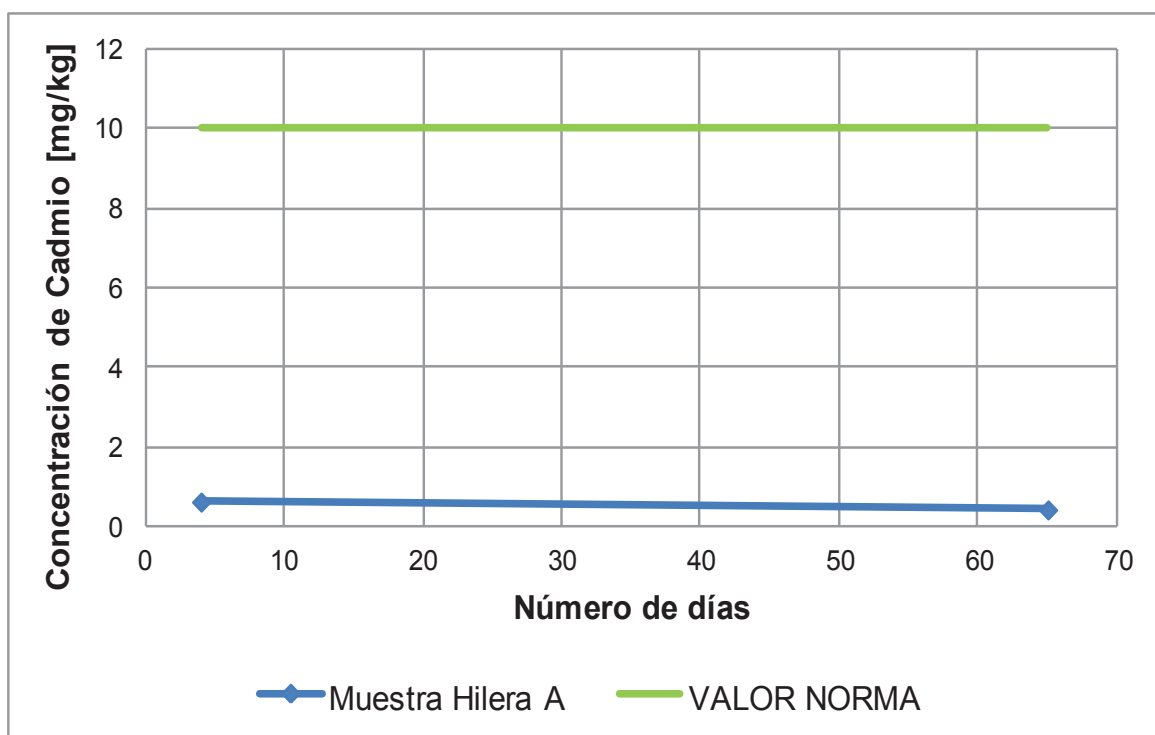


Figura AX.8. Concentración de cadmio para la hilera A en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE

