



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores

“Zaragoza”

Carrera de Biología

Laboratorio de Contaminación Atmosférica

Evaluación del establecimiento de la cubierta vegetal con especies arbustivas y arbóreas tolerantes a las condiciones del sitio de disposición final postclausura “Parque Ecológico Cuitlahuac”

Alumno: López Buendía Víctor Alfonso

Área: Ambientalismo

Asesora de tesis: Biól. María de los Ángeles Galván Villanueva



México, D.F. Enero de 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre: María del Carmen Buendía Gutiérrez a quien le debo la vida, gracias por su amor y porque me ha brindado todo su apoyo para seguir estudiando y siempre esperara lo mejor de mí.

A la memoria de mi padre: Vicente López Vera por ser la estrella que ilumina mi camino y por cuidarme desde el cielo en todo momento.

A mis hermanos: Ali y Vicente que siempre me han acompañado en todo momento y que creyeron en mi, a Toño que gracias a su ejemplo y apoyo me impulsa en seguir adelante.

A mis sobrinos: Emilio y Alison por su felicidad y dicha de ser su tío por que con su compañía y cariño, me hacen amarlos con todo el corazón.

A Yssel: por el cariño y apoyo incondicional que siempre me ha entregado.

A mis amigos y compañeros: con los que mantuve una estrecha amistad y confianza e interés en la realización de este trabajo.

A mi directora de tesis Biól. María de los Ángeles Galván Villanueva: por su apoyo, amistad, y buenos consejos en la realización de este trabajo, gracias profesora.

A mis sinodales: Biól. Aída Zapata Cruz, M. en C. Ramiro Ríos Gómez, Dra. Rosalva García Sánchez y Dra. Esther Matiana García Amador por su apoyo, sus valiosas aclaraciones y su tiempo para realización y culminación este trabajo.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	i
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEORICO	3
2.1 Antecedentes	3
2.2 Residuos sólidos urbanos (RSU)	5
2.2.1 Definiciones y tipos	5
2.2.2 Marco legal de los residuos sólidos	6
2.2.3 Manejo de los residuos sólidos urbanos	9
2.3 Disposición final	11
2.3.1 Métodos	11
2.3.1.1 Tiradero a cielo abierto	11
2.3.1.2 Enterramiento controlado	12
2.3.1.3 Relleno sanitario	12
2.3.1.3.1 NOM-083-SEMARNAT-2003	13
2.3.1.3.2 Categorías de rellenos sanitarios	13
2.3.2 Reacciones químicas que se generan en los sitios de disposición final	15
2.3.3 Impactos ambientales en los sitios de disposición final	16
2.3.4 Clausura de un sitio de disposición final	17
2.3.4 .1 Uso final del suelo	19
2.3.4.2 Diseño de la cobertura final	19
2.4 Revegetación	22
2.4.1 Consideraciones en la selección de las especies vegetales	24
2.4.2 Diseño de la cubierta vegetal	25
2.4.3 Mantenimiento de la cubierta vegetal	27
2.5 Contaminación de suelos por metales pesados en los sitios de disposición final	28
2.5.1 Definición y generalidades de metales pesados	28
2.5.2 Fuentes de metales pesados en el suelo	28
2.5.3 Efecto de los metales pesados en el suelo	29
2.5.4 Distribución de los metales pesados en suelo	29
2.5.5 Biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo	30
2.5.6 Movilidad de los metales pesados en el suelo	31
2.5.7 Características de los metales estudiados	33
2.5.8 Concentración de metales pesados en el suelo y plantas	39

2.6 Descripción de las especies vegetales y requerimientos de cultivo	40
2.6.1 <i>Cupressus sempervirens L</i>	40
2.6.2 <i>Liquidambar styraciflua L</i>	42
2.6.3 <i>Senna multiglandulosa (Jacq.) Irwin & Barneby</i>	44
2.6.4 <i>Dodonaea viscosa (L.) Jacq</i>	46
2.6.5 <i>Callistemon citrinus (Curtis) Skeels</i>	47
2.7 Planteamiento del problema	49
2.8 Descripción del área de estudio	50
2.8.1 Antecedentes del área de estudio	50
2.8.2 Localización geográfica	51
2.8.3 Condiciones climáticas	52
2.8.4 Topografía e Hidrología	53
2.8.5 Edafología y Geología	53
2.9 Justificación	54
III. HIPOTESIS	55
IV. OBJETIVOS	56
4.1 Objetivo general	56
4.2 Objetivos particulares	56
V. MÉTODO	57
5.1 Muestreo del suelo	57
5.2 Análisis químicos y físicos del suelo	57
5.3 Análisis de metales extractables en el suelo	58
5.4 Selección de las especies	59
5.5 Plantación	60
5.6 Supervivencia	62
5.7 Crecimiento	63
5.8 Análisis estadístico	64
VI. RESULTADOS	65
VII. ANALISIS DE RESULTADOS	78
VIII. CONCLUSIONES	96
IX. REFERENCIAS	97
X. ANEXOS	103

INDICE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Manejo de los residuos sólidos urbanos	9
Figura 2. Bordo Poniente IV Etapa	10
Figura 3. Componentes de un relleno sanitario	12
Figura 4. Esquema general de la descomposición de los residuos	15
Figura 5. Secuencia para el procedimiento de clausura de un sitio de disposición final	18
Figura 6. Capas de la cubierta final de un sitio de disposición final	21
Figura 7. Sucesión natural de una comunidad de plantas	26
Figura 8. Influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales	31
Figura 9. <i>Cupressus sempervirens</i> introducido en la parcela experimental	40
Figura 10. <i>Liquidambar styraciflua</i> introducido en la parcela experimental	42
Figura 11. <i>Senna multiglandulosa</i> introducida en la parcela experimental	44
Figura 12. <i>Dodonaea viscosa</i> introducida en la parcela experimental	46
Figura 13. <i>Callistemon citrinus</i> introducid en la parcela experimental	48
Figura 14. Estructura del suelo del Parque Ecológico Cuitlahuac	49
Figura 15. Ubicación de la parcela experimental en el Parque Ecológico Cuitláhuac	51
Figura16. Parcela experimental en el Parque Ecológico Cuitláhuac	52
Figura 17. Transporte de las especies vegetales seleccionadas	61
Figura 18. Diferentes formas de plantación	61
Figura 19. Distribución de los individuos por especie en la parcela experimental	70

Figura 20. Porcentaje de supervivencia de las especies <i>Cupressus sempervirens</i> , <i>Liquidambar styraciflua</i> , <i>Senna multiglandulosa</i> , <i>Callistemon citrinus</i> y <i>Dodonaea viscosa</i> vs Tiempo (días) en estudio en la parcela experimental	71
Figura 21. Crecimiento en altura (cm) vs tiempo (mes), de las especies <i>Cupressus sempervirens</i> y <i>Senna multiglandulosa</i> de mayo 2009 a abril 2010 y <i>Callistemon citrinus</i> y <i>Dodonaea viscosa</i> de julio 2009 a junio 2010	72
Figura 22. Crecimiento en diametro (mm) vs tiempo (mes), de las especies <i>Cupressus sempervirens</i> y <i>Senna multiglandulosa</i> de mayo 2009 a abril 2010 y <i>Callistemon citrinus</i> y <i>Dodonaea viscosa</i> de julio 2009 a junio 2010	73
Figura 23. Crecimiento en cobertura de copa (m ²) vs tiempo (mes), de las especies <i>Cupressus sempervirens</i> y <i>Senna multiglandulosa</i> de mayo 2009 a abril 2010 y <i>Callistemon citrinus</i> y <i>Dodonaea viscosa</i> de julio 2009 a junio 2010	74
Figura 24. Tasa relativa de crecimiento en altura promedio de las especies <i>Callistemon citrinus</i> <i>Cupressus sempervirens</i> , <i>Dodonaea viscosa</i> y <i>Senna Multiglandulosa</i>	75
Figura 25. Tasa relativa de crecimiento en diametro promedio de las especies <i>Callistemon citrinus</i> <i>Cupressus sempervirens</i> , <i>Dodonaea viscosa</i> y <i>Senna Multiglandulosa</i>	76
Figura 26. Tasa relativa de crecimiento en cobertura de copa promedio de las especies <i>Callistemon citrinus</i> <i>Cupressus sempervirens</i> , <i>Dodonaea viscosa</i> y <i>Senna multiglandulosa</i>	77

INDICE DE CUADROS

	Pag.
Cuadro 1. Antecedentes referentes a revegetación en sitios de disposición final	3
Cuadro 2. Legislación nacional en materia de residuos sólidos	6
Cuadro 3. Proceso de desarrollo de los métodos de disposición final	11
Cuadro 4. Categorías de rellenos sanitarios	13
Cuadro 5. Resumen de los requisitos y especificaciones generales para los sitios de disposición final, de acuerdo a la categorización presentada en la NOM-083-SEMARNAT-2003	14
Cuadro 6. Concentración típica de algunos metales pesados en el suelo y en las plantas	39
Cuadro 7. Condiciones operacionales en la determinación de metales por espectrofotometría de absorción atómica de flama con el equipo Varian Spectran 2000	58
Cuadro 8. Apariencia de follaje	62
Cuadro 9. Resultados promedio del análisis químico y físico realizado al suelo de la parcela experimental	66
Cuadro 10. Concentración promedio de metales en la parcela experimental	68
Cuadro 11. Estadística descriptiva de las la concentración de metales intercambiables ($\mu\text{g g}^{-1}$), en el suelo de la parcela experimental	69

RESUMEN

Este trabajo se realizó en la parcela experimental en el Parque Ecológico Cuitlahuac. El objetivo fue evaluar el establecimiento y crecimiento de las especies *Cupressus sempervirens*, *Liquidambar styraciflua*, *Senna multiglandulosa*, *Dodonaea viscosa* y *Callistemon citrinus*, durante el primer año después de su plantación.

Se realizaron análisis físicos y químicos del suelo de la parcela experimental con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000. Se trabajaron dos repeticiones de 25 muestras simples tomadas al azar, el resultado de los análisis mostro: un color moteado principalmente, una clase textural dominante migajón arenosa, bajas cantidades de salinidad de 0.01dsm^{-1} a 0.018dsm^{-1} , una actividad de carbonatos que va desde baja a alta, un porcentaje de materia orgánica que van de 0.01% a 8.69%, una CIC de 14.17cmol kg^{-1} a 47.39cmol kg^{-1} y un pH de 6.8 a 8.6 (que va de neutro hasta fuertemente alcalino).

Se analizó la concentración de metales intercambiables, los cuales fueron Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb y Zn de las 25 muestras obtenidas. Los metales intercambiables presentaron la siguiente secuencia: $\text{Zn} > \text{Al} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Fe} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Cr}$.

La especie *Cupressus sempervirens*, *Senna multiglandulosa* presentaron una supervivencia de 100%, *Dodonaea viscosa* un 94% y *Callistemon citrinus*, un 88 %. Sin embargo, *Liquidambar styraciflua* tuvo una mortalidad del 100%.

La tasa relativa de crecimiento en *Senna multiglandulosa* presentó el mejor crecimiento, seguida de *Cupressus sempervirens*, *Callistemon citrinus* y por último *Dodonaea viscosa*.

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los informes históricos de la SEDESOL, la generación y composición de los residuos sólidos urbanos han variado significativamente durante las últimas décadas, debido a factores como la explosión demográfica e industrial, patrones de producción, consumo y el proceso de urbanización, entre otros. La generación *per cápita* creció de 0.300 kg/hab/día en 1950 a 0.900 kg/hab/día en 2004, la población nacional en este mismo periodo pasó de 30 a 105 millones de habitantes (SEDESOL, 2005).

Existen graves daños provocados al ambiente por el manejo y control inadecuado de los residuos y la falta de incorporación de métodos o técnicas apropiados en los sitios de disposición final, lugares donde se depositan permanentemente los residuos, cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones a la salud de la población.

Las prácticas tradicionales sin control han dado lugar a la aparición de tiraderos a cielo abierto, que constituyen un foco de contaminación ambiental ya que no hay control del biogás que se produce por la degradación de los desechos, que en su mayoría son metano (CH_4) y bióxido de carbono (CO_2), ni de la producción de los lixiviados tanto por el agua que resulta de la degradación de la materia orgánica como por el agua de lluvia que atraviesa el material acumulado y que arrastra en solución distintos componentes, como materia orgánica, compuestos orgánicos, principalmente alcanos y metales pesados.

En la actualidad, los tiraderos se encuentran en un espectro de tamaños y a menudo se encuentran en zonas críticas, ya sea en un hábitat sensible o cerca de las viviendas residenciales urbanas, por lo que origina un impacto visual y ambiental a corto y largo plazo en la comunidad o la región. En la mayoría de los casos, los tiraderos a cielo abierto son abandonados sin ningún control, dejándole el trabajo a la naturaleza, para que con el tiempo, regenere el área contaminada.

El hecho de que los municipios abandonen los residuos en tiraderos a cielo abierto es considerado una práctica irresponsable con las generaciones presentes y futuras, así como opuesta al desarrollo sostenible. Sobre la disposición final total de los residuos sólidos urbanos (RSU) que se generan a nivel nacional, el 73.18% se depositan en tiraderos a cielo abierto, y el resto 26.82%, se maneja por medio de relleno controlado y relleno sanitario (SEDESOL, 2005).

Entre los métodos más conocidos para disponer los residuos, actualmente se considera a los rellenos sanitarios como la mejor solución técnica, económica y sanitaria. (Espinace *et al.*, 2000). Un sitio de disposición final cerrado puede ser un recurso valioso para el futuro desarrollo y uso de la comunidad o puede permanecer como una carga económica y un déficit ambiental.

Con el fin de que los sitios de disposición final reúnan los criterios fijados por la normatividad y aspectos técnicos y operativos vigentes, una vez que hayan agotado su vida útil o finalizado su cometido, se requiere de acciones para la clausura y saneamiento ambiental, así como establecer un uso apropiado para que, bajo ciertas condiciones pueda utilizarse nuevamente en alguna actividad con fines recreativos, deportivos y/o áreas verdes (SEGEM-GTZ, 2002).

El sellado de los sitios de disposición final tiene como objetivo principal preparar el área que ocupan para su revegetación, con el fin de integrar el área de vertido con el medio que le rodea y sin deterioro de las condiciones ambientales del lugar. Sin embargo, la mayor parte de los mismos tiene una deficiente integración con el entorno donde se ubican. Por lo general estos sitios contienen residuos de origen mixto (urbano e industrial), que hacen aún más difícil la «colonización natural» de estos sitios. No obstante, en estos lugares se tienen gran interés por la aplicación de la ciencia ecológica, ya que proporcionan un escenario real adecuado para la investigación acerca de las pautas que podemos seguir tanto para la revegetación de ecosistemas degradados y contaminados. Así como para el conocimiento de especies vegetales indicadoras de contaminación y tolerantes a las condiciones desfavorables y otras idóneas para la fitorremediación de suelos degradados (Pastor y Hernández, 2002).

II. MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes

Los antecedentes referentes a trabajos sobre revegetación en sitios de disposición final a nivel internacional y en la zona de estudio, se resumen a continuación (cuadro 1).

Cuadro 1. Antecedentes referentes a revegetación en sitios de disposición final			
Autor (es)	Año	Título del trabajo	Resumen del trabajo
El Ministerio del Ambiente y Calidad de Vida de Francia.	1985	Los residuos urbanos	Planteó la importancia de ocupar los rellenos sanitarios, con una cubierta vegetal y especies tanto arbóreas como herbáceas, las cuales soportaron las condiciones de suelo que posee un relleno sanitario, esto es, delgada capa de suelo, alta concentración de gases como dióxido de carbono y metano, alto contenido de metales pesados entre otros.
Galván y otros autores (b).	1995	Caracterización del extriradero de Santa Cruz Meyehualco y su efecto en la vegetación utilizada en la forestación	Observo una serie de problemáticas, que ha impedido que la cubierta vegetal se establezca a las condiciones extremas que se presentan en este tipo de sitios como lo son: un suelo antrosol con bajo contenido de nitrógeno y oxígeno, rico en materia orgánica, estrés hídrico y elevada concentración de metales pesados.
Olaeta y otros autores.	1997	Experiencias de reinserción de vertederos mediante la implantación de una cubierta vegetal	Definió diferentes alternativas de reinserción y distintos usos que se pueden dar a una cubierta vegetal. Se determinaron diversas especies de arbustos y árboles para la reinserción postclausura de diversos rellenos sanitarios, donde se concluye que debido a las condiciones de los lugares, se deben utilizar especies resistentes y con adaptación de estas a las condiciones de tensión del medio.
Espinace y otros autores.	2000	Metodología integrada para rehabilitar rellenos sanitarios	Definió metodologías para rellenos de residuos; seleccionar especies vegetales empleadas en la rehabilitación, evaluar las influencias de las emisiones de biogás en el desarrollo de especies vegetales; evaluar posibles usos agrícolas o forestales de especies vegetales y estabilizar taludes a través de la introducción de vegetación de estabilizadores.

García y Murguía.	2000	Evaluación del establecimiento de <i>Senna didymobotrya</i> para la recuperación de la cubierta vegetal para sitios de disposición final postclausura	Resaltaron la importancia de caracterizar física y químicamente el suelo del parque recreativo Cuitlahuac, determinando una elevada salinidad, pH alcalino y déficit nutrimental. Se propone a <i>Senna didymobotrya</i> , como una especie con gran capacidad de éxito para establecerse bajo condiciones adversas.
López y Pérez.	2003	El género <i>Acacia</i> como una alternativa para recuperar la cubierta vegetal arbórea, en el sitio postclausura en el parque recreativo Cuitlahuac de Santa Cruz Meyehualco	Determinaron cuales son las variables del sustrato que afectan el desarrollo de la planta y que son comunes a la mayoría de los sitios de la zona de estudio como Santa Fe, Tláhuac, entre otros. Introdujeron ejemplares de <i>Acacia saligna</i> y <i>Acacia nerifolia</i> con tallas de 120 a 150 cm de altura. Después del estudio se obtuvo un 90 % de supervivencia para ambas especies.
Duarte.	2005	Rehabilitación de la cubierta vegetal arbórea con el genero <i>Acacia</i> en un sitio de disposición final postclausura, parque recreativo Cuitlahuac	Llevó a cabo la introducción y seguimiento de individuos del género <i>Acacia</i> y concluyó que las especies presentan una elevada capacidad de establecimiento a las condiciones del sustrato y reportó que el sustrato del sitio presenta heterogeneidad tanto vertical como horizontal.
Marín.	2006	Introducción de <i>Grevillea robusta</i> y <i>Cupressus lindley</i> en el parque Cuitlahuac anteriormente empleado como sitio de disposición final	Se evaluó y se observó la capacidad de establecimiento de <i>Grevillea robusta</i> y <i>Cupressus lindley</i> . Se concluyo que estas especies tienen la capacidad de establecimiento en sitios de disposición final en donde existen condiciones adversas para su crecimiento.
Mendoza.	2006	Evaluación del establecimiento de <i>Tamarix gallica</i> y <i>Tecoma stans</i> a diferentes tallas, para la recuperación de la cubierta vegetal arbórea y arbustiva en un sitio de disposición final postclausura	Estudio dos especies vegetales <i>Tamarix gallica</i> y <i>Tecoma stans</i> , con el seguimiento de su establecimiento, a través del desarrollo mensual de ciertos caracteres que indican su norma de reacción a los diferentes tipos de estrés que presentan y se determino que la talla con la que el individuo es introducido en el área de estudio influye en su desarrollo.
Gómez.	2007	Seguimiento de las especies de <i>Acacia baileyana</i> , <i>A. saligna</i> y <i>A. nerifolia</i> en un sitio de disposición final postclausura en el parque recreativo Cuitlahuac	Realizó el seguimiento de la cubierta vegetal con especies arbóreas y arbustivas (<i>Acacia baileyana</i> , <i>Acacia nerifolia</i> y <i>Acacia saligna</i>) en el Parque Recreativo Cuitlahuac concluyendo que estos árboles presentan buena adaptación al sitio tolerando condiciones extremas y favoreciendo la fijación de nitrógeno.

2.2 Residuos sólidos urbanos (RSU)

2.2.1 Definiciones y tipos

La clasificación de los residuos es una herramienta que permite definir para cada tipo de residuo, las formas más adecuadas de manejo y se basa por lo general en la identificación y similitud en sus características físicas, químicas o biológicas. Por lo que son importantes las siguientes definiciones.

Residuo: Son aquellos materiales cuyo poseedor desecha y que se encuentran en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso contenidos en recipientes y que pueden ser susceptibles de recibir tratamiento o disposición final (artículo 5, fracción XXIX, LGPGIR, 2007).

Residuos sólidos urbanos (RSU): Son aquéllos generados en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas, de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole (artículo 5, fracción XXXIII, LGPGIR, 2007).

Residuos de manejo especial (RME): Los que requieran sujetarse a planes de manejo específico con el propósito de seleccionarlos, acopiarlos, trasportarlos, aprovechar su valor o sujetarlos a tratamientos o disposición final de manera ambientalmente adecuada y debidamente controlados (artículo 3, fracción XXX, LRSDF, 2003).

Residuos peligrosos (RP): Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente (artículo 3, fracción XXXII, LGEEPA, 2007).

2.2.2 Marco legal de los residuos sólidos

El marco legal vigente en México referentes a los residuos sólidos es por medio de leyes, normas y reglamentos en los tres órdenes de gobierno: federal, estatal y municipal. El detalle de estos preceptos se señala a continuación en el cuadro 2 (SEMARNAT-GTZ, 2004).

Cuadro 2. Legislación nacional en materia de residuos sólidos		
Legislación Federal	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	Art. 115. Establece la prestación de servicios públicos por parte del municipio.
	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA, 2007)	<p>Art. 7. Corresponden a los Estados, de conformidad con lo dispuesto en esta ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades:</p> <p>Fracción VI. Obliga a los Estados a ocuparse de la regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos.</p> <p>Art. 8. Corresponden a los Municipios, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades:</p> <p>Fracción IV.- La aplicación de las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos.</p> <p>Art. 134. Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios:</p> <p>Fracción I.- Corresponde al Estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo;</p> <p>Fracción II.- Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;</p> <p>Fracción III.- Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reusó y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes.</p> <p>Art.135. Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en los siguientes casos:</p> <p>Fracción II. La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios;</p> <p>Fracción III.- La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos, industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorgan.</p> <p>Art. 136. Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltran en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:</p>

	<p>Fracción I. La contaminación del suelo;</p> <p>Fracción II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;</p> <p>Fracción III.- Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación,</p> <p>Art. 137. Queda sujeto a la autorización de los Municipios o del Distrito Federal, conforme a sus leyes locales en la materia y a las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reusó, tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos.</p> <p>La Secretaría expedirá las normas a que deberán sujetarse los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de residuos sólidos urbanos.</p> <p>Art. 138. La Secretaría promoverá la celebración de acuerdos de coordinación y asesoría con los gobiernos estatales y municipales para:</p> <p>Fracción I.- La implantación y mejoramiento de sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos;</p> <p>Fracción II.- La identificación de alternativas de reutilización y disposición final de residuos sólidos municipales, incluyendo la elaboración de inventarios de los mismos y sus fuentes generadoras.</p>
<p>Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2007)</p>	<p>Art. 1. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación, así como establecer las bases para:</p> <p>Art. 97. Las normas oficiales mexicanas establecerán los términos a que deberá sujetarse la ubicación de los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, en rellenos sanitarios o en confinamientos controlados.</p> <p>Las normas especificarán las condiciones que deben reunir las instalaciones y los tipos de residuos que puedan disponerse en ellas, para prevenir la formación de lixiviados y la migración de éstos fuera de las celdas de confinamiento. Asimismo, plantearán en qué casos se puede permitir la formación de biogás para su aprovechamiento. Los municipios regularán los usos del suelo de conformidad con los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano, en los cuales se considerarán las áreas en las que se establecerán los sitios de disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial.</p>
<p>NOM-083-SEMARNAT-2003</p>	<p>Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.</p>

Legislación Estatal	Ley Estatal de Prevención y Gestión Integral de Residuos	Puede o no existir dentro de la entidad en cuestión.
	Ley Estatal del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	Puede o no existir dentro de la entidad en cuestión.
	Reglamento de la Ley Estatal del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiental	Puede o no existir dentro de la entidad en cuestión.
Legislación Municipal	Bando Municipal	Por lo general, los bandos municipales consideran una pequeña fracción referente al servicio de limpia, ya sea en los capítulos de ecología o servicios públicos.
	Reglamento del Servicio de Limpia Municipal	Puede o no existir dentro de la entidad en cuestión.
	Ordenamiento Municipal	Pueden o no existir dentro de la entidad en cuestión.
Normas Técnicas	<p>Norma Mexicana(NMX)</p> <p>Estas NMX tienen el objetivo de estandarizar los procedimientos relacionados con los estudios de caracterización de los residuos sólidos, que por lo general se solicitan como parte de los proyectos de ingeniería. No son de observancia obligatoria</p>	<p>NMX-AA-15-1985 Muestreo – Método de cuarteo.</p> <p>NMX-AA-61-1985 Determinación de la generación.</p> <p>NMX-AA-22-1985 Selección y cuantificación de subproductos</p> <p>NMX-AA-16-1984 Determinación de humedad.</p> <p>NMX-AA-19-1985 Peso volumétrico <i>in situ</i>.</p> <p>NMX-AA-21-1985 Determinación de materia orgánica.</p> <p>NMX-AA-24-1984 Determinación de nitrógeno total.</p> <p>NMX-AA-25-1984 Determinación de pH, método potenciométrico.</p> <p>NMX-AA-33-1985 Determinación del poder calorífico</p> <p>NMX-AA-52-1985 Preparación de muestras de laboratorio para su análisis</p> <p>NMX-AA-67-1985 Determinación de la relación carbono/nitrógeno</p> <p>NMX-AA-68-1986 Determinación de hidrógeno</p> <p>NMX-AA-90-1986 Determinación de oxígeno</p> <p>NMX-AA-92-1984 Determinación de azufre.</p>

2.2.3 Manejo de los residuos sólidos urbanos

Es la parte técnica de la gestión integral e incluye a todos los aspectos relacionados con los RSU, consta de las siguientes fases: generación, separación, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos; Esta última es imprescindible para su manejo. Las primeras tres fases son responsabilidad del generador de dichos residuos; las demás son competencia del organismo encargado de la prestación del servicio de limpia (Figura 1).

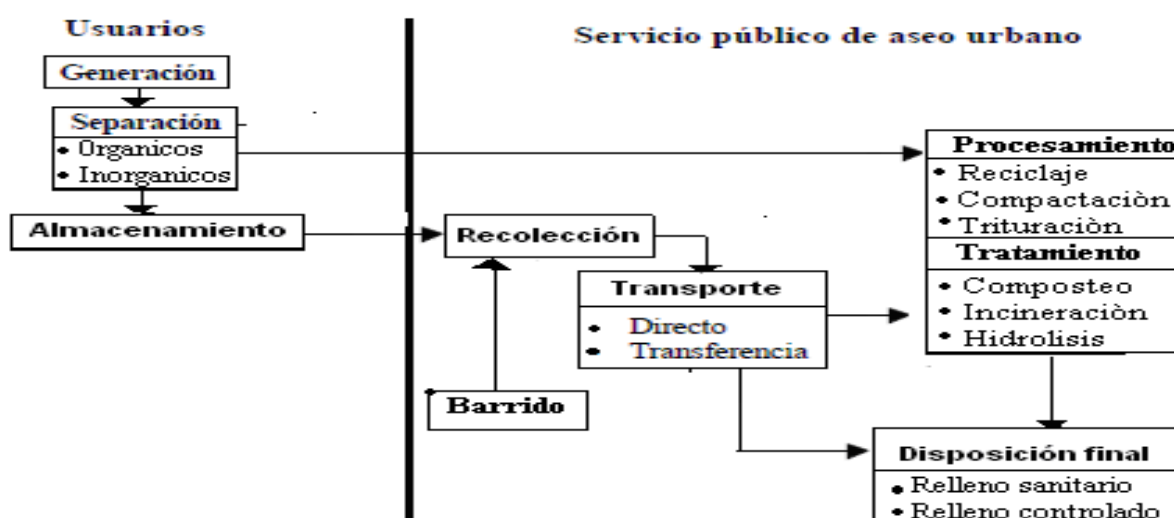


Figura 1. Manejo de los residuos sólidos urbanos

La generación *per cápita*¹ los RSU de una población (kg/hab/día), depende de la localidad y el nivel socioeconómico de la población: En zonas rurales la generación *per cápita* es menor en relación a las zonas metropolitanas. La generación *per cápita* a nivel nacional en el 2010 se estima de 0.960 kg/hab/día. Mientras que para el Distrito Federal es de 1.274 kg/hab/día (SMA, 2010).

