



SEP
SECRETARÍA
DE EDUCACIÓN
PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

**SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN**

**REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES
CONTAMINADOS CON ACEITES LUBRICANTES
UTILIZANDO
Geobacillus thermoglucosidasius.**

TESIS

**PRESENTA:
IBQ. NERY NOEMI LIMÓN ORTIZ.**

**DIRECTOR:
M.C. CHRISTIAN REYES VELÁZQUEZ.**

**CODIRECTORA:
DRA. OLAYA PIRENE CASTELLANOS ONORIO.**

**ASESORA:
DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ.**

**ASESORA:
DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO.**

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO.



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro **A-614-120118**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 14:00 horas del día 17 del mes de septiembre de 2019 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

**"REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES CONTAMINADOS CON ACEITES LUBRICANTES
UTILIZANDO *Geobacillus thermoglucosidasius*"**

Que presenta el (la) alumno(a):

C. NERY NOEMI LIMÓN ORTIZ

Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACIÓN, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:

M.C. Christian Reyes Velázquez
Director

Dra. Olaya Pirene Castellanos Onorio
Codirector

Dra. Fabiola Lango Reynoso
Asesor

Dra. María Del Refugio Castañeda Chávez
Asesor





"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Boca del Río, Ver., 02/octubre/ 2019

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

C. NERY NOEMI LIMÓN ORTIZ
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

**"REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES CONTAMINADOS CON ACEITES LUBRICANTES
UTILIZANDO *Geobacillus thermoglucosidasius*"**

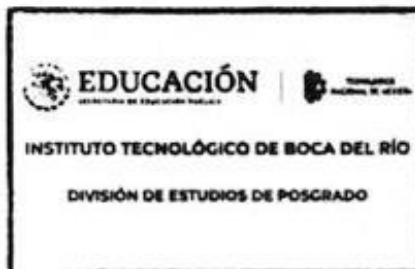
Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede AUTORIZACIÓN para que proceda a su impresión.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
Por nuestros mares responderemos


M. C. ANA LETICIA PLATAS PINOS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

c.c.p. Coordinación de la Maestría
c.c.p. Expediente



AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Tecnológico de Boca del Río por haberme acogido dentro de sus filas y por permitirme formarme académicamente, gracias a todas aquellas personas que directa o indirectamente fueron parte de este proceso, gracias en especial a las Doctoras Fabiola Lango Reynoso y Refugio Castañeda Chavéz por la calidez, entusiasmo y alegría que contagian para la formación de todos los somos parte de esta hermosa maestría, al M.C. Christian Reyes Velázquez gracias por siempre estar comprometido con este proyecto, por su don de enseñanza y su afabilidad que hace un ambiente de trabajo satisfactorio y lleno de motivación.

Agradezco también al M.I.A Manuel Susunaga por motivarme a seguir con mi formación después de la universidad, ya que son pocos los académicos se preocupan por seguir impulsando a sus alumnos a ser profesionales mejor capacitados para los retos de la vida y que el país necesita.

Agradezco infinitamente a la Dra. Olaya Pirene Castellanos Onorio, por haberme brindado de su inspiración y por frajuar el amor por mi profesión cuando más necesitaba de una señal para seguir en mi carrera universitaria, siendo ella de los contados académicos preocupados por sus alumnos; agradezco su paciencia, su compromiso, su amistad, su franquesa convida con dureza y principalmente por su tiempo, ya que este sagrado tesoro nunca más volverá, y por ello asumo el compromiso de compartir cada uno de los conocimientos adquiridos de ella.

Y por ultimo sin dejar de ser menos importante, a mi madre Petra Limon Ortiz por ser el pilar de nuestra familia, por estimularnos a ser mejores personas que puedan retibuir a la sociedad, a mi hermano el Dr. Arturo Cobos Limon por siempre inspirarme en ser una profesional con humanidad y ética, gracias por su infinito amor y apoyo incondicional.

RESUMEN

En la presente investigación se evaluó la capacidad de remoción de la bacteria *Geobacillus thermoglucosidasius* (Gt) en suelos contaminados con aceites lubricantes, considerados pasivos ambientales (PA), por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y de acuerdo con los artículos del 68-70 de esta misma ley, los responsables de un sitio contaminado considerado PA están obligados a llevar acciones de remediación con forme a lo dispuesto en la presente ley.

Para el desarrollo de esta investigación se tomaron muestras de cuatro talleres de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río de acuerdo con la Norma Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 y la NMX-AA-132-SCFI-2006, a estas muestras se les aplicaron el análisis de determinación de grasas y aceites, antes y después de la aplicación de la técnica de remediación como indicativo de cuanto contaminante fue removido de los PA, consiguiente al primer análisis fueron aplicados otros estudios con los cuales se caracterizó el suelo permitiendo tener una mayor información para la correcta aplicación de la técnica de remediación, en paralelo a estos se realizaron técnicas activación, inoculación e incubación a la bacteria Gt., necesarias para la remediación.

Con los datos obtenidos se realizó la evaluación de la remoción de la bacteria Gt sobre los pasivos ambientales, estos datos fueron sometidos a un análisis de estudio estadístico con el programa STATISTICA 7.

ABSTRAC

In this investigation, the ability to remove *Geobacillus thermoglucosidasius* bacteria in soils contaminated with lubricating oils, environmental environmental liabilities (PA) was evaluated by the General Law for the Prevention and Integral Management of Residues (LGPGIR) and in accordance with Articles 68-70 of this same law, those responsible for a contaminated site considered PA are required to carry out remediation actions in the manner provided in this law. For the development of this research, take samples from four workshops in the Veracruz-Boca del Río area in accordance with Mexican Standard NOM-021-SEMARNAT-2000 and NMX-AA-132-SCFI-2006, these samples are they applied the modification analysis of fats and oils, before and after the application of the remediation technique as an indication of how much contaminant was removed from the PA, analysis to the first analysis were applied other studies with the channels are characterized the soil have a More information for the correct application of the remediation technique, in parallel to these are activation techniques, inoculation and incubation to the Gt. bacteria, necessary for remediation. With the selected data, the evaluation of the removal of the Gt bacteria on the environmental liabilities was performed, these data were sometimes a statistical study analysis with the STATISTICA program 7.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ABSTRAC	VI
Introducción	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 El suelo	3
1.1.1. Estructura: perfil del suelo	4
1.1.2 Factores formadores del suelo	6
1.1.3 Textura	7
1.1.4 Clasificación de suelos	10
1.2 Pasivos ambientales	13
1.3 Destino ambiental de los pasivos ambientales	14
1.4 Legislación ambiental de los suelos contaminados considerados como pasivos ambientales	16
1.4.1 Remediación de suelos contaminados considerados pasivos ambientales.....	16
1.4.2 Responsables de la remediación de un suelo contaminado considerado pasivo ambiental.	18
1.5 Aceites lubricantes	18
1.5.1 Estado físico de los aceites lubricantes.....	19
1.5.2 Clasificación de la composición natural de los aceites naturales	20
2.5.3 Clasificación de los aceites lubricantes	21
1.5.4 Aditivos	26
1.6 Tecnologías de remediación de suelos.....	28
1.7 Tipos de tratamientos.....	29
1.7.1 Tratamientos biológicos (biorremediación)	30
1.7.1.1 Tecnologías in situ	30
1.7.1.2 Tecnologías ex situ.....	33
1.7.1.3 Factores que influyen en la biorremediación	34
1.7.2 Tratamientos fisicoquímicos	39
1.7.3 Tratamientos térmicos	41
1.8 Microorganismos encapsuladores de aceites lubricantes.....	43

1.9 Complejo <i>Geobacillus thermoglucosidasius</i>	44
2. Justificación.....	46
3. Hipótesis	46
4.Objetivos	47
4.1 Objetivo general	47
5.2 Objetivos específicos	47
5. MATERIALES Y METODOS	47
5.1 Diseño experimental	47
5.2 Objetivo específico 1	50
5.2.1 Establecimiento del área de estudio.....	50
5.2.2 Ubicación del área de estudio	51
5.2.3 Muestreo del suelo contaminado con aceites lubricantes considerados PA	58
5.2.3.1 Plan de muestreo	60
5.2.3.2 Técnica de muestreo sistemático.....	60
5.2.4 Caracterización de los suelos contaminados con aceites considerados PA	61
5.2.4.1 Analisis de los suelos contaminados con aceites lubricantes considerados PA.....	61
5.3 Objetivo especifico 2	69
5.3.1 Reactivación de la cepa <i>Geobacillus thermoglucosidasius</i>	69
5.3.1.1 Adiccion del inoculo de cepa <i>Geobacillus thermoglucosidasius</i> en medio Luria Bertani	69
5.3.1.2 Incubación en condiciones controladas.....	70
5.3.2 Segunda inoculación en medio LB	70
5.3.3 Medio selectivo	70
5.3.4 Inoculación en tubos de ensaye en condiciones controladas	71
5.3.4.1 Obtención de la curva de crecimiento en un periodo de 30 días (densidad óptica)	71
5.4 Objetivo especifico 3	72
5.4.1 Determinación de materia grasa	72
5.4.2 Concentración de los datos obtenidos	72
5.4.3 Comparacion y análisis estadísticos con el programa STATISTICA 7 ...	73
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	74

6.1 Caracterización de los suelos contaminados con aceites considerados PA	74
6.1.1 Propiedades fisicoquímicas	74
6.1.2 Porcentajes textural de la composición del suelo.....	75
6.1.2.1 ARENAS.....	76
6.1.2.2 ARCILLAS.....	77
6.1.2.3 LIMOS	78
6.2 Determinar la concentración óptima de <i>Geobacillus thermoglucosidasius</i> para la remoción de pasivos ambientales con aceites lubricantes.....	79
6.2.1 VERACRUZ	79
6.3 3. Evaluación la remoción total de los pasivos ambientales contaminados por aceites lubricantes derivados de hidrocarburos, en el laboratorio.....	83
7. CONCLUSIONES.....	86
REFERENCIAS.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Contribucion de la definición de suelo por diversos autores.....	3
Tabla 2 Definicion de grados SAE de viscosidad para aceites de motor	22
Tabla 3 Clasificación de viscosidad en el sistema ISO	23
Tabla 4 Especificación estandar AGMA	24
Tabla 5 Clasificación de servicio API para motores de gasolina	25
Tabla 6 Clasificación de servicio API para motores diesel.....	25
Tabla 7 Clasificación de servicio API para engranajes	25
Tabla 8 Diseño estadístico del área de estudio de la zona coburbada Veracruz-Boca del Río.....	50
Tabla 9 Datos de la unidad económica de VER I.	51
Tabla 10 Servicios brinda el taller mecanico VER I.	52
Tabla 11 Datos de la unidad económica de Vaeracruz II.....	53
Tabla 12 Servicios que brinda el taller mecánico VER II.....	53
Tabla 13 Datos de la unidad económica de Boca del Río I.	55
Tabla 14 Servicios que brinda el taller mecanico BOCA I.....	55
Tabla 15 Datos de la unidad económica de Boca del Río II.....	57
Tabla 16 Servicios que brinda el taller mecánico BOCA II.....	57
Tabla 17 Analisis aplicados a los suelos contaminados para su caracterización.....	74
Tabla 18 Porcentajes de textura de los sitios de estudio VER1, VER2, BOCA1 y BOCA2.....	75
Tabla 19 Media y desviación estandar del % de arenas de los sitios de muestreo de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.	76

Tabla 20 Media y desviación estandar del % de arcillas de los sitios de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.	77
Tabla 21 Media y desviación estandar del % de limos de los sitios de muestreo de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.	78
Tabla 22 Media y desviación estandar del % de aceites lubricantes iniciales de los sitios de muestreo de la zona conurbada Veracruz- Boca del Río.	84
Tabla 23 Media y desviación estandar del % de aceites lubricantes finales de los sitios de muestreo de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de los horizontes más importantes del suelo (Gardi et al., 2014).	6
Figura 2 Mancha de un pasivo ambiental en suelo de taller mecanico clausurado (QUADRIN,2015).	15
Figura 3 Sitios identificados como PA por el DGGIMAR a nivel nacional, 2017(Elaboracion apartir de SEMARNAT,2018).	16
Figura 4 Geobacillus thermoglucosidasius en placa en medio LB.....	45
Figura 5 Metodología del Objetivo 1	48
Figura 6 Metodología del Objetivo 2	49
Figura 7 Metodología del Objetivo 3	49
Figura 8 Área de estudio: zona conurbada Veracruz-Boca del Río, Fuente Google maps,2019.	50
Figura 9 Plano del taller automotriz VER I.....	52
Figura 10 Localización de taller automotriz VER I. Fuente: Google maps,2019. ...	52
Figura 11 Plano de taller automotriz VER II.....	54
Figura 12 Localización del taller automotriz VER II. Fuente: Google, 2019.....	54
Figura 13 Plano del taller mecánico automotriz BOCA I.	56
Figura 14 Localización del taller mecánico BOCA I. Fuente: Google, 2019.	56
Figura 15 Plano del taller mecánico automotriz BOCA II.	57
Figura 16 Localización del taller mecánico BOCA II. Fuente: Google, 2019.	58
Figura 17 Muestreo sistemático de los sitios VER I, VER II, BOCA I, BOCA II.....	59
Figura 18 Pasos de tecnica de muestreo sistemático.....	61
Figura 19 Medidor de sobremesa HANNA HI 2550	62
Figura 20 Equipos utilizados en el analisis de porcentaje de humedad.....	63
Figura 21 Procedimiento del analisis de obtencion de materia organica: a) Pesado de muestra en balanza analítica RADWAG-AS220/c, b) Secado de muestras en estufa Memmert-UNE400, c) Tamizado de muestras enTamizador Ro-Tap, d) Muestra en vaso de precipitadi de 1L, e) Agitación de la muestra en vaso de precipitado de 1L.....	66
Figura 22 Reacción de la digestion de la materia.....	67
Figura 23 Muestra en reposo de suelo sin materia organica.....	68
Figura 24 Alícuota de cepa Geobacillus	69

Figura 25	Tubo de ensaye con Luria Bertani inóculado con Gt.	69
Figura 26	Segunda incubacion de la cepa Gt en medio LB.	70
Figura 27	Inoculación del tercer pase de la cepa Gt.	70
Figura 28	Tubos inoculados con Gt, LB	71
Figura 29	Extracion de grasas en el extractor Figursa EG-4000, a) extracción de grasa inicial, b) extracción de grasa final.	72
Figura 30	Pesado de grasa extraida en Balanza RADWAG AS 220/c.	72
Figura 31	Gráfico de cajas del % de arenas en los sitios de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.	76
Figura 32	Gráfico de cajas del % de arcillas en los sitios de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.	77
Figura 33	Grafico de cajas del % de limos en los sitios de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.	78
Figura 34	Curva cinetica de cremiento de Gt con PA del sitio VER 1.	79
Figura 35	Curva cinetica de crecimiento de Gt con PA del sitio VER 2.	80
Figura 36	Curva cinetica de crecimiento de Gt con PA del sitio BOCA 1.	81
Figura 37	Curva cinetica de crecimiento de Gt con PA del sitio BOCA 2.	82
Figura 38	Gráfico de cajas del % de aceites lubricantes iniciales en los sitios de la zona conurbada Veracruz Boca del Río.	83

ABREVIATURAS

AGMA	American Gear Manufacturers Association
AL	Aceite Lubricante
API	American Petroleum Institute
BOCA 1	Boca del Río 1
BOCA 2	Boca del Río 2
BPC	Bifenilos Policlorados
°C	Grados Celsius
CDMX	Ciudad de México
CLC	Combustión de Lecho Circulante
cm	Centímetros
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente
COS	Compuestos Orgánicos Semivolátiles
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
cSt	Centi-Stokes
DENUE	Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas
DGGIMAR	Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas
DT	Desorción Térmica
EPA	Environmental Protection Agency
EV	Extracción de Vapores

FAO	Food and Agriculture Organization
g	Gramos
GL	Gear lubricant
GSR	Grupos de Suelo de Referencia
<i>Gt</i>	<i>Geobacillus thermoglucosidasius</i>
h	Horas
HAP	Hidrocarburos Alifáticos Policíclicos
HTP	Hidrocarburos Totales de Petróleo
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ISO	International Standard Organization
ISSS	Int. Soil Science Society
IUSS	Unión Internacional de Ciencias del Suelo
Kg	Kilogramo
KOW	Octanol/Water Partition Coefficients
L	litros
LB	Luria Bertani
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
m	Metro
min	Minutos
mL	Mililitros
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana
OMS	Organización Mundial de la Salud
PA	Pasivos Ambientales
PCP	Bombas de Cavidades Progresivas
pH	Potencia de Hidrogeno
RE	Remediación Electrocinética
RP	Residuos Peligrosos
S/E	Solidificación/Estabilización
SAE	Society of Automotive Engineers
SEMARNAT	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
TNT	Trinitrotolueno
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación
USDA	United States Department of Agriculture
VER 1	Veracruz 1
VER 2	Veracruz 2
WGEA	Working Group on Environmental Auditing
WRB	Base Referencial Mundial del Recurso Suelo

Introducción

En México al igual que en otros países, el proceso de industrialización, que se intensificó a partir de la segunda mitad del Siglo XX, derivó en una mayor demanda de materias primas, bienes y servicios, con ello el incremento de vehículos misma que asciende hasta el 2012 a 34, 875, 837 unidades registradas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2012).

Para atender a esta demanda de mantenimiento y reparación de las unidades vehiculares, existen en el país 48,389 talleres mecánicos automotrices registrados por el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE,2017). Los cuales generan residuos por utilización de gasolina, diesel, naftas gastados y otros derivados de hidrocarburos, siendo estos los que ocupan el tercer lugar como la industria que genera los mayores volúmenes de residuos peligros (RP) (SEMARNAT,2012), impactando directa o indirectamente la salud de la población y la calidad de los recursos naturales.

Estos RP son considerados como pasivos ambientales (PB) por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR); en el caso de los suelos, las principales consecuencias ambientales que se presentan después de un evento de contaminación por hidrocarburos son: a) La formación de una película hidrofóbica, que disminuye la fertilidad inhibiendo la mineralización de la materia orgánica al impedir el intercambio gaseoso con la atmosfera, evitando la difusión del oxígeno y el agua, b) La reducción de la cobertura vegetal y cambios en la dinámica poblacional de la fauna y la biota microbiana y contaminación por infiltración a cuerpos de agua subterráneos (Domínguez & Pichtel,2004; Ighovie & Okpali, 2012; Larenas & L de Viana.2005; Ogbo,2009; Zand *et al.*, 2010; Pardo, *et al.*, 2004).

Existen distintas tecnologías para la remediación de suelos contaminados, de los cuales se clasifican en tipos de tratamientos de acuerdo con su efecto fundamental de acción: tratamientos fitoquímicos, térmicos, y tratamientos de biorremediación, esta última utiliza las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar, transformar o remover los contaminantes a

productos metabólicos inocuos (Van Deuren *et al.*, 1997; Eweis *et al.*, 1998).

La biorremediación surge como una de las estrategias biológicas aplicadas para la reparación de ambientes contaminados por derrames de hidrocarburos, por la necesidad de disminuir el impacto ambiental negativo en los diferentes ambientes como agua y suelos (Pardo, *et al.*, 2004; Kumar *et al.*, 2011); diversos autores han descrito que el uso de microorganismos, en la biorremediación por contaminación de hidrocarburos, se obtienen resultados satisfactorios para la remediación (Odu, 1978; Sloan, 1987; Ijah y Antai, 1988; Okpokwasili y Okorie, 1988; Barnhart y Meyers, 1989; Anon, 1990; Pritchard, 1991; Pritchard y Costa, 1991; Ijah, 2002 e Ijah, 2003).

La importancia de utilizar microorganismos es porque poseen sistemas enzimáticos capaces de fraccionar las moléculas de hidrocarburos haciéndolas reaccionar para obtener una disminución en su toxicidad, utilizando los contaminantes como nutrientes o fuentes de energía, para assimilarlas e incorporarlas a sus procesos metabólicos, obteniendo de la reacción: dióxido de carbono y agua, en el caso de procesos aerobios, para procesos anaerobios se obtiene una composición de biomasa compuesta por: CO₂, N₂, Mn²⁺, S²⁺, Fe²⁺, CH₄, entre otros compuestos (Hess *et al.*, 1997; Agarwal, 1998; Tang *et al.*, 2007; Boyer, R., 2000; Gan, *et al.*, 2009).

En los últimos años el bacteria *Gt* ha sido de interés como fuente de enzimas termoestables y productos naturales, digestores de lignocelulosa, biorremediadores de hidrocarburos, productores de biocombustible, fábricas celulares para la expresión heteróloga de enzimas y como hospedadores para la evolución dirigida (Wiegel *et al.*, 2008 ; Niehaus *et al.*, 1999 ; Couñago y Shamoo, 2005 ; Marchant *et al.*, 2006 ; Cripps *et al.*, 2009 ; Taylor *et al.*, 2009 ; Tabachnikov and Shoham, 2013).

En esta investigación se evalúa la capacidad de remoción de *Gt* en los suelos contaminados considerados pasivos ambientales derivados de talleres automotrices de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río, por medio de la tecnología de biorremediación.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 El suelo

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes para el ser humano por su relación directa con el desarrollo de su habitad y la producción de alimentos, es esencial para la vida y extremadamente frágil. La palabra suelo tiene diferentes percepciones dependiendo las aplicaciones que cada ciencia o profesión le de de acuerdo a sus necesidades basadas en diversas propiedades: físicas, químicas, de nutrición, microbiológicas, de fertilidad y de clasificación entre otras.

A lo largo de los años se ha buscado una definición que pueda comprender todos los ámbitos desde la agricultura hasta nivel científico y profesional, los primeros trabajos en definir al suelo fueron los descritos en la tabla 1.

Tabla 1 Contribución de la definición de suelo por diversos autores.

Autor y año	Contribución de definición de suelo
Fitzpatrick, 1987.	Consideraba al suelo como el continuo espacio-tiempo que forma la parte superior de la corteza terrestre, con un espesor de pocos centímetros y de donde se desarrollan las raíces de las plantas.
Ortiz <i>et al.</i> , 1990.	Definen al suelo como cualquier material suelto en la superficie de la Tierra capaz de sustentar la vida.
Brady & Wey, 1999.	Definen que el suelo es un cuerpo natural tridimensional en el mismo sentido que es una montaña, lago o valle.
Boul <i>et al.</i> , 2004.	Consideraba al suelo como cuerpos naturales que exhiben sus características en forma tridimensional

Con el fin de dar una unificación más completa y con el propósito de clasificar a los suelos según la Taxonomía, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB), la cual define al suelo como: un cuerpo natural integrado por sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren sobre la superficie de la tierra, ocupan un lugar en el espacio y se caracterizan por tener horizontes o capas, que se distinguen del material inicial por ser el resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformación de energía y materia; además poseen la habilidad de soportar raíces de plantas en un ambiente natural (Soil Survey Staff, 1998; Soil Survey Staff, 1999; Soil Survey Staff, 2003; Soil Survey Staff, 2006).

La clasificación de la FAO-WRB es actualizada para el año 2017, siendo esta la última unificación de la definición a nivel mundial, la cual denomina a los suelos como la combinación vertical de horizontes presentes dentro de una profundidad específica y por la organización lateral (secuencia) de horizontes o por su ausencia, a una escala que se refleja en el relieve o lo conceptualizan como un cuerpo natural continuo, el cual tiene tres dimensiones espaciales y una temporal. Las tres principales propiedades de un suelo son: 1) están formados por minerales y elementos orgánicos e incluye las fases sólida, líquida y gaseosa; 2) los materiales están organizados en estructuras específicas en el medio pedológico. Estas forman el aspecto morfológico de la cobertura del suelo, equivalente a la anatomía de un ser vivo. Su estudio facilita el entendimiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas, que, a su vez, permite explicar el pasado, presente y futuro del suelo y 3) el suelo está en constante evolución, tiene una cuarta dimensión: el tiempo.

Los objetivos de la clasificación WRB son identificar y clasificar cualquier material, hasta una profundidad de 2 m de la superficie de la tierra, que está en contacto con la atmósfera, a excepción de los organismos vivos, las áreas con hielos continuos no cubiertos por otro material y los cuerpos de agua más profundos de 2 m. La definición incluye roca continua, suelos con pavimento urbano, suelos de áreas industriales, de cuevas, así como los suelos subacuáticos (IUSS Working Group WRB, 2006).

1.1.1. Estructura: perfil del suelo

El suelo se compone de una mezcla compleja de partículas minerales y orgánicas que representan los productos de la meteorización y de los procesos bioquímicos.

Las rocas son erosionadas en fragmentos, mientras que la vegetación y los organismos muertos se transforman en materia orgánica del suelo. Además de estos elementos sólidos, también encontramos líquidos y gases en este complejo sistema.

Si cavamos un hoyo y observamos la sección vertical que aparece, conocida como perfil, podremos ver, en la mayoría de los casos, una serie de capas más o menos paralelas a la superficie.

Estas capas se conocen como "horizontes" y son el resultado de procesos geológicos, químicos y biológicos en el material parental durante la vida del suelo. Los suelos relativamente jóvenes, como los que se originan a partir de los sedimentos de ríos, dunas o cenizas volcánicas, pueden tener horizontes poco diferenciados o incluso carecer de ellos. A medida que aumenta la edad del suelo, los horizontes son generalmente más fáciles de observar (hay excepciones, como por ejemplo los suelos tropicales o en el permafrost).

La mayoría de los suelos presentan generalmente tres o cuatro horizontes (puede haber más o menos), definidos principalmente por el color, textura, estructura, contenido en materia orgánica y presencia de carbonatos (sus características químicas se pueden medir en el laboratorio). Algunos suelos muestran un cambio gradual de un horizonte a otro, mientras que otros varían de manera más brusca entre ellos (Gardi *et al.*, 2014; Jórdan, 2006).

La identificación y descripción de los horizontes del perfil es una parte importante del estudio de los suelos. Los horizontes principales se suelen representar con una letra mayúscula, generalmente seguida de varios caracteres alfanuméricos indicadores de las características del suelo, como se muestra en la Figura 1 (Jórdan, 2006).

O. Acumulaciones de materia orgánica sin descomponer (>20-30%), saturados en agua por largos períodos. Es el horizonte de las turbas. Capa de hojarasca sobre la superficie del suelo (sin saturar agua; >35%), frecuente en los bosques.

A. Formado en la superficie, con mayor porcentaje de materia orgánica (transformada) que los horizontes situados debajo. Típicamente de color gris oscuro, más o menos negro, pero cuando contiene poca materia orgánica (suelos cultivados) puede ser claro. Estructura migajosa y granular.

E. Horizonte de fuerte lavado. Típicamente situado entre un A y un B. Con menos arcilla y óxidos de Fe y Al que el horizonte A y B. Con menos materia orgánica que el A. Muy arenosos y de colores muy claros (altos valores). Estructura de muy bajo grado de desarrollo (la laminar es típica de este horizonte).