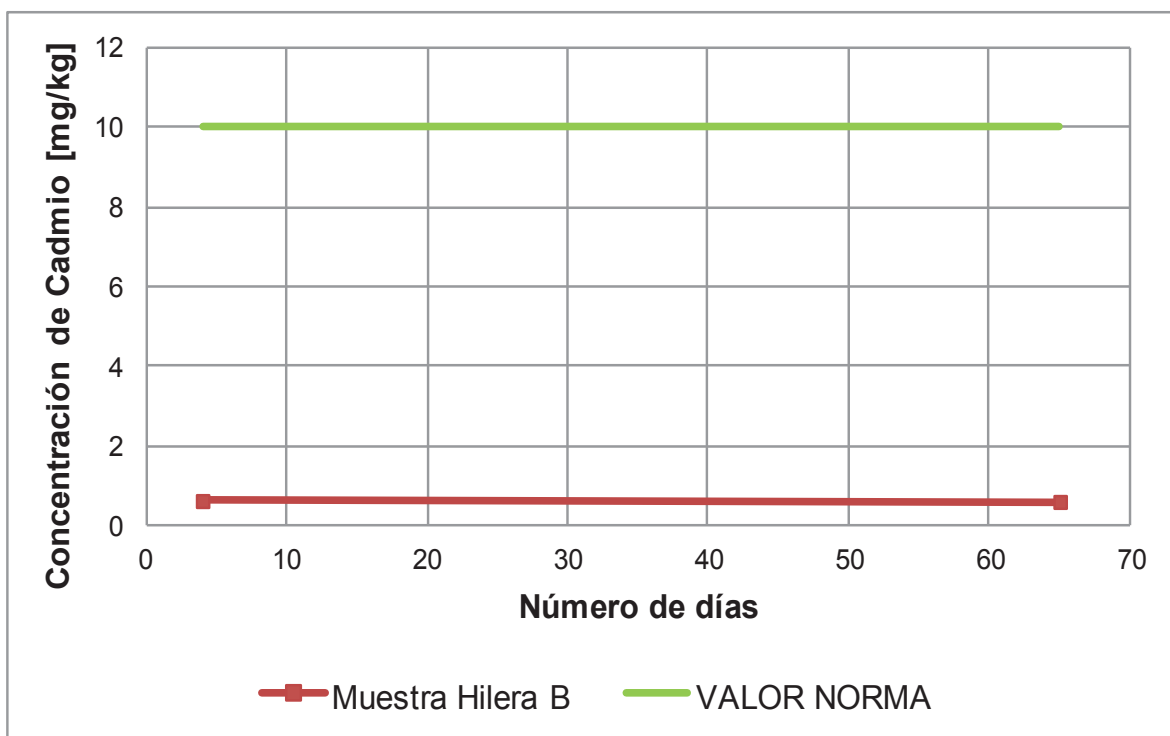


Figura AX.9. Concentración de cadmio para la hilera B en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE

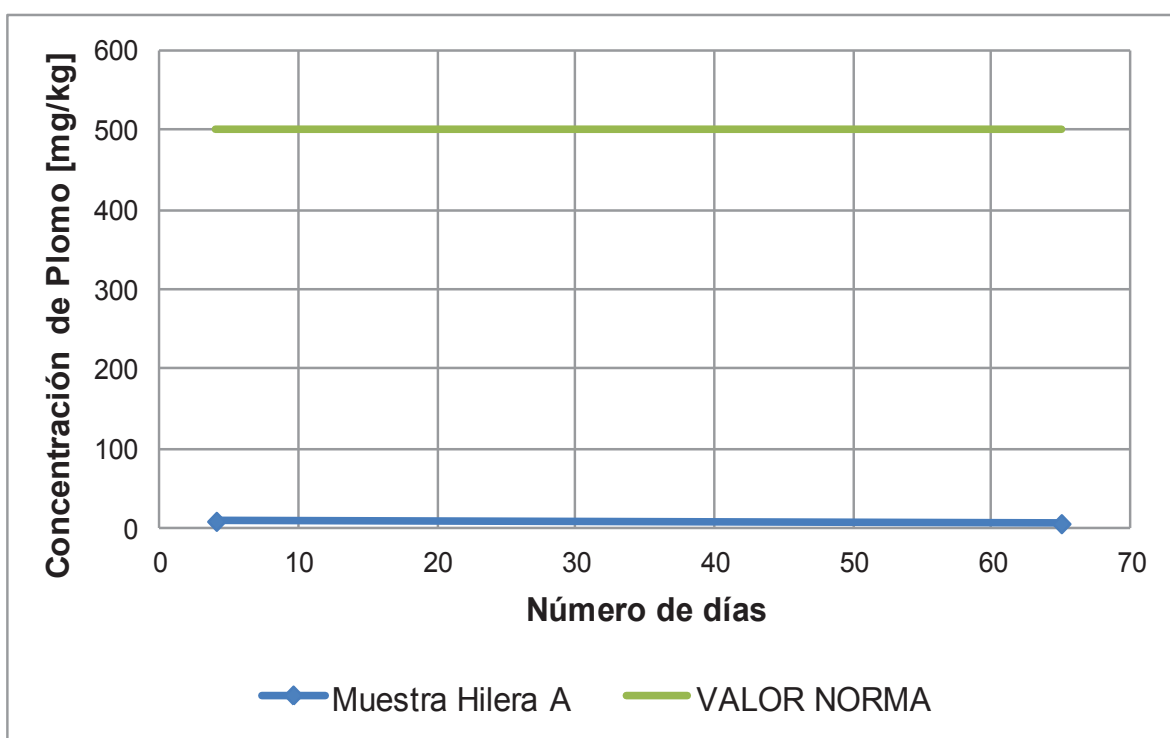


Figura AX.10. Concentración de plomo para la hilera A en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE

