



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA LA
VALORIZACIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GENERADOS
EN EL DISTRITO FEDERAL

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

SOFÍA PALACIOS GONZÁLEZ



MÉXICO, D.F.

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor:** M. en I. María Rafaela Gutiérrez Lara
VOCAL: **Profesor:** M. en C. Rolando Salvador García Gómez
SECRETARIO: **Profesor:** Dr. Alfonso Duran Moreno
1er. SUPLENTE: **Profesor:** Dr. Agustín García Reynoso
2° SUPLENTE: **Profesor:** M. en C. Gema Andraca Ayala

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

TORRE DE INGENIERÍA, 3ER PISO, ALA SUR

ASESOR DEL TEMA: DR. ALFONSO DURÁN MORENO

(Nombre y firma)

SUPERVISOR TÉCNICO (Si lo hay): M.I. ABRIL MORENO GUTIÉRREZ

(Nombre y firma)

SUSTENTANTE (S): SOFÍA PALACIOS GONZÁLEZ

(Nombre (s) y firma (s))

**“La Basura es un concepto humano;
todo en la naturaleza es utilizado
eventualmente.”**

Agradecimientos

Aunque para la realización de esta tesis, se ha requerido de mucho esfuerzo y dedicación de mi parte, no me hubiera sido posible terminarla sin el apoyo de las personas que agradezco a continuación:

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, el Dr. Alfonso Durán, por haberme dado la oportunidad de desarrollar este trabajo en su grupo de investigación, por confiar en mi capacidad y recibirme con los brazos abiertos en un grupo tan distinguido. Ha sido una fortuna trabajar al lado de un hombre con un conocimiento tan profundo del ámbito ambiental, comprometido con encontrar solución a los problemas ambientales que enfrenta México.

Quiero externar un especial agradecimiento a Abril Moreno, por su apoyo constante, el tiempo que me dedicó, y la paciencia que me tuvo en los meses que estuve trabajando. Desde el principio, me dio mucha seguridad contar con el apoyo de una mujer entregada y accesible, y con el paso del tiempo puedo afirmar que estas dos cualidades son vitales para el trabajo en equipo.

A mis compañeros de la torre, por ser siempre tan amables, y hacer que el día a día sea ameno; por compartir información y facilitarme el trabajo; por todas esas horas en estaciones de transferencia y todo lo que implicaron. Dicen por ahí que lo mejor de un equipo es la gente que lo conforma, y ustedes me lo confirmaron.

Al Fondo Mixto CONACyT – GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL por el financiamiento del proyecto No. DF-2008-C01-94261 “OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL DISTRITO FEDERAL”, proyecto marco en el cual se realizó este trabajo de tesis.

Agradezco a todos mis maestros, por haberme enseñado todo lo que me convirtió en una Ingeniera Química. En particular a todos los maestros del Departamento de Matemáticas, por impulsar mi pasión por los números y la solución a problemas, por incluirme en su dinámica y hacerme sentir parte de un equipo tan hermoso. Gracias César Rincón, por ser todo lo que quiero ser, una persona entregada, inteligente, alegre y llena de energía; por demostrar que la edad está en el espíritu y no en los años vividos; por apoyarme durante toda mi carrera, y ser un gran amigo.

Gracias a mis amigos. A Luki y Steph, por seguirme buscando aunque estaba desaparecida, por ayudarme con todo, y por estar siempre ahí. A Gabo, Chango, Kiki, Karen, y Charly, por todo lo compartido en la carrera, por hacer que los proyectos más pesados fueran divertidos, por todos los juegos de dominó, por hacerme reír tanto. A la Sangha, por ayudarme a crecer, por quitarme el mal humor y no dejar que me gane la rutina, por todo el cariño que me dan, y por impulsarme a seguir haciendo lo que más me gusta.

Por último, quisiera agradecer a mi familia, por haberme enseñado de forma continua, los últimos 25 años, mediante palabras y el ejemplo de sus acciones, que para que las cosas salgan bien tienes que entregarte por completo. Gracias a mis papás, Mariano y Ana, por darme la vida y enseñarme a vivirla. Gracias a mis hermanos, Mariano, Ana, María, Andrea, Paloma y José Luis, por brindarme un apoyo incondicional, por estar siempre presentes, por el amor que me dan a diario, expresado justo en la forma que lo necesito. Gracias a mis sobrinos, Fats, Sebas, Jero y María, por ser la luz de mi vida, por llenar mis días de ilusión y alegría, por ayudarme a ser niña otra vez.

¡En verdad no hubiera podido hacer esto sin ustedes!

Índice

| | |
|---|----|
| <i>i. Índice de gráficos</i> | 7 |
| <i>ii. Índice de fotografías</i> | 7 |
| <i>iii. Índice de diagramas</i> | 8 |
| <i>iv. Índice de tablas</i> | 9 |
| <i>v. Abreviaciones y Acrónimos</i> | 10 |
| 1. Introducción | 11 |
| 1.1. Objetivo General | 12 |
| 1.2. Objetivos Específicos | 12 |
| 1.3. Justificación | 13 |
| 2. Marco Teórico | 15 |
| 2.1. Clasificación de los residuos sólidos | 15 |
| 2.2. Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal | 16 |
| 2.2.1. Generación | 17 |
| 2.2.2. Recolección / Transporte | 19 |
| 2.2.3. Transferencia | 22 |
| 2.2.4. Tratamiento | 23 |
| i. Plantas de Selección | 23 |
| ii. Plantas de composta | 23 |
| 2.2.5. Disposición Final | 31 |
| 2.3. Estimación de la cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos generados en el Distrito Federal | 31 |
| 2.4. Resumen de las Tecnologías de Conversión | 32 |
| 2.4.1. Procesos de conversión Termoquímicos | 33 |
| i. Incineración | 33 |
| ii. Pirólisis | 35 |
| iii. Gasificación | 36 |
| 2.4.2. Procesos de conversión Bioquímicos | 38 |
| iv. Compostaje | 38 |
| v. Digestión Anaerobia | 40 |
| vi. Fermentación Alcohólica | 41 |
| 2.4.3. Procesos de conversión Físicoquímicos | 43 |