1. La estimación de la generación nacional se calcula, conforme a lo establecido en la norma NMX-AA-61-1985 sobre la determinación de la generación de residuos sólidos, con base en la generación promedio de residuos sólidos por habitante (medida en kg/hab/día).

Se estima que actualmente en el Distrito Federal el 53% de lo RSU son de tipo orgánico, en tanto que el 28% son potencialmente reciclables como el papel y el cartón (14%), vidrio seis por ciento, plásticos cuatro por ciento, hojalata tres por ciento. El 19 % restantes son residuos de madera, cuero, hule, envases de cartón encerado y fibras diversas (SMA, 2010).

Por lo tanto es mejor separarlos en el momento que se generan y para su almacenamiento se hace en los recipientes que deben tener un peso y diseño específicos que faciliten su manejo por los operarios y equipos, de este modo la recolección y su transporte hacia las instalaciones de procesamiento, transferencia de materiales o bien un relleno sanitario, en el D. F. se realiza por el servicio de limpia a través de las delegaciones y en provincia, por medio de los municipios (Jaramillo, 2002).

En el D.F., más del 75% de los RSU pasan por estaciones de transferencia, parte de los cuales son procesados (Sancho y Cervera, 1999), finalmente al relleno sanitario deberán llegar los materiales que no tienen la posibilidad de ser aprovechados o procesados y corresponde a la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) que es la instancia responsable de la disposición final de los RSU generados en el Distrito Federal, en el relleno sanitario Bordo Poniente. En donde estos son confinados, en espacios que al saturarse son reforestados y se convierten en áreas verdes destinadas a la recreación (DGSU, 2009, figura 2).



Figura 2. Bordo Poniente IV Etapa.

2.3 Disposición final

2.3.1 Métodos

Se muestra la evolución típica de los métodos de disposición final de RSU.

(cuadro 3, Jaramillo, 2002).

Cuadro 3. Proceso de desarrollo de los métodos de disposición final	
Métodos/Situación	Descripción
Disposición en la vía pública	El generador de residuos los dispone en vías y espacios públicos, así como en áreas urbanas y rurales, lo que genera riesgos sanitarios o ambientales. Esto es común en zonas que no cuentan con un servicio de recolección.
Disposición local sin control en pequeños tiraderos	Existe un servicio de recolección primaria y un transporte incipiente hacia un sitio cercano (por lo general, dentro de la ciudad) donde se colocan los RSU sin control alguno.
Tiradero a cielo abierto	Existe recolección primaria y secundaria. Los residuos se transportan y disponen sin control alguno en un sitio alejado de la ciudad.
Relleno controlado	Lugar de disposición final de los residuos que no cuenta con la infraestructura necesaria ni suficiente para ser considerado como un relleno sanitario. En el relleno controlado tiene las condiciones mínimas de operación para que los residuos no se encuentren a cielo abierto; estos residuos deberán ser compactados en capas para reducir su volumen y serán confinados periódicamente con material de cobertura.
Relleno sanitario	El relleno sanitario es diseñado, construido y operado con criterios de ingeniería sanitaria y ambiental. El sitio cuenta con los permisos y requisitos de ley.

2.3.1.1 Tiradero a cielo abierto

Es el sitio donde los RSU se arrojan y abandonan en el suelo sin separación ni tratamiento alguno. Este lugar suele funcionar sin criterios técnicos y ningún tipo de control sanitario. Los tiraderos a cielo abierto se caracterizan por contaminar en un grado muy alto al ambiente que les rodea. Esto se basa en la premisa de que la basura contiene materiales putrescibles que se descomponen por la acción de las bacterias aerobias y anaerobias, produciendo gases altamente tóxicos como el (CH₄), (CO₂), (NH₃) y (H₂S).

Puesto que las temperaturas en el tiradero se elevan, llegan a originarse incendios espontáneos que provocan la presencia de humo en grandes cantidades, lo que aunado al polvo y partículas arrastradas por el viento, contaminan la atmósfera. Lo mismo sucede con el agua subterránea que es contaminada por la infiltración de los lixiviados (Deffis, 1994).

2.3.1.2 Enterramiento controlado

Consiste en verter los residuos en el suelo, extenderlos y presionarlos mediante aplanadoras, cubriéndola con tierra y comprimiendo ésta. Este método disminuye y evita problemas de contaminación ambiental relacionados con la acumulación de los desechos, ya que no existe un control de los lixiviados, ni el biogás que se producen durante la acumulación y descomposición de los residuos (Mendoza, 2007).

2.3.1.3 Relleno sanitario

El relleno sanitario es un método, que consiste en depositar en el suelo los residuos sólidos, los cuales se esparcen y compactan reduciéndolos al menor volumen posible para que así ocupen un área pequeña y siguiendo los requisitos que marca la norma oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT-GTZ. 2004). En la figura 3, se presentan los componentes de un relleno sanitario.

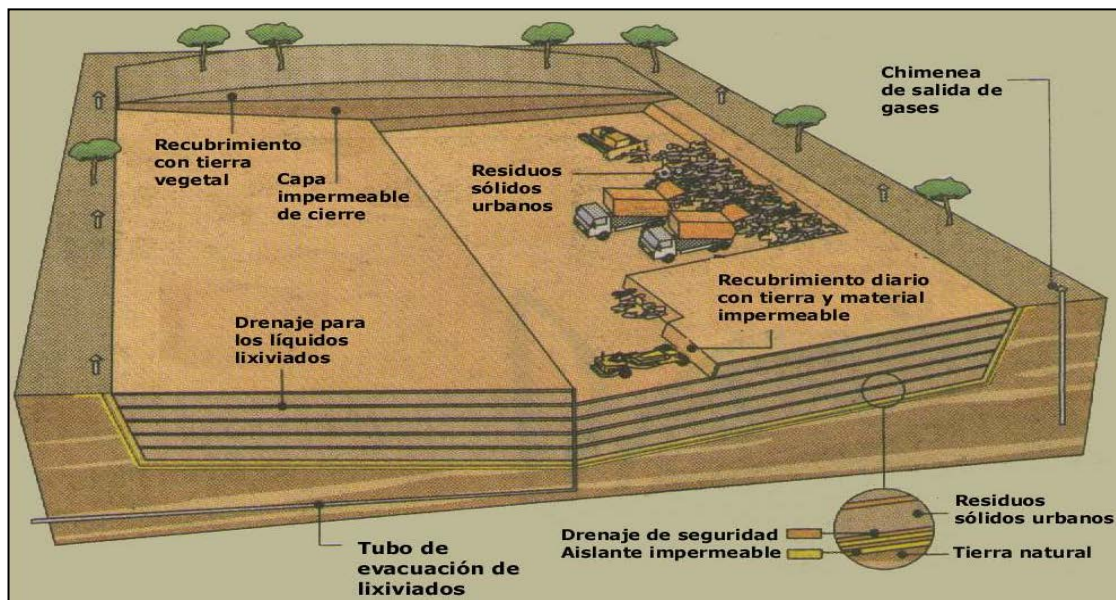


Figura 3. Componentes de un relleno sanitario

2.3.1.3.1 NOM-083-SEMARNAT-2003

Fue publicada el 20 de octubre de 2004 y entro en vigor a partir del 19 de diciembre de 2004. El instrumento más apegado a las condiciones en las distintas regiones del país, y se espera que a través de su operatividad se mejore la disposición final de los RSU y RME en el territorio mexicano.

Los elementos de la Normatividad vigente (NOM-083-SEMARNAT-2003) son:

1. Criterios y estudios que deben realizarse para seleccionar el lugar donde se construirá el relleno sanitario.
2. Estudios y criterios básicos para el diseño de la ingeniería de este tipo de obra.
3. Características de construcción y operación que deberán contener.
4. Obras complementarias para su funcionamiento.
5. Características del monitoreo ambiental.
6. Bases para considerar la clausura final, y
7. Procedimiento para evaluar el cumplimiento de la NOM ante las autoridades correspondientes.

2.3.1.3.2 Categorías de rellenos sanitarios

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, los rellenos sanitarios se categorizan de según la cantidad de RSU y RME que reciben diariamente. En la cuadro 4, puede verse el tipo de municipio que corresponde a cada categoría de relleno sanitario.

Cuadro 4. Categorías de rellenos sanitarios		
Categoría	Tonelaje recibido en el sitio de disposición final Ton /día	Equivalente rango en número de habitantes
A	Mayor de 100	Mayor de 100,000
B	De 50 hasta 100	De 50,000 hasta 120,000
C	De 10 y menor que 50	De 12,000 hasta 65,000
D	Menor de 10	Menor de 15,000

En el cuadro 5, se presenta un breve resumen de los criterios que se deben cumplir dependiendo de la categoría de relleno sanitario que le corresponda (SEMARNAT-GTZ, 2004).

Cuadro 5. Resumen de los requisitos y especificaciones generales para los sitios de disposición final, de acuerdo a la categorización presentada en la NOM-083-SEMARNAT-2003.

Requisitos	Tipo de categoría de relleno sanitario			
	A	B	C	D
A. Especificaciones de selección del sitio				
A.1 Restricciones	•	•	•	•
A.2 Estudios y análisis previos a la selección del sitio	•			
A.3 Estudios y análisis previos a la construcción				
A.3.1 Topográfico	•	•	•	
A.3.2 Geotécnico	•	•		
A.3.3 Geológico/Hidrogeológico	•	•		
A.3.4 Generación y composición de residuos	•	•	•	
A.3.5 Generación de biogás	•	•		
A.3.6 Generación de lixiviados	•	•		
B. Características constructivas y operativas.	•	•		
B.1 Barrera impermeable.	1x10 ⁷ cm/s	1x10 ⁷ cm/s	1x10 ⁷ cm/s	1x10 ⁵ cm/s
B.2 Extracción, captación, conducción y control del biogás	•	•	•	
B.3 Captación y extracción de lixiviados.	•	•	•	
B.4 Drenaje pluvial.	•	•	•	
B.5 Área de emergencia.	•	•	•	
B.6 Compactación (kg/m ³).	600-700	>500	>400	>300
B.7 Cobertura.	Diaria	Diaria	Diaria	Semanal
B.8 Control de entrada de residuos.	•	•	•	•
B.9 Obras complementarias.	Ver NOM	Ver NOM	Ver NOM	Cerca perimetral
B.10 Manual de operaciones.	•	•		
B.11 Programa de monitoreo ambiental.	•	•		
C. Clausura del sitio.				
C.1 Cubierta final.	Ver NOM	Ver NOM	Ver NOM	Ver NOM
C.2 Conformación final.	•	•	•	•
C.3 Mantenimiento.	•	•	•	•
C.4 Programa de monitoreo.	•	•	•	•
C.5 Uso final.	•	•	•	•

2.3.2 Reacciones químicas que se generan en los sitios de disposición final

Los residuos depositados en un sitio de disposición final presentan una serie de cambios físicos, químicos y biológicos de manera simultánea e interrelacionada. Estos procesos dependen de diferentes factores internos y externos entre los cuales se encuentran: Las condiciones climáticas, propiedades fisicoquímicas y tamaño de los residuos dispuestos, compactación, espesor, permeabilidad del material de recubrimiento, profundidad, humedad y edad. Las principales transformaciones fisicoquímicas son de acuerdo con Jaramillo (2002).

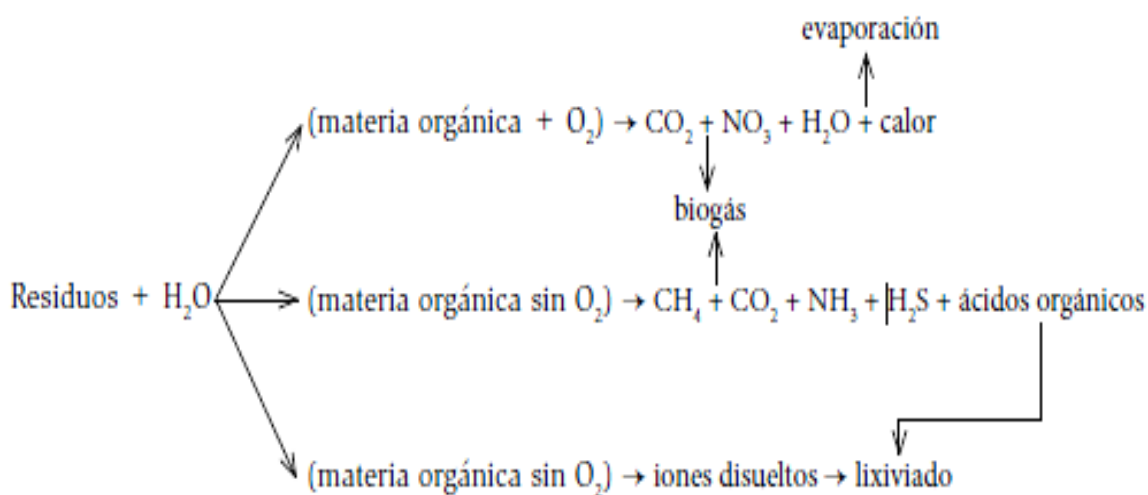


Figura 4. Esquema general de la descomposición de los residuos (tomado de Kiss y Mendoza 1998).

El proceso de descomposición de los residuos ocurre en cinco etapas de acuerdo con las condiciones del medio. Las cuales son: aeróbica, aeróbica-anaeróbica, anaeróbica (no metanogénica), anaeróbica (metanogénica) y estabilización.

Las fases aeróbica y aeróbica-anaeróbica. Pueden durar desde varias semanas hasta dos años (o más), favoreciendo el proceso de biodegradación, las altas temperaturas de aire ambiente, la alta compactación y la disposición de residuos en capas delgadas y celdas pequeñas, reduciendo el tiempo transcurrido para estas fases.

Las fases anaeróbica (no metanogénica) y anaeróbica (metanogénica). Tienen una duración aproximada de unos cinco años, en función de la operación del sitio de disposición final y en particular, de la cantidad de humedad de los residuos dispuestos, debido a que el alto contenido de humedad incrementará significativamente las reacciones biológicas, y por tanto, aumentando la cantidad de biogás generado con el tiempo.

La fase de estabilización. Puede tener una duración de varias décadas o incluso siglos, para que los residuos dispuestos logren finalmente la estabilización, que depende en gran medida de las medidas adoptadas en la operación del sitio de disposición final para garantizar el aumento de su tiempo de vida útil (Camargo y Vélez 2009).

2.3.3 Impactos ambientales en los sitios de disposición final

Los efectos adversos de los sitios de disposición final afectan a las características del suelo, agua (subterránea y superficial), atmosfera, fauna, flora, paisaje y la salud pública.

Contaminación de las aguas (subterráneas y superficiales) y del suelo: Por lixiviado cuya composición es variable y potencialmente tóxico (Mendes *et al.*, 1989), que transportan materia orgánica disuelta (demanda bioquímica de oxígeno, DBO), los cuales son: metano y ácidos grasos; macro compuestos inorgánicos los cuales son: calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), nitrógeno orgánico y amoniacal, hierro (Fe); metales pesados los cuales son: cadmio (Cd), níquel (Ni), zinc (Zn) y plomo (Pb); compuestos orgánicos xenobióticos los cuales son: hidrocarburos solubles (Mendoza, 2007).

Contaminación a la atmósfera: Procede de los gases tóxicos o malolientes que pueden formarse y los materiales que pueden ser levantados por el aire. El mayor potencial de contaminación del biogás en los sitios de disposición final, es a partir de los posibles efectos ambientales de los principales gases que son el metano (CH₄), bióxido de carbono (CO₂), amoniaco (NH₃), hidrógeno (H₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), nitrógeno (N₂), tolueno (C₆H₅CH₃), benceno (C₆H₆) en varias proporciones (Mendoza, 2007).

Otro problema importante para la atmósfera es la formación de nubes de polvo y de materiales ligeros en suspensión (papeles, bolsas de plástico, etc.), levantados por las corrientes de aire locales.

Las consecuencias sobre la fauna y la flora: Pueden ser tanto positivas como negativas. Respecto a los animales, los sitios de disposición final son un punto de alimentación directa o indirecta de muchas aves (córvidos, buitres, gaviotas), mamíferos (roedores, perros, zorros; incluso de cerdos, cabras, caballos) e insectos (moscas, cucarachas y escarabajos). Sin embargo, se puede producir el desplazamiento de especies locales por otras más agresivas (como ratas, córvidos y gaviotas) y se puede facilitar el contagio y dispersión de algunas enfermedades (a través de las pulgas y piojos de las ratas, o directamente por moscas, cucarachas). Otro aspecto negativo es el de desplazamiento debido a destrucción del hábitat original y por lo tanto la desaparición de especies y de la cobertura vegetal en una amplia zona, como consecuencia de la construcción del sitio de disposición final.

El efecto sobre el paisaje: Es siempre negativo, debido al impacto visual propio del aspecto de los vertidos, y al debido a la dispersión de los residuos ligeros (papeles, plástico) motivada por el viento. Consecuencia de todos estos problemas que pueden producirse (y en especial, olores, incendios, insectos y roedores), los sitios de disposición final suelen tener también un efecto negativo sobre las poblaciones humanas cercanas, ocasionando empobrecimiento general de la zona y la aparición de movimientos de traslado de la gente a zonas más alejadas (SEDESOL, 2005).

2.3.4 Clausura de un sitio de disposición final

El plan de clausura debe mostrar todas las características del lugar completo e identificar las entidades responsables para implantar la clausura de las instalaciones. Se debe cumplir con los requisitos mínimos fijados en el punto 9 de la NOM-083-SEMARNAT-2003 para procurar la estabilidad, monitoreo sanitario y ambiental a largo plazo.

El proyecto de clausura es un diseño de ingeniería que requiere de la información reunida en los estudios previos (composición de los RSU, análisis de lixiviados, de biogás; topografía, geofísica y geohidrología, mecánica de suelos, climatología, meteorología y servicio de limpieza en su totalidad) (SEMARNAT-GTZ, 2004). El flujo de actividades para la clausura está representado en la figura 5.

Los elementos de un plan de clausura requieren la siguiente secuencia de trabajos:

- Excavaciones y nivelación de superficies.
- Instalación de un sistema de impermeabilización, sobre las superficies preparadas.
- Instalación de un sistema de captación de lixiviados, en la zona de residuos.
- Instalación de una red de canalización de biogás.
- Instalación de una red de captación, para la extracción de lixiviados.
- Instalación de un sistema de cobertura final, un sistema de evacuación de pluviales, y una capa final de preparación de suelo para la cubierta vegetal.
- Revegetación (García *et al.*, 2009).

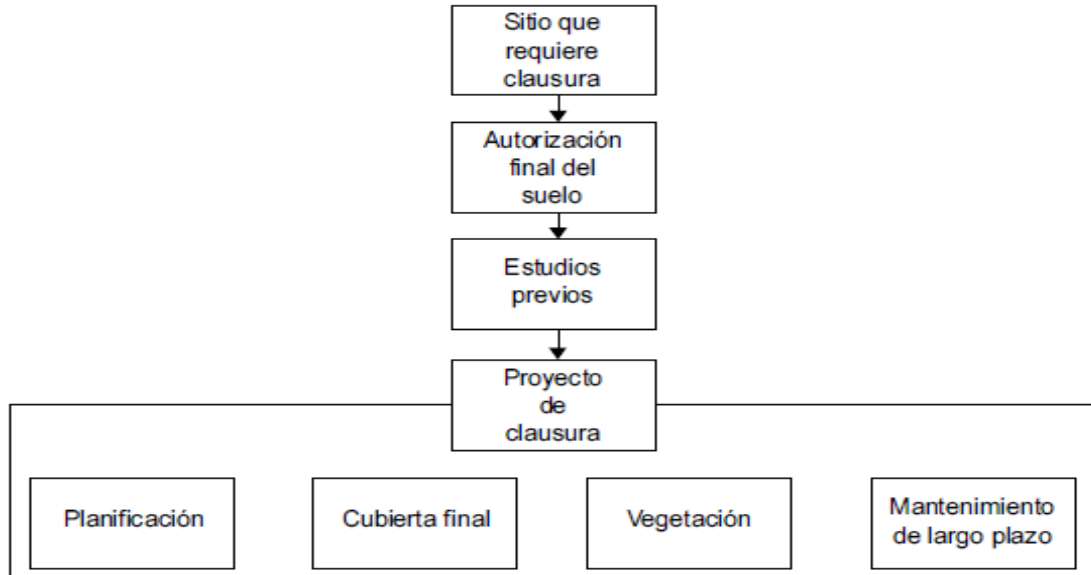


Figura 5. Secuencia para el procedimiento de clausura de un sitio de disposición final (SEGEM-GTZ, 2002).

El plan de clausura deben ser congruentes con el uso final del suelo que haya sido autorizado en el que se encuentra el sitio.

2.3.4 .1. Uso final del suelo

Los sitios utilizados como sitios de disposición final, una vez clausurados y acondicionados, proporcionan una gran superficie de terreno que puede utilizarse para muchos propósitos, con las características de control apropiadas. Los usos más comunes y relativamente económicos son áreas verdes y recreativas. Cuando se usan plantas, se debe prestar una atención especial a la selección de las especies vegetales, para que puedan establecerse en las condiciones especiales de un sitio de disposición final clausurado (Piñón *et al.*, 2009).

Cuanto más complejo o e estructurado el uso final del suelo, más complejos serán los requisitos de diseño para la cubierta final y la planificación de la repoblación vegetal. Un área verde, exigirá menor diseño de la cubierta final que un parque de recreativo o un centro comercial (Graber, 1999).

El sitio debe pasar un periodo de estabilización de por lo menos 6 a 10 años, debido a la estabilización de los residuos confinados. Después de este periodo, es posible asignar un uso como es mencionado, durante este tiempo el sitio debe estar controlado y adecuado periódicamente, mediante el monitoreo ambiental de lixiviados, biogás y acuíferos, aunado al mantenimiento de las cubiertas de clausura, cambios exteriores e interiores, drenajes y sistemas de ventilación (SEGEM-GTZ. 2002).

2.3.4.2 Diseño de la cobertura final

El diseño de la cobertura final debe satisfacer dos funciones: asegurar la integridad postclausura a largo plazo del sitio de disposición final con respecto a cualquier emisión ambiental y soportar el crecimiento de la vegetación o soportar otras posibles utilidades, de acuerdo a las condiciones que son: los aspectos físicos del sitio (perfiles de las pendientes superficiales, composición y topografía), condiciones climáticas, cantidad y calidad de las capas de suelo, tratamiento paisajístico (poblaciones de especies vegetales a utilizar).

Para efectuar el diseño de la cobertura final, se colocan uniformemente capas de suelos de diferentes texturas y espesores. Cada capa de suelo en la cobertura final tendrá un ensayo de densidad, permeabilidad en la puesta en obra y espesor. La capa superior de suelo, a menudo la capa que soporta la vegetación, requerirá ensayos para establecer su capacidad para sostener el crecimiento de plantas (García *et al.*, 2009).

Las recomendaciones y características más importantes de capas de suelo son las siguientes:

A) **Residuos:** Esta última capa debe estar bien compactada antes de colocar el material de cubierta siguiente, pues será la base estructural para la clausura.

B) **Capa amortiguadora:** De 0.30 m. a 0.50 m. de espesor. Se coloca sobre los residuos para cubrirlos y evitar su contacto con las siguientes capas de suelo.

C) **Sistemas de drenaje de gases:** De 0.30 m. a 0.40 m. de espesor, con una permeabilidad de 1×10^{-6} cm/s. Se coloca una capa de arena, grava o material granular con menos del 20% de material fino; este material tiene buena permeabilidad y se debe compactarse bien; éste se coloca con el fin de canalizar el biogás hacia la atmósfera. Sin embargo cuando se construyen pozos de extracciones y venteo, no es necesario construir dichos canales.

D) **Capa de sello:** Filtro de 0.20 m. a 0.50 m. de espesor y baja permeabilidad. Sobre la capa de drenaje se coloca la capa de sello, además permite el drenaje de líquidos y gases generados por la descomposición de la materia orgánica contenida en los residuos.

E) **Capa drenante:** De 0.20 m. de espesor, con una permeabilidad de 1×10^{-7} cm./seg, como las arcillas montmorilloníticas; los cuales evitan o minimicen la infiltración de agua.

F) **Geotextil:** Después de la capa drenante, con el fin de evitar la saturación de los poros de la capa permeable y minimizar la erosión.

G) **Tierra vegetal:** Capa que soporta la vegetación de 0.50 m. de espesor mínimo está constituida por una cubierta de tierra vegetal capaz de sustentar la vegetación rasante. En el caso de que se tenga planeado la plantación de árboles y arbustos se puede requerir un espesor de 0.60 m. a 1.00 m. para estabilizar la vegetación.

H) **Cubierta vegetal:** Las características de la vegetación son de rápido crecimiento, perennes, frondosos, talla y diámetro recomendados debido a que ello depende un rápido establecimiento, capaces de soportar la falta de agua (sequia), resistentes a bajas concentraciones de oxígeno y raíces poco profundas que se extiendan horizontalmente sobre el área para evitar que las raíces penetren dañen las capas de la cobertura final y poner en peligro las funciones de las barreras de control de humedad y gases (figura 6).

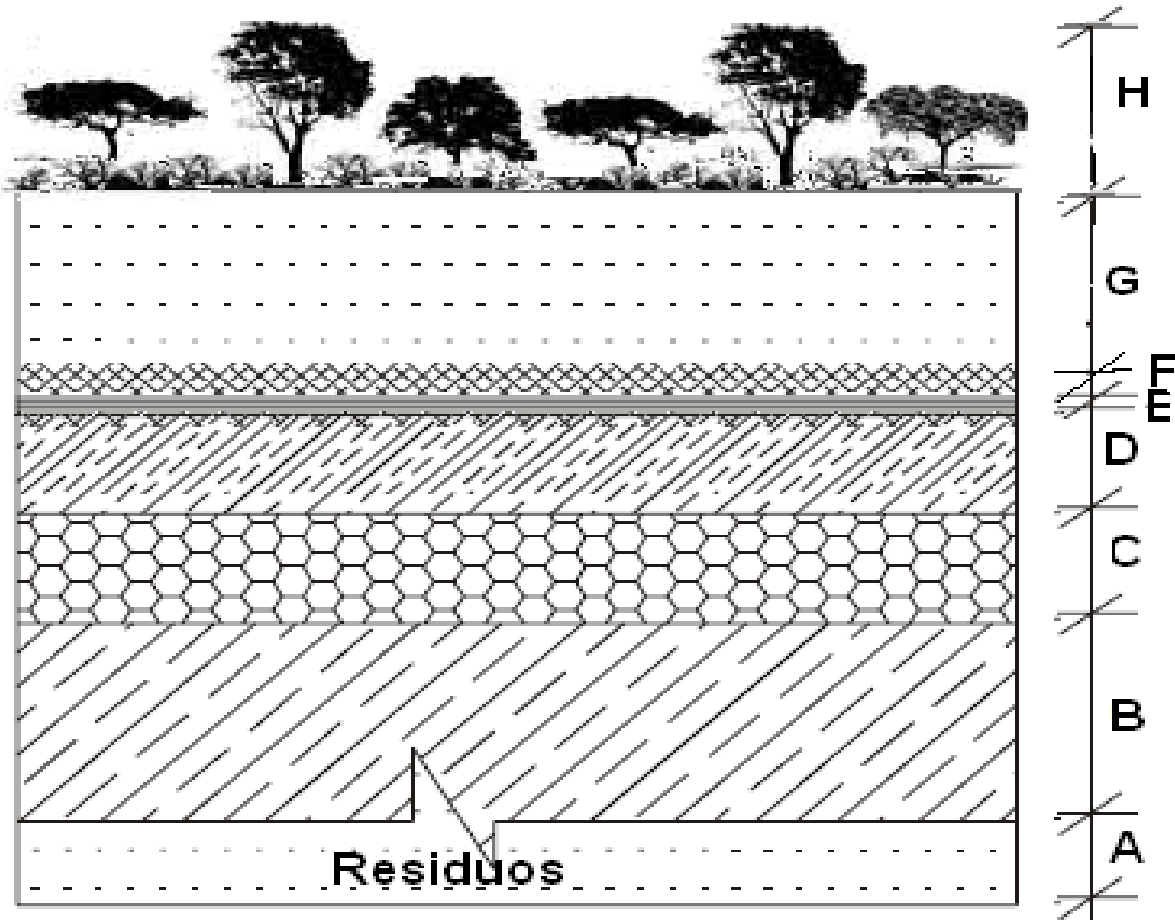


Figura 6. Capas de la cubierta final de un sitio de disposición final

La función de la cubierta vegetal es de estabilizar los taludes del sitio, control del escurrimiento superficial, protección de las capas inferiores del daño mecánico, transpiración eficaz en el sistema de control de la humedad de las capas de cobertura, reducción de las posibilidades de saturación, reducción de la erosión del viento y agua, y evitar que queden expuestos los residuos al intemperie (SEGEM-GTZ, 2002).

