

300618



UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS

INCORPORADA A LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

250

**ANALISIS DE LA SITUACION ACTUAL DE LA
OPERACION DE COMPOSTAJE A NIVEL
INDUSTRIAL COMO METODO DE TRATAMIENTO
DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES EN
MEXICO D.F.**

**TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
ASTRID GUADALUPE VILLASEÑOR JOHNSON**

ASESOR DE TESIS:

M. C. JOSE LUIS GONZALEZ DIAZ

MEXICO, D. F.

1995



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 está 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.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con todo mi cariño:

- A mi querida M.T.A., por quien este trabajo vió su fin.
 - A mis papás, Ignacio y Sigrid y mis hermanos María, Nacho, Karen y Kerstin; la mejor familia que se puede tener.
 - A Don Juan Bulbulian, un verdadero maestro.
 - A mis amigos.
-

AGRADECIMIENTOS

- A Juan Ignacio Corujo, por su valiosa asesoría desde el inicio de este proyecto.
 - A Gustavo Solórzano por su tiempo y su invaluable apoyo.
 - A mi Director de Tesis: M.C. José Luis González Díaz, por todo su apoyo en este trabajo y durante la carrera.
 - A mis revisores: Dra. Araceli Sánchez de Corral
Q.F.B. Ma. Leticia Linares Estudillo.
I.Q. Fernando García Mata.
Por su tiempo y sus comentarios.
 - A la Dra. Sylvie Turpin Marion y al Ing. Jorge Sánchez, por toda su colaboración
-

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I. INTRODUCCION.....1

1.1. Filosofía de la Protección al Medio Ambiente 1

 1.1.1 Carta del Jefe Seattle, Piel Roja al Gran Jefe Blanco
 Washington, 1854.2

1.2. Objetivo de la Tesis5

CAPITULO II. PROBLEMÁTICA DE LOS DESECHOS SÓLIDOS.....8

2.1. Aspecto Histórico.....8

 2.1.1 Mundo Antiguo 8

 2.1.2 Período Clásico..... 9

 2.1.2.1 Grecia 9

 2.1.2.2 Roma..... 9

 2.1.3 Edad Media10

 2.1.4 Revolución Industrial..... 11

 2.1.5 Actualidad..... 13

 2.1.6 México 16

2.2. El Problema Actual de los Desechos Sólidos en México 18

2.3. Aspectos Legales para el Manejo de los Desechos Sólidos:20

 2.3.1 La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al
 Ambiente.22

2.3.2 La Ley Orgánica de la Ciudad de México	25
CAPITULO III. MANEJO DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES.....	28
3.1 Introducción al Manejo de Residuos Sólidos Municipales.....	28
3.1.1 Clasificación de Residuos Sólidos	29
3.1.1.1. Origen.....	29
3.1.1.2 Tipo.....	32
3.1.1.3 Potencial de Reutilización.....	33
I. Recuperación de Materiales.....	34
II. Recuperación de Energía.....	34
3.2 Tecnologías para el Manejo de Desechos Sólidos	35
3.2.1. Rellenos Sanitarios	35
3.2.1.1 Tiradero a Cielo Abierto.....	35
3.2.1.2 Relleno Sanitario Antiguo	36
3.2.1.3 Cuasi-rellenos.....	39
3.2.1.4 Rellenos Sanitarios Contemporáneos	39
3.2.1.5 Contaminación de Aguas	42
3.2.1.6 Generación de Gases.....	43
3.2.2. Incineración.....	44
3.2.2.1 Parámetros Involucrados en el Proceso de Incineración	47
I. Humedad.....	47
II. Material Inerte	47
III. Poder Calorífico.....	47
3.2.2.2 Productos de Incineración	48
I. Gases	48
II. Cenizas	49
III. Agua	49
3.2.2.3 Tipos de Procesos de Incineración.....	50
I. Método de Incineración Continua.....	50

II. Método de Incineración Intermitente	50
3.2.2.4 Principales Ventajas y Desventajas del Proceso de Incineración	50
I. Ventajas.....	50
II. Desventajas.....	51
3.3. Separación Física de Materiales de Desecho.....	51
3.3.1 Separación de las Fracciones Orgánica e Inorgánica.....	52
3.3.1.1. Pulverización Húmeda.....	52
3.3.1.2 Pulpas Húmedas.....	53
3.3.1.3 Separación Seca.....	53
3.4 Combustibles Derivados de Desechos Orgánicos (RDF).....	53
3.4.1 Producción de RDF.....	56
3.5. Pirólisis y otros Procesos Térmicos.....	57
3.6. Procesos Biológicos.....	58
CAPITULO IV. CONSIDERACIONES TEORICAS ACERCA DEL COMPOSTAJE COMO OPERACION DE MANEJO DE DESECHOS SOLIDOS.....	62
4.1. Introducción.....	62
4.2. Definición.....	63
4.3. Implicaciones de la Naturaleza Biológica del Proceso.....	65
4.4. Microbiología del Proceso.....	65
4.4.1 Principales Grupos de Microorganismos.....	65

4.4.1.1 Bacterias.....	66
4.4.1.2 Actinomicetos.....	66
4.4.1.3 Hongos.....	67
4.4.2 Importancia de la Identificación de Microorganismos para el Diseño del Proceso.....	68
4.4.3 Inoculación de Microorganismos Distintos de los Contenidos dentro de la Población Autóctona.....	69
4.4.4 Fenómenos de Antagonismo Biológico.....	69
4.5. Factores Ambientales.....	70
4.5.1. Factores Físicos.....	70
4.5.1.1 Temperatura.....	70
4.5.1.2 Control del Flujo de Calor.....	73
I. Almacenamiento de Calor.....	73
II. Conducción.....	73
III Enfriamiento por Evaporación.....	73
4.5.1.3 Contenido de Humedad.....	74
4.5.1.4 Tamaño de Partícula.....	75
4.5.2 Factores Químicos.....	76
4.5.2.1 Concentración de Oxígeno.....	76
4.5.2.2 pH.....	77
4.5.3 Factores Nutricionales.....	78
4.5.3.1 Substrato Nutricional.....	78
4.5.3.2 Relación Carbono-Nitrógeno.....	79
4.5.3.3 Trazas de Elementos y Requerimientos Enzimáticos.....	80
4.6. Principales Ventajas y Desventajas de Proceso.....	81
4.6.1. Ventajas.....	81
4.6.2. Desventajas.....	82

CAPITULO V. PROCESOS INDUSTRIALES DE FABRICACION DE

COMPOSTA.....	85
5.1. Pre-tratamiento.....	85
5.1.1 Recepción de Residuos Sólidos.....	85
5.1.2 Separación.....	86
5.1.3 Reducción del Tamaño de Partícula.....	92
5.2. Procesos de Compostaje.....	97
5.2.1 Tecnología de Apilamiento (Windrows).	97
5.2.1.1 Introducción.....	97
5.2.1.2 Dimensiones Permisibles de los Apilamientos.....	98
5.2.1.3 Aireación.....	99
5.2.1.4 Aplicabilidad del Método Windrows.....	102
5.2.2 Tecnologías Mecanizadas Utilizadas en la Etapa de Compostaje.....	102
5.2.2.1 Introducción.....	102
5.2.2.2 Tecnología de Apilamiento Estático (Static-Pile).....	105
5.2.2.3 Tecnología en Digestor.....	108
I. Sistemas de Pisos Múltiples.....	108
II. Sistemas Rotatorios.....	116
III. Sistemas tipo Silo.....	120
IV. Sistema tipo Caja.....	120
V. Sistemas Combinados.....	123
5.3. Tratamiento Final o Curado.....	126
5.3.1 Cribado.....	126
5.3.2 Maduración o Curado.....	129
5.3.3 Molienda Final.....	129

CAPITULO VI. TRATAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS	
MUNICIPALES POR COMPOSTAJE EN MEXICO D.F.	131
6.1 instalaciones de la Planta Industrializadora de Residuos	
Sólidos en San Juan de Aragón	131
6.2. Proceso Empleado en la Planta Industrializadora de Residuos	
Sólidos en San Juan de Aragón	133
6.2.1 Etapa de Recepción	133
6.2.2 Etapa de Pre-tratamiento	134
6.2.3 Etapa de Compostaje	136
6.2.4 Tratamiento Final	137
6.3. Situación Histórica de la Línea de Compostaje en la Planta	
Industrializadora de San Juan de Aragón.....	138
6.4. Situación Actual y Perspectivas	143
CAPITULO VII. CONCLUSIONES	145
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	148

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1.- FILOSOFIA DE LA PROTECCION AL MEDIO AMBIENTE

La contaminación del medio ambiente es uno de los más graves problemas que enfrenta la humanidad de hoy. La atmósfera, los cuerpos de agua y el suelo se ven cada vez más presionados en su capacidad para asimilar la gran cantidad de sustancias extrañas que reciben día con día y que en su mayoría son contaminantes o no biodegradables. Al mismo tiempo los organismos encargados del manejo de la contaminación ambiental buscan incansablemente nuevas tecnologías, cada vez más sofisticadas, capaces de remediar, o por lo menos de controlar, un problema cuya solución cada día se ve más alejada de las posibilidades humanas.

Sin embargo, éste no es un problema nuevo que pueda resolverse únicamente aplicando los más recientes descubrimientos de la ciencia moderna. El problema de la contaminación del medio ambiente es simplemente la consecuencia natural que ha traído el enfoque global del hombre moderno frente a la realidad que lo circunda: La búsqueda incesante del máximo beneficio instantáneo, sin un segundo de reflexión acerca de las implicaciones futuras de las propias acciones.

En el año de 1854, durante la colonización de los territorios del oeste de la Unión Americana, George Washington recibe una carta del Jefe Seattle, jefe de una tribu Piel Roja, a quien había sido enviada una propuesta de compra de sus tierras. En ella se refleja una visión del mundo totalmente opuesta a los principios que rigen las civilizaciones modernas. Y ya en esa

época, se vislumbraban las consecuencias que tendría el enfoque de los colonizadores, con respecto al Medio Ambiente.

Hoy en día, hemos logrado desentrañar los más grandes misterios de la naturaleza y somos en gran medida capaces de dominar sus fuerzas y de aplicarlas para nuestro propio beneficio. Pero ¿Realmente el camino que hemos seguido nos lleva hacia adelante, hacia un perfeccionamiento del hombre y consiguientemente del mundo que nos circunda?...

1.1.1 Carta del Jefe Seattle, Piel Roja al Gran Jefe Blanco Washington, 1854.

¿Cómo se puede comprar o vender el firmamento, ni aún el calor de la Tierra? Dicha idea nos es desconocida. Si no somos dueños de la frescura del aire, ni del fulgor de las aguas, ¿Cómo pueden ustedes comprarlo?

Cada parcela de esta tierra es sagrada para mi pueblo, cada brillante mata de pino, cada grano de arena en las playas, cada gota de rocío en los oscuros bosques, cada alto sano y hasta el sonido de cada insecto es sagrado a la memoria y al pasado de mi pueblo.

La savia que circula por las venas de los árboles lleva consigo la memoria de los pieles rojas; los muertos del hombre blanco olvidan su país de origen cuando emprenden sus paseos entre las estrellas. En cambio, nuestros muertos nunca pueden olvidar esta bondadosa tierra, puesto que es la Madre de los Piel Roja. Somos parte de la tierra, asimismo ella es parte de nosotros.

Las flores perfumadas son nuestras hermanas, el venado, el caballo, y la gran águila, éstos son nuestros hermanos, las escarpadas peñas, los húmedos prados, el calor del cuerpo del caballo y el hombre, todos pertenecemos a la misma familia.

Por todo ello, cuando el gran Jefe Washington nos envía un mensaje que quiere comprar nuestra tierra, nos está pidiendo demasiado. También Gran Jefe nos dice que nos reservará un lugar en donde podamos vivir confortablemente entre nosotros, y él se convertirá en nuestro padre y nosotros en sus hijos, por ello consideramos su oferta de comprar nuestras tierras. Ello no es fácil ya que la tierra es sagrada para nosotros.

El agua cristalina que corre por los ríos y arroyuelos no es solamente agua, sino también representa la sangre de nuestros antepasados. Si les vendemos la tierra, deben recordar que es sagrada y a la vez, deben enseñar a sus hijos que es sagrada y que cada reflejo fantasmagórico en las claras aguas de los lagos cuenta los sucesos y memorias de la vida de nuestra gente.

El murmullo del agua es la voz del padre de mi padre; los ríos son nuestros hermanos, sacian nuestra sed, son portadores de nuestras canoas y alimentan a nuestros hijos. Si les vendemos las tierras, ustedes deben recordar y enseñarles a sus hijos que los ríos son nuestros hermanos y también lo son suyos, por lo tanto deben tratarlos con la misma dulzura con que se trata a un hermano.

Sabemos que el hombre blanco no comprende nuestra forma de vida. El no sabe distinguir entre un pedazo de tierra y otro, ya que es un extraño que llega de noche y toma las tierras que necesita. La tierra no es su hermana sino su enemiga y una vez conquistada sigue su camino dejando atrás la tumba de sus padres sin importarle; le secuestran la tierra a sus hijos, tampoco le importa, tanto la tumba de sus padres como el patrimonio de sus hijos son olvidados.

Trata a su madre, la tierra y a su hermano el firmamento como objetos que se compran, se explotan y se venden como ovejas o cuentas de colores. Su apetito devorará la tierra dejando atrás sólo el desierto.

No sé, pero nuestro modo de vida es diferente al de ustedes, la sola vista de su ciudad es pena a los ojos de piel roja, pero quizá sea porque el piel roja es un salvaje y no comprende nada.

El ruido sólo, parece insultar nuestros oídos y después de todo para qué sirve la vida, si el hombre no puede escuchar el grito solitario del chotacabras, ni las discusiones nocturnas al borde del estanque.

Soy un piel roja y nada entiendo, nosotros preferimos el sólo y suave susurro del viento sobre la superficie de un bosque, así como el olor mismo del viento pasando la lluvia del medio día perfumado de los pinos.

El aire tiene un olor estimable para el piel roja, ya que todos los seres comparten el mismo aliento, la bestia, el árbol, el hombre, todos respiramos el mismo aire.

El hombre blanco no parece estar consciente del aire que respira, como un moribundo que agoniza después de muchos días, es insensible al hedor.

Pero si les vendemos nuestras tierras, deben recordar que nuestra tierra nos es inestimable, que el aire comparte su espíritu con la vida que sostiene. El viento que dio a nuestros abuelos el primer soplo de vida también recibe los últimos suspiros.

Soy un salvaje y no comprendo otro modo de vida. He visto miles de búfalos pudriéndose en las praderas, muertos a tiros por el hombre blanco desde el tren en marcha.

Soy un salvaje que no comprende cómo una máquina humeante puede importar más que el búfalo, que nosotros matamos solamente para sobrevivir. ¿Qué sería del hombre blanco sin animales? Si todos fueran exterminados, el hombre también moriría de soledad espiritual. Porque lo que le suceda a los animales, también le sucederá al hombre y todo va enlazado.

Ni siquiera el hombre blanco, cuyo Dios pasea y habla con él de amigo a amigo, queda exento del destino común, porque después de todo quizá seamos hermanos, ya veremos...

Sabemos una cosa que quizá el hombre blanco descubra un día: Nuestro Dios es el mismo Dios. Ustedes pueden pensar ahora que El les pertenece, lo mismo que decían que nuestras tierras les pertenecen. Pero no es así. El es el Dios de los hombres y su compasión se comparte por igual entre el piel roja y el hombre blanco. Esta tierra tiene un valor inestimable para El y si se daña, provocará la ira del Creador.

También los Blancos se extinguirán, quizás, antes de las demás tribus, y contaminarán sus lechos y una noche perecerán ahogados por sus propios residuos; pero ustedes caminarán hacia su destrucción rodeados de gloria. Inspirados por la fuerza del Dios que les trajo a esta tierra y por algún destino espiritual, les dio dominio sobre ella y sobre los pieles rojas.

Este destino es un misterio para nosotros, pues no entendemos porque se exterminan los búfalos, fenomenales caballos salvajes, se saturan los rincones secretos de los árboles con el aliento de los hombres y se alborra el paisaje con exuberantes colinas de cables parlantes.

¿Dónde está el matorral? Destruído. ¿Dónde está el águila? Desapareció.

Termina la vida y empieza la sobrevivencia

1.2.- OBJETIVO DE LA TESIS

Desde la aparición del ser humano en la Tierra y el surgimiento de las primeras civilizaciones, el hombre ha producido desechos de todos tipos como subproductos de su actividad. De todos ellos, los desechos sólidos han sido siempre los más abundantes, los más molestos y potencialmente los más peligrosos. Es importante hacer notar desde un principio, que la generación racional de desechos sólidos no implica la existencia de un problema, o al menos, no de la magnitud del que hoy en día enfrentan las grandes ciudades. Sin embargo, actualmente existen ciertos factores que al entrar en estados críticos, han influido negativamente hasta convertirse en causas de la existencia de un problema casi incontrolable en relación con el manejo de los desechos sólidos:

1. Altas concentraciones de población, unidas a serias limitaciones de espacio en las grandes ciudades.
2. El aumento progresivo de las tendencias consumistas, que traen consigo una generación desmedida y creciente de desechos sólidos aunada al aumento de la proporción de desechos de lenta y difícil degradación o inclusive no biodegradables que se generan en el mundo.
3. Un desarrollo industrial enfocado únicamente a la generación de riqueza a corto plazo, sin tener en cuenta las implicaciones irreversibles que produce sobre el medio ambiente.
4. La falta de concientización de la población que actualmente considera el problema de los desechos, más como una molestia que como parte de

una crisis ambiental a gran escala que trae consigo graves peligros potenciales a la salud.

Adicionalmente, las soluciones que se han dado al problema de los residuos a lo largo de la historia, pero de manera especial en los últimos tiempos: tiraderos a cielo abierto, disposición de residuos en océanos y cuerpos de agua, uso incontrolado de rellenos sanitarios, quema de residuos, etc.; tampoco han tomado en cuenta la existencia de las leyes dentro de sus fundamentos; sino que se enfocan únicamente en hacer desaparecer el problema de manera inmediata, con el menor esfuerzo y el menor costo posible, independientemente de las repercusiones que puedan generar a futuro. Desgraciadamente, en muchos casos ese futuro se ha convertido en presente y actualmente enfrentamos en el mundo la crisis más grave de ruptura del equilibrio ecológico que ha existido desde la aparición del hombre.

En la Ciudad de México, los cuatro factores mencionados anteriormente se presentan en grado exacerbado, de manera que el manejo adecuado de las enormes cantidades de residuos sólidos que se producen diariamente, y que cada día van en aumento, representan un gran reto, tanto para las autoridades, como para la totalidad de la población. La generación per cápita de residuos sólidos se ha incrementado en las últimas tres décadas en casi siete veces, sus características han cambiado de desechos biodegradables a elementos de lenta y difícil degradación (5). La producción actualmente alcanza 12,000 toneladas de basura diaria. De este volumen, solo el 70% es recolectado (con técnicas y equipos deficientes). Se le da tratamiento al 5% y la disposición final del 95% de los residuos sólidos recolectados se realiza en tiraderos a cielo abierto, en donde la basura es clasificada mediante pepena y posteriormente se descompone por la acción de roedores, insectos y microorganismos. Estos, en condiciones anaerobias, generan como subproductos gases altamente tóxicos e inflamables, principalmente metano, ácido sulfúrico y amoníaco; los que producen serios problemas de contaminación atmosférica, de suelos y de mantos freáticos (5).

Frente a esta problemática; dado que en México el 52.98% del total de los residuos generados son orgánicos; el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos mediante la fabricación de composta a gran escala puede ser la respuesta adecuada ya que más de la mitad de los residuos pueden

ser, no solamente dispuestos, sino que su alto contenido energético puede reaprovecharse mediante este método de tratamiento.

El compostaje involucra una tecnología alternativa que se ha utilizado en México desde la década de los 70. Consiste en una serie de transformaciones procesos metabólicos para la descomposición incompleta de la materia orgánica heterogénea mediante la acción de una población microbiana, bajo condiciones controladas de temperatura, humedad y concentración de oxígeno (3).

El compostaje como método de tratamiento y confinamiento presenta ventajas importantes:

- Reducción del volumen de desechos.
- Destrucción total de parásitos patógenos para los cuales, las condiciones fisicoquímicas existentes en la basura no tratada constituyen excelentes medios de reproducción.
- Reciclado de residuos orgánicos, disminuyendo así la degradación del alto contenido intrínseco de energía que estos poseen.
- Reducción de problemas de contaminación y salud pública asociados al mal manejo de la basura
- Producción de un producto estable, no contaminante y con excelentes propiedades para mejoramiento de suelos (3).

Por lo tanto, los objetivos que persigue la presente tesis son los siguientes:

- Analizar las tecnologías comerciales utilizadas para la fabricación de composta, como una alternativa en el aprovechamiento de los residuos sólidos municipales en la Ciudad de México.
- Establecer la situación actual de las plantas productoras de composta en el Distrito Federal y sus posibilidades de desarrollo.

CAPITULO II

PROBLEMATICA DE LOS DESECHOS SOLIDOS

A fin de cobrar perspectiva y ser capaces de tomar conciencia acerca de la naturaleza y magnitud del problema de los desechos sólidos en la actualidad, es conveniente rastrear el impacto del desecho en la sociedad humana a lo largo de su historia; de esta manera, resulta patente la conexión histórica entre los procesos de urbanización y la cantidad de desechos generada; así como la importancia de las circunstancias locales y la actitud de los pueblos hacia los desechos (1).

2.1.- ASPECTO HISTORICO

Al darse la transición, a partir de civilizaciones sostenidas por la caza y la recolección a sociedades agrícolas, productoras de alimento (hacia el 10,000 a.C.), el ser humano comienza a abandonar sus hábitos nómadas, para adoptar formas de vida establecidas en lugares permanentes y más tarde, deja el trabajo de la tierra para establecer los primeros asentamientos urbanos. Con el tiempo, las demandas de este nuevo tipo de vida trajeron consigo nuevos retos, incluyendo la necesidad de desarrollar mejoras en los métodos de confinamiento de desechos. (1).

2.1.1 Mundo Antiguo

En las ciudades del mundo antiguo, la práctica más utilizada consistía en abandonar los desechos en las calles mismas o en lugares algo apartados de las ciudades. Sin embargo, existieron excepciones principalmente en ciertas culturas del Medio Oriente: India, Babilonia,

Egipto, Creta e Israel; que contaban con sistemas eficientes de alcantarillado y drenaje, así como con servicios de recolección de desechos en algunas de sus ciudades. Por lo general las religiones y las convenciones sociales jugaron un rol mayoritario en el establecimiento de prácticas sanitarias en esta época (1).

2.1.2 Período clásico

2.1.2.1 Grecia

En el Siglo V, correspondiente al período clásico y al máximo esplendor de la cultura griega, los desechos sólidos acumulados en las afueras de las ciudades más importantes, incluyendo Atenas, constituyeron un problema y una amenaza contra la salud pública. Hacia el año 500 a.C., los griegos organizaron los primeros tiraderos municipales del mundo occidental. El concejo de Atenas emitió una ordenanza requiriendo recolectores, para confinar los desechos sólidos a no menos de una milla de los muros de las ciudades, y además, en Atenas se publicó el primer edicto que se conoce con la prohibición de tirar basura en las calles (1).

2.1.2.2 Roma

Debido a su tamaño y a su alta densidad de población, Roma enfrentó problemas sanitarios nunca conocidos en Grecia. La administración de la ciudad fue más eficaz para tratar asuntos relacionados con aguas de desecho, drenaje y salud pública que para resolver el problema generado por la superabundancia de desechos sólidos. La infraestructura existente para la recolección y el confinamiento de los desechos resultaba insuficiente, ya que el volumen generado era enorme, por otra parte, los sistemas de recolección municipal se limitaban a intervenir durante eventos organizados por el estado, tales como desfiles, juegos de gladiadores, competencias, etc. (1).

Por ley, los dueños de las propiedades eran responsables de las calles adyacentes a éstas, sin embargo esta ley realmente no se hacía cumplir. La gente adinerada empleaba esclavos para la recolección y confinamiento de la basura, existiendo además recolectores independientes que recogían basura y excremento para venderlo más tarde como fertilizante, los tiraderos a cielo abierto fueron utilizados con todas las desventajas que esto implica. Para una ciudad que contaba con 1.25 millones de habitantes aproximadamente, el problema de los desechos sólidos excedía grandemente su capacidad para resolverlo. Mucho antes de su caída, Roma se había convertido en una ciudad sucia y sin recursos que le permitieran mejorar sus condiciones (1).

Más allá de Europa, especialmente en las grandes ciudades islámicas y en China, existían sistemas de sanidad bastante avanzados (1).

2.1.3 Edad media

El periodo medieval, conocido como el tiempo del oscurantismo y caracterizado por plagas recurrentes y graves epidemias, hace pensar que tras la caída del Imperio Romano, Europa se convirtió en un vasto tiradero. Sin embargo durante éste periodo, a pesar de la crudeza de las condiciones de vida medievales, la gravedad del problema de los desechos sólidos fue refrenada, puesto que la población europea se segregó a los campos y la mayoría de las áreas estuvieron escasamente habitadas. La recolección y el confinamiento de los desechos volvió a constituir un problema al resurgir las pequeñas ciudades medievales, en las que los hábitos rurales fueron reintroducidos en la vida de ciudad, y así, el hábitat urbano fue compartido con todo tipo de ganado y animales domésticos (1).

Hacia el S. XIII, las ciudades europeas más grandes otra vez comenzaron a verse dominadas por los desechos, un poco más tarde las calles se empezaron a pavimentar y su limpieza corría por cuenta de las autoridades. En 1388, el Parlamento inglés prohibió el confinamiento de los desechos sólidos en cauces de agua o en canales de drenaje (1).

En París hacia 1400, los amontonamientos de basura en las puertas de la ciudad eran tan altos que constituyeron un obstáculo para la defensa de la ciudad. Desde la transición de una Europa predominantemente agraria hasta alcanzar una sociedad urbano-industrial en el S. XIX , el problema de los desechos sólidos permaneció como se había presentado en la Edad Media, sin cambios mayormente importantes. Aún cuando el Renacimiento trajo un resurgimiento de las ciencias y las artes clásicas en Europa, anunciando una nueva era, la naciente Europa moderna no sufrió un cambio estructural o demográfico suficientemente grande, que la llevara al desarrollo de nuevos métodos para enfrentar el problema de los desechos, así, el cambio fue gradual hasta el surgimiento de la Revolución Industrial (1).

2.1.4 Revolución Industrial

La Revolución Industrial, originada en Inglaterra a mediados del S. XVIII, acabó con el antiguo orden de Europa, reemplazándolo por uno caracterizado por una amplia expansión económica y una rápida urbanización. El descuido del medio ambiente fue una consecuencia inevitable al darse el florecimiento de una sociedad, cuyas prioridades se asignaban por un orden de valores basado en una disciplina netamente industrial (1).

Hasta 1760, la industria inglesa conserva una estructura y una producción tradicional. El llamado "domestic-system", caracterizado por miles de pequeños propietarios, dueños de una rudimentaria maquinaria y la consecuente generación de pequeñas cantidades de desechos con la posibilidad de reciclado natural, desaparece con la Revolución Industrial, en la que aparece el sistema de fábrica, caracterizado por la mecanización, la concentración técnica y geográfica y la división del trabajo a nivel industrial (2).

Entre 1700 y 1789, la producción de algodón se multiplicó por 30, la producción de hulla aumentó 5 veces y la metalurgia adquiere un índice decenal de aumento de producción cercano al 40%, con lo que la producción de hierro se triplica a lo largo del siglo. Poco a poco, esta nueva forma de organización comienza a extenderse a lo largo de toda

Europa y más tarde, a América del Norte junto con todas sus consecuencias ambientales (2).

El factor esencial necesario para el surgimiento del primer esfuerzo por mejorar la sanidad en la ciudad industrial, correspondió al nacimiento de la ciencia moderna de la Salud Pública. La aplicación de exámenes llevados a cabo por la "Comisión Legal para los Pobres", inicialmente en Londres y más tarde a través de toda Inglaterra, sobre la salud de la clase trabajadora, permitieron concluir que las enfermedades, y especialmente las contagiosas, estaban relacionadas de alguna manera con las inmundas condiciones ambientales de trabajo, (la conexión exacta no resultó clara hasta surgir la teoría de los gérmenes patógenos, como precursores de las enfermedades) (1).

El establecimiento de la Comisión Sanitaria en 1869 y la subsecuente legislación pro salud pública dio como resultado la fundación de organismos enfocados a la Sanidad Ambiental, que llevaron a una reducción en las enfermedades urbanas. Con el advenimiento de la ciencia moderna, las condiciones sanitarias en la Inglaterra industrial comenzaron a mejorar (1).

Al iniciarse el Siglo XIX, el industrialismo inglés comenzó a adquirir proporciones considerables. Las máquinas inglesas fueron solicitadas por los Estados Unidos y más tarde por toda Europa. Aparecieron los grandes capitales y los negocios bancarios; los artesanos que tiempo atrás poseían sus talleres y realizaban trabajo a mano, no pudieron sostener sus pequeñas industrias, pues las fábricas, realizaban más rápido y a menor costo la labor que ellos antes produjeran. Debido a esto, los talleres cerraron y los ex-propietarios buscaron empleo en las fábricas; así, el proletariado hace su aparición: En torno a las fábricas fueron amontonándose grandes cantidades de casas miserables y una población hacinada, hambrienta e inconforme (2).

El impacto de la Revolución Industrial en las ciudades americanas no fue menor que en las europeas y lo mismo que en Europa, América empezó a experimentar una crisis ambiental a gran escala. Los Estados Unidos primeramente y todo América más tarde, tienen que confrontar un

problema de desechos que trajo consigo dos situaciones claramente definidas:

1. La primera, relacionada con el daño en el ambiente físico producido por la sobrepoblación, por las condiciones nulas de sanidad y por métodos primitivos de colección y confinamiento.
2. La segunda, relacionada con la gran afluencia de personas a las grandes metrópolis, lo cual tuvo un impacto aún mayor. Esto dio como resultado ciudades superpobladas, problemas crónicos de salud, atmósferas y cursos de agua contaminados, tráfico, ruido y amontonamientos de basura en descomposición en diversos lugares de las ciudades (1).

Finalmente hacia 1870, se empezó a tomar conciencia de la gravedad de la situación, teniendo prioridad el aseguramiento de las fuentes de agua pura y alcantarillado. Los problemas de ruido y gases contaminantes en las ciudades industriales no fueron atendidos sino hasta 1890. El problema de los desechos sólidos que inicialmente fue considerado como una mera molestia, comenzó a considerarse en esta época como el mayor contaminante de la era industrial. Sin embargo, no es hasta 1960-1970, en que los norteamericanos comienzan a relacionar la solución del problema de los desechos sólidos con el control del exagerado consumo de bienes y servicios (1).

2.1.5 Actualidad

Actualmente, muchas naciones industrializadas se han visto forzadas a implementar políticas que impulsen a los distintos ámbitos de la sociedad, hacia una nueva visión en torno a la administración de los desechos sólidos, la cual opte prioritariamente por el reciclado de materiales como estrategia para mejorar los procedimientos de aprovechamiento de los residuos sólidos municipales. En Alemania, la recuperación de materiales tiene prioridad sobre el confinamiento de desechos si es técnicamente factible, si el aumento de costos se justifica y si existe algún mercado para reaprovechar los materiales o la energía. En Japón, el reciclado tiene prioridad máxima como estrategia de manejo de residuos, hasta el punto

de no considerar los materiales reciclables dentro de las estadísticas de generación de desechos, sino en las de generación de materia prima disponible. A fin de posibilitar dicha política, se ha implementado un plan de separación en fuente, que consiste en la clasificación y separación de los residuos en las mismas casas o en los lugares donde se generan, dentro de cuatro a seis categorías de residuos: papel, cartón, metales, vidrio, textiles y plásticos. Únicamente el 10% de los municipios permiten la recolección de residuos sin separar y cuentan con instalaciones separadoras y de reciclaje. El alto nivel de participación ciudadana en el reciclado local, se explica por la constante educación pública y las campañas promocionales que llevan a cabo las autoridades encargadas de administración de desechos y por el alto grado de disciplina cívica. Sin embargo, también existen límites de otra naturaleza para los niveles de reciclado, puesto que la estabilidad de los mercados presenta para dicha nación una prioridad más elevada (8).