| | |
|---|----|
| vii. Transesterificación | 43 |
| viii. Producción de comida para animales | 45 |
| 3. Metodología | 47 |
| 4. Resultados y Discusión | 49 |
| 4.1. Evaluación de Viabilidad Técnica | 49 |
| 4.1.1. Determinación de los criterios. | 49 |
| 4.1.2. Asignación de valores a las alternativas. | 51 |
| 4.1.3. Asignación de valores a los criterios: | 52 |
| 4.1.4. Determinación de la función de Criterio | 53 |
| 4.2. Resumen de Opciones Tecnológicas | 54 |
| 4.2.1. Digestión Anaerobia | 54 |
| i. Sistema húmedo de una etapa | 57 |
| ii. Sistema seco de una etapa | 59 |
| iii. Sistemas multietapa | 62 |
| 4.2.2. Compostaje | 65 |
| iv. Sistemas de compostaje abierto | 67 |
| v. Sistemas de compostaje cerrado | 69 |
| 4.3. Evaluación de Opciones Tecnológicas | 70 |
| 4.3.1. Determinación de los criterios | 70 |
| 4.3.2. Asignación de valores a los criterios | 73 |
| 4.3.3. Definición de las funciones de preferencia y sus parámetros | 74 |
| 4.3.4. Determinación de la función de criterio | 78 |
| 4.4. Propuesta tecnológica de la alternativa seleccionada | 82 |
| 5. Conclusiones | 84 |
| 6. Bibliografía consultada | 87 |
| <i>Anexo I. Generación de Energía con Biogás</i> | 93 |
| <i>Anexo II. Emisiones de gases de efecto invernadero</i> | 94 |
| <i>Anexo III. Consideraciones para calcular el costo de operación de plantas de digestión anaerobia</i> | 97 |
| <i>Anexo IV. Cálculo del Valor Presente Neto y la Tasa Interna de Retorno</i> | 98 |

i. Índice de gráficos

| | |
|---|----|
| Gráfico 1. Residuos sólidos urbanos recolectados en las rutas de recolección separada en los años 2004 a 2008 | 21 |
| Gráfico 2. Comparación de flujos de preferencia netos de sistemas de digestión anaerobia. | 80 |

ii. Índice de fotografías

| | |
|--|----|
| Fotografía 1. Operadores triturando residuos que entran a la planta de composta de Bordo Poniente | 27 |
| Fotografía 2. Trituradora de la planta de composta de Bordo Poniente | 27 |
| Fotografía 3. Acumulación de troncos en la zona de descarga de materia prima, en la planta de composta de Bordo Poniente | 28 |
| Fotografía 4. Materia orgánica triturada, antes de ser llevada a las pilas. | 29 |
| Fotografía 5. Agua contaminada infiltrándose al subsuelo en la planta de composta de Bordo Poniente | 30 |
| Fotografía 6. Sistema de compostaje abierto | 67 |
| Fotografía 7. Sistema de compostaje cerrado | 69 |

iii. Índice de diagramas

| | |
|---|----|
| Diagrama 1 Diagrama de flujo de los RSU en el D.F. | 17 |
| Diagrama 2. Proceso de incineración | 34 |
| Diagrama 3. Proceso de pirólisis | 35 |
| Diagrama 4. Proceso de gasificación | 37 |
| Diagrama 5. Proceso de compostaje | 39 |
| Diagrama 6. Proceso de digestión anaerobia | 40 |
| Diagrama 7. Proceso de fermentación alcohólica | 42 |
| Diagrama 8. Proceso de transesterificación | 44 |
| Diagrama 9 Proceso de producción de comida para animales | 45 |
| Diagrama 10. Metodología seguida para la selección de la mejor alternativa tecnológica | 48 |
| Diagrama 11. Pasos en la digestión anaerobia | 55 |
| Diagrama 12. Proceso de digestión anaerobia en un sistema húmedo de una etapa | 58 |
| Diagrama 13. Proceso de digestión anaerobia en un sistema seco de una etapa | 60 |
| Diagrama 14. Proceso de digestión anaerobia en un sistema multietapa | 63 |
| Diagrama 15. Ingresos y egresos de la planta de tratamiento | 98 |

iv. Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Comparación de la generación de RSU en México por zona. | 18 |
| Tabla 2. Comparación de generación de RSU en distintos países. | 18 |
| Tabla 3. Avances en la instrumentación de rutas de recolección separada de los años 2004 a 2008. | 20 |
| Tabla 4. Comparación entre el aumento anual de rutas de recolección separada y el aumento anual de residuos que se separa | 21 |
| Tabla 5. Características principales de las plantas de composta en el Distrito Federal | 25 |
| Tabla 6. Capacidad de las plantas de composta del Distrito Federal para los años 2006, 2007 y 2008 | 26 |
| Tabla 7. Resumen de las tecnologías de conversión | 50 |
| Tabla 8. Bases para la asignación de valores a las tecnologías de conversión | 51 |
| Tabla 9. Valores asignados a las tecnologías de conversión | 52 |
| Tabla 10. Valores porcentuales asignados a los criterios de evaluación | 52 |
| Tabla 11. Resultados de la matriz de decisiones | 53 |
| Tabla 12. Plantas en operación de sistemas húmedos de una etapa | 58 |
| Tabla 13. Plantas en operación de sistemas secos de una etapa | 60 |
| Tabla 14. Plantas en operación de sistemas multietapa | 64 |
| Tabla 15. Resumen de criterios utilizados para la evaluación técnica, económica y ambiental de opciones tecnológicas. | 72 |
| Tabla 16. Criterios de evaluación de las opciones tecnológicas | 73 |
| Tabla 17. Funciones de preferencia | 75 |
| Tabla 18. Parámetros utilizados en el software Decision Lab ® | 77 |
| Tabla 19. Flujos netos de preferencia para las evaluaciones de opciones tecnológicas | 78 |
| Tabla 20. Flujos de preferencia para la evaluación final | 79 |
| Tabla 21. Propuesta tecnológica de la alternativa seleccionada | 82 |
| Tabla 22. Generación de energía eléctrica con Biogás | 93 |
| Tabla 23. Equivalencias de CO ₂ para sistemas de Digestión Anaerobia | 95 |
| Tabla 24. Equivalencias de CO ₂ para sistemas de Compostaje | 96 |
| Tabla 25. Resumen de los cálculos de costo de operación de plantas de digestión anaerobia | 97 |
| Tabla 26. Cálculos de costo de operación para plantas de compostaje | 99 |