2.4 Revegetación

La revegetación es la práctica común en la rehabilitación de áreas donde es imposible restaurar el ecosistema original.

En todos los casos, la revegetación se hace siguiendo principios ecológicos con la finalidad de restaurar la funcionalidad. Esta última no solo implica funciones ecosistémicas, sino que se puede integrar el lugar degradado en un entorno natural de forma armoniosa, desarrollando un paisaje atractivo y con una funcionalidad en términos de prestación de servicios ambientales de los nuevos sistemas recreados. Por ejemplo, en valores estéticos que promuevan un uso recreativo de las áreas previamente degradadas. Estos valores pueden establecerse aún cuando para ello se deba partir de un ecosistema distinto al original con base a las nuevas condiciones del medio físico en un hábitat modificado (Lafranco *et al.*, 1996).

La revegetación tiene como objetivo fundamental el restablecimiento de una cubierta vegetal en áreas donde la vegetación ha sido eliminada por efectos naturales o antropógenos.

La revegetación de áreas degradadas, por la actividad de vertido de residuos es de primordial importancia en los proyectos de rehabilitación y debe ser planificada para que al cierre del sitio de disposición final (clausura), puedan realizarse acciones que aseguren una mayor probabilidad de ser autosostenibles en el largo plazo. En este sentido, la selección de especies vegetales juega un papel crucial para garantizar la rehabilitación de áreas alteradas (Guevara *et al.*, 2005).

Es muy importante tener en cuenta, que el éxito de la cubierta vegetal en un sitio de disposición final no es un proceso aislado, sino que depende de una apropiada selección de especies vegetales y las condiciones edáficas. Además que se deben utilizar una variedad de especies vegetales adaptadas a las condiciones climáticas del sitio (Rondón y Vidal, 2005).

El proceso de implantación de la vegetación se realiza a partir de especies vegetales que puedan ser seleccionadas usando criterios ecológicos que van a depender de las metas de los planes de revegetación, entre ellos las condiciones fisicoquímicas del suelo, la disponibilidad de semillas y en vivero, autóctonas, su forma y rapidez de crecimiento, clima, compatibilidad con otras especies y principalmente aquellas que presenten una elevada resistencia, adaptación al medio y pocas necesidades hídricas. Además, el tiempo necesario para establecer una cubierta vegetal es un motivo importante de consideración al elegir las especies vegetales que se van a utilizar.

La selección de especies está sujeta a los objetivos de uso del suelo en correspondencia con las características específicas del sitio y que las especies pioneras que invaden las zonas afectadas deben ser consideradas en primera instancia en los planes de revegetación. Asimismo, para la producción y aprovisionamiento de semillas y plantas en vivero de especies nativas para programas de revegetación se recomiendan las especies pioneras (en la fase inicial de sucesión) y las tolerantes (en la etapa final de sucesión) del ecosistema que se quiera revegetar (Guevara *et al.*, 2005).

Piñón *et al* (2009) señala que en la primera fase de establecimiento de la vegetación se recomiendan que se establezca una cobertura estabilizadora del terreno usando una diversidad de especies herbáceas nativas o naturalizadas. Además de incluir algunas especies vegetales fijadoras de nitrógeno como las del género *Acacia*, ya que la inclusión de leguminosas favorece la provisión de nitrógeno (Duarte, 2005).

También usualmente se realizan estudios pilotos en parcelas experimentales, en las que se ensayen con diferentes especies vegetales, se evalúan los resultados de las parcelas experimentales y se escogen las especies vegetales exitosas (Piñón *et al.*, 2009).

Los procesos de sucesión vegetal son clave en la restauración de estas funciones, de allí la importancia de una adecuada selección de las especies que puedan servir en el diseño de programas de revegetación que resulten exitosos en el largo plazo con mínimos tratamientos posteriores (Guevara *et al.*, 2005).

2.4.1 Consideraciones en la selección de las especies vegetales

Una especie vegetal debe ser elegida cuando sus condiciones biológicas la habiliten para desarrollar su actividad, aspecto importante de los procesos de revegetación (López y Pérez, 2003). Las condiciones para la selección de las plantas son:

Climáticas: Hay que tener siempre en cuenta el clima de la zona para elegir correctamente las especies. Las condiciones climáticas están determinadas por la altura, precipitaciones, evaporación, temperatura y vientos. Es necesario abordar estas propiedades importantes por influenciar el crecimiento de las plantas.

Edáficas: El conjunto de plantas que se utilicen deben ser compatibles con la textura de los suelos (arcilloso, limoso, arenoso) en los que mejor se establece. La estructura, retención de humedad, espacio intersticial, su aireación, condiciones de drenaje, pH, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico (Martínez, 2008), que en conjunto determinan las condiciones para el enraizamiento (Crow, 2005). Todas estas propiedades edáficas son factores que directamente tienen influencia en el establecimiento de las plantas.

Nutrimientales: Cada especie tiene requerimientos particulares que cambian dependiendo de la etapa del desarrollo (Birchler *et al.*, 1998).

Condiciones del sistema radicular: Se debe seleccionar especies vegetales que presenten un sistema de raíces secundarias, es decir perennes.

Resistencia a plagas y especies invasoras: Por lo que el uso de plantas nativas en la vegetación aumenta las posibilidades de supervivencia de las plantas y sustitución de plantas perdidas a las infestaciones de plagas, ya que están adaptadas para defenderse de las plagas indígenas (Graber, 1999). En contraparte, las especies exóticas no están favorecidas por las condiciones locales de patógenos.

También se debe seleccionar plantas que puedan crecer en suelos que contengan niveles de iones tóxicos letales para otras especies (Fitter y Hay, 1991). Finalmente a las condiciones atmosféricas pueden afectar a las plantas, debido a los contaminantes del aire ya que afecta negativamente a las plantas. El daño es común en especies de coníferas y latifoliadas, estas han demostrado sensibilidad a la contaminación por partículas, pérdida de follaje y mayor mortalidad (Martínez, 2008).

2.4.2 Diseño de la cubierta vegetal

Para la colocación de la vegetación se debe tener una planificación de los detalles de la cubierta vegetal y la plantación definitiva. Una comunidad vegetal planificada puede estar diseñada e instalada en una variedad de formas entre ellas:

- **Desarrollar los tres estratos hierbas, arbustos y árboles, desde el principio de la plantación.**

Este procedimiento requerirá de una planificación avanzada ya que debe proporcionar el mayor elemento de control en el diseño de la cubierta vegetal y el resultado final. La comunidad de final de plantas se establecerá y tendrá una maduración temprana el restablecimiento de la vegetación.

- **Otra alternativa es proporcionar el ambiente adecuado y las condiciones del suelo para fomentar el crecimiento de plantas y permitiendo la invasión natural (voluntario) de las plantas nativas adyacentes al sitio.**

Este procedimiento proporciona el menor elemento de control sobre los tipos de plantas que pueden ser introducidos en el sitio. Este proceso es impredecible en el establecimiento y la sucesión natural de las comunidades de plantas, ya que toma más tiempo que el procedimiento de la plantación inmediata. Comienza el proceso con las plantas pioneras, que son las más adaptadas a las duras condiciones de estos sitios. Esta comunidad por lo general consiste en el crecimiento de malezas y hierbas con raíces profundas.

Esta asociación inicial de la plantas comienza con el reblandecimiento del suelo que ofrece condiciones más propicias que favorezcan un cambio progresivo de la calidad del sustrato y proveen un microclima favorable para el establecimiento de otras especies. A medida que el suelo se rompe y se suaviza, los pastos pueden afianzarse y establecerse. Con el tiempo, las leguminosas, herbáceas y leñosas perennes puede comenzar la ocupación, la calidad del suelo y de nutrimentos mejora el contenido y finalmente, los arbustos y árboles asumen el nivel de madurez de la ubicación (figura. 7).

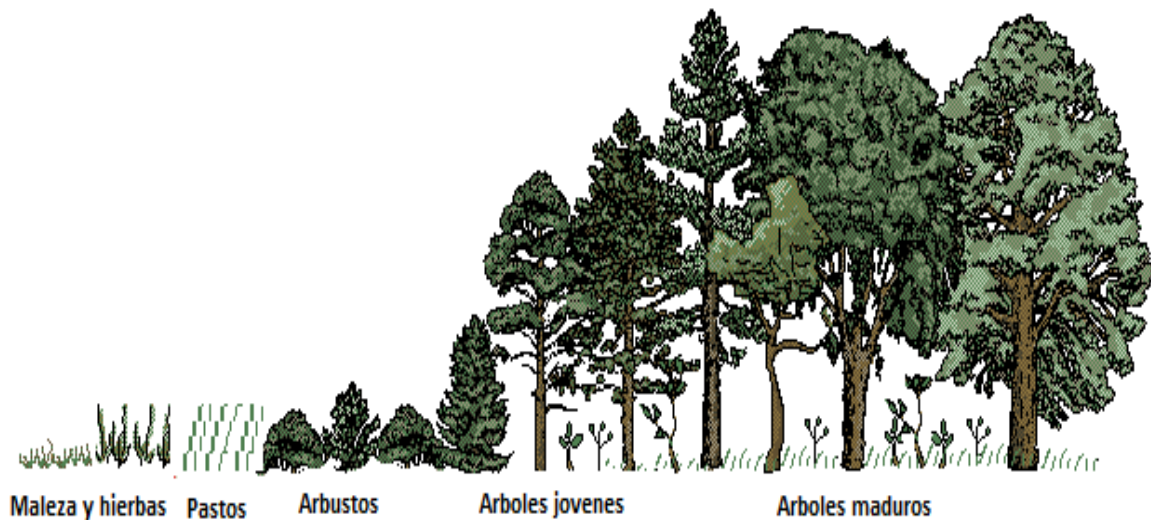


Figura 7. Sucesión natural de una comunidad de plantas

- **Finalmente la plantación prevista con el voluntariado de especies nativas para crear la cubierta vegetal.**

Este enfoque tiene un alto potencial de erosión y costo de controlar especies invasoras. Las especies invasoras normalmente prosperan en el hábitat de sucesión temprana y una vez establecido es difícil y costoso el combate. Un método eficaz para la revegetación de los sitios de disposición, incluye las islas de hábitat para la siembra.

Cada plan debe incluir la siembra de plantas de la familia de las leguminosas, lo que aumentará la salud de otras especies. Las leguminosas pueden fijar el nitrógeno atmosférico, ayudando a la acumulación de nitrógeno orgánico disponible en el suelo recién formado y minimizando la necesidad de fertilizantes químicos (Graber, 1999).

2.4.3 Mantenimiento de la cubierta vegetal

Una vez que la cubierta vegetal del SDF se ha establecido, la siguiente fase es su mantenimiento. Esta acción implicará un tiempo de 20 años de seguimiento y realizar las actividades culturales que aseguren mantener una comunidad de plantas viables.

Riego: Puede ser suministrado por el ciclo hidrológico natural en el sitio o riego suplementario ocasional durante época de secas (Gómez, 2007).

Fertilización: El suministro de nutrimentos es una consideración importante en la plantación inicial y también las necesidades de fertilización que puede favorecer el desarrollo de la vegetación, generalmente N, P, K son adicionados como fertilizante o como materia orgánica.

Poda: La poda es necesaria y debe realizarse con base en la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-001-RNAT-2006.

Saneamiento vegetal: Es necesario para salvaguardar la vegetación contra las enfermedades, plagas de insectos y lesiones debido a los daños del viento y control de incendios. Un programa activo de la reducción selectiva de malezas puede reducir la presión de la competencia de las malezas sobre la vegetación (Graber, 1999).

2.5 Contaminación de suelos por metales pesados en los sitios de disposición final

El resultado de la contaminación que emana de los residuos, provoca la contaminación del suelo, por lo que aparecen concentraciones muy elevadas de algunos elementos traza (metales pesados y algunos metaloides) o fitotóxicos, que dan lugar a problemas de toxicidad en las plantas (Moreno, 2006). Las concentraciones anómalas de metales pesados en los suelos en los sitios de disposición final son básicamente por el enterramiento de los residuos (aproximadamente el 10% de los residuos contiene metales pesados).

2.5.1 Definición y generalidades de metales pesados

"Metales pesados" es un término general y colectivo que se aplica al grupo de elementos que en la tabla periódica se identifica como metales y metaloides, que posee una densidad igual o superior a 5.0g cm^{-3} y un número atómico mayor a 20 (García y Pineiro, 2003).

Dentro de los metales pesados hay dos grupos; los oligoelementos o micronutrientes, que son los requeridos en pequeñas cantidades o cantidades traza por las plantas y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasado cierto umbral se vuelven tóxicos. Como el As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Fe, Se y Zn y los metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva apareja disfunciones en los organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de bioacumularse estos son: Cd, Hg, Pb, Sb, Bi, Sn, Tl (Prieto *et al.*, 2009).

2.5.2 Fuentes de metales pesados en el suelo

La entrada de metales pesados al suelo puede ser de forma natural o inducida antrópicamente. Estos dos tipos incrementan el nivel de metales tóxicos y son absorbidos por las plantas y se transfieren hacia la cadena alimenticia.

2.5.3 Efecto de los metales pesados en el suelo

La toxicidad de un metal pesado depende de sus propiedades y de las características del suelo donde se encuentre (Seoáñez, 1999). Los efectos perjudiciales de estos contaminantes en el ecosistema están relacionados no sólo con los contenidos totales de estos elementos, sino también con su biodisponibilidad y movilidad tanto en los propios materiales residuales como en el suelo (Illera *et al.*, 2001).

2.5.4 Distribución de los metales pesados en suelo

La distribución de un contaminante en un suelo varía en función de la profundidad del horizonte y de la movilidad del elemento desde su llegada al suelo (Porta *et al.*, 1999). La toxicidad que genera un elemento varía en función de la fracción en que se encuentre asociado, ya que regula su disponibilidad y por lo tanto, su posible paso a la cadena trófica. Es de gran importancia conocer las fracciones asimilables y la forma química en la que se encuentra, ya que para un mismo elemento, sus distintas especies químicas presentan diferente toxicidad.

Fracción soluble: Los elementos se encuentran como iones libres o unidos a aniones inorgánicos o ligados orgánicos constituyendo complejos solubles.

Fracción cambiante: Fijados por fuerzas predominantes electrostáticas en los sitios cargados negativamente de los coloides del suelo.

Fracción adsorbida específicamente: Se fijan de forma relativamente fuerte mediante uniones en las que predominan el enlace covalente sobre el iónico. Los oxihidróxidos de hierro, aluminio y manganeso son los principales componentes del suelo en las reacciones de adsorción específica.

Fracción fijada en materiales orgánicos insolubles: Se trata fundamentalmente de cationes complejados o quelados por materiales orgánicos de reciente síntesis o residuos del metabolismo microbiano.

Fracción fijada en óxidos de Fe, Al o Mn: Estos óxidos contienen elementos traza coprecipitados como elementos menores mientras el óxido permanezca en estado amorfo. En principio los óxidos adsorben los metales en forma cambiante, pero luego ir aumentando la fortaleza del enlace a medida que aumenta la participación covalente en el mismo.

Fracción formada por nuevos precipitados: Generalmente contienen más de un elemento traza y con frecuencia formas cristalinas o mezcla de cristales con las correspondientes sales de los elementos principales, normalmente calcio o hierro (Sierra, 2005).

De otra forma, la facilidad con la que un metal potencialmente tóxico puede acceder a la cadena alimenticia a través del suelo depende de si el metal está libre, en solución intersticial o en fases sólidas o cómo el metal está ligado a las partículas de suelo y su forma química, o sea de su especiación.

2.5.5 Biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo

La biodisponibilidad sería el grado de libertad en que se encuentra un elemento o compuesto de una fuente potencial para ser capturado por un organismo (ingerido o adsorbido). Normalmente sólo una fracción pequeña de una sustancia potencialmente contaminante de un medio es biodisponible. Su efecto suele ser negativo, pero también puede ser indiferente para un organismo específico.

La biodisponibilidad de un elemento es función de la forma química y física en la que se encuentra en el medio y la capacidad de los organismos para absorberlo (Galán y Romero, 2008).

2.5.6 Movilidad de los metales pesados en el suelo

El transporte de contaminantes en el suelo depende de cómo es el movimiento del agua en su interior, es decir, de su evolución espacial y temporal en el terreno. Los contaminantes se encuentran en el suelo en diferentes fases, por lo que su desplazamiento en él está condicionado por la movilidad de estas fases y por la interacción entre ellas (Piñón *et al.*, 2009).

Los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son:

a) **El pH:** Es un factor esencial, para que la mayoría de los metales tiendan a estar más disponibles en un pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino. El pH es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos. En medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución como hidroxicomplejos. La adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo y también su biodisponibilidad de sus compuestos (Alloway, 1995).

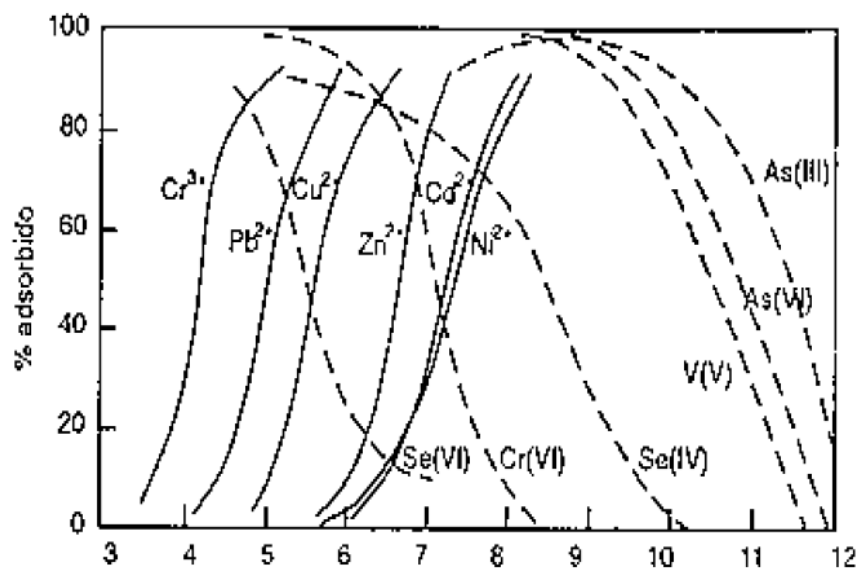


Figura 8. Influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales (tomada de Kabata-Pendias, 2000).

b) Textura. La textura favorece la entrada e infiltración de la contaminación de metales pesados en el suelo, por ejemplo la arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio, por el contrario los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos (Pineda, 2004).

c) Mineralogía de arcillas. Cada arcilla tiene un determinado valor de superficie específica y de descompensación eléctrica. Cuanto mayor es la superficie activa, mayor es la adsorción de metales. La importancia de las arcillas como adsorbentes es secundaria cuando en un suelo existe abundante materia orgánica y/o oxihidróxidos de hierro, componentes más competitivos (Galán y Romero, 2008).

d) Materia orgánica. Reacciona con los metales formando complejos de cambio o quelatos. La adsorción puede ser tan fuerte que queden estabilizados, como el caso del Cu, o formen quelatos también muy estables, como puede pasar con el Pb y Zn. En muchos casos se forman complejos organometálicos lo que facilita la solubilidad del metal, la disponibilidad y dispersión porque pueden degradarse por los organismos del suelo (Alloway, 1995). Además, la materia orgánica puede retener a los metales tanto por su capacidad de intercambio catiónico como por su capacidad quelante (Adriano, 2001).

e) Capacidad de cambio. El poder de intercambio catiónico depende del tipo de arcilla, de la materia orgánica, de la valencia y del radio iónico hidratado del metal. A mayor tamaño y menor valencia, menos frecuentemente quedan retenidos.

f) Condiciones redox. El potencial de oxidación-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido (especiación), lo cual va a condicionar su toxicidad y su movilidad, bien de manera indirecta por cambios de valencia, bien indirectamente variando la estabilidad de los complejos metálicos.

g) Carbonatos. La presencia de carbonatos garantiza el mantenimiento de los altos pH y en estas condiciones tienden a precipitar los metales pesados. El Cd y otros metales tienden a quedar adsorbidos por los carbonatos.

h) Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn. Juegan un importante papel en la retención de metales pesados y en su inmovilización. También pueden ser muy importantes en la adsorción del Cu, Pb o Mn (Adriano, 2001).

i) Salinidad. El aumento de la salinidad puede incrementar la movilización de metales y su retención por dos mecanismos. Primeramente, los cationes Na y K pueden reemplazar a metales pesados en lugares de intercambio catiónico. En una segunda fase, los aniones cloruro y sulfato pueden formar compuestos más estables con metales tales como Pb, Zn, Cu, Cd y Hg (Alloway, 1995).

La movilidad de los metales pesados es un factor importante porque determina su biodisponibilidad por las plantas que toman los elementos disueltos en la solución del suelo (Kabata-Pendias, 1992). Para elucidar el comportamiento de los metales pesados en los suelos y prevenir riesgos tóxicos potenciales se requiere la evaluación de la disponibilidad y movilidad de los mismos (Prieto *et al.*, 2009).

2.5.7 Características de los metales estudiados

Aluminio (Al)

El aluminio se considera un elemento no esencial (Toneatti y Rivera, 2006), señalan que el aluminio es uno de los mayores componentes del suelo y los iones de aluminio libre solubilizados a pH inferior a 5,0 son la mayor limitante para el crecimiento vegetal. No todas las formas de aluminio son tóxicas, las formas solubles son las que están implicadas en la toxicidad de suelos ácidos.

En general los cationes trivalentes son tóxicos para las plantas y el Al(III) es considerado la mayor forma tóxica, aunque algunos estudios han implicado a las formas di y monovalente en la toxicidad (Toneatti y Rivera, 2006). El aluminio está presente en minerales primarios, en minerales secundarios y en óxidos e hidróxidos de aluminio. Aparece como bauxita (Al_2O_3), jurbanita (AlOH_2SO_4) y gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$.

La solubilidad está influenciada por el pH, si existe reducción del pH del suelo se incrementa la solubilidad del aluminio hasta llegar a ocupar más de la mitad de los sitios de intercambio iónico del suelo. En horizontes del suelo ricos en materia orgánica, la mayor parte de los iones de aluminio forman complejos no tóxicos con los compuestos húmicos. Además, algunos iones de aluminio pueden incorporarse a las capas intermedias de los minerales expandidos de las arcillas y así sucede una transformación de estos minerales en cloruros de aluminio, con una capacidad de intercambio catiónico considerablemente reducida (Casierra y Aguilar, 2007).

Cadmio (Cd)

El cadmio se considera un elemento no esencial para procesos metabólicos. Es un metal pesado de gran toxicidad y presenta una alta peligrosidad ya que es bioacumulable a nivel radicular. Presenta un estado de oxidación estable Cd(II). Aparece como octavita (CdCO_3), greenokita (CdS) y monteponita (CdO).

La movilidad es media, salvo en condiciones reductoras que es muy baja. Por otra parte, Alloway (1995), indica que el aumento de la fuerza iónica de la solución del suelo reduce la adsorción de cadmio, siendo los cloruros uno de los aniones que más contribuyen a incrementar su movilización. La solubilidad está influenciada por el pH y por la cantidad total de Cd. Presenta una fuerte tendencia a quedar adsorbido por el carbonato de calcio, por lo que en suelos carbonatados su disponibilidad se ve muy mermada (Alloway *et al.*, 1988).

La materia orgánica aumenta la capacidad del cambio del suelo, y por lo tanto, aumenta la adsorción de Cd. La materia orgánica forma complejos con el Cd que son menos estables que los formados con otros metales pesados como Pb y Cu. La arcilla y los óxidos de hierro también adsorben Cd lo que condicionan su disponibilidad (Sierra, 2005). Existen resultados que muestran que el Cd es más móvil en suelos alcalinos debido a la formación de complejos o quelatos de metal. Cuando el potencial redox de los suelos disminuye la proporción del Cd soluble disminuye (Kitagishi y Yamane, 1981).

Cobre (Cu)

El Cu es un elemento esencial con rol fisiológico y es un micronutriente esencial para los organismos, siendo tóxico solo a elevadas concentraciones. En el suelo se presenta principalmente en los suelos como ión Cu (II) y se encuentra formando complejos solubles, inorgánicos y orgánicos, y estables, con ligandos de naturaleza orgánica. Precipita como calcopirita (CuFeS_2), bomita (Cu_5FeS_4), calcosita (Cu_2S), malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), covellina (CuS), digenita (Cu_9S_5) y tetraedrita ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$); cabe destacar que, más que formando minerales, el cobre, suele encontrarse unido al complejo de cambio.

Los componentes del suelo que más contribuyen a su adsorción y fijación son la materia orgánica y los óxidos de hierro y manganeso, los cuales tienen un papel más importante que los minerales de arcilla. Su movilidad aumenta con la acidez, es media en condiciones oxidantes y muy baja en medios reductores. La forma bioasimilable varía en función del pH del suelo, así en medios ácidos es $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, mientras que cuando el pH es neutro o alcalino la biodisponibilidad es $\text{Cu}(\text{OH})_2$ (Sierra, 2005). Otros elementos presentes en el suelo como el calcio, fósforo, aluminio, hierro, zinc y molibdeno pueden afectar la disponibilidad del cobre para las plantas.

Cromo (Cr)

El Cr es un metal sin un rol metabólico esencial en la planta. Algunos de sus compuestos del Cr(VI) son altamente tóxicos debido a su carácter cancerígeno. Presenta varios estados de oxidación, pero las formas comunes más estables son el Cr (III) y el Cr (VI). Precipita fundamentalmente como cromita (FeCr_2O_4) y como crocoita (PbCrO_4).

La movilidad del Cr(VI) es mayor que la del Cr(III), aunque en general es baja, aumentando un poco con el pH. Las condiciones de oxidación-reducción modulan poco la movilidad, siendo muy baja tanto en ambientes oxidantes como reductores. El Cr (VI) con su alto potencial reductor es fuertemente oxidante y en presencia de materia orgánica el Cr (VI) se reduce a Cr (III) (Cary *et al.*, 1977).

Hierro (Fe)

El hierro se considera un elemento esencial y juega un rol importante de nutrición en la planta. El Fe se encuentra en la naturaleza tanto en forma de Fe(III) como de Fe(II), dependiendo del estado redox del sistema. La mayoría del hierro se presenta en las estructuras cristalinas de numerosos minerales. El aluminio está presente en minerales primarios. Aparece como silicatos ferromagnéticos, olivino (Mg,Fe^{2+}) 2SiO_4 , augita (CaMg,Fe) $2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$, goethita $\alpha\text{-FeO(OH)}$, homblenda $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Al,Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ y biotita $\text{K}(\text{Mg,Fe}^{2+})_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$.

A partir de la meteorización de los minerales primarios se libera Fe soluble a la disolución, que podrá unirse a distintos ligandos orgánicos, o bien ser transformados a minerales secundarios tales como sulfuros, carbonatos, minerales de arcilla, pero fundamentalmente óxidos e hidróxidos de distinta composición y grados de cristalización, que serán los que controlen principalmente la solubilidad de este elemento en el suelo (Lindsay, 1979).

Debido a la extremadamente baja solubilidad de los óxidos de Fe(III) en el rango de pH normal en suelos, el hierro liberado precipitará rápidamente como óxido o hidróxido. La reversibilidad de la reacción de oxidación-reducción del hierro juega un papel importante en su comportamiento en los suelos (Schewertmann y Taylor, 1989).