B. Horizonte de enriquecimiento en: arcilla (iluvial o in situ), óxidos de Fe y Al (iluviales o in situ) o de materia orgánica (sólo si es de origen iluvial; no in situ), o también por enriquecimiento residual por lavado de los carbonatos (si estaban presentes en la roca). De colores pardos y rojos, de cromas (cantidad de color) más intensos (tonalidad del color) más rojo que el material original. Con desarrollo de estructura edáfica (típicamente en bloques angulares, subangulares, prismática).

C. Material original. Sin desarrollo de estructura edáfica, ni rasgos edáficos. Blando, suelto, se puede cavar con una azada. Puede estar meteorizado pero nunca edafizado.

R. Material original. Roca madre.

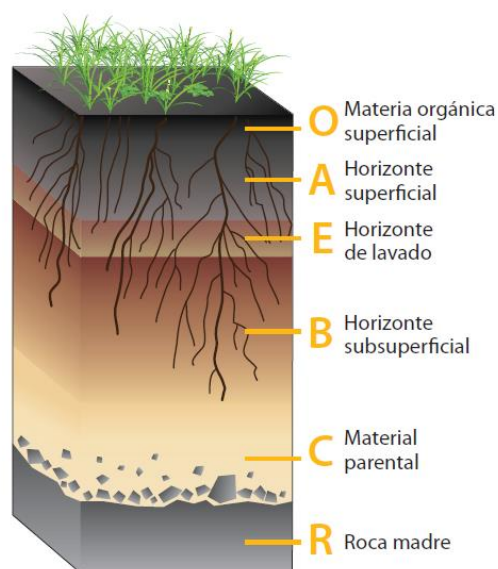


Figura 1 Esquema de los horizontes más importantes del suelo (Gardi et al., 2014).

1.1.2 Factores formadores del suelo

Las características del suelo pueden variar de manera considerable de un lugar a otro. En los siguientes apartados se describen los principales factores formadores de suelo que determinan las propiedades del mismo (Gardi et al., 2014; Jórdan, 2006; Lal R, 2009; Kotték et al., 2006).

Factores que lo condicionan:

- I. El clima: condiciona el tipo de meteorización y los flujos verticales.
 - a. La temperatura: influye sobre la velocidad de las reacciones y sobre los organismos que viven en él.
 - b. El agua (moviéndose por los poros o por capilaridad) es el agente movilizador (lixiviación): eluviación pérdida de sales o humus por lavado. iluviación acumulación de sales o humus en un determinado horizonte. Estos movimientos pueden suceder hacia abajo pero también hacia arriba (por intensa evaporación).
- II. La topografía:
 - a. la pendiente afecta a la estabilidad o erosión.
 - b. La orientación condiciona la climatología (solanas y umbrías).
- III. La naturaleza de la roca madre. Afecta fundamentalmente en las primeras etapas: resistencia a la erosión, grado de disgregación, porosidad.
- IV. Organismos: enriquecen en materia orgánica, airean, meteorizan, sujetan.
- V. El tiempo transcurrido: son procesos muy lentos que generan que el suelo sea considerado un recurso no renovable ya que su tiempo de reposición es mucho más prolongado que nuestra capacidad de destrucción.
- VI. La influencia de las actividades humanas. Casi siempre negativa.

1.1.3 Textura

Se define la textura del suelo como: La proporción (en porcentaje de peso) de las partículas menores a 2 mm de diámetro (arena, arcilla y limo) existentes en los horizontes del suelo (Blanquer *et al.*, 2010). La textura describe la proporción de las partículas minerales presentes en el suelo en función de su tamaño (FAO, 2006).

La textura del suelo, varía de unos horizontes a otros, siendo una característica propia de cada uno de ellos por lo que es tan importante el análisis de los diferentes horizontes del suelo uno a uno.

En este sentido, hablar de textura del suelo no es correcto, pues hablamos de la textura de cada uno de los horizontes del suelo (Blanquer *et al.*, 2010).

Las partículas del suelo pueden dividirse según su tamaño:

- I. Gravas y piedras. Son partículas minerales sólidas, de diámetro comprendido entre 2 mm y 7 cm (gravas) o mayor (piedras). Cuando son muy abundantes, pueden afectar a las propiedades del suelo y dificultar su manejo.
- II. 2. Tierra fina. Esta fracción incluye las partículas menores de 2 mm de diámetro.
 - a. **Arena.** Son partículas minerales sólidas de tamaño comprendido entre 2 mm y 0.02 mm. La arena es la fracción más grande del suelo, compuesta principalmente por granos de cuarzo más o menos meteorizados. La arena no tiene capacidad de agregación, de modo que sus partículas no se unen entre sí y aparecen de manera individualizada. Debido a que una gran proporción de arena en el suelo origina poros numerosos y relativamente grandes. Los principales minerales que constituyen la arena son el cuarzo, los feldespatos, las micas, etc. Son visibles y se pueden observar individualmente. Tienen una relación superficie/volumen muy baja (aprox.3). Su capacidad de intercambio catiónico es baja. Su principal función es la composición de la matriz del suelo.
 - b. **El limo** es una clase de partículas minerales de tamaño comprendido entre 0.02 y 0.002 mm. El limo está constituido por partículas de tamaño mediofino, como el talco. Su composición química es semejante a la de la arena. Al igual que esta, el limo no tiene capacidad de agregación. Sus partículas no forman estructura. No sufren expansión ni contracción y su relación superficie/volumen es baja ($300 - 3000\text{m}^{-1}$). Su capacidad de intercambio catiónico es baja.
 - c. **La arcilla** es la fracción más pequeña. Mientras que la arena y el limo provienen del fraccionamiento físico de la roca, la arcilla proviene de la alteración química del material original.

Por lo tanto, se diferencia mineralógicamente de las anteriores fracciones por estar compuesta por minerales originados por la meteorización, que no se encuentran en las rocas sin meteorizar.

Las partículas de arcilla tienen capacidad de agregación y no se comportan como granos individuales en el suelo. Su tamaño es inferior a 2 μm y poseen unas propiedades físicas y químicas especiales. Su relación superficie/volumen es superior a 3000 m^{-1} (metro a la potencia menos uno) Un metro a la potencia menos uno (m^{-1}) es el número de ondas de una radiación monocromática cuya longitud de onda es igual a 1 metro.

La grava y otros materiales de tamaño mayor que 2 mm no se consideran como parte del suelo a la hora de evaluar su textura u otros aspectos (FAO, 2006; Jordan, 2006).

En la Tabla 2 se muestra algunas de las clasificaciones texturales más usadas en la actualidad: la propuesta por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (Int. Soil Science Society, ISSS), la clasificación del Sistema Internacional (IS) y la empleada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture, USDA).

Tabla 1 Clasificación de la clases texturales más importantes a nivel mundial

USDA*	(μm)	IS*	(μm)	ISSS*	(μm)
Arena muy gruesa	2000-1000	Arena gruesa	2000-200	Arena gruesa	2000-200
Arena gruesa	1000-500				
Arena fina	500-250	Arena fina	200-2	Arena fina	200-20
Arena muy fina	250-100				
Limo grueso	50-20	Limo	20-2	Limo	20-2
Limo fino	20-2				
Arcilla	<2	Arcilla	<2	Arcilla	<2

USDA* United States Department of Agriculture, IS* Sistema Internacional, ISSS* Int. Soil Science Society.

Conocer esta granulometría es esencial para cualquier estudio del suelo (ya sea desde un punto de vista genérico como aplicado).

Para clasificar a los constituyentes del suelo según su tamaño de partícula se han establecido muchas clasificaciones granulométricas. Básicamente todas aceptan los términos de grava, arena, limo y arcilla, pero difieren en los valores de los límites establecidos para definir cada clase (Romero, 1989; Bravo, 1998; Martins, 1992).

1.1.4 Clasificación de suelos

Clasificar no es otra cosa que agrupar en categorías, o como la palabra indica, “clases” relevantes según el objetivo de dicha clasificación. El propósito de cualquier sistema de clasificación es organizar el conocimiento de manera que las propiedades de los objetos puedan recordarse, así como comprender la relación entre ellos con un fin determinado (p. ej. la gestión del suelo). El proceso implica la formación de clases mediante el agrupamiento de los elementos en base a las propiedades que tienen en común.

Clasificar ayuda a abordar la complejidad cuando hay demasiados objetos como para considerarlos de manera individual; al agrupar los elementos de acuerdo a sus similitudes de comportamiento o de propiedades, se pueden crear clases útiles para la organización del conocimiento, lo que también permite simplificar los procesos de toma de decisiones.

Las primeras clasificaciones de suelos se basaban en características individuales como la textura (limosa, arcillosa o arenosa) o el material parental (p. ej. material aluvial o gravas). A finales de 1880, el geólogo ruso Dokucháyev, hoy en día considerado el padre de las Ciencias del Suelo, fue el primero en proponer una clasificación más “científica” basada en la combinación de las características del suelo y su formación. Este enfoque que, sigue sirviendo de guía para muchas clasificaciones nacionales de suelos. Una de sus particularidades es que distingue aquellas características de origen geológico de las que son resultado de los procesos formadores de suelo.

La Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) se desarrolló bajo el auspicio de la Unión Internacional de Ciencias del Suelo (IUSS), tomando como base la leyenda de la FAO y valiéndose de la correlación internacional de los distintos sistemas de clasificación de suelos (IUSS,2006).

Se utilizaron criterios objetivos procedentes tanto de trabajo de campo como de análisis de laboratorio, con el fin de clasificar de manera sistemática los diferentes tipos de suelo en Grupos de Suelo de Referencia (GSR). Éstos se pueden caracterizar más mediante adjetivos denominados calificadores.

Dicho sistema no busca sustituir los sistemas nacionales de clasificación de suelos, sino servir como denominador común para la comunicación a nivel internacional.

De acuerdo con esta clasificación se puede definir el tipo de suelo, son 32 tipos diferentes de suelos catalogados en el mundo (IUSS,2006).

En México existe una gran diversidad edáfica representada por 26 grupos de suelo. Sin embargo, sólo seis de ellos, en conjunto ocupan el 81.7% del territorio. Dominan los Leptosoles (28.3% del territorio), Regosoles (13.7%), Phaeozems (11.7%), Calcisoles (10.4%), Luvisoles (9%) y Vertisoles (8.6%) que, en conjunto, ocupan 81.7% de la superficie nacional (INEGI,2007). Algunas de las características de estos grupos principales se presentan a continuación:

Los Leptosoles (del griego *leptos*, delgado), que se conocen en otras clasificaciones como Litosoles y Redzinas, son suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. Son los suelos de mayor distribución a nivel mundial (1 655 millones de hectáreas; IUSS, 2007) y están asociados a sitios de compleja orografía, lo que explica su amplia distribución en México. Estos suelos se encuentran en todos los tipos climáticos (secos, templados, húmedos), y son particularmente comunes en las zonas montañosas y en planicies calizas superficiales, como las de la Península de Yucatán. Su potencial agrícola está limitado por su poca profundidad y alta pedregosidad, lo que los hace difíciles de trabajar.

Aunado a ello, el calcio que contienen puede inmovilizar los nutrientes minerales, por lo que su uso agrícola es limitado si no se utilizan técnicas apropiadas, por ello, es preferible mantenerlos con la vegetación original.

En la categoría de Regosoles (del griego *reghos*, manto) se agrupa a los suelos que no pueden ser clasificados dentro de los grupos reconocidos por el Sistema

Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, 2017, en otras clasificaciones se reconocen como Entisoles.

En general, son suelos muy jóvenes que se desarrollan sobre suelo no consolidado, de colores claros y pobres en materia orgánica. Se encuentran en todos los climas, con excepción de zonas de permafrost, y en todas las elevaciones, y son particularmente comunes en las regiones áridas, semiáridas (incluyendo los trópicos secos) y montañosas. Muchas veces se asocian con los Leptosoles y con afloramientos de roca o tepetate.

Los Phaeozem (del griego *phaios*, oscuro y del ruso *zemlja*, tierra) también se forman sobre suelo no consolidado. Se encuentran en climas templados y húmedos con vegetación natural de pastos altos o bosques. Son suelos oscuros y ricos en materia orgánica, por lo que son muy utilizados en agricultura de temporal; sin embargo, las sequías periódicas y la erosión eólica e hídrica son sus principales limitantes. Se utilizan intensamente para la producción de granos (soya, trigo y cebada, por ejemplo) y hortalizas, y como zonas de agostadero cuando están cubiertos por pastos. A nivel mundial, ocupan alrededor de 190 millones de hectáreas, de las cuales cerca de una cuarta parte se encuentra en las pampas argentinas y uruguayas (IUSS, 2007). En México, se distribuyen en porciones del Eje Neovolcánico, la Sierra Madre Occidental, la Península de Yucatán, Guanajuato y Querétaro, principalmente. (Gardi *et al.*, 2014; Bautizta *et al.*, 2000).

Los Calcisoles (del latín, *calx*, cal) son suelos propios de las zonas áridas y semiáridas, frecuentemente asociados a materiales parentales ricos en bases (depósitos aluviales, coluviales y eólicos). En los Calcisoles se desarrollan preferentemente los matorrales xerófilos con arbustos y pastos efímeros. Su potencial agrícola puede ser alto, siempre y cuando se cuente con infraestructura de riego, fertilización y un adecuado drenaje que evite la potencial salinización y el encostramiento superficial originado por el arrastre de las sales y los altos índices de evaporación (IUSS, 2007; Gardi *et al.*, 2014; Bautista *et al.*, 2000).

Los Luvisoles (del latín *luere*, lavar) son suelos que se encuentran sobre una gran variedad de suelos no consolidados, tales como las terrazas aluviales o los depósitos glaciales, eólicos, aluviales y coluviales. Son muy comunes en climas templados y fríos o cálidos húmedos con estacionalidad de lluvia y sequía. Son comunes en bosques de coníferas y selvas caducifolias del sur del país. Se encuentran dentro de los suelos más fértiles, por lo que su uso agrícola es muy elevado y cubre, por lo general, la producción de granos pequeños, forrajes y caña de azúcar. Los Luvisoles se extienden por alrededor de 500 a 600 millones de hectáreas en el mundo (IUSS, 2007). En México, se encuentran en la Sierra Madre Occidental, Guerrero, Oaxaca, Campeche y la Península de Yucatán, entre otras regiones.

Los Vertisoles (del latín *vertere*, invertir) son suelos de climas semiáridos a subhúmedos y de tipo mediterráneo, con marcada estacionalidad de sequía y lluvias. La vegetación natural que se desarrolla en ellos incluye sabanas, pastizales y matorrales. Se pueden encontrar en los lechos lacustres, en las riberas de los ríos o en sitios con inundaciones periódicas. Se caracterizan por su alto contenido de arcillas que se expanden con la humedad y se contraen con la sequía, lo que puede ocasionar grietas en esta última temporada. Esta propiedad hace que, aunque son muy fértiles, también sean difíciles de trabajar debido a su dureza durante el estiaje y a que son muy pegajosos en las lluvias (IUSS, 2007). A nivel mundial ocupan alrededor de 335 millones de hectáreas, de las cuales cerca de la mitad se destinan al cultivo de maíz (IUSS, 2007; Gardi *et al.*, 2014; Bautizta *et al.*, 2000).

1.2 Pasivos ambientales

La contaminación ambiental es el daño causado al ambiente, por la introducción de agentes contaminantes que producen un desequilibrio al estado natural de los recursos que conforman el ambiente (Albert, 1997). La contaminación se imputa al aumento de las poblaciones y a la actividad industrial, siendo esta última un creador de los altos índices de contaminación en aire, agua y suelo. Por esta razón se dice, que la contaminación ambiental surgió a raíz de la aparición de la revolución industrial que se dio a mediados del siglo XVIII, tras la invención de la máquina de vapor (De Borjas, 2010).

Los pasivos ambientales son las consecuencias de los daños causados al ambiente, así mismo estos deterioran la calidad de vida de los seres humanos. En este contexto, los pasivos ambientales se definen como “la suma de los daños no compensados producidos por una empresa al ambiente a lo largo de su historia, en su actividad normal o en caso de accidente (Russi & Martinez, 2002).

Diferentes organismos internacionales tales como: la Working Group on Environmental Auditing (WGEA), UNESCO, OMS, son los que hacen referencia de la necesidad de establecer procedimientos precisos para evitar y minimizar los daños ambientales, en Latino América son pocos los países que han decretado en sus leyes la necesidad de indemnizar y reparación del daño al medio ambiente por un pasivo ambiental, tales como: EPA en Estados Unidos, CONAMA en Brasil, secretarías de medio ambiente en México, Chile, Perú, Colombia y Argentina.

Existen muchas definiciones de pasivos ambientales en el mundo, pero todas hacen referencia a un daño ambiental al que hay que resarcir, sin enfocarse en contaminantes específicos ya que las mismas definiciones mencionan que son por actividades de carácter antropogénico por un mal manejo de sus desechos, y el enfocarse en un solo tipo de pasivo ambiental aumenta el número de combinaciones que puedan surgir ya que son causados por diferentes tipos de contaminantes.

1.3 Destino ambiental de los pasivos ambientales

En México el desarrollo de las industrias en sus inicios y sin un marco jurídico y normativo que regulara el manejo y derrame de materiales y residuos peligrosos acumuló la generación de grandes cantidades de suelos contaminados haciendo de esto una mala práctica, algo común que no generaba un costo para las empresas.

El marco jurídico con respecto a lo ambiental en nuestro país ha ido evolucionando con el propósito de atender a la problemática ambiental de suelos contaminados, en la actualidad en nuestro país de acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Peligrosos (LGPGIR) marcado en el Artículo 6 menciona que: La Federación, las entidades federativas y los municipios, ejercerán sus atribuciones en materia de prevención de la generación, aprovechamiento, gestión integral de los residuos, de prevención de la contaminación de sitios y su

remediación, de conformidad con la distribución de competencias prevista en esta Ley y en otros ordenamientos legales.

Esta gestión es atendida por Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) la cual tiene dos clasificaciones: a) emergencias ambientales y b) pasivos ambientales, según sean el origen, causa y antigüedad de la contaminación

a) Emergencia ambiental: cuando la contaminación del sitio se derive de una circunstancia o evento indeseado o inesperado, que ocurra repentinamente y traiga como resultado la liberación no controlada, incendio o explosión de uno o varios materiales o residuos peligrosos que afecten la salud humana o el medio ambiente, de manera inmediata.

b) Pasivo ambiental: aquellos sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos que no fueron remediados por las industrias oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación.



Figura 2 Mancha de un pasivo ambiental en suelo de taller mecanico clausurado (QUADRIN,2015).

En México existe la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR) de SEMARNAT. La DGGIMAR, a través de la Dirección de Remediación de Sitios Contaminados, evalúa y dictamina propuestas específicas de remediación de suelos contaminados considerados pasivos ambientales, contenidas en los programas de remediación correspondientes.

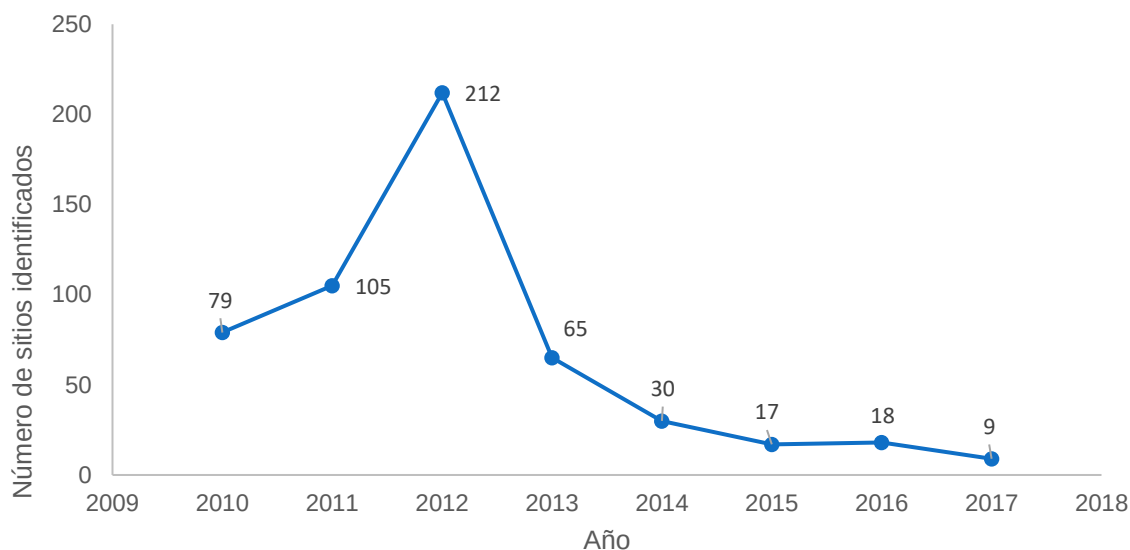


Figura 3 Sitios identificados como PA por el DGGIMAR a nivel nacional, 2017(Elaboracion apartir de SEMARNAT,2018).

A pesar de la ardua labor de las diferentes secretarias aun no es suficiente ya que se sabe que en México existen más de 48 mil talleres mecánicos registrados como unidades económicas por el DENUE tan solo en el 2017 y tan solo el 4% tienen capacitación.

1.4 Legislacion ambiental de los suelos contaminados considerados como pasivos ambientales

1.4.1 Remediación de suelos contaminados considerados pasivos ambientales.

Las actividades serán variables de acuerdo ala dificultad del suelo contaminado a remediar, las condiciones climáticas, el tipo de contaminante y causas que originaron la contaminación. No obstante, estos PA pueden evaluarse y determinar la solución mas efectiva para su remediación, para lo cual deben ser considerados los siguientes criterios:

- 🔴 Tipo de contaminante: características físicas y químicas
- 🔴 Tipo de suelo: las características naturales del suelo determinaran las particularidades de los procesos de tratamiento para su aplicación, siendo un criterio en la selección del tipo de proceso a utilizar.

- ✿ Localización y uso de suelo: estos factores inciden fundamentalmente en los niveles de remediación y los métodos que pueden emplearse para correcta remediación.
- ✿ Tecnologías: estos procesos tienen como fin disminuir la concentración del contaminante, separar o eliminarlo, transformándolos en compuestos no dañinos para el medio ambiente, la selección de la tecnología dependerá de los criterios ya antes mencionados.

Los procesos de tratamiento para la remediación del suelo pueden clasificarse en dos ramas distintas:

1. Lugar en donde se aplicará el proceso:

- ✿ Proceso de remediación en el sitio: el proceso de tratamiento es aplicado en el sitio contaminado.
- ✿ Proceso de remediación al lado del sitio: el proceso de tratamiento se aplica cuando el suelo contaminado se remueve y se traslada a un área adyacente de la excavación.
- ✿ Proceso de remediación fuera del sitio: el proceso de tratamiento se aplica cuando el suelo contaminado se remueve y se transporta a una planta de tratamiento en una instalación fija autorizada para ser sometido a tratamiento.

2. Tipo de tratamiento

- ✿ Tratamientos biológicos
- ✿ Tratamientos físicos
- ✿ Tratamientos químicos
- ✿ Tratamientos térmicos

En México operan 227 empresas autorizadas por SEMARNAT, para brindar diferentes procesos de tratamiento para la remediación de suelos contaminados.

1.4.2 Responsables de la remediación de un suelo contaminado considerado pasivo ambiental.

De acuerdo con los artículos 68,69 y 70 de la LGPGIR los responsables de un sitio contaminado considerado pasivo ambiental y que están obligados a llevar a cabo las acciones de remediación conforme a lo dispuesto en la presente Ley y demás disposiciones aplicables son:

-  Toda aquella persona físico o moral que, directa indirectamente contamine un sitio u ocasione un daño o afectación al ambiente.
-  Las personas responsables de actividades relacionadas con la generación y manejo de materiales y residuos peligrosos que hayan ocasionado la contaminación.
-  Los propietarios o poseedores de predios de dominio privado y los titulares de áreas concesionadas, cuyos suelos se encuentren contaminados.

1.5 Aceites lubricantes

Se llama aceite lubricante (AL) a toda sustancia sólida, semisólida o líquida o gaseosa de origen animal, mineral o sintético, que puesto entre dos piezas con movimiento entre ellas, reduce el rozamiento y facilita el movimiento, el cual ayuda a incrementar la potencia del vehículo reduciendo así la fricción y sus consecuencias como lo son: calor excesivo, desgaste, ruido, golpes, vibración, el aceite lubricante tanto para uso en automóviles e industrias, esta compuesto por una mezcla de base orgánicas y aditivos, estos últimos son utilizados para aumentar su rendimiento, eficiencia y vida útil tanto al motor como al mismo lubricante (Viterio & Jaramillo, 2011; Díaz, 2006; Ruiz, 1999).

La base orgánica de los AL es de origen mineral y es obtenida por la destilación de hulla, pizarra y principalmente crudo de petróleo que esta compuesta por hidrocarburos (hidrogenos y carbonos), oxígeno, azufre y nitrógeno, el petróleo representa del 80-90% del la composición de los lubricantes (Viterio & Jaramillo, 2011).

Los diferentes AL que existen en el mercado poseen distintas características de acuerdo a la función que desempeñe dentro del motor, sin embargo el objetivo de todos los AL es crear una fina película de interposición, entre las piezas o superficies metálicas que pudieran entrar en contacto, evitando el desgaste del motor (Ruiz, 1999).

Los lubricantes realizan diversas funciones entre las cuales se puede mencionar entre otras (Viterio & Jaramillo, 2011; Díaz, 2006; Ruiz, 1999):

- I. Sellar el espacio entre piezas: Dado que las superficies metálicas son irregulares a nivel microscópico, el lubricante llena los huecos. En los motores de explosión este sellado evita fugas de combustible y gases de escape y permite un mejor aprovechamiento de la energía.
- II. Mantener limpio el circuito de lubricación: en el caso de los lubricantes líquidos estos arrastran y diluyen la suciedad, depositándola en el filtro.
- III. Contribuir a la refrigeración de las piezas: En muchos sistemas, de hecho, el lubricante es además el agente refrigerante del circuito. Transferir potencia de unos elementos del sistema a otros: Tal es el caso de los aceites hidráulicos

1.5.1 Estado físico de los aceites lubricantes

Como se señaló precedentemente, los lubricantes se clasifican de acuerdo a su estado físico en, gaseosos, líquidos, semisólidos y sólidos, siendo sus características básicas las que se indican a continuación. Industrialmente los lubricantes líquidos y semisólidos son los mas utilizados y los restantes tienen una ocupación mas específica en determinados procesos (Viterio & Jaramillo, 2011).

- a) Gaseosos: Como su nombre lo indica, estos lubricantes se encuentran en su fase gaseosa. El mas utilizado es el aire que se utiliza a presión formando un colchón entre los elementos en movimiento, pero además se utiliza el Helio y el Neón.
- b) Líquidos: Los mas utilizados son los derivados del petróleo, están constituidos por un aceite base al que le agregan aditivos, para de esta forma lograr características específicas.

Dentro de los lubricantes líquidos se encuentran cuatro grupos, de acuerdo al origen del aceite base y que son los lubricantes minerales, grasos, compuestos y sintéticos

- c) Semisólidos: Normalmente poseen una viscosidad mayor que los lubricantes líquidos. Se generan de un aceite base y se les incorporan jabones espesantes, que le dan una mayor consistencia, por lo que la película lubricante permanece por mas tiempo sobre la superficie lubricada. Esta clase de lubricantes engloba principalmente a las grasas.
- d) Sólidos: Generan películas lubricantes fuertemente unidas a las superficies metálicas, dando lugar a coeficientes de fricción muy bajos. Están constituidos por minerales, tales como el grafito, disulfuro de molibdeno, la mica y el talco.