En los Estados Unidos, la legislación se está revisando, a fin de lograr cambios de base en el desarrollo de nuevas tecnologías, que aseguren un confinamiento libre de riesgos para el medio ambiente. Sin embargo, en este ámbito aún queda un largo camino por recorrer (8).

Repetidas veces se ha intentado propiciar una actitud hacia el manejo de desechos, en la que la primera prioridad sea siempre sanitaria y ecológica; sin embargo, este aspecto ha sido continuamente relegado en favor del beneficio económico que puede obtenerse a partir de los desechos. A pesar de esto, el reciclado de materiales en los Estados Unidos, comienza a perfilarse como una opción competitiva debido a los altos costos y la preocupación ambiental que ha surgido en torno al uso de rellenos sanitarios y del proceso de incineración. Actualmente doce estados han nombrado coordinadores de reciclado, siendo la meta de la EPA, canalizar hacia sistemas de reciclado en fuente el 25% de los residuos que van a incineración y rellenos sanitarios. Varios estados han implementado restricciones para el uso de los rellenos, tales como la recepción restringida a desechos separados por categoría, así como un impuesto por depósitos en rellenos; los beneficios obtenidos a partir de estas acciones se utilizarán para promover programas de reciclaje comunitarios, a través de educación pública de la comunidad, campañas

de limpieza y programas de incentivos y reconocimientos por el diseño de programas exitosos de separación en fuente. Siete estados tienen leyes para favorecer la devolución de envases de bebidas no retornables, a fin de reducir la cantidad de basura generada. Actualmente, existen en escala experimental programas de incentivos pro reducción de basura y programas de concientización en los consumidores en pro de productos reciclados. Asimismo, el estado de Washington ha implementado la aplicación de impuestos sobre abarrotes sobre empacados, mientras que el estado de California ha establecido programas de estímulos fiscales y reducción de impuestos a compañías que utilicen materias primas reciclables (8).

Es importante considerar también, la dimensión social del problema, que en la actualidad ha cobrado una magnitud enorme y que se manifiesta en la creciente cantidad de redes organizadas de pepenadores de basura en todas las naciones del mundo, tanto subdesarrolladas como altamente industrializadas, las cuales llevan a cabo el reciclado de enormes cantidades de desechos. Ciertos factores han favorecido el crecimiento de la ya elevada tasa de crecimiento de las redes de pepenadores, éstos incluyen: la necesidad de materia prima barata para varios tipos de industrias y la crisis económica a nivel mundial que ha traído consigo tasas elevadísimas de desempleo y una gran reducción del poder de compra. El hecho de que el reciclado de materiales se encuentre en manos de un sector productivo informal e inclusive en algunas ocasiones clandestino, genera graves problemas. La posición de las autoridades a nivel mundial se reduce a cerrar los ojos ante la existencia, y principalmente, ante la importancia, que estos grupos de pepenadores han adquirido dentro del manejo de los residuos sólidos. Estos aspectos han generado altos niveles de ineficiencia de operaciones en el manejo de residuos sólidos municipales: El personal encargado de la recolección de los desechos municipales comienza la pepena dentro de los mismos camiones recolectores, desviándose de las rutas preestablecidas a fin de vender los residuos que cuentan todavía con valor económico. Además, en regímenes políticos atacados de base por la corrupción, la posición de las autoridades se enfoca en obtener el mayor beneficio posible a través del control clandestino del problema. A fin de reducir dicho problema es

necesaria la existencia de reglamentaciones que puedan conciliar los intereses de la municipalidad y de los grupos de pepena, como se hizo en Ciudad Juárez en 1975, en donde los pepenadores locales obtuvieron la concesión de los desechos y se organizaron en una cooperativa para reciclar los desechos aprovechables y más tarde la operación de un relleno sanitario; como resultado, las condiciones laborales de estos grupos se han visto muy mejoradas al mismo tiempo que se dio una solución adecuada a un problema existente (8).

2.1.6 México

En la época prehispánica, bajo el reinado de Moctezuma Xocoyotzin, Tenochtitlan contaba con servicios urbanos de limpia y recolección aún mejor organizados que hoy en día. No existían actividades comerciales de ningún tipo fuera de los mercados, dándose además la circunstancia de que el común de la población no usaba calzado, y que los habitantes de las ciudades estaban habituados a no tirar desperdicios en las calles (3).

A partir de la colonización española, se adoptan las costumbres europeas, con lo que los desechos sólidos comienzan a manejarse arbitrariamente, imposibilitándose su reutilización y reciclaje; con esto, surgen problemas económicos y de contaminación ambiental. Hacia el año de 1787, las calles de la Ciudad de México se han vuelto intransitables debido al desaseo y la falta de limpieza. Existían serios problemas en los sistemas de drenaje y en casi todas las calles existían tiraderos (muladares), ya que no se contaba en absoluto con sistemas de confinamiento y recolección. En consecuencia, el Virrey Revillagigedo promulga reglamentaciones municipales para barrer y regar las calles, estableciendo la recolección de basura por carros tirados por mulas, con lo cual se evitó que los tiraderos continúen en las calles (3).

En el año de 1824 dichas medidas habían dejado de aplicarse, por lo que el Coronel Melchor Múzquiz, Jefe Superior Interino de la Provincia, establece nuevas reglamentaciones nombrando una comisión que propusiera medidas convenientes a fin de que dichas leyes fueran cumplidas invariablemente; en ellas se rige lo siguiente:

- La limpieza de las calles de la ciudad era, a partir de entonces, responsabilidad del gobierno de la misma.
- Los carros de basura debían hacer sus recorridos por la mañana y por la noche, aguardando el tiempo suficiente para que los vecinos entregaran sus desechos.
- Dar a conocer dichas reglamentaciones a fin de que sean del conocimiento del público y evitar así penalizaciones por incumplimiento de las mismas (3).

Estas son las primeras reglamentaciones que establecen multas a quienes arrojen desechos en las calles de México. Debido al crecimiento de la ciudad, en el año de 1884, el servicio de limpia de la Ciudad de México se descentraliza, distribuyendo los recursos entre las 8 inspecciones de policía. En ese año el servicio de limpia contaba con 83 carros, 43 pipas y 136 mulas. Hacia 1936, cuenta con 2500 empleados, el sindicato de trabajadores de limpia y se cuenta ya con camiones tubulares y carros de volteo de 7 y 20 toneladas. Los carros tirados por mulas cubrían únicamente los servicios de la periferia de la ciudad. La práctica utilizada para el confinamiento de los desechos sólidos fue la de tiraderos a cielo abierto (3).

En 1941, se promulga el primer reglamento de limpia. A principios de los sesentas se crea la Dirección General de Servicios Urbanos del D.F., de la que depende la oficina de Recolección de desechos sólidos. Al final de la misma década ésta desaparece, para volver a surgir a principios de los ochentas. De esta dirección, depende actualmente la recolección, tratamiento y disposición de desechos sólidos en la Ciudad de México. Desgraciadamente a las autoridades les ha faltado decisión para modernizar la práctica de tratamiento adecuado de los residuos sólidos según las necesidades de nuestros tiempos (3).

2.2.- EL PROBLEMA ACTUAL DE LOS DESECHOS SOLIDOS EN MEXICO

En la Ciudad de México, la generación per cápita de residuos sólidos se ha incrementado en las últimas tres décadas en casi siete veces. Sus características han comenzado a cambiar de desechos biodegradables a elementos de lenta y difícil degradación. La producción diaria de residuos sólidos actualmente alcanza las 12,000 toneladas. De este volumen, sólo el 70% es recolectado (con técnicas y equipos deficientes). Se le da tratamiento al 5 % y la disposición final de un 95 % de los residuos recolectados se realiza en tiraderos a cielo abierto, en donde la basura es clasificada mediante pepena y posteriormente, es descompuesta por roedores, insectos y microorganismos. Estos, en condiciones anaerobias, generan como subproductos gases altamente tóxicos e inflamables, principalmente metano, ácido sulfúrico y amoníaco, que producen serios problemas de contaminación atmosférica, de suelos y de mantos freáticos. Por otra parte, los pequeños centros de población en toda la República carecen de servicios de recolección y disposición final, por lo que la práctica común es la de arrojar los desechos en cuerpos de agua y lotes baldíos (3).

A fin de establecer planes y estrategias para la cuantificación y el mejor manejo de los desechos sólidos en México, éstos han sido clasificados de la siguiente manera:

- **Desechos Residenciales:** Corresponde a los desechos que cada individuo genera en su hogar.
- **Desechos Municipales Domiciliarios:** Se componen por los desechos residenciales y los desechos generados por oficinas, comercios y otros establecimientos como escuelas y restaurantes.
- **Desechos Urbanos:** Comprenden los desechos mencionados anteriormente más los desechos industriales.
- El monto de los **Desechos Urbanos per cápita** se obtiene al dividir el monto total de los desechos urbanos entre el número de habitantes de cada ciudad (4).

Por otra parte, los desechos sólidos pueden separarse en diferentes categorías para su estudio y para el establecimiento de planes de reciclaje. Las categorías generalmente encontradas en los desechos de tipo municipal son las siguientes:

- Metales
- Papel
- Plásticos
- Vidrio
- Materiales Orgánicos
- Textiles
- Otros

Dentro de la categoría de metales se engloban todo tipo de residuos metálicos, independientemente de que sean magnéticos o no. Este tipo de residuos tiene grandes posibilidades de reciclaje, especialmente si es separado de otros tipos de desechos en etapas previas al inicio de su descomposición oxidativa. El aluminio, puede ser reciclado casi en su totalidad, dadas sus características de resistencia a la corrosión (4).

Dentro de la categoría de papel, se puede a su vez hacer la división de papel de empaque, periódicos y revistas, y otros tipos de papel; actualmente han comenzado a llevarse a cabo bastantes esfuerzos en el ámbito del reciclado del papel. Esto es debido a la grave deforestación que han sufrido los bosques y las enormes cantidades de agua contaminada como subproducto del proceso de producción de papel de primera. En cuanto a los plásticos, existen métodos de reciclado de varios polímeros, sin embargo, para que éstos puedan dar los resultados esperados, es forzoso que el material plástico no se encuentre en combinación con papel o material metálico. Debido a esto, las nuevas tendencias de empaque de productos de consumo, que emplean materiales elaborados a base de combinaciones de plásticos, metales y papel, han agravado los problemas desde el punto de vista ecológico (4).

En la Tabla 1, se presentan los pesos respectivos generados actualmente en la Ciudad de México, de las diversas categorías de materiales y su composición en por ciento.

Para el resto de la República no existen todavía fuentes de información confiables que suministren éste tipo de información.

Tabla 1. Composición de desechos sólidos municipales generados en la Ciudad de México (5).

Categoría	Monto (Ton/día)	Composición en %
Metales	411.6	3.43 %
Papel	2269.2	18.91 %
Plástico	756.0	6.30 %
Vidrio	1032.0	8.60 %
Orgánicos	6348.0	52.90 %
Textiles	387.6	3.23 %
Otros	795.6	6.63 %

A través de la figura 1, es notorio que el rubro más importante dentro de las categorías de desechos municipales en México es el material orgánico, constituyendo poco más de la mitad de los desechos generados.

Este se caracteriza por la ausencia de materiales tóxicos y por la posibilidad de ser reutilizados mediante métodos biológicos de tratamiento y confinamiento, como es el caso de la producción de composta.

2.3.- ASPECTOS LEGALES PARA EL MANEJO DE LOS DESECHOS SOLIDOS:

Actualmente la estrategia propuesta por las autoridades para el manejo de los desechos sólidos en México se encuentra basada principalmente en los siguientes documentos:

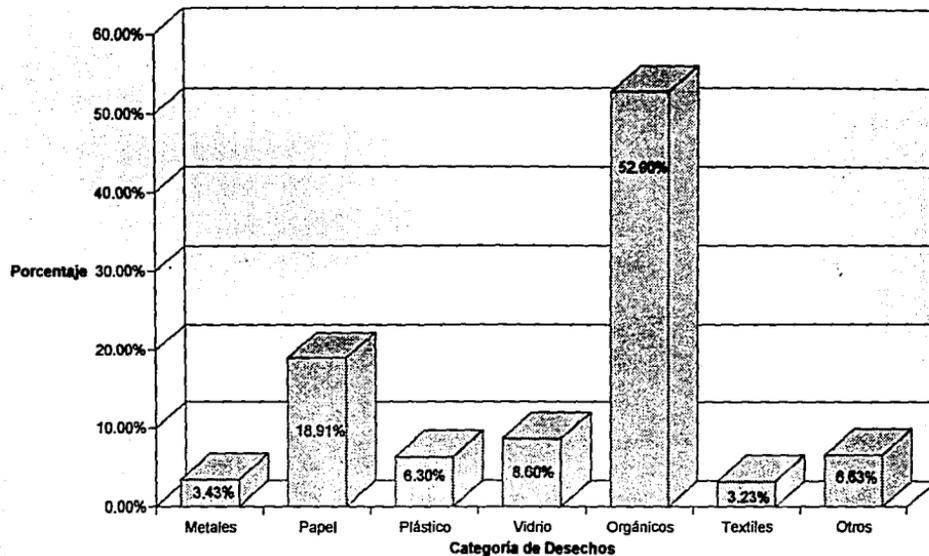


Figura 1. Composición de Residuos Sólidos en México

- **La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.** Publicada en 1988, en la cual se reúnen las bases para una política ecológica nacional.
- **El Reglamento para el Servicio de Limpia en el D.F.** Publicado en 1989.
- **La Ley Orgánica de la Ciudad de México**

2.3.1 La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

En la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (6), publicada en el Diario Oficial el 28 de enero de 1988, se presentan varios artículos relacionados con el manejo de los desechos sólidos, siendo ésta el comunicado oficial más adelantado a éste respecto:

- **Artículo 15.-** Para la formulación y conducción de la política ecológica y la expedición de Normas Técnicas y demás instrumentos previstos en esta ley, en materia de restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente, el Ejecutivo federal observará los siguientes principios:
 - IV.** La responsabilidad respecto al equilibrio ecológico, comprende tanto las condiciones presentes como las que determinarán la calidad de vida de las futuras generaciones.
 - V.** La prevención de las causas que lo generan es el medio más eficaz para evitar el desequilibrio ecológico.
- **Artículo 18.-** El Gobierno federal promoverá la participación de los distintos grupos sociales en la elaboración de los programas que tengan por objeto la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, según lo establecido en esta ley y las demás aplicables.
- **Artículo 22.-** Se consideran prioritarios, para efectos del otorgamiento de estímulos fiscales que se establezcan conforme a la Ley de Ingresos de la

Federación, las actividades relacionadas con la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

- **Artículo 36.-** Para los efectos de esta Ley, se entiende por norma técnica ecológica, el conjunto de reglas científicas o tecnológicas emitidas por la Secretaría, que establezcan los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de actividades o uso y destino de bienes, que causen o puedan causar desequilibrio ecológico o daño al ambiente además que uniforme principios, criterios, políticas y estrategias en la materia. Las normas técnicas ecológicas, determinarán los parámetros dentro de los cuales se garanticen las condiciones necesarias para asegurar la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección del ambiente.
- **Artículo 41.-** El Gobierno Federal, las entidades federativas y los municipios, con arreglo a lo que dispongan las legislaturas locales fomentarán investigaciones científicas y promoverán programas para el desarrollo de técnicas y procedimientos que permitan prevenir, controlar y abatir la contaminación, propiciar el aprovechamiento racional de los recursos y proteger los ecosistemas. Para ello se podrán celebrar convenios con instituciones de educación superior, centros de investigación, instituciones del sector social y privado, investigadores y especialistas en la materia.
- **Artículo 120.-** Para evitar la contaminación de agua, quedan sujetos a regulación federal o local:
 - VI.** Las infiltraciones que afecten a los mantos acuíferos.
 - VII.** El vertimiento de residuos sólidos en cuerpos y corrientes de agua.
- **Artículo 134.-** Para la prevención y control de la contaminación del suelo se considerarán los siguientes criterios:
 - I.** Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo;
 - II.** Deben ser controlados los residuos sólidos en tanto constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;

III. Es necesario racionalizar la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; e incorporar técnicas y procedimientos para reuso y reciclaje;

IV. La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas.

- **Artículo 135.-** Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo, se consideran en los siguientes casos:

I. La ordenación y regulación del desarrollo urbano;

II. La operación de los sistemas de limpia y disposición final de residuos en rellenos sanitarios;

III. La autorización para la instalación y operación de confinamientos o depósitos de residuos y,

IV. El otorgamiento de todo tipo de autorizaciones para la fabricación, importación, utilización y en general la realización de actividades relacionadas con plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas.

- **Artículo 136.-** Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:

I. La contaminación en el suelo;

II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;

III. Las alteraciones en el suelo que alteren su aprovechamiento, uso y explotación;

IV. Riesgos y problemas de salud.

- **Artículo 138.-** La secretaría promoverá la celebración de acuerdos de coordinación y asesoría con los gobiernos estatales y municipales para :

I. La implantación y mejoramiento de sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales, y;

II. La identificación de alternativas de reutilización y disposición final de desechos sólidos municipales, incluyendo la elaboración de inventarios de los mismos y sus fuentes generadoras.

- **Artículo 141.-** La Secretaría de Comercio y Fomento Industrial promoverá la fabricación y utilización de empaques y envases para todo tipo de productos cuyos materiales permitan reducir la generación de residuos sólidos.
- **Artículo 157.-** El Gobierno Federal promoverá la participación y responsabilidad de la sociedad en la formulación de la política ecológica, la aplicación de sus instrumentos, en acciones ecológicas que emprenda.
- **Artículo 159.-** La Secretaría propondrá a la Comisión Nacional de Ecología, la participación de los representantes de los principales sectores de la sociedad; así como de organizaciones, instituciones y particulares con quienes hubiere celebrado convenios de concertación en los términos de esta ley (6).

2.3.2 La Ley Orgánica de la Ciudad de México

En la Ley Orgánica del D.D.F. (7), también se confiere atención al problema de los desechos sólidos en los siguientes artículos:

- **Artículo 23.-** Para los efectos de esta ley , se entiende por servicio público, la actividad organizada que se realice conforme a las leyes o reglamentos vigentes en el Distrito Federal, con el fin de satisfacer en forma continua, uniforme, regular y permanente, necesidades de carácter colectivo. La prestación de estos servicios es de interés público.
- **Artículo 25.-** A fin de que una empresa particular pueda prestar un servicio público, será necesario que además de darse los presupuestos que prescriben los artículos anteriores de éste apartado, el Presidente de la República, a través del jefe del D.D.F., le otorgue una concesión así como las disposiciones contractuales que procedan en cada caso (7).

El otorgamiento de estas concesiones, sólo podrá hacerse a personas físicas o morales de nacionalidad mexicana y serán por tiempo determinado, y al cumplirse, los bienes utilizados por el concesionario, bienes de uso público, volverán al poder del D.D.F., al término de la concesión. En caso de ampliación en el plazo de estas concesiones, sólo podrá ser otorgada por el Presidente de la República, mediante proposición del regente capitalino, siempre y cuando el concesionado

demuestre que ha cumplido con los términos y obligaciones de la concesión respectiva. Por otro lado, si una empresa está interesada en industrializar la basura orgánica, procesándola para obtener composta, la declaratoria general No. 273 del 23 de Octubre de 1972, publicada en el Diario Oficial, especifica la exención de impuestos para la fabricación de mejoradores orgánicos, a partir de la fermentación y procesamiento de los residuos. La exención se refiere al 100% de Impuesto general de importación, al 100% del Impuesto del timbre, al 100% de la Participación federal del Impuesto sobre ingresos mercantiles, al 30% de reducción en el Impuesto sobre la Renta, durante un plazo de 10 años. En esta industrialización está además autorizada la participación del extranjero (3).

En los artículos mencionados anteriormente se vislumbra cierto interés de las autoridades mexicanas hacia la posibilidad de dar solución al problema de los desechos sólidos y en general de frenar la grave crisis de desequilibrio ecológico. Sin embargo a través del tiempo de vigencia de la Ley de Protección al Ambiente (1988-1993), no se han observado mayores acciones concretas que indiquen una tendencia hacia la búsqueda, el compromiso y el seguimiento de estrategias que lleven a la solución real de problemas. Concretamente, hasta la fecha, no se ha publicado ningún reglamento, ni Norma Oficial Mexicana en materia de residuos sólidos municipales, ni para la protección de contaminación de suelos.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y el Reglamento del Servicio de Limpia en el Distrito Federal, en los que se recomienda el manejo de los rellenos sanitarios, no hacen referencia al ciclo de contaminación de aguas y suelos que se desencadena en éstos a partir de la infiltración incontrolada de lixiviados a los mantos acuíferos. La ley se preocupa por preservar los ecosistemas acuáticos, identificando como problema principal la contaminación generada por descarga de aguas residuales provenientes de drenajes urbanos y hace referencia a las filtraciones que afectan los mantos acuíferos, pero no identifica los rellenos y ex-tiraderos como posibles fuentes de tal tipo de contaminación, ni establece medidas de prevención y control al respecto (4).

La ley presenta un enfoque poco específico al asumir que la diferencia entre los residuos sólidos municipales y los residuos peligrosos es clara y

bien definida, como si existiera una dicotomía entre sus generadores. Es deseable enfocarse, como lo hace la ley referida, en el control de los residuos altamente tóxicos, los cuales han sido identificados por las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes. Sin embargo, el punto crucial es que los residuos municipales, que no son considerados como peligrosos por la ley, actualmente, debido a su enorme cantidad y al hecho de que continuamente están siendo mezclados con los anteriores; están resultando los más altamente contaminantes en las grandes ciudades (4).

Conforme el problema se agrava, cada vez es más urgente tomar acciones concretas que lleven a una reducción del monto de los desechos generados, así como a su aprovechamiento, reuso y reciclaje, puesto que dicho monto y el grado de desequilibrio ecológico alcanzado, principalmente en la Ciudad de México, imposibilitan el continuar considerando el problema de los desechos sólidos municipales como una simple inconveniencia.

A últimas fechas, se han integrado varias agrupaciones ecologistas, entre cuyos fines principales está llevar a cabo campañas de concientización en la población, para fomentar en cada individuo una mentalidad hacia la protección del medio ambiente, así como buscar el apoyo de las autoridades para evitar acciones susceptibles de producir graves desequilibrios ecológicos. Sin embargo mientras no existan esfuerzos conjuntos y un mayor seguimiento por parte de las autoridades, no se verá la posibilidad de vislumbrar una solución al grave problema de la contaminación ambiental.

CAPITULO III

MANEJO DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES

3.1 INTRODUCCION AL MANEJO DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES

Todas las actividades humanas, como se mencionó anteriormente, generan materiales residuales que no tienen una utilidad inmediata. Estos residuos pueden ser reciclados, recuperados y/o reutilizados; de otra manera, se constituyen en desperdicio, el cual finalmente se descarga al medio ambiente. La biosfera tiene la capacidad de transformar, con el tiempo, una gran cantidad de desechos, ya sea en productos inofensivos o en nutrientes que pueden ser reutilizados. Sin embargo, esta capacidad natural de asimilación del ambiente puede ser fácilmente excedida si los desechos, y especialmente los provenientes de la actividad industrial, no son controlados. En estas circunstancias, se requiere de la planeación cuidadosa para el control de los desechos y evitar así el surgimiento de problemas de contaminación y la disminución de la calidad del medio ambiente (9).

El tratamiento de los residuos sólidos municipales se define como el conjunto de técnicas y métodos de procesamiento, físicos, químicos o biológicos que se aplican a los desechos sólidos con la finalidad de modificar sus características. Los objetivos últimos que comúnmente se persiguen mediante el tratamiento de residuos sólidos son los que se listan a continuación (10):

- Reciclaje de subproductos
- Reducción de volumen
- Recuperación de energía

- Eliminación/Disminución de la agresividad de los residuos
- Aumento de la facilidad de manejo.

La figura 2 muestra una representación esquemática del flujo de materiales, servicios, desechos y contaminantes que fluyen del medio ambiente y hacia él. Idealmente el manejo de desechos sólidos debería tenerse en mente como una unidad con un control integrado y dirigido a los tres grandes medios de recepción de contaminantes, es decir: aire, agua y suelo. Sin embargo conforme las medidas de control de descargas hacia la atmósfera y hacia cuerpos de agua han incrementado sus restricciones, la suelo, el tercer medio de recepción de contaminantes, se ha visto cada vez más presionado por todo tipo de descargas.

3.1.1 Clasificación de Residuos Sólidos

Los desechos pueden subdividirse según:

- Origen
- Tipo
- Potencial de reutilización (9).

3.1.1.1. Origen

Esta categoría se refiere a la actividad económica de la cual surge el desecho de que se trata. A continuación se listan las principales actividades que dan origen a la presente clasificación:

- Desechos municipales. Provenientes de viviendas y comercios
- Desechos industriales: Similares a los anteriores
Desechos asociados con el proceso productivo.
Lodos
Residuos peligrosos

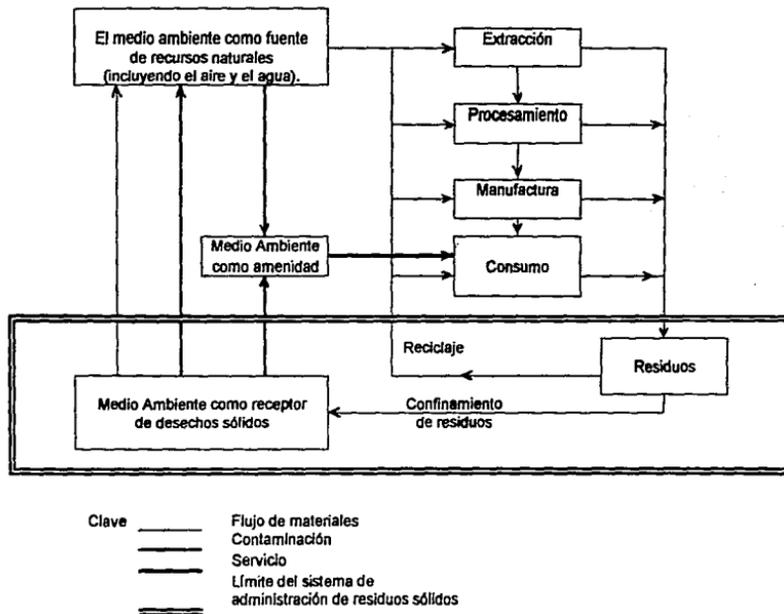


Figura 2. Administración de los desechos en una economía industrial

- Cenizas de incineración de combustibles
- Desechos mineros
- Desechos de la industria extractiva (canteras)
- Desechos de construcciones y demoliciones
- Desechos agrícolas
- Lodos provenientes del drenaje (al 5% de sólidos totales)
- Desechos médicos, quirúrgicos y veterinarios
- Desechos radioactivos
- Desechos provenientes de vehículos automotores e industria pesada
- Llantas
- Desechos provenientes de tratamientos de residuos (9).

Los desechos generados por actividades de minería y canteras, cenizas provenientes de la incineración de combustibles y los escombros pueden utilizarse como agregados o ser desechados en rellenos sanitarios. La mayoría de los desechos provenientes de actividades agrícolas son reciclados al suelo como parte de todo proceso agrícola bien controlado. Los desechos médicos y radioactivos requieren tratamientos y control especializados debido a su peligrosidad intrínseca. Los residuos de automotores y maquinaria pesada tienen altas posibilidades de reutilización como chatarra (19).

Por su parte, el manejo de los desechos municipales e industriales debe ser ejercido mediante un control más estricto. Los desechos industriales pueden ser de varios tipos y se clasifican en base a su estado físico (sólido, líquido, gas y lodos) y en base a sus propiedades (inerte e inflamable, potencialmente inflamable y/o biodegradable) y aquellos que requieren de tratamiento especial para su confinamiento. Cabe señalar que no todos los residuos generados en la industria son de naturaleza asociada al proceso que se lleva a cabo en la planta, ya que por lo general una proporción significativa de ellos proviene de las oficinas y comedores. Los desechos municipales se generan diariamente en proporciones altísimas y

deben ser colectados, ya sea por la autoridad local o por alguna firma local autorizada. Tanto la cantidad como la composición del desecho municipal presentan un amplio rango de variación diaria y estacional. Existen diferencias considerables no solamente de una localidad a otra sino de un vecindario a otro, por lo que cualquier estudio de manejo de residuos sólidos debe llevarse a cabo asociado a una composición específica, sin que nada pueda sustituir un análisis local del tipo de desechos a tratar (9).

3.1.1.2 TIPO

Según el tipo, los desechos sólidos se clasifican en cuanto al material de que se encuentran constituidos. Las categorías más importantes son:

- Orgánicos
- Papel
- Textiles
- Plásticos
- Metales
- Vidrio
- Humedad y Aire mezclados. Esta categoría se toma en cuenta debido a la alta proporción de volumen que ocupa. (9).

En términos generales, el contenido de papel de desecho en los países industrializados se encuentra dentro del rango de 20 a 70%, mientras que en los países subdesarrollados va de 5-20%. Por el contrario el contenido de material vegetal y putrescibles se encuentra en rangos de 15 a 50% y de 50 a 80% respectivamente. Estas diferencias tan grandes tienen un efecto significativo en el tipo de proceso a emplear para el tratamiento de cada composición dada de desechos. Los empresarios de países subdesarrollados deben tener muy en cuenta esta diferencia, antes de invertir en equipos importados para tratamiento de desechos sólidos municipales; ya que una tecnología, que pueda resultar excelente para el tratamiento de una composición dada de desechos, va a resultar forzosamente

ineficiente al ser operada bajo una composición de desechos totalmente distinta. Cualquier tipo de equipo, debe considerar la composición del desecho a tratar dentro de sus criterios de diseño (9).

La proporción en el contenido de metales globalmente varía entre 1-10%, mientras que el vidrio abarca rangos del 1-20%. El contenido de plástico, aumenta con respecto al tiempo con velocidades vertiginosas. Actualmente se encuentra entre 2-13% (9).

La Tabla 2 muestra los porcentajes que actualmente se toman como promedio en el bloque de países desarrollados (9).

Tabla 2. Composición Nominal de desechos en los países desarrollados (9).

Componente	% Peso Húmedo	% Contenido de Humedad	% Peso Seco
Materia particulada	12.00	25.00	9.00
Orgánicos	20.00	52.50	9.40
Papel	40.00	22.70	30.90
Textiles	3.00	25.00	2.20
Hule, piel y madera	5.00	13.60	4.30
Plásticos	3.00	15.00	2.60
Metales Ferrosos	7.60	5.00	7.20
Aluminio	0.50	5.00	0.50
Metales no-ferrosos	0.10	5.00	0.10
Vidrio	9.00	2.00	8.80
Humedad	---	---	25.00
Valor Promedio Total	100.00	24.95	100.00

3.1.1.3 Potencial de reutilización

Dentro de este aspecto, no existen definiciones estáticas. Conforme avanza el tiempo y dada la urgencia del momento, surgen

grandes variedades de tecnologías alternativas, para la reutilización de desechos de diversos tipos y el reciclado a materias primas (9).