Los contenidos de arcilla y materia orgánica influyen también en la disponibilidad del Fe. En los suelos arcillosos, existe una tendencia a retener el Fe. Un contenido adecuado de materia orgánica, actúa de forma favorable en cuanto al aprovechamiento del Fe por parte del cultivo, debido a sus características acidificantes y reductoras, así como a la capacidad de determinadas sustancias húmicas para formar quelatos en condiciones adversas de pH (Sierra, 2005)

Níquel (Ni)

El Ni es un metal que hasta el momento no se le han descubierto funciones metabólicas en la planta. En general los compuestos de Ni(II) son moderadamente tóxicos. Niveles elevados de Ni pueden dar lugar a deficiencias en el desarrollo de las plantas.

En el suelo, el níquel se presenta como Ni(II) ya que es la forma químicamente estable en un amplio margen de pH y Eh. Precipita como niquelina (NiAs), gersdorffita (NiAsS), garnierita ((Ni,Mg)₃Si₂O₅(OH)₄), almanita (NiSbS).

En suelos superficiales se presenta en formas ligadas con compuestos orgánicos, de las cuales solo una parte puede ser fácilmente soluble. Se sabe que una fracción de Ni en el suelo se encuentra en los óxidos de Fe y Mn, y se ha visto que es la forma más disponible para las plantas (Kabata-Pendias y Pendias 2001). La movilidad es media en condiciones oxidantes y muy baja cuando lo son reductoras o cuando el pH es neutro o alcalino, aumentando ésta con la acidez. La materia orgánica es capaz de movilizar el níquel de carbonatos y óxido. Además, el níquel puede ser bastante móvil en suelos con una capacidad de complejación alta, como por ejemplo, en suelos ricos en materia orgánica o contaminados (Bloomfield, 1981).

Plomo (Pb)

Es un metal pesado de carácter tóxico sobre todo para los microorganismos del suelo, siendo más tolerante las plantas. El plomo presenta dos oxidaciones estables: Pb(II) y Pb(IV), siendo el Pb(II) más frecuentes en el suelo. Tiene una gran afinidad por el azufre, con el que da uno de los minerales más frecuentes, la galena (PbS). Otros minerales de plomo que encontramos son anglesita (PbSO₄). Cerusita (PbCO₃) y minio (Pb₃O₄), que son compuestos insolubles. Los principales sitios de Pb en el suelo son la solución del suelo, superficie de adsorción de los complejos de intercambio de arcilla-humus, formas precipitadas, óxidos de Fe y Mn (Petrovic, 1999).

La movilidad del plomo es baja y aumenta cuando lo hace la acidez. Según Zimdahl (1977), el contenido en materia orgánica y el complejo de cambio son las propiedades del suelo que más influyen en la fijación del plomo. La gran capacidad inmovilizadora de plomo que tiene la materia orgánica produce un enriquecimiento de éste en los horizontes superficiales, evitándose así la contaminación de las aguas freáticas.

Zinc (Zn)

Es un elemento esencial para los organismos. Su toxicidad es baja, de manera que son más problemáticas las deficiencias que el exceso. Forma parte de multitud de minerales, entre los más abundantes se encuentran: esfalerita (ZnS), smithsonita (ZnCO₃), franklinita (ZnFe₂O₄) y numerosas especies sulfatadas y fosfatadas.

La presencia de zinc en suelos se asocia a la solución del suelo, a formas cambiables ligadas a partículas cargadas eléctricamente, a formas adsorbidas a minerales secundarios de la arcilla y a óxidos metálicos insolubles y formado parte de minerales primarios (Martin, 2000). La solubilidad del Zn(II) es altamente dependiente del pH. Otro factor del suelo que aparentemente determina la disponibilidad de Zn es la temperatura.

La movilidad es muy baja en medios básicos y neutros y aumenta conforme lo hace la acidez. El potencial de oxidoreducción también modula la movilidad, de manera que en medios oxidantes es alta y muy baja en condiciones reductoras. Es adsorbido principalmente por la materia orgánica, los minerales de la arcilla y los óxidos metálicos hidratados (Lindsay, 1972). Además Farrah y Pickering *et al* (1977), indican que la adsorción de zinc esta relacionada directamente con el complejo de cambio en suelos ácidos, mientras que en los suelos alcalinos predominan los procesos de quimioadsorción por ligados orgánicos.

2.5.8 Concentración de metales pesados en el suelo y plantas

En el cuadro 6, se reporta las concentraciones normales y consideradas tóxicas en el suelo y plantas para varios metales que han sido reportados por diferentes fuentes.

Cuadro 6. Concentración típica de algunos metales pesados en el suelo y en las plantas

Elemento	Suelo			P lantás	
	Rango normal en suelo (total) ($\mu\text{g g}^{-1}$ seco wt) ^a	Concentración en el suelo considerado no toxico(total) ($\mu\text{g g}^{-1}$ seco wt) ^b	Concentración en el suelo considerado toxico(total) ($\mu\text{g g}^{-1}$ seco wt) ^c	Rango normal en plantas ($\mu\text{g g}^{-1}$) ^d	Concentración de contaminantes en plantas ($\mu\text{g g}^{-1}$) ^c
Al	---	---	---	0.1-10,000	---
Cd	0,01	1	2-8	0.05-0.28	5-30
Cr	5-100	---	75-100	0.02-1.5	5-30
Cu	2-60	40	60-125	0.01-50	20-100
Fe	---	---	300	20-35	80
Pb	0,1-150	70	100-400	1-6	30-300
Ni	2-100	100	100	0.05-20	10-100
Zn	25-200	50	70-400	5-250	100-400

(---) = No se encontró información

Referencias: ^a Giuffré *et al* (2005); ^b Kabata-Pendias (1992); ^c Alloway (1990); ^d Kabata-Pendias (1992).

2.6 Descripción de las especies vegetales y requerimientos de cultivo

A continuación se presentan las siguientes especies: *Cupressus sempervirens* L, *Liquidambar styraciflua* L, *Senna multiglandulosa* (Jacq.) Irwin & Barneby, *Callistemon citrinus* (Curtis) Skeels y *Dodonaea viscosa* (L.) Jacq.

2.6.1 *Cupressus sempervirens* L

Familia: Cupressaceae.

Nombre común: Ciprés italiano, ciprés del mediterráneo.

Lugar de origen: Originario de las regiones del este del Mediterráneo.

Descripción: Árbol monoico perennifolio que mide de 20 a 25 m de altura. Es de tronco erecto, follaje denso y ramas ascendentes, que le dan la típica forma columnar. Su crecimiento es rápido.



Figura 9. *Cupressus sempervirens* introducido en la parcela experimental

Hojas: Son diminutas escamas imbricadas, de 1 mm de ancho. Son rómbicas, de color verde oscuro y se superponen estrechamente sobre las ramificaciones.

Conos. Los conos masculinos miden 0.5 cm de largo, son oblongo-cilíndricos y están situados en posición terminal. Los femeninos miden 3 cm de diámetro en promedio. Son leñosos, dehiscentes y de forma globosa; presentan entre 8 y 14 escamas peltadas con un corto abultamiento en el dorso y bráctea libre en el ápice, así como numerosas semillas aladas debajo de cada escama. Cuando están maduros son de color pardo rojizo.

Corteza. Su corteza es delgada y gris. Es fibrosa y están alistada en sentido longitudinal.

Semillas: La semilla se encuentra en los conos y poseen una propiedad germinativa muy duradera.

Raíz. Su raíz es extendida y bien desarrolladas. Las secundarias son horizontales, superficiales y alargadas, lo que le permiten anclarse firmemente al suelo.

Requerimientos de cultivo y tolerancias

Clima. Se da en climas templados. Tolera bien el calor y la sequía.

Suelo. Soporta suelos ácidos o alcalinos, pero no deben ser muy húmedos o ricos, porque esto estimula un crecimiento excesivo del follaje.

Exposición: Necesita posiciones soleadas. Tolera la sombra.

Riego. El riego debe ser frecuente mientras el árbol se establece. Posteriormente debe ser mínimo solo para controlar el crecimiento de su follaje.

Resistencia a la contaminación ambiental. Tolerante a la contaminación de las ciudades, aunque sus hojas pueden acumular mucho polvo y dar mal aspecto (Martínez, 2008).

2.6.2 *Liquidambar styraciflua* L

Familia: Hamamelidáceae.

Nombre común: Liquidambar, copalme y ocozote.

Lugar de origen: Originaria de Norteamérica, en su región Atlántica.

Descripción: Árbol (sub)caducifolio de 20 a 40 m de altura. En cultivo de 15 a 20 m de altura. Tiene copa cónica, simétrica cuando es joven, y se vuelve oval o redonda en la madurez. Su tronco es recto, y las ramas alternas, ascendentes y delgadas. Es de crecimiento moderado a rápido.

Hojas. Sus hojas en espiral, simples; láminas más anchas que largas, de 4 a 11 cm de largo y 5 a 15 cm de ancho, 3-5-lobadas, los lóbulos triangulares, con el margen aserrado.



Figura 10. *Liquidambar styraciflua* introducido en la parcela experimental

Fruto. Son cápsulas pequeñas en cabezuelas de 2.5 a 4 cm de diámetro, en pedúnculos de 5 a 6.5 cm de largo, glabro; cabezuelas globosas, equinadas, leñosas, morenas a negro brillantes; fruto una cápsula bivalvada, dehiscente por el ápice.

Flores. En panículas terminales o axilares sobre ramas cortas laterales, de 5 a 10 cm de largo. Flores unisexuales muy pequeñas, sin perianto. Florece de enero a marzo.

Corteza. Externa: angostamente fisurada, suberificada, moreno-grisácea. Interna: de color crema amarillento cambiando a pardo, ligeramente amarga, fibrosa. De la corteza fluye un líquido resinoso. Grosor total: 5 a 10 mm.

Semillas. El fruto contiene unas cuantas semillas, de 6 a 8 mm de largo, aladas, morenas.

Raíz. Sus raíces son superficiales y ampliamente extendidas y algo profundas.

Requerimientos de cultivo y tolerancias

Clima. Se desarrolla en climas templados, es resistente a bajas temperaturas. Tolera vientos fuertes, heladas y sequía moderada.

Suelo. Es muy tolerante a un amplio rango de suelos, se desarrolla preferentemente en suelos ácidos y franco-arcillosos, profundos, ricos en nutrimentos, húmedos y frescos. En suelos muy alcalinos suelen presentar problemas de clorosis férrica.

Exposición. Requiere exposición soleada, pero tolera sombra parcial en estado juvenil. A mayor edad son menos tolerantes a la competencia por luz.

Riego. Es importante mantener húmedo el sustrato. Es tolerante al exceso de agua.

Resistencia a la contaminación ambiental. Es sensible o moderadamente tolerante al ozono, que hace que las hojas pierdan color y mueran (Vázquez *et al.*, 1999).

2.6.3 *Senna multiglandulosa* (Jacq.) Irwin & Barneby

Familia: Leguminosae (fabaceae).

Nombre común: Retama.

Lugar de origen: Se distribuye en México, Centro y Sudamérica.

Descripción: Es un arbusto o árbol pequeño, monoico, caducifolio, que mide de 1 a 6 m de altura. Su copa redondeada de poca sombra. Su tronco es ramificado y tomentoso. Es de crecimiento rápido.

Hojas. Las hojas son imparipinnadas, densamente peluda en raquis, folíolos moderadamente peludos por encima y densamente peludos por debajo, oblongas o elípticas, ligeramente asimétrica y subaguda, de 15-40 mm de largo, por lo general en 5-8 pares; glándulas protuberantes presentes principalmente entre cada par de folíolos.



Figura 11. *Senna multiglandulosa* introducida en la parcela experimental

Flores. Las flores se presentan en panículas axilares. Son de color amarillo, muy llamativas, con 5 pétalos que miden de 1.2 a 1.5 cm de largo y algo desiguales, con receptáculo levemente cóncavo. Florece en la primavera.

Fruto. El fruto es una legumbre, que miden entre 10 y 15 cm de largo por 7 mm de ancho, es subcilíndrica, comprimida, de color pardo claro, con septos transversales notorios. Fructifica a principios de verano.

Corteza. La corteza es de color café oscuro.

Semillas. Sus semillas son de forma semilunar, cada una mide entre 2 y 3 mm de ancho por 5 mm de largo, son color café claro y están dispuestas de manera transversal.

Raíz. Su sistema radicular puede ser superficial o poco profundo.

Requerimiento de cultivo y tolerancias

Clima. Se adapta a climas cálidos o templados. Se adapta a condiciones de poca humedad siendo capaz de resistir altas temperaturas. Tolera el frío y la sequía.

Suelo. Se adapta a una amplia gama de suelos desde texturas franco-arcillosas a franco-arenosos.

Exposición. Requiere exposición soleada. Tolera la sombra ligera.

Riego. Conviene regarlo al menos cada semana en la época de estiaje (Martínez, 2008).

2.6.4 *Dodonaea viscosa* (L.) Jacq

Familia: *Sapindaceae*.

Nombre común: Chapulixtle, cuerno de cabra, chapuliz, ocotillo, palomilto.

Lugar de origen: América. Distribuido desde el sur de Estados Unidos hasta el sur de Sudamérica.

Descripción: Arbusto leñoso, perennifolio, alcanza hasta 3 m de alto. Ramillas surcadas de color castaño oscuro. Follaje persistente de color verde amarillento. Presenta un aspecto brillante particular.

Hojas. Simples, alternas, glabras. Pegajosas al tacto. Lanceoladas, de 4 a 8 cm de largo. Borde íntegro. Ápice agudo, base cuneada. Las nervaduras son notorias por presentar un color más claro.



Figura 12. *Dodonaea viscosa* introducida en la parcela experimental

Flores: Flores pequeñas, unisexuales, amarillentas, con 2 a 5 pétalos (en realidad tépalos, ya que no se distinguen sépalos y tépalos), las flores masculinas con 5 a 8 estambres de filamentos cortos y anteras grandes, y con el ovario rudimentario; las flores femeninas con los estambres rudimentarios muy pequeños. Florece en primavera.

Fruto. Cápsular, trilocular. Con una coloración que varía entre el amarillo, rojo pálido llegando al rojo lacre fuerte. Fructifica en verano y otoño. Cuando los frutos están maduros le dan al arbusto una coloración particulares (Villaseñor y Espinosa, 1998).

Requerimiento de cultivo y tolerancias

Clima: Se adapta a cualquier tipo de clima. Es tolerante a la sequía.

Suelo: Soporta cualquier tipo de suelos. Prefiere suelos limosos y ricos en materia orgánica. Este arbusto es uno de las plantas más comunes sobre terrenos degradados.

Exposición. Prefiere sol. Por lo general crece en sitios abiertos.

Riego: Prefiere riego con frecuencia, una vez establecido.

2.6.5 *Callistemon citrinus* (Curtis) Skeels

Familia: Myrtaceae.

Nombre común: Calistemo, limpiatubos.

Lugar de origen: Nativo de Australia y Nueva Gales del Sur.

Descripción: Es un arbusto o arbolito perenne, de forma irregular, de follaje semitransparente, ramas finas de hojas repartidas y madera dura, generalmente de 2-6 m de altura, a veces con las ramas arqueadas. Es de crecimiento moderado a rápido.

Hojas. Sus hojas son oblanceoladas a reducir- elípticas, 3-7 cm de largo, 5-8 mm de base ancha, ápice por lo general a corto acuminado y picante.

Flores. Flores con los sépalos algo rosados y los pétalos verdosos o rojizos, con pelos en los bordes. Estambres con los filamentos libres o ligeramente unidos en la base, de 3 cm de largo, de color rojo brillante a rosados, rara vez blancos. Anteras de color rojo oscuro.

Fruto. Sus frutos son cápsulas de 3-9 mm de ancho. Espigas cilíndricas y densas, y de color rojo carmín (Sánchez, 2001).

Requerimientos de cultivo y tolerancias

Clima. Se adapta a cualquier tipo de clima y temperaturas extremas, prefiriendo los lugares secos.

Suelo. Es rustico en cuanto a suelos, prefiere suelos limosos y ricos en materia orgánica.

Exposición. Requiere sombra parcial.

Riego. Prefiere riego ligero (Chanes, 1979).



Figura13. *Callistemon citrinus* introducido en la parcela experimental

2.7 Planteamiento del problema

Se ha analizado que en el Parque Ecológico Cuitlahuac (El ex tiradero a cielo abierto de Santa Cruz Meyehualco), las características del suelo son: heterogéneo (material de construcción, escombros), elevada compactación, bajo contenido de nitrógeno, deficiencia de nutrimentos, presencia de metales pesados en concentraciones superiores a los niveles normales, poca profundidad con una delgada capa de sellado con suelo orgánico de 0.3 m de profundidad colocado encima de la columna de basura, elevadas temperaturas que se generan en el interior de la columna de basura, deficiencia hídrica y poca retención de agua (Galván, 1995)^a.



Figura 14. Estructura del suelo del Parque Ecológico Cuitláhuac

Las diferentes especies de plantas que se han introducido anteriormente y con reintroducciones recientes, presentan crecimiento lento, porcentajes bajos de supervivencia, presencia de clorosis y necrosis, además de presencia de plagas y enfermedades, esto debido a las condiciones adversas presentes en el sitio (Duarte, 2005). Por lo que el establecimiento en el sitio de otras especies vegetales se ve limitado (Galván *et al.*, 1995)^b.

2.8 Descripción del área de estudio

2.8.1 Antecedentes del área de estudio

Tiradero a cielo abierto Santa Cruz Meyehualco

A partir de 1924, el tiradero de Santa Cruz Meyehualco empezó a utilizarse con tal. Situado al oriente de la ciudad de México, con una extensión de 160 hectáreas y con 60 años de operación, este tiradero llegó a constituirse en un importante centro de influencia, que condicionó el sistema de manejo de los desechos sólidos y representó uno de los principales focos de contaminación de la ciudad. El tiradero de Santa Cruz Meyehualco recibía alrededor de 6, 400 toneladas de desechos sólidos al día, los cuales eran separados dentro del sitio por cerca de 800 familias de pepenadores, el tiradero se formó de numerosas montañas de desechos; algunas hasta de 100 metros de altura, causas que lo convirtieron en el más grande del mundo (Deffis, 1994). A lo largo de su operación captó un total de 44, 712, 500 toneladas de basura.

El 15 de noviembre de 1982, inicia la clausura definitiva de este tiradero y concluye en junio de 1986, para ello se removieron aproximadamente 2, 600, 000 m³ de residuos y se utilizaron 769, 600 m³ de material para cobertura proveniente de excavaciones y zonas de construcción, lo cual sirvió para controlar las exhalaciones de biogás, instalándose 42 pozos de monitores para su control.

Al finalizar la clausura y saneamiento se propuso establecer una extensa zona verde con fines recreativos la cual fue habilitada como parque, inaugurado oficialmente como Parque Ecológico Cuitláhuac el 5 de enero de 2003. Sin tener en cuenta el tipo de suelo con el que se contaba, en este se realizó la plantación sin planificación alguna, de un gran variedad de especies exóticas como: Eucaliptos, Casuarinas y Álamos (García y Munguía, 2000).

Una vez clausurado, se estableció en la parte norte una extensa zona verde con fines recreativos que incluye módulos de convivencia familiar, oficinas administrativas, sanitarios y estacionamiento. Mientras que la parte sur es una zona deportiva que cuenta con canchas para la práctica de diferentes actividades

2.8.2 Localización geográfica

El Parque Ecológico Cuitlahuac se localiza en la Ciudad de México, en el perímetro de la Delegación Iztapalapa al sureste de la zona metropolitana del Distrito Federal, entre el paralelo $19^{\circ}22'00''$ latitud Norte y el meridiano $99^{\circ}02'00''$ longitud Oeste. colinda al Norte con el Eje 5 Oriente y terreno de propiedad federal, al Sur con el Eje 6 Oriente y la unidad habitacional Santa Cruz Meyehualco, al Oriente con la Avenida Guelatao de la colonia Santa María Aztahuacan y al Poniente con la calle Carlos L. Grávidas de la unidad habitacional Vicente Guerrero (Galván *et al.*, 1995)^b.

En el Parque Ecológico Cuitlahuac, se otorgo a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza de la UNAM, una parcela experimental, con dimensiones de 35 x 80 m, lo cual proporciona un área de 2550 m² (figura 15 y 16).

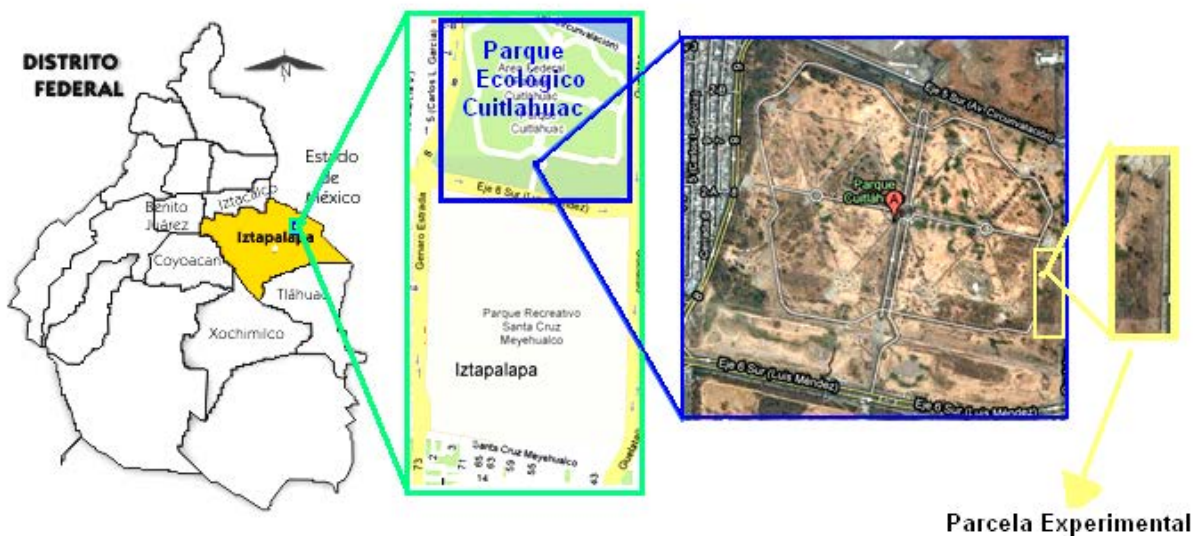


Figura 15. Ubicación de la parcela experimental en el Parque Ecológico Cuitláhuac



Figura 16. Parcela experimental en el Parque Ecológico Cuitláhuac

2.8.3 Condiciones climáticas

De acuerdo al sistema de clasificación climática de Köppen, adecuado por Enriqueta García (en modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlos a las condiciones particulares de la República Mexicana, México). El clima de Iztapalapa está comprendido en el grupo de climas templados, esto es con temperatura media del mes más frío entre -3° y 18°C . Con este tipo de temperatura, el subgrupo correspondiente a Iztapalapa es el clima C(w) con el siguiente significado: C(w) templado, subhúmedo con lluvias en verano, con % de lluvia invernal entre 5 y 10.2 del anual, precipitación del más seco 40mm. Siendo el más seco de los templados sub húmedos, con lluvia en verano con un cociente P/T 43.2

En el mapa de precipitación promedio anual del Distrito Federal, observamos como en Iztapalapa tiene de 600 a 700 mm de precipitación media anual. La temperatura media anual del INEGI, en Iztapalapa destacan dos grupos climáticos: al norte mayor a los 16°C y en el sur varía entre los 14°C y los 16°C (MDI, 2005).

2.8.4 Topografía e Hidrología

El área presenta topoformas de llanuras lacustres con suelos del Cuaternario, mientras que la hidrología es una fuente importante de abastecimiento de agua debido a que por esta pasa una corriente subterránea proveniente del sistema de Santa Catarina y en la parte superior del sitio predominan los depósitos lacustres (Duarte, 2005).

2.8.5 Edafología y Geología

Los residuos fueron depositados sobre suelos tipo regosol eutrico, parecidos a los del ex lago de Texcoco y con características salino-sódicas con alto contenido de arcilla (Galván *et al.*, 1995)^b.

La Geología de Iztapalapa, se encuentra dividida en 2 zonas, de la siguiente manera:

- Al Norte (en menor porción) perteneciente al período Cenozoico, Cuaternario, Suelo.
- Desde parte del Norte hasta el Sur, pertenece también al período Cenozoico, era Terciaria, roca ígnea extrusiva (MDI, 2005).

2.9 Justificación

Es importante señalar que debido a las condiciones adversas y extremas, en el Parque Ecológico Cuitláhuac, la cubierta vegetal que se ha introducido, ha significado un costo ambiental y económico elevado. Por lo que se debe hacer una selección de especies arbustivas y arbóreas que cumplan con las características de aclimatación como son: rápido crecimiento, resistencia al biogás, capaces de soportar disponibilidad de agua, resistencia a la salinidad, raíces poco profundas o superficiales, a fin de tener una comunidad de plantas tolerantes a las condiciones del sitio, que puede asegurar su desarrollo y establecimiento sea exitoso, con esto tener la creación de una comunidad vegetal naturalizada.

Se debe promover una mayor riqueza de cubierta vegetal, dado que una mezcla mayor de especies vegetales aumenta la probabilidad de microclimas favorables, así como su desarrollo sustentable en el sitio (Olaeta *et al.*, 1997). Además que se tiene una baja susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades. Las plantas son un factor de conservación de la capa de suelo, pudiendo reducir la erosión en más de un 90% , dependiendo de las especies vegetales presentes y su densidad (Moreno, 2006). El tener una cubierta vegetal reducida o nula ocasionará que los residuos queden al descubierto y puedan provocar problemas ambientales a las zonas aledañas a la zona de estudio, por lo que es importante mantenerla.

De tal manera que también se deben aprovechar los sitios de disposición final postclausura para incrementar las áreas verdes en los suelos urbanos, por las funciones ambientales que realizan, como: generación de oxígeno, baja los niveles de contaminantes, control de la erosión, aparte de representar sitios de refugio, protección y alimentación de fauna silvestre; las áreas verdes representan los espacios favoritos para el esparcimiento, recreación y deporte, además del realce de la imagen urbana (Martínez, 2008).

III. HIPOTESIS

Si las especies seleccionadas *Cupressus sempervirens*, *Liquidambar styraciflua*, *Senna multiglandulosa*, *Dodonaea viscosa* y *Callistemon citrinus* son tolerantes a diferentes condiciones del suelo, clima y humedad, **entonces** al introducirlas en el Parque Ecológico Cuitláhuac, se tendrá un establecimiento y crecimiento favorable para la revegetación del sitio.

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Describir el establecimiento y crecimiento de las especies *Cupressus sempervirens*, *Liquidambar styraciflua*, *Senna multiglandulosa*, *Dodonaea viscosa* y *Callistemon citrinus*, en las condiciones de la parcela experimental del Parque Ecológico Cuitláhuac, durante el primer año después de su plantación.

4.2 Objetivos particulares

- Caracterizar física y químicamente el suelo donde se desarrolla la vegetación introducida.
- Calcular la concentración de de metales intercambiables (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) en el suelo de la parcela experimental, para saber si afecta el establecimiento y crecimiento de las especies seleccionadas.
- Evaluar el porcentaje de supervivencia de las especies introducidas en la parcela experimental.
- Calcular la tasa relativa de crecimiento (TRC) de las especies introducidas en la parcela experimental.

V. MÉTODO

5.1 Muestreo del suelo

El muestreo del suelo fue al azar. Por la variación que presenta el sitio (presentándose estrato heterogéneo horizontal y vertical). Se llevo a cabo la recolección de 25 muestras simples, y se manejan 2 repeticiones en el análisis de cada parámetro para cada muestra; se tomo la muestra a una profundidad de 0-20 cm, 0-30 cm, ya que esta profundidad recomienda la norma para análisis de fertilidad (NOM-021-SEMARNAT-2000). Las muestras fueron transportadas al laboratorio de contaminación atmosférica de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, donde se llevo a cabo la preparación de las muestras simples de suelo, donde fueron secadas a temperatura ambiente. Después se tamizaron en malla de 2 mm para homogeneizar el tamaño de partículas, y por ultimo fueron envasadas y rotuladas en bolsas de polietileno, para su posterior determinación analítica.