1.5.2 Clasificación de la composición natural de los aceites naturales

La mayoría de los AL están conformados por una base mineral, sintética o vegetal, estas propiedades brindan una correcta lubricación, garantizando y evitando un desgaste pronto de los metales que se encuentran en contacto ().

Aceites parafínicos. Estos aceites tienen una base de crudo con cadenas de hidrocarburos abierta y saturadas que tienen índices de viscosidad altos, teniendo temperaturas de ignición e inflamación muy altas, estos AL son apropiados para trabajar en motores de combustión interna (Suárez, 2012).

Aceites nafténicos. La base de este tipo de aceites poseen cadenas cerradas de hidrocarburos y su índice de viscosidad es bajo, estos tipos de AL se evaporan de una manera muy limpia de las superficies, producen cantidades pequeñas de carbón evitando el atascamiento de los anillos en el caso de los motores de combustión interna (Benlloch, 2010).

Aceites aromáticos. Estos proceden de crudos asfálticos y tienen muy bajo índice de viscosidad normalmente no se emplean en aceites para motores, sino para transmisión, en cajas de velocidad, los hidrocarburos aromáticos son muy susceptibles a la oxidación con formación de ácidos orgánicos (Benlloch, 2010).

2.5.3 Clasificación de los aceites lubricantes

Con el fin de asignar una clasificación para los distintos tipos de AL varias asociaciones internacionales han desarrollado clasificaciones comerciales de acuerdo con un parámetro específico como: Estados Unidos la Society of Automotive Engineers (SAE); la International Standard Organization (ISO) y la American Gear Manufacturers Association (AGMA) clasifican a los lubricantes en función de su viscosidad. También el American Petroleum Institute (API) ha creado un sistema de clasificación para los lubricantes en función del destinatario del aceite (Díaz, 2006).

Normas SAE (Viterio & Jaramillo, 2011; Díaz, 2006): La clasificación de los aceites según su viscosidad fue desarrollada por la SAE y se conoce mundialmente como la norma SAE J300. Esta clasificación define dos grupos de viscosidades: 6 grados de viscosidad a bajas temperatura o grados de invierno que están seguidos por la letra W (Winter por invierno en inglés) y 5 grados de viscosidad de alta temperatura o grados de verano, que se identifican con un número solo, y representando cada número SAE un rango de viscosidad expresada en cSt (centi-Stokes) y medida a 100°C.

En esta clasificación no interviene ninguna consideración de calidad, composición química o aditivación, sino que se basa exclusivamente en la viscosidad.

La norma SAE J 300 definió lo que se denomina "Grado de viscosidad" para cada lubricante Ej.: S.A.E. 40 (grado de viscosidad para el verano).

Cuanto más elevado es el número, mejor es el mantenimiento de la viscosidad a altas temperaturas. En el caso de uso urbano o deportivo, o cuando la temperatura del aire es elevada, el motor soporta altas temperaturas que acentuarán dicho fenómeno. También es importante para la protección del motor la utilización de un aceite que se mantenga lo suficientemente viscoso.

Cuanto menor es el número mayor es la fluidez del aceite a baja temperatura o en el momento del arranque. Los aceites monogrados son utilizados cuando la temperatura de funcionamiento varía poco (o en aplicaciones específicas).

Los aceites multigrados responden a la vez a una graduación de invierno y una de verano. Ej.: S.A.E. 10W 40 10W= Graduación de invierno 40= Graduación de verano. El aceite multigrado es menos sensible a la temperatura. Esto significa que en invierno permite un arranque fácil gracias a su fluidez.

Tabla 2 Definición de grados SAE de viscosidad para aceites de motor

Grados SAE	Viscosidad Max Cp	Temperatura °C	Temperatura Limite de Bombeo	Viscosidad Cst 100°C	
				Minimo	Maximo
0 W	3250	-30	-35	3.8	-
5W	3500	-25	-30	3.8	-
10W	3500	-20	-25	4.1	-
15W	3500	-15	-20	5.6	-
20W	4500	-10	-15	5.6	-
25W	6000	-5	-10	9.3	-
20	-	-	-	5.69.	9.3
30	-	-	-	9.3	12.5
40	-	-	-	12.5	16.3
50	-	-	-	16.3	21.3
60	-	-	-	21.9	26.1

W: frio, fuente: www.SAE.org

Normas ISO (Viterio & Jaramillo, 2011; Díaz, 2006): Los aceites industriales se clasifican según las Normas Internacionales para la Estandarización (ISO), vigentes desde 1975, pero puestas en práctica a partir de 1979. Antes de implementarlas, los fabricantes de aceites especificaban sus productos con un nombre y un número, el cual no daba ninguna información acerca de su viscosidad. Por lo tanto, era frecuente encontrar aceites especificados de la siguiente manera. Tellus 41, teresso 72, Macoma 45, Turbina 81, DTE Light, etc.

El sistema ISO clasifica los aceites industriales en Centistokes a 40°C. Este sistema permite una mayor facilidad en cuanto al manejo de los lubricantes porque evita la posibilidad de una mala utilización de los aceites por parte del usuario.

Además facilita hallar el equivalente de mejor manera, puesto que el nombre del aceite debe ir acompañado de un número que indica la viscosidad en el sistema ISO. Así por ejemplo, si se tiene el aceite Tellus 68 (de la Shell) y se sabe que este fabricante ya adopto el sistema ISO, el numero 68 indica que se trata de un aceite con una viscosidad de 68 cSt, a 40°C. En la tabla se especifican los diferentes grados de viscosidad en el sistema ISO.

Tabla 3 Clasificación de viscosidad en el sistema ISO

Grado ISO	cSt/40°C		ssu/100°F (37.8°C)		ss/210°F (98.7°C)	
	Minmo	Maximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
2	1.98	2.42	32.8	34.4	-	-
3	2.88	3.52	36.0	38.2	-	-
5	4.14	5.06	40.4	43.5	-	-
7	6.12	7.48	47.2	52.0	-	-
10	9.00	11.00	57.6	65.3	34.6	35.7
15	13.50	16.50	75.8	89.1	37.0	38.3
22	19.80	24.20	105.0	126.0	39.7	41.4
32	28.80	35.20	149.0	182.0	43.0	45.0
46	41.40	50.60	214.0	262.0	47.1	49.9
68	61.20	74.80	317.0	389.0	52.9	56.9
100	90.0	110.0	469.0	575.0	61.2	66.9
150	135.0	165.0	709.0	871.0	73.8	81.9
220	198.0	242.0	1047.0	1283.0	90.04	101.0
320	288.0	352.0	1533.0	1881.0	112.0	126.0
460	414.0	506.0	2214.0	2719.0	139.0	158.0
680	612.0	748.0	3298.0	4048.0	178.0	202.0
1000	900.0	1100.0	4864.0	5975.0	226.0	256.0
1500	1350.0	1650.0	7865.0	9079.0	291.0	331.0

Clasificación AGMA (Viterio & Jaramillo, 2011; Díaz, 2006): Graduación de la viscosidad del aceite para engranajes mostarado en la Tabla 5 análogo a la clasificación SAE del aceite para motor.

Tabla 4 Especificación estandar AGMA

AGMA No.	Rango de viscosidad		Agma No.
	SUS	Centistokes	
1	180-240 / 100°F	36.-51.7 / 38°C	-
2	280-360 / 100°F	60.4-77.7 / 38°C	2EP**
3	490-700 / 100°F	105.7-151 / 38°C	3EP
4	700-1000 / 100°F	151-216 / 38°C	4EP
5	80-105 / 210°F	15.5-21.5 / 99°C	5EP
6	105-125 / 210°F	21.5-26.1 / 99°C	6EP
7	125-150 / 210°F	26.1-31.7 / 99°C	7EP
8	150-190 / 210°F	31.7-40.5 / 99°C	8EP
8	190-250 / 210°F	40.5-53.5 / 99°C	8EP

COMP* Compuesto de 8-10% de aceites grasos o sintéticos para brindar mayor lubricación en donde es deslizamiento es extremo, EP** Presión extrema.

Clasificación API (Viterio & Jaramillo, 2011; Díaz, 2006): Para establecer un sistema de clasificación según la calidad, la API (American Petroleum Institute) ha diseñado una nomenclatura según el tipo de motor al que se le va a aplicar el lubricante. De esta forma, para motores a gasolina se estableció la letra "S" de Spark (chispa en inglés) para relacionar con el principio de ignición por chispa que se utiliza en este tipo de motores, seguida de las letras "A" hasta la "L" para representar la evolución en orden alfabético de los grados de clasificación que se han desarrollado en forma sucesiva, siendo mayores los requerimientos por calidad a medida que progresa la letra del alfabeto. En la siguiente Tabla 6, se puede apreciar la evolución de la clasificación API de los aceites para motores a gasolina.

En cuanto a los aceites para motores diesel, la nomenclatura utiliza la letra "C" de la palabra inglesa Compression por tratarse de aceites para motores cuyo principio de ignición es por compresión y una letra en serie alfabética que representa la evolución del nivel de calidad Tabla 7.

API clasifica sus aceites para engranajes con las letras GL (Gear lubricant:) que son aceites para transmisión y diferenciales el Tabla 8 muestra dicha clasificación.

Tabla 5 Clasificación de servicio API para motores de gasolina

Sistema de clasificación para aceites de motor		
"S" Spark: combustión por chispa		Periodo de validez
SA	Antigüedad para servicios de motores a gasolina diesel	-1950
SB	Servicio en motores a gasolina de trabajo ligero	1950-1960
SC	Servicio de mantenimiento por garantía en motores a gasolina modelo 1968	1960-1964
SD	Servicio de mantenimiento por garantía en motores a gasolina modelo 1970	1965-1970
SE	Servicio de mantenimiento por garantía en motores a gasolina modelo 1972	1971-1980
SG	Servicio de mantenimiento por garantía en motores a gasolina modelo 1980	1981-1987
SH	Servicio de mantenimiento por garantía en motores a gasolina modelo 1989	1988-1992
SH	Servicio de mantenimiento por garantía en motores a gasolina modelo 1993	1993-1996
SJ	Servicio de mantenimiento por garantía en motores a gasolina modelo 1996	1997-2000
SL	Servicio de mantenimiento por garantía en motores a gasolina modelo 2001	2001-

* En tanto no exista una categoría de servicio a la SL, se recomienda el uso de esta para motores de vehículos último modelo y años anteriores.

Tabla 6 Clasificación de servicio API para motores diesel.

Sistema de clasificación para aceites de motor		
"C" Combustión por compresión		Periodo de validez
CA	Servicio de motores diesel de trabajo ligero, combustible de alta calidad	-1950
CB	Servicio de motores diesel de trabajo ligero, combustible de baja calidad	1950-1952
CC	Servicio de motores diesel y gasolina	1952-1954
CD	Servicio de motores diesel	1955-1987
CD II	Servicio de motores diesel de dos tiempos	1955-1987
CE	Servicio de motores diesel de trabajo pesado	1987-1992
CF-4	Servicio de motores de trabajo pesado de dos tiempos	1992-1994
CF	Servicio típico de motores diesel de 4 tiempos de inyección	1992-1994
CF-2	Servicio para motores de diesel de dos tiempos	1992-1994
CG-4	Servicio de motores diesel de cuatro tiempos de alta velocidad	1995-2000
CH-4	Servicio de motores diesel de cuatro tiempos de alta velocidad	2001-2002
CI-4	Servicio de motores diesel de cuatro tiempos de inyección de alta velocidad	2002-

Tabla 7 Clasificación de servicio API para engranajes

Clasificación	Tipo	Aplicación
GL-1	Aceite mineral puro	Transmisión de camiones
GL-2	Contiene materiales grasos	Transmisiones sin fin, aceite para engranajes industriales
GL-4	Equivalente a la especificación MIL-L 2105 (OBSOL)	Transmisiones: engranajes cónicos en espiral
GL-5	Equivalente a la especificación presente MIL-L-2105C/D	Uso en engranajes hipoidales de servicio moderado y severo
PG-1	Limpieza a alta temperatura y estabilidad a la oxidación	Camiones de trabajo pesado
PG-2	Propiedades de alta temperatura y compatibilidad con sellos de aceite	Diferenciales en camiones de trabajo pesado y buses que utilizan engranaje cónicos

G: Gear (engranaje), L: Lubricante

1.5.4 Aditivos

Los aditivos, como su nombre lo indica, corresponden a sustancias químicas que agregadas al aceite base, logran por una parte mejorar las especificaciones técnicas de los lubricantes, y por otra conferirle propiedades que refuerzan a las existentes y también en algunos casos estabilizar otras propiedades. Además reducen los cambios indeseables en el lubricante. En resumen los aditivos que son incorporados a los aceites mejoran la calidad técnica de los lubricantes.

Existen de dos tipos de aditivos, los químicamente inertes y los químicamente activos. En promedio los aditivos constituyen un 5% a 20% del lubricante. A un aceite comercial no deberán agregarse aditivos extras. Los productos químicos que componen los aditivos compiten unos con otros por espacio sobre las superficies en movimiento, y dentro del aceite mismo. Los aditivos extras pueden destruir el equilibrio del conjunto, resultando un aceite con más aditivos, pero que brinda un rendimiento más pobre que el original.

En general, los aditivos proveen las cualidades necesarias a un aceite, pero interfieren con el proceso mismo de lubricación de las partes móviles.

Menor cantidad de aditivos junto con una base superior dará una lubricación más efectiva que más aditivos en una base mediocre. Algunos aditivos pueden reaccionar químicamente con las partes internas de ciertas piezas del equipo.

En la actualidad existen una infinidad de aditivos para mejorar las características de los Aceites, estos se pueden clasificar de la siguiente manera (Viterio & Jaramillo, 2011; Díaz, 2006; Caines, 2001):

- a) **Mejorador del IV (índice de viscosidad):** Los mejoradores del índice de viscosidad, son una clase de aditivos que mejoran las características de la relación viscosidad-temperatura del lubricante. Esta modificación de las propiedades reológicas resultan en un incremento de la viscosidad a todas las temperaturas. El incremento en la viscosidad es más pronunciado a altas temperaturas, lo cual mejora sensiblemente el índice de viscosidad del lubricante.

Esto se manifiesta por un decrecimiento en la pendiente de la curva viscosidad temperatura.

- b) **Aditivos EP (Presión extrema):** Reacciona con la superficie de metal asegurando una película de lubricante para hacer frente a cargas aún mayores, que las que permiten los aditivos que operan sobre la resistencia de la película fluida.
- c) **Aditivos antiespuma:** Promueven el más rápido rompimiento de las burbujas de espuma por debilitamiento de las películas de aceite entre estas mismas burbujas. La espuma es causada por agitación del aceite y atrapamiento de aire.
- d) **Aditivos inhibidores de oxidación:** Interrumpen la reacción en cadena de oxidación para evitar o desacelerar el rompimiento de la molécula de aceite asociado con el ataque del oxígeno. Entre los antioxidantes mas conocidos se encuentran los de tipo fenólicos y los ditiofosfatos de zinc, estos no solo inhiben la oxidación sino que también forman una capa protectora sobre la superficie de los elementos de máquina haciéndoles impenetrables al ataque de los ácidos.
- e) **Aditivos reductores de fricción o antidesgaste:** Forman una película que se adhiere fuertemente a las superficies del metal. Reducen el contacto metal con metal, disminuyendo así el desgaste y la fricción.
- f) El contacto metal con metal puede ser prevenido adicionando compuestos formadores de capas que protejan la superficie, bien por absorción física o por reacción química. Los ditiofosfatos de zinc se usan ampliamente para este propósito. Otros aditivos contienen fósforo, azufre, o combinaciones de estos elementos. El desgaste por corrosión se puede prevenir usando aditivos alcalinos tales como fenatos básicos y sulfonatos.
- g) **Aditivos detergentes:** Se utilizan en los lubricantes ya que existe una variedad de efectos que tienden a causar el deterioro del aceite, además de la formación de depósitos nocivos. El detergente previene o reduce la cantidad de depósitos formados bajo condiciones de temperaturas elevadas.

Los aditivos detergentes mantienen partículas potenciales de lodo en suspensión, para evitar que se asienten y formen depósitos en el equipo. Además los detergentes pueden reducir la corrosión de los cojinetes neutralizando los ácidos corrosivos.

- h) **Aditivos antióxido:** El aditivo cubre las superficies de metal. Desplaza el agua, protegiendo como una fina película al metal, de la acción del líquido.
- i) **Aditivos demulsificantes:** Habilita al agua para escurrirse en gotas con más facilidad, mientras mejor sea la demulsibilidad del lubricante mas rápidamente se separará del agua cuando ambos se encuentren mezclados.
- j) **Aditivos depresores del Punto de Fluencia:** Los depresores del punto de fluencia previenen la congelación del aceite a bajas temperaturas. Este fenómeno se asocia con la cristalización de las ceras de parafina que están presentes en las fracciones de aceite mineral. Para lograr bajos puntos de fluencia, las refinerías eliminan los constituyentes que contienen ceras, los cuales solidifican a temperaturas relativamente altas, mediante un proceso conocido como descerado. El descerado completo podría reducir el rendimiento del aceite a un nivel no económico. Por lo tanto el proceso de descerado se mejora usando aditivos que bajan el punto de fluencia del aceite.

1.6 Tecnologías de remediación de suelos

El término «tecnología de tratamiento» implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA, 2001). Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en tierra de desechos peligrosos que no han sido tratados, y sus capacidades o posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente. Como ya se mencionó, el uso de una tecnología de remediación en particular depende, además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante, de su disponibilidad, de la fiabilidad demostrada o proyectada, de su estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo (Sellers, 1999).

1.7 Tipos de tratamientos

Los principios de las tecnologías de remediación se clasifican entre tipos de tratamiento de acuerdo con su efecto fundamental de acción.

-  Tratamientos biológicos (biorremediación). Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.
-  Tratamientos fisicoquímicos. Este tipo de tratamientos utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.
-  Tratamientos térmicos. Utilizan calor para incrementar la volatilización (separación), quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo.

Tabla 2 Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación.

Tratamientos	Ventajas		Desventajas	
Biológicos	✓	Bajo costo	✗	Requieren mayor tiempo de tratamiento, dependiendo el microorganismo
	✓	Tecnología amigable con el ambiente		
	✓	Los contaminantes son destruidos		
	✓	Se requiere mínimo o ningún tratamiento posterior		
Fisicoquímicos	✓	Bajo costo	✗	Los residuos generados por las técnicas de separación requieren un segundo tratamiento elevando el costo
	✓	Periodos cortos		
	✓	El equipo es accesible y no necesita mucha energía	✗	Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes y necesitan sistemas de recuperación elevando el costo
Térmicos	✓	No requiere ningún tratamiento posterior	✗	Es el grupo de tratamientos más costoso

1.7.1 Tratamientos biológicos (biorremediación)

El término biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía (Van Deuren *et al.* 1997). Las rutas de biodegradación de los contaminantes orgánicos varían en función de la estructura química del compuesto y de las especies microbianas degradadoras.

El proceso de biorremediación incluye reacciones de oxido-reducción, procesos de sorción e intercambio iónico, e incluso reacciones de acomplejamiento y quelación que resultan en la inmovilización de metales (Eweis *et al.* 1998).

La biorremediación puede emplear organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), puede realizarse in situ o ex situ, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno) (Eweis *et al.* 1998).

Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo (HTP), solventes (benceno y tolueno), explosivos (TNT), clorofenoles (PCP), pesticidas (2,4-D), conservadores de madera (creosota) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Van Deuren *et al.* 1997, Semple *et al.* 2001).

1.7.1.1 Tecnologías in situ

Las técnicas in situ buscan estimular y crear un ambiente favorable para el crecimiento microbiano a partir de los contaminantes. Este objetivo generalmente puede lograrse con el suministro de aire u oxígeno (bioventeo), nutrientes (bioestimulación), microorganismos (bioaumentación) y/o humedad, además del control de temperatura y pH (EPA, 2001).

Bioventeo El bioventeo es una tecnología relativamente nueva, cuyo objetivo es estimular la biodegradación natural de cualquier compuesto biodegradable en condiciones aerobias. El aire se suministra en el sitio contaminado a través de pozos de extracción, por movimiento forzado (extracción o inyección), con bajas velocidades de flujo, con el fin de proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores (Van Deuren *et al.* 1997). Aplicaciones. Se utiliza para tratar compuestos orgánicos biodegradables semivolátiles (COS) o no volátiles. Además de favorecer la degradación de contaminantes adsorbidos, pueden degradarse COV, por medio de su movimiento a través del suelo biológicamente activo (Eweis *et al.* 1998).

Se ha utilizado con éxito para remediar suelos contaminados con HTP, solventes no clorados, pesticidas y conservadores de la madera, entre algunos otros químicos (Van Deuren *et al.* 1997).

Bioestimulación La bioestimulación implica la circulación de soluciones acuosas (que contengan nutrientes y/u oxígeno) a través del suelo contaminado, para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos, y mejorar así la biodegradación de contaminantes orgánicos o bien, la inmovilización de contaminantes inorgánicos in situ (Van Deuren *et al.* 1997).

Aplicaciones. Se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con gasolinas, COV, COS y pesticidas (Alexander, 1994). Estudios a escala piloto, han mostrado la biodegradación de suelos contaminados con desechos de municiones. Limitaciones. Esta tecnología no es recomendable para suelos arcillosos, altamente estratificados o demasiado heterogéneos, ya que pueden provocar limitaciones en la transferencia de O₂. Otros factores que pueden limitar su aplicación incluyen: (i) que el tipo del suelo no favorezca el crecimiento microbiano; (ii) incremento en la movilidad de los contaminantes; (iii) obstrucción en los pozos de inyección provocada por el crecimiento microbiano.

Bioaumentación. Esta tecnología se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado, o cuando la microflora autóctona es insuficiente en número o capacidad degradadora.

Consiste en la adición de microorganismos vivos, que tengan la capacidad para degradar el contaminante en cuestión, para promover su biodegradación o su biotransformación. El tamaño del inóculo a utilizar depende del tamaño de la zona contaminada, de la dispersión de los contaminantes y de la velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores (Riser-Roberts, 1998). Aplicaciones. Se ha usado para tratar suelos contaminados con herbicidas (2,4-D, clorofam), insecticidas (lindano, clordano, paratión), clorofenoles (PCP) y nitrofenoles, BPC, HTP y HAP (Alexander, 1994). También se ha aplicado efectivamente para tratar desechos con concentraciones relativamente altas de metales (Eweis *et al.* 1998).

Biolabranza. Durante el proceso de biolabranza, la superficie del suelo contaminado es tratado en el mismo sitio por medio del arado. El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, y se remueve periódicamente para favorecer su aireación. Las condiciones del suelo (pH, temperatura, aireación) se controlan para optimizar la velocidad de degradación y generalmente se incorporan cubiertas u otros métodos para el control de lixiviados (Riser-Roberts, 1998). La diferencia entra la biolabranza y el composteo, es que en la biolabranza, se mezcla el suelo contaminado con suelo limpio, mientras que el composteo generalmente se realiza sobre el suelo (Van Deuren *et al.* 1997).

Fitorremediación. La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto in situ como ex situ. Los mecanismos de fitorremediación incluyen la rizodegradación, la fitoextracción, la fitodegradación y la fitoestabilización (Van Deuren *et al.* 1997, Hutchinson 2001). La rizodegradación se lleva a cabo en el suelo que rodea a las raíces. Las sustancias excretadas naturalmente por éstas, suministran nutrientes para los microorganismos, mejorando así su actividad biológica. Durante la fitoextracción, los contaminantes son captados por las raíces (fitoacumulación), y posteriormente éstos son traslocados y/o acumulados hacia los tallos y hojas (fitoextracción).

En la fitoestabilización, las plantas limitan la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo, debido a la producción en las raíces de compuestos químicos que pueden adsorber y/o formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos así en la interfase raíces-suelo (Sellers, 1999). La fitodegradación consiste en el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos de la planta, a través de enzimas que catalizan su degradación.

1.7.1.2 Tecnologías ex situ

Los procesos de biorremediación ex situ, incluyen: (i) procesos de biodegradación en fase de lodos, en donde el suelo se mezcla con agua (para formar un lodo), microorganismos y nutrientes; y (ii) de biodegradación en fase sólida, en donde los suelos colocan en una celda de tratamiento (composteo) o sobre membranas impermeables (biolabranza), en donde se agrega agua y nutrientes (EPA, 2001).

Biorremediación en fase sólida (composteo). El composteo es un proceso biológico controlado, por el cual pueden tratarse suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables, para obtener subproductos inocuos estables. El material contaminado se mezcla con agentes de volumen (paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas), que son sustancias orgánicas sólidas biodegradables, adicionadas para mejorar el balance de nutrientes, así como para asegurar una mejor aireación y la generación del calor durante el proceso.

Los sistemas de composteo incluyen tambores rotatorios, tanques circulares, recipientes abiertos y biopilas (Alexander, 1994, Eweis *et al.* 1998, Semple *et al.* 2001).

Biorremediación en fase de lodos (biorreactores) Los biorreactores pueden usarse para tratar suelos heterogéneos y poco permeables, o cuando es necesario disminuir el tiempo de tratamiento, ya que es posible combinar controlada y eficientemente, procesos químicos, físicos y biológicos, que mejoren y aceleren la biodegradación (Reiser-Roberts, 1998). Es la tecnología más adecuada cuando existen peligros potenciales de descargas y emisiones. Uno de los reactores más utilizados para biorremediar suelos es el biorreactor de lodos, en el cual el suelo contaminado se mezcla constantemente con un líquido,

y la degradación se lleva a cabo en la fase acuosa por microorganismos en suspensión o inmovilizados en la fase sólida. El tratamiento puede realizarse también en lagunas construidas para este fin o bien en reactores sofisticados con control automático de mezclado (Alexander 1994).

1.7.1.3 Factores que influyen en la biorremediación

El proceder de un contaminante en el suelo, así como la eficacia de una tecnología de remediación esta dictaminada por los factores del contaminante y el tipo de suelo de acuerdo con sus características propias de los antes mencionados.

Estas características llevan a una toma de decisión sobre cuál será la mejor tecnología de remediación a utilizar, para ello se estudian las características del contaminante y del suelo, es indispensable obtener una descripción detallada de los siguientes aspectos:

Ubicación geográfica y uso del suelo afectado.

-  Tipo de instalación que dio origen a la contaminación.
-  Magnitud y distribución de la mancha
-  Formas de acceso al sitio, ubicación de poblaciones y cuerpos de agua.
-  Tipo de vegetación, clima y topografía del sitio.
-  Características ecológicas.
-  Características hidrogeológicas (formaciones geológicas, ciclo hidrológico y flujo de cuerpos de agua)

A continuación, se describen algunos de los factores más importantes que deben considerarse para la caracterización del contaminante, así como del sitio a remediar.