Las posibilidades de recuperación de recursos en desechos sin procesar se limitan a la pepena, a la extracción magnética de metales ferrosos y a la recuperación de metano, producto de la descomposición anaerobia. En términos generales, para que pueda existir una recuperación de recursos verdaderamente útil, las fracciones orgánicas e inorgánicas deben estar separadas, usando la primera como fuente de energía y la segunda como fuente de materiales. A fin de lograr esta separación, comúnmente se utilizan tres procesos: Separación Seca, Pulverización Húmeda y Pulpa Húmeda, los cuales serán discutidos posteriormente dentro de este capítulo.

Recuperación de Materiales

La fracción inorgánica de los desechos puede ser tratada a fin de separar los materiales ferrosos de los no ferrosos, y el vidrio. La separación de materiales no ferrosos y vidrio se encuentra en una etapa en que han surgido varios métodos a partir de la aplicación de tecnologías basadas en propiedades diferenciales de los materiales tales como densidades, comportamiento frente a corrientes electrostáticas, flotación de espumas y separación colorimétrica del vidrio (9).

Recuperación de energía

La fracción orgánica es separada para recuperar cierto tipo de materiales, pero principalmente para recuperar energía, dada la enorme riqueza de ésta que se encuentra encerrada dentro de las estructuras orgánicas. Una alternativa para recuperación de energía proveniente de fuentes orgánicas de desecho es el compostaje. También puede ser tratada mediante métodos térmicos, combustión o conversión bioquímica de desechos para obtener gases combustibles (9).

3.2 TECNOLOGIAS PARA EL MANEJO DE DESECHOS SOLIDOS

3.2.1. RELLENOS SANITARIOS

Dado que el uso de los Océanos como sitio de confinamiento de desechos municipales ha quedado estrictamente prohibido por legislación internacional, el relleno sanitario se considera la única operación a través de la cual se logra un confinamiento final de los desechos sólidos, ya que el resto de la operaciones traen consigo la generación de productos o subproductos que deben ser confinados o relocalizados para su uso posterior (9).

Relleno sanitario es el nombre que se le da a la operación de confinamiento de desechos en el subsuelo, la cual ha sido correctamente diseñada y controlada durante todo el proceso de descomposición de los residuos (9).

Es importante tener en cuenta que un sitio de relleno no debe ser considerado de la misma forma que un tiradero a cielo abierto, un relleno sanitario moderno debe ajustarse a procedimientos estrictos en su operación, basados en principios de ingeniería. La selección y el manejo de cada relleno debe estar soportado por la comprensión científica del comportamiento de los materiales de desecho, bajo las condiciones ambientales en las que se construye el relleno (9).

Sin embargo la realidad histórica del manejo de los rellenos sanitarios ha dado lugar a la siguiente clasificación:

3.2.1.1 Tiradero a cielo abierto

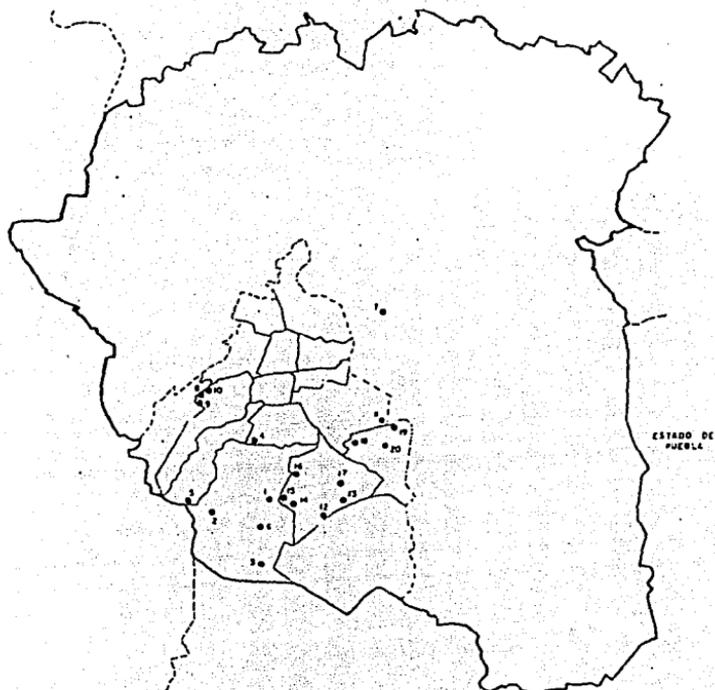
La forma más simple para deshacerse de los residuos ha sido a lo largo de la historia, el tiradero a cielo abierto, que puede ser de tipo localizado o difuso. El primero es un sitio donde se acumulan los desechos sistemáticamente; el segundo se forma con diversos focos dispersos a lo largo de las zonas habitacionales. Estos tradicionalmente se han ubicado en barrancas y pequeños cañones,

el vaso de alguna laguna o lago seco, la orilla de un río o alguna depresión en el terreno. Muchos de estos lugares han sido señalados como altamente peligrosos ya que pueden entrar en contacto con escurrimientos de lluvia, cauces y mantos freáticos. Los factores para la elección de los sitios han sido por lo general arbitrarios, puesto que no han considerado a fondo su impacto ambiental. La interacción del ambiente con la basura rara vez es monitoreada, los riesgos ecológicos se han dejado al azar y no se mantiene un control estricto sobre el confinamiento de los residuos ahí depositados. En el D.F. y zonas aledañas hay un sinnúmero de tiraderos, oficiales y clandestinos, así como tiraderos que se encuentran ya cerrados. Todos estos presentan un peligro ambiental de gran magnitud, puesto que apenas está comenzando su larga vida de interacción ambiental (4).

En las figuras 3 y 4 se muestra un panorama de la ubicación geográfica de los principales basureros y rellenos sanitarios que operan actualmente y que operarán en un futuro en la zona Metropolitana de la Ciudad de México respectivamente (4).

3.2.1.2 Relleno Sanitario Antiguo

Este método de confinamiento de residuos sólidos se inició a fines del siglo pasado, pero se desarrolló y adaptó finalmente en la época de la postguerra. El objetivo que se perseguía era prevenir la diseminación de enfermedades contagiosas, controlar los procesos de descomposición orgánica de los desechos y atenuar los olores e impresión visual que generaban los tiraderos a cielo abierto. La idea se materializó con la aplicación de técnicas de nivelación diaria de los desechos para cubrirlos finalmente con una capa de arena. Al saturar la capacidad del sitio se cubre el predio del relleno con una capa gruesa de tierra y vegetación de algún tipo. A diferencia del relleno sanitario contemporáneo, el antiguo no contaba con una capa de impermeabilizante en el fondo para evitar las filtraciones al subsuelo. En aquella época se asumía que los procesos de descomposición transformarían los desechos en una composta rica e inofensiva. Actualmente la situación ha cambiado diametralmente



<u>Relleno Sanitario</u>	<u>Ubicación</u>	<u>Relleno Sanitario</u>	<u>Ubicación</u>
1 LA CHINITA	TLALPAN	11 SANTA CATARINA	12 WAPALAPA
2 LLANO DEL VIDRIO	TLALPAN	12 SN. BARTOLO XICOMULCO I	XOCHIMILCO
3 EL GUARDA (PARRÉS)	TLALPAN	13 SN. BARTOLO XICOMULCO II	XOCHIMILCO
4 PLANTA DE ASFALTO	COXDACAN	14 SLMATEO KALPA I	XOCHIMILCO
5 VALLE DEL TEZONILE	M. CONTRERAS	15 SLMATEO KALPA II	XOCHIMILCO
6 EL OYAMEYO	TLALPAN	16 SANTIAGO TEPALLATLAPAN	XOCHIMILCO
7 BORDO PONIENTE	MPIO. TEXCOCO	17 STA. CRUZ ACALPIXCA	XOCHIMILCO
8 SANTA FE I	A. OREGÓN	18 VOLCAN XALTEPEC	TLAHUAC
9 SANTA FE II	A. OREGÓN	19 VOLCAN GUADALUPE	TLAHUAC
10 BARRANCA DE TLAPIZAHUAYA	A. OREGÓN	20 STA. CATARINA YECAMUZOTL	TLAHUAC

Figura 3. Ubicación de Tiraderos y Rellenos Sanitarios Actuales

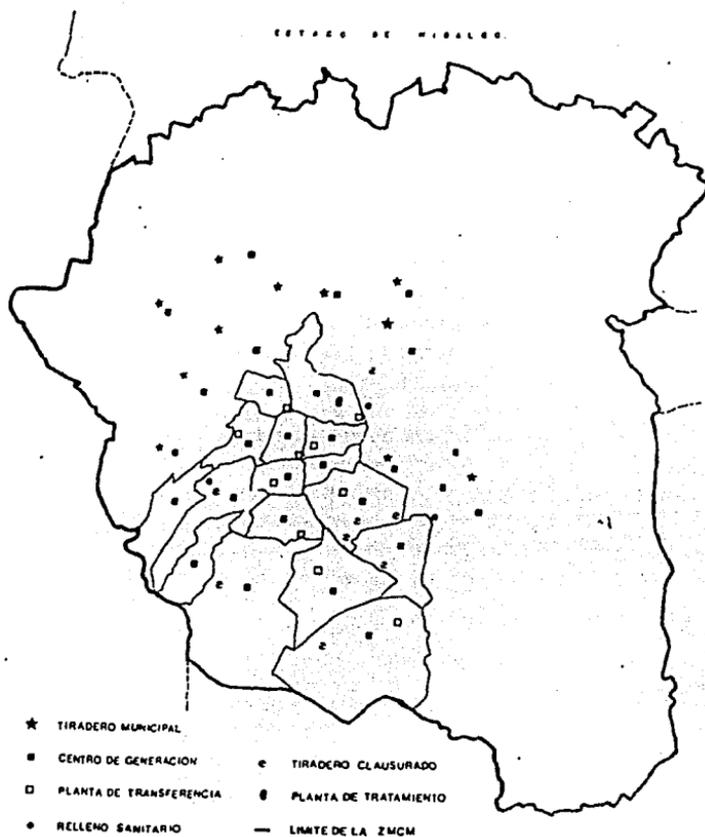


Figura 4. Ubicación de Tiraderos y Rellenos Sanitarios en Planeación

pues los desechos depositados llegan a contener ahora sustancias tóxicas y contaminantes (4).

El relleno sanitario antiguo se vio como una posibilidad de confinamiento viable, en una época en la que la industria química no ofrecía una variedad tan grande de sustancias y materiales químicos como los que se emplean en los procesos industriales modernos. Sin embargo, ya no tiene cabida en la época actual; desde hace varias décadas debió haber cedido su lugar por completo a los nuevos métodos de confinamiento, los cuales exigen un riguroso control de todos los desechos que entran al sitio, así como de su disposición. Desgraciadamente ésta no es la situación actual de nuestro país (4).

3.2.1.3 Cuasi-rellenos

Este tipo de relleno es una combinación de diseño y operación frecuentemente aplicado en México, especialmente en el D.F. Un cuasi-relleno es un tiradero, el cual por lo menos en apariencia, es convertido en un relleno sanitario. La mayoría de las zonas de depósito de residuos sólidos en México son, o han sido tiraderos a cielo abierto y las autoridades han tratado de mitigar su impacto con acciones parciales que buscan transformar el tiradero en relleno sanitario. El resultado de su operación deja mucho que desear, principalmente porque existe un control mínimo o nulo de los residuos que entran, así como de la operación en general de este tipo de confinamientos (4).

3.2.1.4 Rellenos sanitarios contemporáneos

El relleno sanitario contemporáneo requiere de varios elementos básicos para funcionar adecuadamente:

- El estudio detallado del sitio de ubicación.
- La instalación de una capa de impermeabilizante de materiales sintéticos o de arcillas que garanticen la imposibilidad absoluta de infiltraciones de lixiviados hacia mantos terrestres o acuíferos inferiores.

- **Instalación y mantenimiento de un sistema de recolección y tratamiento de subproductos del relleno (lixiviados y gases)**
- **Control estricto de los desechos que se introducen para garantizar que los residuos peligrosos no tengan cabida bajo ninguna circunstancia (4).**

Los principios de administración de todo relleno deben ajustarse a cuatro principios básicos:

- **El espacio hueco disponible en el sitio debe aprovecharse al máximo asegurando una completa compactación previa (9).**
- **Los problemas de contaminación de agua y generación de gases deben ser minimizados y atendidos a fin de evitar desequilibrios ecológicos o contaminación ambiental (9).**
- **Los problemas macroambientales, tales como olores, riesgos de incendio, predadores (insectos, roedores y aves detritívoras), esparcimiento vía aire de partículas de desecho y contaminación visual; deben eliminarse o mantenerse a niveles mínimos (9).**
- **La administración del relleno debe contemplar el uso posterior que se le dará al terreno plano una vez terminada su función de sitio de confinamiento (9).**

Los métodos de confinamiento de desechos varían ampliamente. Sin embargo, en términos generales una buena operación implica que los desechos sean depositados y compactados en capas y que éstas sean cubiertas por material inerte en toda el área de exposición por lo menos una vez al final de cada jornada de trabajo. El material de recubrimiento puede obtenerse mediante excavaciones previas al inicio de operaciones del relleno en el mismo sitio, puede comprarse para tal fin, pudiendo también utilizarse cierto tipo de desechos inertes. La máxima profundidad aconsejada es de 2.5 m. con una cubierta de material diaria de 15 cm. de altura mínima. La regularidad con que se cubren los desechos ayuda a reducir las molestias ambientales asociadas con los rellenos sanitarios, así como su impacto visual. La compactación de desechos ayuda a evitar la proliferación de gusanos e insectos dentro del relleno mismo y sin

embargo en ocasiones se requieren otros métodos suplementarios como control regular de plagas. Muchos otros desechos pueden ser depositados conjuntamente con desechos municipales en los rellenos sanitarios, por ejemplo se tienen desechos voluminosos, incluyendo muebles y electrodomésticos, alimentos en descomposición y cadáveres animales. Los objetos huecos deben ser pulverizados tanto como sea posible a fin de minimizar asentamientos desiguales en el sitio (9).

El relleno sanitario ha sido ampliamente utilizado por varios años, aún cuando los métodos de operación han variado. Actualmente dan cabida aproximadamente al 90% de los desechos municipales en E.U.A., 86% en Inglaterra, 60-70% en otras naciones europeas y 50% en Japón (9).

El relleno sanitario puede ser contemplado como un reactor biológico en el cual los desechos se descomponen a través del tiempo. Al ocurrir esto, la temperatura en el interior aumenta, dando lugar a riesgos de incendio, especialmente si el lugar no es manejado adecuadamente. Los asentamientos tienen lugar conforme la descomposición va llevándose a cabo, cualquier cantidad de aire presente en los intersticios de los desechos es consumida rápidamente al inicio de la descomposición, de tal manera que la mayor parte de ésta se lleva a cabo anaerobiamente. Los gases producidos son generalmente una mezcla de dióxido de carbono ácido sulfhídrico, amoníaco y metano los cuales se pueden considerar, ya como un peligro potencial o como una fuente de recuperación dependiendo de las circunstancias. Los problemas de contaminación pueden surgir a partir de dos fuentes principales:

- A través de la producción de lixiviados mineralizados, altamente contaminantes, generados cuando el material en descomposición entra en contacto con agua.
- A través de los gases generados por la degradación biológica de los desechos.

3.2.1.5 Contaminación de aguas.

Los procesos involucrados en la contaminación de agua por la operación del relleno sanitario pueden resumirse de la siguiente manera:

- La infiltración de cantidades de agua adicionales a la contenida en los desechos sólidos y a la generada durante las primeras etapas de su descomposición, llevadas por lluvias y fenómenos de drenaje o por la disposición de desechos líquidos en el relleno puede aumentar la proporción de lixiviados dentro del mismo. A fin de prevenir esta situación es recomendable la construcción de canales sobre la cubierta superior del relleno diseñados con una cierta inclinación de manera que imposibiliten la entrada de agua al sitio de relleno transfiriéndola a terrenos aledaños evitando dañar así el ecosistema natural y su balance de agua (9).
- Los lixiviados pueden filtrarse a terrenos colindantes al relleno ya sea vertical u horizontalmente. Los movimientos laterales pueden darse cuando existen capas intermedias impermeables o cuando la permeabilidad de los desechos se ve altamente disminuida por exceso de compactación (9).
- Los lixiviados también pueden filtrarse verticalmente a través de la estructura rocosa debajo del sitio de relleno moviéndose por sitios insaturados hasta alcanzar los mantos acuíferos. Al mezclarse con el agua contaminan diferentes sitios de extracción y aguas provenientes de otras fuentes (9).

A fin de evitar que durante la operación del relleno, los lixiviados entren en contacto con mantos acuíferos subterráneos o con cuerpos de agua superficiales pueden llevarse a cabo dos tipos de estrategia:

- Elección de un sitio que cuente con una cantidad de espacio suficiente para contener los desechos y los lixiviados generados, sin que exista la posibilidad de filtraciones posteriores, evitando además que el nivel de líquidos se eleve hasta el punto de generar derrames, pudiendo contaminar corrientes superficiales.

- Elección de un sitio que permita un drenado excesivamente lento de los lixiviados, de manera que su uso como relleno sanitario no implique contaminación.

Al aumentar el grado de concientización acerca de los riesgos de contaminación de aguas que implica la operación de un relleno sanitario, así como la mayor demanda de los mismos, dada la creciente producción de desechos sólidos municipales, los sitios disponibles para ser utilizados como rellenos cerca de las grandes ciudades disminuyen rápidamente. El transporte directo en camiones recolectores es a la vez caro e inconveniente, con lo que en la actualidad se ha desarrollado un número cada vez mayor de estaciones de transferencia, en las cuales los desechos pasan a medios de transporte más convenientes y económicos mientras que los camiones recolectores y sus operarios continúan con sus tareas. La estación de transferencia puede consistir en una simple plataforma de concreto en la cual el desecho es vertido y posteriormente cargado en vehículos abiertos para ser transportado a una planta compactadora y de ahí a su destino final en el relleno sanitario (9).

3.2.1.6 Generación de gases.

Conforme la biodegradación del relleno se va llevando a cabo, la composición de los gases que se generan en su interior va variando. Durante la fase inicial de degradación, el oxígeno disponible es consumido en forma de CO_2 . Conforme las condiciones se vuelven anaerobias, la concentración de este gas va siempre en aumento y comienza a disminuir conforme la cantidad de metano aumenta. Por lo general, existe también un pico de hidrógeno que puede alcanzar una concentración de 20 % en mol. Si no existe un ingreso de aire significativo, los niveles de nitrógeno molecular disminuyen a cero, después de varios años se alcanza una concentración de equilibrio del 50 al 60% de metano y 40 - 50% de dióxido de carbono (9).

En el pasado, el gas generado era considerado como una molestia olfativa, asociada a la presencia de concentraciones de sulfuros. Actualmente se sabe que los gases generados deben ser

atendidos como parte de la administración del relleno. Si el movimiento de los gases se restringe, mediante capas de material impermeable, se corre el riesgo de explosión. Debido a esto se ha hecho necesaria la construcción de instalaciones de colección de gases los cuales son venteados o quemados de manera controlada, generando también contaminación atmosférica; en el mejor de los casos dichos gases pueden ser reutilizados como energéticos, ya que el encarecimiento de éstos ha traído la posibilidad de ver en los rellenos sanitarios una fuente potencial de gases combustibles. Desde que la idea surgió en California en 1973, la investigación en este campo ha aumentado enormemente. Proyectos más recientes se han enfocado hacia el uso directo de estos gases en la industria de altos hornos, incluyendo plantas productoras de cemento y de ladrillo. Las condiciones requeridas para optimizar la producción de gas proveniente de rellenos, todavía no están bien establecidas. Sin embargo se establecen analogías con las condiciones bajo las que se efectúan las digestiones anaerobias convencionales para desechos, para las cuales las condiciones están bien documentadas y establecidas (9).

3.2.2. INCINERACION

La incineración de los residuos sólidos municipales es un proceso de tratamiento que consiste en la transformación de la fracción combustible de aquellos en un producto gaseoso, fundamentalmente bióxido de carbono y vapor de agua, y un producto sólido relativamente inerte y libre de microorganismos compuesto por escorias y cenizas, en base a una combustión controlada, vía oxidación a altas temperaturas (10).

Durante siglos se han utilizado fuegos abiertos para quemar desechos combustibles. Sin embargo, la primera planta a gran escala diseñada con este fin fue construida en Inglaterra en 1870 (9).

Actualmente, la incineración se ha constituido en una tecnología desarrollada y ambientalmente aceptada, mediante la cual se confina el 5% de los desechos generados en E.U.A., el 10% de los generados en

Inglaterra, del 20-30% de los generados en la mayor parte de las naciones europeas y el 46% en Japón (9).

El proceso básico de incineración es relativamente simple, en la figura 5, se muestra el diagrama de flujo de proceso, el cual se lleva a cabo de la siguiente manera:

El material de desecho almacenado en una bodega, se carga mediante una grúa a un horno con recubrimiento refractario, a fin de garantizar la combustión completa de los residuos, la cual se alcanza mediante el control de la temperatura, de la cantidad de aire en exceso, del manejo de los gases en un régimen de flujo turbulento, del tiempo de residencia en la zona caliente y del tiempo de retención de las cenizas antes de la descarga (9).

Los productos que se obtienen a partir de dicho proceso son:

- Gases y vapores: Después de lavarse se encuentran en un estado adecuado para arrojarse a la atmósfera.
- Cenizas inorgánicas: Pueden sufrir algún método de tratamiento posterior para recuperación de materiales elementales, o ser confinadas en rellenos sanitarios.
- Efluentes: Provenientes del proceso de enfriamiento de gases y cenizas.
- Calor: Se puede utilizar para la generación de vapor o de electricidad.

Las consideraciones de diseño y operación que se listan a continuación, se deben de seguir a fin de alcanzar una óptima combustión (9):

1. En todo momento debe suministrarse la cantidad necesaria de aire en exceso.
2. El control de temperatura debe ser estricto, el rango de temperatura adecuado va de 750-1000 °C para asegurar la combustión adecuada de todos los desechos, sin correr el riesgo de que las cenizas se fundan. Un buen método de control de temperatura

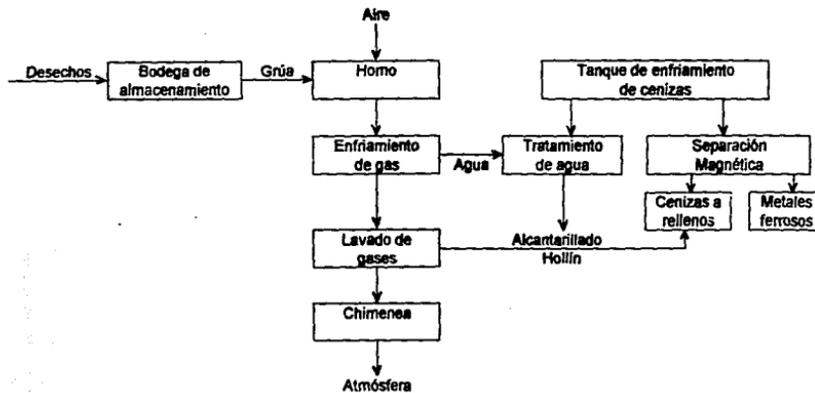


Figura 5. Incineración. Diagrama de flujo de proceso

puede ser mediante adición de aire al horno, en caso de ser requerido.

3. Se debe alcanzar una buena mezcla de gases. Para asegurar esta condición, generalmente se alimenta aire a alta presión en la cámara de combustión.
4. También es necesario que exista cierta turbulencia en el lecho de incineración. Por lo general los hornos ya cuentan con algún dispositivo que genera esta condición.

3.2.2.1 Parámetros involucrados en el proceso de incineración

I. Humedad

El agua contenida en los desechos sólidos no solamente no aporta calor, sino que lo toma de la combustión de éstos para su evaporación, por lo que su control constituye un parámetro de suma importancia para la operación adecuada del proceso de incineración. La humedad contenida en los residuos puede disminuirse en el proceso de incineración mediante una fase de precalentamiento utilizando para ello el calor de los gases generados en el proceso mismo (10).

II. Material Inerte

Dentro de esta categoría se incluye material mineral, metales, botellas, latas, etc., los cuales se encuentran en los residuos sólidos municipales en un rango del 15-40%. La mayor proporción en peso de estos materiales se debe a cantidades importantes de escombros y material de construcción (10).

III. Poder calorífico

Se define como la cantidad de calor que se desprende por la combustión completa de la unidad de masa correspondiente. El combustible y el comburente son tomados a una temperatura y presión de referencia y los productos son llevados a las mismas condiciones (10).

3.2.2.2 Productos de incineración

I. Gases

Los gases resultantes del proceso de incineración, contienen principalmente dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno en exceso, además de partículas de polvo (aproximadamente 1-5% del peso de residuos alimentados al incinerador), las cuales requieren de un proceso de lavado antes de descargar. Existen varios métodos que pueden utilizarse con este fin, incluyendo cámaras de asentamiento (que remueven aproximadamente 40% de partículas), mallas de baffle húmedo (50%), ciclones (60-80%), lavadores húmedos (80-95%) precipitadores electrostáticos (96-99.5%) y filtros de bolsa (99.9%). La elección del método depende principalmente del tamaño de partícula y de la eficiencia requerida. Para partículas gruesas (mayores de 10 μm) se puede utilizar cualquier método, sin embargo para partículas más pequeñas (5 μm o menores), la elección varía entre precipitadores electrostáticos o filtros de bolsa, los cuales tienen la desventaja de que representan una inversión grande. Adicionalmente a la remoción de partículas es necesario quitar gases ácidos, si los niveles sobrepasan los límites de descarga permitidos. El ácido clorhídrico, óxidos de nitrógeno, azufre y fósforo, así como los metales volátiles tales como plomo, cobre, zinc, cadmio, mercurio, arsénico y antimonio, también deben ser removidos, mediante lavadores húmedos de alta energía o filtros de bolsa (9).

Los problemas relacionados con los gases de lavado también deben ser considerados dentro del diseño de los hornos, ya que la presencia de partículas fundidas y ácidos inorgánicos generan una atmósfera altamente corrosiva (9).

II. Cenizas

Las cenizas provenientes de un incinerador de residuos municipales, por lo general se descargan a un tanque de enfriamiento a base de agua, mediante una banda transportadora. Las cenizas ya frías se someten a una separación magnética de metales; sin embargo, ésta resulta de muy baja eficiencia, dada la alta proporción de compuestos a base de hierro presentes en diferentes estados de oxidación. La eficiencia de incineración se mide generalmente por el porcentaje de orgánicos no quemados en los residuos. Las especificaciones comunes permiten un 5% de carbón libre, y 0.3 % de orgánicos. El porcentaje de residuos resultantes, que deben ser enterrados es aproximadamente del 30% en peso seco de la cantidad de desechos alimentados. Actualmente en los países desarrollados se llevan a cabo grandes esfuerzos a fin de crear mercados para las cenizas producidas, especialmente en el área de construcción ya que éstas, aún cuando son inertes mientras permanecen secas, al ser enterradas en los rellenos y entrar en contacto con agua y líquidos producidos por la descomposición de otro tipo de residuos, generan grandes problemas de producción de lixiviados tóxicos con alto contenido de inorgánicos solubles. (9).

III. Agua

El agua de proceso se utiliza en cuatro puntos dentro del incinerador:

- Enfriamiento de cenizas (0.1 m³/t)
- Enfriamiento de gases (2 m³/t)
- Lavador húmedo (2 m³/t)
- En algunos precipitadores electrostáticos para remover partículas de los platos colectores.

Todos estos efluentes son altamente corrosivos y deben ser tratados antes de descargarse al sistema de drenaje (9).

3.2.2.3 Tipos de procesos de incineración

De manera general, los procesos comerciales de incineración, de acuerdo a los equipos utilizados pueden clasificarse de dos maneras:

I. Método de incineración continua

Este proceso posibilita la alimentación continua de los residuos al horno, la combustión de los mismos y la eliminación de cenizas a una cierta velocidad predeterminada de acuerdo a las características de los residuos. Este método es recomendable para el manejo de grandes volúmenes de residuos (10).

II. Método de incineración intermitente

Cuando se utiliza este proceso, los residuos sólidos se alimentan en cargas de volumen predeterminado al horno, se efectúa la combustión y posteriormente se desalojan las cenizas una sola vez, repitiéndose el proceso. Los equipos involucrados en este tipo de proceso son de construcción más simple y debido a sus características, es difícil asegurar la estabilidad de las condiciones de incineración. Su aplicación se recomienda para incineración en pequeña escala (27).

3.2.2.4 Principales Ventajas y Desventajas del Proceso de Incineración

I. Ventajas

- Permite una reducción del 80 al 90% del volumen original de los desechos.
- Elimina completamente los microorganismos dadas las elevadas temperaturas de combustión (800-900 C) y tiempos de residencia.
- Las condiciones climáticas y meteorológicas no afectan el proceso.
- El proceso requiere de poco espacio disponible, pudiendo

Instalarse dentro de una zona urbana.

- Bajo condiciones de operación adecuadas, es posible la recuperación de energía (10).

II. Desventajas

- Implica altos costos de inversión, operación y mantenimiento.
- Se requiere de personal altamente especializado para las actividades de operación y mantenimiento.
- Se requiere de programas y equipos de control de emisiones sumamente eficientes con objeto de prevenir la contaminación ambiental
- Se requiere siempre de algún método alternativo para la disposición final de las cenizas y escorias.
- Para residuos con bajo poder calorífico, no es posible obtener una autocombustión y es necesario utilizar combustible adicional.

3.3. SEPARACION FISICA DE MATERIALES DE DESECHO.

La mayoría de los procesos empleados para la recuperación de materiales a partir de desechos municipales, utilizan diferentes métodos de separación física de los elementos que los componen, estos métodos se pueden dividir en las siguientes categorías:

- **Separación primaria.**- Implica la separación de las fracciones orgánica e inorgánica.
- **Separación secundaria.**- Implica la separación de componentes particulares, por ejemplo, separación de materiales magnéticos de la fracción inorgánica.
- **Separación terciaria.**- Usada para dar mayor calidad a las fracciones separadas, por ejemplo extracción de vidrio de la corriente de contaminantes: cerámica, piedras, hueso (9).

Muchas de las propiedades de los componentes pueden utilizarse para la separación de éstos. Las más comúnmente aprovechadas son: tamaño de partícula, densidad, susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica, y color. Sin embargo dentro de ciertos procesos, también es posible aplicar algunas otras, incluyendo resiliencia, resistencia, maleabilidad, forma, área seccional, inercia, fricción ante el resbalamiento y condiciones de superficie (9).

3.3.1 Separación de las fracciones orgánica e inorgánica.

Existen tres alternativas generales para la separación primaria de los desechos municipales para obtener una fracción eminentemente orgánica y otra inorgánica. Estas pueden clasificarse en términos de los métodos iniciales para reducción del tamaño de partícula y son las siguientes:

- Pulverización Húmeda
- Pulpa Húmeda
- Separación Seca

3.3.1.1. Pulverización húmeda

El desecho sin tratamiento previo se humedece y posteriormente se introduce en un tambor de rotación lenta en el cual se obtiene una pulverización automática debido a la acción golpeante de los componentes más duros. Los desechos alimentados se separan en dos fracciones. La fracción fina pasa por una serie de mallas al final del tambor, esta fracción contiene aproximadamente el 60% del peso desecho seco, y tiene características fibrosas; el material es eminentemente orgánico, pero contiene una proporción muy alta de material vítreo mezclado. La fracción que queda en la parte final del tambor es una fracción eminentemente inorgánica, pero cuenta con ciertos materiales como plásticos y objetos de cuero (9).