v. Abreviaciones y Acrónimos

| | |
|-----------------------|---|
| USD\$ | Dólares Americanos |
| USD¢ | Centavos de dólar |
| Φ | Flujos netos de preferencia |
| $\Phi+$ | Flujos de preferencia positivos |
| $\Phi-$ | Flujos de preferencia negativos |
| °C | Grados Celsius |
| C/N | Relación carbono/nitrógeno |
| CH ₄ | Metano |
| CO | Monóxido de carbono |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| d | Día |
| <i>d</i> | Desviación o diferencia entre evaluaciones de criterios |
| D.F. | Distrito Federal |
| DGSU | Dirección General de Servicios Urbanos, Gobierno del D.F., México |
| FORSU | Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos |
| GEI | Gases de efecto invernadero |
| H ₂ O | Agua |
| H ₂ S | Sulfuro de hidrógeno |
| hab | Número de habitantes |
| kg | kilogramo |
| kg CO ₂ eq | Equivalencia de GEI, expresada como CO ₂ |
| kWh | kiloWatt hora |
| m ² | Metros cuadrados |
| m ³ | Metros cúbicos |
| N ₂ O | Monóxido de nitrógeno |
| NO ₂ | Dióxido de nitrógeno |
| NO _x | Óxidos de nitrógeno |
| O ₂ | Oxígeno |
| p | Límite de preferencia |
| P | Preferencia |
| PCG | Potencial de calentamiento global |
| q | Límite de indiferencia |
| RSU | Residuos Sólidos Urbanos |
| s | Límite Gaussiano |
| SV | Sólidos volátiles |
| t | Tonelada métrica |
| TIR | Tasa Interna de Retorno |
| tpa | Toneladas por año |
| tpd | Toneladas por día |
| TRH | Tiempo de retención hidráulica |
| VPN | Valor presente neto |

1. Introducción

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son aquellos residuos que se generan en una comunidad, exceptuando a los residuos industriales, y a los residuos de agricultura. Estos residuos incluyen los residuos domiciliarios (casas, unidades habitacionales, etc.), residuos comerciales (centros comerciales, mercados, hoteles, etc.) y residuos institucionales (escuelas, hospitales, etc.). El papel, cartón, residuos de alimento y residuos de jardinería, pueden clasificarse como residuos orgánicos o residuos biodegradables.

La Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) representa el 43% del total de los RSU generados en el Distrito Federal (D.F.). Esta fracción es la responsable de la generación de gas metano en los rellenos sanitarios, como resultado de las reacciones microbianas. El metano tiene un potencial de calentamiento global que es más de veinte veces mayor que el del dióxido de carbono, por lo que es de vital importancia el tratamiento de la FORSU en un sistema de manejo integral de residuos, pues por una parte se puede tener un valor agregado, y por la otra, se reduce la toxicidad y el volumen de los RSU que se dispone en rellenos sanitarios.

Este trabajo evalúa diferentes tecnologías de conversión de la FORSU para determinar primeramente la competitividad tecnológica, y posteriormente la ambiental y la económica. Estas tecnologías incluyen procesos termoquímicos como la gasificación, la pirólisis y la incineración; procesos bioquímicos como la digestión anaerobia, la digestión aerobia y la fermentación alcohólica; y por último, procesos fisicoquímicos como la transesterificación y la producción de comida para animales a partir de la FORSU.

Se realizó una primera evaluación de tecnologías de conversión de la FORSU con los siguientes criterios aplicables a estas tecnologías: la viabilidad técnica de los procesos, el tipo de alimentación que pueden admitir, los productos que se obtienen, la experiencia, y la capacidad de plantas instaladas. A partir de las tecnologías identificadas con mayor potencial, se realizó una segunda evaluación con base en los siguientes criterios de evaluación: los costos de operación, los costos de instalación, el área requerida, las repercusiones ambientales y la generación de productos valorizables.

1.1. Objetivo General

Presentar el diseño conceptual de una alternativa tecnológica para la valorización de la FORSU separada en sitio que actualmente no se aprovecha en el D.F.

1.2. Objetivos Específicos

- Analizar la valorización actual de la FORSU en el D.F.
- Analizar y evaluar las alternativas tecnológicas disponibles, para seleccionar la mejor alternativa, favoreciendo el uso de tecnologías limpias.
- Presentar un diseño conceptual de la propuesta tecnológica seleccionada para la valorización de la FORSU separada en sitio que hoy en día no se aprovecha en el D.F.

1.3. Justificación

En el Distrito Federal se generan aproximadamente 12,439 tpd de Residuos Sólidos Urbanos (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal 2008), de los cuales el 43% corresponden a residuos orgánicos. Actualmente se emplea únicamente el 4.4%¹ de la FORSU para la generación de composta, y el resto (95.6%), es dispuesto en un relleno sanitario sin que estos tengan un valor agregado.

Lo anterior resulta ser un grave problema, ya que por una parte el relleno sanitario que se encuentra actualmente en operación, conocido como Bordo Poniente, ya rebasó el tiempo de vida para el cual fue diseñado (Instituto de Acceso a la Información Pública del Distrito Federal 2007), lo que implica un riesgo inminente al ambiente, debido a que si la geomembrana, que se encuentra separando a los RSU del suelo, soporta más peso para el cual fue diseñada, ésta puede romperse y los lixiviados se infiltrarían hacia los mantos acuíferos subterráneos. Por otro lado, el cerrar el relleno sanitario actual sin contar con una alternativa para el destino final de los residuos, podría ocasionar serios problemas de salud, sociales y ambientales.

Dentro del Distrito Federal, no se cuenta con espacio disponible para crear otro relleno sanitario (Gasca Álvarez 2007), que cumpla con los requisitos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-1996. Si a lo anterior agregamos el hecho de que actualmente el Gobierno del Distrito Federal tiene un gasto público asociado a la disposición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), vs un ingreso, si los residuos se valorizaran por otro método, queda claro que es indispensable mejorar el estado actual del manejo integral de los residuos en el D.F.

¹ Este porcentaje fue calculado con la cantidad de producción de composta según el Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2008.