Estructura del contaminante. Cada compuesto químico posee características únicas que dictan el mecanismo o combinación de ellos, que controlan su movimiento y degradabilidad. Independientemente de la naturaleza del contaminante, su estructura química determina su polaridad, solubilidad, volatilidad y capacidad para reaccionar con otras sustancias.

Algunos compuestos son altamente resistentes a la transformación, mientras que otros son completamente química o bioquímicamente reactivos (Alexander 1994, Eweis *et al.* 1998, Sellers 1999).

Concentración. La concentración de un compuesto en un suelo es un factor de gran importancia para definir si el sitio puede remediarse con el uso de tecnologías biológicas, o si es necesario utilizar tecnologías fisicoquímicas o térmicas. Por ejemplo, compuestos tolerados a bajas concentraciones por muchos microorganismos, pueden ser tóxicos a concentraciones mayores (Alexander, 1994).

Toxicidad. El factor clave para decidir la remediación de un sitio contaminado, es la toxicidad para los seres vivos. La descarga de químicos tóxicos a un suelo implica, entre muchos otros problemas, que son generalmente resistentes a la biodegradación.

Si el contaminante como tal no es tóxico, algunos de sus componentes pueden ser tóxicos o inhibitorios para ciertos microorganismos, retardando o impidiendo la biodegradación de otros contaminantes degradables (Alexander *op. cit.*).

Solubilidad. Es la cantidad de un compuesto que puede disolverse en agua, es decir, define la disponibilidad potencial de los compuestos en la fase líquida. En general, la solubilidad disminuye al aumentar el tamaño de la molécula, y los compuestos polares son más solubles que los no polares. Por otra parte, para que la transformación biológica de un compuesto se lleve a cabo, es necesario que éste se encuentre en solución, por lo tanto, la biodegradabilidad de un compuesto depende de su solubilidad (Alexander 1994, Eweis *et al.* 1998, Sellers 1999).

Coeficiente de partición octanol/agua (KOW). El KOW indica la hidrofobicidad de una molécula y es un parámetro clave para determinar el destino de ésta en un medio. Es la relación entre la concentración de un compuesto en una fase de octanol y una fase acuosa, en un sistema octanol/agua. En otras palabras, el KOW es una medida de la tendencia de un compuesto para separarse entre una fase orgánica y una acuosa. Los compuestos con valores bajos de KOW (10^4) son considerados hidrofóbicos y tienden a acumularse en superficies orgánicas como

suelos con alto contenido de materia orgánica y especies acuáticas (Van Deuren *et al.* 1997).

Polaridad y carga iónica. Los compuestos no polares tienden a ser hidrofóbicos y se concentran preferencialmente en la materia orgánica del suelo. Los compuestos no polares generalmente tienen menor movilidad en el suelo que los compuestos polares. La carga iónica determina la capacidad de un compuesto para su adsorción en un sólido.

Difusión. La velocidad de movimiento de un contaminante a través del suelo es proporcional a su concentración y a su coeficiente de difusión. La difusión de un contaminante hacia dentro y fuera de los poros del suelo controla su degradación. Es uno de los procesos abióticos que compite más efectivamente con los microorganismos por el sustrato (Alexander, 1994, Riser-Roberts, 1998).

Sorción. Los mecanismos de sorción incluyen la adsorción, que es la atracción de un compuesto hacia una superficie sólida, y la absorción, que es la penetración de un contaminante en un sólido.

La sorción de un químico tiene un gran impacto en su degradación y depende de las propiedades del contaminante y del suelo. La adsorción afecta la volatilización y difusión del contaminante (y por consiguiente su transporte y destino), así como su disponibilidad para microorganismos (Alexander, 1994, Riser-Roberts, 1998).

Volatilización. Es el proceso en el que un químico se mueve de una fase líquida o sólida a la gaseosa. La velocidad de volatilización de un compuesto en el suelo es una función de su concentración, su presión de vapor y su solubilidad. Depende del tipo de compuesto, contenido de humedad, temperatura y porosidad del suelo, contenido de materia orgánica y de arcillas (Eweis *et al.* 1998).

Densidad. La migración de un compuesto inmiscible depende de su densidad y viscosidad. La densidad determina la tendencia de la fase inmiscible a flotar o sumergirse en la superficie del suelo, y por consiguiente el lugar en donde éste quedará concentrado (Bouwer y Zehnder, 1993).

Biodegradabilidad. Es la susceptibilidad de un compuesto para ser transformado a través de mecanismos biológicos. Los compuestos orgánicos metabolizables y no tóxicos, con normalidad son oxidados muy rápidamente por los microorganismos del suelo (Eweis *et al.* 1998). Reacciones de oxidación-reducción. Este tipo de reacciones pueden degradar compuestos orgánicos, o bien, convertir compuestos metálicos a formas que son más o menos solubles que la forma original del contaminante (Sellers, 1999).

El suelo compone el más grande recurso natural y desempeña diversas funciones en la superficie de la Tierra, brinda el soporte mecánico, así como nutrientes para el crecimiento de plantas y macroorganismos. La matriz del suelo está formada por cinco componentes principales: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos. Los materiales minerales son los principales componentes estructurales y constituyen más del 50% del volumen total del suelo.

El aire y el 17 agua juntos ocupan el volumen de los espacios, y usualmente conforman de 25% a 50% del volumen total.

La proporción relativa de aire/ agua fluctúa considerablemente con el contenido de humedad del suelo. El material orgánico ocupa entre 3% y 6% del volumen promedio, mientras que los organismos vivos constituyen menos del 1% (Eweis *et al.* 1998). Todos estos factores definen el tipo de suelo, que junto con las condiciones particulares de un sitio frecuentemente pueden limitar la selección de un proceso de tratamiento en particular.

A continuación, se describen algunos de los datos del suelo, que pueden obtenerse con relativa facilidad y que controlan la eficiencia de una tecnología de remediación.

Tamaño de partícula. Los suelos se clasifican en función de su tamaño de partícula, siendo sus tres principales componentes las arcillas (< 0.002 mm), los sedimentos (0.002 - 0.05 mm) y las arenas (0.05 - 2.0 mm). Es importante considerar esta propiedad, ya que la relación área/volumen de los diferentes tipos de partícula, tienen un impacto directo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por consiguiente en las tecnologías de remediación. En general, los

materiales no consolidados (arenas y gravas finas) son más fáciles de tratar (Van Deuren *et al.* 1997, Eweis *et al.* 1998).

Heterogeneidad. Un suelo demasiado heterogéneo puede impedir el uso de tecnologías in situ que dependan del flujo de un fluido. Pueden crearse canales indeseables de fluidos en las capas arenosas y arcillosas, dando como resultado tratamientos inconsistentes (Van Deuren *et al.* 1997). **Densidad aparente.** Es el peso del suelo por unidad de volumen, incluyendo agua y espacios. Es importante considerar que el suelo está compuesto por sólidos y espacios llenos de agua y/o aire, y que su densidad dependerá de su humedad. Es útil para realizar cálculos para el transporte del material (Van Deuren *et al.* 1997).

Permeabilidad. Se refiere a la facilidad o dificultad con la que un líquido puede fluir a través de un medio permeable. La permeabilidad de un suelo es uno de los factores que controla la efectividad de tecnologías in situ (Sellers, 1999).

En general, una baja permeabilidad en el suelo disminuye la efectividad de la mayoría de las tecnologías de remediación.

pH. El pH determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo (Alexander, 1994). La solubilidad de muchos contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con altos valores de pH.

Humedad. La humedad del sitio a tratar es un factor importante para la elección de una tecnología en particular. Una alta humedad puede impedir el movimiento de aire a través del suelo, lo que afecta los procesos de biorremediación, así como provocar problemas durante la excavación y transporte, además de aumentar costos durante el uso de métodos de remediación térmicos (Van Deuren *et al.* 1997).

Materia orgánica. La fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, que generalmente se le conoce como humus. Un suelo con alto contenido húmico disminuye la movilidad de los compuestos orgánicos y así la

eficiencia de ciertas tecnologías (extracción de vapores, lavado de suelo) (Van Deuren op cit., Eweis op. cit.)

1.7.2 Tratamientos fisicoquímicos

Como ya se mencionó, los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación. Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos cortos, en comparación con las tecnologías de biorremediación. Sin embargo, los costos pueden incrementarse cuando se utilizan técnicas de separación en las que los contaminantes pueden requerir de tratamiento o disposición (Van Deuren *et al.* 1997).

Remediación electrocinética (RE). La remediación electrocinética es una tecnología en desarrollo que aprovecha las propiedades conductivas del suelo, cuyo objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico que permite remover las especies cargadas (iones).

Implica la aplicación de una corriente directa de baja intensidad entre un electrodo positivo y uno negativo (Van Cauwenberghe 1997, Paillat *et al.* 2000). Los iones metálicos, iones amonio y compuestos orgánicos con carga positiva, migran hacia el cátodo; mientras que los aniones como el cloruro, cianuro, fluoruro, nitratos y compuestos orgánicos cargados negativamente se mueven hacia el ánodo (EPA, 2001).

Lavado de suelos, extracción por solvente e inundación de suelos Estas tres tecnologías separan contaminantes orgánicos e inorgánicos del suelo por medio de un líquido de extracción.

El fluido líquido requiere de un tratamiento posterior para remover o destruir los contaminantes. Cada una de estas tecnologías relacionadas entre sí, trabajan de manera diferente sobre los contaminantes (Sellers, 1999).

-  Lavado de suelos. Los contaminantes sorbidos en las partículas finas del suelo son removidos con el uso de soluciones acuosas en un suelo excavado. De esta manera se reduce el volumen del material contaminado, ya que las partículas finas son extraídas del resto del suelo.
-  Extracción por solventes. Este tipo de procesos utiliza solventes orgánicos para disolver los contaminantes y así removerlos del suelo.
-  Inundación del suelo. Grandes cantidades de agua, en ocasiones con algún aditivo, se aplican al suelo o se inyectan en cuerpos de agua cercanos, para aumentar el nivel del agua en la zona contaminada, favoreciendo así el paso de los contaminantes del suelo hacia el cuerpo de agua. Un sistema de inundación debe incluir la extracción y tratamiento del agua contaminada (Sellers 1999: EPA, 2001).

Extracción de vapores (EV). La EV, también conocida como ventilación del suelo, vaporización y volatilización, es una tecnología en la que se aplica un vacío al suelo, para inducir un flujo controlado y continuo de aire, y remover así contaminantes volátiles y semivolátiles del suelo.

La EV usualmente se lleva a cabo in situ. Sin embargo, en algunos casos, puede usarse como una tecnología ex situ (Riser-Roberts, 1998: EPA 2001). La efectividad del sistema de EV depende principalmente de la volatilidad de los contaminantes y de la permeabilidad y homogeneidad del suelo (Sellers, 1999).

Solidificación/estabilización (S/E). La S/E es un proceso en el que el suelo contaminado se mezcla con aditivos para inmovilizar los contaminantes, disminuyendo o eliminando la lixiviación. La solidificación se refiere a las técnicas que encapsulan (atrapan físicamente) al contaminante formando un material sólido, y no necesariamente involucra una interacción química entre el contaminante y los aditivos solidificantes. La estabilización limita la solubilidad o movilidad del contaminante, generalmente por la adición de materiales, como cemento Portland, cal o polímeros, que aseguren que los constituyentes peligrosos se mantengan en su forma menos móvil o tóxica (Sellers, 1999: EPA, 2001). La S/E puede realizarse tanto in situ como ex situ. Para la S/E ex situ, el material a tratar debe excavar

para tratarse, de manera que el material resultante sea dispuesto. En la S/E in situ pueden utilizarse sistemas para cubrir los suelos contaminados sin necesidad de excavar, de manera que el material se deja en el mismo sitio (EPA, 2001).

Separación física Las técnicas de separación buscan concentrar los contaminantes sólidos por medios físicos y químicos. La mayoría de los contaminantes orgánicos e inorgánicos tienden a unirse, química o físicamente, a la fracción más fina del suelo. Las partículas finas de arcillas y sedimentos pueden separarse de arenas y gravas gruesas para concentrar los contaminantes en volúmenes menores de suelo. De esta manera, el volumen de suelo obtenido puede tratarse o disponerse. La separación ex situ puede realizarse por varios procesos. La separación por gravedad (por diferencia de densidad entre fases) y la separación por tamaño de partícula (concentración de contaminantes en volúmenes menores) son dos procesos bien desarrollados. En cambio, la separación magnética (extracción de partículas magnéticas) es un proceso mucho más novedoso que aún se encuentra en desarrollo (EPA, 2001).

1.7.3 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos ofrecen tiempos muy rápidos de limpieza, pero son generalmente los más caros. Sin embargo, estas diferencias son menores en las aplicaciones ex situ que in situ. Los altos costos se deben a los costos propios para energía y equipos, además de ser intensivos en mano de obra. Al igual que las tecnologías fisicoquímicas y a diferencia de las biológicas, los procesos térmicos incluyen la destrucción, separación e inmovilización de contaminantes. Los procesos térmicos utilizan la temperatura para incrementar la volatilidad (separación), quemado, descomposición (destrucción) o fundición de los contaminantes (inmovilización). Las tecnologías térmicas de separación producen vapores que requieren de tratamiento; las destructivas producen residuos sólidos (cenizas) y, en ocasiones, residuos líquidos que requieren de tratamiento o disposición. Es importante hacer notar que, para ambos tipos de tratamiento, el volumen de residuos generados que requieren de tratamiento o disposición es mucho menor que el volumen inicial (Van Deuren *et al.* 1997).

Desorción térmica (DT). Los procesos de DT consisten en calentar (90 a 540 °C) el suelo contaminado con contaminantes orgánicos, con el fin de vaporizarlos y por consiguiente separarlos del suelo. El calor acelera la liberación y el transporte de contaminantes a través del suelo, para posteriormente ser dirigidos hasta un sistema de tratamiento de gases con el uso de un gas acarreador o un sistema de vacío. Es un proceso de separación física no destructivo. Con base en la temperatura de operación, la DT puede clasificarse en dos grupos (EPA, 2001):

- ❁ Desorción térmica de alta temperatura (DTAT). Es una tecnología a gran escala en la cual los desechos son calentados a temperaturas que varían entre los 320 y los 560 °C. Frecuentemente se utiliza en combinación con la incineración o S/E, dependiendo de las condiciones específicas.
- ❁ Desorción térmica de baja temperatura (DTBT). Los desechos se calientan a temperaturas entre 90 y 320 °C. Es una tecnología a gran escala que se ha probado con éxito en el tratamiento de varios tipos de suelos contaminados con HTP.

Incineración. En los procesos de incineración tanto in situ como ex situ, se utilizan altas temperaturas de operación que van desde los 870 a los 1,200 °C, con la finalidad de volatilizar y quemar compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno. Generalmente se utilizan combustibles para iniciar el proceso de combustión. Las eficiencias de remoción y destrucción de los incineradores operados adecuadamente exceden el 99.99%. Sin embargo, los gases de combustión generalmente requieren de tratamiento. Existen diferentes tipos de incineradores (Van Deuren *et al.* 1997):

- ❁ Combustión de lecho circulante (CLC). Utilizan altas velocidades en la entrada de aire, lo que provoca la circulación de los sólidos, creando una zona de combustión turbulenta favoreciendo la destrucción de hidrocarburos tóxicos. Los incineradores de CLC operan a temperaturas menores que los incineradores convencionales (790 a 880 °C).

- ❖ Lecho fluidizado. Utiliza aire a alta velocidad para provocar la circulación de las partículas contaminadas y opera a temperaturas mayores a 870 °C.
- ❖ Tambor rotatorio. La mayoría de los incineradores comerciales son de este tipo, y están equipados con un «dispositivo de postcombustión», un extintor y un sistema para el control de emisiones. Son cilindros rotatorios con una ligera inclinación que opera a temperaturas por arriba de los 980 °C.

Vitrificación. El proceso de vitrificación puede llevarse a cabo in situ o ex situ, y utiliza una corriente eléctrica para fundir los suelos contaminados con temperaturas que van de 1,600 a 2,000 °C. Es un proceso de S/E que estabiliza la mayoría de los contaminantes inorgánicos y destruye los orgánicos. El producto de la vitrificación es un material cristalino químicamente estable que no produce lixiviados, en el cual quedan incorporados los compuestos inorgánicos. Durante el proceso, las altas temperaturas, provocan la destrucción o remoción de los materiales orgánicos (EPA, 2001).

Pirólisis. Lapirólisis es la descomposición química de materiales orgánicos inducida por calor en ausencia de oxígeno. El proceso normalmente se realiza a presión y temperaturas de operación mayores a 430 °C.

Los hornos y equipos utilizados para el pirólisis pueden ser físicamente similares a los utilizados para la incineración, pero se deben operar a temperaturas menores en ausencia de aire. Los productos primarios formados del pirólisis de materiales orgánicos, en diferentes proporciones de acuerdo con las condiciones del proceso, son: (i) gases residuales (metano, etano y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros); (ii) condensados acuosos y aceitosos y (iii) residuos sólidos carbonosos (coque) que pueden usarse como combustible (Riser-Roberts 1998: Kreiner 2002).

1.8 Microorganismos encapsuladores de aceites lubricantes

Un gran número de compuestos orgánicos contaminantes de suelos pueden ser degradados o encapsuladores biológicamente. De ahí la necesidad de conocer las características de cada proceso biológico para evaluar la posibilidad de llevarlo a la práctica y controlarlo eficazmente.

Dentro de los aspectos a estudiarse está el metabolismo microbiano de los microorganismos responsables de la degradación en el ambiente. Aquí es donde entra la biorremediación, la cual es una tecnología basada en la actividad microbiana sobre el contaminante.

La biodegradación de materiales orgánicos en el medio ambiente se realiza fundamentalmente por dos grupos de microorganismos: bacterias y hongos. Los microorganismos que interactúan en el proceso de biorremediación se clasifican según su estructura y función celular, como eucariotes, eubacterias y arqueobacterias, estas dos últimas denominadas solamente como *bacterias*. Estas serán descritas a continuación puesto que son los microorganismos de interés de este trabajo.

1.9 Complejo *Geobacillus thermoglucosidasius*

Las especies de *Geobacillus* se clasificaron originalmente como miembros del género *Bacillus* (Nazina *et al.*, 2001). De los años de 1920 hasta 1980 solo era conocida una especie termofílica del género *Bacillus* con el nombre de *Bacillus stearothermophilus* (Donk, 1920), posterior a los años 80 se presentaron más especies termofílicas: *Bacillus stearothermophilus*, *Bacillus kaustophilus*, *Bacillus thermoglucosidasius*, *B. thermoleovorans*, *Bacillus thermodenitrificans*, *Bacillus pallidus*, *Bacillus vulcani*, de las cuales se les realizaron análisis fenotípicos y aplicación de la secuencia del gen 16S rRNA para que formaran un linaje genérico distinto del *Bacillus sensu stricto* (Scholz *et al.*, 1987; Ash *et al.* 1991; Caccamo *et al.*, 2000). En 2001 se propusieron que estas especies fueran renombradas en el género *Geobacillus*, junto con dos nuevas especies, *Geobacillus Subterraneus* y *Geobacillus uzenensis* (Nazina *et al.*, 2001). Los primeros estudios en aislar y reconocer a la especie *Geobacillus thermoglucosidasius* antes conocida antes como *Bacillus thermoglucosidasius* fueron realizados en Japón (Suzuki *et al.* 1983).



Figura 4 *Geobacillus thermoglucosidasius* en placa en medio LB.

Geobacillus thermoglucosidasius CCR8 es una bacteria en forma de bacilo mediano y largo Gram-, su rango de temperatura óptima de crecimiento es de 40-70°C y 7-9 pH produce en medio selectivo proteasas y quitinasas (Rodriguez et al., 2002).

2. Justificación

En el 2012 INEGI reporta que en México hay 34,875,837 unidades de vehículos registradas entre ellas automóviles, camiones para pasaje, camiones y camionetas para carga y motocicletas, siendo los estados con más autos registrados son el Edo. de México, CDMX, Nuevo León y Veracruz.

En este mismo año también se reportaron que existen 185,720 establecimientos dedicados a la mecánica, reparación, mantenimiento de los cuales se generan residuos sólidos y líquidos tales como aceites e hidrocarburos que son considerados residuos peligrosos según la NOM-052-SEMARNAT-2015 y los cuales son derramados accidentalmente en el suelo convirtiéndose en pasivos ambientales que deben tener un manejo especial de acuerdo con sus características (SEMARNAT 2012). En México existen 227 empresas registradas ante SEMARNAT autorizadas para el manejo de residuos peligrosos para la remediación de suelos contaminados, de las cuales trabajan con diferentes métodos de remediación, la biorremediación está emergiendo como una tecnología limpia y prometedora, ya que es el acto de utilizar procesos naturales inducidos a ambientes contaminados para acelerar los procesos de degradación logrando mejores tasas de remediación en menor tiempo y costo.

Con base a lo anterior se introduciría la biorremediación en las empresas generadoras de RP que tengan pasivos ambientales convirtiéndolas en empresas que cumplen con las obligaciones que le corresponden de acuerdo con la normatividad, siendo socialmente responsables con el ambiente y con mayor competitividad en el mercado.

3. Hipótesis

La capacidad de *Geobacillus thermoglucosidasius* para remover los aceites lubricantes de los pasivos ambientales dependerá de las características y tipo de suelo en los diferentes sitios de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.

4.Objetivos

4.1 Objetivo general

Determinar la capacidad de *Geobacillus thermoglucosidasius* para remover los aceites lubricantes en pasivos ambientales de suelos en diferentes sitios de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.

5.2 Objetivos específicos

1. Caracterización de los pasivos ambientales de suelos contaminados con aceites lubricantes.
2. Determinar la concentración óptima de *Geobacillus thermoglucosidasius* para la remoción de pasivos ambientales con aceites lubricantes.
3. Evaluar la remoción total de los pasivos ambientales contaminados por aceites lubricantes derivados de hidrocarburos, en el laboratorio.

5. MATERIALES Y METODOS

Dentro del proceso de investigación y análisis de la biorremediación para la remoción de AL presentes en los sedimentos considerados PA en talleres mecánicos de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río se realizó el siguiente diseño experimental.

5.1 Diseño experimental

Se evaluó la capacidad de remoción del *Geobacillus thermoglucosidasius* resultante de enriquecimiento de fuentes de carbono provenientes de los sedimentos contaminados con aceites lubricantes con siderados PA, para un mayor conocimiento se caracterizó el suelo contaminado, para una mejor discernimiento en la aplicación de la tecnología de biorremediación, también se determinó la concentración mediante la obtención de biomasa (necesaria para su aplicación ambiental) mediante la amplificación de la población en medio rico Luria Bertani (LB), con los resultados obtenidos se evaluó la remoción total de los contaminantes en los PA.

Para alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo, la metodología fue dividida en tres partes de acuerdo con cada uno de los objetivos específicos a alcanzar: en el primero objetivo es la caracterización de los pasivos ambientales de suelos contaminados con aceites lubricantes para lo cual se realizó la siguiente metodología mostrada en la Fig. 1, el segundo objetivo específico es determinar la concentración óptima de Gt para la remoción de pasivos ambientales con aceites lubricantes con la metodología mostrada en la Fig.2, y el tercer objetivo específico es evaluar la remoción total de los pasivos ambientales contaminados por aceites lubricantes derivados de hidrocarburos, en el laboratorio con la siguiente metodología mostrada en la Fig. 3.