3.3.1.2 Pulpas húmedas

Los desechos se introducen en el equipo de fabricación de pulpa en forma de lodos acuosos, (con un contenido de sólidos del 3-10%), en el que sufren una reducción de tamaño mediante una cuchilla segmentada giratoria a alta velocidad. Los desechos procesados pasan al fondo del dispositivo, mientras que los componentes que no son susceptibles de formar pulpa son lanzadas mediante métodos balísticos a la parte externa del tambor, de donde son removidos. La fracción convertida en pulpa es principalmente orgánica, la parte inorgánica contenida dentro de la pulpa, que consiste en vidrio principalmente, se separa mediante un ciclón de fase líquida (9).

Se han propuesto varios usos para la pulpa generada que van desde recuperación de fibra, secado de la misma para su venta como combustible, hasta incineración (9).

3.3.1.3 Separación seca.

Este método de separación primaria se utiliza más comúnmente para recuperación de residuos sólidos. Los procesos implicados en esta operación son:

- Reducción de tamaño
- Cribado
- Clasificación por inyección de aire
- Separación magnética

En la figura 6 se presenta un diagrama de flujo de proceso general, sin embargo dentro de esta operación existe un número infinito de variantes posibles (9).

3.4 COMBUSTIBLES DERIVADOS DE DESECHOS ORGANICOS (RDF)

El uso de combustibles derivados de desechos orgánicos es un desarrollo relativamente moderno que busca aprovechar el alto índice de

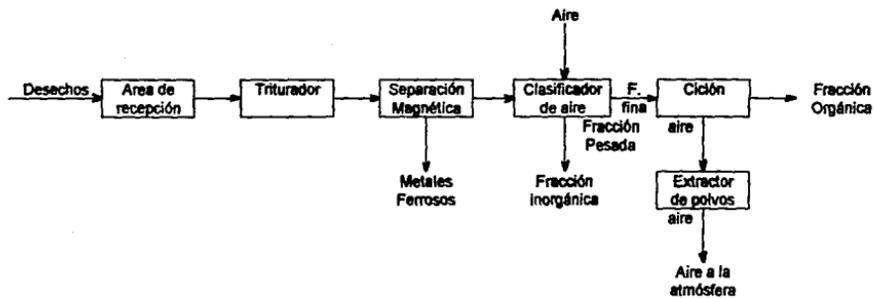


Figura 6. Separación Seca. Diagrama de flujo de proceso

energía contenida en la materia orgánica de desecho, la cual tiene buenas propiedades combustibles, al convertirla en sustituto de los energéticos comúnmente utilizados, que cada vez son más escasos y por lo tanto más costosos; al mismo tiempo que se evita una fuente de contaminación potencial de suelos al confinar la materia orgánica en rellenos sanitarios.

Aún cuando esta tecnología constituye un desarrollo relativamente nuevo, una gran cantidad de procesos y de alternativas de uso se han diseñado para ellos. Varias plantas comerciales se encuentran operando tanto en Europa como en E.U.A., y desde el inicio de su fabricación se ha pensado en el RDF como en un sustituto para el carbón en procesos industriales convencionales o como fuentes de poder de calderas. La variedad de procesos existentes para la fabricación de RDF se debe a que se busca darles especificaciones tales que puedan ser utilizados en una amplia gama de equipos industriales. Uno de los campos de aplicación más importantes que se presentan para los RDF son las plantas productoras de cemento, ya que la alta cantidad de cenizas que éstos generan forman parte del producto final del proceso (9).

Los tres métodos vistos en la sección anterior de separación de la fracción orgánica de los desechos sólidos pueden aplicarse para la producción de RDF (9).

- **Pulverización Húmeda.**- Produce una fracción orgánica altamente fibrosa y fina, contaminada con residuos de vidrio. El contenido de humedad es más alto que el de los desechos de alimentación, en un rango del 40-60 %. Los resultados obtenidos en quemadores de prueba son bastante promisorios (9).
- **Pulpa Húmeda.**- A partir de este proceso se obtienen lodos acuosos que contienen la fracción orgánica. Ya sea la corriente orgánica total o los subproductos del proceso de recuperación de fibra, pueden ser desecados y venderse como RDF (9).
- **Separación seca.**- Los procesos de separación seca, dada la variedad de procesos, pueden producir varias calidades de RDF, dependiendo principalmente en el grado de separación de materiales inorgánicos y de los componentes orgánicos de plásticos y papel. La

energía contenida en la materia orgánica de desecho, la cual tiene buenas propiedades combustibles, al convertirla en sustituto de los energéticos comúnmente utilizados, que cada vez son más escasos y por lo tanto más costosos; al mismo tiempo que se evita una fuente de contaminación potencial de suelos al confinar la materia orgánica en rellenos sanitarios.

Aún cuando esta tecnología constituye un desarrollo relativamente nuevo, una gran cantidad de procesos y de alternativas de uso se han diseñado para ellos. Varias plantas comerciales se encuentran operando tanto en Europa como en E.U.A., y desde el inicio de su fabricación se ha pensado en el RDF como en un sustituto para el carbón en procesos industriales convencionales o como fuentes de poder de calderas. La variedad de procesos existentes para la fabricación de RDF se debe a que se busca darles especificaciones tales que puedan ser utilizados en una amplia gama de equipos industriales. Uno de los campos de aplicación más importantes que se presentan para los RDF son las plantas productoras de cemento, ya que la alta cantidad de cenizas que éstos generan forman parte del producto final del proceso (9).

Los tres métodos vistos en la sección anterior de separación de la fracción orgánica de los desechos sólidos pueden aplicarse para la producción de RDF (9).

- **Pulverización Húmeda.**- Produce una fracción orgánica altamente fibrosa y fina, contaminada con residuos de vidrio. El contenido de humedad es más alto que el de los desechos de alimentación, en un rango del 40-60 %. Los resultados obtenidos en quemadores de prueba son bastante promisorios (9).
- **Pulpa Húmeda.**- A partir de este proceso se obtienen lodos acuosos que contienen la fracción orgánica. Ya sea la corriente orgánica total o los subproductos del proceso de recuperación de fibra, pueden ser desecados y venderse como RDF (9).
- **Separación seca.**- Los procesos de separación seca, dada la variedad de procesos, pueden producir varias calidades de RDF, dependiendo principalmente en el grado de separación de materiales inorgánicos y de los componentes orgánicos de plásticos y papel. La

mayoría de los procesos de producción de RDF se basan en procesos de separación seca (9).

3.4.1 Producción de RDF

El proceso más simple de producción de RDF implica la molienda de los residuos en un molino de martillos y la separación de los metales por extracción magnética, el tamaño de partícula debe ser sometido a un control más estricto, ya sea mediante el uso de un molino capaz de producir una fracción homogénea de partículas finas o mediante una etapa de cribado y remolido, el tamaño de partícula apropiado debe ser menor de 50 mm. La mayoría de los procesos de fabricación de RDF utilizan un proceso de clasificación mediante corrientes de aire, para separar los compuestos inorgánicos que por lo general tienen una relación peso/tamaño mayor que las partículas de RDF. También es conveniente aclarar que existe una enorme variedad de tipos de RDF según el número de etapas de separación de fracciones con que cuenta cada proceso (9).

Actualmente, la mayoría de los procesos de fabricación de RDF involucran una fase final de peletización a fin de facilitar el almacenamiento y la comercialización del producto (9).

Entre los problemas que el manejo de RDF trae consigo podemos mencionar los siguientes:

- Varias plantas se han enfrentado con la falta de mercado para su producto.
- Varias plantas han reportado problemas con el manejo y transporte de materiales.
- El RDF al quemarse produce un alto contenido de cenizas, las cuales pueden sobrepasar la capacidad de las instalaciones para su manejo.
- El RDF puede presentar problemas de almacenamiento.
- En las instalaciones en las cuales se maneja el RDF, forzosamente se debe contar con equipo de control de polvos (9).

3.5.- PIROLISIS Y OTROS PROCESOS TERMICOS

El aprovechamiento de la materia orgánica residual mediante procesos de combustión incompleta se ha utilizado durante varios siglos. La carbonización de la madera a fin de producir carbón se ha llevado a cabo desde los tiempos antiguos. Sin embargo, a partir de los años sesenta el interés por el aprovechamiento de la materia orgánica ha tenido un gran resurgimiento, principalmente debido a la creciente escasez de combustibles fósiles por lo que han sido propuestos más de 150 procesos de fabricación de gases combustibles a partir de materia orgánica residual proveniente de desechos municipales, como una medida para enfrentar la crisis actual de energéticos. Sin embargo la mayoría de estos procesos solamente han sido probados a escala piloto, sin que muchos de ellos hayan dado resultados efectivos a gran escala (9).

Los procesos térmicos pueden subdividirse en varias categorías. El término pirólisis frecuentemente se utiliza como un término genérico para hacer referencia a métodos relacionados con la incineración, pero dicho uso no es del todo adecuado. A continuación se listan los procesos térmicos más comúnmente presentes al tratar desechos municipales.

- **Combustión.-** El término combustión implica la reacción de algún compuesto con el aire para producir calor y los productos de combustión que normalmente son: dióxido de carbono y agua. La combustión completa de diferentes tipos de desechos comúnmente recibe el nombre de incineración (9).
- **Pirólisis.-** Es la descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Los productos obtenidos pueden ser sólidos, líquidos y gases de diferentes clases. Los rendimientos alcanzados dependen generalmente de las condiciones de proceso. La destilación destructiva es un proceso especializado de pirólisis para producir productos líquidos, mientras que la carbonización genera productos sólidos, en su mayoría carbón (9).
- **Gasificación.-** El proceso de gasificación implica una reacción de combustión incompleta, debido a que la cantidad de oxígeno es

insuficiente para que se lleve a cabo la reacción y se presenta un cierto grado de pirólisis (9).

- **Hidrogenación o hidrogasificación.**- Este proceso implica la pirólisis de la materia orgánica en una atmósfera rica en Hidrógeno a fin de obtener principalmente productos líquidos y gaseosos (9).
- **Oxidación Húmeda.**- Es la reacción de algún lodo húmedo con alto contenido de materia orgánica con oxígeno en condiciones de alta presión y temperatura. Los productos que se obtienen son gases de bajo poder calorífico y una mezcla de ácidos orgánicos que pueden separarse y reutilizarse (9).

Cuando una corriente de RDF o de desechos sólidos municipales es alimentada en un proceso térmico, los productos obtenidos son muy variados dependiendo las condiciones del proceso. Se llevan a cabo una gran cantidad de reacciones químicas, muchas de las cuales pueden ser simultáneas. Los rendimientos relativos de los diferentes productos pueden controlarse mediante la manipulación de la química de los compuestos y la atmósfera en el interior del reactor, así como la temperatura (9).

La totalidad de los pocos procesos que actualmente se utilizan para tratamiento de desechos sólidos municipales en E.U.A. generan como resultado gases con bajo poder calorífico (9).

3.6.- PROCESOS BIOLÓGICOS

Los procesos biológicos de recuperación de desechos también tienen sus orígenes en la antigüedad. La agricultura primitiva dependía en gran parte del retorno del estiércol animal a la tierra para fertilizar la tierra y suministrarle materia orgánica. Este tipo de procesos como es de suponerse, se encuentra restringido en su mayoría a la fracción orgánica de los desechos municipales. Por esta razón, la mayor experiencia de operación en esta categoría se encuentra en aquellos países donde las fracciones orgánicas son más abundantes que las inorgánicas. La mayoría de los procesos biológicos, dada su naturaleza, requieren de una operación previa

de separación de la fracción inorgánica, principalmente los componentes metálicos y de reducción de tamaño de partícula (9).

Los diferentes procesos biológicos alternativos se muestran en el esquema de la figura 7 (9).

Desde la perspectiva biológica, el relleno sanitario se puede ver como un método ineficiente de compostaje y/o descomposición anaerobia. El método de compostaje será revisado en los capítulos siguientes. La celulosa, que conforma el componente más importante del papel puede ser hidrolizada, mediante los procesos de catálisis enzimática, para la obtención de glucosa, y esta a su vez se puede fermentar para obtener alcohol etílico o levadura (estructuras proteicas unicelulares). La hidrólisis alcalina se puede utilizar para remover la membrana de lignina y así aumentar la solubilidad y reactividad de la celulosa y obtener una mezcla de ácidos orgánicos de bajo peso molecular. Es importante hacer notar que el proceso de hidrólisis no genera ningún producto útil a partir de cualquier componente no celulósico de la corriente de desechos sólidos tratada. La digestión anaerobia de desechos orgánicos, en ausencia total de aire genera una mezcla de metano y dióxido de carbono. La reactividad de la fracción orgánica de los desechos municipales por lo general es baja y por lo tanto se obtiene una proporción importante de subproductos; esta situación puede atenuarse mediante un pre-tratamiento de hidrólisis de los materiales celulósicos. El proceso de reciclado anérido consiste en la alimentación de una población de lombriz roja con la corriente de residuos orgánicos, las cuales lo convierten en un buen fertilizante rico en materia orgánica. Por otra parte el exceso de lombrices puede someterse a un proceso de desecado para la fabricación de un suplemento alimenticio para animales, rico en proteínas.

El proceso de biofotólisis en términos generales ha recibido bastante poca atención a niveles comerciales. El proceso consiste en la reducción enzimática de agua contenida dentro de células vegetales, inducida mediante luz solar o ultravioleta para producir gas hidrógeno (9).

Dentro de esta categoría de procesos de aprovechamiento de residuos sólidos, únicamente tres procesos han alcanzado importancia a niveles comerciales: El compostaje, la hidrólisis y la digestión anaerobia. Sin embargo existe un interés creciente por el desarrollo de esta categoría de

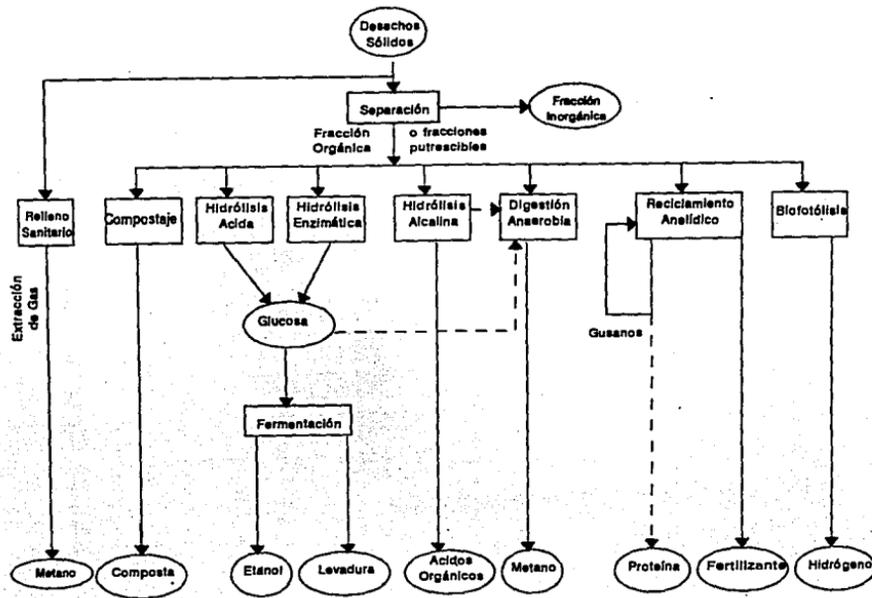


Figura 7. Procesos Biológicos de Tratamiento de Residuos Municipales

procesos, ya que a través de ellos los materiales orgánicos en desuso pueden ser reincorporados al medio ambiente del cual salieron de manera natural, reduciendo considerablemente las enormes pérdidas de energía, que trae consigo la aplicación de los métodos descritos en la primera parte de este capítulo. Además de que a través de su aplicación, en términos generales, se reduce la generación de subproductos contaminantes (9).

En el siguiente capítulo se discutirá la fundamentación teórica, el campo de aplicabilidad y las ventajas y desventajas del proceso de compostaje; una vez analizado éste, se establecerá un cuadro comparativo que incluirá todos los métodos de tratamiento y confinamiento de residuos tratados.

CAPITULO IV

CONSIDERACIONES TEORICAS ACERCA DEL COMPOSTAJE COMO OPERACION DE MANEJO DE DESECHOS SOLIDOS

4.1.- INTRODUCCION

El compostaje es uno de los métodos de tratamiento de residuos sólidos más antiguos que se conoce. Hacia 1909, el Dr. F.H. King del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, visita China y Corea en donde entra en contacto con la práctica del compostaje; más tarde, sus observaciones sirvieron de base a Sir Albert Howard quien en la India, inició la investigación científica en la cual se apoyó el proceso Indore, primer sistema de compostaje a gran escala.

Este proceso consistía en la formación de apilamientos de 2 pies de altura formados por capas intercaladas de estiércol, lodos de drenaje y heces humanas; con capas de materiales orgánicos más estables como paja, hojas, residuos de jardinería y residuos municipales; dentro de huecos cavados en la tierra o en recipientes de madera.

El apilamiento debía voltearse pasados 16, 30 y 60 días y permanecer durante un periodo total de 90 días, después de los cuales se transportaba a los campos (etapa de curado). El agua producida por los lixiviados se recirculaba, por lo cual, las condiciones de proceso eran en gran parte anaerobias.

Posteriormente se aplicaron ciertas mejoras al proceso:

- 1) Aumento del tamaño de las pilas a 3 pies de altura, alternando capas de hojas y residuos municipales de 6 pulgadas con capas de estiércol de 2 pulgadas.
- 2) Instalación de venteos verticales de aireación, contruidos mediante palancas dispuestas cada tres o cuatro pies a lo largo y a lo ancho de las pilas (15).

Con el avance tecnológico han surgido muchas variantes a partir de dicho proceso. Actualmente el proceso más comúnmente utilizado es el proceso Dano, que consiste en un dispositivo cerrado en forma de tanque horizontal, formado por un tambor rotatorio a baja velocidad provisto de un sistema de entrada forzada de aire y de agua. El tiempo de retención es aproximadamente de tres días, después de los cuales, la composta debe entrar en una etapa de curado en apilamientos (12).

4.2.- DEFINICION

El proceso de fabricación de composta es el método de tratamiento de la fracción orgánica de una corriente de residuos sólidos, la cual se descompone por acción de una población microbiana, en condiciones de humedad, alta temperatura y suministro de oxígeno controladas y aceleradas artificialmente, para formar un producto con características que permitan manejarlo, almacenarlo, y/o aplicarlo a la tierra, con fines de mejoramiento, sin provocar ningún efecto adverso al medio ambiente (14, 15).

La descomposición de los residuos se lleva a cabo mediante una serie de procesos metabólicos complejos, similares a los procesos que se llevan a cabo en los procesos de humificación en la tierra (14). La degradación de los compuestos se da por la actividad combinada de una amplia sucesión de poblaciones de microorganismos, principalmente bacterias, actinomicetos y hongos, cada una con un tiempo de vida y una actividad limitadas en la descomposición de algún tipo particular de sustrato. Su acción se manifiesta a través de cambios continuos de temperatura y composición generados por rompimientos progresivos de compuestos complejos para formar sustancias

más simples. Es necesaria la existencia de una gran variedad de microorganismos capaces de atacar diferentes sustratos para producir una descomposición rápida y satisfactoria, ya que una población homogénea, sin importar qué tan activa sea, jamás podrá llevar el proceso a término (16).

El proceso de compostaje puede dividirse en cuatro etapas: Etapa mesofílica, etapa termofílica, enfriamiento central y maduración. Al inicio del proceso, la masa de residuos se encuentra a temperatura ambiente y en condiciones de pH ligeramente ácidas (aproximadamente 5.7). La población mesofílica autóctona se multiplica rápidamente generando energía y un aumento constante en la temperatura. Entre los productos de esta etapa se encuentran los ácidos orgánicos simples, los cuales provocan un descenso en el pH. A temperaturas cercanas a los 40°C, la actividad de los organismos mesofílicos decae y la degradación subsecuente se lleva a cabo por la acción de organismos termofílicos, el pH se torna alcalino y si existe un exceso de nitrógeno presente que pueda ser rápidamente aprovechado, se libera en forma de amoníaco. A 60° C los hongos termofílicos desaparecen y las reacciones se llevan a cabo por bacterias formadoras de esporas. La hidrólisis y la subsecuente asimilación de materiales poliméricos es un proceso relativamente lento, lo cual provoca que el grado de generación de calor disminuya hasta llegar a temperatura ambiente. Al llegar a los 40 °C, los organismos mesofílicos reinician su actividad; estos pueden provenir de los microorganismos formadores de esporas resistentes al calor o directamente del exterior. El pH asciende para llegar en el producto final a rangos neutros o ligeramente alcalinos (16).

La duración total de la etapa de descomposición varía dependiendo del tipo de tecnología aplicada. Después de esto el producto puede pasar a una etapa final de curado, tras de la cual se obtiene un producto manejable y con características estables (14).

En ocasiones, el proceso puede llevarse a cabo solamente para reducir el volumen de los residuos, pero por lo general, tiene como fin último la generación de composta (12).

4.3.- IMPLICACIONES DE LA NATURALEZA BIOLÓGICA DEL PROCESO.

La mecánica microbiológica del proceso lo sitúa dentro de una categoría diferente al resto de los métodos de tratamiento y confinamiento de residuos sólidos empleados a escala comercial, tales como la incineración, el uso de rellenos sanitarios y la pirólisis (12).

En los procesos biológicos, la velocidad y el grado de predecibilidad son menores que en los procesos fisicoquímicos (12).

Los procesos biológicos son altamente sensibles ante cambios bruscos de condiciones, ya que si los rangos dentro de los que caen las condiciones vitales de las especies microbiológicas se exceden, éstas mueren (12).

La velocidad de degradación presenta un límite superior, asociado a las características genéticas de los organismos presentes, que no se puede sobrepasar mediante mejoras de proceso. Mientras mayor sea la variedad de los microorganismos existentes, mayor será la velocidad y la capacidad de descomposición del proceso (14).

Las condiciones ambientales, bajo las que se lleva a cabo el proceso, tienen una influencia trascendental sobre los organismos encargados de la degradación de la materia orgánica. Las diferentes tecnologías aplicadas al proceso de compostaje a nivel industrial, sirven para mantener las condiciones imperantes dentro de los niveles óptimos y dentro de un rango económicamente factible (14).

4.4.- MICROBIOLOGIA DEL PROCESO

4.4.1 Principales grupos de microorganismos

El proceso de producción de composta requiere de la presencia de tres grandes grupos de organismos:

Bacterias

- Actinomicetos
- Hongos

4.4.1.1 Bacterias

Las diferentes especies bacterianas se encargan de la descomposición inicial de la materia orgánica y de la generación de energía calorífica en el interior de la masa de composta, por lo que se constituyen en la fuente más importante de descomposición inicial. Las bacterias productoras de ácidos son numéricamente importantes en esta etapa. La mayor parte de las especies bacterianas cuenta con una alta capacidad de reproducción en proteínas solubles y otros sustratos fácilmente disponibles y presentan la mejor adaptabilidad a altas temperaturas, en las cuales las bacterias termofílicas se activan. En la temperatura límite, solo sobreviven las bacterias formadoras de esporas en el centro de la masa de composta.

Las especies bacterianas por gramo de sustrato pueden alcanzar cuentas de 10^8 a 10^{12} a temperaturas de 55-56 °C. A temperaturas termofílicas, pueden alcanzar cuentas aún mayores (14).

4.4.1.2 Actinomicetos

Los grupos de hongos y actinomicetos, aún cuando pueden utilizar como sustratos alimenticios varios tipos de nutrientes no se desarrollan sino hasta etapas avanzadas del proceso

Los actinomicetos constituyen una línea filogenética separada de los hongos y las bacterias, compartiendo varias características con los primeros, por lo que en ocasiones son clasificados incorrectamente. Producen cadenas de esporas polvosas y diminutas, llamadas conidios. Los filamentos de los actinomicetos, muy raras veces exceden 1 mm. de diámetro, forman colonias radiales en cultivos de agar, juegan un papel muy importante en la bioquímica de suelos y presentan su mejor adaptabilidad en condiciones húmedas y aerobias con pH ligeramente alcalino (14, 17).

La presencia de actinomicetos en una masa de composta procesada por medios no mecánicos es fácilmente detectable tanto visual como olfatoriamente, si el proceso se desarrolla correctamente. Después de cinco o seis días de haberse iniciado, es posible detectar un ligero olor a tierra húmeda que se vuelve más pronunciado conforme pasa el tiempo. En etapas más avanzadas de proceso, la presencia de este grupo es visualmente detectable, estructurado en forma de capas azul-verdosas de apariencia polvosa y filamentosa mezclada con cierta cantidad de hongos.

Este grupo de organismos puede utilizar como sustrato un amplio rango de compuestos orgánicos complejos, tales como azúcares orgánicos, levaduras, proteínas, polipéptidos, aminoácidos, hemicelulosa y celulosa. Su actividad más importante consiste en la ruptura de compuestos derivados de celulosa y lignina. El papel contenido dentro de las corrientes de desechos, comienza a desintegrarse cuando las poblaciones de actinomicetos comienzan a crecer. Dentro de los procesos de compostaje en plantas mexicanas, la cantidad de actinomicetos presentes, por lo general es menor que en plantas operadas en Estados Unidos y en Europa, porque la proporción de papel contenido en los residuos a tratar es menor que en estas últimas.

4.4.1.3 Hongos

Los hongos presentan rangos de crecimiento específico máximos menores que las bacterias. Bajo condiciones anaerobias los hongos se encuentran en desventaja con respecto a éstas, presentando mejor adaptabilidad en condiciones secas (14).

Dentro de la misma etapa de proceso y en zonas similares a las que se encuentran los actinomicetos, es posible detectar varias especies del reino fungi, las cuales son bastante más fáciles de identificar que los primeros. El rol que llevan a cabo los hongos es, en cierta manera, similar al que llevan a cabo los actinomicetos, principalmente porque comparten con ellos la versatilidad en el aprovechamiento de sustratos que pueden utilizar como fuente

alimenticia. La similitud en apariencia y morfología general, dificulta establecer una división clara entre las tareas individuales que llevan a cabo los hongos de las que realizan los actinomicetos.

Tanto los hongos como los actinomicetos se desarrollan por lo general en capas no más profundas de 10 a 15 cm. de la superficie de la pila de material, ya que la gran mayoría de sus especies son aerobios obligados. Sus ciclos de vida encuentran condiciones óptimas a temperaturas moderadas, las cuales se encuentran únicamente en las capas externas de los apilamientos. Su acción más importante se lleva a cabo durante las etapas finales del proceso, en las que las condiciones son propicias y el sustrato remanente se compone de celulosa y lignina (14).

4.4.2 Importancia de la Identificación de microorganismos para el diseño del proceso.

La identificación de los microorganismos presentes en el proceso puede efectuarse a fin de encontrar mejoras para el proceso global, partiendo del conocimiento de las características de cada especie involucrada. Para esto se requeriría establecer la importancia relativa del rol que lleva a cabo cada una, tanto por su naturaleza como por su extensión y en base a esto, diseñar las mejoras que tiendan a favorecer el crecimiento de los organismos que resulten tener una importancia mayor.

La identificación de los organismos y de su actividad preponderante requiere en gran medida del estudio de cada especie de manera aislada, lo cual haría cuestionable la validez de los resultados obtenidos al aplicarlos al sistema global. El enfoque más lógico y más utilizado actualmente para el diseño del proceso, de los equipos y de los procedimientos de operación en cuanto a aspectos microbiológicos se refiere, no se basa en la aplicación de enfoques fragmentados de la realidad, sino en el uso de procedimientos iterativos sobre la operación misma, los cuales una vez que convergen garantizan que el proceso cuenta con las condiciones óptimas de funcionamiento (13).

4.4.3 Inoculación de microorganismos distintos de los contenidos dentro de la población autóctona.

La inoculación de microorganismos consiste en la introducción al sistema de una colonia de microorganismos no autóctonos, suficientemente grande para afectar significativamente la composición del material receptor. Aún cuando en varias naciones se han aplicado colonias inoculables a sistemas de compostaje, existen varios hechos que hacen dudar de la posibilidad de acelerar los procesos mediante la introducción de organismos más activos que los existentes dentro de la población autóctona. Esto resulta claro al considerar que las especies predominantes en cada punto del proceso, son aquellas que pueden adaptarse mejor a las condiciones reinantes en este punto. Por lo que cualquier especie ajena, se encontrará en desventaja con respecto a los organismos autóctonos.

Sin embargo, en el caso de que se requiriera de inoculación lo más recomendable es la adición de desechos de jardinería, aguas residuales provenientes del drenaje municipal (co-compostaje) o estiércol de caballo, los cuales contienen los organismos necesarios, desde bacterias hasta hongos, para la descomposición (compostaje) de casi cualquier tipo de material (13).

4.4.4 Fenómenos de Antagonismo Biológico

Dentro de los procesos de compostaje se han identificado tres tipos de fenómenos de antagonismo.

- **Antibiosis.**- Este fenómeno se da cuando alguna especie produce sustancias que son tóxicas para otras especies.
- **Explotación.**- Este fenómeno sucede cuando alguna especie utiliza a otras para su propio beneficio.
- **Competencia.**- Este fenómeno ocurre cuando diferentes especies compiten por algún aspecto ambiental o nutricional que cuenta con disponibilidad limitada (15).

La capacidad de cada población para enfrentar estos fenómenos de antagonismo, bajo las condiciones de proceso en cada unidad de tiempo.

decidirá la sucesión y proliferación de las diferentes poblaciones microbianas.

4.5.- FACTORES AMBIENTALES

Los factores ambientales que afectan el proceso de compostaje pueden dividirse en tres grandes grupos: Físicos, químicos y nutricionales. La velocidad de transformación de la materia orgánica a composta es función de la influencia que ejercen estos factores sobre la población microbiana. Aun considerando que en ciertas partes del proceso las condiciones son difíciles para las poblaciones, se ha demostrado que la asociación de los microorganismos con las partículas que van a transformar les permiten soportar condiciones que en otras atmósferas no podrían soportar.

4.5.1. Factores físicos

4.5.1.1 Temperatura

El proceso de compostaje representa la actividad integrada de un gran número de especies de organismos diferentes, así, la probabilidad de que exista una temperatura óptima para todas ellas en un momento dado es nula. Un alto grado de actividad, indica que la temperatura es satisfactoria para la mayoría de los organismos. La temperatura óptima para cada etapa de proceso, será la que integre las óptimas de los diferentes microorganismos involucrados en ella.

La temperatura, a través de toda la masa de material, solamente es uniforme al principio y al final del proceso.

Para que se inicie la descomposición de los residuos, la temperatura inicial del material sujeto al proceso debe ser mayor de 12° C.

La naturaleza de la materia orgánica, la disponibilidad de los nutrientes, el contenido de humedad, el tamaño del apilamiento, el aislamiento externo, el tamaño de partícula y el grado de agitación y aireación, afectan la forma exacta y la magnitud de la curva de temperatura vs. tiempo, pero la forma común que presenta se

muestra en la figura 8. Mientras mayor sea la proporción de nutrientes disponibles (sustancias de fácil descomposición y nutrientes simples), mayor será la amplitud de la curva y mayor será la velocidad de descomposición (15).

El proceso cuenta con cuatro etapas bien definidas por el comportamiento térmico del sistema.

La primera es una etapa mesofílica, en la cual la población microbiana predominante presenta un ciclo de vida cuyas condiciones óptimas se encuentran dentro de un rango que va de 8-10 °C a 45-50 °C. Cuando los microorganismos mesofílicos comienzan a descomponer la materia orgánica, destruyen primeramente los carbohidratos y proteínas, que constituyen el sustrato más lábil, generando calor. Si el material se encuentra en apilamientos de tamaño regular, las propiedades aislantes inherentes al material orgánico impiden la liberación del calor al medio ambiente, éste comienza a acumularse y provoca un aumento de temperatura global (15).