Generalmente cuando se habla de valorizar la Fracción Orgánica de los RSU, se piensa en compostaje, ya que esta tecnología es de las más simples y es la que actualmente se utiliza en el D.F., sin embargo, hay muchas otras tecnologías de valorización para la FORSU, mismas que originan productos con un mayor valor agregado.

Por lo anterior, es indispensable conocer las diferentes tecnologías disponibles, y proponer la mejor alternativa para el tratamiento de la FORSU en el D.F.

2. Marco Teórico

2.1. Clasificación de los residuos sólidos

La Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, clasifica a los residuos en dos tipos:

1. Residuos de manejo especial:

En su 3° artículo, fracción XXX define a los residuos de manejo especial como los que requieran sujetarse a planes de manejo específicos con el propósito de seleccionarlos, acopiarlos, transportarlos, aprovechar su valor o sujetarlos a tratamiento o disposición final de manera ambientalmente adecuada y controlada.

2. Residuos urbanos:

En su 3° artículo, fracción XXXI define a los residuos urbanos como los generados en casa habitación, unidad habitacional o similares que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques, los provenientes de cualquier otra actividad que genere residuos sólidos con características domiciliarias y los resultantes de la limpieza de las vías públicas y áreas comunes, siempre que no estén considerados como residuos de manejo especial. Dentro de los residuos urbanos, se distinguen dos tipos de residuos:

2.1 Residuos orgánicos:

En su 3° artículo, fracción XXXII define a los residuos orgánicos como todo residuo sólido biodegradable.

2.2 Residuos inorgánicos:

En su 3° artículo, fracción XXXII define a los residuos orgánicos como todo residuo que no tenga características de residuo orgánico y que pueda ser susceptible a un proceso de valorización para su reutilización y reciclaje.

2.2. Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal

La gestión integral de RSU comprende las siguientes etapas (Bertolino, y otros 2009):

1. Generación
2. Recolección
3. Transferencia / Transporte
4. Tratamiento
5. Disposición final.

En el diagrama 1 se presenta el flujo de los RSU generados en el D.F, donde se resumen las diferentes etapas de la gestión integral de los RSU

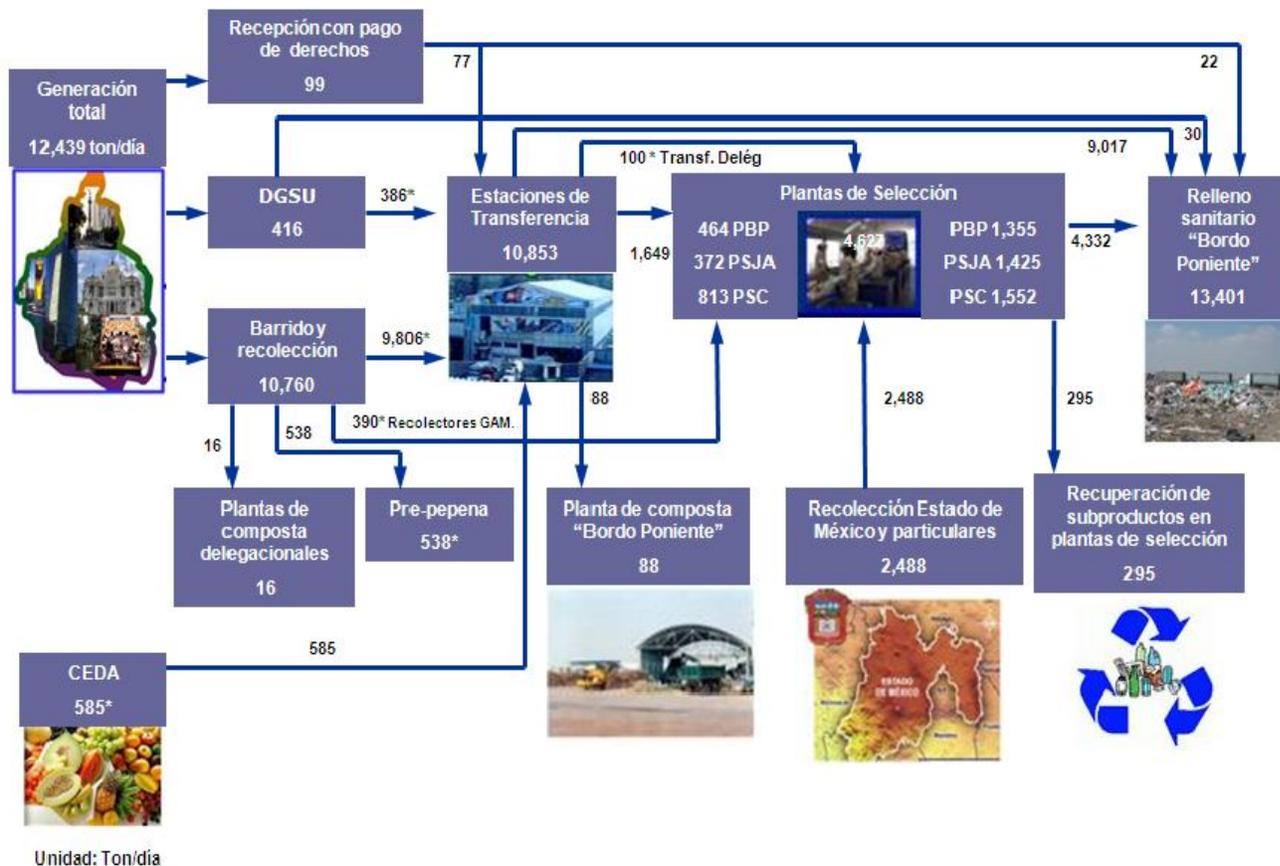


Diagrama 1 Diagrama de flujo de los RSU en el D.F.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, 2008

2.2.1. Generación

A grandes rasgos, la generación de residuos y su composición es en función del tamaño de la población, el nivel de vida y grado de desarrollo económico, los hábitos de consumo, los métodos de acondicionamiento de los productos, la época del año, entre muchas otras variables (Bertolino, y otros 2009).

Es importante comparar la generación de residuos *per cápita*, entre países y entre distintas regiones de nuestro país, ya que como se menciono con anterioridad, la generación de RSU depende de factores como el nivel de vida, o los hábitos de consumo.

En la tabla 1 se compara la generación de residuos por zona en nuestro país, y en la tabla 2 se compara la generación de residuos en diferentes países.