5.2 Análisis químicos y físicos del suelo

El análisis físico y químico del suelo, se realizó por duplicado y de acuerdo a lo establecido en la NOM-021-SEMARNAT-2000 y Muñoz, 2000; mediante las siguientes técnicas:

- Color por las tablas Munsell (Munsell, 1992; NOM 021; Muñoz *et al.*, 2000).
- Textura por el método del hidrómetro Bouyoucos (NOM 021; Muñoz *et al.*, 2000).
- Conductividad eléctrica por el método pasta de saturación (NOM 021; Muñoz *et al.*, 2000; Chapman, 1979).
- Potencial de hidrógeno real (pH), se determinó por el método del potenciométrico. Relación 1:2 (Ríos 1985).
- Actividad de carbonatos, por el método volumétrico (Muñoz *et al.*, 2000).
- Porcentaje de materia orgánica por vía húmeda, por el método de Walkley y Black (NOM 021; Muñoz *et al.*, 2000).
- Capacidad de intercambio catiónico total (C.I.C.T), se determinó por el método de acetato de amonio 1 N pH 7 (NOM 021; Muñoz *et al.*, 2000).

5.3 Análisis de metales extractables en el suelo

El contenido extractable de metales en el suelo, se determinó por el método con acetato de amonio (CH_3COO) 1N pH 7 (Zapata y Galván, 2004) y se cuantificaron por espectrofotometría de absorción atómica de flama, de acuerdo a las condiciones de trabajo que se encuentran en el cuadro 7, con el equipo Varian Spectran 2000

Cuadro 7. Condiciones operacionales en la determinación de metales por espectrofotometría de absorción atómica de flama con el equipo Varian Spectran 2000.

Elemento	Longitud de onda (nm)	Ancho de banda (nm)	Corriente de la lámpara (mA)	Posición de la lámpara	Tipo de flama
Al	309.3	0.5	10	2	oxido nitroso/acetileno
Cd	228.8	0.5	5	3	Aire/acetileno
Cr	357.9	0.2	10	2	Aire/acetileno
Cu	324.8	0.5	10	3	Aire/acetileno
Fe	248.3	0.2	10	4	Aire/acetileno
Ni	232	0.2	10	4	Aire/acetileno
Pb	217	1	10	2	Aire/acetileno
Zn	213.9	1	7	4	Aire/acetileno

Para determinar la concentración de los metales se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Concentración del metal } (\mu\text{g g}^{-1}) = \text{ppm CC} \times D_m \times D_v$$

Donde:

ppm CC = partes por millón en la curva de calibración

D_m = Dilución de masa (volumen de extractante/g de muestra)

D_v = Dilución de volumen (aforo/alícuota) (IRENAT, 1994).

5.4 Selección de las especies

La selección de especies se basa en sus exigencias para un óptimo desarrollo o bien en su tolerancia, por lo tanto se considera los siguientes aspectos:

- Clima
- Tipo de suelo
- pH del suelo
- Textura
- Radiación solar
- Vientos
- Tipo de crecimiento (lento, medio o rápido)
- Necesidades de humedad
- Rusticidad general, poco exigentes a la calidad de sitio
- Capacidad de fijar N (leguminosas)
- Por sus cualidades de desarrollo radical
- Tolerancia a contaminantes atmosféricos
- Compatibilidad a las condiciones estacionales de la zona
- Por su origen autóctono y alóctono de compatibilidad ecológica
- Exigencias de mantenimiento para su supervivencia
- Por su alto valor ornamental y funcional dentro del sitio (Martínez, 2008).
- Por su disponibilidad en vivero: Se investigó que especies a emplear tenían disponibles en ese momento, en los viveros de Netzahualcóyotl en el Distrito Federal y Yecapixtla en el Estado de Morelos, de la Dirección General de Parques Urbanos del D.F.

5.5 Plantación

Se procedió a la excavación de las cepas de 0.3X0.3X0.3m. tomándose distancias mínimas de plantación (5m entre cada individuo) y se mejoró parcialmente las condiciones de suelo del sitio por lo que se preparó un sustrato antes de la plantación, el cual consistió en una mezcla de tierra del cavado, calabaza y composta en relación 1:1:1 respectivamente como relleno de la cepa, de acuerdo a la Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-006-RNAT-2006.

Según la disponibilidad de las especies a emplear, primero se acudió en el mes de abril de 2009 al vivero Netzahualcóyotl en el Distrito Federal para adquirir y seleccionar 10 individuos de las especies *Cupressus sempervirens*, *Senna multiglandulosa* y *Liquidambar styraciflua* (árboles) y dos meses después se acudió al vivero de Yecapixtla en el Estado de Morelos, para adquirir 16 individuos de las especies *Callistemon citrinus* y *Dodonaea viscosa* (arbustos), todos los individuos debían presentar follaje vigoroso, tallo sin deformaciones, carencia de plagas y enfermedades, jóvenes y buena cobertura de copa (NADF- 006-RNAT-2006; Harris, 1992). Además que la selección implicó la medición de la altura y el diámetro de las plantas cultivadas en vivero. Cada especie tiene fijados unos rangos (en el caso de la altura) o un valor mínimo a superar (en el caso del diámetro) (Birchler *et al.*, 1998) de tal forma que las plantas que no cumplieran las especificaciones fijadas fueron rechazadas.

Se llevó a cabo la plantación de las especies *Cupressus sempervirens*, *Senna multiglandulosa* y *Liquidambar styraciflua* el 8 abril de 2009, y de las especies *Callistemon citrinus* y *Dodonaea viscosa* el 15 de junio de 2009.

Una vez que se retiró el empaque, se colocó el árbol con su cepellón en la cepa, se vació la mezcla preparada previamente, se formó un cajete para captar agua de lluvia y se regó cada árbol con 20 litros de agua (NADF-001-RNAT-2006). Finalmente cada individuo fue etiquetado.



Figura 17. Transporte de las especies vegetales seleccionadas

Así, se plantaron un total 56 individuos en un área de 2550 m². Los individuos miden en promedio entre 1 y 2 metros de altura, la distancia de plantación entre individuos fue de 5 metros, alternando aleatoriamente individuos de diferentes especies aplicando la técnica del tresbolillo (seguir el plantado en forma de zig-zag; figura 18), ya que esta técnica resulta más apropiada al lugar para que las plantas cubran mayor superficie del suelo.

Los individuos plantados en la parcela experimental estuvieron expuestas a las condiciones adversas del Parque Ecológico Cuitláhuac, solo con el cuidado de riego asistido permanente 2 veces por semana, ya que es importante mantener el potencial hídrico de la planta por debajo de los límites de estrés durante la época de crecimiento (Birchler *et al.*, 1998).

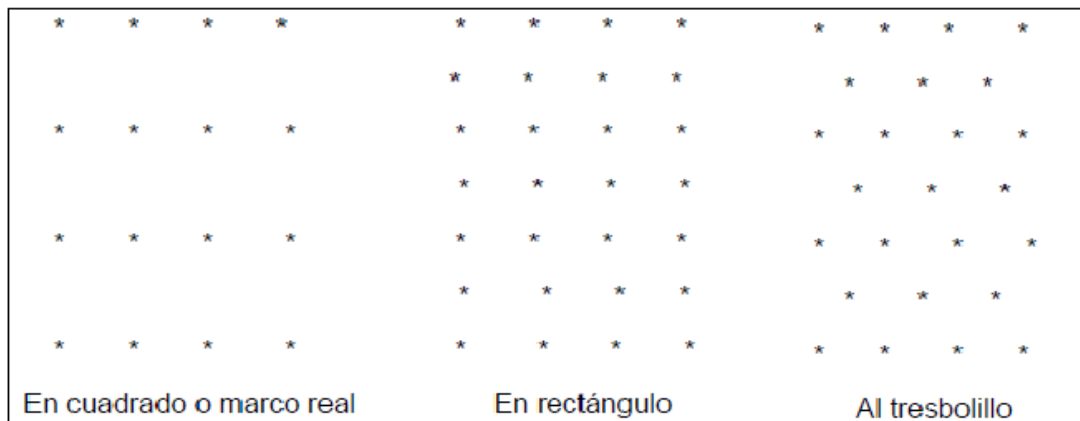


Figura 18. Diferentes formas de plantación (Duarte, 2005).

5.6 Supervivencia

El porcentaje de supervivencia se determinó cada 30 días (mensual), para cada especie. La primera evaluación se realizó al iniciar el experimento y se efectuaron un total de 12 mediciones a lo largo de un año. En cada una se evaluó el porcentaje de supervivencia.

El porcentaje de supervivencia se calculó mediante una regla de tres, considerando el número inicial de árboles plantados como el 100%, con el objeto de demostrar la supervivencia de las especies bajo estudio.

Para determinar la supervivencia se registró mediante el conteo de los individuos y se consideró la apariencia del follaje (número, color y apariencia de las hojas) como un indicador del estado de los individuos (cuadro 8), tomando los siguientes criterios:

Cuadro 8. Apariencia de follaje		
Color	Apariencia de hojas	Estado del árbol
Verde vivo	Grandes y/o muy verdes	Excelente
Verde seco	Pequeñas y pocas	Bien
Naranja	Marchitas	Con estrés
Blanco	Sin hojas o solo yemas	Latente
Gris claro	Sin hojas	Seco

Para apoyar este registro se tomó fotografía de los individuos introducidos. De igual forma, se hicieron anotaciones sobre las condiciones de la parcela experimental en cuanto a factores que estaban afectando el establecimiento y crecimiento de las plantas. Se anotaron las posibles causas de mortalidad (daños por insectos, necrosis desecación, daño mecánico).

5.7 Crecimiento

El crecimiento toma lugar simultánea e independientemente en diferentes partes de un árbol y puede ser medido a través de la modificación, a un mayor valor, de la magnitud de cualquier característica mensurable o diversas variables dendrométricas como altura, diámetro y cobertura de copa (Imaña y Encinas, 2008).

Una vez que los individuos de las especies, fueron plantados se tomaron medidas iniciales de altura, diámetro y cobertura de copa y durante 12 meses se hicieron visitas periódicas cada 30 días (mensual) a la parcela experimental para la toma de datos en cuanto al crecimiento de las variables dendrométricas.

En altura, se determinó midiendo directamente con un flexometro en metros, desde la base del tallo hasta la yema apical, el diámetro, se calculó midiendo directamente el individuo, con un vernier graduado en milímetros, marca: Mauser, modelo: Inox, donde se realizó una marca para disminuir errores entre mediciones sucesivas.

La cobertura de copa (CC) se calculó midiendo directamente con un flexometro en metros el eje mayor (d1) y el eje menor (d2) de cada individuo y después indirectamente con la siguiente fórmula:

$$CC = \left[\frac{d1 + d2}{4} \right]^2$$

A todos los individuos de cada una de las especies se les promedio las mediciones que estuvieron orientadas a evaluar la tasa relativa de crecimiento (TRC) en altura, diámetro y cobertura de copa.

5.8 Análisis estadístico

El cambio en el crecimiento, altura, diámetro y cobertura de copa en el tiempo fue calculado a partir de la tasa relativa de crecimiento, la cual expresa el crecimiento en términos de la tasa de incremento en tamaño por unidad de tamaño inicial.

La fórmula para calcular la TRC quedo de la siguiente manera:

$$TRC = (\ln \text{variable}_2 - \ln \text{variable}_1) / (t_2 - t_1)$$

Donde:

variable 1 = medición de la variable al momento de la plantación

variable 2 = medición de la variable al año de la plantación

t_1 = tiempo (0 año)

t_2 = tiempo (1 año)

La tasa relativa de crecimiento de las medias de las variables dendrométricas (altura, diámetro y cobertura de copa) para cada una de las especie, se comparó mediante análisis de varianza (ANOVA) de una vía. Para las variables que presentaron diferencias estadísticas en el análisis de varianza ($P < 0,05$), se hizo la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey (DSH). Para el análisis de datos se utilizó el programa estadístico (Statgraphics Centurion XVI).

VI. RESULTADOS

El análisis físico para el color indica una amplia variación en el suelo, debido fundamentalmente a las diferencias en los materiales contenidos. Así el color en seco se encontraron las variantes de café (24%), café amarillento (20%), café pálido (12%), café claro (12%), y gris muy oscuro (12%), además de otros tipos de color escasamente representados; en la prueba de color en húmedo la mayoría es de dos tipos de color café muy oscuro (44%) y negro (44%). La clase textural indica que la parcela experimental muestra valores diversos en cuanto a clases textuales, debido a los materiales presentes. El contenido de arena varía entre 56.6% a 78.4%, con un valor medio del 64.0%. El contenido de limo en las muestras varía entre el 11.0 % y el 29.3%, con un valor medio del 23.0 %. El contenido de arcilla varía desde valores de 6.64 por ciento a 25.36%, con un valor medio del 13.0%. Así, la clase textural (USDA) mayoritariamente es la migajón arenoso, a la que le corresponden el 84.0% de las muestras. El contenido de carbonatos varía considerablemente entre las 25 muestras con valores desde muy bajo (12%), bajo (24%), alto (28%) y medio (36%) (cuadro 9).

En el análisis químico, el pH se tiene valores entre 6.8 a 8.6, con un valor medio de 7.55. Así el 60% pertenece a la clasificación medianamente alcalino y el 32% a la clasificación de neutro. En conductividad eléctrica indica que el 100% de las muestras de suelo presentada es menor a 2 dS m^{-1} a 25°C , lo que se interpreta como que tiene efectos despreciables de salinidad. Los valores obtenidos en materia orgánica comprenden un amplio rango de valores que oscilan entre 0.01 a 8.69. Por lo tanto, los niveles de materia orgánica son desde muy bajos a muy altos. Así se tienen un 40% con valores entre 1.6 a 3.5 (medio), el 24% con valores entre 3.6 a 6.0 (alto), el 12% con valores menores a 0.5 (muy bajo), el 8 por ciento con valores de 0.6 a 1.5 (bajo) y 8 por ciento con valores de mayores a 6 (muy alto). Los valores de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) varían desde bajos de $14.17 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ a muy altos de $47.39 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$. Así se tiene en su mayoría valores entre 15 y $25 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (medio) con 60%, valores mayores a $40 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (muy alto) con el 20%, el 16% con valores entre 25 a $44 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (alto) y el 4 por ciento con valores entre 5 a $15 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (bajo) (cuadro 9).

Análisis químico y físico del suelo

Cuadro 9. Resultados promedio del análisis químico y físico realizado al suelo de la parcela experimental

Muestra No.	Color		Características texturales			Clase Textural	Actividad de carbonatos	pH (2:1)	C.E 25° (dS m ⁻¹)	M.O (%)	C.L.C.T (cmol/kg)
	Seco	Húmedo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)						
1	10YR ^{5/4} Café amarillento	10YR ^{3/3} Café oscuro	63.6	11	25.36	Migajón arenoso arcilloso	Baja	7.3	0.03	1.89	42.32
2	10YR ^{4/2} Café oscuro	10YR ^{2/1} Negro	58.6	29.3	12.08	Migajón arenoso	Alta	7.8	0.1	8.69	35.57
3	10YR ^{5/3} Café	10YR ^{4/2} Café oscuro grisáceo	68.1	22	9.92	Migajón arenoso	Alta	7.5	0.02	1.65	22.38
4	10YR ^{5/3} Café	10YR ^{5/3} Café	62.1	21.7	16.2	Migajón arenoso	Media	8	0.04	3.29	42.6
5	10YR ^{3/1} Gris muy oscuro	10YR ^{2/1} Negro	58.4	28.3	13.36	Migajón arenoso	Media	7.5	0.18	8.69	19.67
6	10YR ^{5/4} Café amarillento	10YR ^{2/1} Negro	57.6	22	20.36	Migajón arenoso arcilloso	Baja	7.9	0.06	1.65	28.2
7	10YR ^{3/4} Café amarillento	10YR ^{3/3} Café oscuro	74.6	16	9.36	Arenoso migajón	Media	8	0.02	2.59	28.75
8	10YR ^{3/4} Café amarillento	10YR ^{3/3} Café oscuro	66.1	23.7	10.2	Migajón arenoso	Media	7.9	0.14	1.65	29.87
9	10YR ^{4/2} Café oscuro grisáceo	10YR ^{3/3} Café oscuro	78.4	12.6	9	Arenoso franco	Baja	7.5	0.09	3.06	35.37
10	10YR ^{5/3} Café	10YR ^{2/1} Negro	60.6	19	20.36	Migajón arenoso	Nula	7.6	0.04	2.35	25.16

Continúa cuadro 9.

11	10YR ^{6/3} Café pálido	10YR ^{2/1} Negro	56.6	24.6	18.72	Migajón arenoso	Media	8.1	0.04	1.65	28.31
12	10YR ^{4/2} Café oscuro grisáceo	10YR ^{2/1} Negro	67.1	22.7	10.2	Migajón arenoso	Nula	6.8	0.04	5.17	24.9
13	10YR ^{5/3} Café	10YR ^{3/3} Café oscuro	63.6	21.3	15.64	Migajón arenoso	Nula	8.6	0.06	0.01	47.39
14	10YR ^{6/3} Café pálido	10YR ^{2/2} Café muy oscuro	61.6	28	10.36	Migajón arenoso	Alta	7.2	0.02	1.18	41.19
15	10YR ^{6/3} Café pálido	10YR ^{2/2} Café muy oscuro	67.6	22	10.36	Migajón arenoso	Alta	7.2	0.07	2.82	31.17
16	7.5YR ^{6/3} Café claro	7.5 YR ^{2/2} Café muy oscuro	65.6	23.3	11.08	Migajón arenoso	Baja	7	0.06	2.59	35.98
17	10YR ^{5/3} Café	10YR ^{2/1} Negro	61.6	24	14.36	Migajón arenoso	Alta	7.3	0.07	2.82	33.21
18	7.5YR ^{6/3} Café claro	10YR ^{2/2} Café muy oscuro	59.6	25.6	14.72	Migajón arenoso	Media	7.6	0.11	0.95	45.84
19	7.5YR ^{6/3} Café claro	10YR ^{2/2} Café muy oscuro	60.6	26	13.36	Migajón arenoso	Alta	8.1	0.05	0.48	24.75
20	7.5YR ^{5/1} Gris	10YR ^{5/3} Café	61.1	28.6	10.28	Migajón arenoso	Media	7.1	0.08	4.47	14.17
21	10YR ^{3/1} Gris muy oscuro	10YR ^{2/1} Negro	61.6	28	10.36	Migajón arenoso	Media	7.1	0.1	5.87	15.89
22	10YR ^{3/1} Gris muy oscuro	10YR ^{2/1} Negro	67.1	21.6	11.28	Migajón arenoso	Baja	7.5	0.05	5.4	26.97
23	10YR ^{5/3} Café	7.5 YR ^{2/2} Café muy oscuro	72.1	21.3	6.64	Arenoso migajón	Baja	6.9	0.01	3.76	27.27
24	10YR ^{5/2} Café grisáceo	10YR ^{2/1} Negro	60.7	25.9	13.36	Migajón arenoso	Alta	8.4	0.04	4.94	32.57
25	10YR ^{5/4} Café amarillento	10YR ^{2/1} Negro	71.1	20.7	8.2	Arenoso migajón	Media	7	0.17	0.01	34.7

Análisis de metales intercambiables en el suelo

El cuadro 10, presenta el resultado de las concentraciones obtenidas para Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$), de las 25 muestras obtenidas en la parcela experimental. Sin embargo, Cr no fue detectado en ninguna de las 25 muestras, asimismo para Fe 21 de las 25 muestras no fue detectado, Cu 12 de las 25 muestras no fue detectado y Cd 7 de las 25 muestras no fue detectado.

Cuadro 10. Concentración promedio de metales en la parcela experimental

Muestra	Metales ($\mu\text{g g}^{-1}$)							
	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn
1	6.0	0.17	ND	0.78	0.6	1.11	2.9	4.48
2	5.0	0.05	ND	0.66	0.13	0.85	0.9	13.4
3	3.4	0.18	ND	0.92	0.92	1.06	4.8	7.35
4	2.6	0.2	ND	0.72	ND	1.12	6.3	6.43
5	2.6	0.09	ND	0.7	ND	0.83	5.7	1.4
6	2.6	0.11	ND	0.3	ND	0.52	1.3	11.4
7	1.6	0.1	ND	0.38	ND	0.88	3.4	5.51
8	1.4	0.1	ND	0.2	ND	0.6	3.2	4.39
9	1.8	0.14	ND	0.3	ND	0.79	3.9	4.55
10	3.2	0.3	ND	0.48	0.2	0.67	2.2	8.56
11	3.0	0.33	ND	0.24	ND	0.66	2.0	3.71
12	3.6	0.53	ND	ND	ND	0.68	2.6	6.65
13	4.4	0.39	ND	0.2	ND	0.9	2.5	8.83
14	5.2	0.6	ND	ND	ND	1.1	4.7	6.37
15	6.4	ND	ND	0.12	ND	0.8	5.7	4.77
16	6.4	ND	ND	ND	ND	1.34	4.8	2.61
17	6.0	ND	ND	ND	ND	1.05	9.2	5.71
18	8.8	ND	ND	ND	ND	1.03	7.9	9.79
19	9.4	ND	ND	ND	ND	1.1	1.9	9.66
20	11.0	ND	ND	ND	ND	1.21	7.3	10.8
21	7.2	ND	ND	ND	ND	1.32	10.6	4.8
22	6.6	0.06	ND	ND	ND	1.4	7.8	11.4
23	5.0	0.2	ND	ND	ND	1.07	7.5	2.26
24	6.6	0.24	ND	ND	ND	0.4	9.9	8.83
25	5.8	0.41	ND	ND	ND	0.63	5.4	2.84

ND = NO Detectado

En el cuadro 11, se presenta la estadística descriptiva de la concentración de metales intercambiables ($\mu\text{g g}^{-1}$), de cada metal. El Al presenta contenidos, que fluctúan entre 1.4 y 11.0 $\mu\text{g g}^{-1}$ con un promedio de 5.024 $\mu\text{g g}^{-1}$. La concentración de Cd intercambiable, variaron entre 0.05 y 0.53 $\mu\text{g g}^{-1}$, con un valor promedio de 0.233 $\mu\text{g g}^{-1}$. El Cr no se detecto este en forma intercambiable. Los contenidos de Cu variaron entre 0.12 y 0.92 $\mu\text{g g}^{-1}$ con un promedio de 0.461 $\mu\text{g g}^{-1}$. Los concentraciones de Fe variaron de 0.13 y 0.92 $\mu\text{g g}^{-1}$ de suelo, con un valor promedio de 0.462 $\mu\text{g g}^{-1}$. Para Ni se encontraron valores que van de 0.4 a 1.34 $\mu\text{g g}^{-1}$, con un promedio de 0.924. Los valores de Pb intercambiable oscilaron entre 0.9 y 10.6 $\mu\text{g g}^{-1}$, con un valor promedio de 4.976 $\mu\text{g g}^{-1}$. En Zn los valores fueron muy fluctúan entre 1.4 a 13.4 $\mu\text{g g}^{-1}$, con un valor promedio de 6.66 $\mu\text{g g}^{-1}$.

En la mayoría de las muestras, tras la extracción con acetato de amonio (CH_3COO) 1N pH 7, los metales intercambiables estudiados presentaron la siguiente secuencia: Zn>Al>Pb>Ni>Fe>Cu>Cd>Cr.

Cuadro 11. Estadística descriptiva de las la concentración de metales intercambiables ($\mu\text{g g}^{-1}$), en el suelo de la parcela experimental

	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn
Media	5.024	0.233	0	0.461	0.462	0.924	4.976	6.66
Desviación estándar	2.504	0.161	0	0.264	0.368	0.267	2.770	3.229
Valor mínimo	1.4	0.05	0	0.12	0.13	0.4	0.9	1.4
Valor máximo	11	0.53	0	0.92	0.92	1.34	10.6	13.4

Selección de especies

Con base a los criterios para la selección de las especies y disponibilidad en vivero, se determino evaluar las siguientes especies: *Cupressus sempervirens*, *Liquidambar styraciflua*, *Senna multiglandulosa*, *Callistemon citrinus* y *Dodonaea viscosa*.

Plantación

La plantación de los individuos de las especies (a) *Cupressus sempervirens*, (b) *Liquidambar styraciflua*, (c) *Senna multiglandulosa*, (d) *Callistemon citrinus* y (e) *Dodonaea viscosa*, se identificó por su posición dentro de la parcela experimental (figura 19).

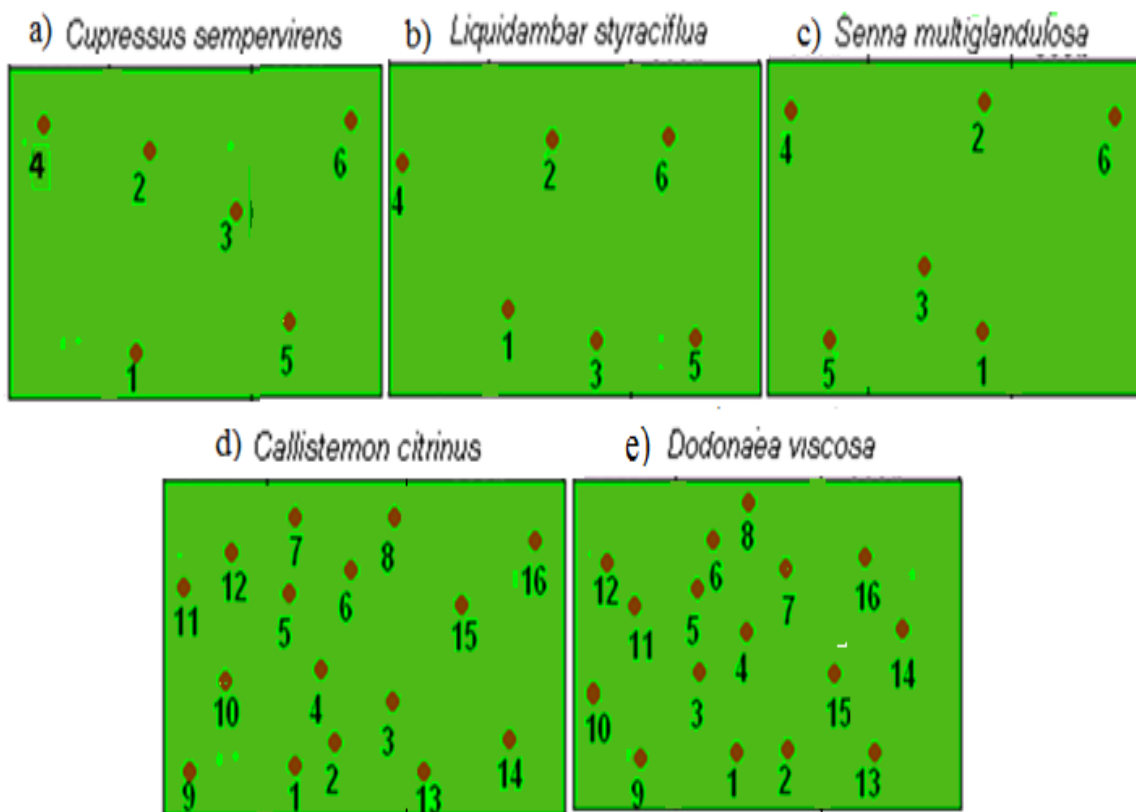


Figura 19. Distribución de los individuos por especie en la parcela experimental

Supervivencia

Las curvas de supervivencia de las cinco especies de plantas introducidas en la parcela experimental fue similar entre ellas, excepto en el caso de *Liquidambar styraciflua*, la cual a los 240 días transcurridos, presenta una mortalidad del 100 por ciento, correspondiendo con la época seca del año. En el caso de *Cupressus sempervirens* y *Senna multiglandulosa* mantuvieron una supervivencia de 100 por ciento, durante el ciclo anual. *Dodonaea viscosa* presento una supervivencia de los individuos de 100 por ciento, hasta el día 150, sin embargo 30 días después tiene una supervivencia del 94 por ciento, para mantenerse así hasta el final del ciclo. En el caso de *Callistemon citrinus* en los 90 días transcurridos tiene una supervivencia del 100 por ciento, y sin embargo 30 días después tiene una supervivencia del 88 por ciento, para continuar así hasta el final del periodo de evaluación. Además las cinco especies muestran buena respuesta al trasplante (figura 20).