La segunda etapa, llamada termofílica se caracteriza por la actividad predominante de una población de microorganismos adaptables a condiciones de temperatura mayores a 45-50 °C.

Entre el final de la etapa mesofílica y el principio de la termofílica se presenta un nivel de actividad bacteriana reprimida por la división existente entre las condiciones vitales de los organismos mesófilos y termófilos. La descomposición en la etapa termofílica, es más eficiente que en la anterior puesto que a temperaturas elevadas, la actividad metabólica de los organismos es mayor. La actividad enzimática se duplica por cada aumento de 10° C de temperatura, hasta alcanzar las condiciones de temperatura límite que puede soportar el sistema (72 °C), en la cual las enzimas se inactivan y la actividad biológica y la evolución calorífica cesan completamente; esta etapa se conoce como muerte térmica, y debe existir un excelente control de temperatura, ya que de otra manera puede provocar la muerte de los organismos encargados de la descomposición final, con lo que el proceso se vería interrumpido.

La existencia de una etapa termofílica es necesaria y conveniente debido a que:

- Una gran variedad de organismos, altamente especializados para la asimilación de materia orgánica, encuentran su temperatura óptima en el rango termofílico.
- Las semillas vegetales y la mayoría de los organismos patógenos mueren al ser sometidos a temperaturas termofílicas.

El aumento de temperatura tiende a generar aumentos en las velocidades de descomposición hasta alcanzar rangos tan altos que inhiben el proceso, dando origen a la tercera etapa, que se conoce como etapa de enfriamiento, y se caracteriza por la descomposición de sustratos de difícil degradación, que no producen niveles altos de energía y que requieran más tiempo de descomposición, permitiendo que el calor se disipe. (14).

La última etapa, conocida como etapa de maduración, es un periodo en que la composta propiamente dicha se deja reposar para que los procesos finales de descomposición den al producto final las características de estabilidad deseadas.

El perfil de temperatura contra eficiencia y velocidad presenta una tendencia muy similar para diferentes sistemas de compostaje: A temperaturas menores a 30 °C existe una relación lineal entre la eficiencia/velocidad de proceso contra la variación de temperatura. Cuando la temperatura sobrepasa esta condición, la velocidad comienza a disminuir gradualmente hasta alcanzar los 35 °C. Entre esta temperatura y los 55 °C, la pendiente de eficiencia vs. temperatura se mantiene como una línea horizontal, posiblemente con una cierta pendiente negativa entre los 50 y 55 °C. Al sobrepasar los 55 °C la relación eficiencia/velocidad disminuye abruptamente y al sobrepasar los 65 °C, los organismos capaces de formar esporas adoptan esta forma y muestran niveles mínimos de actividad que se tornan imperceptibles a temperaturas mayores a 70 °C . La mayoría de los organismos incapaces de formar esporas mueren.

4.5.1.2 Control del Flujo de calor

El flujo de calor es de vital importancia para el control de los perfiles de temperatura de compostaje, los cuales son función de la velocidad de generación, de almacenamiento y de pérdidas de calor. Estas últimas, a su vez, son función de fenómenos de conducción, evaporación de agua y transferencia de calor sensible al aire (14).

I. Almacenamiento de calor

Los procesos de almacenamiento de calor afectan las temperaturas de proceso especialmente al principio y al final de éste, en que las temperaturas son bajas o los sustratos energéticos comienzan a agotarse. El agua contenida en la materia orgánica, constituye la mayor fuente de almacenamiento de calor debido a su alto calor específico; sin embargo, por lo mismo requiere de una gran cantidad de energía para elevar su temperatura. Un alto contenido de humedad, en etapas iniciales del proceso, puede impedir que se alcancen las máximas temperaturas en la etapa termofílica (14).

II) Conducción

En términos generales, las pérdidas de calor debido a fenómenos de conducción durante el proceso son mínimas, puesto que el potencial de conductividad en los materiales susceptibles de tratarse por composta presentan valores de conductividad muy bajos, lo mismo que el aire contenido dentro de los poros de la matriz de compostaje (14).

III. Enfriamiento por evaporación

La evaporación del agua tiene gran capacidad de remoción de calor de los sistemas de compostaje, por la gran cantidad de calor requerida para que se verifique el cambio de fase. Las etapas de volteo favorecen la pérdida de calor a través de este mecanismo (14).

Los mecanismos de transferencia de calor relacionados con el aire también presentan gran importancia dentro del compostaje, tanto

por su participación en la evaporación y como en la transferencia de calor sensible al aire seco. El aire en movimiento tiene un potencial de remoción de calor más adecuado y uniforme que cualquier otro mecanismo (14).

El control de temperatura a través de la remoción de calor puede verificarse a través de varias estrategias. La remoción de calor puede aumentarse o disminuirse simplemente por el cambio de configuración de la masa composta, i.e. forma y tamaño. La distribución de temperatura puede mejorarse, con un poco más de esfuerzo, a través de máquinas de volteo que lanzan al aire la composta promoviendo una alta remoción de calor. Los procesos de consumo de oxígeno y evolución calorífica están altamente correlacionados; sin embargo, se requiere de nueve veces más ventilación para remover calor, que para suministrar el oxígeno necesario a una composta con una temperatura de 60° C (14).

4.5.1.3 Contenido de humedad

En los procesos de compostaje por apilamiento, el contenido de humedad y de oxígeno son dependientes entre sí. El contenido de humedad óptimo dentro del proceso siempre será el máximo permitido, tomando en cuenta que a mayor cantidad de agua presente entre los intersticios del material, será menor la cantidad de aire existente en ellos; el nivel mínimo de humedad permanece relativamente constante y es independiente de otro tipo de factores. A niveles menores de 12% de humedad, tanto la actividad biológica como los fenómenos de transporte de nutrientes disueltos y productos residuales de la actividad metabólica disminuyen hasta niveles imperceptibles (15).

En la práctica, los niveles de humedad nunca deben ser menores de 40-50 %. El nivel máximo permisible de humedad es aquel que permite que los requerimientos de oxígeno de los microorganismos se vean satisfechos. Si la totalidad de los intersticios se encuentran llenos de agua, la pila del material se encontrará en muy poco tiempo en condiciones anaerobias (el coeficiente de difusión de oxígeno a través de huecos llenos de aire,

es de $0.189 \text{ cm}^2/\text{seg}$, mientras que a través del agua es de $2.56 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{seg}$, (casi 10,000 veces menor). Cuando se cuenta con un digestor mecánico, con agitación y suministro de oxígeno, los niveles de humedad convenientes varían del 50 al 70% y puede añadirse agua en cualquier etapa del proceso, mientras que para el compostaje por apilamiento, es recomendable añadir el agua durante los volteos ya que de otra manera, ésta tiende a filtrarse hacia el fondo, sin que se logre repartir la humedad a lo largo de la pila (15).

Cuando se presenta un exceso de humedad, éste se manifiesta por la abundancia de lixiviados, mientras que una apariencia polvosa indica que el contenido de humedad es insuficiente. Al inicio del proceso, el contenido de agua debe ser lo suficientemente alto para alcanzar rangos de actividad aceptables, pero no tan alto que genere un producto final excesivamente húmedo. Esto dificulta las operaciones de transferencia de gases, manejo, transporte y almacenamiento del producto final aumentando además su peso.

Los materiales que cuentan con altas concentraciones de lípidos, los cuales son líquidos a las temperaturas de compostaje, deben considerarse como parte de la fracción líquida junto con el agua (14).

4.5.1.4 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es un factor crítico dentro del proceso de compostaje, tanto por las partículas en sí, como por los intersticios que se generan alrededor de ellas.

La relación entre la estructura del material a procesar y el contenido de humedad máximo permitido, es especialmente importante en el proceso de compostaje por apilamiento. Cuando se forma una pila de material, a menos que se compacte deliberadamente, una fracción significativa de su volumen se encontrará en forma de huecos. El tamaño de estos intersticios depende en parte del tamaño de las partículas, de su configuración y de la fuerza estructural que presenta el material. Si las partículas son de gran tamaño, de forma regular y estructura firme darán lugar a la formación de intersticios de gran volumen; mientras que los

materiales eminentemente amorfos casi no generan intersticios. En esta situación, la velocidad de difusión de oxígeno y dióxido de carbono, y la liberación de calor hacia el exterior se reducirán, especialmente en las etapas termofílicas en las que la demanda de oxígeno y la generación de calor son mayores (15).

4.5.2 FACTORES QUIMICOS

4.5.2.1 Concentración de Oxígeno

La aplicación de condiciones completamente aerobias en los procesos trae consigo importantes ventajas:

- Eliminación de olores desagradables
- Mayor rapidez de descomposición
- Altas temperaturas de proceso

El grado en el que se alcanzan estas ventajas es función directa del grado de satisfacción que alcanzan los requerimientos de demanda de oxígeno impuestos por los ciclos de vida de los organismos presentes en cada etapa del proceso.

El suministro de oxígeno al sistema se lleva a cabo mediante diferentes métodos de aireación, ya sea al forzar la entrada de aire al sistema por medios mecánicos o mediante etapas en las que el material sometido al proceso se revuelve. El compostaje por apilamiento tiene una concentración inicial de oxígeno importante originada durante la formación de las apilamientos de material y requiere de aireación subsecuente por medio de etapas de volteo. La demanda de oxígeno en el proceso aumentará conforme las condiciones restantes alcancen sus puntos óptimos.

Los rangos de difusión se determinan por el gradiente de concentración de gases y su resistencia a fluir, la cual es función del tamaño y continuidad de los poros y el contenido de humedad. El fenómeno de difusión por sí solo se da a velocidades demasiado bajas para suministrar el oxígeno suficiente a masas de composta de

gran tamaño. Esta desventaja ha sido superada a través de sistemas de compostaje que utilizan sistemas de ventilación forzada para suministrar oxígeno (14).

4.5.2.2 pH

Por lo general el pH de los residuos municipales es moderado, nunca tan alto como para producir fallas de proceso. Aún si se encuentran en condiciones ácidas o alcalinas, los materiales pueden someterse al proceso de compostaje y generar un producto final en condiciones de pH cercanas a la neutralidad.

Dentro del proceso de compostaje, el pH es función de la actividad de los microorganismos presentes. El rango de pH óptimo para la mayoría de las bacterias, oscila entre 6-7.5, mientras que los hongos pueden adaptarse a condiciones de 5.5-8.

Al iniciarse el proceso de compostaje, el pH comienza a decaer como consecuencia de la actividad de las bacterias productoras de ácidos, las cuales se encargan de la degradación de compuestos complejos derivados de carbono (polisacáridos y celulosa), para formar intermediarios de ácidos orgánicos. En este proceso, el pH puede descender a niveles de 4.5 a 5, lo que provoca un aumento de la actividad de descomposición, puesto que la síntesis de ácidos orgánicos se ve acompañada por el crecimiento de una población de microorganismos capaz de utilizarlos como sustrato nutricional.

Después de unos días, el pH comienza a elevarse hasta alcanzar un nivel de 8.0-9.0. Al llegar a niveles de pH alrededor de 11, los hongos y actinomicetos comienzan a ser visibles. Es importante dejar que el proceso continúe de manera natural, principalmente al inicio, en que el pH comienza a descender puesto que se ha demostrado que el aumento de los niveles de pH en ésta etapa, trae consigo pérdidas innecesarias de nitrógeno en el sistema.

La producción de amoníaco trae consigo problemas de mal olor, corrosión de equipos y contaminación ambiental. La amonificación constituye un proceso corto, que se completa en menos de una semana en sistemas que promueven altos rangos de actividad metabólica; es función de la temperatura y sus condiciones óptimas

caen dentro de un rango de temperatura de 40-50° C, en las que se pueden alcanzar concentraciones de 1000 ppm y mayores, si se cuenta con sustratos con alto contenido proteico. El amoniaco libre puede formar productos de reacción estables, cuyas velocidades de formación aumentan con la temperatura y con la presencia de oxígeno.

La conversión de amoniaco para formar productos estables, resistentes a amonificaciones posteriores es muy importante para formar un producto final que se encuentre dentro de especificaciones, ya que el amoniaco libre es altamente reactivo y es capaz de disolver la materia orgánica haciéndola susceptible de descomposición posterior (14).

4.5.3 Factores Nutricionales

4.5.3.1 Substrato Nutricional

El sustrato se considera un factor ambiental puesto que es una condición extrínseca a la población microbiana y como tal, ejerce acción sobre la cantidad y velocidad de la actividad de los microorganismos.

La naturaleza física y química del sustrato constituyen un factor esencial en la determinación del curso y la velocidad que se darán en el proceso.

El sustrato puede definirse como la cantidad y el balance de nutrientes disponibles para los microorganismos presentes durante las diferentes etapas del proceso. Sus características físicas son principalmente el tamaño de partícula y el contenido de humedad. La importancia del tamaño de partícula radica en que determina el área superficial por unidad de masa expuesta al ataque de los microorganismos.

La disponibilidad bioquímica es característica de los residuos que se someten al proceso y no es posible cambiarla mediante operaciones de pretratamiento. Las características bioquímicas son aquellas que se relacionan con el tamaño molecular y la complejidad

de la naturaleza química del sustrato, la que determina la susceptibilidad de éste a ser atacado por la población microbiana presente. Si el sustrato no puede ser atacado, el proceso de compostaje no se verificará. La capacidad de un microorganismo dado para descomponer un sustrato radica en la posibilidad de sintetizar las enzimas encargadas de romper los compuestos más complejos de éste y transformarlos en sustancias elementales o en intermediarios que puedan ser utilizados en las reacciones metabólicas de otros microorganismos y en la construcción de nuevo material celular. Entre más complejo sea el sustrato, requerirá de un sistema enzimático más extenso y complejo (13,14).

4.5.3.2 Relación Carbono-Nitrógeno

Uno de los aspectos más importantes dentro del balance nutricional es la relación carbono:nitrógeno (C/N). Aún cuando existen otras relaciones, rara vez es necesario considerarlas dentro del proceso de compostaje de desechos municipales.

Los organismos vivos necesitan disponer de carbono como fuente de energía y de nitrógeno para la síntesis protoplasmática. La eficiencia de las operaciones de síntesis es siempre menor de 1, por lo que la cantidad de carbón presente, siempre deberá ser mayor que la de nitrógeno. Se ha calculado, que del 20-40% del carbono presente en el sustrato se asimila para formar nuevas células microbianas, mientras que el resto se oxida y se libera como dióxido de carbono. Las nuevas células microbianas contienen aproximadamente 50% de C y 5% de N (i.e el N contenido constituye el 10% del carbono presente), de donde el requerimiento de N por parte de los microorganismos varía de 2-4% del carbono inicial, lo que da una relación de C/N entre 25:1 y 50:1. La actividad microbiana tiende a bajar esta relación a 10:1 en el producto final, por lo cual si la relación inicial C:N es muy alta, la cantidad de nuevas células formadas deberá ser muy alta a fin de reducir la cantidad de carbono presente.

En el caso de que la disponibilidad de nitrógeno sea mayor que la cantidad requerida, el organismo utiliza todo el carbono posible y

elimina el nitrógeno restante en forma de amoníaco. Si la relación C/N es demasiado baja, es posible que se forme una cantidad tal de amoníaco que se vuelva tóxica para la población microbiana.

La relación C/N óptima depende esencialmente de la naturaleza de los desechos introducidos al proceso. Si el carbón se encuentra en forma de moléculas muy complejas, en cuanto concierne a ciertos microorganismos, es como si dicha fracción de carbón no existiera, puesto que no está disponible para ellos. Los compuestos de este tipo son principalmente ligninas, algunos compuestos aromáticos y ciertas formas físicas de celulosa. Por lo tanto, si una cantidad importante de carbono se encuentra en forma de estos compuestos, la relación C/N permisible puede ser más alta. En el caso del nitrógeno, por lo general se encuentra disponible a excepción de ciertas formas de queratina, la cual constituye un compuesto nitrogenado altamente resistente al ataque de microorganismos. La experiencia acumulada en las dos décadas pasadas permite afirmar que cuando se manejan residuos municipales, una relación C/N recomendable es de 25-30 partes de carbón por cada parte de nitrógeno, puesto que los organismos utilizan aproximadamente 30 partes de carbono por cada parte de nitrógeno. Sin embargo si la corriente de residuos presenta una alta proporción de residuos de madera o papel, la relación permitida puede ser del 35-40:1 (14).

Al morir los microorganismos, el carbono y el nitrógeno que habían sido fijados en forma de protoplasma, vuelve a estar disponible, y de nuevo a fin de utilizarlo, es necesario quemar una fracción del carbono a dióxido de carbono.

4.5.3.3 Trazas de elementos y requerimientos enzimáticos

Por lo general se encuentran presentes partículas elementales además de los macronutrientes en cantidad suficiente para que el proceso de compostaje se verifique sin necesidad de adiciones posteriores. La adición de enzimas como catalizadores de proceso, por lo general tampoco es necesario, dado que la población microbiana sintetiza las enzimas necesarias para su actividad y para

la asimilación de nutrientes, a una velocidad paralela a la influencia limitante de la complejidad del sustrato.

4.6. PRINCIPALES VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE PROCESO.

4.6.1. Ventajas

- A través del proceso, se produce una reducción importante del volumen de los residuos.
- El compostaje es el único proceso operativo en la actualidad a escala industrial cuya tecnología permite el reciclado natural al 100% de la fracción orgánica de los desechos municipales lo cual implica que no se destruye su contenido energético intrínseco, además de que no se genera ningún otro subproducto (15).
- Las condiciones predominantes del proceso favorecen la destrucción de microorganismos patógenos y los huevos o semillas de parásitos. Esta reducción patogénica, se lleva a cabo por dos mecanismos, el primero por la muerte térmica y el segundo por el antagonismo biológico (14).
- Presenta la posibilidad de dar tratamiento a una gran variedad de residuos, incluyendo parte de la fracción inorgánica de los residuos municipales y algunos tipos de residuos industriales procedentes de plantas de elaboración de alimentos en general, industria papelera, maderera, de jardinería y enlatados, así como de residuos de drenaje secos (12).
- Normalmente las plantas de composta presentan una gran flexibilidad de operaciones que permite manejar sobrecargas del 100 al 200% de la capacidad diseñada, mediante el aumento de operación de los molinos de recepción y los recipientes de proceso (15).
- Si se cuenta con infraestructura capaz de acondicionar los residuos municipales mediante una buena etapa de pretratamiento, es posible dar al producto final un uso como mejorador de suelos (12).

- En general los costos de procesos son menores que los que implican los procesos físico-químicos
- La generación de subproductos es mínima.

4.6.2. Desventajas

- La demanda del producto no favorece la recuperación de los costos de inversión y proceso (12).
- La comercialización del producto requiere de procedimientos especiales y se requiere de un estudio de mercado previo a la instalación de la planta a fin de determinar la factibilidad de comercialización del mismo. (12).
- La operación de las plantas requiere de personal capacitado, el cual no se encuentra actualmente disponible en el país (12).

En la Tabla 3 se muestra un cuadro comparativo de ventajas y desventajas de los diferentes métodos de tratamiento/confinamiento de residuos municipales utilizados comercialmente a escala industrial.

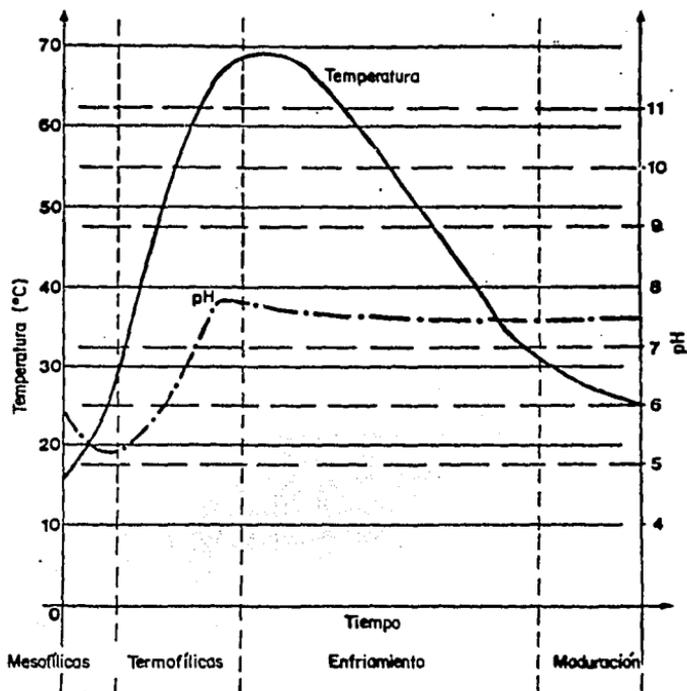


Figura 8. Compostaje. Perfil de Temperatura y pH en función del tiempo

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los métodos de tratamiento y confinamiento de residuos sólidos municipales

	METODO DE CONFINAMIENTO/ TRATAMIENTO	Reteno Sanitario	Incineración	Pirólisis	Composta	RDF
VENTAJAS	Confinamiento final de residuos sólidos	*				
	No genera subproductos				*	
	Reducción de volumen de residuos		*	*	*	
	Eliminación de microorganismos patógenos		*	*	*	
	Requerimientos mínimos de terreno		*	*	*	
	Reciclado natural. Aprovechamiento del contenido energético intrínseco				*	
	Aplicable a todo tipo de residuos Municipales	*	*	*		
DESVENTAJAS	El producto final vuelve a tener un uso productivo				*	*
	El producto requiere confinamiento final		*	*	*	
	El producto final requiere de un proceso de comercialización			*	*	*
	El proceso genera problemas de contaminación atmosférica	*	*	*	*	
	El proceso genera problemas de contaminación de agua	*	*	*	*	
	El proceso implica altos costos de inversión		*	*	*	
	El proceso requiere inversión adicional para equipos de control de contaminantes	*	*	*	*	
El proceso requiere de una etapa previa de separación compleja				*	*	

CAPITULO V

PROCESOS INDUSTRIALES DE FABRICACION DE COMPOSTA

La producción industrial de composta a partir de residuos municipales requiere de tres tipos de procesos generales:

- Pre-tratamiento
- Proceso de Compostaje
- Tratamiento Final

5.1. PRE-TRATAMIENTO

La etapa de pre-tratamiento tiene como fin preparar la corriente de residuos sólidos antes ingresar a la etapa de descomposición.

La elección de las etapas de pre-tratamiento puede verse afectada por la tecnología de compostaje empleada, por la composición y las propiedades físicas de la corriente de residuos y por los requerimientos de calidad del producto final (18). Sin embargo, la mayoría de los procesos requieren de las siguientes etapas:

5.1.1 Recepción de residuos sólidos

En primer término, se pesan los residuos que llegan a la planta con el fin de mantener un control sobre los volúmenes que se manejan en cada planta (10).

Inmediatamente después, se separan los residuos de gran tamaño no compostables, tales como muebles, artículos de línea blanca, alfombras, aparatos eléctricos, etc.; los cuales incrementan el tiempo de

descomposición, ocupan espacio innecesario y disminuyen la eficiencia de proceso. Este tipo de artículos, en caso de no reciclarse, requieren de algún otro método de disposición final (18).

5.1.2 Separación

Los residuos que permanecen en la corriente de procesos se transportan a una fosa de almacenamiento y posteriormente se alimentan mediante grúas en las tolvas de recepción, de las que pasan a bandas transportadoras de rodillos sobre las que se depositan los residuos para entrar en la etapa de separación (21).

Actualmente existen tecnologías y equipos cuyo objetivo es la separación mecánica de los subproductos contenidos en los residuos sólidos. A nivel industrial la separación de los residuos puede ser completamente mecanizada o bien una combinación de equipo mecánico y separación manual. (21).

El método de separación combinado utiliza fundamentalmente bandas transportadoras de rodillos accionadas por motores y sobre los cuales los residuos se desplazan a velocidades controlables (21). Los operarios se colocan a ambos lados a lo largo de estas bandas y llevan a cabo la separación manual, o pepena, de un tipo específico de subproductos reciclables tales como vidrio blanco y de color, plástico y en ocasiones papel y los depositan en tolvas próximas a ellos que a su vez alimentan otras bandas transportadoras específicas para cada tipo de residuo separado (10).

El material de rechazo que permanece sobre la banda puede pasar a la etapa de separación mecanizada, la cual utiliza principios de tipo balístico, neumático y magnético para separar los subproductos contenidos en los residuos aprovechando sus características físicas (10).

Los separadores de tipo electromagnético tienen por objeto la separación automática de los desechos constituidos por metal ferroso, para lograrlo, se hace pasar la corriente de residuos previamente triturados bajo el campo de un electroimán que atrapa los metales para enviarlos a un área específica. La figura 9 presenta esquemáticamente dos

de los separadores electromagnéticos más comúnmente utilizados para la separación de residuos sólidos (19).

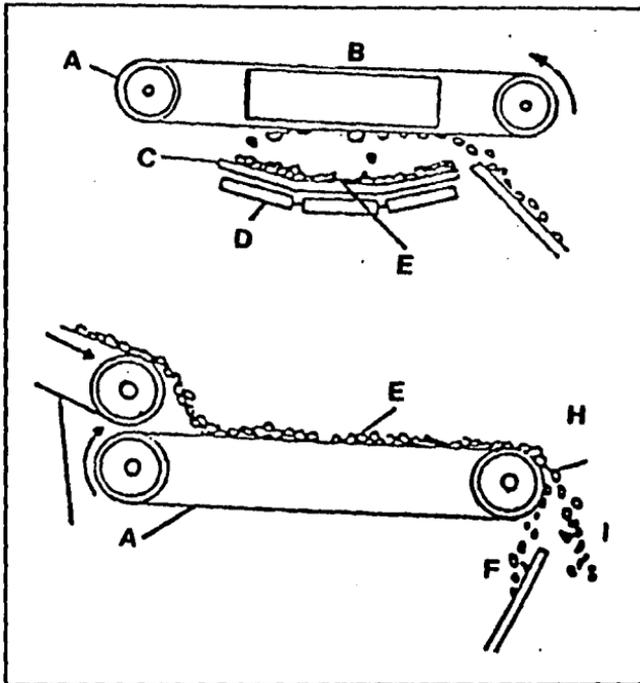
El resto de los separadores automatizados más comúnmente utilizados en la producción industrial de composta, buscan separar, hasta donde sea posible, la fracción inorgánica de la corriente de residuos para dejar en la corriente de proceso una fracción eminentemente orgánica, partiendo de la base de que las gravedades específicas de los residuos orgánicos, en general son menores que las de los inorgánicos (19).

Un tipo de separador con estas características es el separador zig zag, al cual se alimentan los residuos molidos por la parte superior, mientras que por la parte inferior se introduce una corriente de aire. El dispositivo cuenta en su interior con placas en forma de zig zag que permiten que el tiempo de caída sea mayor y que la corriente de aire ascendente arrastre consigo a las partículas ligeras (eminentemente orgánicas) cayendo las más pesadas por acción de la gravedad. En la figura 10 se presenta un diagrama esquemático del separador zig zag (19).

Los separadores inerciales más comúnmente utilizados son el separador balístico, el separador de rebote y el transportador inclinado (19).

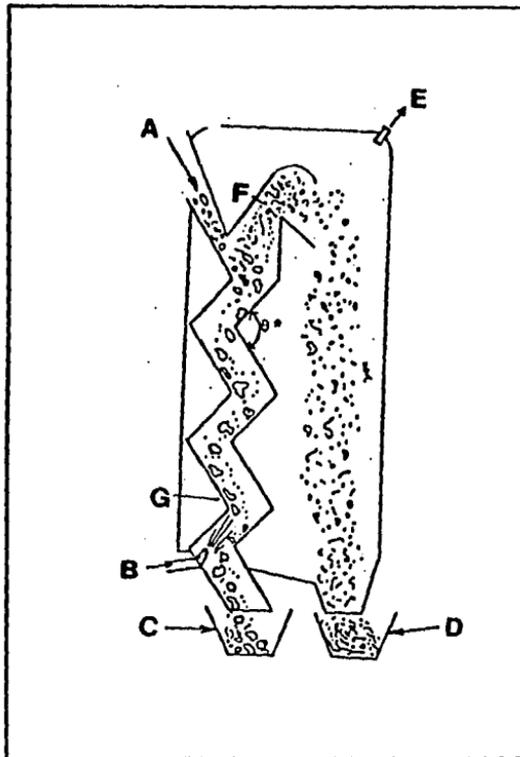
El separador balístico cuenta con un rotor que lanza las partículas con una fuerza constante, separándose éstas en diferentes compartimientos según la distancia que alcancen a recorrer. La figura 11 presenta un esquema de dicho separador (19). La figura 12 esquematiza el separador de rebote, el cual alimenta los residuos molidos, mediante una banda transportadora, sobre una polea que gira continuamente arrastrando consigo a las partículas más ligeras y dejando caer por gravedad a las de mayor peso (19).

La figura 13 esquematiza el transportador inclinado, el cual recibe los residuos molidos sobre una banda sin fin inclinada la cual transporta hacia arriba las partículas ligeras que caen en un compartimiento, mientras que



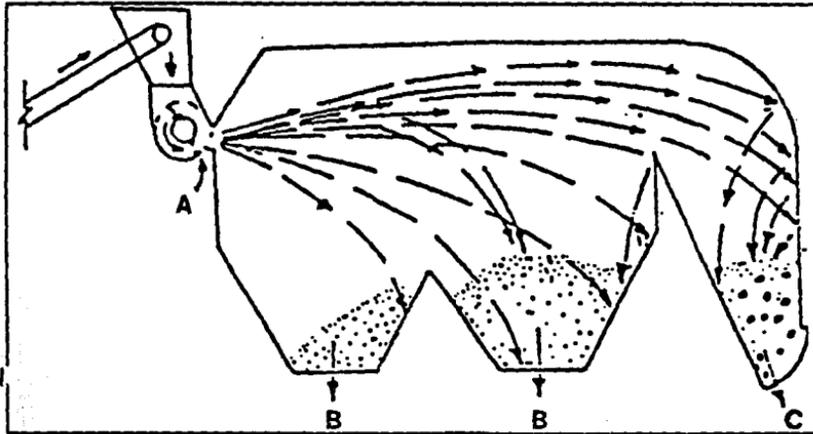
- | | |
|-------------------------|---------------------------------|
| A. Banda Continua | G. Residuos Triturados |
| B. Imán Fijo Suspendido | H. Imán fijo dentro de la polea |
| C. Banda Transportadora | I. Material no ferroso |
| D. Rodillos | J. Material ferroso |
| E. Residuos Triturados | |
| F. Metal Ferroso | |

Figura 9. Separadores Magnéticos



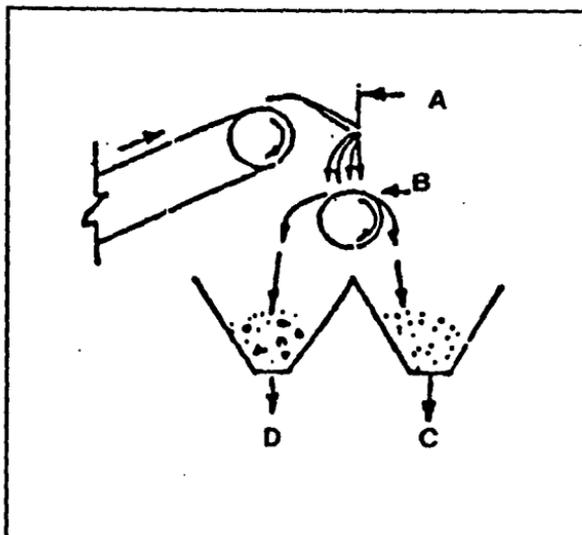
- A. Ingreso de residuos
- B. Ingreso de aire
- C. Partículas pesadas
- D. Partículas ligeras
- E. Venteo
- F. Partículas ligeras (suben)
- G. Partículas pesadas(caen)

Figura 10. Separador Zig zag



- A. Rotor
- B. Partículas orgánicas
- C. Partículas inorgánicas

Figura 11. Separador Balístico



- A. Placa de rebote
- B. Polea
- C. Partículas ligeras
- D. Partículas pesadas

Figura 12. Separador de rebote

las partículas pesadas resbalan sobre la parte inferior de la banda y caen en otro compartimiento (19).