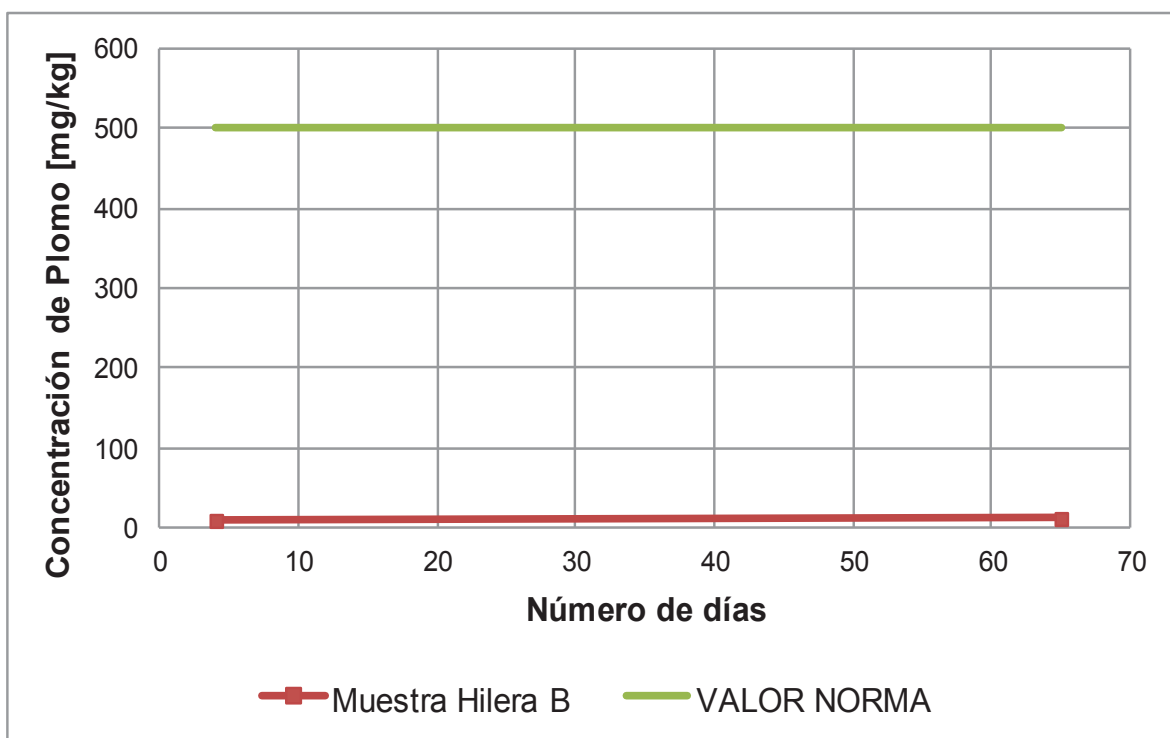


Figura AX.11. Concentración de plomo para la hilera B en función del tiempo, comparándola con el valor norma regulado por el RAOHE