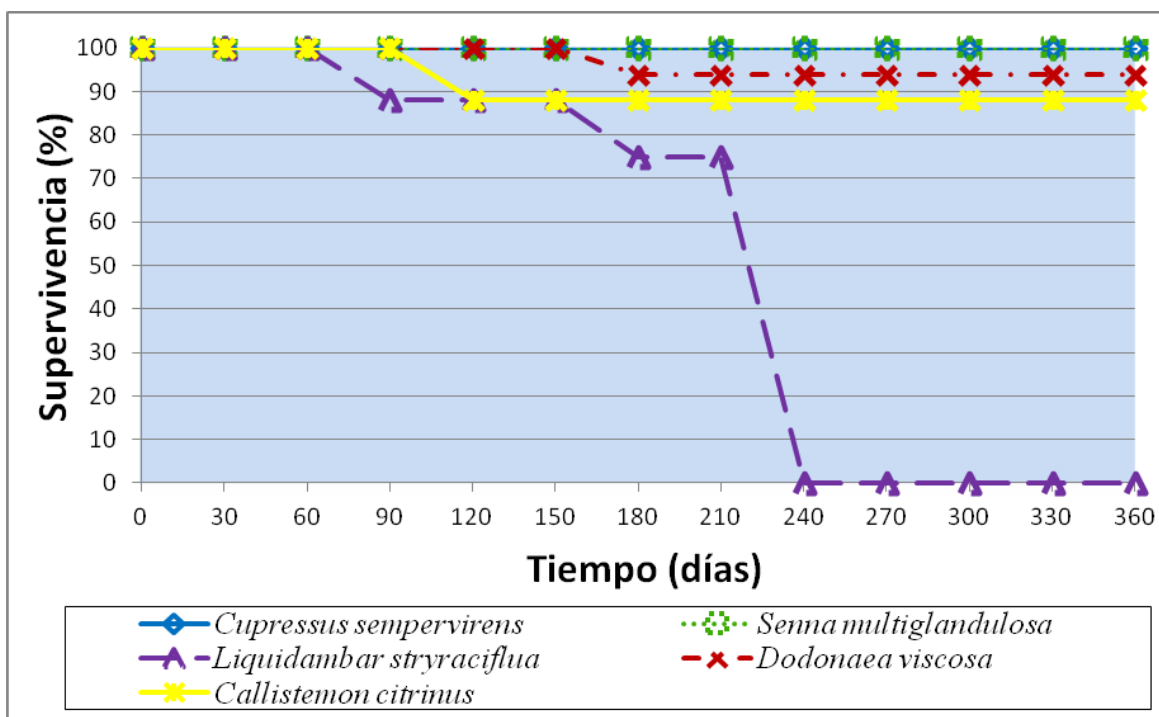


Figura 20. Porcentaje de supervivencia de las especies *Cupressus sempervirens*, *Liquidambar styraciflua*, *Senna multiglandulosa*, *Callistemon citrinus* y *Dodonaea viscosa* vs Tiempo (días) en estudio en la parcela experimental.

Crecimiento

No se incluye a *Liquidambar styraciflua*, en el comportamiento del crecimiento de ninguna variable debido a como ya se menciona en la supervivencia no completo el ciclo anual para su observación.

En la figura 21, el comportamiento en el crecimiento en altura para las cuatro especies de plantas introducidas en la parcela experimental fue similar entre ellas, además que se observa que el mayor crecimiento se tiene en la época de lluvias correspondiendo a los meses de mayo a octubre, sin embargo, el crecimiento disminuyó al terminar la temporada de lluvias. Para las cuatro especies el mayor crecimiento se presenta en el mes de septiembre, que corresponde al mes más lluvioso.

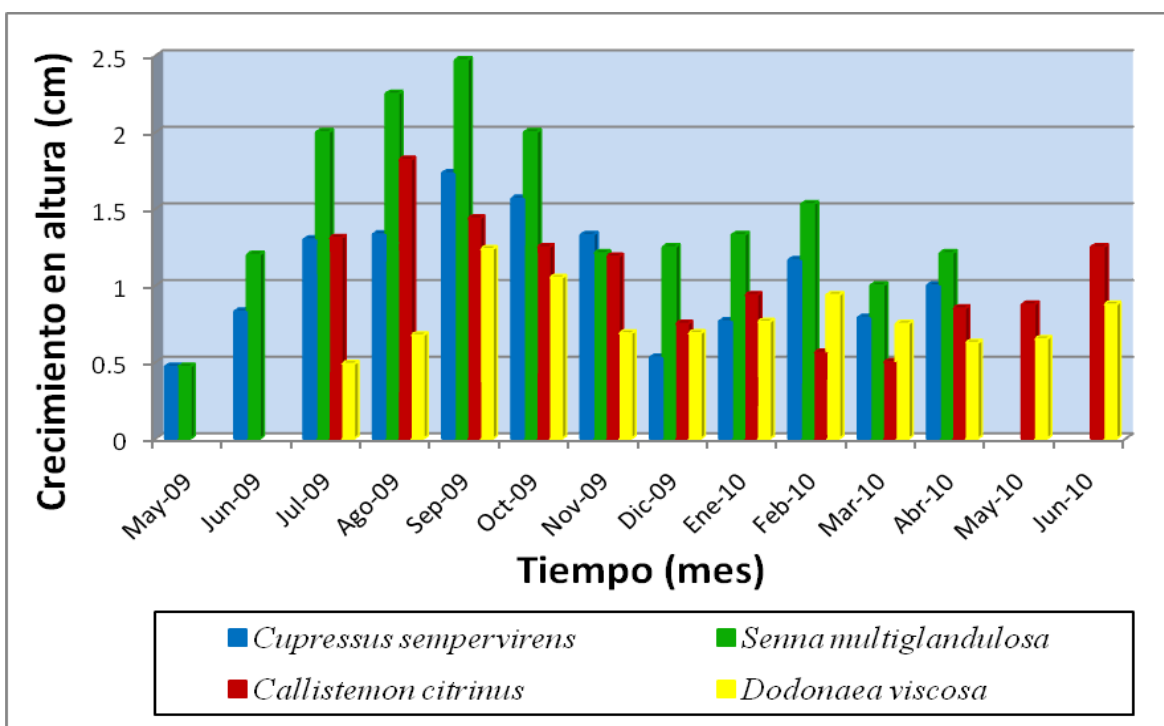


Figura 21. Crecimiento en altura (cm) vs Tiempo (mes), de las especies *Cupressus sempervirens* y *Senna multiglandulosa* de mayo 2009 a abril 2010 y *Callistemon citrinus* y *Dodonaea viscosa* de julio 2009 a junio 2010.

En la figura 22, el comportamiento del crecimiento en diámetro para las cuatro especies de plantas introducidas en la parcela experimental fue distinta entre ellas durante el ciclo anual, ya que se observa que las especies *Cupressus sempervirens*, *Senna multiglandulosa* y *Callistemon citrinus* tienen un crecimiento constante a lo largo del periodo de evaluación, sin embargo, entre los meses de noviembre a enero se presentó una disminución en el crecimiento, coincidiendo con la época de secas, además para estas especies en el mes de septiembre se tiene el mayor crecimiento, siendo el mes con mayor precipitación. En el caso de *Dodonaea viscosa* el crecimiento fue bajo durante los meses de julio a enero, sin embargo, en el mes de febrero empezó a tener un mayor crecimiento hasta terminar el ciclo anual.

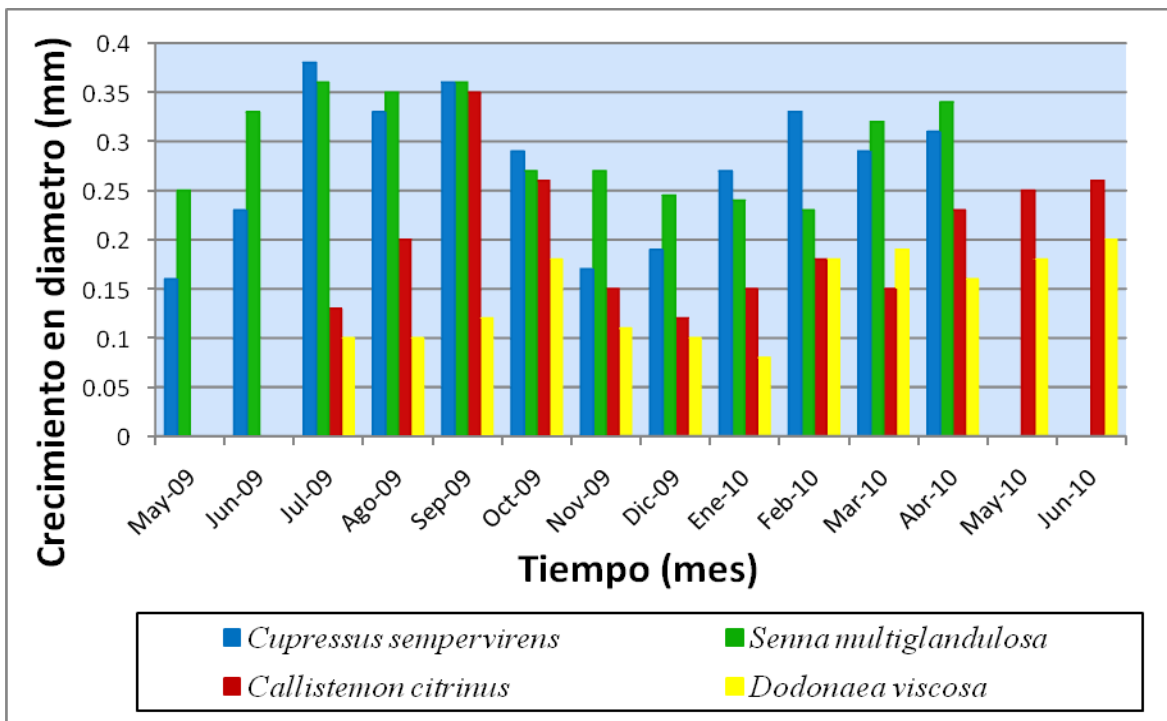


Figura 22. Crecimiento en diámetro (mm) vs Tiempo (mes), de las especies *Cupressus sempervirens* y *Senna multiglandulosa* de mayo 2009 a abril 2010 y *Callistemon citrinus* y *Dodonaea viscosa* de julio 2009 a junio 2010.

En la figura 23, el crecimiento en cobertura de copa para las cuatro especies de plantas fue distinto entre ellas durante el ciclo anual. En el caso de *Cupressus sempervirens*, entre los meses de mayo a enero su crecimiento fue regular despuntando en el mes de febrero. En el caso de *Senna multiglandulosa* en los primeros meses presento un aumento en el crecimiento, para después tener una disminución en crecimiento lo cual se debe a la época de secas del año, dado que la especie es caducifolia, además que en el mes de enero tiene un aumento en el crecimiento. *Callistemon citrinus* tienen muy bajo crecimiento durante los primeros meses teniendo un incremento en los meses de abril a junio. *Dodonaea viscosa* tiene un constante crecimiento a lo largo del periodo de evaluación, sin embargo, entre los meses de diciembre a febrero tiene descenso en el crecimiento coincidiendo con la época de seca y menores temperaturas del ambiente.

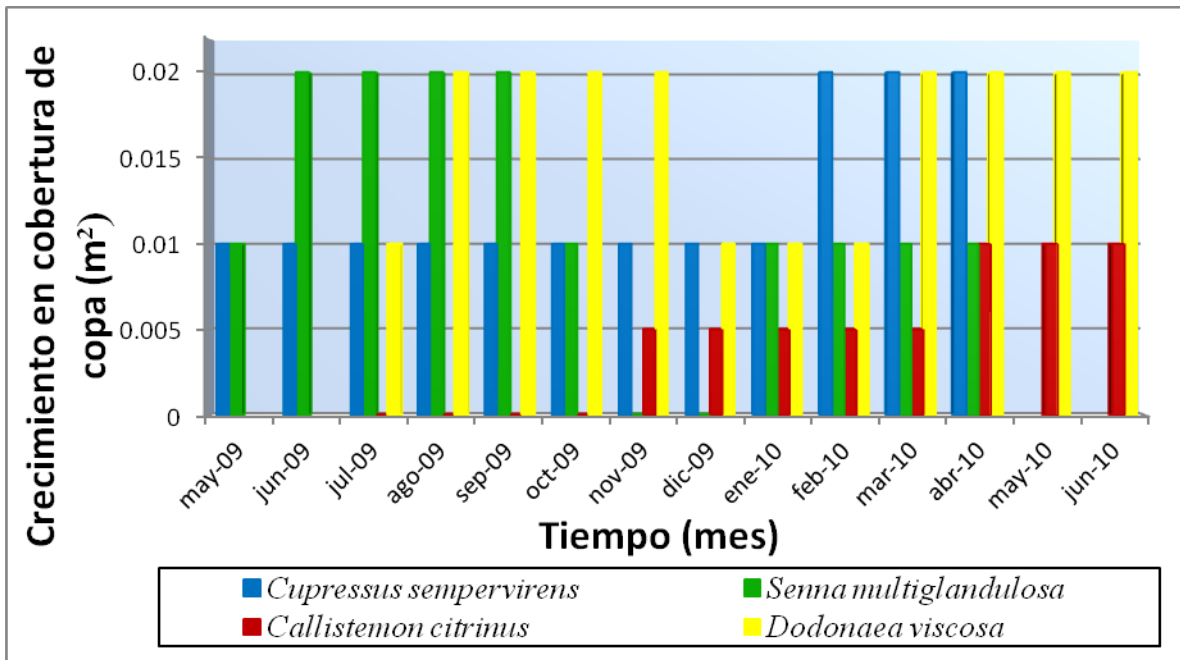


Figura 23. Crecimiento en cobertura de copa (m^2) vs Tiempo (mes), de las especies *Cupressus sempervirens* y *Senna multiglandulosa* de mayo 2009 a abril 2010 y *Callistemon citrinus* y *Dodonaea viscosa* de julio 2009 a junio 2010.

Tasa relativa de crecimiento

Asimismo no se incluye a *Liquidambar styraciflua*, en la tasa de relativa de crecimiento de ninguna variable debido a como ya se menciona en la supervivencia y comportamiento de crecimiento no completo el ciclo anual para ser evaluada.

En la figura 24, se muestra la tasa relativa de crecimiento en altura promedio por especie, se observa que la especie de mayor crecimiento es *Senna multiglandulosa* en contraste con las especies de menor crecimiento que son *Cupressus sempervirens*, *Callistemon citrinus* y *Dodonaea viscosa*. Por lo que se tienen diferencias significativas en la media de la tasa relativa de crecimiento alcanzado en cada especie (Anexo 1).

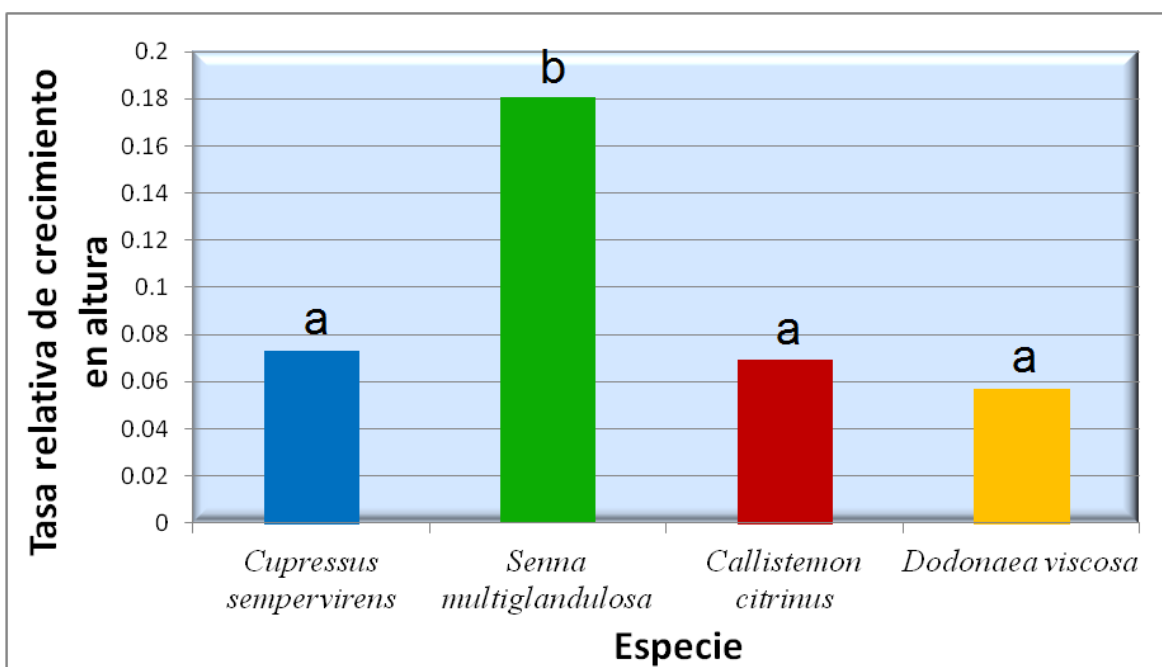


Figura 24. Tasa relativa de crecimiento en altura promedio de las especies *Callistemon citrinus*, *Cupressus sempervirens*, *Dodonaea viscosa* y *Senna multiglandulosa*. Las letras minúsculas distintas, indican diferencias estadísticamente significativas con prueba de Tukey DSH ($P < 0.05$) en la tasa relativa de crecimiento.

En la figura 25, se muestra la tasa relativa de crecimiento en diámetro promedio por especie se observa que el valor más alto se presenta en *Senna multiglandulosa* en contraste con el valor más bajo se presentan en *Dodonaea viscosa*, mientras en *Cupressus sempervirens* y *Callistemon citrinus* los resultados son muy semejantes. Por lo que se tienen diferencias significativas en la media de la tasa relativa de crecimiento alcanzado en cada especie (Anexo 2).

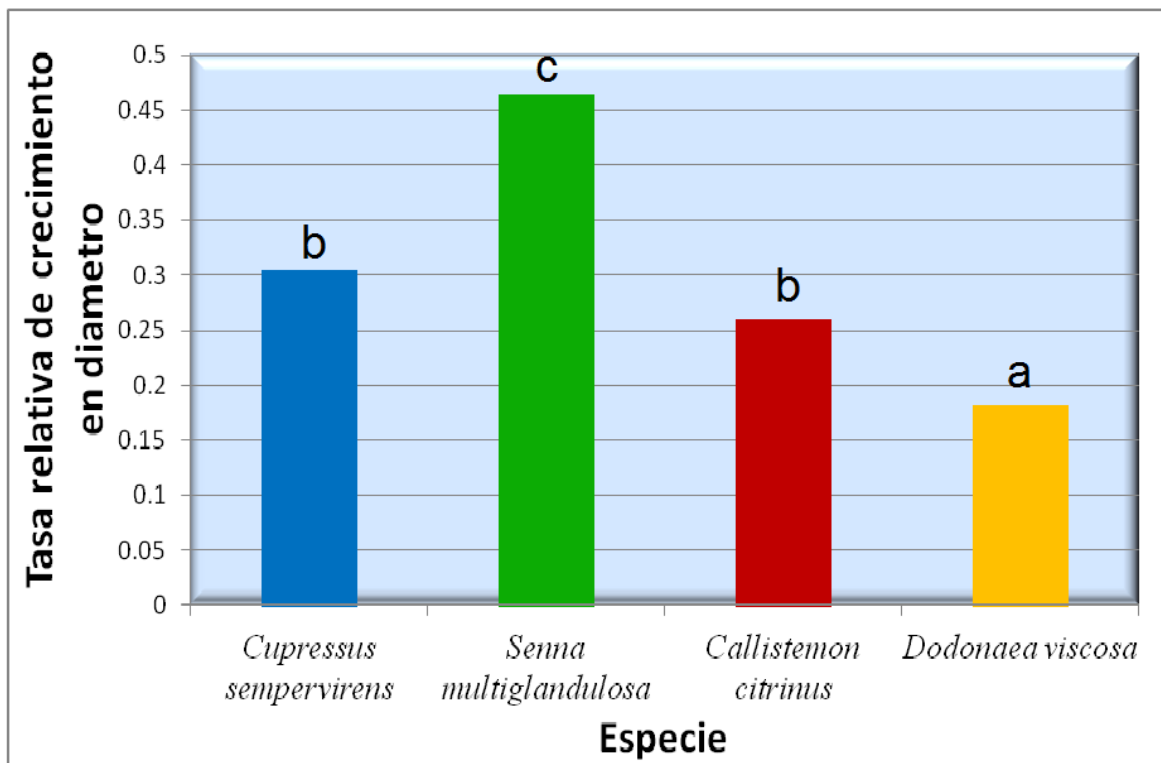


Figura 25. Tasa relativa de crecimiento en diámetro promedio de las especies *Callistemon citrinus*, *Cupressus sempervirens*, *Dodonaea viscosa* y *Senna multiglandulosa*. Las letras minúsculas distintas, indican diferencias estadísticamente significativas con prueba de Tukey DSH ($P < 0.05$) en la tasa relativa de crecimiento.

En la figura 26, se señala la tasa relativa de crecimiento en cobertura de copa promedio por especie, donde se observa que el valor más alto se presenta en *Senna multiglandulosa* y *Dodonaea viscosa*, en contraste con el valor más bajo se presentan en *Callistemon citrinus*, mientras en *Cupressus sempervirens* el resultado es intermedio. Por lo que se tienen diferencias significativas en la media de la tasa relativa de crecimiento alcanzado en cada especie (Anexo 3).

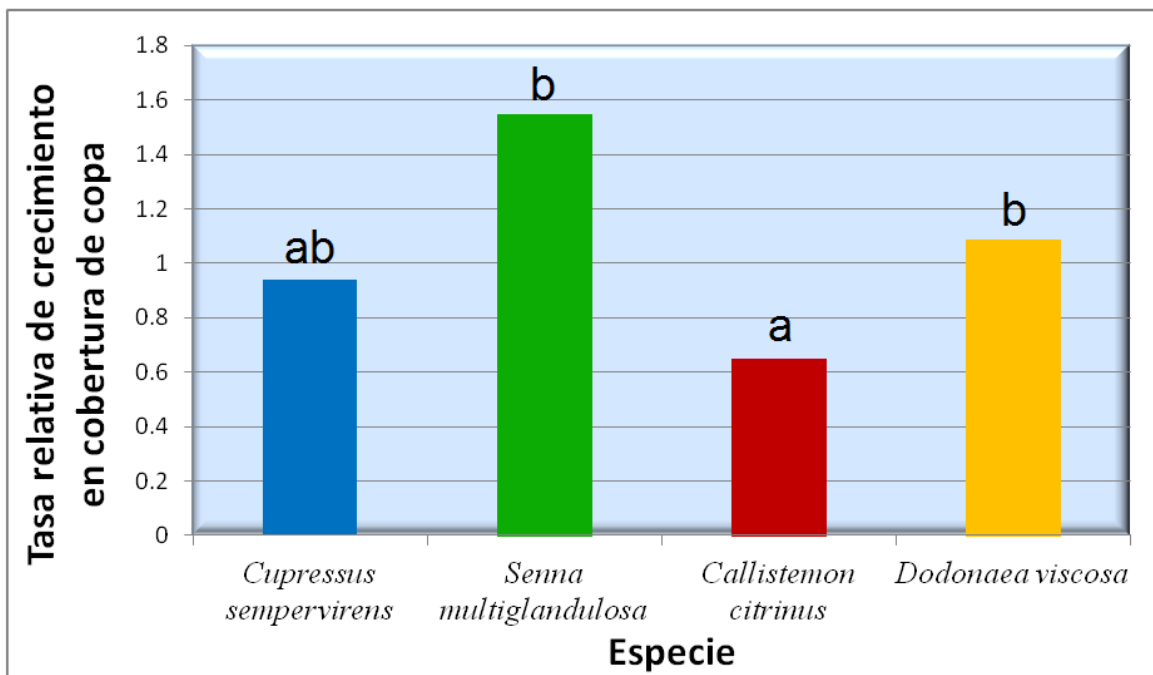


Figura 26. Tasa relativa de crecimiento en cobertura de copa promedio de las especies *Callistemon citrinus*, *Cupressus sempervirens*, *Dodonaea viscosa* y *Senna multiglandulosa*. Las letras minúsculas distintas, indican diferencias estadísticamente significativas con prueba de Tukey DSH ($P < 0.05$) en la tasa relativa de crecimiento.

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis químicos y físicos del suelo

El suelo de la parcela experimental tiene la presencia de capas de distinto origen y por lo tanto una diversidad muy amplia en sus componentes, ya que proviene de residuos de la industria de la construcción, arenas, gravas y suelo de diversos orígenes dispuestos al azar y que forman parte de la composición del suelo. Una alta heterogeneidad tanto horizontal como verticalmente, además de los problemas de compactación, deficiencia de nutrimentos y oxígeno, exceso de contaminación, poca profundidad, temperatura elevada y deficiencia de humedad se presentan en el área de estudio.

Según Millar *et al* (1981), la compactación ocasiona elevada impedancia mecánica sobre el crecimiento radicular y limitaciones en las relaciones planta-suelo por lo que inhibe el desarrollo radicular de la vegetación y afecta la cantidad de oxígeno para la respiración de las raíces. Con los efectos de la compactación del suelo se tiene una reducción del crecimiento y una distorsión de la arquitectura de planta completa. También ocasiona desbalance y deficiencia nutrimental en el complejo suelo, afectando la baja disponibilidad para los nutrimentos (Alameda, 2010). La profundidad del suelo es un factor limitante para el desarrollo de las raíces y de disponibilidad de agua y nutrimentos para las plantas (Moreno, 2006).

El aumento de la temperatura del suelo, por la descomposición los residuos, pueden reducir el nivel de humedad existente, lo que ocasiona un efecto perjudicial para el crecimiento sano de la cobertura vegetal. Si la temperatura se eleva se experimentan algunas alteraciones de las raíces y el crecimiento se reducirá (EPA, 1999). También se menciona que las altas temperaturas también disminuyen la capacidad del suelo para retener el agua, por lo que afecta a las plantas ya que es la principal reserva de agua. Además que la disminución de la humedad del suelo también tiende a bajar el flujo de los elementos esenciales de la planta de suelos aún deficientes en nutrimentos.

La deficiencia de oxígeno en el suelo puede afectar negativamente a las raíces de las plantas y sus asociaciones simbióticas de hongos que ayudan en la asimilación de nutrimentos, lo que ocasiona un crecimiento atrofiado con el tiempo o muerte de las plantas (Alameda, 2010).

Un factor muy importante que existe en el sitio y que influye de manera directa sobre el suelo es la deficiencia de humedad, lo cual no permite que exista la movilidad apropiada para la interacción entre componentes, y por lo tanto afecta la disponibilidad de nutrimentos en el suelo, el funcionamiento y la supervivencia de las plantas, esta condición prevalece en los primeros 30 cm y se acentúa de noviembre a mayo.

El resultado de la contaminación que emana de los residuos, provoca la contaminación del suelo, por lo que aparecen concentraciones muy elevadas de algunos elementos o presencia de sustancias indeseadas como los elementos traza (metales pesados y algunos metaloides) o fitotóxicos, que dan lugar a problemas de toxicidad en las plantas (Moreno, 2006). Por lo que según Pastor y Hernández (2002), en suelos con estas condiciones hacen aún más difícil el establecimiento y crecimiento de la cubierta vegetal.

Para la determinación de cada uno de los parámetros, se utilizaron las técnicas estandarizadas. El color de la matriz del suelo de cada muestra se registro en condiciones, seco y húmedo, usando las notaciones para matiz, valor y croma como se indica en las cartas de colores de suelo Munsell (Munsell, 1992). En la zona no hay un color de suelo o matriz dominante o mas bien es moteado por que se dan dos o más colores, por lo que indica diferencias en la velocidad de circulación del agua y del aire y con ella diferencias en las reacciones que se realizan entre un punto y otro del suelo.

El resultado para la prueba de color en seco, el color oscuro puede ser resultado de la descomposición de materia orgánica de origen exclusivamente vegetal (Julca *et al.*, 2006), el color amarillento se debe a la presencia de óxidos de hierro y el color grisáceo puede ser deficitario en oxígeno o bien poseer un exceso de sales alcalinas como el carbonato de calcio. La prueba de color en húmedo, el color negro se debe a la presencia de materia orgánica y con óxidos de manganeso (FAO e IFA, 2002).