Tabla 1. Comparación de la generación de RSU en México por zona.

| Zona | kg/hab/día |
|-------------------|------------|
| Centro | 0.788 |
| DF | 1.329 |
| Norte | 0.891 |
| Sur | 0.629 |
| Fronteriza Norte | 0.965 |
| Promedio Nacional | 0.853 |

Fuente: (Muñoz Meza 2008)

Tabla 2. Comparación de generación de RSU en distintos países.

| País | kg/hab/día |
|--------------------------|------------|
| E.U.A | 1.97 |
| Brasil (Sao Paulo) | 1.35 |
| Canadá | 1.9 |
| Argentina (Buenos Aires) | 0.88 |
| Finlandia | 1.69 |
| Chile (Santiago) | 0.87 |
| Suiza | 1.3 |
| México | 0.853 |
| Japón | 1.12 |

Fuente: (Muñoz Meza 2008)

En la comparación anterior se observa una clara tendencia de una generación mayor de RSU en las zonas urbanas que en las zonas rurales. El Distrito Federal y la zona fronteriza del norte del país son las zonas más desarrolladas de México, y esto se refleja en la generación de basura. Si se comparan los países expuestos en la tabla 3, también se ve esta tendencia, ya que entre más

industrializado sea el país, mayor es la generación de basura, esto también está asociado a fenómenos culturales y geográficos.

En el conocimiento de la composición se debe basar la toma de decisiones referidas a los sistemas de tratamiento, y la composición depende del nivel de industrialización de la ciudad en cuestión. En el DF, en la década de los 90's los RSU presentaban en su composición 46.44% de fracción orgánica, y para la década de los 2000's este porcentaje se redujo a 42%(Ayala Hernández 2009).

Siguiendo estas tendencias, se puede concluir que conforme pase el tiempo, en el D.F. disminuirá la proporción de la FORSU, y aumentará la producción total de RSU.

2.2.2 Recolección / Transporte

Las delegaciones tienen a su cargo la recolección de los residuos y su transporte a las estaciones de transferencia, a las plantas de selección o directamente al sitio de disposición final Bordo Poniente.

El D.F. cuenta con 1,737 rutas de recolección, de las cuales 450 son rutas con recolección separada. Para incrementar la separación de residuos, las delegaciones establecieron metas anuales para la instrumentación de rutas de recolección separadas, donde tenían una meta mínima, y una meta objetivo, a la que sería ideal llegar durante ese año. A continuación se muestra en la tabla 3, por delegación, los avances en la instrumentación de rutas con recolección separada de los años 2004 a 2008.

Tabla 3. Avances en la instrumentación de rutas de recolección separada de los años 2004 a 2008.

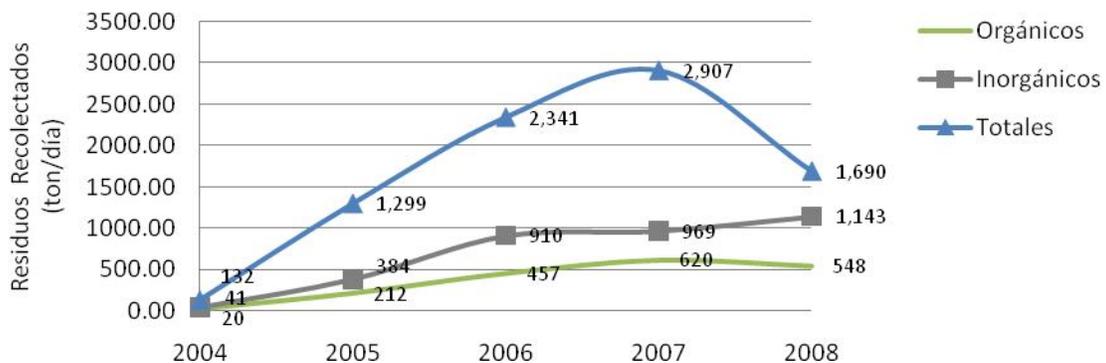
Fuente: (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal 2008)

| Delegación | Colonias Totales | 2004 | | | 2005 | | | | 2006 | | | | 2007 | | | | 2008 | | | |
|---------------------|------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|-------------|-----------|------------|-------------|-------------|-----------|------------|
| | | Meta | | Avance | Meta | | Avance | Acumulado | Meta | | Avance | Acumulado | Meta | | Avance | Acumulado | Meta | | Avance | Acumulado |
| | | Min | Obj | | Min | Obj | | | Min | Obj | | | Min | Obj | | | | | | |
| Álvaro Obregón | 257 | 15 | 30 | 4 | 45 | 75 | 32 | 36 | 89 | 134 | 0 | 36 | 149 | 209 | 23 | 59 | 224 | 298 | 1 | 60 |
| Azcapotzalco | 91 | 5 | 9 | 16 | 14 | 23 | 28 | 44 | 27 | 41 | 30 | 74 | 45 | 63 | 5 | 79 | 68 | 90 | 5 | 84 |
| Benito Juárez | 57 | 3 | 6 | 9 | 8 | 14 | 9 | 18 | 17 | 25 | 0 | 18 | 28 | 39 | 0 | 18 | 42 | 56 | 0 | 18 |
| Coyoacán | 140 | 6 | 13 | 0 | 19 | 32 | 20 | 20 | 38 | 57 | -17 | 3 | 63 | 88 | 2 | 5 | 95 | 126 | 0 | 5 |
| Cuajimalpa | 41 | 3 | 5 | 41 | 8 | 13 | -7 | 34 | 16 | 23 | -23 | 11 | 26 | 36 | 6 | 17 | 39 | 52 | -6 | 11 |
| Cuauhtemoc | 34 | 2 | 34 | 21 | 5 | 9 | 4 | 25 | 10 | 15 | 0 | 25 | 17 | 24 | 1 | 26 | 26 | 34 | -3 | 23 |
| Gustavo A. Madero | 244 | 9 | 18 | 6 | 27 | 46 | 13 | 19 | 55 | 82 | 34 | 53 | 91 | 127 | -23 | 30 | 137 | 182 | -2 | 28 |
| Iztacalco | 36 | 2 | 4 | 1 | 5 | 9 | 2 | 3 | 11 | 16 | 3 | 6 | 18 | 25 | 1 | 7 | 27 | 36 | 1 | 8 |
| Iztapalapa | 157 | 11 | 21 | 0 | 32 | 54 | 0 | 0 | 64 | 96 | 39 | 39 | 107 | 150 | 26 | 65 | 161 | 214 | -1 | 64 |
| Magdalena Contreras | 51 | 2 | 47 | 8 | 7 | 12 | 0 | 8 | 14 | 21 | 0 | 8 | 24 | 33 | 0 | 8 | 35 | 47 | 0 | 8 |
| Miguel Hidalgo | 81 | 4 | 9 | 7 | 13 | 22 | 2 | 9 | 26 | 40 | 0 | 9 | 44 | 62 | 17 | 26 | 66 | 88 | 14 | 40 |
| Milpa Alta | 12 | 1 | 3 | 2 | 4 | 7 | 10 | 12 | 9 | 13 | 2 | 14 | 15 | 20 | 1 | 15 | 22 | 29 | -6 | 9 |
| Tlahuac | 72 | 4 | 8 | 4 | 13 | 21 | 6 | 10 | 25 | 38 | 2 | 12 | 42 | 59 | 4 | 16 | 63 | 84 | 16 | 32 |
| Tlalpan | 243 | 10 | 20 | 12 | 30 | 50 | 18 | 30 | 59 | 89 | 6 | 36 | 99 | 139 | 17 | 53 | 149 | 198 | 34 | 87 |
| Venustiano Carranza | 70 | 4 | 72 | 10 | 11 | 18 | 3 | 13 | 22 | 32 | 0 | 13 | 36 | 50 | 1 | 14 | 54 | 72 | -1 | 13 |
| Xochimilco | 47 | 5 | 10 | 22 | 15 | 25 | 12 | 34 | 30 | 45 | 0 | 34 | 50 | 69 | -11 | 23 | 74 | 99 | 18 | 41 |
| Total | 1633 | 85 | 171 | 163 | 256 | 426 | 152 | 315 | 512 | 767 | 76 | 391 | 853 | 1194 | 70 | 461 | 1279 | 1705 | 70 | 531 |