De esta manera se logra obtener un material constituido básicamente por elementos orgánicos, el cual conforma la materia prima inmediata para la producción de composta (19).

5.1.3 Reducción del tamaño de partícula

La porción de residuos que permanece en la corriente de proceso está formada principalmente por materia orgánica, la cual se fragmenta para obtener partículas relativamente homogéneas, los requerimientos de reducción del tamaño de partícula, dependen de el tipo de sistema de circulación de aire con que cuenta el proceso (18). Entre mayor sea la capacidad de dicho sistema, menos crítica será esta operación, sin embargo, el tamaño máximo de partícula recomendado es de 5 cm. (20).

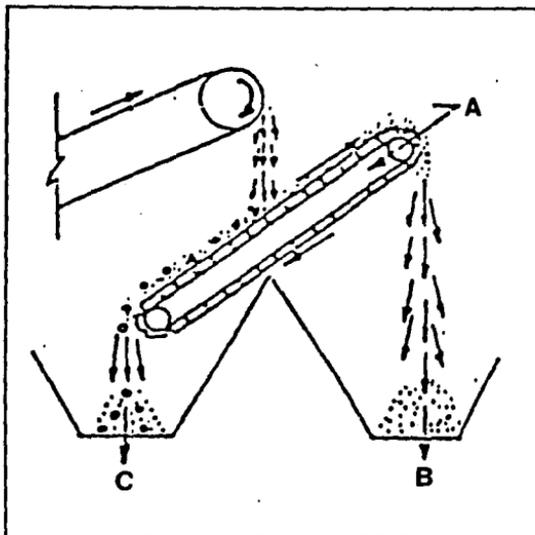
La importancia de esta operación radica en el aumento del área superficial de los residuos, lo que permite una mezcla completa entre los sólidos y líquidos que forman la corriente de proceso, aumenta el área de ataque por parte de los microorganismos y mejora las características de manejo de los residuos (18).

Es importante mantener una buena mezcla de partículas de diferentes tamaños a fin de generar suficientes espacios intersticiales que favorezcan la circulación de aire a través de la masa de composta (18).

Dentro de los procesos de fragmentación se incluyen todas aquellas técnicas que tienen por objeto la reducción u homogeneización del tamaño de las partículas que conforman los residuos sólidos (21).

Los equipos actualmente disponibles para lograr la fragmentación de los residuos sólidos son muy diversos y se basan en diferentes principios de operación.

Dentro de los equipos más comúnmente utilizados están los molinos de martillos, los cuales se componen de una estructura de acero o camisa en cuyo interior pueden girar uno, dos, o tres rotores sobre un eje vertical u horizontal. Dentro de la estructura, se encuentran fijas una o más parrillas



- A. Transportador inclinado
- B. Partículas ligeras
- C. Partículas pesadas

Figura 13. Separador Inclinado

cuya posición se puede regular, según las necesidades. Los rotores se accionan mediante un motor eléctrico conectado mediante una banda u otro mecanismo de transmisión, los ejes de los rotores cuentan con discos de acero fijos a una distancia de cada 10 cm. unos de otros. Sobre estos discos se instalan los martillos, formados por barras rectangulares de acero, los cuales pueden girar libremente sobre su eje. Cuando el rotor gira a alta velocidad, los martillos adoptan una posición radial por el efecto de la fuerza centrífuga golpeando todo lo que se encuentra en su radio de influencia y girando sobre su eje después del impacto o cuando se introduce algún objeto sumamente duro o voluminoso evitando así que se dañe u obstruya el equipo. (21).

La granulometría deseada se obtiene regulando diferentes parámetros de operación: número y colocación de los martillos, velocidad de rotación, velocidad tangencial, espaciamiento de las barras de la parrilla, etc.

Los más adecuados para tratar residuos municipales son los siguientes:

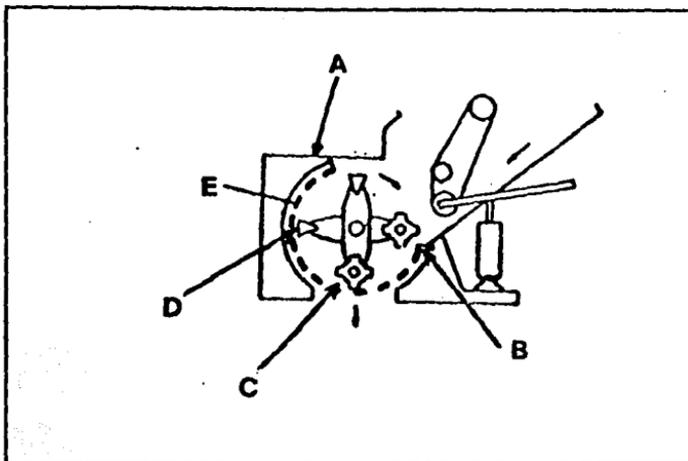
- **Molino de Martillos tipo Columpio Horizontal**

Generalmente cuenta con un grupo de 2 a 4 martillos tipo columpio instalados a la circunferencia de rotación, con una placa de rotación y con una barra y una malla cortadora, cuya función es la de aumentar la función de fragmentación, (véase figura 14). Este tipo de molino no es adecuado para materiales textiles resistentes tales como trozas de alfombra y presenta problemas asociados a desgaste de martillos, vibración y ruido.

- **Molino de martillos tipo columpio Vertical**

Los molinos de martillos tipo vertical presentan el mismo principio de operación que el anterior, pero cuentan con varios martillos que giran sobre una flecha vertical. Los residuos se alimentan por la parte superior reciben varios golpes de los martillos y caen. Los residuos que no pueden fragmentarse, tales como bloques de metal, se descargan por la parte superior.

La velocidad tangencial del martillo en el punto de impacto tiene un efecto determinante en el resultado obtenido.



- A. Camisa
- B. Barra de corte
- C. Anillo
- D. Martillos
- E. Parrillas
- F. Rejilla

Figura 14. Esquema de molino de martillos

Para la eliminación completa del vidrio, esta velocidad deberá encontrarse entre 80 y 100 m/s, con lo cual el 80% del vidrio se pulveriza y el resto se reduce a partículas muy pequeñas sin bordes cortantes. Conociendo el diámetro de los rotores, es posible obtener la velocidad de rotación necesaria que puede variar de 500 a 2,300 r.p.m. dependiendo del equipo.

El molino de martillos consume una gran cantidad de energía, que varía según el gasto de alimentación y la granulometría deseada. En razón de las características dimensionales de los residuos crudos, la potencia instalada generalmente es superior a 150 C.V., ya que los residuos no siempre han sufrido una preselección. El gasto horario y el rendimiento granulométrico son función de la potencia. Para una granulometría final de 80 mm, en promedio la potencia requerida es de 15 C.V. por ton/hora de alimentación.

Por lo general, los residuos sólidos presentan características de abrasividad elevada, por lo que las piezas sometidas a un desgaste excesivo (martillos, parrillas, placas de protección, etc.) deben ser susceptibles de desmontarse fácilmente y ser reemplazadas rápidamente. El desgaste de estas piezas depende de factores tales como: alimentación por hora de residuos, granulometría deseada y tipo de residuos tratados. La vida de este tipo de piezas se puede prolongar si se emplean para su fabricación diferentes tipos de aleaciones de metales o aceros especiales, sin embargo, en principio esto resulta sumamente costoso, por lo que se debe proceder a hacer un estudio de costo-beneficio, una vez que se cuenta con el proceso y las características de los residuos a tratar definidos con la mayor exactitud posible.

En los casos en los que el sentido de giro del rotor no se puede invertir y el desgaste de los martillos se da en un solo lado, es posible invertir su posición cuando presentan medio uso, de manera que cada martillo se aproveche en su totalidad.

La tabla 4 presenta la vida útil de un grupo de martillos expresada en toneladas molidas en función de la granulometría deseada.

Tabla 4 Vida útil de martillos para molinos

Vida útil de martillos (ton. de residuos molidas)	Granulometría (mm.)
600	35
800	55
1000	75
1,200	100

5.2. PROCESOS DE COMPOSTAJE

5.2.1 Tecnología de Apilamiento (Windrows).

5.2.1.1 Introducción

La tecnología de Apilamiento es la primera tecnología utilizada para la fabricación de composta a gran escala. Actualmente, se sigue utilizando como una tecnología no mecanizada. Generalmente se lleva a cabo a la intemperie, formando pilas de longitud variable sobre el suelo, el proceso comprende una etapa preliminar de fermentación y una posterior maduración, curado o estabilización, lo cual requiere de extensiones considerables de terreno. A diferencia del proceso de alta velocidad, éste requiere de hasta tres meses para llevarse a cabo y se ve afectado directamente por las condiciones climatológicas del sitio (21).

Independientemente del volumen de residuos tratado, el área requerida para llevar a cabo el proceso Windrows, es función de la velocidad con la que el proceso se lleva a cabo para cada tipo específico de residuos a tratar, lo cual debe tenerse en cuenta durante el diseño de planta. Durante el periodo de descomposición activa, los residuos deben encontrarse en un área pavimentada para asegurar la maniobrabilidad especialmente en temporada de lluvias,

para evitar la contaminación del subsuelo por filtración de lixiviados y por la transferencia de larvas de organismos patógenos.

5.2.1.2 Dimensiones Permisibles de los Apilamientos

Cuando el proceso de compostaje se lleva a cabo mediante esta tecnología, al completarse la etapa de pre-tratamiento, los residuos se apilan. La forma de las pilas puede ser cónica o elongada. En cuanto a la sección transversal, las pilas pueden variar de triangular a trapezoidal. Por lo general, la forma preferible es la de domo con los lados tendiendo hacia la vertical con una inclinación de aproximadamente 70 u 80°, ya que al redondear la parte superior del apilamiento, se maximiza el escurrimiento del agua, lo cual es especialmente útil durante la temporada de lluvias.

El factor clave, en función del cual se determina el tamaño del apilamiento es la concentración de oxígeno que debe existir en el interior del apilamiento, para mantener en todo momento y a través de todo el apilamiento, las condiciones aerobias. Tomando en cuenta que la principal fuente de oxígeno es el aire contenido dentro de los intersticios de las partículas de residuos; el tamaño del apilamiento debe ser tal, que garantice que el volumen de los intersticios individuales no se vea reducido por la compresión de los residuos en la parte inferior debido al peso de los superiores. Puesto que la reducción del volumen de los residuos es función de la fuerza estructural del material a compostar, la altura permisible del apilamiento también es función de la naturaleza del residuo; así, un apilamiento de residuos que tenga un alto contenido de aserrín, virutas de madera, paja, etc. puede ser mucho más alto que uno que tenga una alta concentración de papel.

Otro factor que debe de considerarse para determinar el tamaño del apilamiento es el mecanismo de volteo con el que se cuente. Si el volteo se lleva a cabo manualmente, la altura del apilamiento no debe sobrepasar la altura promedio de los operadores encargados de esto. Si el volteo se lleva a cabo por medios mecánicos, la altura permisible es función de la capacidad de la máquina de volteo. En las

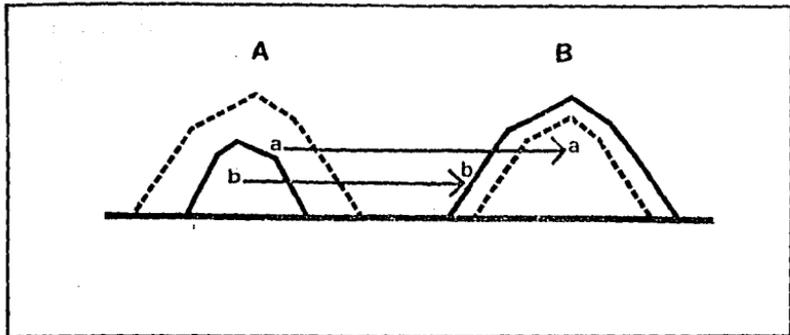
plantas a gran escala que operan con este tipo de tecnología por lo general la altura convencional es de 1.5 a 2 mts. con 2 a 2.5 mts. de ancho.

5.2.1.3 Aireación

La manera más efectiva con que cuenta la tecnología Windrows, para suministrar oxígeno a un apilamiento es mediante volteo, el cual favorece además la reconstrucción de los intersticios llenos de aire fresco en su interior. El volteo implica la ruptura del apilamiento y su reconstrucción. El apilamiento reconstruido puede situarse en el mismo lugar o en el lugar inmediato adyacente al que tenía el anterior. Independientemente del método de volteo empleado, el material debe sufrir una acción expandente más que una de compresión a fin de aumentar la porosidad del apilamiento, además el material que se encontraba en la parte interna del apilamiento original debe quedar en la parte externa del mismo como se muestra en la figura 15 lo cual asegura:

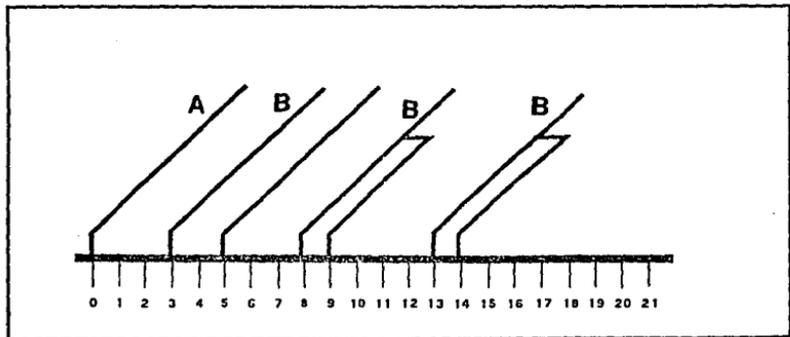
- Que todo el material se descompone uniformemente, bajo la premisa de que, por efecto de la temperatura, el proceso de compostaje se lleva a cabo a mayor velocidad en el interior del apilamiento (Véase sección).
- Que todo el material se expone a las temperaturas que prevalecen en el interior del apilamiento, lo cual garantiza la destrucción de semillas y gérmenes patógenos existentes en el material a tratar.

Cuando el método empleado para llevar a cabo el volteo no garantiza la inversión de las capas, la frecuencia de los volteos se debe aumentar, incrementando así la probabilidad de que la totalidad del material pase por la parte central del apilamiento. Aún cuando la frecuencia de volteos depende principalmente de la disponibilidad de oxígeno, el contenido de humedad en el apilamiento también influye en función directamente proporcional; así, a mayor contenido de humedad dentro del apilamiento, mayor deberá ser la frecuencia de los volteos.



- A. Apilamiento Original
- B. Apilamiento Reconstruido

Figura 15. Rearreglo de capas durante el volteo de composta



- A. Construcción del Apilamiento Original
- B. Volteo

Figura 16. Programa de volteos por el Método de Apilamiento

Para residuos municipales con un contenido de humedad de entre el 55 y 60% y una operación en la que el tiempo de compostaje se debe minimizar, el programa de volteos que se presenta en la figura 16 es adecuado, por lo general, para el cuarto o quinto volteo, el producto habrá alcanzado un estado de estabilización tal, que no se requerirán volteos subsecuentes. Si el tiempo de descomposición no es una limitante, un volteo semanal es suficiente.

El equipo empleado para llevar a cabo los volteos puede variar desde un simple traxcavo hasta compleja maquinaria automática, la cual es recomendable cuando la fuerza de trabajo es cara y escasa. Para estimar las necesidades de mano de obra, se calcula que un hombre tiene la capacidad de voltear de 4 a 6 toneladas de material mediante un traxcavo, por jornada de trabajo (8 horas).

Una máquina diseñada especialmente para volteo de composta de residuos municipales en plantas a gran escala es la Terex 74-51, con una capacidad de volteo de 800 toneladas por hora. La máquina mencionada, que cuenta con una banda sin fin paletada, las paletas voltean el material e introducen aire y a través de la hoja se va formando el nuevo apilamiento conforme pasa a lo largo del terreno donde se encontraba el apilamiento originalmente.. Dentro de las consideraciones de diseño, debe dejarse libre un espacio un poco mayor que el ancho de la máquina entre la pila que se encontraba formada y la que se está formando, según se presenta en las figuras 17 y 18.

También se puede utilizar un cargador frontal para llevar a cabo los volteos, sin embargo, su desempeño nunca será de la calidad del de una máquina de volteo especialmente diseñada para el proceso de compostaje.

Un proceso Windrows que ha cobrado importancia a escala comercial es el proceso Bühler, que es un proceso de compostaje Windrows que utiliza un molino de martillos Bühler al inicio del proceso.

5.2.1.4 Aplicabilidad del Método Windrows

Hubo un tiempo en el que se pensó que el proceso de compostaje por Apilamiento podría adecuarse únicamente a pequeña escala o a aquellos lugares en los cuales la disponibilidad de terreno es alta, la base de este razonamiento radicaba en el hecho de que dentro de los procesos Windrows, el residuo como tal se expone a los elementos ambientales hasta que el grado de descomposición es suficiente para modificar las características de los residuos. Por lo tanto, el lugar de operación podría convertirse en un foco de generación de roedores y de malos olores, además de suponerse que los requerimientos de terreno aumentarían debido al mayor tiempo de descomposición requerido. Sin embargo, conforme se ha desarrollado la tecnología de volteo y conforme ha aumentado la comprensión del proceso como tal, ha disminuido el tiempo de descomposición, por la optimización de las condiciones globales. Sin embargo, es necesario aclarar que la mayoría de las plantas de composta que manejan este proceso a escala municipal han tenido que enfrentar problemas de asociados a malos olores.

5.2.2 Tecnologías mecanizadas utilizadas en la etapa de compostaje

5.2.2.1 Introducción

Los sistemas de compostaje que cuentan con diferentes grados de mecanización están diseñados para dar al proceso condiciones óptimas que le permitan llevarse a cabo en el menor tiempo posible. Otro de los objetivos de la mecanización es el de aislar los residuos del medio ambiente y así reducir tanto los impactos que los residuos ejercen sobre él, como el efecto de las condiciones climatológicas locales sobre los residuos en proceso.

Los procesos mecanizados requieren de instalaciones y equipos especiales, por lo que llevan implícita una alta inversión de capital.

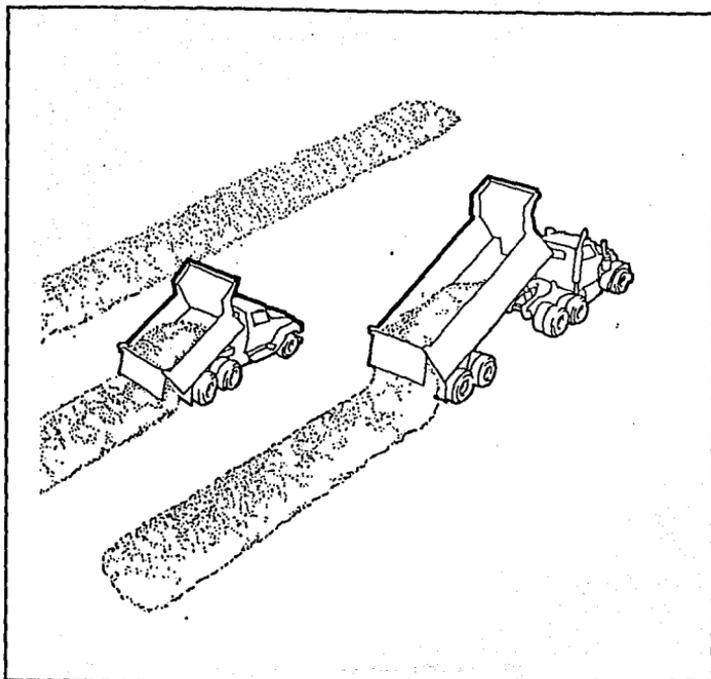


Figura 17. Formación de Aplamientos de composta.

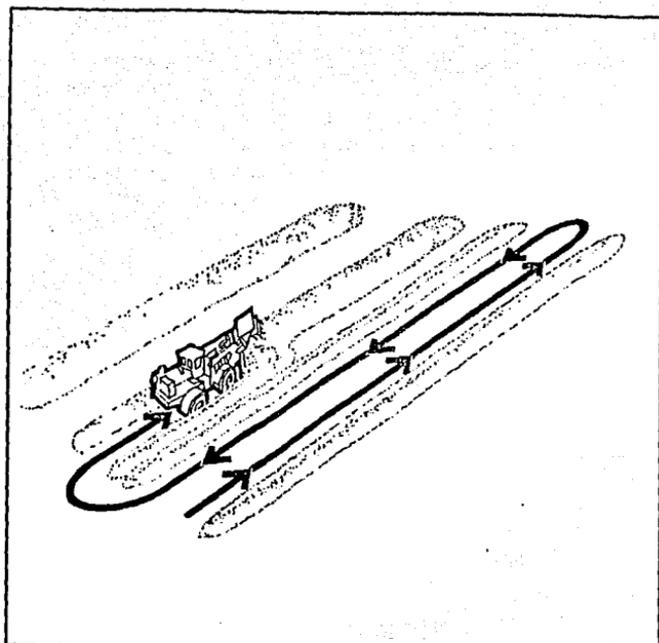


Figura 18. Arreglo de los Apilamientos para su volteo mediante la Terex 74-51

Dentro de las tecnologías mecanizadas existentes, dos han tenido éxito comercialmente, la tecnología de Apilamiento Estático (Static Pile) y la Tecnología en Digestor (In-vessel).

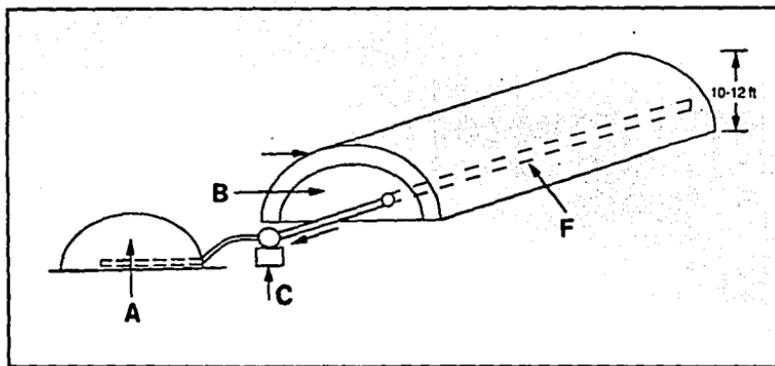
5.2.2.2 Tecnología de Apilamiento Estático (Static-Pile)

La tecnología de apilamiento estático consiste en la formación de apilamientos de residuos municipales que reciben aireación forzada por medio de un sistema mecánico (Véase figura 19) por estar colocados sobre un arreglo de tuberías conectado a una bomba o sistema de bombeo de aire. Las bombas pueden funcionar en sentido positivo o negativo inyectando aire al apilamiento o extrayendo los gases liberados por el sistema y se controlan mediante un sistema de retroalimentación dependiente del tiempo o de la temperatura en el apilamiento.

El proceso de compostaje por Apilamiento estático puede llevarse a cabo ya sea a cubierto o a la intemperie, en este último caso deberán tomarse en cuenta todas las desventajas que esto implica, que son las mismas asociadas al método de Apilamiento (Windrows).

La circulación de aire a través del apilamiento de composta suministra el oxígeno requerido por la población microbiana y evita el sobre calentamiento del apilamiento. La remoción del calor y del vapor de agua generados en el interior, permite que el apilamiento se enfríe en caso necesario y así, es posible mantener las condiciones de temperatura en el punto óptimo durante todo el proceso. El sistema de suministro de aire (enfriamiento) posibilita la formación de apilamientos de gran altura disminuyendo así los requerimientos de terreno.

Los sistemas más avanzados dentro de la tecnología de apilamiento estático cuentan con una flecha móvil asociada al sistema de tuberías de suministro de aire, para evitar que las corrientes de aire que se introduce al apilamiento formen "canales" de aire a través de la masa de residuos, ya que si esto ocurre, el movimiento del aire seca los residuos inmediatamente adyacentes, impidiendo que el aire penetre de manera uniforme al resto de la



- | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| A. Filtro de olores | B. Residuos Sólidos Municipales |
| C. Bomba | D. Cubierta de composta de 6-12" |
| E. Flujo de gases de salida | F. Tubería de aireación perforada |

Figura 19. Esquema de sistemas de fabricación de composta mediante la Tecnología de Apilamiento Estático

masa, pudiéndose llegar inclusive a rangos eminentemente anaerobios. Estos sistemas son especialmente útiles para sistemas que manejan residuos muy poco porosos con bajo contenido de materiales de estructura firme, en los cuales la difusión natural de aire a través de la masa de material es difícil (Véase sección 5.1.4 y 5.2.1 del Capítulo 4) .

En los procesos de apilamiento estático, las temperaturas alcanzadas en la parte interna de los apilamientos son suficientemente altas para garantizar la destrucción térmica de organismos patógenos y semillas. Sin embargo, la superficie exterior de los apilamientos no llega nunca a la temperatura deseada, por lo que es necesario cubrir los apilamientos de residuos sin compostar con una capa de 6 a 12 pulgadas de composta terminada, la cual funciona como aislante y asegura que la totalidad de los materiales a compostar alcancen las temperaturas requeridas.

Mediante esta tecnología los problemas asociados a malos olores se minimizan, ya que estos surgen principalmente durante los volteos, en los que los residuos en proceso de descomposición entran en contacto con el aire atmosférico. La ruptura de los apilamientos se lleva a cabo por primera vez cuando el proceso de compostaje casi ha terminado. En caso de ser necesario pueden utilizarse filtros de aire en las zonas de apilamientos para evitar la migración de olores a predios vecinos.

El tiempo de descomposición mediante esta tecnología puede variar entre 6 y 12 semanas dependiendo principalmente de la potencia del sistema de suministro de aire y de la susceptibilidad del sistema a verse afectado por las condiciones meteorológicas.

Una vez que la etapa de compostaje ha concluido, el producto pasa a través de una serie de operaciones de post-tratamiento.

La tecnología de apilamiento estático implica los menores costos de inversión de todas las tecnologías, ya que no requiere de cantidades de terreno tan elevadas como la tecnología Windrows, ni genera costos tan elevados de inversión y operación asociadas a adquisición de equipos y energéticos respectivamente.

5.2.2.3 Tecnología en digestor

Para todos los sistemas de compostaje en digestor, los residuos deben encontrarse previamente molidos y separados.

La función de los digestores radica en dar a los residuos tratamiento bioquímico mediante una fermentación aerobia que se lleva a cabo condiciones óptimas de proceso.

La adición de agua dentro del Digestor se lleva a cabo mediante la instalación de boquillas dentro de la unidad, la adición de otro tipo de sustancias se lleva a cabo durante la carga de material molido.

Las diferencias más importantes en el diseño de los digestores para fabricación de composta se encuentran en el método de aireación. Los sistemas de aireación más comúnmente empleados son:

1. Por caída libre de los residuos de un nivel a otro dentro del reactor.
2. Mediante sistemas de agitación que giran a través de la masa de residuos.
3. Mediante sistemas de tambor rotatorio que permiten la aireación de los residuos por golpeo.
4. Mediante el suministro de aire por los fondos y la agitación mediante una banda dentada sin fin.

Los digestores en base a su estructura física y a los sistemas de suministro de aire, se clasifican en:

I. Sistemas de pisos múltiples

1. Digestores verticales de etapas múltiples. Proceso Earp-Thomas

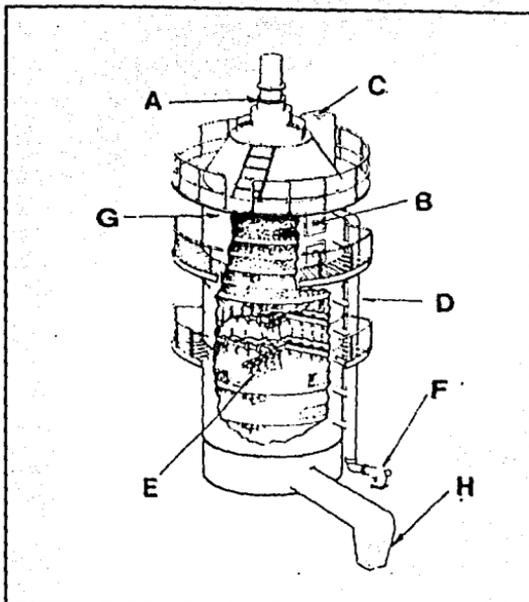
Uno de los procesos más utiliza comercialmente para la fabricación de composta, consiste en el uso de un silo dividido aproximadamente en seis u ocho secciones, llamado digestor Earp-

Thomas. La estructura del tanque esta firmemente cerrada, y de arriba hacia abajo se presentan las diferentes condiciones atmosféricas y de temperatura necesarias para mantener los organismos de bajas medias y altas temperaturas. El aire entra a la unidad mediante una bomba, mediante boquillas por los fondos, a través de las paredes de cada cámara y por las aletas de agitación. Cada sección cuenta con una perforación en su centro para permitir el paso de una flecha que atraviesa toda la altura del silo como se muestra en la figura 20. La flecha cuenta brazos aletados, los cuales mezclan los residuos en cada sección y a través de los cuales entra aire a los residuos, una vez que se ha completado el tiempo de retención en una etapa, los residuos bajan a la cámara inmediata inferior. El tiempo de retención en cada sección es aproximadamente de un día, al salir de la unidad, los residuos requieren de un tiempo de maduración posterior. Dos problemas asociados a este tipo de unidad son la gran cantidad de energía requerida para la operación del digestor y el esfuerzo cortante que se genera por la enorme magnitud del torque que producen las aletas de la flecha.

2. Digestor vertical de pisos múltiples. Proceso Peabody.

El digestor es un cilindro vertical con varios niveles, que cuenta por lo general con 5 cabinas, sin embargo, este número puede variar en función del tipo de residuos a tratar.

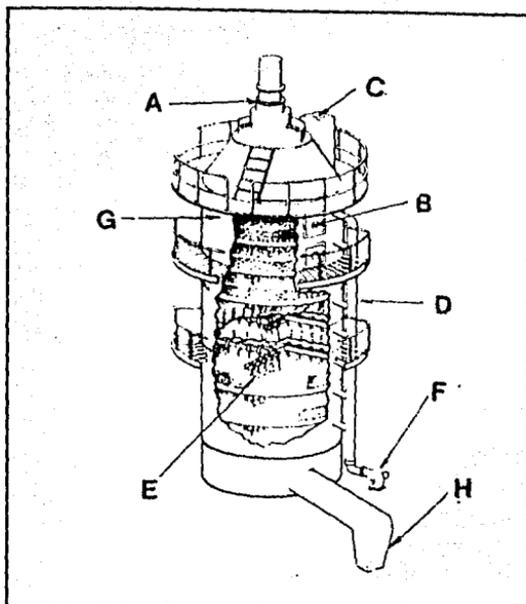
El tanque externo está formado por una placa rolada de metal o una estructura de concreto, en el interior se encuentran tanques independientes que cuentan con aspas rotatorias capaces de cambiar su velocidad de rotación y mantener así las condiciones aerobias durante todo el proceso, además cuentan con una compuerta inferior en cada nivel, para permitir la salida de los residuos a las cámaras inferiores. Durante el proceso de transferencia de una cámara a otra, los residuos sufren una agitación muy violenta, por acción del aspa rotatoria. El aire se introduce al reactor mediante una bomba, el tiempo de retención en cada cabina es aproximadamente de un día (véase figura 21).