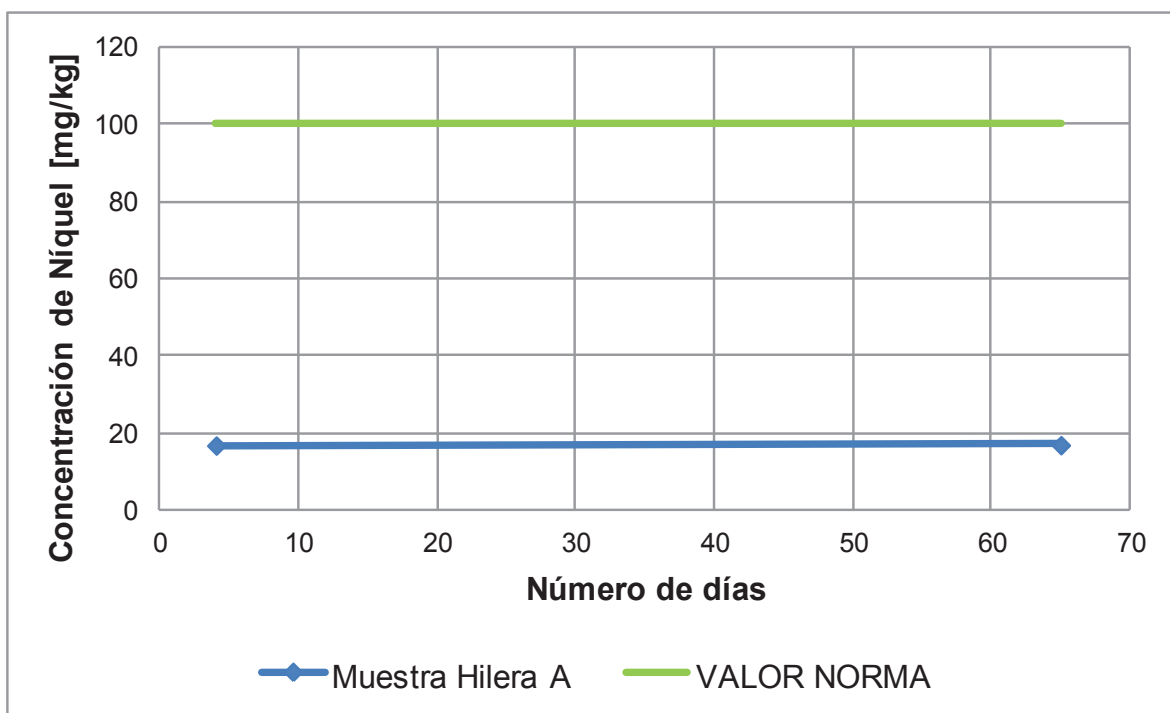


Figura AX.12. Concentración de níquel para la hilera A en función del tiempo, comparándola con el valor norma del RAOHE

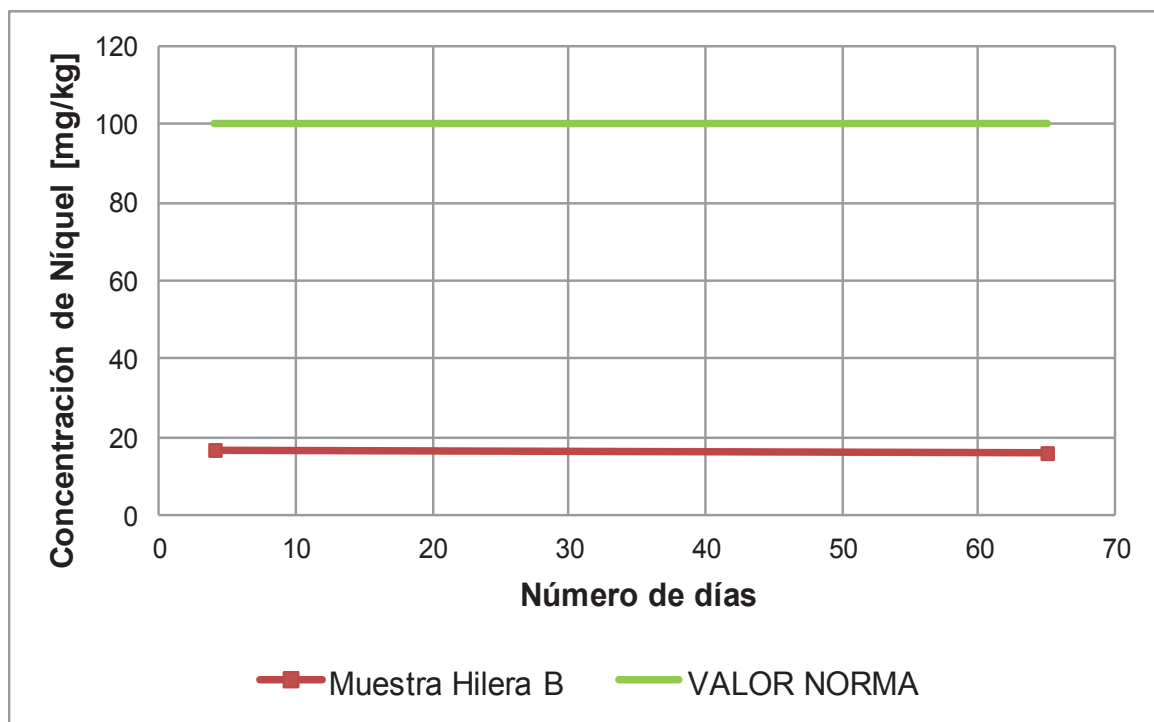


Figura AX.13. Concentración de níquel para la hilera B en función del tiempo, comparándola con el valor norma del RAOHE