En la tabla 3 se puede observar que únicamente la delegación Azcapotzalco cubrió con el avance esperado en el año 2008 y que entre el 2004 y el 2008, se cerraron 107 rutas de recolección separada.

En el gráfico 1 se presenta la tendencia de la FORSU recolectada en las rutas de recolección separada en esos mismos años.

Gráfico 1. Residuos sólidos urbanos recolectados en las rutas de recolección separada en los años 2004 a 2008



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal 2008)

Al realizar un comparativo entre el aumento anual de las rutas de recolección separada, y el aumento anual de residuos que se separa, obtenemos los resultados expresados en la tabla 4.

Tabla 4. Comparación entre el aumento anual de rutas de recolección separada y el aumento anual de residuos que se separa

| Periodo | 2004-2005 | 2005-2006 | 2006-2007 | 2007-2008 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Aumento en Recolección Separada (ton/día) | 536 | 771 | 222 | 101 |
| Aumento en rutas | 152 | 76 | 70 | 70 |
| ton/día por ruta nueva | 3.5 | 10.1 | 3.2 | 1.4 |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal 2008)

Se puede resumir que entre los periodos 2005/2006, 2006/2007 y 2007/2008, aunque el aumento de rutas de recolección separada fue muy parecido, la proporción de residuos separados, por ruta nueva disminuyó significativamente.

Esto refleja que el problema no está necesariamente ligado a la falta de infraestructura de recolección. Puede haber problemas en otros aspectos del manejo de los residuos, tal como la falta de infraestructura para la valorización o transformación de la FORSU, que limite la separación de los residuos al no ser requerida esta fracción en etapas posteriores.

2.2.3 Transferencia

La Ciudad de México cuenta con trece instalaciones denominadas Estaciones de Transferencia, las cuales son puntos intermedios entre las diversas fuentes generadoras de residuos sólidos, las plantas de aprovechamiento y el sitio de disposición final.

Estas se encuentran ubicadas en:

1. Central de Abasto
2. Delegación Álvaro Obregón
3. Delegación Azcapotzalco
4. Delegación Benito Juárez
5. Delegación Coyoacán
6. Delegación Cuauhtémoc
7. Delegación Gustavo A. Madero
8. Delegación Iztapalapa
9. Delegación Miguel Hidalgo
10. Delegación Milpa Alta
11. Delegación Tlalpan
12. Delegación Venustiano Carranza
13. Delegación Xochimilco

El principal objetivo de las estaciones de transferencia es incrementar la eficiencia del servicio de recolección, por medio de la reducción en el número de transportes y la disminución del tiempo en la descarga de los residuos, la cual se realiza a cajas de transferencia remolcadas por tractocamiones con capacidad de recibir la carga de 4 a 5 vehículos recolectores (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal 2004).

2.2.4 Tratamiento

Actualmente se tienen dos tipos de plantas para el tratamiento de los RSU. Las primeras son plantas de selección, y las segundas son plantas de composta.

i. Plantas de Selección

El Distrito Federal cuenta con tres plantas de selección de residuos mezclados, con capacidad instalada conjunta de 6,500 toneladas por día. Estas tres plantas se ubican en Bordo Poniente, San Juan de Aragón y Santa Catarina, y en ellas se recuperan materiales reciclables (comercializables en la ciudad y sus alrededores), y los que no lo son, se transportan posteriormente a los sitios de disposición final.

ii. Plantas de composta

Actualmente, el único uso que se le da a la FORSU, es el de materia prima para la producción de composta. Según el Inventario de Residuos Sólidos del Distrito

Federal², se procesan 96 tpd de residuos orgánicos en las plantas de composta, esto equivale al 1.67% de la FORSU.

Con anterioridad se indicó que el 9.5% de la FORSU es separada, y únicamente se aprovecha el 1.67%, siendo el resto mezclado con los RSU mixtos, para depositarse en el relleno sanitario.

Actualmente existen 9 plantas de Composta en operación, ubicadas en diferentes delegaciones del D.F., en la tabla 5 se presenta un resumen de las características principales de estas plantas.

² En 2010, se amplió la capacidad de la planta de composta de bordo poniente de 200 tpd a 500 tpd. Cabe mencionar que la capacidad instalada generalmente difiere de la capacidad de operación (López Jardinez 2010).