Por lo que la presencia de materia orgánica en el suelo favorece el desarrollo de la cubierta vegetal y estimula el crecimiento de las plantas en un sistema equilibrado, Los óxidos de hierro son muy eficaces en la retención de aniones como fosfato, molibdeno y silicatos, y elementos traza como Cu, Pb, V, Zn, Co, Cr y Ni (Schwertmann y Taylor, 1989), algunos de los cuales son esenciales para las plantas. Los óxidos de manganeso en el suelo son capaces de sustituir a elementos esenciales para las plantas como son el caso de Ca y Mg (Kabata-Pendias, 2000).

Con base en los resultados de textura (cuadro 9) y con lo señalado por Gaucher (1971), el suelo del sitio es poco estable ya que con menos del 12% de arcilla tiende a la inestabilidad, por lo que el suelo estudiado está muy cercano a este porcentaje. No obstante, debido a la presencia de materia orgánica en el suelo estudiado, esta juega un papel importante, por que es capaz de adsorber más nutrimentos que la cantidad comparable de arcilla, con esto se favorece que las raíces puedan asimilar los nutrimentos, y por lo tanto aumente la capacidad de crecimiento de las raíces. Por otra parte, forma agregados que tienden a fortalecer y estabilizar la estructura del suelo, uniéndose las arcillas y formando el complejo de cambio, mejorando la penetración del agua y su retención y favoreciendo el intercambio gaseoso (Julca *et al.*, 2006), de esta forma estas propiedades ayudan a la nutrición de las plantas de forma decisiva. También se debe considerar que se tiene la presencia los óxidos de hierro, como ya se menciono en el color de suelo, por lo que según Schewertmann y Taylor (1989), tiene poder cementante que les permite influir en la estructura de los suelo y de igual manera para los carbonatos en el suelo asegura una buena estructura.

Al tener un suelo arenoso se carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente al subsuelo (Pineda, 2004). Sin embargo, como ya se mencionó debido a la existencia de materia orgánica la cual proporcionan sitios para la adsorción de metales pudiendo ser la principal fuente de la capacidad de intercambio catiónico en las capas superficiales del suelo.

La presencia de carbonatos se debe a la alta heterogeneidad de los residuos depositados (residuos de la industria de la construcción), lo que favorece el proceso de mineralización de la materia orgánica y la liberación de algunos nutrimentos esenciales para el desarrollo de las plantas como el nitrógeno y azufre. Sin embargo, también afecta la disponibilidad de otros elementos minerales esenciales. Se debe tener atención en los altos contenidos de carbonatos, ya que altos contenidos de los mismos pueden inducir deficiencias de fósforo, zinc, hierro y/o manganeso en las plantas (NOM-021-SEMARNAT-2000). La presencia de carbonatos pueden tener un papel importante en la retención o solubilidad de los metales en el suelo, al proporcionar sitios superficiales para las interacciones con los metales pesados, adsorción o reacciones de precipitación y de manera indirecta por el efecto que los cambios de pH tiene en otros constituyentes del suelo (Peris, 2006).

Los valores para pH son debido a la presencia de materiales carbonatados, que le confieren un carácter básico a los suelos, por lo que se considera viable para el establecimiento de las plantas en el lugar de estudio. Las condiciones alcalinas del suelo causan varios problemas nutricionales a las plantas, según, Rowell (1994), habla acerca de la dificultad de las plantas para obtener boro, manganeso y hierro solubles, aun cuando estos elementos se encuentren disponibles en el suelo, además de que pueden ocurrir deficiencias de cobre, zinc y también de fósforo a causa de su baja solubilidad, por lo que se esperaba que los individuos introducidos sufrieran deficiencia de estos nutrimentos y por lo tanto limitaran su crecimiento. Al tener un pH básico generalmente, los metales quedan retenidos en el suelo por lo tanto, menor su disponibilidad para las plantas (Ross, 1994).

En cuanto a la salinidad del suelo se tienen muy bajas cantidades de salinidad, debido a que el suelo posee un gran porcentaje de arena, el suelo es incapaz de almacenar agua suficiente y facilita la infiltración; son evidentes los consecuentes procesos de desalinización y lixiviación. Además, los valores de conductividad eléctrica obtenidos no favorece la complejación de los metales pesados, dado el escaso contenido salino y por tanto de aniones complejantes; limitando de esta forma la movilidad de los metales (Seoáñez, 1999). La baja salinidad observada en el área de estudio no representa un obstáculo para el normal desarrollo de las especies vegetales.

El contenido de materia orgánica se sumo a generar la heterogeneidad del suelo. Es decir existe una cantidad regular a alta cantidad de materia orgánica en el suelo, lo que favorece ofrecer los elementos esenciales para las plantas, tales como fósforo, magnesio, calcio, azufre y micronutrientes (Julca *et al.*, 2006), además la contribución de la materia orgánica a la capacidad de intercambio catiónico es significativa (Kabata- Pendias, 2000). Sin embargo, la materia orgánica es degradada muy lentamente, debido a la presencia de carbonatos que dificultan la descomposición de la materia organiza humificada (mineralización secundaria), lo cual provoca la poca asimilación de nutrimentos por parte de la planta. Philip (1982), demostró que un rasgo distintivo que caracteriza a la vegetación en suelos deficientes en nutrimentos es la elevada frecuencia de especies con una tasa de crecimiento particularmente lenta.

La materia orgánica juega un importante papel en la retención de metales pesados y en su inmovilización, también pueden ser muy importantes en la adsorción del Cu, Pb o Mn. Además, el alto contenido de materia orgánica de las muestras favorece la formación de complejos poco móviles y la formación de complejos metálicos basados en la capacidad de quelación de los componentes orgánico, disminuyendo la captación de los metales por las raíces de las plantas. La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente algunos metales que pueden llegar a no ser disponibles por las plantas, como ejemplo el Cu. La fortaleza de esta unión puede ocasionar carencias de ciertos elementos necesarios para el metabolismo vegetal en las plantas (Adriano, 2001).

Los valores obtenidos para la capacidad de intercambio catiónico (CIC) nos indica los cambios en los valores de porcentaje de arcilla presentes en el suelo. No obstante, se debe tomar en cuenta que la materia orgánica tiene una participación destacada en dicho proceso, cuantificado a través de su participación relativa en el proceso de adsorción. Por lo que nos indica que se tiene una considerable reserva nutrimental en el suelo y un buen intercambio de nutrimentos entre el suelo y la planta. Sin embargo, no todos los elementos se encuentran en forma asimilable, así como que algunos elementos pueden ser contaminantes (metales pesados) y se encuentren también disponibles.

Las características del suelo del sitio son muy diversas por lo que se debe elaborar un análisis considerable para que se tenga un resultado confiable. El conjunto de datos es el que se debe tomar en cuenta para conocer que especies vegetales que puedan ser tolerantes a estas condiciones.

Es importante mencionar que debido a lo largo de los más de 20 años de evolución del suelo del área de estudio existe abundante vegetación rasante y herbácea, que asociada a microorganismos, insectos y roedores, así como los individuos de otras especies plantados por el mismo proyecto anteriormente han creado condiciones más favorables en el suelo del sitio para el establecimiento de nueva vegetación. Estos resultados son coincidentes con los hallados por Julca *et al* (2006), sobre las influencias de las plantas y su actividad biológica asociada en la formación de horizontes culturales. También debido a que el suelo se encuentra en la fase de estabilización, según en Lafranco *et al* (1996), se tiene un soporte edáfico que puede ser calificado como aceptable para algunas plantas.

Análisis de metales intercambiables en el suelo

Para la fracción intercambiable se han extraído los metales unidos a especies químicas inestables bajo condiciones ligeramente ácidas (acetato de amonio). Se incluyen metales débilmente adsorbidos en partículas sólidas por fuerzas electrostáticas y que pueden ser liberados por un proceso de intercambio iónico (Filgueiras *et al.*, 2002).

En México, existen escasos estudios sobre valores de concentración de metales pesados (totales e intercambiables), en suelos de los sitios de disposición final. Por esta razón los resultados de este trabajo se comparan con suelos contaminados con metales pesados, como los suelos de uso agrícola irrigados con aguas residuales y biosólidos; y en chinampas de la ciudad de México. Además los estudios con los que se van a comparar, presentan el mismo método de extracción de los metales intercambiables de este trabajo.

Al intercambiable. Se puede considerar que las concentraciones de Al encontradas en el suelo son normales. Por lo que cabe señalar que los resultados obtenidos coincidieron con el pH alcalino y la presencia de materia orgánica en el suelo pues el Al es disponible en pH ácidos y dependerá del grado de acidez que este nutrimento pueda ser tóxico (Kabata-Pendias, 1992). Además en horizontes del suelo ricos en materia orgánica, la mayor parte de los iones de aluminio forman complejos no tóxicos con los compuestos húmicos. Por lo tanto no se pueden tener problemas de toxicidad, ya que la biodisponibilidad de este metal se ve limitada, por lo que no es un factor limitante del crecimiento de las plantas.

Cadmio intercambiable. El cadmio fue el elemento con un comportamiento más homogéneo. Al comparar los valores se obtuvo que son superiores a los reportados por González *et al* (2009), donde no se detectó este metal, en biosólidos que son utilizados para uso agrícolas. No obstante, se tienen valores semejantes de (0.22 a 0.66 $\mu\text{g g}^{-1}$) publicados por Ramos *et al* (2001), en chinampas de la ciudad de México y por Méndez *et al* (2000), con valores que oscilan entre 0.21 a 0.36 $\mu\text{g g}^{-1}$ con un valor promedio de 0.30 $\mu\text{g g}^{-1}$ en suelos del valle de Atlixco, en el estado de Puebla, que son regados con las aguas del río Atoyac, contaminadas con aguas residuales e industriales.

El rango habitual de Cd en la fracción de metal intercambiable o biodisponible respecto a su contenido total en suelos no contaminados debe ser inferior al 10 por ciento de $1 \mu\text{g g}^{-1}$ (Kabata-Pendias, 1992), por lo que el porcentaje de concentración de los resultados obtenidos para este metal es mayor y por lo tanto se encuentra dentro de un suelo considerado tóxico como menciona Alloway (1995), donde la concentración en el suelo considerado tóxico (total) es de $2-8 \mu\text{g g}^{-1}$. Sin embargo, se puede tener una mayor concentración de Cd ya que según (Gray *et al.*, 1999 citado en Peris, 2006), la concentración de Cd extraíble asociada a la fracción intercambiable es la minoritaria, siendo la fracción orgánica y la fracción residual las mayoritarias.

De acuerdo con los resultados obtenidos, estos correspondieron con el pH alcalino, la presencia de materia orgánica, óxidos de hierro y carbonatos, según lo mencionado por Kitagishi y Yamane (1981) quienes señalan que la materia orgánica aumenta la capacidad del cambio del suelo, y por lo tanto aumenta la adsorción de Cd. Los óxidos de hierro también adsorben Cd lo que condiciona su disponibilidad. El Cd es más móvil en suelos alcalinos debido a la formación de complejos o quelatos de metal. Además los carbonatos intervienen en la acumulación de metales, ya que esta correlación puede ser debida a la gran afinidad del Cd por los carbonatos, debido a su adsorción al CaCO_3 o a la formación de precipitados de CdCO_3 y además la precipitación de CdCO_3 predomina cuando hay elevadas concentraciones de Cd (Peris, 2006), por lo que en estas condiciones se disminuye la absorción por las plantas.

Los suelos contaminados con Cd de acuerdo con Sposito (1989), constituye un llamado de alerta, ya que es uno de los metales pesados con mayor grado de solubilidad, que podría asimilarse por las plantas. Además, el Cd de origen antrópico es más móvil que el natural (Kabata-Pendias, 1992), por lo tanto, el mayor contenido de Cd extraíble se encuentra allí donde ha habido mayores aportes antrópicos. Y que en suelos incubados con Cd, Barrow (1998) encontró que éste se mantiene en solución a través del tiempo, lo que conserva su efecto tóxico.

Por lo tanto se debe tener atención en este metal ya que según Kabata-Pendias (1992), esto significa que cuando las plantas crecen en suelos contaminados, este elemento es probable que se acumule en las raíces y afecte a los rizobios que participan en el proceso de fijación simbiótica de nitrógeno.

Cobre intercambiable. Al comparar los valores se encontró que son muy inferiores a los presentados $4.50 \pm 0.89 \mu\text{g g}^{-1}$ en Gonzales *et al* (2009), y a los presentados por Cajuste *et al* (1991), con valores promedio (24 y $25 \mu\text{g g}^{-1}$) detectados en suelos de Tlahuelilpan y Tlaminulpa, respectivamente en el valle del Mezquital regados con agua residual del Gran Canal de Desagüe de la ciudad de México, sin embargo, entran dentro del rango de los presentados en Ramos *et al* (2001), con valores de Cu 0.57 a $2.02 \mu\text{g g}^{-1}$.

Los valores de concentración en el suelo son muy bajos, por lo que concordaron a las condiciones del suelo con un pH alcalino, donde se ocasiona la retención de estos elementos, fijándolos en formas no disponibles para las plantas. Además que el cobre en el suelo esta principalmente adsorbido a la materia orgánica y a los óxidos de hierro y por lo tanto reduce la disponibilidad del Cu. Hay que tomar en cuenta que al tener un suelo arenoso se presentan deficiencias de Cu. Por lo que con este elemento se tienen deficiencia afectando el crecimiento y desarrollo de las plantas desde jóvenes.

Cromo intercambiable. No se detecto este metal en forma intercambiable. Los valores son similares a los expuestos en Gonzáles *et al* (2009), y Méndez *et al* (2000), donde tampoco se detecto el metal. Sin embargo, los valores son inferiores a los presentados por Ramos *et al* (2001), (0.00 a $1.81 \mu\text{g g}^{-1}$). Esto no significa que este elemento se encuentre ausente en el suelo, sino que probablemente esté complejado o adsorbido a los coloides o forma compuestos insolubles por efecto del pH alcalino y los carbonatos. Además debido a la presencia de materia orgánica, permite retener el cromo, también se reduce con facilidad al cromo (VI) en cromo (III), reduciendo los problemas de intoxicación, pero no de contaminación. Sin embargo, la nula concentración de cromo no afecta el normal desarrollo de la plantas, ya que se ha demostrado que en concentraciones bajas de este elemento se ha observado un estímulo en el crecimiento de las plantas.

Fe intercambiable. Al comparar los valores se obtuvo que están muy por debajo a las cantidades detectadas por Mendoza (1981) y Cajuste *et al* (1991), ya que los valores promedio de este fueron de 25.93 y 10.70 $\mu\text{g g}^{-1}$ detectados en suelos de Tlahuelilpan y Tlaminulpa, respectivamente.

Las extremadamente bajas y nulas concentraciones de Fe intercambiable encontradas en el suelo de la parcela experimental, pueden deberse a las condiciones de alcalinidad, donde Lindsay (1991), menciona que la solubilidad de los óxidos e hidróxidos de Fe (III) presentes en el medio está muy relacionada con el pH y que la región de mínima solubilidad del hierro corresponde al rango de pH entre 7.5 y 8.5, a estos pH la concentración de Fe precipitara en formas insolubles y por lo tanto es insuficiente para el óptimo crecimiento de las plantas y se dificulta la nutrición férrica del vegetal.

Otro factor que afecta la baja concentración de Fe encontrado puede deberse al dominante porcentaje de arena, por lo que existe baja retención de este elemento en el suelo. A pesar de su baja concentración, los óxidos de hierro tienen un alto poder pigmentante por lo que se corrobora el color de suelo estudiado.

Níquel intercambiable. Al comparar los valores obtenidos se encontró que son inferiores a los presentados ($9.32 \pm 1.67 \mu\text{g g}^{-1}$) por González *et al* (2009), sin embargo, entran dentro del rango de valores en los reportados en Ramos *et al* (2001), para este se tienen valores de 0.93 a 3.14 $\mu\text{g g}^{-1}$.

Las bajas concentraciones encontradas de Ni intercambiable en el suelo, pueden deberse nuevamente a las condiciones de alcalinidad que se tienen en el suelo de la parcela experimental, por lo que a medida que aumenta el pH se disminuye el contenido de níquel en la solución del suelo y al dominante porcentaje de arena, por lo que existe baja disponibilidad de este elemento y por lo tanto al ser un elemento esencial para las plantas a bajas concentraciones y en relación a las concentraciones obtenidas, este elemento permite el óptimo crecimiento de las plantas.

Plomo intercambiable. Al comparar los valores se encontró que son superiores a los reportados por González *et al* (2009), en que se tienen valores de $1.20 \pm 0.78 \mu\text{g g}^{-1}$. Sin embargo, los valores se encuentran dentro del intervalo de concentración reportados por Ramos *et al* (2001), en el cual se obtuvieron valores de 0.41 a $4.70 \mu\text{g g}^{-1}$ y son similares a los reportados por Méndez *et al* (2000), que fluctúan entre 1.70 y $7.36 \mu\text{g g}^{-1}$, con un valor promedio de $4.22 \mu\text{g g}^{-1}$.

Los valores de Pb extractable se relacionan negativamente a las condiciones de alcalinidad, ya que cuanto más alto el pH es más insoluble en el suelo y a la textura arenosa por lo que este metal esta menos disponible. Además la presencia de materia orgánica influye en la fijación del Pb ya que existe una gran afinidad con las sustancias húmicas Zimdahl (1977). Sin embargo las concentraciones obtenidas de Pb pueden deberse a que el plomo es muy poco móvil por lo que permanece en los horizontes superiores, lo que coincide con la baja profundidad de suelo (30 cm) del área de estudio. No obstante, al ser un elemento no esencial, la baja disponibilidad para las plantas hace que no suelen presentar problemas de toxicidad por Pb y que no pueden causar perjuicio al desarrollo de las plantas.

Zinc intercambiable. Al comparar las concentraciones, estos son inferiores a los expuestos por González *et al* (2009), se encontraron valores de $19.04 \pm 6.47 \mu\text{g g}^{-1}$, también superan a los presentados por Ramos *et al* (2001), que oscilaron de 0.50 a $5.59 \mu\text{g g}^{-1}$.

Por lo que cabe indicar que los resultados obtenidos coincidieron con el pH alcalino en el suelo, ya que las bajas concentraciones de Zn encontradas, puede deberse a diversos factores por lo cual uno de ellos, es que la disponibilidad del Zn se ve afectada cuando el pH del suelo se incrementa. Además según Farrah y Pickering (1977) indican que en los suelos alcalinos predominan los procesos de quimioadsorción por ligados orgánicos, en estas condiciones la biodisponibilidad de este elemento, está restringida. Por lo tanto, al ser un elemento esencial para las plantas, su concentración se encuentra normal permitiendo un adecuado desarrollo para las plantas.

Los metales pesados intercambiables cuantificados en los suelos de la parcela experimental tuvieron concentraciones bajas a excepción de Cd. Esto se puede deberse al pH alcalino, principal factor de biodisponibilidad de los elementos en el suelo de la parcela experimental, por lo que coincide con Cala (1998), que menciona que el pH del suelo es el principal factor que condiciona los procesos de adsorción en el suelo y la actividad de los metales. Además según Ross (1994), generalmente los metales quedan retenidos en el suelo a pH básicos, por lo tanto, menor es su disponibilidad para las plantas.

La ventaja de un pH superior a 7.0 y una cantidad considerable de materia orgánica, es conservar una baja actividad de los iones de los metales en la solución. Además, con un pH elevado no se tendrán problemas de toxicidad por un incremento en la disponibilidad de los metales, ya que dichos iones son casi totalmente adsorbidos, fijados o precipitados. Los cambios en el pH afectan la formación de diferentes especies químicas, como complejos de hidróxidos y carbonatos (Petrovic *et al.*, 1999).

Supervivencia y crecimiento

Cupressus sempervirens: Esta especie presentó una supervivencia de 100 por ciento y un estado general bueno durante las 12 mediciones a lo largo de 1 año, mantuvo un constante crecimiento óptimo basándonos en la cobertura de copa, ya que al ser una especie perenne siempre conservo el follaje característico con una adecuada apariencia y coloración. Sin embargo, el crecimiento de las variables, altura y diámetro fue variado debido a la temporada de lluvias y de secas. Cabe señalar que se confirmó lo que menciona su tolerancia al calor y la sequía, además de soportar un suelo alcalino (Martínez, 2008), por lo tanto, permite suponer que demuestra su rusticidad general y una buena adaptación a las condiciones adversas del área de estudio (figura 20-23).

Senna multiglandulosa: Esta especie logró una supervivencia del 100 por ciento y presentó un estado general excelente con un color siempre verde durante las 12 mediciones a lo largo de 1 año, demostrando su baja exigencia de mantenimiento para su supervivencia (riego); su crecimiento fue distinto en las variables altura, diámetro y cobertura de copa, esto se debió a que respondió a la cantidad de agua disponible que corresponde a la temporada de lluvias por lo que fue donde se tiene el mayor crecimiento en contraste con la temporada de secas donde se tiene un menor crecimiento. Además en la cobertura de copa se tuvo una disminución, debido a que esta especie es caducifolia, por lo tanto tuvo pérdida de follaje. Cabe mencionar que esta especie respondió de manera adecuada a las condiciones desfavorables del sitio, corroborando con lo mencionado en la tolerancia a las condiciones de poca humedad siendo capaz de resistir altas temperaturas, además de adaptarse a una amplia gama de suelos, demostrando su rusticidad general (Martínez, 2008) (figura 20-23).

Dodonaea viscosa: Consiguió una supervivencia de 94 por ciento y manifestó un estado general excelente en las hojas con un color siempre verde durante las doce mediciones a largo de un año, al igual *Senna multiglandulosa* evidenció su baja exigencia de mantenimiento para su supervivencia (riego); El crecimiento fue distinto para las tres variables de altura, diámetro y cobertura de copa, reaccionando al ser mayor en la temporada de lluvias. Se comprobó su resistencia a la sequía, adaptación al clima y soportando cualquier tipo de suelos que se menciona en su biología. Cabe mencionar la importancia que tiene este arbusto ya que es una de las plantas más comunes sobre terrenos degradados (figura 20-23).

Callistemon citrinus: Obtuvo una supervivencia de 88 por ciento y expresó un estado general bueno con un color verde seco en sus hojas durante las 12 mediciones en un año; mostró un crecimiento distinto en las tres variables altura, diámetro y cobertura de copa, Al igual que las especies anteriores tuvo un incremento durante la época de lluvias esto se presentó solamente en las variables de altura y diámetro. Sin embargo, en cobertura de copa a partir de quinto mes después de la plantación se observó un incremento. De forma general se afirmó lo que menciona su biología, se adapta a cualquier tipo de clima, prefiriendo los lugares secos y es rústico en cuanto a suelos, además la baja exigencia de mantenimiento para su supervivencia (riego) (Chanes, 1979, figura 20-23).

El hecho de que *Dodonaea viscosa* y *Callistemon citrinus* no alcanzaran una supervivencia del 100 por ciento, podría atribuirse a la heterogeneidad del suelo y no necesariamente a una menor resistencia a condiciones desfavorables propias del área de estudio.

Liquidambar styraciflua: Alcanzó una mortalidad del 100%, expresó un estado general bueno en los primeros dos meses, después entre el tercer y séptimo mes, el estado general era con estrés y finalmente en el octavo mes el estado general era seco para todos los individuos; en el crecimiento se observó un nulo incremento en las variables de altura, diámetro y cobertura de copa, durante el establecimiento, por lo tanto esta especie no se consideró en la tasa relativa de crecimiento.

La especie no pudo establecerse ya que solo se baso en que era muy tolerante a un amplio rango de suelos, sin embargo, es intolerante a suelos alcalinos y es el tipo de suelo que se tienen en su mayoría en la parcela experimental. Otro factor limitante en el establecimiento fue el clima ya que esta especie se desarrolla en regiones climáticas subhúmedas a húmedas, con 1,000 a 1,500 mm de lluvia, por lo que en el área de estudio se tiene un clima templado, subhúmedo con lluvias en verano, siendo el más seco de los templados subhúmedos con precipitaciones de 600 a 700 mm (MDI, 2005). Además esta especie no logro soportar la deficiencia de humedad en el sitio, ya que esta especie requiere de suelos húmedos y frescos. También que es muy sensible a la falta de agua durante el establecimiento, ya que continuamente se tenía un desprendimiento de hojas de las plantas.

Una causa más que restringió el establecimiento fue que se observó una decoloración de las hojas de las plantas hacia tonos amarillentos y a medida que transcurrió el tiempo, las hojas presentaron necrosis, para finalmente secarse completamente, lo que se podría atribuirse a un desbalance nutrimental, lo que corrobora a que requiere suelos ricos en nutrientes. Otro factor puede deberse a que en el área de estudio hay una abundancia de malas hierbas y de que esta especie no compite bien con malas hierbas lo que condiciona el establecimiento (Vázquez *et al.*, 1999; figura 20).

Tasa relativa de crecimiento

Al comparar la tasa relativa de crecimiento en altura, obtenida en cada una de las especies se realizó un análisis de varianza, determinándose que a un nivel de significación del 5 por ciento podemos afirmar que la tasa relativa de crecimiento promedio en la altura de los individuos es diferente, información que corrobora lo que se ha mencionado anteriormente (Anexo 1).

Se puede observar en la figura 24 y en el anexo 1 en la parte de pruebas de múltiple rangos para la tasa relativa de crecimiento en altura por especie, cual tasa relativa de crecimiento es significativamente diferente de otra. Igualmente a un nivel de confianza del 95%, la tasa relativa de crecimiento promedio en altura, en la especie *Senna multiglandulosa* manifestó el valor más alto, en contraste con las especies *Callistemon citrinus*, *Cupressus sempervirens* y *Dodonaea viscosa* presentaron valores bajos e iguales.

Al comparar la tasa relativa de crecimiento en diámetro promedio, obtenido en cada una de las especies se realizó un análisis de varianza, obteniéndose que a un nivel de significación del 5 por ciento, la tasa relativa de crecimiento promedio en el diámetro de las plantas es diferente al menos una de las especies analizadas, información que confirma lo que se ha indicado previamente (Anexo 2).

Se puede observar en la figura 25 y en el anexo 2 en la parte de pruebas de múltiple rangos para la tasa relativa de crecimiento en diámetro por especie, cual tasa relativa de crecimiento es significativamente diferente de otra. Asimismo, a un nivel de confianza del 95%, la tasa relativa de crecimiento promedio en diámetro en la especie, *Senna multiglandulosa* presenta el valor más alto, mientras que el valor más bajo es obtenido en la especie *Dodonaea viscosa*. Ramirez y Rodríguez (2004), mencionan que el diámetro se relaciona con la resistencia de las plantas a factores ambientales difíciles y además, Birchler *et al* (1998), indican que tienen capacidad relativa para tolerar altas temperaturas en la superficie del suelo las especies que tienen un mayor crecimiento.

Según Parker (2000), menciona que se tiene menor crecimiento en altura y diámetro en situación de estrés hídrico y nutrimental. Se considera que *Senna multiglandulosa* obtuvo un mayor crecimiento tanto en diámetro y altura debido a que es una especie caducifolia, por lo que se concluye lo reportado en Valladares (2004), que señala que las plantas caducifolias suelen crecer más rápidamente que las perennifolias.

Al comparar la tasa relativa de crecimiento en cobertura de copa, obtenida en cada una de las especies se realizó un análisis de varianza, determinándose que a un nivel de significación del 5 por ciento podemos afirmar que la tasa relativa de crecimiento promedio en la cobertura de copa de los individuos es diferente (Anexo 3).

Se puede observar en la figura 26 y en el anexo 3 en la parte de pruebas de múltiple rangos para la tasa relativa de crecimiento en altura por especie, cual tasa relativa de crecimiento es significativamente diferente de otra. La cobertura de copa en general de las especies *Cupressus sempervirens*, *Senna multiglandulosa* y *Dodonaea viscosa* fue de normal desarrollo. Sin embargo, en la especie *Callistemon citrinus* fue poco densa por lo que según lo reportado en Rodríguez *et al* (2009), presenta estrés por humedad.