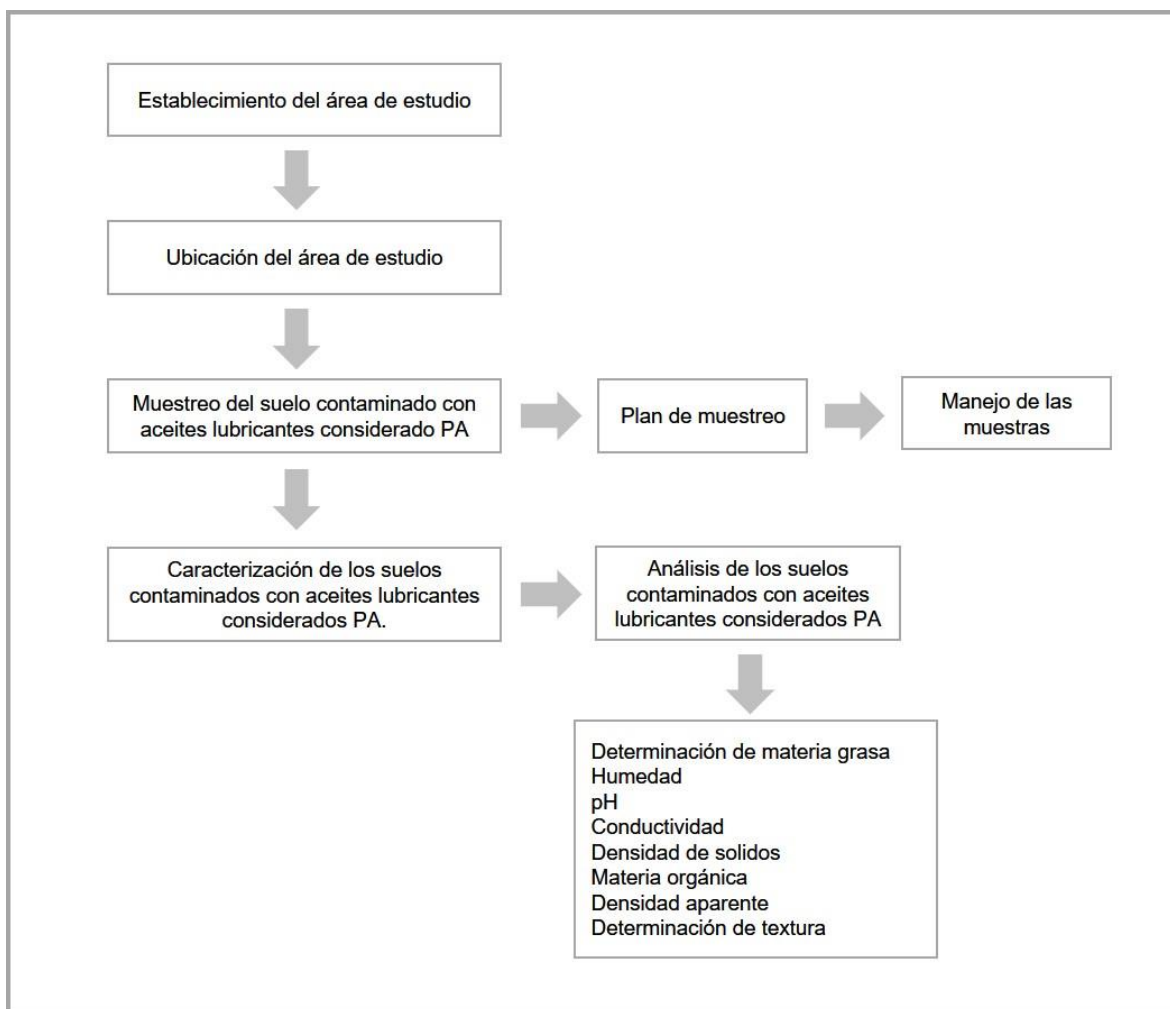


Figura 5 Metodología del Objetivo 1

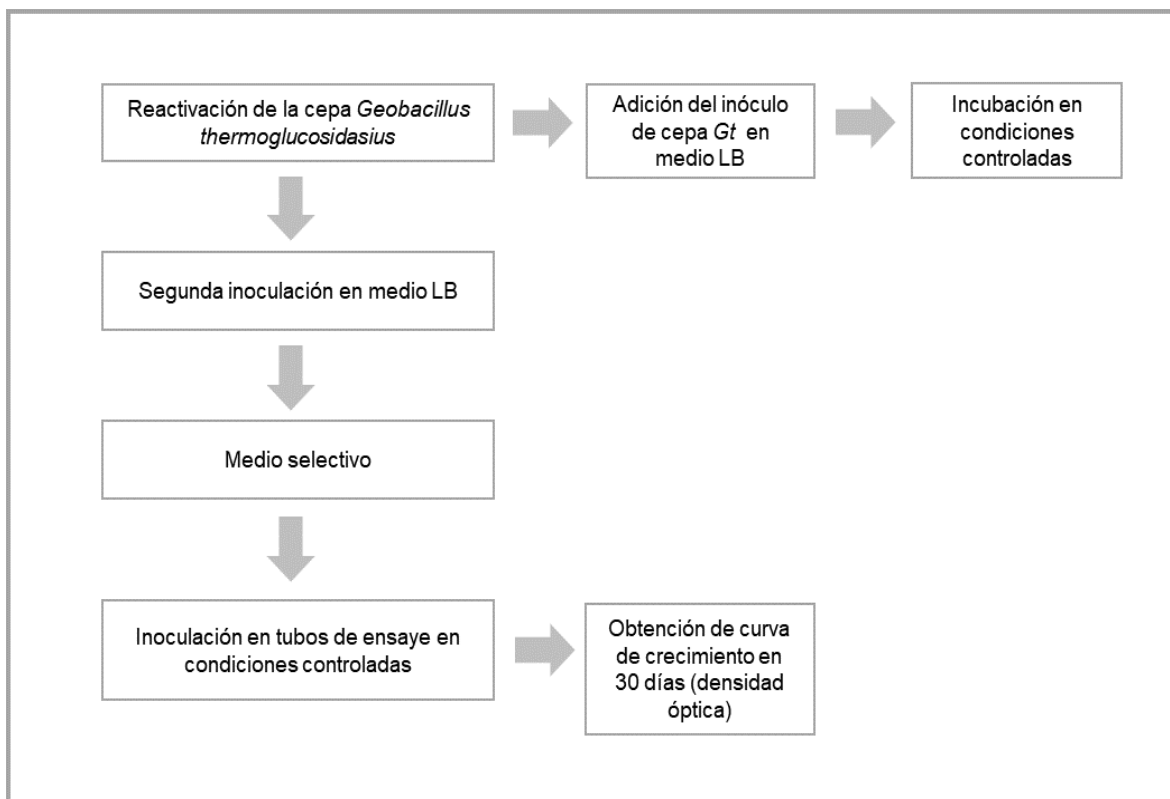


Figura 6 Metodología del Objetivo 2

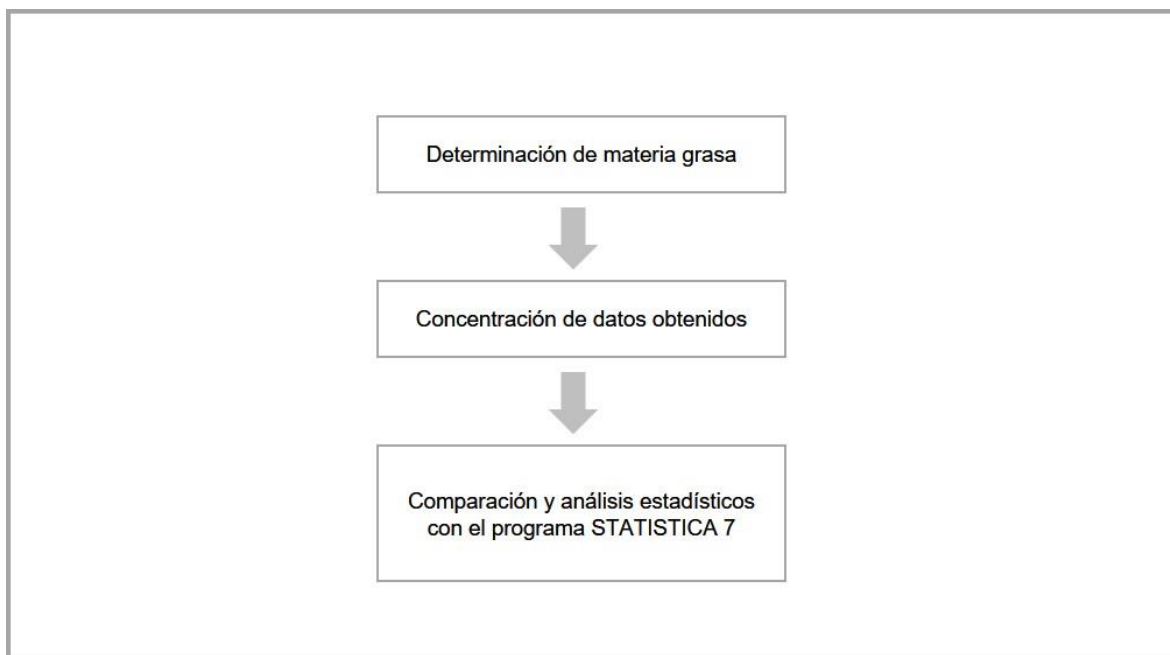


Figura 7 Metodología del Objetivo 3

5.2 Objetivo específico 1

5.2.1 Establecimiento del área de estudio

El área de estudio se estableció bajo dos criterios fundamentales, el primero: el estado de Veracruz cuenta con el mayor registro de PA de suelos a nivel nacional según datos del SISCO, 2013 dependencia derivaba de SEMARNAT, el segundo criterio se estableció que la zona de estudio fuera la zona conurbada Veracruz - Boca del Río, por contar con el mayor número de registros de talleres mecánicos según datos del DENUE, 2017 dependencia derivada del INEGI.



Figura 8 Área de estudio: zona conurbada Veracruz-Boca del Río, Fuente Google maps,2019.

El diseño estadístico de la presente investigación corresponde a un modelo de muestreo no probabilístico ya que por su versatilidad da la opción de cambiar de sitio de estudio por motivos de permisos en los establecimientos, los datos se obtuvieron de la base de datos del DENUE.

Tabla 8 Diseño estadístico del área de estudio de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.

Población	
Datos	Resultados
Talleres Mecánicos $n = \text{Veracruz} + \text{Boca del Río}$	$n = \frac{(Z^2)(\sigma^2)(N)}{(e^2)(N-1) + (Z^2)(\sigma^2)}$ $n = \frac{(1.96^2)(0.5^2)(279)}{(0.5^2)(279-1) + (1.96^2)(0.5^2)}$ $n = \frac{(3.8416)(0.25)(279)}{(0.25)(279-1) + (3.8416)(0.25)} = 3.80 \approx 4$

De acuerdo con el resultado del modelo estadístico el número de talleres para una población de 279 unidades económicas, fue de 3.80 el cual fue redondeado a cuatro unidades a muestrear, dado que son dos municipios, se deliberó que fueran dos unidades para el municipio de Veracruz y dos unidades para el municipio de Boca del Río, los cuales se mostraron a continuación en el siguiente apartado.

5.2.2 Ubicación del área de estudio

Veracruz

El taller mecánico automotriz designado con la nomenclatura VER I, se encuentra ubicado en la calle Costa Blanca número 91 de la Colonia Astilleros del puerto de Veracruz, Veracruz México, con una latitud 19.21129311 y una longitud de -96.18734162, tiene un área de 315 m² distribuido en tres secciones, la primera para laminación y pintura, la segunda lubricación y la tercera para mecánica automotriz en general como se muestra en la Fig. 9, cuenta con 5 trabajadores entre personal directivo y operativo. El taller VER I se encuentra en operaciones desde el año 2004 comenzó únicamente con el servicio de mecánica automotriz en general, actualmente esta registrada como unidad económica en el DENUe con los siguientes datos de la Tabla 9 y ofrece más de 10 servicios descritos en la Tabla 10.

Tabla 9 Datos de la unidad económica de VER I.

Nombre de la unidad	Taller mecánico automotriz
Nombre de clase de actividad	Reparación mecánica en general de automóviles y camiones
Nombre de la vialidad	Costa blanca
Tipo de asentamiento humano	Colonia Astilleros
CP	91800
Municipio	Veracruz de Ignacio de la Llave
Fecha de apertura	1992(27 años)
Fecha de incorporación al DENUe	2010-07

Tabla 10 Servicios brinda el taller mecanico VER I.

Lavado y engrasado total	Cambio de filtro de aire
Cambio de aceite y filtro motor	Revisión de frenos
Cambio de aceite la la transmisión automática	Limpieza de inyectores
Cambio de aceite de la transmisión mecanica	Reparación de mangueras de presión
Cambio del aceite diferencial	Cambio de herramientas de corte
Cambio de aceite de dirección hidraulica	Laminación y pintura

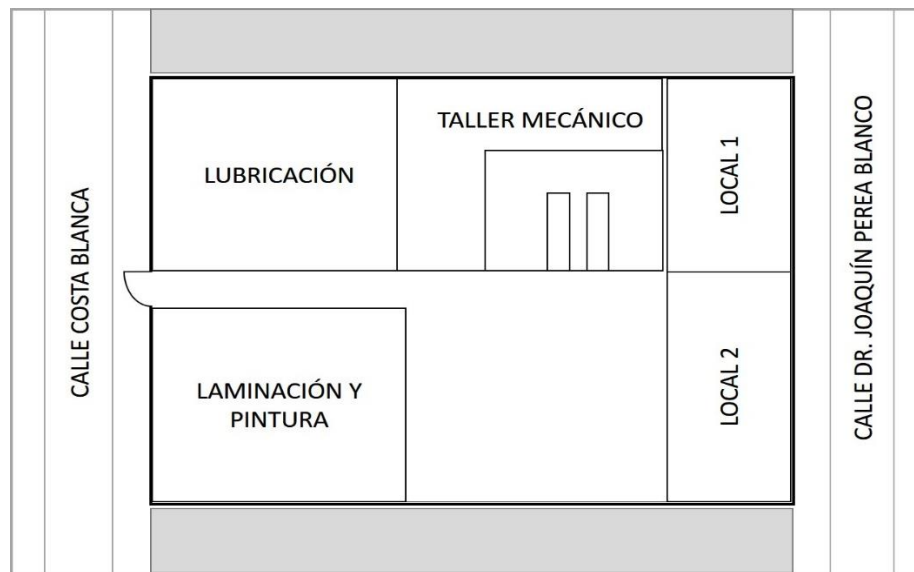


Figura 9 Plano del taller automotriz VER I.

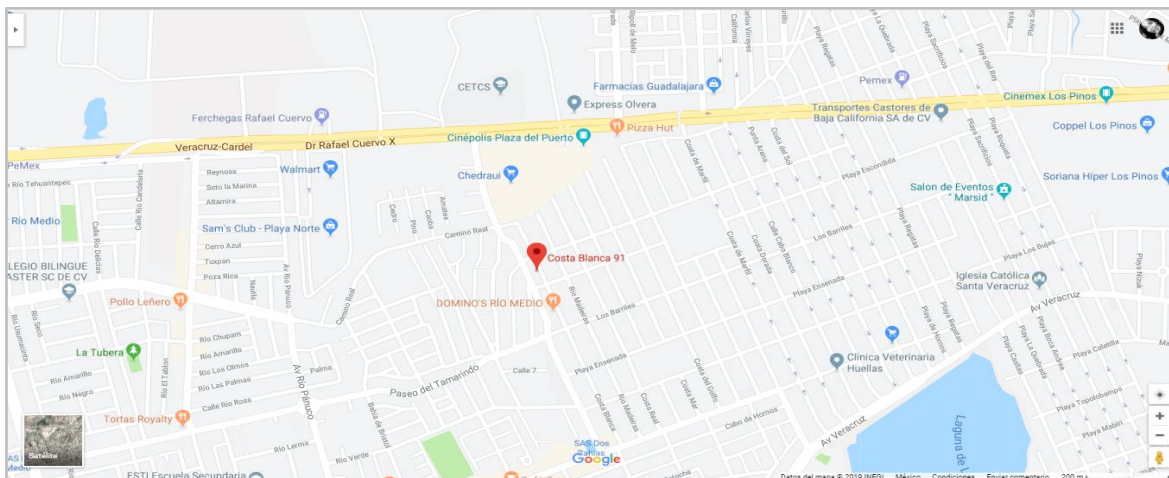


Figura 10 Localización de taller automotriz VER I. Fuente: Google maps,2019.

El taller mecánico automotriz designado con la nomenclatura VER II, se encuentra ubicado en la avenida Constancia número 80 de la Colonia Nuevas Esperanzas del puerto de Veracruz, Ver, México, con una latitud 19.19162214 y una longitud de -96.16429518, tiene un área de 243 m² distribuido en tres secciones, la primera mecánica automotriz en general, electromecánica, lubricaciones como se muestra en la Fig. 11, cuenta con tres trabajadores solo personal operativo.

El taller VER II se encuentra en operaciones desde el año 2004, actualmente cuenta con registro como unidad económica en el DENUe con los siguientes datos descritos en la Tabla 11, y ofrece 13 servicios descritos en la Tabla 12.

Tabla 11 Datos de la unidad económica de Veracruz II.

Nombre de la unidad	Taller de servicio Automotriz veracruz
Nombre de clase de actividad	Reparación mecánica en general de automóviles y camiones
Nombre de la vialidad	Constancia
Tipo de asentamiento humano	Colonia Nuevas Esperanzas
CP	91713
Municipio	Veracruz de Ignacio de la Llave
Años de apertura	2004(15 años)
Fecha de incorporación al DENUe	2010-07

Tabla 12 Servicios que brinda el taller mecánico VER II.

Laboratorio para lavar inyectores	Servicio scanner
Afinaciones fuel injection	Autolavado
Frenos	Lubricación
Electromecánica	Afinaciones
Mecánica en general	Direcciones hidráulicas
Suspensiones	

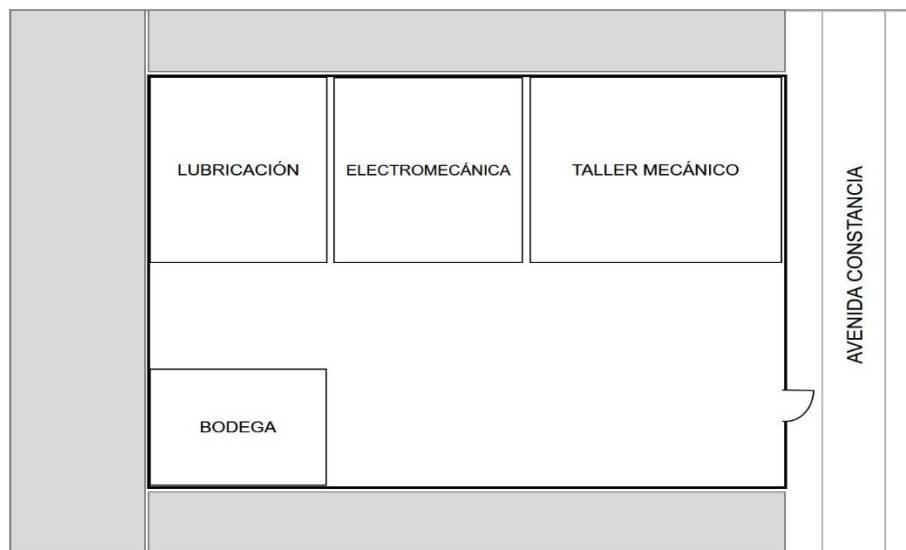


Figura 11 Plano de taller automotriz VER II.

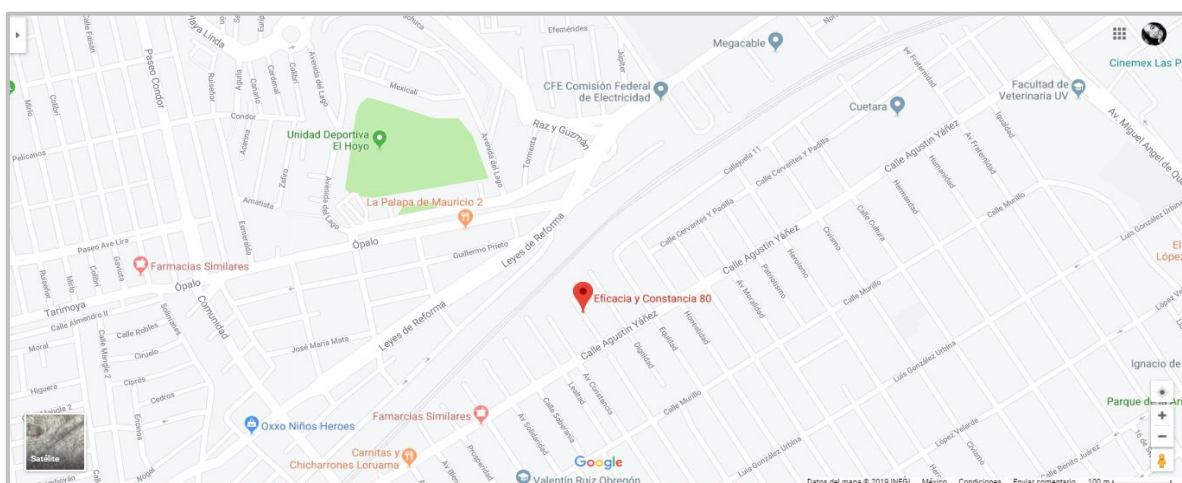


Figura 12 Localización del taller automotriz VER II. Fuente: Google, 2019.

Boca del Río

El taller mecánico automotriz designado con la nomenclatura Boca I, se encuentra ubicado en la calle Jornaleros s/n Colonia Villa Rica del municipio de Boca del Río, Veracruz, México, con una latitud 19.12530492 y una longitud de -96.11561702, tiene un área de 117 m² distribuido en dos secciones, la primera mecánica automotriz en general y la segunda en lubricación, como se muestra en la Fig. 13, cuenta con cuatro trabajadores operativos.

El taller Boca I se encuentra en operaciones, actualmente cuenta con registro como unidad económica en el DENUe con los siguientes datos descritos en la Tabla 13, ofrece 7 servicios descritos en la Tabla 14.

Tabla 13 Datos de la unidad económica de Boca del Río I.

Nombre de la unidad	TALLER AUTOMOTRIZ
Nombre de clase de actividad	Reparación mecánica en general de automóviles y camiones
Nombre de la vialidad	Calle Jornaleros
Tipo de asentamiento humano	Colonia Villa Rica
CP	94298
Municipio	Boca del Río
Años de apertura	2009 (10 años)
Fecha de incorporación al DENUe	2010-07

Tabla 14 Servicios que brinda el taller mecanico BOCA I.

Mecánica en general
 Cambio de aceite y filtro de motor
 Cambio de aceite de transmisión automática
 Cambio de aceite diferencial
 Dirección hidráulica
 Frenos
 Afinaciones

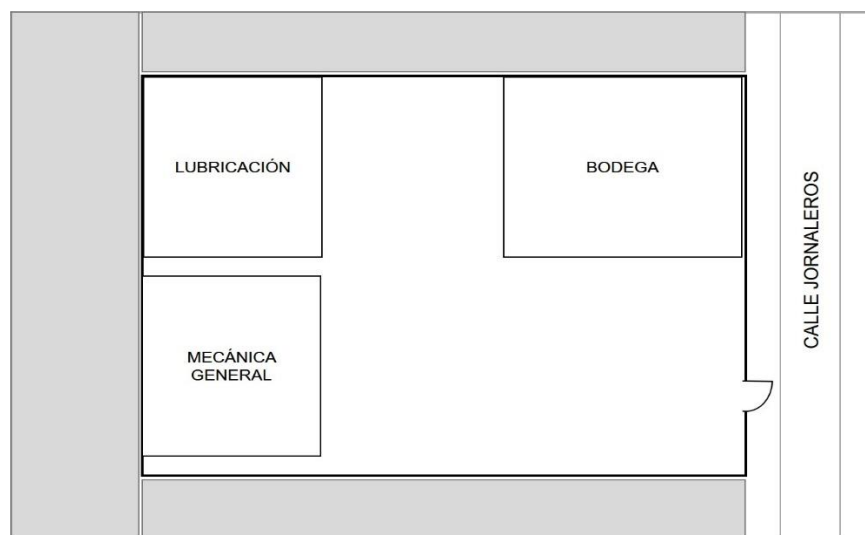


Figura 13 Plano del taller mecánico automotriz BOCA I.

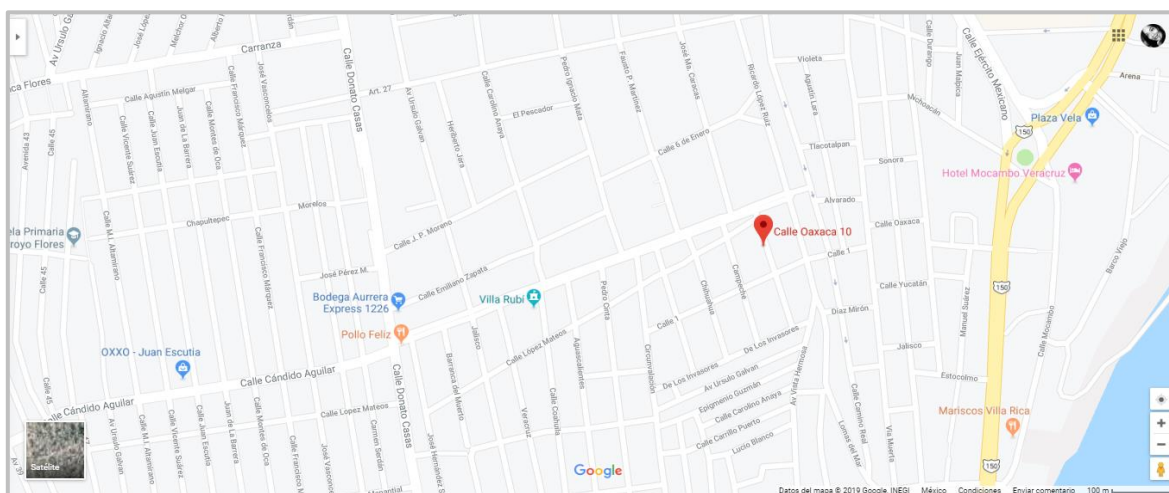


Figura 14 Localización del taller mecánico BOCA I. Fuente: Google, 2019.

El taller mecánico automotriz designado con la nomenclatura Boca II, se encuentra ubicado en la Calle 3 #345 de la Colonia Nueva Era del municipio de Boca del Río, Veracruz, México, con una latitud 19.15759034 y una longitud de -96.12694535, tiene un área de 165 m², distribuido en tres secciones, la primera lubricación, la segunda mecánica automotriz en general y la tercera en laminación y pintura como se muestra en la Fig.15, cuenta con cinco trabajadores cuatro operativos y un administrador. El taller Boca II se encuentra en operaciones desde su registro como unidad económica en el DENUe con los siguientes datos descritos en la Tabla 15, y el cual ofrece 9 servicios descritos en la Tabla 16.

Tabla 15 Datos de la unidad económica de Boca del Río II.

Nombre de la unidad	TALLER AUTOMOTRIZ
Nombre de clase de actividad	Reparación mecánica en general de automóviles y camiones
Nombre de la vialidad	Calle 3
Tipo de asentamiento humano	Nueva Era
CP	94295
Municipio	Boca del Río
Años de apertura	2006 (13 años)
Fecha de incorporación al DENU	2010-7

Tabla 16 Servicios que brinda el taller mecánico BOCA II.

Revisión de frenos	Cambio de aceite de filtro de motor
Limpieza de inyectores	Servicio de scanner
Laminación y pintura	Suspensiones
Cambio de aceite de direccion hidraulica	Mecánica automotriz
Cambio de aceite de transmisión automatica	

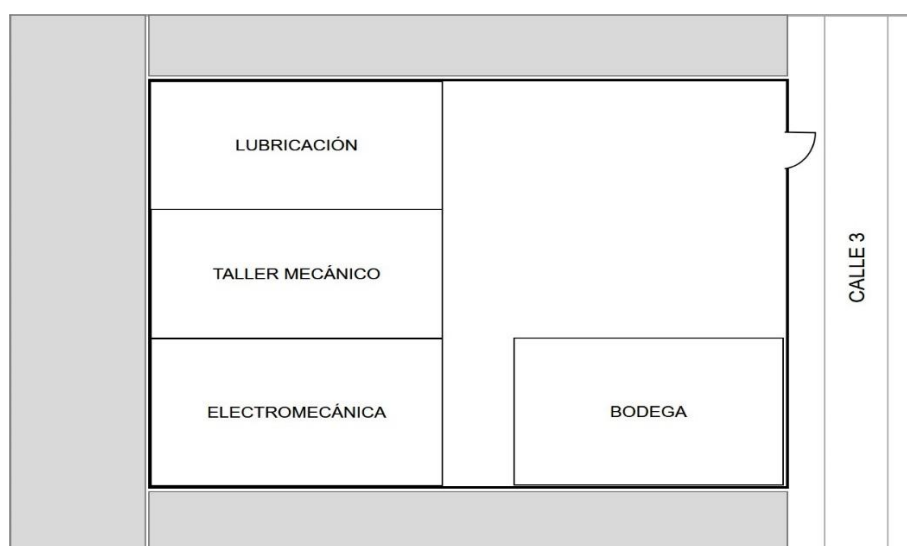


Figura 15 Plano del taller mecánico automotriz BOCA II.

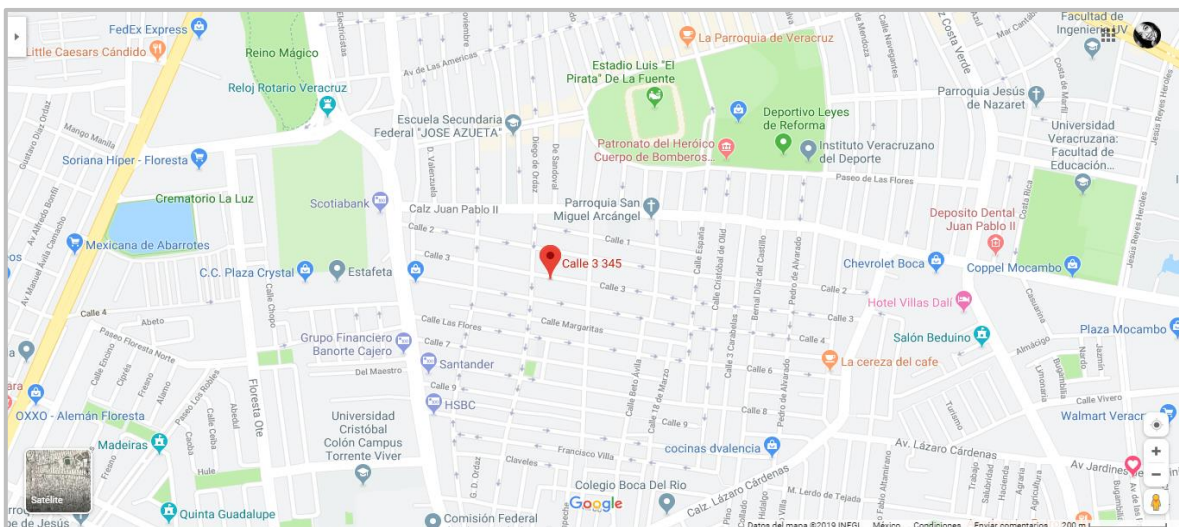


Figura 16 Localización del taller mecánico BOCA II. Fuente: Google, 2019.