- A. Flecha
- C. Alimentación de residuos
- E. Brazos Paletados
- G. Recipiente Cerrado

- B. Ventana de Inspección
- D. Tubería de alimentación de aire
- F. Bomba
- H. Descarga de composta

Figura 20. Diagrama del digestor empleado en el proceso Earp-Thomas.



- | | | | |
|----|--------------------------|----|---------------------------------|
| A. | Flecha | B. | Ventana de Inspección |
| C. | Alimentación de residuos | D. | Tubería de alimentación de aire |
| E. | Brazos Paletados | F. | Bomba |
| G. | Recipiente Cerrado | H. | Descarga de composta |

Figura 20. Diagrama del digestor empleado en el proceso Earp-Thomas.

3. Digestor vertical paletado

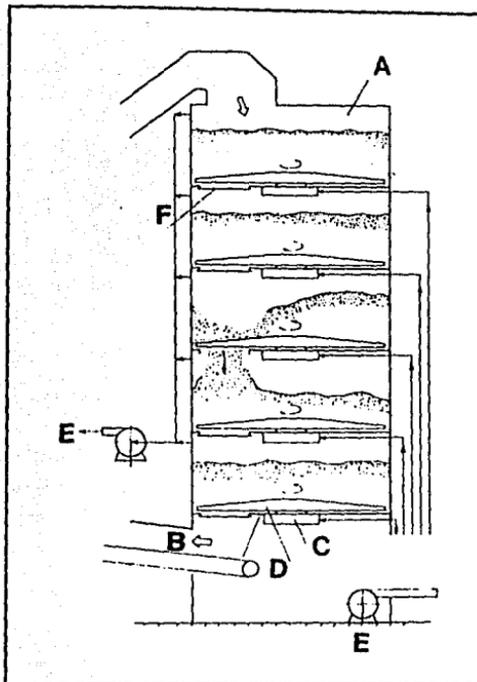
Este reactor cuenta con un cilindro interior, que soporta las paletas por medio de un brazos fijos a una flecha rotatoria, dentro de un tanque cilíndrico de etapas múltiples. Las paletas se encuentran colocadas sobre cada una de las cámaras y pueden girar a una misma velocidad relativamente alta mediante una flecha central según se muestra en la figura 22. Como se observa, las paletas y los brazos paletados se encuentran desfasados unos con respecto a otros y mientras que las paletas giran en dirección radial sobre los brazos, éstos últimos giran alrededor de la flecha longitudinal, lo cual garantiza que todo el material se agita uniformemente. Una vez terminado el tiempo de retención en cada cámara, el material pasa a la cámara inmediata hasta descargarse por la cámara inferior.

4. Digestor Vertical de etapas múltiples y piso móvil.

Como se muestra en la figura 23, el material se apila de uno a dos metros de altura sobre el piso móvil del nivel superior, y se mantiene a una altura constante a lo largo del eje horizontal, mediante un rasador rotatorio. El material compostable se mueve lentamente en dirección horizontal y se le suministra aire por el piso de cada nivel, subsecuentemente, el material cae de acuerdo con la cantidad de material alimentado. De esta manera el material pasa de una etapa superior a la inmediata inferior, etapa por etapa y durante este proceso se agita y se ventila adecuadamente para obtener la composta a la salida de la última etapa.

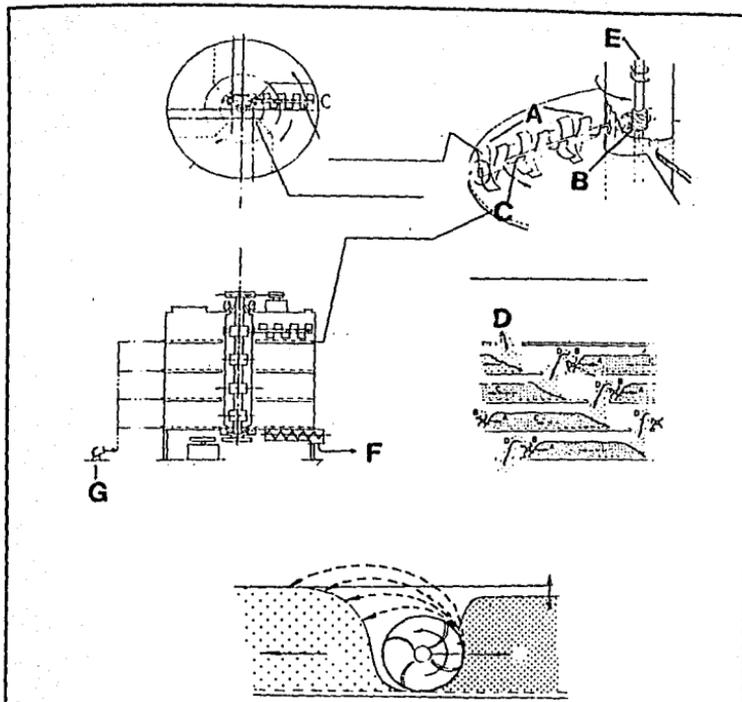
5. Digestor Vertical de caída libre

El digestor vertical de caída libre, deja caer material intermitentemente desde la parte superior al fondo del digestor. El tanque, de concreto o acero, por lo general es de sección cuadrada. El material cae al abrir por peso varias compuertas o al hacer girar rodillos aletados.



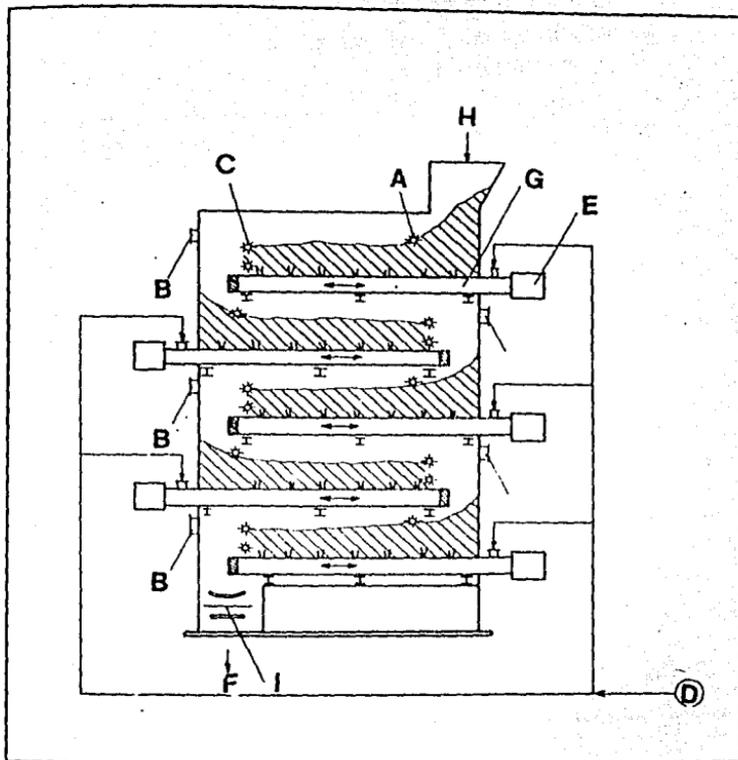
- | | |
|---------------------------|-----------------------|
| A. Cámara de fermentación | B. Salida de residuos |
| C. Flecha Rotatoria | D. Brazos rotatorios |
| E. Bomba | F. Descarga de cámara |

Figura 21. Digestor Vertical de pisos múltiples. Proceso Peabody



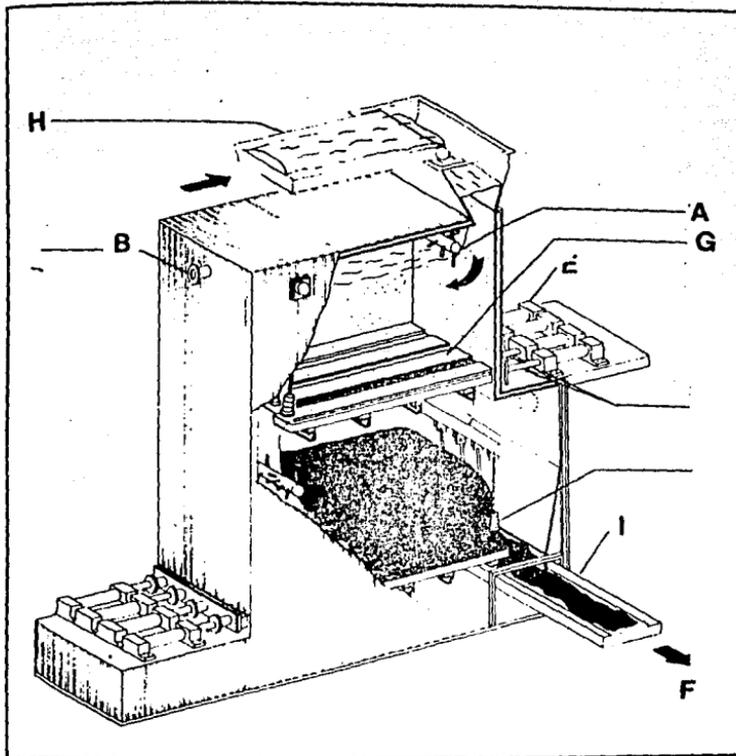
- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| A. Paletas giratorias | B. Eje principal de rotación |
| C. Brazos fijos | D. Alimentación de residuos |
| E. Flecha rotatoria | F. Descarga de composta |
| G. Bomba de suministro de aire | H. Eje principal de rotación |

Figura 22. Digestor Vertical paletado de etapas múltiples



- | | | |
|--------------------------------|----------------------|------------------------|
| A. Rasador Rotatorio | B. Salida de gases | C. Dispositivo de paso |
| D. Bomba de suministro de aire | E. Motor de piso | |
| F. Descarga de composta | G. Piso Móvil | |
| H. Alimentación de residuos | I. Banda de descarga | |

Figura 23. Digestor Vertical de etapas múltiples y piso móvil



- | | | |
|--------------------------------|----------------------|------------------------|
| A. Rasador Rotatorio | B. Salida de gases | C. Dispositivo de paso |
| D. Bomba de suministro de aire | E. Motor de piso | |
| F. Descarga de composta | G. Piso Móvil | |
| H. Alimentación de residuos | I. Banda de descarga | |

Figura 23a. Estructura del digestor Vertical de etapas múltiples y piso móvil

El aire entra a través de las paredes del tanque, y a través de los rodillos y compuertas y se descarga por la parte inferior o viceversa, al terminar la etapa de compostaje, el producto pasa a la etapa de curado. (Véase figura 24)

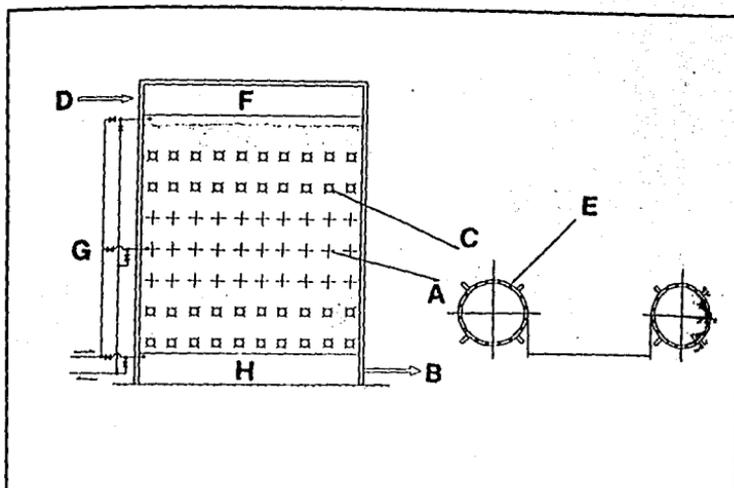
6. Proceso Naturizer

Una planta que emplee el proceso Naturizer esta formada por dos estructuras de 3 pisos cada una. Los residuos se transportan mediante una banda transportadora al piso superior de la primera estructura, donde permanecen por un periodo de 24 horas, después del cual se dejan caer al piso intermedio, para hacer esto posible cada piso debe estar construido en forma de canal en V y equipado de manera que pueda voltearse hacia abajo y descargar el material hacia el nivel inferior. Los residuos deben permanecer 24 horas en cada nivel. Al salir del nivel inferior de la primera estructura, se vuelve a moler, se transporta al piso superior de la segunda estructura y se repite el procedimiento, por lo tanto el tiempo total de residencia en la planta es de 6 días, después de lo cual el material se apila de uno a dos meses y se deben llevar a cabo volteos ocasionalmente.

II. Sistemas Rotatorios

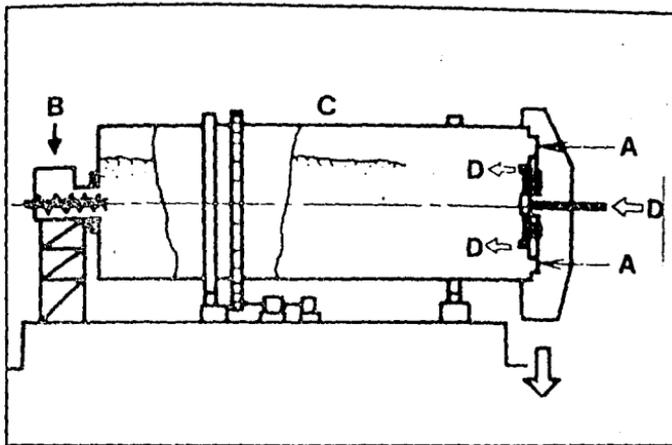
1. Digestor Rotatorio Horizontal

El digestor Rotatorio Horizontal cuenta con un sistema de agitación por golpeo, en el que los residuos suben en la dirección de rotación, por la pared interna del digestor, cuando éste comienza a girar, por efecto de la fuerza de fricción con la pared interna del tambor y vuelven a caer por efecto de la gravedad. Por la repetición de este movimiento, se puede garantizar la agitación de los residuos y su aireación constante. Además, al caer los residuos se van moviendo en dirección longitudinal hacia la salida del tanque, véase figura 25.



- | | | | |
|----|-------------------|----|--------------------------|
| A. | Compuertas | B. | Salida de composta |
| C. | Rodillos Aletados | D. | Etrada de material |
| E. | Entrada de aire | F. | Distribuidor de residuos |
| G. | Venteos | H. | Banda de descarga |

Figura 24. Digestor vertical de caída libre



- A. Puerta de Descarga de Composta
- B. Alimentación de residuos
- C. Cámara de Fermentación
- D. Sistema de suministro de aire

Figura 25. Digestor Rotatorio Horizontal

Las condiciones de tratamiento se pueden resumir de la siguiente manera:

- La temperatura del aire de ventilación debe ser de 20 °C y el gasto de 0.1 m³/min.
- El suministro de aire es lateral.
- La velocidad de rotación estándar de agitación en el reactor debe ser de 0.2 a 0.32 r.p.m.
- El tiempo de retención para fermentación completa debe ser de 5 a 8 días y de 1 a 4 para fermentación preliminar.
- El volumen de residuos que se carga dentro del reactor entre la capacidad del tanque no debe ser mayor del 80%.
- La temperatura promedio del reactor durante el proceso debe ser de 50 - 60 °C, alcanzando una máxima de 75 °C

2. Digestor Rotatorio. Proceso Dano

En la figura 26 se presenta un esquema del arreglo de una planta bio-estabilizadora. El proceso implica el uso de un tambor rotatorio a baja velocidad, equipado con mamparas en su interior, que permiten la separación de las diferentes etapas dentro del reactor.

Los residuos se introducen por un extremo del tambor y después de tres días de rotación lenta, salen por el extremo opuesto del tambor. El método de aireación que se emplea en este proceso es el proceso por golpeo y la inyección de aire al interior del tambor para asegurar un suministro constante de aire. Una vez terminado el tiempo de residencia, el contenido sale y se apila para pasar a la etapa de curado por un periodo de uno a dos meses dependiendo de la frecuencia de volteos.

III. Sistemas tipo Silo

1. Digestor tipo Silo

El digestor empleado es tipo silo y se encuentra equipado con un equipo de ventilación y un sistema de agitación lenta. La figura 27 muestra el tanque y sus partes principales. La alimentación se efectúa por la parte superior y se distribuye mediante un dispersor superior. El suministro de aire se lleva a cabo mediante una banda que alimenta aire por el fondo un tubo dispersor que lo distribuye.

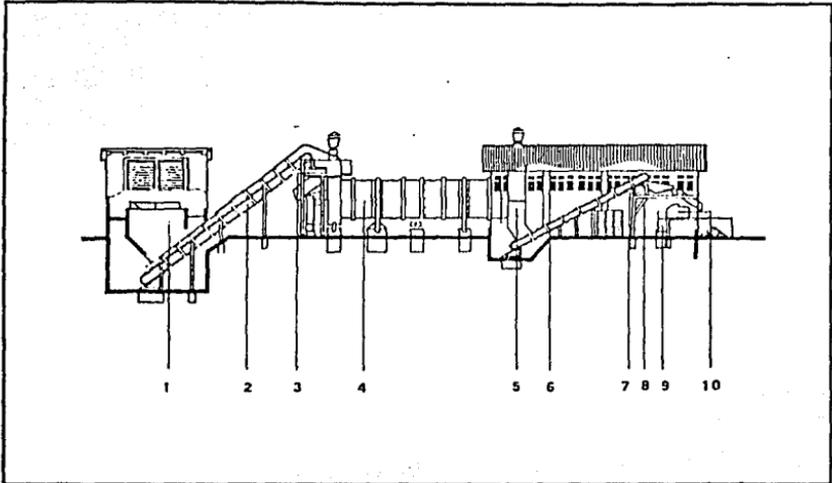
2. Proceso Fairfield-Hardy

Los residuos molidos se depositan mediante una banda de alimentación, en tanques cilíndricos abiertos equipados con un juego de tornillos enclavados en un puente que cuenta con un sistema de pivotaje (Véase figura 28). El puente gira de manera semejante un aspersor para riego. El aire entra mediante un tubo dispersor que lo transporta hacia los tornillos que están huecos en su interior y presentan bordes perforados, a través de los cuales sale el aire hacia el material a compostar. El monitoreo de la temperatura y la concentración de oxígeno en cada área del tanque, es posible regular la cantidad de aire de alimentación en cada sección y el rango de volteo a través de la velocidad de rotación del pivote. El tiempo de retención varía de seis a diez días y posteriormente los residuos se apilan para pasar a la etapa final o de curado.

IV. Sistema tipo caja

1. Digestor de volteo

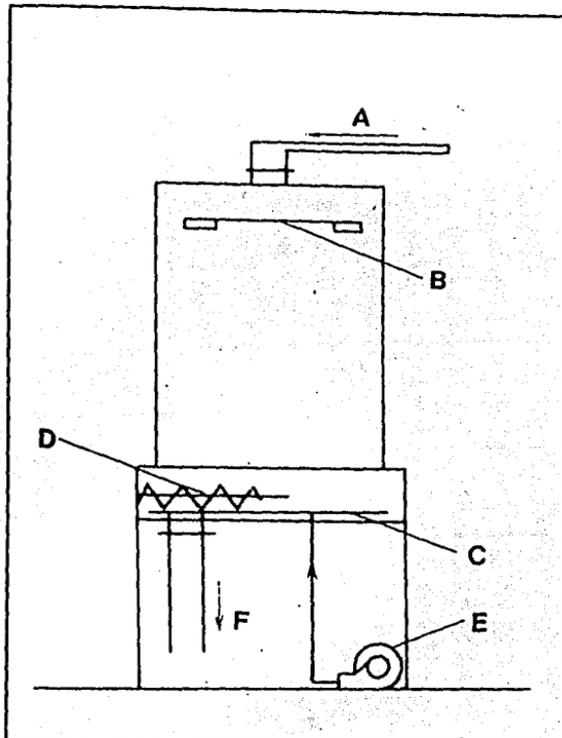
El digestor esta formado por una estructura horizontal fija que cuenta con un sistema de agitación mediante una máquina de volteo a fin de garantizar la uniformidad en las condiciones de humedad y concentración de oxígeno, dándose una descomposición rápida y libre de olores.



1. Tolva de recepción
2. Banda transportadora
3. Electroimán
4. Digestor Bio-estabilizador Dano
5. Tamizado primario

6. Banda transportadora
7. Electroimán
8. Malla vibratoria
9. Banda para composta
10. Molino

Figura 26 Planta Bio-estabilizadora. Proceso Dano.



- A. Alimentación
- C. Tubo dispersor
- E. Bomba

- B. Rasador de descarga
- D. Dispensador de residuos
- F. Descarga

Figura 27. Digestor tipo Silo

El esquema se muestra en la figura 29, el tiempo de retención es de 7 a 10 días con un volteo diario por lo general, sin embargo está puede variar en función del sustrato a compostar. El sistema de volteos cuenta con las siguientes partes:

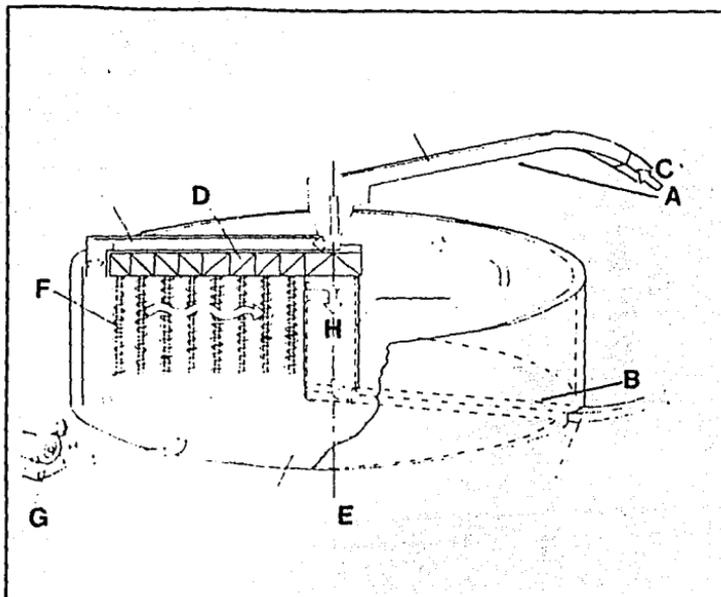
- El digestor cuenta con una máquina de volteo constituido por un carro de volteo equipado con una banda volada, que volteo los residuos mientras se mueve en el digestor mientras que volteo los residuos, al terminar el volteo vuelve al carro móvil y pasa a otro digestor.
- El digestor cuenta también con sistema de aireación forzada que divide el proceso de fermentación en sus diferentes etapas y alimenta el aire requerido en cada etapa.
- Cuando el proceso de volteo termina, la banda de salida lleva la composta hacia la siguiente etapa del digestor.

2. Sistema de volteo mediante grúas

El digestor se encuentra formado por una estructura cuadrangular fija, como se muestra en la figura 30 en la cual se apilan los residuos que se introducen mediante la banda de alimentación. Los residuos reciben aire mediante un sistema de aireación forzada, sincronizado con una grúa de techo que cuenta con una cubeta que volteo los residuos. El digestor cuenta además con una banda de piso que transporta los residuos hacia la siguiente etapa de proceso.

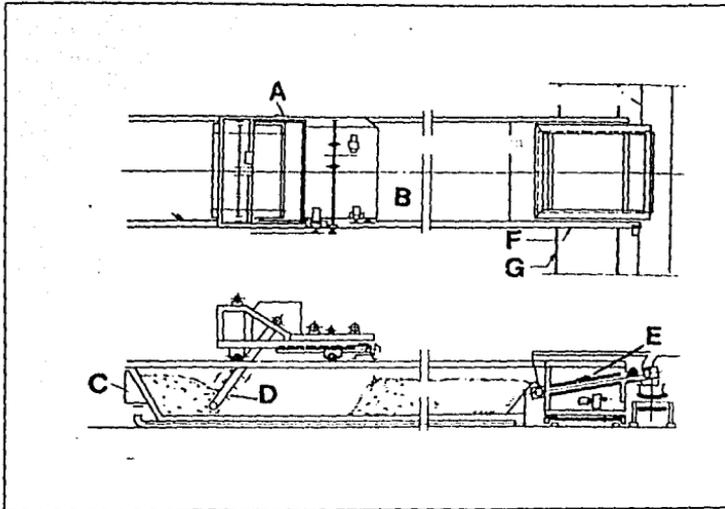
V. Sistemas Combinados

Existen ciertos procesos que emplean combinaciones de los diferentes tipos de digestores ya mencionados. La figura 31 muestra una de las posibles combinaciones, que cuenta con un digestor rotatorio como etapa primaria y un digestor vertical de etapas múltiples como etapa secundaria. El digestor primario rota lentamente dando uniformidad a los residuos e iniciando la etapa de fermentación por agitación y reducción del tamaño de partícula.



- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| A. Banda de alimentación | B. Banda de salida |
| C. Residuos de Alimentación | D. Puente |
| E. Tubo Dispersor | F. Tornillos de dispersión de aire |
| G. Bomba de alimentación de aire | H. Tolva de Salida |

Figura 28. Diagrama del dispositivo de aireación del digestor empleado en el proceso Fairfield-Hardy



- A. Máquina de volteo B. Tanque de fermentación C. Ducto de Aire
D. Banda volada E. Banda de salida
F. Carro móvil G. Riel

Figura 29 Dígester de volteo

Después los residuos se envían al digestor secundario, donde los residuos se descomponen bajo condiciones aerobias y posteriormente pasan a la etapa de curado.

5.3. TRATAMIENTO FINAL O CURADO

Antes de que el producto pueda ser utilizado o colocado en el mercado para su venta, requiere de un tratamiento final de maduración o curado.

Los objetivos principales de este proceso son los siguientes:

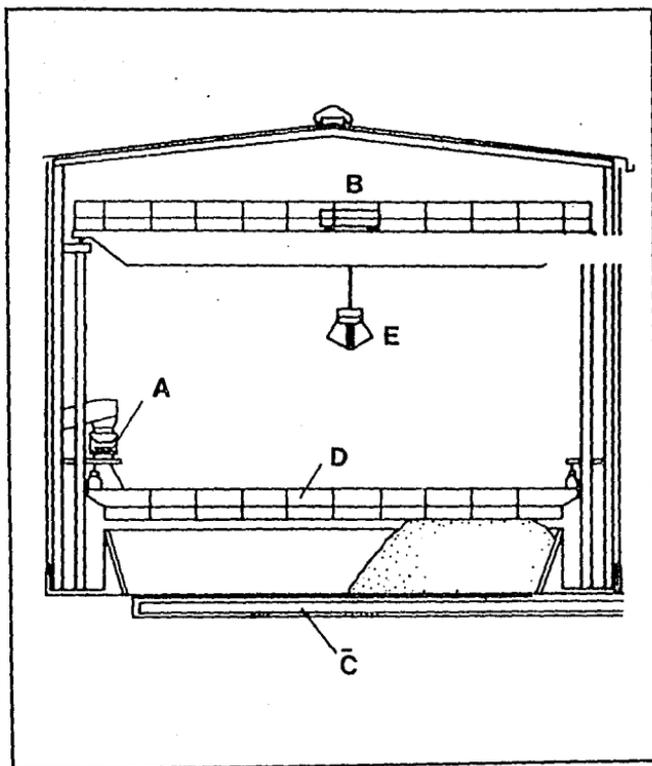
- Garantizar el grado de estabilidad del producto terminado.
- Eliminar materiales indeseables o partículas de gran tamaño que pudieran disminuir la calidad y por lo tanto la utilidad del producto.
- Alterar las propiedades físicas del producto para ajustarse a las necesidades del mercado.

El tratamiento final puede efectuarse antes o después de que el producto entre a almacén de producto terminado. Si se lleva a cabo después de que el producto se ha almacenado, presenta la ventaja de permitir que la etapa de descomposición se verifique por completo, facilitando la etapa final.

Por lo general el post-tratamiento de la composta producida en digestor requiere de una o dos etapas de cribado, una etapa de molienda final y una etapa de curado.

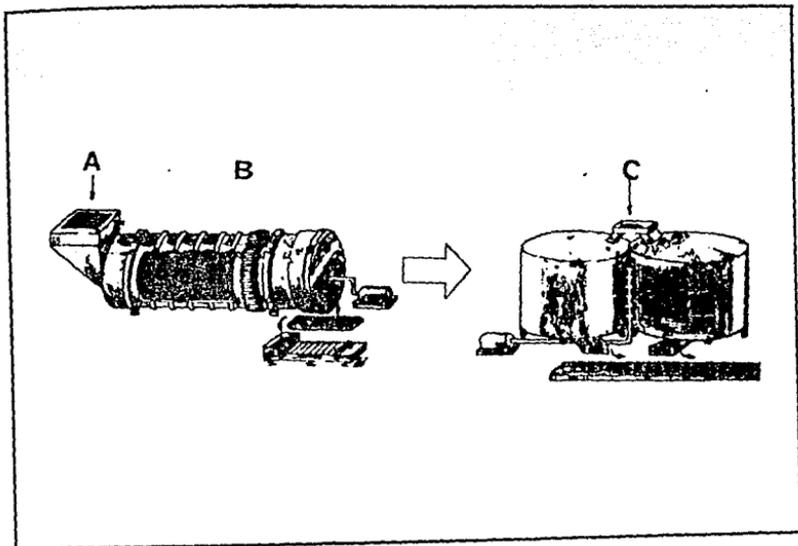
5.3.1 Cribado

Las cribas se utilizan para separar la composta de la fracción no compostable. Durante la operación de compostaje, la fracción orgánica sufre una reducción de partícula significativa, mientras que la fracción inorgánica no presenta ninguna reducción adicional durante dicho proceso. Por la misma razón, el cribado puede verificarse antes o después de la etapa de curado. Dependiendo de el proceso de fragmentación inicial y del tamaño de cribas utilizado, ciertas partículas de composta pueden atravesar a la corriente de no compostables durante el cribado.



- | | | | | | |
|----|-----------------------|----|---------------|----|-----------------|
| A. | Banda de Alimentación | B. | Grúa de techo | C. | Tubería de aire |
| D. | Banda de piso | E. | Cubeta | | |

Figura 30. Sistema de volteo por grúa



- A. Tolva de recepción de residuos
- B. Digestor primario
- C. Digestor secundario

Figura 31. Sistemas Combinados

Se pueden utilizar una o dos cribas para efectuar la separación gruesa seguida de una operación de cribado fino.

Las partículas de no compostables que se retienen durante el proceso de cribado se separan para su posterior confinamiento. Los materiales compostables que se retienen durante la operación de cribado pueden recircularse a la corriente de proceso.

5.3.2 Maduración o Curado

La operación de curado tiene por objeto garantizar para el producto final una condición de estabilidad biológica. Durante esta etapa la actividad microbiana continúa, pero a una velocidad mucho menor que durante la etapa de compostaje real. Conforme avanza la etapa de maduración el calor producido por los microorganismos es cada vez menor y el apilamiento comienza a enfriarse. Sin embargo es conveniente aclarar que el enfriamiento de los apilamientos no necesariamente significa que el producto ha pasado a la etapa de maduración, ya que como se mencionó anteriormente también puede ser indicativo de una reducción de actividad microbiana debido a condiciones de proceso inadecuadas.

El curado puede llevarse a cabo mediante aireación forzada o mediante aireación pasiva por volteos ocasionales. El proceso de maduración puede tomar de unos pocos días a semanas o meses dependiendo del grado de estabilidad que se haya alcanzado mediante el proceso de compostaje empleado.

5.3.3 Molienda final

Una vez que el proceso de maduración ha terminado, la composta debe prepararse para introducirse en el mercado. Dependiendo de las necesidades de cada consumidor se llevará a cabo el proceso de molienda final y posiblemente una última etapa de cribado.