Tabla 5. Características principales de las plantas de composta en el Distrito Federal

| Planta de composta | Tipo de proceso | Tiempo de producción (meses) | Materia Prima | Destino de la Composta |
|------------------------|-----------------|------------------------------|---|--|
| Álvaro Obregón | Pilas aerobias | 4 | Troncos, ramas y maleza, estiércol de caballo provenientes de: Luz y Fuerza, Jardines del Pedregal | Viveros, áreas verdes de la delegación, ciudadanía |
| Bordo Poniente | Pilas aerobias | 4 | Material de poda, hortalizas, lodos autorizados, alimentos caducos provenientes de: Central de Abasto, Delegaciones, generadores particulares en alto volumen, DGSU | Delegaciones, áreas verdes y viveros, actividades DGSU |
| Cuajimalpa de Morelos | Pilas aerobias | 3 | Poda proveniente de: Parques y jardines | Productores Agrícolas en suelos de conservación |
| Iztapalapa | Pilas aerobias | 1 | Poda proveniente de: Parques y jardines, Residuos de panteón | Áreas verdes de la delegación y del panteón San Lorenzo Tezonco. |
| Milpa Alta (4 plantas) | Pilas aerobias | 3 | Restos de nopal y verdura provenientes del Centro de Acopio del Nopal y la Verdura, poda de parques y jardines, Residuos orgánicos domiciliarios | Ciudadanía (cultivos agrícolas) |
| Xochimilco | Pilas aerobias | 3 | Material de poda y estiércol provenientes de: Parques y jardines, Caballerizas | Productores agrícolas |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (2006, 2007 y 2008)

En la tabla 6 se muestra la capacidad de instalación y operación de dichas plantas para los años 2006, 2007 y 2008.

Tabla 6. Capacidad de las plantas de composta del Distrito Federal para los años 2006, 2007 y 2008

| Planta de Composta | Capacidad Instalada 2006 (tpd) | Capacidad de Operación 2006 (tpd) | Capacidad Instalada 2007 (tpd) | Capacidad de Operación 2007 (tpd) | Capacidad Instalada 2008 (tpd) | Capacidad de Operación 2008 (tpd) |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Álvaro Obregón | 5.65 | 2.40 | 2 | 2.48 | 5.03 | 5.03 |
| Bordo Poniente | 200 | 100.00 | 200 | 45.20 | 200.00 | 80.60 |
| Cuajimalpa de Morelos | 1.32 | 1.32 | 3 | 2.37 | 3.29 | 2.63 |
| Iztapalapa | 140.50 | 6.18 | 4 | 3.71 | 3.95 | 3.09 |
| Milpa Alta | 0.45 | 0.31 | 4 | 3.78 | 3.78 | 3.78 |
| Xochimilco | 25.00 | 25.00 | 3 | 0.52 | 3.55 | 1.22 |
| Total | 373 | 135.21 | 216 | 58.06 | 219.59 | 96.35 |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (2006, 2007 y 2008)

En la tabla 6 se puede apreciar que la capacidad de operación total de las plantas es menor al 50% de la capacidad instalada total. Esto refleja un grave problema de organización, pues la capacidad de operación de las plantas de composta alcanza para tratar 40.1% de los residuos orgánicos separados, y únicamente se trata el 17.6%.

La planta de de Bordo Poniente es la de mayor capacidad, y ésta tiene algunos problemas de operación. Actualmente cuentan únicamente con una trituradora en operación, por lo que parte de esta operación se realiza de manera manual, para posteriormente enviar los trozos pequeños a la trituradora. En las fotografías 1 y 2 puede apreciarse esta situación.



Fotografía 1. Operadores triturando residuos que entran a la planta de composta de Bordo Poniente



Fotografía 2. Trituradora de la planta de composta de Bordo Poniente

Se evita introducir troncos muy grandes al tratamiento, y estos se van acumulando en la zona de descarga de materia prima. Esto puede apreciarse en la fotografía 3.



Fotografía 3. Acumulación de troncos en la zona de descarga de materia prima, en la planta de composta de Bordo Poniente

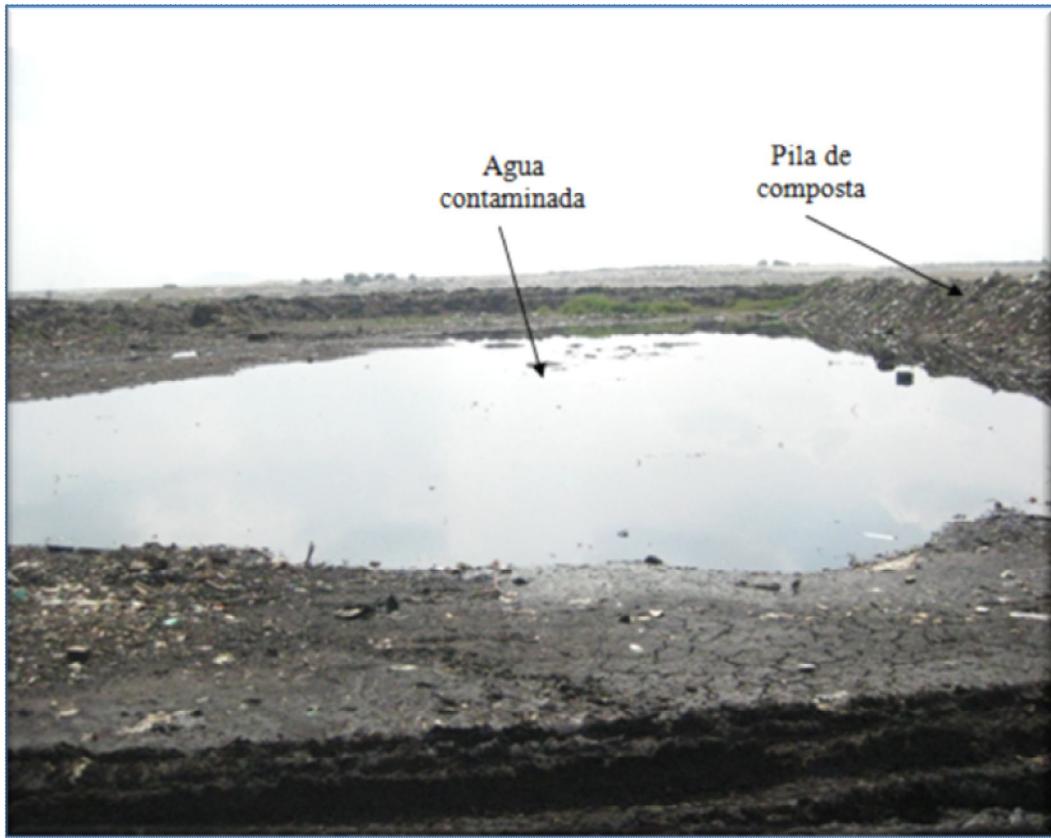
Una vez triturada la materia orgánica, esta es depositada en un cúmulo y camiones la recogen para llevarla a las pilas. Un inconveniente es que algunas veces los camiones tardan mucho en llevar la materia prima a las pilas, por lo que ésta comienza a digerirse de manera anaerobia, ya que en ese momento no se voltea y no se oxigena. En la fotografía 4, se puede apreciar un desprendimiento de vapores del cúmulo que será transportado.