5.2.3 Muestreo del suelo contaminado con aceites lubricantes considerados PA

El muestreo se llevo acabo de acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012 la cual se refiere a los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación, esta norma es redireccionada de la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR) de SEMARNAT, a través de la Dirección de Remediación de Sitios Contaminados.

De acuerdo con los requerimientos de esta norma es preciso tener planteados previamente los siguientes datos: I) Tipo de muestreo, II) Tipo de muestras, III) Tamaño de la muestra, para el desarrollo del plan de muestreo y su posterior ejecución.

Tipo de muestreo. Se determino que fuera un muestreo sistemático ya que puede utilizarse para reducir la variabilidad de muestras, con este método se ubicaron las muestras en un patrón regular en toda la zona de estudio dado que los cuatro sitios a muestras son rectangulares, y con esto se tomó un punto determinado al azar, a partir del cual se establece cierta distancia para ubicar los demás puntos (a distancias uniformes entre sí) tal como se muestra en la Fig 17.

La ventaja de este tipo de muestreo es puede llevarse a cabo en superficies de cualquier tamaño, dado que las muestras pueden ubicarse de acuerdo con las dimensiones y forma del terreno, es decir, la distancia equidistante entre los puntos de muestreo pueden ser de unos centímetros, metros o hasta kilómetros, lo cual depende del tipo de estudio que se esté realizando (Valencia y Hernández 2002).

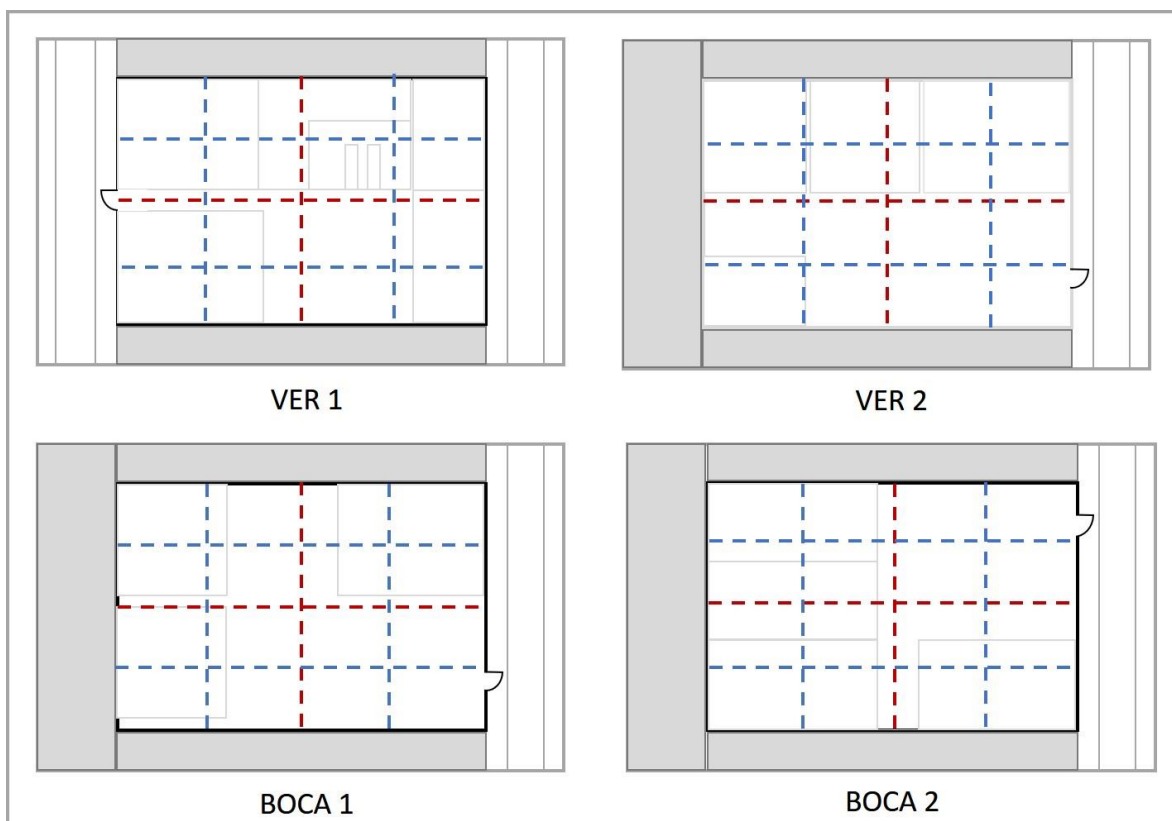


Figura 17 Muestreo sistemático de los sitios VER I, VER II, BOCA I, BOCA II.

Tipos de muestras. Se estableció que el tipo de muestras sea simple ya que representan las condiciones puntuales de una muestra de la población en el tiempo que fue colectado, sin tener que ser combinadas como una muestra compuesta.

Tamaño de la muestra. Para la caracterización de suelo se requieren 200g de suelo, a lo que se aumentaron 800g adicionales para los análisis de caracterización del suelo así como para el análisis de determinación de grasas y aceites e inoculación de la bacteria, siendo un total de 1Kg por cada muestra, cabe mencionar que cada sitio se obtuvieron 4 muestras con su triplicado cada una.

5.2.3.1 Plan de muestreo

Se realizó un plan de muestreo (Anexo 1) de acuerdo a la sección número 7 que indica los lineamientos para el plan de muestreo en la caracterización de la NOM-138-SEMARNAT-SSA1-2012, el propósito de este es:

- a) Organizar y definir los procedimientos aplicables.
- b) Establecer las responsabilidades de los participantes.
- c) Describir la técnica de muestreo.
- d) Programar las actividades a realizar durante el muestreo, su duración, así como las herramientas y medidas de seguridad.
- e) Definir las medidas de aseguramiento de calidad de las etapas de los procesos de muestreo.

5.2.3.2 Técnica de muestreo sistemático

Para este tipo de estudio se realizó una excavación del suelo, para lo cual se planteó un muestreo sistemático, realizando los siguientes pasos para los cuatro sitios de estudio:

1. Se tomaron medidas del terreno, posteriormente se dividió en cuatro partes iguales tal como se muestra en la figura 18a (puntos A, B, C, D) para cada sitio de estudio.
2. Los puntos A, B, C y D se dividieron cada uno en cuatro partes iguales como se muestra en la figura 18b (A1, A2, A3, A4...).
3. Posteriormente con una pala se tomaron estratos del suelo a una profundidad de 50 cm en cada subpunto del terreno (A1, A2, A3, A4...), hasta llegar a un peso de 1Kg por cada subpunto. Fig 18c, cada muestra fue almacenada en bolsas ziploc rotulada con sus datos correspondientes tales como: nomenclatura de muestra, fecha y hora, ubicación de muestreo, responsable de la toma de muestra.

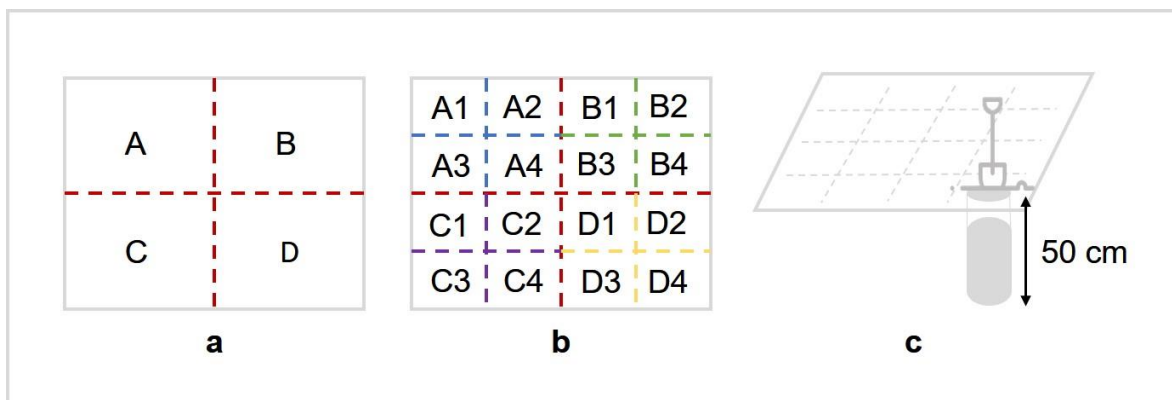


Figura 18 Pasos de técnica de muestreo sistemático.

5.2.4 Caracterización de los suelos contaminados con aceites considerados PA

Para la caracterización de los suelos se realizaron los análisis del Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados referido en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

5.2.4.1 Análisis de los suelos contaminados con aceites lubricantes considerados PA

pH. La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos (H^+) que se da en la interfase líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. Tres son las condiciones posibles del pH en el suelo: la acidez, la neutralidad y la alcalinidad.

Para este análisis del pH se utilizó el Medidor de sobre mesa HI 2550 de la marca HANNA. Fig. 18, se pesó 1 g de suelo y se colocó en un vaso de precipitado de 25 mL, seguido se agregaron 10 mL de agua destilada se agitó y se dejó reposar por 10 min, después del tiempo transcurrido se ajustó el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras y se midió el pH con el medidor de sobremesa HANNA.

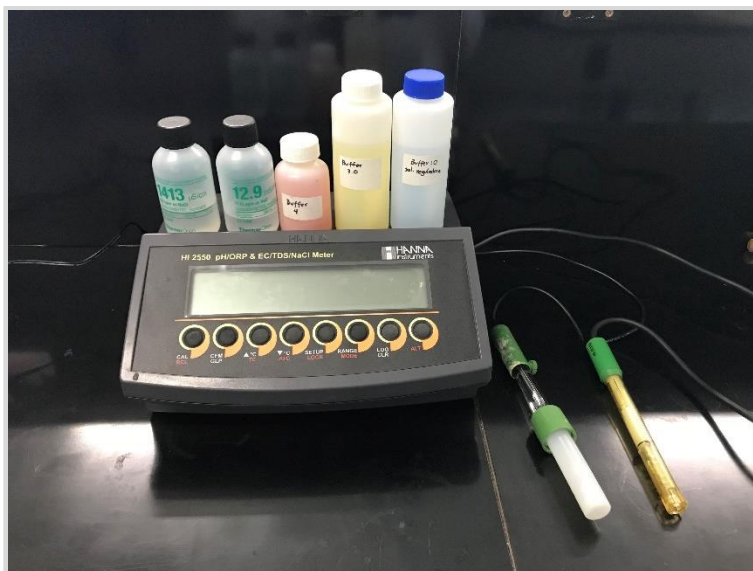


Figura 19 Medidor de sobremesa HANNA HI 2550

Humedad. El contenido de agua en el suelo puede ser benéfico, pero en algunos casos también perjudicial. El exceso de agua en los suelos favorece la lixiviación de sales y de algunos otros compuestos; por lo tanto, el agua es un regulador importante de las actividades físicas, químicas y biológicas en el suelo, Aunque es recomendable determinar la humedad a la capacidad de campo de los suelos, es decir, la cantidad de humedad que un suelo retiene contra la gravedad, cuando se deja drenar libremente; en algunas ocasiones, cuando se trata de suelos contaminados, por ejemplo con hidrocarburos del petróleo, es difícil llevar a cabo esta medición por la dificultad de rehidratar suelos secos con estas características. Por lo que la medición de humedad se realiza sólo en función del porcentaje de agua que retiene este tipo de suelos.

Par efectuar el análisis de humedad del suelo se realizo por medio de la diferenciación de peso de las muestras antes y después de haberse sometido a peso constante en la estufa.

Para lo cual se peso 1g de muestra (Fig. 20) a peso constante en una charola de laminio, seguido de mantuvo a 80 °C por 24 horas, se sacaron las muestras y se colocaron en un desecador para su enfriamiento, se peso la muestra con la charola de aluminio y se calcularon los porcentajes de humedad en el suelo por la diferencia de pesos con la siguiente formula:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100$$

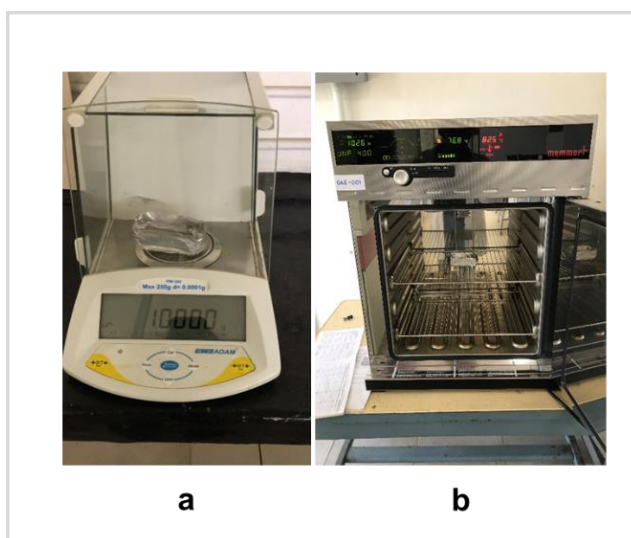


Figura 20 Equipos utilizados en el analisis de porcentaje de humedad
a) Balanza ADAM-PW254, b) Estufa de secado Memmert- UNA400.

Conductividad. Es una propiedad de las soluciones que se encuentra muy relacionada con el tipo y valencia de los iones presentes, sus concentraciones total y relativa, su movilidad, la temperatura del líquido y su contenido de sólidos disueltos. La determinación de la conductividad eléctrica es por lo tanto una forma indirecta de medir la salinidad del agua o extractos de suelo. De acuerdo con los valores de conductividad eléctrica, pH y porcentaje de sodio intercambiable, los suelos se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- a) Suelos salinos. Se caracterizan porque su extracto de saturación tiene un valor de conductividad eléctrica igual o superior que 4 mmhos/cm a 25°C y la cantidad de sodio intercambiable es menor de 15%.

Por lo general tienen una costra de sales blancas, que pueden ser cloruros, sulfatos y carbonatos de calcio, magnesio y sodio.

- b) Suelos sódicos. Presentan un color negro debido a su contenido elevado de sodio. Su porcentaje de sodio intercambiable es mayor que 15, el pH se encuentra entre 8.5 y 10.0, y la conductividad eléctrica está por debajo de 4 mmhos/cm a 25°C.
- c) Suelos salino-sódicos. Poseen una conductividad eléctrica de 4 mmhos/cm a 25°C, una concentración de sodio intercambiable de 15% y el pH es variable, comúnmente superior a 8.5.
- d) La conductividad eléctrica se puede complementar con la determinación de Na^+ o bases intercambiables (K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+). Principalmente si los suelos fueron contaminados con aguas congénitas.

Para la realización de este análisis se tomaron 40g de cada una de las muestras, posteriormente se calibro en Medidor de sobre mesa HANNA HI 2550 (Fig.19) y se procedió a la toma de la conductividad.

Densidad de sólidos. La densidad de sólidos se define como la relación que existe entre el peso de los sólidos y el peso del volumen del agua desalojado por los mismos. El Peso específico relativo de los sólidos es una propiedad índice que debe determinarse a todos los suelos, debido a que este valor interviene en la mayor parte de los cálculos relacionados con la Mecánica de suelos, en forma relativa, con los diversos valores determinados en el laboratorio pueden clasificarse algunos materiales. Una de las aplicaciones mas comunes de la densidad (S_s), es en la obtención del volumen de sólidos, cuando se calculan las relaciones gravimétricas y volumétricas de un suelo.

Para el procedimiento de este analisis se pesaron 50 g (W_s) de cada una de las muestras obtenidas de las sitidos muestreados (los siguientes pasos se realizaron para cada una de las muestras).

Se viertio agua en un matraz aforado de 500 mL hasta la mitad, en la parte de la curva, se agrego la muestra (solido) con un embudo al matraz, se extrajo el aire por

30 seg con una bomba de vacío mientras el matraz fue agitado sobre su mismo eje longitudinal, repitiendo este último paso 5 veces. Consecutivo al paso anterior, se aforo el matraz con agua destilada, se pesa el matraz + agua + sólidos (W_{mws}), y se toma la temperatura de la suspensión introduciendo el termómetro hasta que se llega a la curva del matraz y se vuelve a tomar el peso del matraz + agua hasta la marca de aforo (W_{mw}).

Se sustituyeron los valores obtenidos en la siguiente fórmula y se obtuvo la densidad:

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{mw} + W_{mws}}$$

Donde: S_s es el peso específico de los sólidos.

Materia orgánica. En el suelo el carbono puede hallarse de diferentes formas: compuestos inorgánicos (carbonatos, CO_2 , etc.), compuestos orgánicos, restos de animales y plantas más o menos transformados y los productos derivados de ellos, que constituyen el humus. Forma elemental (carbón, grafito, etc.). El conjunto de todas las formas bajo las que se presenta el C representa el carbono total del suelo. No obstante, el análisis que se suele realizar y los datos que corrientemente se manejan se refieren únicamente a la fracción oxidable, que sólo incluye los compuestos orgánicos presentes en el suelo.

El interés de este análisis reside en obtener una información indirecta acerca de las propiedades físicas del suelo, ya que la materia orgánica influye en la retención de agua, en la estructuración y aireación del suelo.

El procedimiento realizado para este análisis de materia orgánica se tomaron 100g (Fig. 21a) de cada muestra tomadas de los sitios muestreados posteriormente se secaron en la estufa (Mettler-UNE400) a $80^\circ C$ (Fig. 21b) y se tamizaron cada una de las muestras en una malla de 2mm (Fig. 21c), seguido se colocaron las muestras en vasos de precipitado de 1L y se pesaron (Fig. 21d), se le adicionaron

6mL de solución de peróxido de hidrógeno al 6%, se agitaron con una varilla de vidrio para rectificar que ya no hubiera reacción efervescente (Fig. 21e), al termino de esta las muestras fueron se secadas en la estufa y se volvieron a pesar, la diferencia de pesos se reporto como el contenido de materia orgánica en porcentaje.

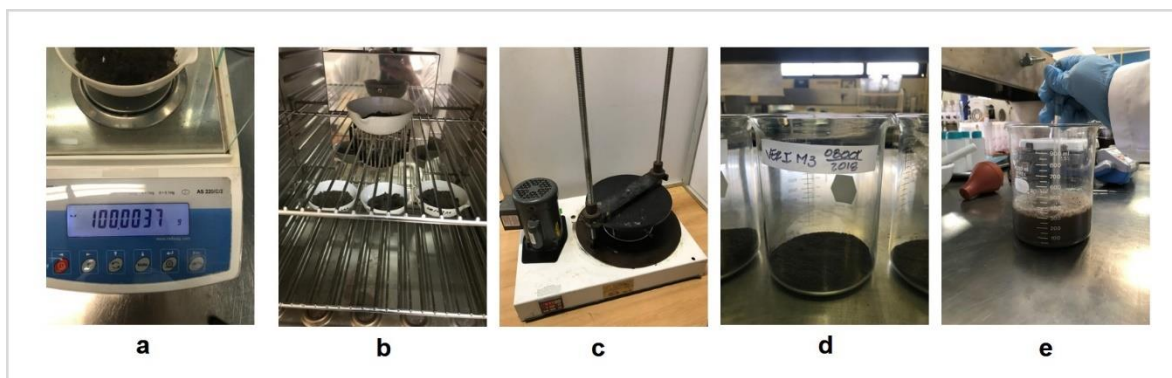


Figura 21 Procedimiento del analisis de obtencion de materia organica: a) Pesado de muestra en balanza analítica RADWAG-AS220/c, b) Secado de muestras en estufa Memmert-UNE400, c) Tamizado de muestras en Tamizador Ro-Tap, d) Muestra en vaso de precipitadi de 1L, e) Agitación de la muestra en vaso de precipitado de 1L.

Determinación de textura. La textura del suelo es la proporción relativa por tamaños de partículas de arena, limo y arcilla; las cuales al combinarse permiten categorizar al suelo en una de las 12 clases texturales. El procedimiento se divide en tres partes: digestión de la materia orgánica, determinación de textura y cálculos (este análisis se le realiza a cada una de las muestras de los sitios de estudio).

1) **Digestión de la materia orgánica.** Se tomaron 100g de suelo seco, se tamizó a través de una malla de 2 mm y se colocó en un vaso de precipitado de 1L, se agregó agua destilada hasta cubrir el suelo. Se le adicionaron 10mL de agua oxigenada al 6% y con el agitador de vidrio se revolvió durante 10 minutos. A continuación se agregaron otros 10 mL de agua oxigenada y se observó si se da una reacción violenta con producción de espuma (Fig. 22) (si esto sucedía se le agregaban 10mL de agua oxigenada, en cada caso de cada muestra hasta que no se produjese más espuma). Se colocó el vaso en una parrilla en la campana de extracción, y se calentó a 90°C. Seguido se vertieron 10mL más de agua oxigenada. Si la reacción era violenta (muchísima espuma) se añadía una dosis más de 10mL de agua oxigenada hasta que no se formase espuma. Después de la última adición de agua oxigenada, se continuó calentando para eliminar el posible exceso de agua oxigenada por 45min.

Se traslado el suelo a un recipiente de aluminio, usando agua destilada, se calentó a 105°C hasta que se obtuvo un peso constante, se vacio la muestra en un mortero y se tamizo por una malla de 2mm.



Figura 22 Reacción de la digestión de la materia orgánica en el Agitador magnético calefactado SBS

2) **Determinación de la textura.** Se pesaron 5g de suelo seco, sin materia orgánica, se molio y posteriormente se tamizo a través de una malla de < 2 mm. Se colocó la muestra en una matraz elenmeyer de 250 mL, se adicionaron 10mL de dispersante de hexametáfosfato de sodio, se llevo aun volumen de 50mL con agua destilada, posteriormente se agito el contenido por 5min y se dejó reposar por 12 horas (Fig.23). Después del periodo de reposo se agito nuevamente por 30 min con un agitador eléctrico, seguido del tiempo transcurrido se hizo pasar la suspensión por un tamiz de 300 mallas, recogiendo el filtrado en una capsula de porcelana, se utilizó la menor cantidad de agua para separar la arena y esta quedara en el tamiz y el limo quedara en suspensión, posteriormente el filtrado del matraz elenmeyer de 250mL se le agrego agua destilada hasta alcanzar un volumen de 200 mL, seguido se agito la suspensión durante 2 minutos y se dejó reposar por el tiempo de una hora 20 minutos con 40 segundos, después se tomó una alícuota de 25mL a la profundidad de 2cm, esta última fue colocada en un charola de aluminio (previamente pesada y llevada a peso constante a 105°C), después se dejó enfriar y se pesó.

Las arenas que se retuvieron en el tamiz de 300 mallas se pasaron a una charola de aluminio previamente pesada y se dispuso a secar en la estufa a 105°C hasta llevar a peso constante.

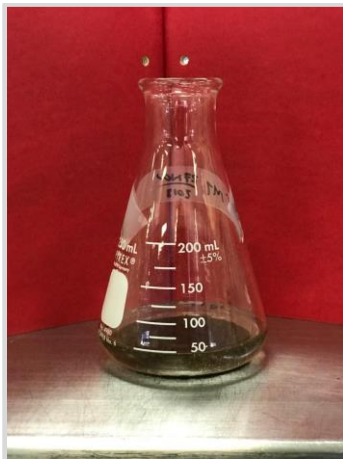


Figura 23 Muestra en reposo de suelo sin materia orgánica adicionada con hexametáfosfato de sodio y agua destilada.

3) Cálculos.

$$\% \text{ Arena} = \frac{B}{A} * 100$$

Donde:

A = peso de la muestra.

B = peso de arenas.

$$\% \text{ Arcilla} = \frac{E}{A} * 100$$

C = peso de arcilla + limo = (A - B).

$$\% \text{ Limo} = \frac{F}{A} * 100$$

D = peso del suelo en la alícuota (partículas < 0.002 mm).

E = peso de arcilla = D x 8.

F = peso del limo = A - B - E.

Con los porcentajes de arena, limo y arcilla y mediante el uso del triángulo de textura se determinó la textura del suelo.

5.3 Objetivo específico 2

5.3.1 Reactivación de la cepa *Geobacillus thermoglucosidasius*

Se obtuvo una alícuota de la cepa bacteriana extremófila *Geobacillus thermoglucosidasius* CCR8 que se encontraban congeladas a -70°C con 80 % de glicerol (Fig. 24), sometiéndolas a descongelación a temperatura ambiente para su reactivación.



Figura 24 Alícuota de cepa *Geobacillus thermoglucosidasius* CCR8 conservada en glicerol al 80%.

5.3.1.1 Adición del inóculo de cepa *Geobacillus thermoglucosidasius* en medio Luria Bertani

En condiciones estériles se tomó 50 μL de inóculo de la alícuota de la cepa y se adicionó a 2 mL de medio Luria Bertani (LB) en tubo de ensaye con tapa en condiciones estériles.



Figura 25 Tubo de ensaye con Luria Bertani inóculado con *Gt.*

5.3.1.2 Incubación en condiciones controladas

Se incubó a 55 °C por 24 horas a 150 rpm en el Shaking WSB-30 de la marca WiseBath para proporcionar las condiciones óptimas de crecimiento a las cepas.

5.3.2 Segunda inoculación en medio LB

Se observó la presencia de turbidez en el tubo de ensaye después del tiempo de incubación, característica propia del crecimiento de bacterias Fig. 25. Se realizó el segundo pase inoculando 100 μ L de medio del tubo de ensaye a un matraz con 100mL de medio LB a 55 °C por 24 horas a 150 rpm en el baño con agitación y temperatura controladas en el Shaking WSB-30 de la marca WiseBath.



Figura 26 Segunda incubación de la cepa Gt en medio LB.

5.3.3 Medio selectivo

Se realizan dos terceros pases con 2ml del matraz inoculado de la segunda inoculación realizada anteriormente, hacia dos matarcezes nuevos de 250ml cada uno con medio LB.



Figura 27 Inoculación del tercer pase de la cepa Gt.

5.3.4 Inoculación en tubos de ensaye en condiciones controladas

Se realizó la inoculación de los tubos para la creación de la curva de crecimiento de cada uno de las muestras de los sitios de estudio, previamente estos se esterilizaron y fueron llenados con suelo contaminado de cada uno de los sitios sienta que para cada sitio se llenaron 30 tubos para crear la curva cinética de 30 días (cada uno con su triplicado correspondiente), cada tubo contenía 1mL de inóculo, 1g de suelo contaminado y 8 mL de medio LB, posteriormente los tubos fueron incubados por 30 días en la incubadora CO₂-INCOMED-Memmert a temperaturas controladas a 55°C.