Los requerimientos de energía para esta molienda final son de un 30-50% menores que para la primera etapa de reducción de tamaño de los residuos sólidos empleados como materia prima, ya que después del

proceso de compostaje, el material se ha tornado más suave y por lo tanto más fácil de moler. Además la cantidad de material que debe molerse es mucho menor, ya que durante el último proceso de cribado, todos los materiales no compostables han sido retirados de la corriente de proceso.

CAPITULO VI

TRATAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES POR COMPOSTAJE EN MEXICO D.F.

En la Ciudad de México existe únicamente una Planta Industrializadora de Desechos Sólidos Municipales, en la que se recibe, se separa y se trata parte de los residuos que llegan a la Estación de Transferencia de San Juan de Aragón. A fin de poder realizar la investigación sobre la situación actual de la Planta Industrializadora, se contactó mediante un oficio, al Ing. Jorge Sánchez, Director Técnico de Desechos Sólidos del Departamento del Distrito Federal. Véase Anexo A.

6.1 INSTALACIONES DE LA PLANTA INDUSTRIALIZADORA DE RESIDUOS SOLIDOS EN SAN JUAN DE ARAGON

La Planta se construyó durante los años de 1974 y 1975, buscando dar solución al problema de manejo de los residuos sólidos municipales en la Delegación de Gustavo A. Madero y al mismo tiempo, absorber a los pepenadores del tiradero de Santa Cruz Meyehualco a laborar dentro de un ambiente que les permitiera su integración global a la sociedad y obtener así un equilibrio entre el avance de la técnica y el desarrollo integral del hombre (25).

El Predio donde se construyó la Planta cuenta con una superficie de aproximadamente 14.5 Hectáreas. Se localiza en Avenida Taxímetros S/N entre las Avenidas 606, 412, 661 y 608 en la Colonia San Juan de Aragón en la Delegación Gustavo A. Madero al Noreste del Distrito Federal (Véase figura 32). Colinda al norte con el Bosque de San Juan de Aragón, al Sur y al

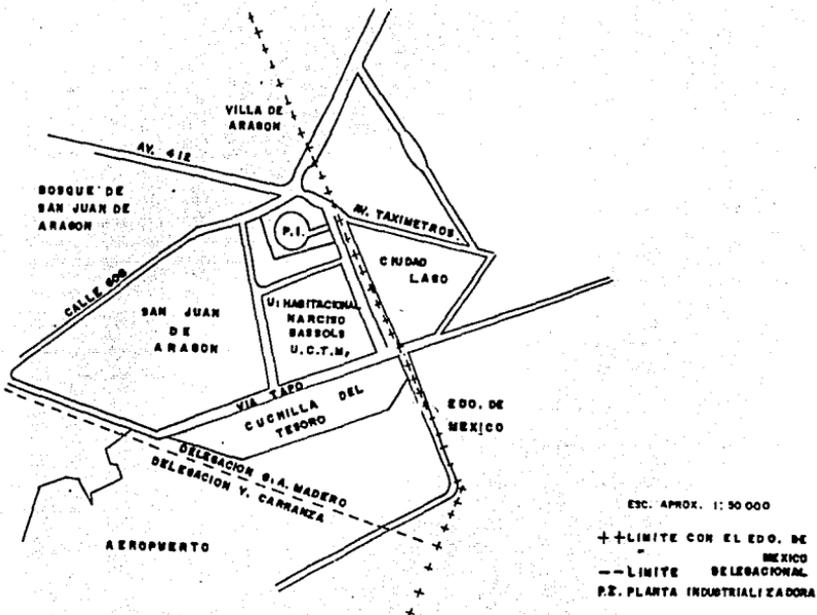


Figura 32. Ubicación del Predio de la Planta Industrializadora de Desechos Sólidos en San Juan de Aragón

Suroeste con la Unidad Habitacional Narciso Bassols y al Este con la Colonia Ciudad Lago.

La Planta comenzó a funcionar en el año de 1975. Su diseño incluye una estación de transferencia para recepción de residuos municipales, un Incinerador para residuos municipales y una línea de compostaje.

Dentro del predio existen diferentes áreas de oficinas, talleres, un laboratorio, un área de comedor, un campo de fútbol y áreas de servicios sanitarios; todas éstas, rodeadas por áreas verdes. Adicionalmente se cuenta con dos áreas de almacenamiento de material no instalada, tanto para incineración, como una línea para compostaje de 3,000 Ton/día.

6.2. PROCESO EMPLEADO EN LA PLANTA INDUSTRIALIZADORA DE RESIDUOS SOLIDOS EN SAN JUAN DE ARAGON

De la totalidad de los residuos que se reciben, una parte, que incluye todos aquellos objetos voluminosos que no son compostables como muebles viejos, línea blanca, etc., pasa a una etapa de compactación para ser enviada al relleno sanitario de Bordo Poniente, sin recibir ningún tratamiento adicional. La otra parte pasa a pretratamiento, antes de ingresar a la línea de Compostaje.

El proveedor de la línea de Compostaje instalada en San Juan de Aragón fue la compañía suiza Buhler-Miag. Esta línea fue adquirida con el objeto de llevar a cabo compostaje de residuos municipales mediante la tecnología de apilamiento. La capacidad máxima de la línea de compostaje es de 750 ton/día bajo el supuesto de que opere tres turnos diarios (22).

6.2.1 Etapa de Recepción

El proceso inicia con la entrada y recepción de los camiones recolectores de basura sobre 2 básculas de 30 y 50 toneladas, en las que se pesa la cantidad de residuos que ingresan y posteriormente se registra la cantidad. Del área de básculas, los residuos pasan a una rampa de acceso de 200 m de longitud que llega a las fosas de recepción, en donde la basura se descarga. Dichas fosas cuentan con capacidad para

almacenar doscientas cincuenta toneladas cada una, pudiendo descargar en ellas hasta nueve vehículos simultáneamente. La basura que se envía al relleno de Bordo Poniente se transfiere mediante dos grúas de brazos a cualquier camión compactador de transferencia (24).

En la parte superior de las fosas de recepción, se cuenta con una estructura acondicionada con rieles metálicos sobre los cuales se desplaza longitudinalmente un carro puente de carga que cuenta con dos grúas de almeja electro-hidráulicas con capacidad aproximada de 1.6 m³ y 4 toneladas con movimiento vertical. Tanto el carro como la grúa se operan a control remoto en el área de producción y a través de ellos, los residuos pasan hacia las tolvas de alimentación que se encuentran en la parte central de la estructura de las fosas de recepción. El área de tolvas se encuentra dividida en dos partes. La primera esta conformada por cuatro tolvas (1, 2, 3 y 4), llamadas tolvas de transbordo ya que los residuos que se alimentan a través de ellas pasan directamente al área de transferencia para transportarse al relleno sanitario. La otra área, conformada por las tolvas 5, 6, 7, 8, 9 y 10, recibe los residuos destinados al proceso de compostaje (22, 24).

Los residuos almacenados en el área de tolvas se recogen mediante las grúas y se descargan en tres transportadores inclinados (45°) de cadena, los cuales transportan los residuos al área de las bandas de clasificación.

6.2.2 Etapa de Pretratamiento

La etapa de Pre-tratamiento tiene como fin preparar la corriente de residuos municipales que se recibe en la planta, antes de que ingrese a la etapa de compostaje. Debido a que el compostaje es una técnica de tratamiento para residuos eminentemente orgánicos, es necesario separar hasta donde sea posible la fase inorgánica de la corriente de residuos. Con este fin, la Planta Industrializadora de Desechos Municipales de san Juan de Aragón cunela con una línea de separación que comprende etapas de separación tanto manuales como automáticas.

La separación manual o pepena tiene como fin la recuperación de materiales con valor comercial, como son papel, plástico, vidrio, chatarra.

llantas demás productos reutilizables. La planta cuenta con tres bandas transportadoras de clasificación ahuladas, que se controlan automáticamente desde un tablero de control y a cuyos lados se sitúan los operadores encargados de la recuperación de materiales. Cada operador se encarga de la recuperación de un tipo específico de material, el cual deposita en una tolva que descarga en otra banda transversal que se encuentra un nivel más abajo y que conduce los residuos clasificados a recipientes apropiados para su concentración, antes de pasar a máquinas de prensado y empacado o a carros que los transportan a un área de almacenamiento, donde permanecen hasta su venta.

La separación automática cuenta con las siguientes etapas:

- **Molinos**

Los residuos que continúan en proceso, que en su mayoría se componen por materia orgánica, pasan a tres molinos de martillos en donde se lleva a cabo la reducción y homogeneización de partículas puesto que el buen éxito de la operación de compostaje por apilamiento es función de la homogeneidad de los residuos, la cual crea condiciones favorables para la circulación de aire y agua a través de toda la masa de material a compostar. Posteriormente por acción de tres transportadoras de cadena pasan al edificio de Cribado Grueso.

EDIFICIO DE CRIBADO GRUESO

Parte Alta

- **Vibrador**

En esta sección, se inicia la separación mediante dos vibradores, cuya función principal es la de desmenuzar y extender la materia que recibe. Mediante este proceso, se separan de la corriente de proceso aquellos residuos que por sus características de dureza, no hayan podido ser triturados en los molinos. Este tipo de residuos normalmente son de naturaleza inorgánica.

- **Separación electromagnética**

Posteriormente, los residuos de cada línea pasan a un separador electromagnético cuyo fin es la separación del material ferroso, que cae en una tolva para su posterior disposición o aprovechamiento.

- **Cribado**

Los residuos que continúan en proceso se unen y pasan a una banda transportadora común que conduce la toda la corriente de basura a un tamiz de 60 mm. El material de rechazo que queda en el tamiz se descarga por medio de un transportador y se envía al relleno sanitario.

Parte Baja

- **Banda de Material Orgánico**

El material que atraviesa la criba de 60 mm. cae sobre la banda de material orgánico y desemboca en una tolva que conduce el material por medio de una banda de cadena, hasta una banda aérea en cuyos extremos se sitúa la grúa de puente que forma los apilamientos piramidales elongados de basura lista para compostarse.

6.2.3 Etapa de compostaje

La tecnología de compostaje utilizada en la Planta de San Juan de Aragón es la de Apilamiento (Windrows). Esta tecnología, siendo tecnológicamente la más simple, es una alternativa económicamente viable y adecuada para las condiciones de México.

Esta tecnología requiere de diferentes etapas de fermentación maduración de los residuos, las cuales se llevan a cabo en el patio de fermentación que cuenta con 5 Has. aproximadamente.

En la etapa de pre-fermentación, que usualmente dura 10 días, las pilas quedan inmóviles a fin de dar tiempo a los residuos para que inicien su descomposición. Posteriormente se lleva a cabo la parte principal del proceso de compostaje durante 20 o 30 días en los cuales los apilamientos reciben aireación mediante el uso de cargadores frontales una vez cada 3 ó 4 días. El control de humedad en los apilamientos se lleva a cabo

mediante mangueras de 3/4" de diámetro, a través de las cuales se suministra agua los aplamamientos.

Antes de que el producto pueda comercializarse, se requiere de un tratamiento final de maduración o curado, en la Planta de San Juan de Aragón, la composta se traslada mediante cargadores frontales o camiones al área de maduración final donde permanece en reposo durante dos meses, después de los cuales completa su ciclo de degradación total (22).

6.2.4 Tratamiento final

La Planta de composta cuenta con dos procesos de desmenuzado que se utilizan según la calidad requerida del producto. La etapa de tratamiento final se inicia con uno de estos procesos.

- **Molienda Fina I. Producción de Ricosuelo**

Mediante un cargador frontal, la composta pasa a un tubo elevador de cadena que alimenta un molino de martillos bi-rotor el cual descarga a una criba vibratoria de 15 mm. La composta tamizada se almacena en el terreno y mediante una banda se carga en camiones de carga. El material de rechazo resultante del tamizado, dependiendo de su calidad, se reprocesa en la etapa de fermentación o, en la mayoría de los casos se lleva al relleno sanitario de Bordo Poniente.

- **Molienda Fina II**

La segunda opción cuenta con una instalación más moderna que incluye una operación de molienda en dos etapas, seguidas de una operación de tamizado y una tercera operación de molienda que completa el proceso. El área cuenta con una tolva metálica que descansa sobre un transportador metálico de persiana con un rango selectivo de apertura para controlar el tamaño de partícula de la alimentación y de un molino de martillos uni-rotor que descarga sobre un elevador de cadena que alimenta otro molino pequeño localizado en la parte superior de la instalación. Este último descarga en un tambor rotatorio (Trommel) de 15 mm que separa y descarga al

exterior el material de diámetro mayor a 15 mm. El material cribado pasa a una última etapa de molienda en un tercer molino bi-rotor que descarga sobre un transportador de cadena que descarga directamente en el medio de transporte a utilizar (22).

La elección del tratamiento final depende del uso que se le vaya a dar a la composta y de la calidad requerida. Durante algún tiempo, el producto de mejor calidad se vendió al público empacado en bolsas de polietileno para su uso en jardines.

La figura 33 presenta un diagrama esquemático del proceso de compostaje de la Planta industrializadora y la figura 34 presenta un plano que muestra las diferentes áreas de la planta.

6.3. SITUACIÓN HISTÓRICA DE LA LÍNEA DE COMPOSTAJE EN LA PLANTA INDUSTRIALIZADORA DE SAN JUAN DE ARAGÓN

Como se mencionó anteriormente, la Planta de Compostaje, inició sus operaciones en 1975. En un principio, dio respuesta satisfactoria a la problemática del manejo de una gran parte de los residuos sólidos generados en la Delegación Gustavo A. Madero, la cual quedó encargada directamente de su operación y mantenimiento. Debido a la gran disponibilidad de espacio con que cuenta la instalación, la generación de olores y la proliferación de fauna nociva no generaron problemas que afectaran a la población circundante. El diseño de la planta, en especial de las áreas de almacenamiento de residuos y de las áreas de fermentación y maduración, el cual contempla la pavimentación adecuada y el uso de canaletas, evitó que se produjeran problemas de contaminación de suelo, por la generación de lixiviados (líquidos que se percolan a través de los residuos sólidos y que extraen material disuelto suspendido de ellos) (22, 24, 26). De esta manera, la proliferación de fauna y la generación de olores y lixiviados, que históricamente han constituido la mayor problemática que enfrentan las instalaciones productoras de composta mediante la tecnología de apilamiento, no generaron situaciones fuera de control en San Juan de Aragón. Sin embargo, desde la apertura de la Planta hasta Noviembre de 1993, la línea de compostaje nunca pudo operar regularmente durante tres

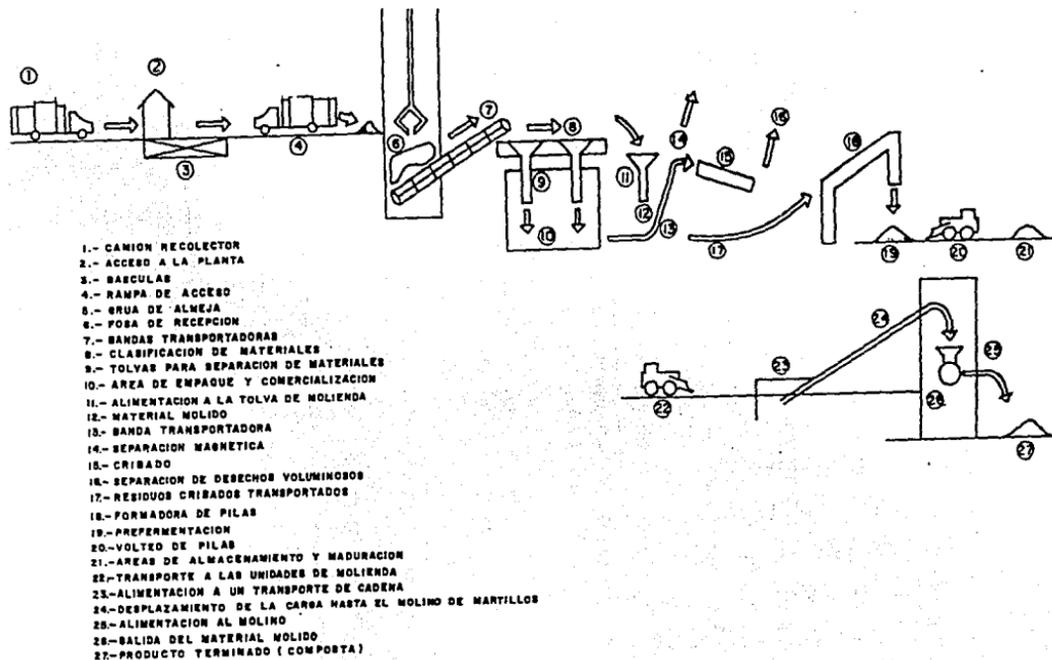


Figura 33. Proceso de Compostaje en San Juan de Aragón

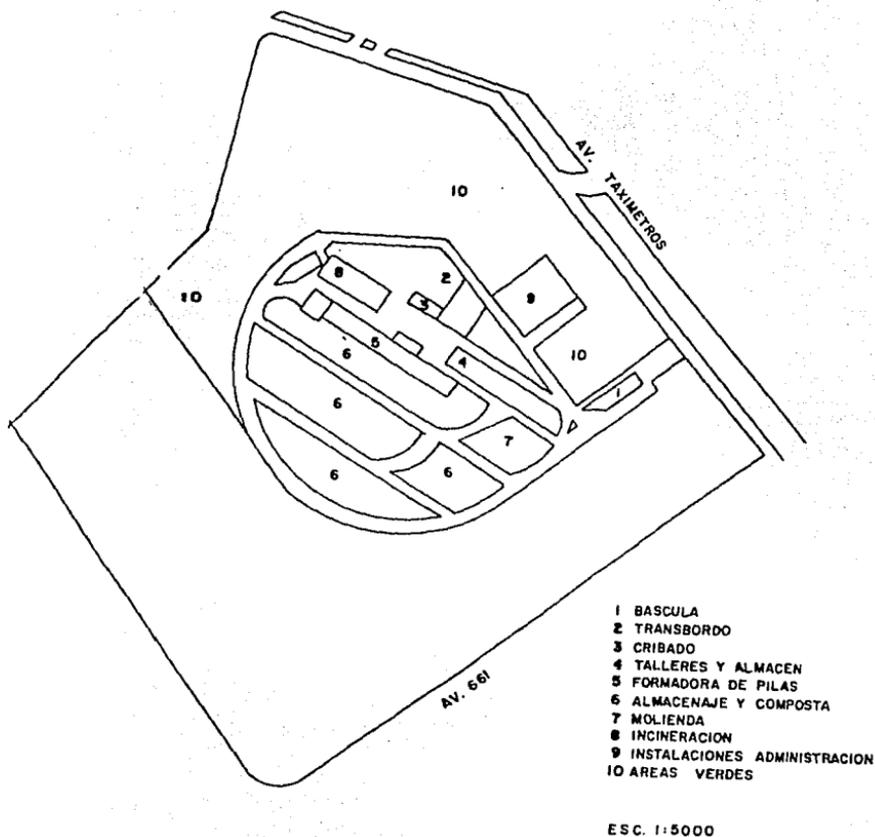


Figura 34. Distribución de Areas en la Planta Industrializadora de Desechos Sólidos

turnos a su máxima capacidad, teniendo además continuamente paros en los cuales no hubo producción de composta. Aún cuando tecnológicamente la instalación es adecuada, se dieron ciertos factores que imposibilitaron la operación continua de la línea de compostaje:

1. Falta de Mantenimiento Preventivo y Correctivo

El diseño conceptual de la Planta de San Juan de Aragón es relativamente simple y su operación no se basa en tecnología sofisticada; sin embargo, para operar la Planta satisfactoriamente, se requiere de un nivel mínimo básico de mantenimiento del equipo mecánico inevitablemente incluido, el cual nunca fue dado de manera programada, mediante técnicas y procedimientos adecuados.

2. Imposibilidad de Adquisición de Refacciones

Dado que la maquinaria utilizada en la producción de composta en San Juan de Aragón, fue adquirida en Suiza, durante mucho tiempo la adquisición de partes de recambio, principalmente para los molinos de martillos se vio imposibilitada, más tarde, se utilizaron partes fabricadas en el país que no llenaban las especificaciones del fabricante, lo cual produjo un descenso en la eficiencia global de la planta.

3. Falta de presupuesto para satisfacer las necesidades de la Planta

Los dos factores mencionados anteriormente se vieron agravados por el hecho de que la operación de la Planta nunca pudo considerarse como prioritaria dentro del Presupuesto destinado a la delegación Gustavo A. Madero, lo cual dificultó el mantenimiento de las condiciones requeridas por la Planta para la producción de un producto satisfactorio que pudiera venderse en su totalidad y generar recursos que le dieran la autosuficiencia económica.

4. Falta de motivación/supervisión del personal encargado de la separación manual previa al compostaje

Los operadores de separación en bandas continuas carecían de la motivación y de la supervisión adecuada a fin de garantizar que la separación de material no compostable se llevara a cabo adecuadamente. Debido a esto la prioridad de muchos de los operadores no fue la de

producir una corriente de residuos orgánicos libre de no compostables, sino la de "pepenar" para su conveniencia, con lo cual la calidad del producto final se vio seriamente afectada.

5. Falta de seguimiento a programas de control de calidad

La Planta Industrializadora cuenta con un laboratorio destinado a la investigación en materia de desechos sólidos a nivel nacional, así como a garantizar el Control de la Calidad de la composta producida. Adicionalmente, desde el inicio de la operación de la planta, se dio capacitación al personal de laboratorio a fin de determinar la calidad del producto final mediante una batería de pruebas que incluyen:

- El muestreo de los desechos sólidos recibidos mediante el método de cuarteo, para conocer la naturaleza y el porcentaje de subproductos presentes en la basura.
- El análisis físico a fin de determinar el peso volumétrico, y el poder calorífico de los desechos.
- El análisis químico que incluye la medición de pH, humedad, el porcentaje de cenizas, la determinación de materia orgánica contenida, la determinación del nitrógeno total, de la relación C/N, del amonio canjeable, de los nitratos presentes, la determinación de P y S y la determinación de la capacidad de intercambio catiónico total.
- Análisis de espectrofotometría de absorción atómica.
- Análisis de suelos a fin de determinar las posibles aplicaciones de la composta en base a sus características.
- Mediciones microbiológicas a fin de garantizar la inocuidad del producto (23).

Sin embargo, en la planta no se cuenta con registros históricos de las determinaciones de control de calidad de producto por periodos prolongados y nunca se establecieron programas de aseguramiento de calidad de producto. Adicionalmente, las malas condiciones de la planta, así como la deficiente separación de subproductos, imposibilitaron la producción de composta de calidad por lo que en muchos de los casos, el producto terminado se enviaba directamente al relleno sanitario junto con los residuos no procesados (24).

6. Falta de un esfuerzo continuo por crear mercados para el producto

La Planta no contaba con un departamento de ventas y/o mercadotecnia que garantizara la comercialización y venta de todo el producto generado, a fin de obtener ganancias derivadas del proceso de compostaje y darle así la mayor autosuficiencia económica posible.

7. Falta de continuidad en la Dirección de la Planta

La Planta, desde el momento en el que se constituyó una dependencia delegacional de Gustavo A Madero tuvo que enfrentar numerosos cambios en su directiva, no solamente por cambios sexenales, sino también de administración delegacional y de administración en la misma planta. Esto no favoreció la continuidad que se requiere a fin acumular experiencia a través de los años de operación y optimizar tanto el funcionamiento de la planta como las condiciones de fabricación del producto y asegurar así la venta de la totalidad del producto.

6.4.- SITUACION ACTUAL Y PERSPECTIVAS

En Noviembre de 1993, se tomó la decisión de parar por última vez la línea de compostaje en San Juan de Aragón y después de realizar un análisis, en base a la experiencia obtenida durante los 20 años en que operó el compostaje, se decidió parar definitivamente la operación y continuar la operación en San Juan de Aragón como una Planta de reciclaje de subproductos aprovechables. Adicionalmente, se decidió no habilitar la línea de compostaje de 3,000 toneladas diarias que se tenía en almacén para la nueva instalación de tratamiento de desechos sólidos en Bordo Poniente, sino dejar ésta también como recicladora de subproductos. Por el momento, se tiene contemplado el seguir, como hasta ahora, utilizando el relleno sanitario como mecanismo principal de disposición de desechos sólidos en México.

Aun cuando cabe la posibilidad de que en un futuro se vuelva utilizar el compostaje como técnica de tratamiento de desechos sólidos municipales en la Ciudad de México y su Area Metropolitana, según la experiencia adquirida en San Juan de Aragón y la tendencia de las autoridades actuales de desechos

sólidos en el DDF; esto no se hará mediante una administración delegacional e inclusive ninguna administración gubernamental, pero existe la probabilidad de que eventualmente se vuelva a utilizar el compostaje de residuos sólidos municipales mediante concesiones a fin de operar las instalaciones bajo el marco de empresa privada y autosuficiente, lo cual disminuirá en gran medida los problemas que generaron el cierre de la línea de compostaje de San Juan de Aragón.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

Con base en la experiencia adquirida durante la operación de dicha planta y la investigación realizada durante la elaboración de la presente tesis, es posible concluir lo siguiente:

- La estrategia prioritaria para la resolución de la problemática generada por los residuos sólidos municipales debe enfocarse hacia la reducción de la generación de los mismos, mediante la acción conjunta de los sectores gubernamentales, industriales, educativos y sociales.
- La reducción en la generación requiere, por parte del sector gubernamental, del desarrollo e implementación de legislación en materia de residuos sólidos municipales, puesto que la que actualmente existe no es suficiente para controlar adecuadamente su manejo. Asimismo se requiere de la creación de programas de capacitación y divulgación enfocados y apoyados por todos los sectores de la sociedad a fin de crear conciencia acerca de la urgente necesidad de la minimización de residuos .
- Por parte de los sectores educativo e industrial, se requiere del desarrollo de investigación básica y de la formación y actualización de profesionales de las diferentes áreas, y de manera especial de la Ingeniería Química, capaces de desarrollar tecnologías de manejo y confinamiento acordes a las necesidades y características de los residuos generados actualmente en nuestro país.

- Por parte de la sociedad, se requiere de la participación comprometida de todos los ciudadanos a fin de reducir al mínimo la producción per cápita de residuos y de reutilizar, hasta donde sea posible, todos los recursos materiales antes de convertirlos en desechos.
- El compostaje como técnica de tratamiento de residuos sólidos municipales se ha utilizado en la Ciudad de México desde 1975, a través de una línea de compostaje por Apilamiento instalada en la Planta Industrializadora de Desechos Sólidos de San Juan de Aragón en la delegación Gustavo A. Madero.
- El tratamiento de residuos sólidos municipales mediante compostaje se encuentra suspendido temporalmente en la Ciudad de México, desde fines de 1993, en que se paró la Planta de Compostaje en San Juan de Aragón. Después de una revisión por parte del Departamento del Distrito Federal de la administración global de los residuos sólidos municipales en el D.F.; la tecnología de confinamiento de residuos municipales que prevalece es el uso del Relleno Sanitario aunado a la creación de plantas de reciclaje de subproductos inorgánicos aprovechables.
- Desde un punto de vista puramente técnico, el tratamiento de residuos municipales por compostaje mediante la tecnología de apilamiento, puede considerarse adecuado para las características globales de los residuos municipales producidos en la Ciudad de México, a reserva de la cantidad de terreno requerida para la etapa de compostaje y maduración. Sin embargo, el desempeño global de la línea de compostaje de la Planta Industrializadora de San Juan de Aragón, no puede considerarse satisfactorio debido principalmente a problemas de tipo administrativo. Con base en la experiencia adquirida, es recomendable adoptar para futuras plantas de reciclaje y compostaje, el tipo de administración que caracteriza a la

empresa privada con el fin de minimizar los problemas operativos generados por la falta de presupuesto y por la falta de continuidad en la dirección de la planta debida a cambios de administraciones gubernamentales. El enfoque de empresa privada conlleva también el mantenimiento de un estricto control de calidad de producto y el desarrollo de estrategias de mercadotecnia y comercialización, que garanticen la venta de la totalidad del producto y la autosuficiencia económica de la planta. Esta última es factible únicamente si el compostaje se lleva a cabo conjuntamente con la venta y reciclaje de subproductos inorgánicos aprovechables.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Melosi, M.V. "Garbage in the cities. Refuse, Reform and the Environment 1880-1980" Texas A & M University Press, U.S.A. 1981.
2. Benassar, M.B., et all. "*Historia Moderna*" Ed. Akal, Madrid, España 1991.
3. Deffis, A. A, "*La Basura es la Solución*" Ed. Concepto, México 1989.
4. Restrepo, I., et all., "*Los Demonios del Consumo: Basura y Contaminación*" Centro de Ecodesarrollo, México 1991.
5. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. "*Dime lo que tiras y te diré quién eres*" Centro de Ecodesarrollo. México 1991.
6. Leyes y Códigos de México. *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Editorial Porrúa. Sexta Edición, México, 1992.
7. Leyes y Códigos de México. *Ley Orgánica del D.D.F.* Editorial Porrúa. Decimocuarta Edición México, 1993.
8. Resources, Conservation and Recycling, 4 (1990) 7-23. Elsevier Science Publishers B.V. / Pergamon Press plc, Netherlands.
9. Wilson, D. C. *Waste Management Planning, Evaluation, Technologies*. Clarendon Press. Oxford 1981.
10. Facultad de Ingeniería U.N.A.M. División de Educación Continua. *Tratamiento y Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales*. México D.F. 1992.
11. Bartone, C. R. *Resources, Conservation and Recycling*, 4 (1990) 7-23. Julio 18, 1990.

12. Canter, L. W. *Solid Wastes Systems Planning*. Impreso como manuscrito, Oklahoma, E.U.A., 1978.
13. Crawford, J.H. *Composting of Agricultural Wastes*. Loughry College of Agriculture. Tyrone, N. Ireland 1980.
14. Miller, F.C. *Degradation of Solid Wastes by Composting*. La Trobe, University Press. Victoria, Australia, 1990.
15. Waste Age, 20-8. *Composting Municipal Solid Wastes*. Agosto 1989
16. Sikora, L.J. Effect of Temperature Control on the Composting Process. J. Environ. Qual. U.S.A., 1984.
17. Bold, C. *Morphology of plants and Fungi*. Ed. Harper & Row. U.S.A., 1981.
18. University of Wisconsin. *Composting Municipal Solid Wastes*. U.S.A., Julio, 1989
19. Japan Institute for Infrastructure. *Guidelines for Construction of High Rate Composting Systems*. Tokio, Japón. 1983.
20. Dickens, P.S. Sludge Management and In-Vessel Systems. ByoCycle Southeast Workshop. Atlanta, 1986.
21. Kuhlman, L.R. *Windrow Composting of Agricultural and Municipal Wastes*. Elsevier Science Publishers. Netherlands, 1990.
22. D.D.F. Oficina de Impacto Ambiental e Investigación y Desarrollo. *Evaluación de Impacto Ambiental de la Planta Industrializadora de Desechos Sólidos de Aragón*. México, 1987.
23. D.D.F. *Manual de operación de laboratorio, Planta Industrializadora de Desechos Sólidos*. México 1975

24. Acción Ecológica S.A. de C.V. *Informe Planta Industrializadora de Desechos Sólidos San Juan de Aragón*. México, 1983.
25. D.D.F. *Planta Industrializadora de Desechos Sólidos*. México 1977.
26. Juárez, N.M. *Estudio Comparativo de la Composición de Lixiviados de Residuos Sólidos Municipales*. México 1988.
27. SEDUE. *Gaceta Ecológica*. Edición Especial. México, 1990.