El comportamiento de una especie y otra, marco diferencias en el establecimiento y crecimiento. Sin embargo lograron adaptarse, por lo que se coincide a lo encontrado en Lanfranco *et al* (1999), que estando bajo un reconocido control genético, pueden modificarse significativamente a través del tiempo, debido a la persistencia de condiciones desfavorables asociadas a la textura, compactación, deficiencia de humedad y la presencia de capas obstructoras en el suelo así como alcalinidad; coincidiendo con las condiciones edáficas de la parcela experimental lo que constituyó en un medio que acentuó la característica de adecuación de *Cupressus sempervirens*, *Senna multiglandulosa*, *Callistemon citrinus* y *Dodonaea viscosa*.

En términos generales, se tiene un mayor crecimiento en la época de lluvias, entre los meses de mayo a octubre, porque la disponibilidad de agua es abundante, por lo contrario con la estación seca entre los mes noviembre a mayo se tiene el menor crecimiento por la escasa disponibilidad de agua. Graber (1999), indica que el volumen de agua necesaria para el control adecuado de humedad de las plantas a establecer en condiciones secas o húmedas es importante y se debe de considerar para escoger especies vegetales que tengan resistencia a sequía, al momento de su introducción y establecimiento.

Para el nivel de análisis del presente trabajo, puede tomarse a las condiciones ambientales de la parcela experimental, como poco favorables, además que es posible que se conjuguen algunos factores antes expuestos por lo que dificulta y limita el desarrollo y crecimiento de las especies, esta generalización, coincide con Lanfranco *et al* (1999), quienes agregaron que la respuesta de las plantas al estresamiento tiene diferentes manifestaciones y son varios los factores que inciden para que ello ocurra y es sumamente difícil su identificación cualitativa y cuantitativamente a los responsables de los síntomas. Sin embargo, no fueron un obstáculo infranqueable para el establecimiento y crecimiento de las plantas introducidas en la parcela experimental a excepción de *Liquidambar styraciflua*.

VIII. CONCLUSIONES

- La gran variabilidad que presentan los diferentes parámetros edáficos intervienen en el establecimiento y crecimiento de las plantas.
- El factor más importante que limita el establecimiento de las especies en el lugar de estudio, es el agua.
- El Al, Cu, Cr, Fe, Ni, Pb y Zn son poco móviles y disponibles debido al pH alcalino, y por lo tanto se encuentran precipitados.
- El Cd se encuentra móvil y disponible debido al pH alcalino, y puede impedir el establecimiento y crecimiento normal de las especies vegetales.
- Las especies seleccionadas presentaron buena tolerancia a las condiciones del sitio, durante el primer año de establecimiento, excepto *Liquidambar styraciflua*.
- La tasa relativa de crecimiento en *Senna multiglandulosa* representa el mayor crecimiento, seguida de *Cupressus sempervirens*, *Callistemon citrinus* y por último *Dodonaea viscosa*.

IX. REFERENCIAS

1. Adriano, D. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. 2^{da} Ed. Springer-Verlag Berlin.
2. Alameda, M. 2010. Implicaciones ecofisiológicas de la compactación del suelo sobre el desarrollo vegetal. Tesis de Doctor en ecología. Departamento de botánica, ecología y fisiología vegetal. Universidad de Córdoba. España. Córdoba.
3. Alloway, B. J. Thornton, I. Smart, G. A. Sherlock, J y Quinn, M. J. 1988. Metal availability. *The Science of total environment*. 75 (2): 41-69.
4. Alloway, B. J. 1995. Heavy Metals in Soils. 2^{da} Ed. Blackie Academic Professional. London.
5. Barrow, N. J. 1998. Effects of time and temperature on the sorption of cadmium, zinc, cobalt and nickel by an soil. *Australian Journal of Soil Research*. 4: 941-950.
6. Birchler, T, Rose, R. Royo, A y Pardos, M. 1998. La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *Investigación agrícola: sistema de recursos forestales*. 7 (1-2): 13.
7. Bloomfield, C. 1981. The traslocation of metals in soils in the chemistry of soils. Processes, Ed. John Wiley & sons. New York.
8. Cajuste, L. R. Carrillo, G. Cota, G. y Laird, R.J. 1991. The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital. *Water, Air, Soil Pollution*. 5: 763-771.
9. Cala, R. V. 1998. Comportamiento de metales pesados en suelos. *Edafología. y Agrobiología* 48: 11-21.
10. Camargo, Y. y Vélez, A. 2009. Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. II Simposio Iberoamericano de ingeniería de residuos. Universidad del Norte.
11. Cary E. Alloway W. Olsen O. 1977. Control of chromium concentrations in food plants. *Agricultural Food Chemistry*. 25 (3): 1- 2.
12. Casierra, P y Aguilar, E. 2007. Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. *Revista colombiana de ciencias hortícolas*. 1 (2): 246-257.
13. Chanes, R. 1979. Deodendron árboles y arbustos de jardín en clima templado. Blume Editorial. España.
14. Chapman Q. H. 1979. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Editorial Trillas. México D.F.
15. Crow, P. 2005. The influence of soils and species on tree Root Depth. Forestry commission. Edinburgh. 8 pp. Disponible en: www.forestry.gov.uk. Consulta el 14-10-2010.
16. Deffis, C. A. 1994. La basura en la solución. Árbol Editorial S.A. de C.V. México.
17. DGSU. 2009. Manejo de residuos sólidos. Secretaria de obras y servicios. Disponible en www.obras.df.gob.mx. Consulta el 19-06-2010.
18. Duarte, Z, V. 2005. Rehabilitación de la cubierta vegetal arbórea (con el género *Acacia*) en un sitio de disposición final postclausura, Parque Recreativo Cuitlahuac. Tesis de Licenciatura en Biología. FES-Zaragoza (UNAM). México. D.F.
19. EPA. 1999. Landfill restoration and aftercare. Environmental protection agency. Wexford, Ireland. p 136. Disponible en: <http://www.epa.ie>. Consulta el 23-06-10.

20. Espinace, A. Olaeta, C. Prado M. Olivia, C. Szanto N. 2000. Metodología integrada para rehabilitar rellenos sanitarios. Universidad de Valparaíso de Chile. Disponible en <http://icc.ucv.cl/fondef/fondefd00i1101/>. Consulta el 15-08-2010.
21. FAO e IFA. 2002. Los fertilizantes y su uso. Roma. 4° Ed.
22. Farrah, H. y Pickering, W. F. 1977. The sorption of lead and cadmium species by clay minerals. *Austin Chemical*. 30: 1417-1422.
23. Fitter, A. H. y Hay, R. K. 1991. Environmental physiology of plants. Academic Press. Great Britain.
24. Filgueiras, A. Lavilla I. y Bendicho C. 2002. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid. *Environ Monit* 4: 823-857.
25. Galán, H. y Romero, B. 2008. Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía*. 10: 13.
26. Galván Villanueva M. 1995. (a) Caracterización de los desechos sólidos del extriradero de Santa Cruz Meyehualco y su impacto en el suelo. Tesis licenciatura en Biología. FES Zaragoza UNAM. México D.F.
27. Galván, A., L. López y M. García. 1995. (b) Caracterización del ex-tiradero de Santa Cruz Meyehualco y su efecto en la vegetación utilizada en la forestación. *Boletín de Investigación, Educación y sus Nexos (Bien)*. 2 (1): 17-19.
28. García, A. M. y Murguía, Ch. A. 2000. Evaluación del establecimiento de *Senna didymobotrya* para la recuperación de la cubierta vegetal para sitios de disposición final postclausura”. Tesis de Licenciatura en Biología. FES-Zaragoza (UNAM). México. D.F.
29. García, P. Meseguer, T. Jordán, S. 2009. La regeneración vegetal y paisajista en suelos degradados por vertidos de residuos. II Simposio Iberoamericano de ingeniería de residuos. Universidad del Norte. España.
30. García, N. A. y Pineiro, G. 2003. Programa de gestión y conservación del suelo. Segundo ciclo de Ciencias Ambientales. Universidad de Extremadura.
31. Gaucher, G. 1971. Tratado de edafología Agrícola, el suelo y sus características agronómicas. Editorial Omega, Barcelona.
32. Giuffré, L. Ratto, S. marbán, L. y Romaniuk, R. 2005. Riesgo por metales pesados en horticultura urbana. *Contaminación de suelos*. Argentina. 23 (1): 101-106.
33. Gómez, N. M. 2007. Seguimiento de las especies de *Acacia baileyana*, *saligna* y *Nerifolia* en un sitio de disposición final postclausura (Parque Recreativo cuitlahuac). servicio social. FES-Zaragoza (UNAM). México. D, F.
34. González, F. E. Tornero, C. M. Angeles, C. Y y Bonilla, F. N. 2009. Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. *Revista internacional de contaminación ambiental*. UNAM. 25 (1): 15-22.
35. Graber, C. T. 1999. Guide to vegetative covers for California landfills. Bryan A Stirrat, and Associates. University of California Press, Disponible en <http://www.calrecycle.ca.gov>. Citado el 23-06-2010.
36. Guevara, R. Rosales, J y Sanoja, E. 2005. Vegetación pionera sobre rocas, un potencial biológico para la revegetación de áreas degradadas por la minería de hierro. 30 (1): 644-651. Disponible en <http://www.scielo.org.ve/scielo>. Citado 18-06-2010.
37. Harris, R.W. 1992. Arboricultura. Pretice Hall, New Jersey, USA.
38. Illera, V. Walter, I y Cala, V. 2001. Niveles de metales pesados en *Thymus zygis* desarrollado en suelos enmendados con residuos orgánicos urbanos. *Revista internacional de contaminación ambiental*. UNAM. 17 (4): 179-186.

39. Imaña, J. E y Encinas, B. O 2008. Epidometria forestal. Universidad de Brasilia y Universidad de los Andes. 1^{ra} edición. Brasil y Venezuela.
40. IRENAT. 1994. Manual de procedimientos analíticos para análisis de suelos y plantas de laboratorio de fertilidad de suelos. IRENAT-Colegio de Postgraduados. Sociedad mexicana de la ciencia del suelo, A.C., ISP Programa de intercalibración de análisis de suelos y plantas.
41. Jaramillo, J. 2002. Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. OPS/CEPIS. Universidad de Antioquia. Colombia.
42. Julca, O. Meneses, F. Blas, S. Bello, A. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *IDESIA*. 24 (1): 49-61.
43. Kabata-Pendias, A. 1992. Trace elements in soils and plants. 2^{da} Ed. CRC Press, Inc. Boca Raton. Florida. USA.
44. Kabata-Pendias, A. 2000. Trace elements in soils and plants. 3^{ra} Ed. CRC Press, Inc. Boca Raton. Florida. USA.
45. Kabata-Pendias, A. y Pendias, H. 2001. Trace elements in soils and plants. 4^{ta} Ed. CRC Press, Inc. Boca Raton. Florida. USA.
46. Kiss, C. y Mendoza, F. 1998. Generación de materias contaminantes en rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales. Ingeniería y ciencias ambientales.
47. Kitagishi, K., Yamane, I. 1981. Heavy metal pollution in soils of Japan. Japan Science Society Press, Tokyo.
48. Lafranco, J. Marlats, R. Baridóne, E. 1996. Procesos de edafización de la cubierta del vertedero de residuos sólidos urbanos. Comportamientos y efectos de la plantación de *Eucalyptus camaldulensis*. Actas del 19 Congreso Nacional de la Asociación Ciencia del Suelo, La Pampa, Argentina.
49. Lafranco, J. Marlats, R. Baridóne, E. 1999. Vertedero de residuos sólidos urbanos: pedogenesis comparada entre sitios de una plantación de *eucalyptus camaldulensis* dehn y de vegetación herbácea naturalizada. *Forest Systems*. 8 (2): 293-304.
50. Lindsay, W. S. 1979. Use of E + pH to predict and interpret metal solubility relationships in soils. *Sci of Total Environment*. 28: 169-178.
51. LGEEPA. 2007. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988. Última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación 5 de julio de 2007. Disponible en <http://www.semarnat.gob.mx>. Consulta el 15-06-2010.
52. LGPGIR. 2007. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos. Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003. Última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación 19 de junio de 2007. Disponible en <http://www.semarnat.gob.mx> Consulta el 15-06-2010.
53. López, S. M. y Pérez, M. C. 2003. EL Género *Acacia*. Una alternativa para recuperar la cubierta vegetal arbórea, en el sitio postclausura. Parque Recreativo Cuitlahuac. Tesis de licenciatura en Biología. FES-Zaragoza (UNAM). México. D, F.
54. LRSDF. 2003. Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal. Publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 22 de abril de 2003.
55. Marín, A. M. 2006. Introducción de *Grevillea robusta* y *Cupressus lindley* en el parque Cuitlahuac anteriormente empleado como sitio de disposición final de residuos sólidos. Servicio Social. FES-Zaragoza (UNAM). México. D, F.

56. Martin, C.W. 2000. Heavy Metals Trends in Floodplain Sediments and Valley Fill. *Catena*. 39: 53-68.
57. Martínez, G. L. 2008. Árboles y áreas verdes urbanas de la Ciudad de México y su zona metropolitana. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Fundación Xochitla, A.C. Editor. México.
58. Mendes, R. Lema, J. Blazquez, R. Pan M. y Forjan, C. 1989. Characterization, digestibility and anaerobic treatment of leachates from old and young landfill. *Water pollution research and control*. 21 (4-5): 145-155.
59. Méndez, G. T. Rodríguez, D y Palacios, M. S. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. *Terra*. 18 (4): 277-288.
60. Mendoza, M. H. 1981. A viable solution for management of wastewater in the Metropolitan Area of the Valley of Mexico. *In: Municipal Wastewater in Agriculture. Academic Press, NY*.
61. Mendoza, R. J. 2006. Evaluación de la capacidad de establecimiento de *Tamarix gallica* y *Tecoma stans* a diferentes tallas, para la recuperación de la cubierta vegetal arbórea y arbustiva en un sitio de disposición final de residuos sólidos post-clausura. Servicio Social. FES-Zaragoza (UNAM). México. D, F.
62. Mendoza, C.M. 2007. Análisis de la normatividad mexicana para el manejo de residuos sólidos municipales, caso Bordo Poniente. Tesis de licenciatura en Biología. FES-Zaragoza (UNAM). México. D, F.
63. MDI. 2005. Monografía de la Delegación Iztapalapa. Gobierno de la Ciudad de México. Disponible en <http://www.iztapalapa.gob.mx/html>. Consulta: 26-01-2010.
64. Millar, C. E. Turk, L. M y Foth, H.D. 1981. Fundamentos de la ciencia del suelo. Editorial continental, S. A. de C.V. 5ª Impresión. México. D, F.
65. Ministerio del ambiente y calidad de vida de Francia. 1985. Les residus urbains, ed. lavoisier, Francia.
66. Moreno, J. E. 2006. La cobertura natural en la recuperación de vertederos clausurados. *Residuos: Revista técnica*. 90: 76-79.
67. Muñoz, I. Mendoza, C. López, G. Soler, A. Hernández, M. 2000. Edafología. Manual de métodos de análisis de suelo. FES-Iztacala. (UNAM).
68. Munsell. 1992. Soil colors charts. Macbeth División of Kolmorgen Corporation Baltimore. USA.
69. Norma Mexicana NMX-AA-61-1985, Protección al ambiente contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-determinación de la generación. Publicada en el Diario Oficial de la Federación en 1985.
70. Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-001-RNAT-2006, Que establece los requisitos y especificaciones técnicas que deberán cumplir las autoridades, empresas privadas y particulares que realicen poda, derribo, trasplante y restitución de árboles en el Distrito Federal. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de septiembre de 2006.
71. Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-006-RNAT-2004, Que establece los requisitos, criterios, lineamientos y especificaciones técnicas que deben cumplir las autoridades, personas físicas o morales que realicen actividades de fomento, mejoramiento y mantenimiento de áreas verdes públicas. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de noviembre de 2005.

72. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad, y clasificación de suelos. México. D, F.
73. Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de octubre de 2004.
74. Olaeta, C. Espinace, A. Szanto, N. Palma, G. 1997. Experiencias de reinscripción de vertederos mediante la implantación de una cubierta vegetal. Universidad de Valparaíso de Chile.
75. Parker, R. 2000. La Ciencia de las plantas 2. 1ª Edición. Editorial Paraninfo, Thompson Learnin. Madrid, España.
76. Pastor, J. y Hernández, A. J. 2002. Estudio de suelos de vertederos sellados y de sus especies vegetales espontáneas para la fitorrestauración de suelos degradados y contaminados del centro de España. Anales de Biología.
77. Peris, M. M. 2006. Estudio de mátales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellón. Tesis doctoral. Centro de Investigación sobre Desertificación. Universidad de Valencia. España.
78. Petrovic, M. Kastelan, M. y Horvart, J. 1999. Interactive sorption of metal ions and humic acids on to mineral. *Water, air and soil pollution*. 111 (1): 41-56.
79. Philip, G. 1982. Estrategias de adaptación de las plantas, y procesos que controlan la vegetación. Editorial Limusa. 1ª Ed. México. D, F.
80. Piñón, G. Sanfeliu, T. Meseguer, S. Jordán, M. 2009. La regeneración vegetal y paisajista en suelos degradados por vertidos de residuos. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Universidad del Norte. España.
81. Porta, C. López, A. R. Roquero C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-prensa. Madrid.
82. Pineda, H. R. 2004. Presencia de hongos micorrízicos arbusculares y contribución de *Glomus Intraradices* en la absorción y translocación de zinc y cobre en girasol (*Helianthus Annuus L.*) crecido en un suelo contaminado con Residuos de Mina. Tesis para Obtener el Grado de Doctor en Ciencias Universidad de Colima. Colima. Mexico.
83. Prieto, M. González, R. César, A. Román, G. Alma, D y Prieto, G. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10: 29-44.
84. Ramirez, C. y Rodríguez, T. 2004. Efecto de calidad de planta, exposición y micrositio en una plantación de *Quercus rugosa*. *Serie ciencias forestales y del ambiente*. 10 (1): 5-11.
85. Ramos R. 2000. Aplicación de sustancias húmicas comerciales como productos de acción bioestimulante: Efectos frente al estrés salino. Tesis de Doctor. Universidad de Alicante. España.
86. Ramos, B. R. Cajuste, L. J. Roman, F. D. y Calderon, G.N. 2001. Metales pesados, sales y sodio en suelos de chinampa en México. *Agrociencia*. 35: 385-395.
87. Ríos, G. R. 1985. Material didáctico del Laboratorio Integral de Biología IV: Prácticas del Módulo de Suelo, séptimo semestre. FES Zaragoza. México.
88. Rondón, A. y Vidal, R. 2005. Establecimiento de la cubierta vegetal en areas degradadas. (Principios y Métodos). *Revista forestal latina*. 38: 63-82.

89. Rodríguez, L. Meza, R. Vargas, H. Jiménez, P. 2009. Variación en la cobertura de suelo en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm, en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León. *Madera y Bosques*. 15: 45-54.
90. Ross, S. M. 1994. Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils. John Wiley & Sons, Chichester.
91. Rowell, D. L. 1994. Soil science; methods and applications. Longman, London, UK.
92. Sánchez, L. J. 2001. Las especies del género *Callistemon* cultivadas en España. España. 6 pp. Disponible en www.arrakis.es. Consulta el 2-04-2010.
93. Sancho, H. y Cervera B. 1999. Manual para determinar la factibilidad de reducción y rehúso de RSU. SEDESOL. México.
94. Schawertmann, U. y Taylor R. M. 1989. Iron oxide in mineral in soil environments. *Soil Science Society of America*. 1: 379-438.
95. SEDESOL, 2005. El Manejo de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial en México. Disponible en: www.ine.gob.mx Consulta: 18-01-2010.
96. SMA, 2010. Cómo y por qué separar la basura México. Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal. Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php>. Consulta: 8-01-2010.
97. SEGEM-GTZ. 2002. Manual para la rehabilitación, clausura y saneamiento de tiraderos a cielo abierto en el Estado de México. Secretaria de Ecología del Estado de México; Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit G. Mexico, Estado de México.
98. SEMARNAT-GTZ. 2004. Guía de cumplimiento de NOM-083-SEMARNAT-2003. Secretaria del Medio ambiente y Recursos Naturales; Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit G. México. D, F.
99. Seoáñez, M. 1999. Contaminación del suelo: Estudios, tratamiento y gestión. Ediciones Mundi-Prensa. España.
100. Sierra, A. M. 2005. Niveles de metales pesados y elementos asociados en suelos de la provincia de Almería. Parámetros que los afectan y riesgos de contaminación. Tesis de Doctor en Farmacia. Universidad de Granada. España.
101. Sposito, G. 1989. The chemistry of soils. Oxford University Press, in. New York.
102. Toneatti, M. y Rivera, N. R. 2006 Ensayos de tolerancia al aluminio de *Bromus stamineus* y *Bromus lithobius* recolectados en el sur de Chile. *Información tecnológica*. 17 (1): 9-17.
103. Vásquez, Y. C. Batis, A. Alcocer, M. Gual, M. y Sanchez, C. 1999. Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084 CONABIO Instituto de de Ecología, UNAM. México. D.F. [www.Conabio.gob. mx/arboles/introd.J084.htm](http://www.Conabio.gob.mx/arboles/introd.J084.htm)
104. Valladares, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid.
105. Villareal Q. J. 2000. Flora del bajío y de regiones adyacentes. Departamento de Botánica. Universidad Autónoma Agraria Antonio. 8: 17.
106. Villaseñor R. y Espinosa, G. 1998. Catálogo de malezas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo de Cultura Económica Editorial. México .D.F.
107. Zapata, C. A. y Galvan, V. M. 2004. Manual básico de absorción atómica para el manejo del equipo Spectraa 200. Marca Varian. FES-Zaragoza (UNAM). México D. F.
108. Zimdahl, R. L. y Skogerboe, R. K. 1977. Behaviour of lead in soil. *Environmental Science and Technology*. 11: 1202-1207.

X. ANEXOS

Anexo1. Análisis estadístico para la variable: altura

Resumen estadístico para la tasa relativa de crecimiento en altura

Esta tabla muestra diferentes estadísticos de la tasa relativa de crecimiento en altura para cada una de las 4 diferentes especies.

Especie	Recuento	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Mínimo	Máximo
<i>Callistemon citrinus</i>	16	0.069	0.021	30.6309%	0.031	0.1
<i>Cupressus sempervirens</i>	8	0.073	0.009	13.102%	0.063	0.088
<i>Dodonaea viscosa</i>	16	0.056	0.008	15.0466%	0.039	0.071
<i>Senna multiglandulosa</i>	8	0.180	0.042	23.7993%	0.117	0.235
Total	48	0.084	0.048	57.8641%	0.031	0.235

Tabla ANOVA para la tasa relativa de crecimiento en altura por especie

La tabla ANOVA descompone la varianza de la tasa relativa de crecimiento en altura en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 61.9545, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la tasa relativa de crecimiento en altura entre una especie y otra, con un nivel del 95.0% de confianza.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.090	3	0.030	61.95	0.0000
Intra grupos	0.021	44	0.0004		
Total (Corr.)	0.112	47			

Pruebas de múltiple rangos para la tasa relativa de crecimiento en altura por especie

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Especie	Casos	Media	Grupos Homogéneos
<i>Dodonaea viscosa</i>	16	0.056	X
<i>Callistemon citrinus</i>	16	0.069	X
<i>Cupressus sempervirens</i>	8	0.073	X
<i>Senna multiglandulosa</i>	8	0.180	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>Callistemon citrinus</i> - <i>Cupressus sempervirens</i>		0.003	0.025
<i>Callistemon citrinus</i> - <i>Dodonaea viscosa</i>		0.012	0.020
<i>Callistemon citrinus</i> - <i>Senna multiglandulosa</i>	*	-0.111	0.025
<i>Cupressus sempervirens</i> - <i>Dodonaea viscosa</i>		0.016	0.025
<i>Cupressus sempervirens</i> - <i>Senna multiglandulosa</i>	*	-0.107	0.029
<i>Dodonaea viscosa</i> - <i>Senna multiglandulosa</i>	*	-0.123	0.025

* indica una diferencia significativa.

Anexo 2. Análisis estadístico para la variable: diametro

Resumen estadístico para la tasa relativa de crecimiento en diametro

Esta tabla muestra diferentes estadísticos de la tasa relativa de crecimiento en diametro para cada una de las 4 diferentes especies.

Especie	Recuento	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Mínimo	Máximo
<i>Callistemon citrinus</i>	16	0.260	0.075	28.8367%	0.144	0.412
<i>Cupressus sempervirens</i>	8	0.304	0.047	15.4699%	0.23	0.376
<i>Dodonaea viscosa</i>	16	0.181	0.035	19.7764%	0.136	0.249
<i>Senna multiglandulosa</i>	8	0.464	0.080	17.2819%	0.356	0.629
Total	48	0.275	0.113	41.0331%	0.136	0.629

Tabla ANOVA para la tasa relativa de crecimiento en diametro por especie

La tabla ANOVA descompone la varianza de de la tasa relativa de crecimiento en diametro en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 38.843, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la tasa relativa de crecimiento en diametro entre una especie y otra, con un nivel del 95.0% de confianza.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.436	3	0.145	38.84	0.0000
Intra grupos	0.164	44	0.003		
Total (Corr.)	0.601	47			

Pruebas de múltiple rangos para la tasa relativa de crecimiento en diametro por especie

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 5 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Especie	Casos	Media	Grupos Homogéneos
<i>Dodonaea viscosa</i>	16	0.181	X
<i>Callistemon citrinus</i>	16	0.260	X
<i>Cupressus sempervirens</i>	8	0.304	X
<i>Senna multiglandulosa</i>	8	0.464	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>Callistemon citrinus</i> - <i>Cupressus sempervirens</i>		-0.043	0.070
<i>Callistemon citrinus</i> - <i>Dodonaea viscosa</i>	*	0.078	0.057
<i>Callistemon citrinus</i> - <i>Senna multiglandulosa</i>	*	-0.203	0.070
<i>Cupressus sempervirens</i> - <i>Dodonaea viscosa</i>	*	0.122	0.070
<i>Cupressus sempervirens</i> - <i>Senna multiglandulosa</i>	*	-0.160	0.081
<i>Dodonaea viscosa</i> - <i>Senna multiglandulosa</i>	*	-0.282	0.070

* indica una diferencia significativa.

Anexo 3. Análisis estadístico para la variable: cobertura de copa

Resumen estadístico para la tasa relativa de crecimiento en cobertura de copa

Esta tabla muestra diferentes estadísticos de la tasa relativa de crecimiento en cobertura de copa para cada una de las 4 diferentes especies.

Especie	Recuento	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Mínimo	Máximo
<i>Callistemon citrinus</i>	16	0.611	0.405	66.3713%	0.167	1.601
<i>Cupressus sempervirens</i>	8	0.939	0.275	29.2882%	0.444	1.304
<i>Dodonaea viscosa</i>	16	1.034	0.320	30.9703%	0.561	1.586
<i>Senna multiglandulosa</i>	8	1.415	0.461	32.5834%	0.729	2.084
Total	48	0.940	0.454	48.2883%	0.167	2.084

Tabla ANOVA para la tasa relativa de crecimiento en cobertura de copa por especie

La tabla ANOVA descompone la varianza de la tasa relativa de crecimiento en cobertura de copa en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 8.945, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la tasa relativa de crecimiento en cobertura de copa entre una especie y otra, con un nivel del 95.0% de confianza.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	3.675	3	1.225	8.945	0.0001
Intra grupos	6.027	44	0.136		
Total (Corr.)	9.703	47			

Pruebas de múltiple rangos para la tasa relativa de crecimiento en cobertura de copa por especie

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Especie	Casos	Media	Grupos Homogéneos
<i>Callistemon citrinus</i>	16	0.611	X
<i>Cupressus sempervirens</i>	8	0.939	X X
<i>Dodonaea viscosa</i>	16	1.034	X
<i>Senna multiglandulosa</i>	8	1.415	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>Callistemon citrinus</i> - <i>Cupressus sempervirens</i>		-0.327	0.427
<i>Callistemon citrinus</i> - <i>Dodonaea viscosa</i>	*	-0.422	0.349
<i>Callistemon citrinus</i> - <i>Senna multiglandulosa</i>	*	-0.803	0.427
<i>Cupressus sempervirens</i> - <i>Dodonaea viscosa</i>		-0.094	0.427
<i>Cupressus sempervirens</i> - <i>Senna multiglandulosa</i>		-0.475	0.494
<i>Dodonaea viscosa</i> - <i>Senna multiglandulosa</i>		-0.381	0.427

* indica una diferencia significativa.