Figura 28 Tubos inoculados con Gt, LB y suelo contaminado a temperatura controlada a 55°C en la incubadora CO₂-INCOMED-Memmert.

5.3.4.1 Obtención de la curva de crecimiento en un periodo de 30 días (densidad óptica)

Durante 30 días se determinó la densidad óptica en un espectrofotómetro Rayleigh-VIS-7220 G calibrado a una absorbancia a 600 nm, para lo cual se esperó una absorbancia de 0.6 –1.0, para garantizar la viabilidad de las cepas bacterianas en las alícuotas, debido a que a esta absorbancia las bacterias se encuentran en fase de crecimiento exponencial.

5.4 Objetivo específico 3

5.4.1 Determinación de materia grasa

Para determinación de la materia grasa se utilizó el extractor de grasas Figursa EG-4000, para este procedimiento previamente se llevó a peso constante 30g de cada muestra tomada, también se preparó un filtro que fue utilizado como blanco, para este último se preparó 1g de tierra de diatomeas se diluyó en 100mL de agua destilada y se filtró, seguido se llevó a secar en la estufa Memmert-UNE400 por 30 min a 60°C, una vez listas las muestras los se llenaron los filtros con las muestras previamente pesadas y secadas junto con el filtro blanco este fue llenado de por 30ml de una solución previamente hecha (0.5mL de aceite mineral diluido en 500mL). Se colocaron los filtros y vasos de contención del extractor fueron llenados con 30ml de hexano por 8 h consecutivas, posteriormente se llevó a evaporar en la estufa el sobrante de hexano y se obtuvo el peso final por diferenciación de los vasos contención.

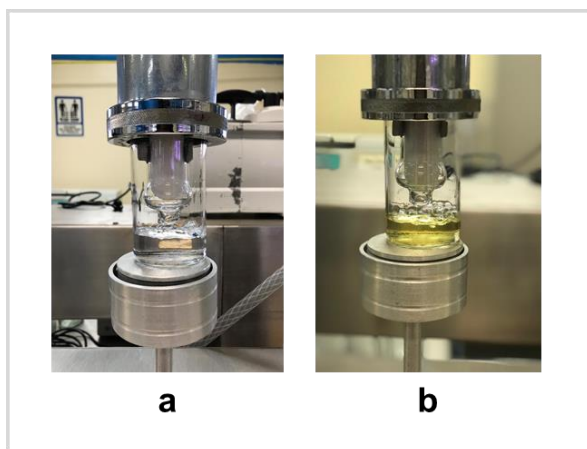


Figura 29 Extracción de grasas en el extractor Figursa EG-4000, a) extracción de grasa inicial, b) extracción de grasa final.

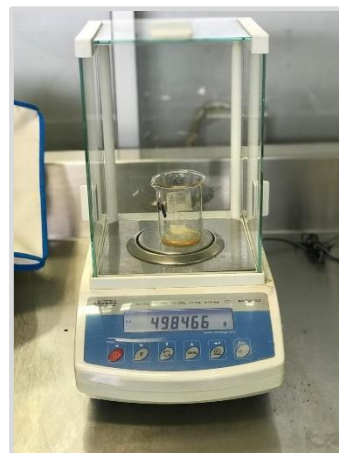


Figura 30 Pesado de grasa extraída en Balanza RADWAG AS 220/c.

5.4.2 Concentración de los datos obtenidos

Se estableció una base de datos para recopilación de todos los resultados obtenidos de cada uno de las etapas de los objetivos específicos, así como los datos obtenidos de los talleres mecánicos.

5.4.3 Comparacion y análisis estadísticos con el programa STATISTICA 7

Se realizó un análisis estadístico comparativo entre valores obtenidos de la determinación de texturas, así como las grasas iniciales como las grasa finales con el programa estadístico STATISTICA 7 llevando a cabo el análisis estadístico mediante una comparación de valores medios y la desviación estándar de cada uno de los porcentajes.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización de los suelos contaminados con aceites considerados PA

6.1.1 Propiedades fisicoquímicas

Tabla 17 Analisis aplicados a los suelos contaminados para su caracterización.

Sitio	Muestra	Humedad	pH	Conductividad	Materia Orgánica	Densidad de Solidos
VER I	1	7.41%	5.8	20.20 μs	3.29%	1.6
	2	7.26%	4.5	18.6 μs	3.17%	1.4
	3	7.49%	5.9	20.22 μs	3.33%	1.8
	4	7.61%	6.1	21.19 μs	4.12%	2.1
VER II	1	1.39%	5.5	141.9 μs	1.63%	1.8
	2	1.25%	5.3	140.7 μs	1.51%	1.6
	3	1.34%	5.4	141.8 μs	1.58%	1.7
	4	1.54%	5.9	142.3 μs	1.59%	1.9
BOCA I	1	3.6%	3.7	251 μs	2.16%	1.7
	2	3.14%	3.8	263 μs	2.26%	1.9
	3	3.21%	4.1	269 μs	2.49%	2.4
	4	3.19%	3.9	267 μs	2.42%	2.1
BOCA II	1	6.49%	4.6	27.6 μs	2.37%	1.6
	2	6.54%	4.1	26.9 μs	2.57%	2.4
	3	6.36%	4.3	27.5 μs	2.39%	1.9
	4	6.19%	4.4	27.8 μs	2.15%	1.1

Los porcentajes de humedad que presentaron los pasivos ambientales varían 1.39 a 7.41 de bajos a medios, lo que favorece a un buen movimiento de aire a través del suelo, lo que beneficia los procesos de biorremediación (Van Deuren et al. 1997).

Se obtuvieron pH 3.7 a 5.5 resultando valores ácidos, pero ideales para algunos tipos de microorganismo tales como *Geobacillus thermoglucosidasius*, estos valores determinan el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, beneficiando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo (Alexander 1994).

Los resultados que se obtuvieron de conductividad eléctrica fueron de 20.20 a 251 μs lo que resulta en suelos salinos-solidos. La determinación de la conductividad eléctrica es por lo tanto una forma indirecta de medir la salinidad del agua o extractos de suelo.

Los porcentajes de materia orgánica van de 1.63 a 3.29 de bajo a medio lo que indica que poca fracción de desechos vegetales y animales a lo que se le conoce como humus este aumenta la movilidad de los compuestos orgánicos (Van Deuren et al.,1997, Eweis et al., 1998.), al ser bajos estos datos, mismos que pueden corregirse aplicando bioestimulación microbiana (Korda et al., 1997).

En la densidad aparente se obtuvieron datos 1.6 a 1.8 que es el peso del suelo por unidad de volumen, incluyendo agua y espacios. Es importante considerar que el suelo está compuesto por sólidos y espacios llenos de agua y/o aire, y que su densidad dependerá de su humedad. Es útil para realizar cálculos para el transporte del material (Van Deuren et al. 1997)

6.1.2 Porcentajes textural de la composición del suelo

Tabla 18 Porcentajes de textura de los sitios de estudio VER1, VER2, BOCA1 y BOCA2.

Sitio	Muestra	% Arena	% Arcilla	% Limo
VER I	1	95.84235756	0.20558232	3.95206012
	2	95.57135101	0.1319806	4.29666839
	3	95.54011219	0.1927865	4.2671013
	4	95.4510868	0.13358277	4.41533042
VER II	1	96.33770254	0.01919946	3.64309799
	2	95.72596838	0.10239836	4.17163325
	3	95.5836634	0.17679346	4.23954314
	4	95.70481784	0.09759278	4.19758938
BOCA I	1	94.81535141	0.09752003	5.08712855
	2	95.24245389	0.07994028	4.67760583
	3	95.18720261	0.09662328	4.71617412
	4	95.09070823	0.03675876	4.87253302
BOCA II	1	94.98572361	0.07835275	4.93592364
	2	94.18873101	0.21996854	5.59130044
	3	94.63531073	0.07839984	5.28628943
	4	95.24179977	0.0983938	4.65980643

En la textura, predominó la fracción arena en el suelo. Se conoce que cuando existe en el suelo mayor porcentaje de arena, los procesos de biorremediación pueden llevarse a cabo con más éxito (Alexander, 1999). Es importante considerar esta propiedad, ya que la relación área/volumen de los diferentes tipos de partícula, tienen un impacto directo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por consiguiente en las tecnologías de remediación. En general, los materiales no consolidados (arenas y gravas finas) son más fáciles de tratar (Van Deuren et al. 1997, Eweis et al. 1998).

6.1.2.1 ARENAS

En cuanto a los porcentajes de arenas constituyentes del suelo muestreado, se puede observar en la Figura 31 que se encontraron diferencias estadísticas significativas ($F(3,12)=12.4655$, $p\leq 0.05$); los valores mas bajos fueron los encontrados en los sitios VER I (4.2327) y VER II (4.0629), en comparación con los que se encontraron en BOCA I (4.8383) y BOCA II (5.1183).

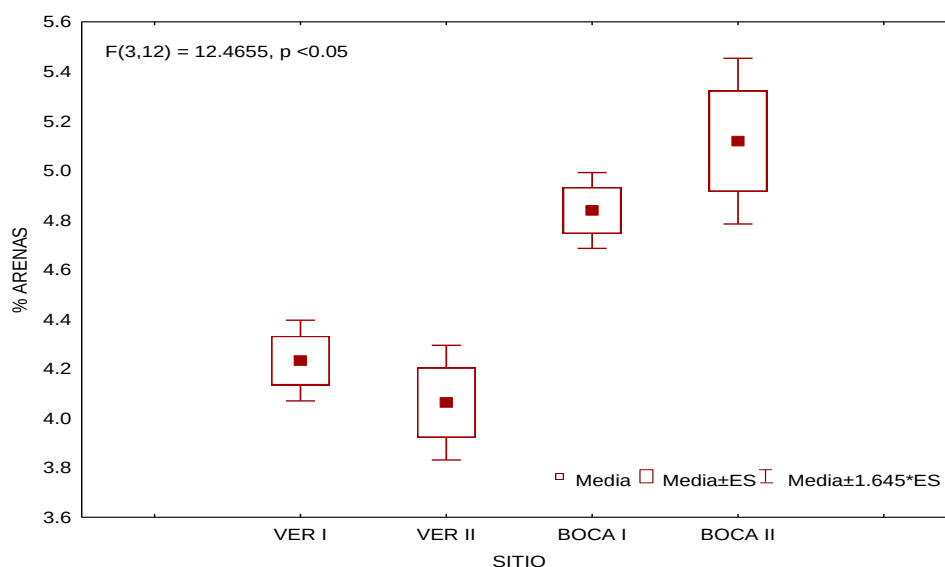


Figura 31 Gráfico de cajas del % de arenas en los sitios de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.

Tabla 19 Media y desviación estandar del % de arenas de los sitios de muestreo de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.

Veracruz I	Veracruz II	Boca del Río I	Boca del Río II
4.2327 ±0.1978 ^a	4.0629± 0.2813 ^a	4.8383± 0.1860 ^b	5.1183± 0.4063 ^b

*Valores con literales diferentes expresan diferencias estadísticas significativas ($p\leq 0.05$).

El grafico de cajas muestra diferencias significativas dentro las zonas de Veracruz y Boca del Río, siendo que Ver I y Ver II muestran menor composición de arenas que las que se obtuvieron las muestras de Boca I y Boca II, esto puede deberse a la ubicación geográfica de cada uno de las zonas y ubicación exacta de cada uno de los sitios de muestreo , así como, si la composición de los sitios de muestreo fue modificada por los propietarios con fines de reglamentación para su apertura, reparación o remodelación y en que años fueron realizadas estas acciones.

6.1.2.2 ARCILLAS

En cuanto a los porcentajes de arcillas constituyentes del suelo muestreado, se puede observar en la Figura 32 que no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($F(3,12)=2.048$, $p \leq 0.05$); por lo cual se describe que el valor mas alto fue registrado por VER I (0.1659) y BOCA II (0.1187), en comparación con los registrados por VER II (0.0989) y con el valor mas bajo BOCA I (0.0777).

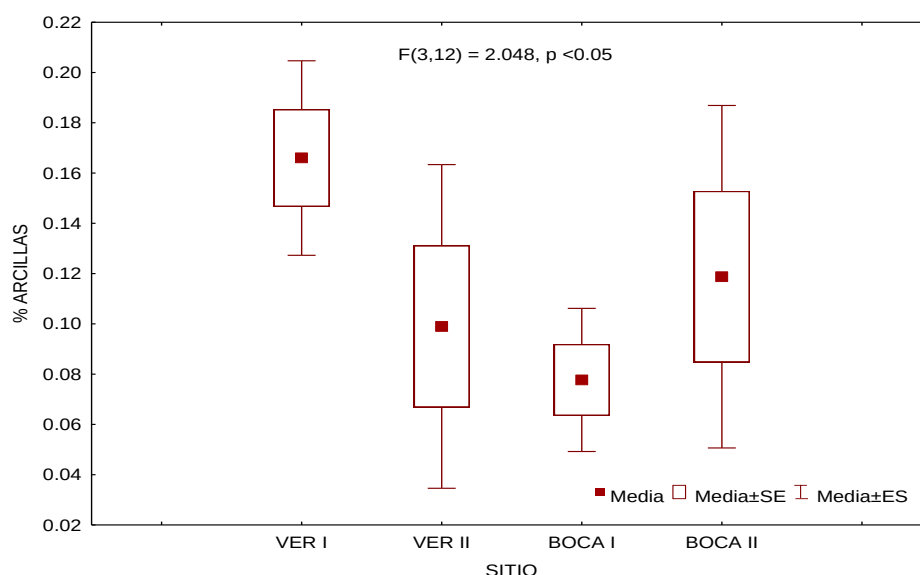


Figura 32 Gráfico de cajas del % de arcillas en los sitios de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.

Tabla 20 Media y desviación estandar del % de arcillas de los sitios de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.

Veracruz I	Veracruz II	Boca del Río I	Boca del Río II
0.1659±0.03869 ^{abc}	0.0989±0.0643 ^{bcd}	0.0777±0.02847 ^{cbd}	0.1187±0.0681 ^{dabc}

*Valores con literales diferentes expresan diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

El grafico de cajas para los porcentajes de arcillas muestra diferencias significativas dentro de los diferentes sitios de muestreo, siendo Veracruz I y Boca del Río II los que concentran mayor cantidad de este material, siendo estos dos puntos muy extremos o alejados, se pueden considerar otras variables distintas a la ubicación geográfica, tales como: modificación por los propietarios con fines de reglamentación para su apertura, reparación o remodelación y en que años fueron realizadas estas acciones.

6.1.2.3 LIMOS

En cuanto a los porcentajes de limos constituyentes del suelo muestreado, se puede observar en la Figura 33 que se encontraron diferencias estadísticas significativas ($F(3,12)=9.8173$, $p<0.05$); los valores donde se fueron los encontrados en los sitios VER I (1 95.6012) y VER II (95.8380), en comparación con los que se encontraron en BOCA I (95.0839) y BOCA II (94.7628).

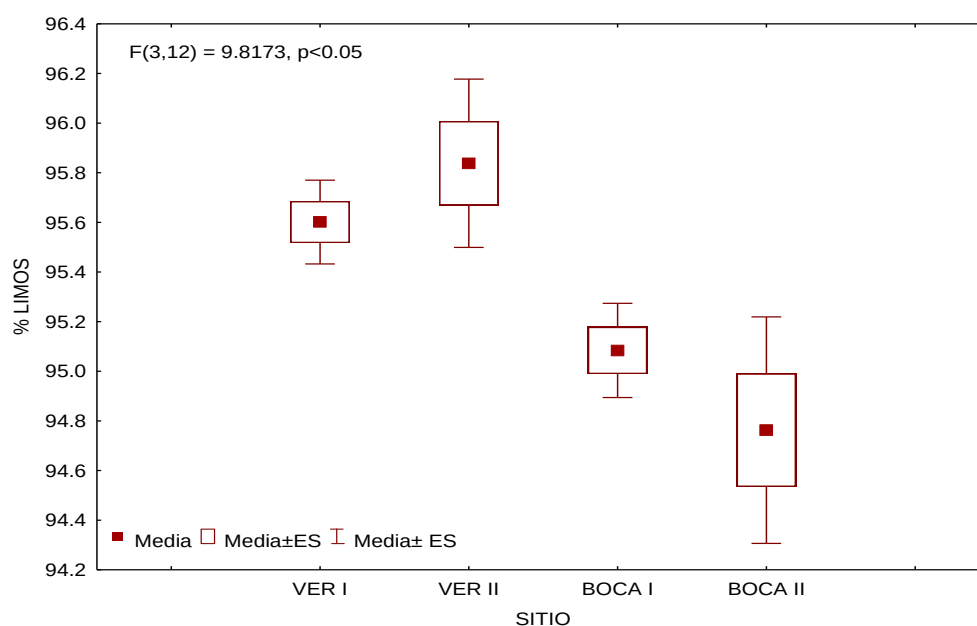


Figura 33 Grafico de cajas del % de limos en los sitios de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.

Tabla 21 Media y desviacion estandar del % de limos de los sitios de muestreo de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.

Veracruz I	Veracruz II	Boca del Río I	Boca del Río II
95.6012±0.16863 ^a	95.8380±0.3389 ^a	95.0839±0.1897 ^b	94.7628±0.4564 ^b

*Valores con literales diferentes expresan diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

El grafico de cajas de los porcentajes de limo muestra diferencias significativas, siendo que la zona de Veracruz muestra mayor porcentaje de limos denotando que la variable predominante para este, es la ubicación de zona geográfica en la que se encuentran dichos sitios, siendo que estos se encuentran hacia la zona norte del estado donde la humedad va en aumento por la creciente altitud de la propia geografía del estado.

6.2 Determinar la concentración óptima de *Geobacillus thermoglucosidasius* para la remoción de pasivos ambientales con aceites lubricantes.

6.2.1 VERACRUZ

VER I

Encuanto para curva cinética de Gt con PA del sitio VER I con el modelo de Gompertz, se obtuvo que la fase de latencia fue de 3.824663275 con un desarrollo de la bacteria muy eficiente, siendo que la velocidad crecimiento de la reacción resultante fue 0.189670415, con un tiempo de generación 3.069864368 y una población máxima de 0.225791 Cel/mL.

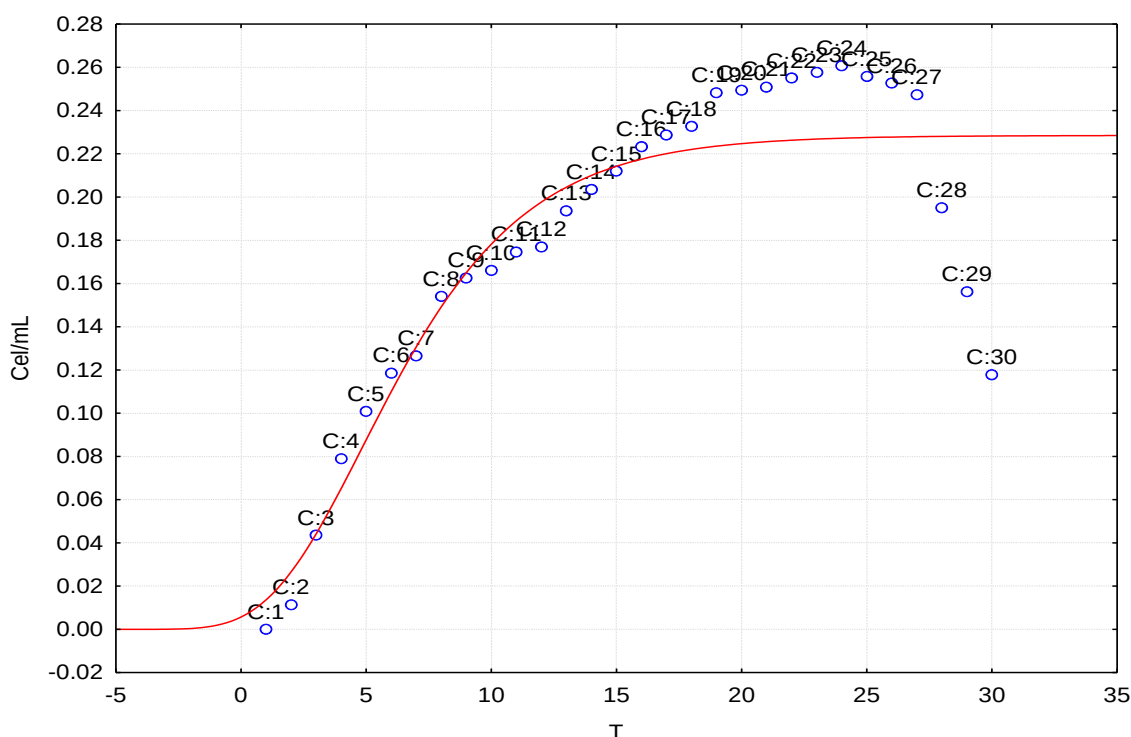


Figura 34 Curva cinetica de crecimiento de Gt con PA del sitio VER 1.

La curva cinética del sitio VER I muestra un comportamiento de crecimiento de 27 días, lo cual se puede asociar a los años 27 años de operación del taller mecánico y sus múltiples servicios que ofrece, ya que con esto se estima que hay una mayor acumulación de aceites lubricantes en el terreno muestreado dando como resultado una mayor cantidad de carbono que es utilizado por la bacteria *Gt* ampliando su tiempo vida.

VER II

Encuanto para curva cinética de *Gt* con PA del sitio VER II con el modelo de Gompertz, se obtuvo que la fase de latencia fue de 3.044798952 con un desarrollo de la bacteria no muy eficiente, siendo que la velocidad crecimiento de la reacción resultante fue 0.575739, con un tiempo de generación 4.73262126 y una población máxima de 0.146462 Cel/mL.

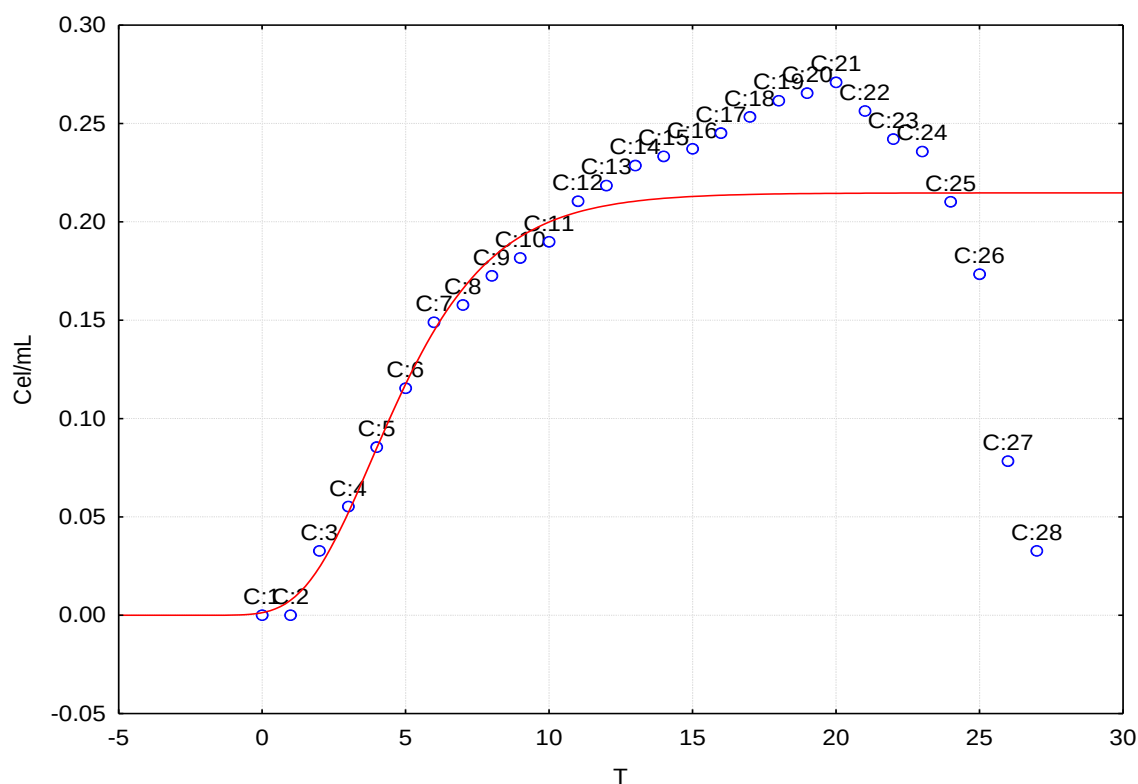


Figura 35 Curva cinetica de crecimiento de *Gt* con PA del sitio VER 2.

La curva cinética del sitio VER II muestra un comportamiento de crecimiento de 25 días, lo cual se puede asociar a los pocos 15 años de operación del taller mecánico y que de los 11 servicios que ofrece están mas orientados al servicio de electromecánica la cual no genera muchos residuos y por tanto menor porcentaje de suelo contaminado que con el tiempo será considerado PA, al ver menor cantidad de carbono para la bacteria y ser sobrepasado en cantidad por esta esta fallece en su intento de crecimiento.

BOCA DEL RÍO

BOCA I

Encuanto para curva cinética de Gt con PA del sitio BOCA I con el modelo de Gompertz, se obtuvo que la fase de latencia fue de 2.01575022 con un desarrollo de la bacteria muy eficiente, siendo que la velocidad crecimiento de la reacción resultante fue 0.125430615, con un tiempo de generación 3.669234287 y una población máxima de 0.188908 Cel/mL.

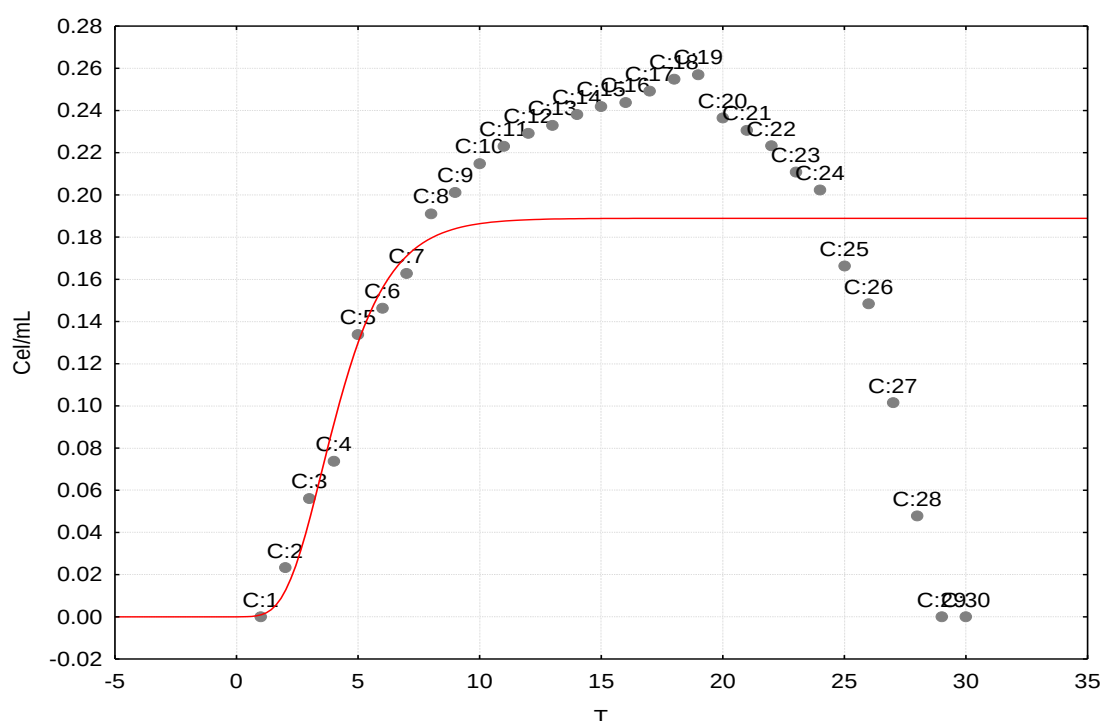


Figura 36 Curva cinetica de crecimiento de Gt con PA del sitio BOCA 1.

La curva cinética del sitio BOCA I muestra un comportamiento de crecimiento de 24 días, lo cual se puede asociar a que es el sitio con el menor periodo de operación y con el menor numero de servicios a ofrecer, por lo cual se estima que hay menor cantidad de residuos vertidos en el suelo, considerados PA, y con ello llevando a una pronta muerte de la bacteria por baja cantidad de carbono.

BOCA 2

Encuanto para curva cinética de Gt con PA del sitio BOCA 2 con el modelo de Gompertz, se obtuvo que la fase de latencia fue de 1.699095215 con un desarrollo de la bacteria muy eficiente, siendo que la velocidad crecimiento de la reacción resultante fue 0.082155597, con un tiempo de generación 3.589609299 y una población máxima de 0.193098 Cel/mL.

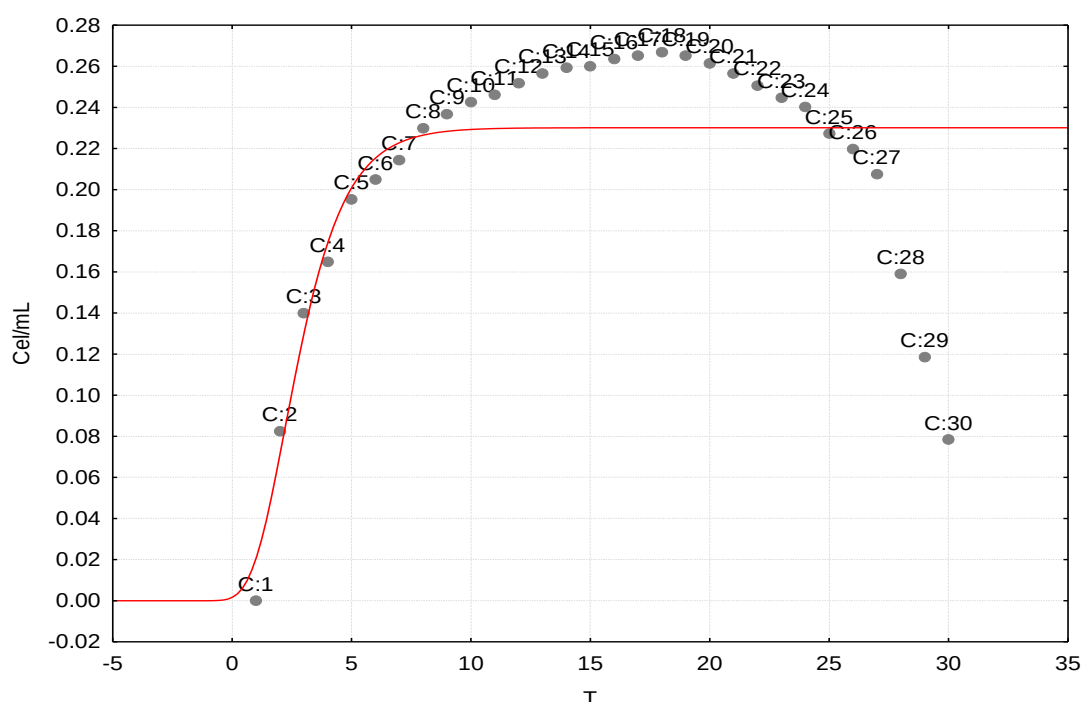


Figura 37 Curva cinetica de crecimiento de Gt con PA del sitio BOCA 2.

La curva cinética del sitio BOCA II muestra un comportamiento de crecimiento de 25 días, lo cual se puede asociar su mediana edad de operaciones y también a que solo ofrece 9 servicios y que es el único taller mecánico de los cuatro sitios muestreados en almacenar sus residuos durante los últimos 3 años, disminuyendo la cantidad de estos y no incrementar la superficie del suelo convirtiéndose en PA, se

estima que en este sitio se encuentra la cantidad mínima necesaria de carbono para la utilización de la bacteria.

6.3.3. Evaluación la remoción total de los pasivos ambientales contaminados por aceites lubricantes derivados de hidrocarburos, en el laboratorio.

En cuanto a los porcentajes de aceites lubricantes iniciales constituyentes del suelo muestreado, se puede observar en la Figura 38 que no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($F(3,12)=3.5227$, $p \leq 0.05$); los valores mas bajos fueron los encontrados en los sitios VER II (80.9330) y BOCA II (92.3671), en comparación con los que se encontraron en VER I (65.4138) y BOCA I (82.0541).

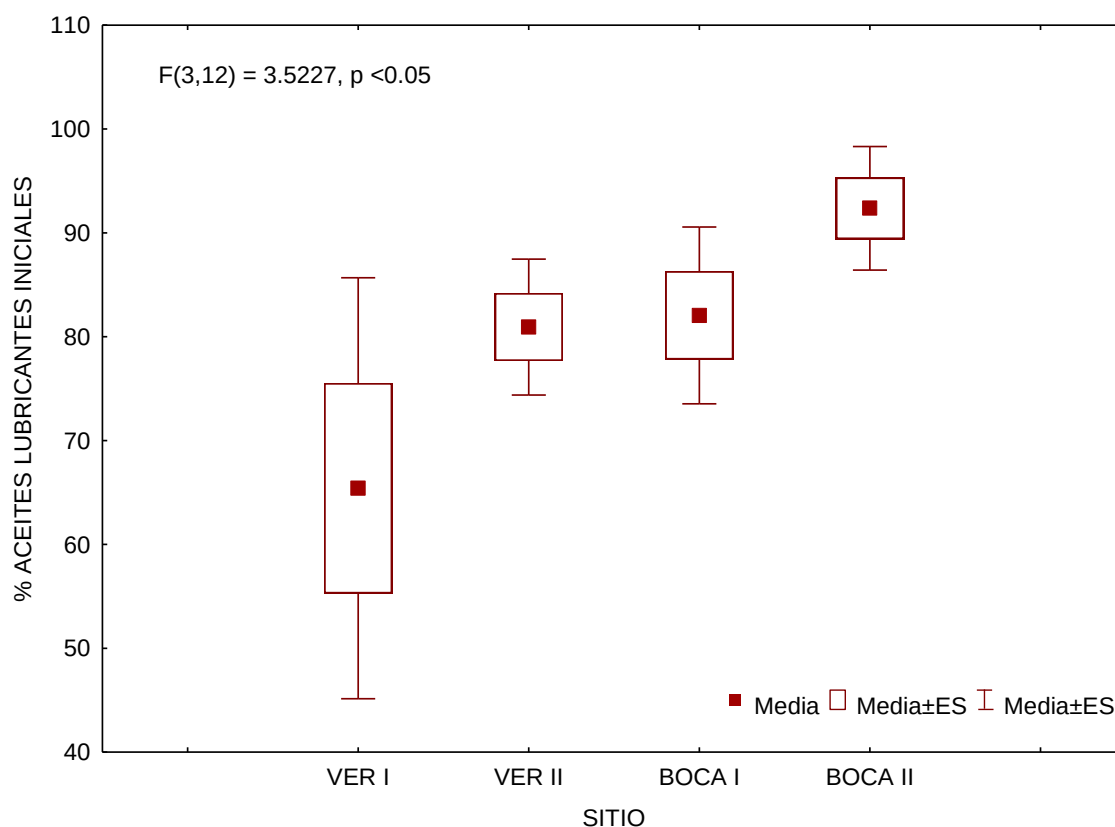


Figura 38 Gráfico de cajas del % de aceites lubricantes iniciales en los sitios de la zona conurbada Veracruz Boca del Río.

Tabla 22 Media y desviación estandar del % de aceites lubricantes iniciales de los sitios de muestreo de la zona conurbada Veracruz- Boca del Río.

Veracruz I	Veracruz II	Boca del Río I	Boca del Río II
65.4138±20.2634 ^a	80.9330±6.5435 ^a	82.0541±8.5082 ^a	92.3671±5.9448 ^{ab}

*Valores con literales diferentes expresan diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

El gráfico de cajas muestra porcentajes con diferencias significativas en los porcentajes, donde el sitio Boca del Río 2 muestra una mayor acumulación de aceites lubricantes, seguido de Boca del Río I, Veracruz II y Veracruz I, se estima que esto se deba a los años de operaciones de cada taller mecánico y la cantidad de servicios que ofrezcan.

En cuanto a los porcentajes de aceites lubricantes finales constituyentes del suelo muestreado, se puede observar en la Figura 39 que se encontraron diferencias estadísticas significativas ($F(3,12)=16.6306$, $p \leq 0.05$); los valores mas bajos fueron los encontrados en los sitios VER II (4.0835) y BOCA II (7.5689), en comparación con los que se encontraron en VER I (5.8090) y BOCA I (4.9907).

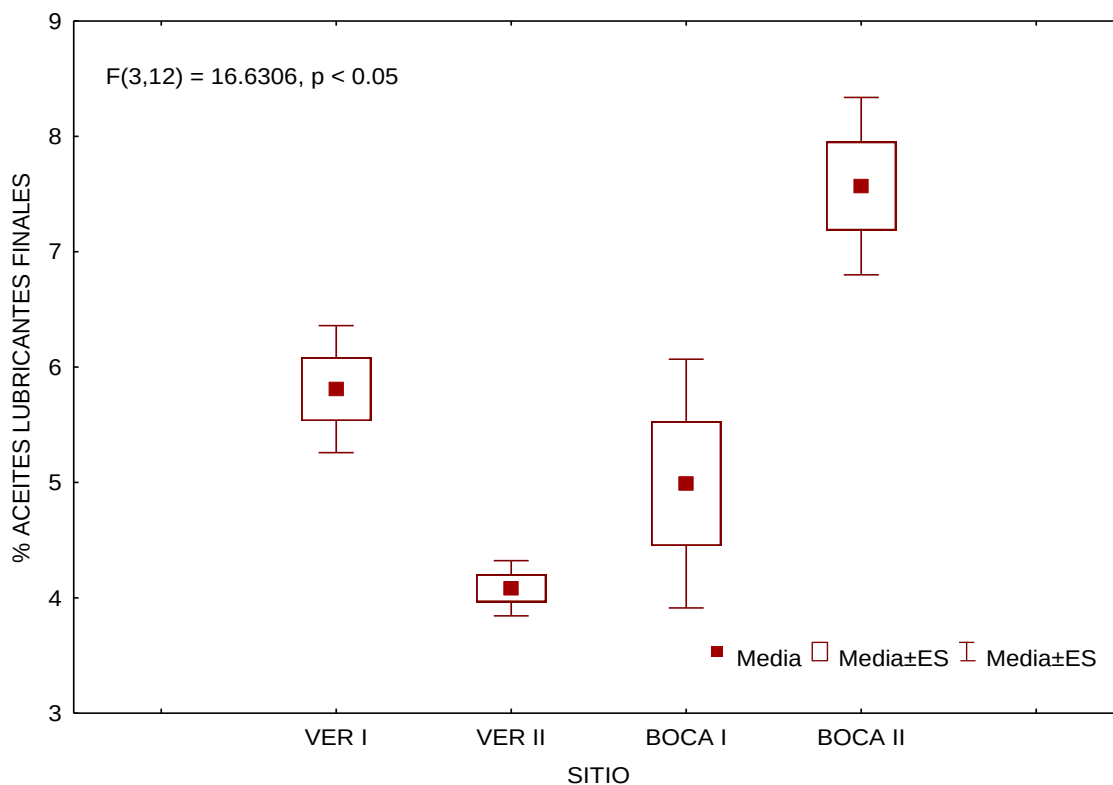


Tabla 23 Media y desviación estandar del % de aceites lubricantes finales de los sitios de muestreo de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.

Veracruz I	Veracruz II	Boca del Río I	Boca del Río II
5.8090±0.5506 ^a	4.0835± 0.2394 ^b	4.9907±1.0780 ^{dab}	7.5689±0.7685 ^c

*Valores con literales diferentes expresan diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

El grafico de cajas muestra diferencias significativas donde las muestras arrojaron que Veracruz 2 fue el que retuvo menos aceites lubricantes seguido de Boca del Río 2 siendo estos los dos sitios con mediana edad con 15 y 13 años de trabajo respectivamente, la edad de operaciones no es factor base para una mayor o menor remoción de aceites lubricantes, así como la concentración inicial y final de los aceites acumulados en los diferentes sitios.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo con los datos obtenidos de la caracterización fisicoquímica de los suelos de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río estos se acondicionan para una buena biorremediación con el microorganismo *Geobacillus thermoglucosidasius*, a excepción de los porcentajes de materia orgánica los cuales se pueden acondicionar a los requerimientos del microorganismo, lo cual resulta de una manera oportuna en los suelos para el control de una de las variables importantes para una excelente biorremediación.

En los datos de la determinación de textura, predominó la fracción arena en el suelo. Se conoce que cuando existe en el suelo mayor porcentaje de arena, los procesos de biorremediación pueden llevarse a cabo con más éxito (Alexander, 1999), tal como aconteció en el porcentaje de remoción de aceites lubricantes finales para el sitio BOCA II el cual está constituido con el mayor porcentaje de arenas, el anterior dato obtenido apoya a esta propiedad, ya que la relación área/volumen de los diferentes tipos de partícula, tienen un impacto directo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por consiguiente en las tecnologías de remediación. En general, los materiales no consolidados (arenas y gravas finas) son más fáciles de tratar (Van Deuren et al. 1997, Eweis et al. 1998).

Lo arrojado por las curvas cinéticas para cada uno de los sitios estudiados se obtuvo que las mayores concentraciones del microorganismo *Geobacillus thermoglucosidasius* fueron en los sitios VER I y BOCA I, con lo cual se concluye que el tipo de servicio está relacionado con la capacidad de remoción de los aceites lubricantes, más no la cantidad de servicios brindados por cada taller ni la cantidad de años de operación de estos, siendo también un factor importante el tipo de textura que predomine en la zona a biorremediar sin embargo esta se deja en segundo lugar de importancia ya que de acuerdo con las exigencias de los requerimientos para funcionar por parte de las autoridades orillan a los establecimientos a modificar su tipo de suelo para el cumplimiento del mismo, dejando este factor como una variable secundaria.

REFERENCIAS

- Agarwal, S. (1998). *Environmental Biotechnology*. India: Publishing.
- Albert, L. (1997). *Introducción a la toxicología ambiental*. Obtenido de <http://www.bvsde.opsoms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-01a4.pdf>
- Alexander, M. (1994). Biodegradation and Biorremediation. *Academic Press, San Diego*, 302.
- Anon. (1990). Bioremediation of Alaskan sites on the way. *Oil and Gas Journal*, 4, 42.
- Barnhart, M., & Meyers, J. (1989). Pilot bioremediation tells all about. *Pollution Engineering*, 21, 110-112.
- Bautista F, D.-d.-B. C.-R. (2000). La materia orgánica soluble en el mejoramiento de los suelos tropicales. En: Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibañez-Huerta y N.E. García-Calderón (Eds). *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI*. México, México: Colegi de posgraduados en ciencias agrícolas.
- Benlloch, J. (2010). *Los lubricantes, características, propiedades y aplicaciones*. Barcelona, España.
- Blanquer, G. J. (2010). Textura de un suelo. *Universidad Politecnica de Valencia*.
- Boul, S. W. (2004). *Génesis y clasificación de suelos* (4° ed.). México. D.F.: Ed. Trillas, S. A.
- Bouwer, E. y. (1993). Biorremediation of organic compoundsputting microbial metabolism to word. *Trens Biotechnol*, 11, 360-367.
- Bouwer, E.J. y A.J.B. Zehnder. (1993). Biorremediation of organic compoundsputting microbial metabolism to word. *Trends Biotechnol*, 11, 360-367.
- Brady, N. C. (1999). *The nature and properties of soils*. NJ. USA: Ed. Prentice Hall. Upper Saddle River.
- Bravo, A. (1998). Climosecuencia en la Sierra de Gata, Slamanca.
- Caines, R. H. (2001). *Lidro de lubricantes del automovil*. USA: SAE.
- Couñago, R. &. (2005). El reemplazo genético de la adenilato quinasa en el termófilo grampositivo *Geobacillus stearothermophilus* altera la homeostasis del nucleótido adenina y reduce la viabilidad celular. *PubMed*, 9(2), 135-44.
- Cripps, R., Eley, K., Leak, D., Rudd, B., Taylor, M., Todd, M., . . . Martin, S. y. (2009). Caracterización funcional del sistema de utilización de galactanos de *Geobacillus stearothermophilus*. *PubMed*, 11(6), 398-408.

- De Borja, F. (2010). Huella ecológica de la revolución industrial. *Aula y Docentes*, 177-185.
- DENUE. (2017). Obtenido de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
- Díaz, S. J. (2006). Gestión de mantenimiento, para la selección y aplicación de lubricantes. Universidad Austral de Chile .
- Dominguez-Rosado, E., & Pichtel, J. y. (2004). Phytoremediation of Soil Contaminated with Used Motor Oil: I. Enhanced Microbial Activities from Laboratory and Growth Chamber Studies. *Environmental Engineering Science*, 21(2), 157-168. Obtenido de <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/109287504773087336>
- EPA. (2001). *Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report*. Environmental Protection Agency.
- Eweis, J. S. (1998). *Bioremediation Principles*. McGraw-Hill International Editions.
- Eweis, J. S. (1998). *Biorremediation Principles* . McGraw-Hill International.
- FAO. (2006). *Guidelines for soil description*. Italy, Rome.
- Fitzpatrick, E. A. (1987). *Suelos. Su formación, clasificación y distribución*. México, D.F.: Compañía Editorial Continental, S. A. de C. V. México.
- Gan, S. E. (2009). Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Journal of Hazardous Materials*, 172, 532-549.
- Gardi, C. A. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Luxemburgo, Luxemburgo.: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. doi:10.2788/37334
- Gardi, C. A. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Luxembourg: Unión Europea.
- Hess, A., Zarda, B., Hanh, D., Haner, A., Stax, D., & Hohener, P. y. (June de 1997). In Situ Analysis of Denitrifying Toluene- and m-Xylene-Degrading Bacteria in a Diesel Fuel-Contaminated Laboratory Aquifer Column. (A. S. Microbiology, Ed.) *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, 63(6), 2136–2141.
- Hutchinson, S. L. (2001). Phytoremediation of aged petroleum sludge of inorganic fertilizer. *Environ Qual*, 30, 395-403.
- Ighovie, E., & Okpali, A. E. (2012). Management of Petroleum Impacted Soil with Phytoremediation and Soil Amendments in Ekpang Delta State, Nigeria. *Journal of Environmental Protection*, 3, 386-393. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/42f7/87a66297c68f1486ab66f35db2ba9739e297.pdf>

- Ijah, U. (2002). Accelerated crude oil biodegradation in soil by inoculation with bacterial slurry. *Journal of Environmental Sciences*, 6(1), 38-47.
- Ijah, U. (2003). The potential use of chickendrop microorganisms for oil. *The Environmentalist*, 23, 89-95.
- INEGI. (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafología, Serie II, escala 1:250000 . *Continuo Nacional*. México.
- INEGI. (2012). *Vehículos de motos registrados en circulación*. Obtenido de http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=>
- International Union of Soil Science. (2006). *World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication*. Rome, Italy: International Soil Reference and Information Centre and Food and Agriculture Organization of the United Nations (IUSS Working Group WRB. IUSS-ISRIC and FAO).
- IUSS. (2006). World Reference Base for Soil Resources. Rome, Italy: UN Food and Agriculture Organization.
- IUSS. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso del Suelo. Roma, Italy: FAO.
- Jórdan, L. (2006). *Manual de Edafología*. Sevilla, España: Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química.
- Kottek, M. G. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259-263.
- Kumar, A. (2011). Crude oil PAH constitution, degradation pathway and associated bioremediation microflora:an overview.
- Kumar, V. (2016). Metabolismo de la bacteria termófila *Geobacillus thermoglucosidasius* en varias fuentes de carbono. *ELSEVIER*, 33, S16. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871678416315631?via%3Dihub>
- Lal, R. (2009). Soils and food sufficiency review. *Agronomy for Sustainable Development*(29), 113-133.
- Larenas, P. G., & L de Viana, M. (2005). Germinación y supervivencia del pasto cubano *Tithonia*. *Ecología Austral*, 177-181.
- Larenas, Parada, Giovanna; L de Viana, Marta. (2005). Germinación y supervivencia del pasto cubano *Tithonia tubaeformis* (Asteraceae) en suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo. *Ecología Austral*, 15(2), 177-182. Obtenido de https://digital.bl.fcen.uba.ar/download/ecologiaaustral/ecologiaaustral_v015_n02_p177.pdf

- Marchant, R., Sharkey, F., Banat, I., Rahman, T., & Perfumo, A. (2006). La degradación del n-hexadecano en el suelo por geobacilos termófilos. *PubMed*, 56(1), 44-54.
- Martins, A. A. (1992). Génesis e evolucao de solos derivados de Granitos. Universidad de Tras-Os-Montes e Alto Douro.
- Niehaus, F., Bertoldo, C., & Kähler, M. y. (1999). Extremófilos como fuente de nuevas enzimas para aplicaciones industriales. *Appl Microbiol Biotechnol.*, 51(6), 711-29.
- Odu, C. T. (1978). Fermentation characteristics and biochemical reactions of some organismos isolated from oil polluted soils. *ELSEVIER*, 271-276.
- Ogbo, E. M. (2009). Efectos de la contaminación del combustible diesel en las semillas. germinación de cuatro plantas de cultivo - Arachihipogaea Vigna unguiculata, sorgo bicolor y zeamayas. *Revista Africana de Biotecnología*, 8(2), 250-253. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/237812045_Effects_of_diesel_fuel_contamination_on_seed_germination_of_four_crop_plants_-_Arachis_hypogaea_Vigna_unguiculata_Sorghum_bicolor_and_Zea_mays
- Okpokwasili, G., & Okorie, B. (1988). Biodeterioration potentials of microorganisms isolated from engine lubricating oil. *Tribology International*, 21(4), 215-220.
- Ortiz S., C. D. (1990). *Manual para la cartografía de las clases de tierras campesinas*. México: Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de Méx.
- Paillat, T. E. (2000). Paillat, T, E. Moreau, P.O Electrokinetic phenomena in porous media applied to soil decontamination. . *Paillat, T, E. Moreau, P.O Grimaud y G. Touchard 2000. ElectrokinEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* , 693-704.
- Pardo, C. J., & Perdomo, R. M. (2004). Efecto de la adición de fertilizantes inorgánicos compuestos en la. *NOVA*, 2(2), 40-49. Obtenido de file:///C:/Users/casti/Downloads/document.pdf
- Pritchard, P. (1991). Bioremediation as a technology; experiences with the . *Journal of Hazardous Materials*, 28, 76-79.
- Pritchard, P., & Costa, C. (1991). EPA's Alaska oil spill bioremediation project. *Environmental Science and Technology*, 25, 115-130.
- Riseer-Roberts, E. (1998). *Remediation of pretroleum contaminated soil*. Lewis Publisher.
- Romero, R. F. (1989). FAMILIAS MINERALÓGICAS DE LOS SUELOS SOBRE GRANITOS DE LA PROVINCIA DE LA cORUÑA. Santiago de Chile: Universidad de Santiago.

- Ruiz, E. (1999). Aceites lubricantes para motores de gasolina . Bogotá, Colombia .
- Russi, D. M. (2002). Los pasivos ambientales. *Revista de ciencias sociales*, 15, 123-131.
- Seller, K. (1999). *Fundamentals of hazardous waste site remediation*. Lewis Publishers.
- SEMARNAT. (2012). Obtenido de http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf
- Semple, K. B. (2001). Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. *Eviron Pollution*, 112, 296.
- Sloan, R. (1987). Bioremediation demonstrated at a hazardous waste site. *Oil and Gas Journal*, 5, 61-66.
- Soil Survey Staff. (2003). *Keys to soil taxonomy*. Washington, DC., USA.: United States Department of Agriculture.
- Soil Survey Staff. (2006). *Keys to soil taxonomy*. Washington, DC. USA.: Department of Agriculture United States.
- Staff, S. S. (1998). *oil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys* (2° ed.). Washington, DC. USA.: United States Department of Agriculture.
- Staff, Soil Survey. (1999). *Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Washington, DC. USA.: United States Department of Agriculture.
- Suárez, L. (2012). *Aceites lubricantes*. España, España.
- Tabachnikov, O. &. (2003). Caracterización funcional del sistema de utilización de galactanos de *Geobacillus stearothermophilus*. *PubMed*, 280(3), 950-64.
- Tang, Y. C., Fu, Q. S., & Criddle, C. y. (2007). Efecto del flujo (presión transmembrana) y las propiedades de la membrana sobre el ensuciamiento y rechazo de las membranas de ósmosis inversa y nanofiltración que tratan el sulfonato de perfluorooctano que contiene aguas residuales. *Reinar. Sci. Technol.*, 41(6), 2008-2014.
- Taylor, M., Eley, K., Martin, S., Tuffin, M., & Burton, S. y. (2009). Etanologénesis termofílica: perspectivas futuras para la producción de bioetanol de segunda generación. *PubMed*, 27(7), 398-405.
- U.J.J., I., & S.P, A. (1988). Degradation and mineralization of crude oil by bacteria. *Nigerian Journal of Biotechnology*, 5, 79-87.
- Van Deuren, J. Z. (1997). *Remediation Technologies Screening Matrix and Referencew Guide*. Technology Innovation Office, EPA.

- Van Deuren, J., Z. Wang, Z. y J. Ledbetter. (1997). *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide*. 3ª Ed. Technology Innovation Office, EPA. Obtenido de <http://www.epa.gov/tio/remed.htm>.
- Viterio, B. . (2011). Analisis de la degradación de aceites lubricantes y propuesta de planes de mejora para el mantenimiento del equipo pesado. Riobamba, Ecuador: Escuela Politecnica de Chimborazo.
- Wiegel, J., & Ljungdahl, L. y. (2008). La importancia de las bacterias termofílicas en la biotecnología. *Taylor & Francis*, 3(1), 39-108.
- Zand, A. D., & Bidhendi, G. N. (2010). Phytoremediation of total petroleum hydrocarbons (TPHs). 34, 429-438. Obtenido de <http://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/issues/tar-10-34-5/tar-34-5-8-0903-2.pdf>