Fotografía 4. Materia orgánica triturada, antes de ser llevada a las pilas.

Otro problema con el que cuenta la planta es la existencia de una sola máquina mezcladora, por lo que el tiempo que tarda una pila en airearse es aproximadamente de una semana. Debido a que se tienen muchas pilas en la planta, al no mezclarse continuamente, se empieza a perder el control de las condiciones de operación, tales como la temperatura y/o la cantidad de oxígeno presente. Esto provoca que en lugar de una digestión aerobia, se lleve a cabo una digestión anaerobia y se produzcan gas metano y algunos lixiviados. Como las pilas se encuentran al aire libre, las condiciones atmosféricas afectan tremendamente al proceso, algunas veces la planta se inunda con el agua de lluvia, y algunas otras las pilas se secan por estar al sol.

Cabe mencionar que la planta de composta no cuenta con una protección entre las pilas y el suelo, por lo que la mezcla de lixiviados y agua de lluvia con residuos orgánicos disueltos son infiltrados en el suelo, como se aprecia en la fotografía 5.



Fotografía 5. Agua contaminada infiltrándose al subsuelo en la planta de composta de Bordo Poniente

Como se puede apreciar, la planta de composta de Bordo Poniente necesita un mayor presupuesto para efectuar el mantenimiento e inversión en equipos nuevos, pues debido a la mala operación que se tiene actualmente de la planta, la composta que se obtiene en condiciones no controladas es de baja calidad. Por otro lado, es necesario asegurar que la planta de composta no se encuentre contaminando el suelo, los mantos acuíferos y la atmósfera, debido al desprendimiento de vapores antes de que la composta sea trasladada a las pilas, o a la infiltración de agua contaminada al subsuelo.

2.2.5 Disposición Final

La Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) es la responsable de la operación del sitio disposición final de residuos sólidos generados en el Distrito Federal, denominado relleno sanitario Bordo Poniente IV etapa, el cual se ubica en la zona federal del lecho del antiguo lago de Texcoco.

Este relleno sanitario se dividió para su operación en cuatro etapas, de las cuales las tres primeras operadas a partir de 1985 y hasta 1994 sumaron una superficie efectiva acumulada de 260 hectáreas, mismas que han culminado su vida útil. La etapa actual en operación (IV), inició a principios de 1995, cuenta con una superficie de 420 hectáreas, ubicada al sur oeste del antiguo lago de Texcoco y al sur de las etapas anteriores separada de aquellas por la autopista México- Texcoco, tiene una recepción diaria de aproximadamente 12,000 toneladas al día (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal 2004). Como se mencionó en la justificación de este trabajo, el relleno sanitario de Bordo Poniente ya rebasó el tiempo de vida para el cual fue diseñado (Instituto de Acceso a la Información Pública del Distrito Federal 2007).

2.3. Estimación de la cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos generados en el Distrito Federal

La Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, Según el Inventario de Residuos Sólidos del D.F. 2008, se disponen diariamente de 13,400 tpd de RSU en el relleno sanitario de Bordo Poniente, de las cuales, el 99.6% proviene de estaciones de transferencia y plantas de selección. Se estima que el 43% de los RSU del D.F. son orgánicos, por lo que la producción de la FORSU es aproximadamente de 5,762 tpd. Cabe mencionar que de esta fracción, sólo 548

tpd se recolectan de manera separada, lo que equivale a un 9.5% de la FORSU (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal 2008).

Con la información señalada hasta el momento se puede concluir lo siguiente:

- Diariamente se generan 5,762 t de FORSU en el D.F.
- Conforme pase el tiempo, en el D.F. disminuirá la proporción de la FORSU, y aumentará la producción total de RSU.
- El gobierno del DF deberá aumentar la cantidad de rutas de recolección separadas, y al mismo tiempo deberá hacer una ardua campaña de concientización sobre los beneficios que pueden obtenerse si se separan los residuos.

2.4. Resumen de las Tecnologías de Conversión

La cantidad de RSU que hoy en día se disponen en diversos rellenos sanitarios, se puede reducir al convertirla en productos útiles por métodos químicos. La materia orgánica dispuesta en el relleno sanitario de Bordo Poniente representa un recurso con un contenido energético sustancial, que puede generar energía eléctrica, combustibles o productos químicos que sirvan como materia prima de otros procesos químicos y/o tecnológicos.

La conversión de materia orgánica puede llevarse a cabo mediante tres procesos principales:

- Procesos de conversión Termoquímicos
- Procesos de conversión Bioquímicos
- Procesos de conversión Fisicoquímicos

2.4.1. Procesos de conversión Termoquímicos

La conversión termoquímica se caracteriza por trabajar a mayores temperaturas y mayores velocidades de reacción que la mayoría de los procesos. Estas tecnologías abarcan procesos que van desde la descomposición térmica en un ambiente primordialmente no reactivo (conocido como pirólisis) hasta la descomposición en un ambiente químicamente reactivo (llamado gasificación cuando los productos son en su mayoría gases combustibles, o de combustión completa cuando los productos se encuentran totalmente oxidados)(Hackett y Williams 2004)(Hackett y Williams 2004).

i. Incineración

a) Descripción del proceso

La incineración es un proceso que se utiliza para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante la oxidación térmica, en la cual todos los factores de combustión, como son la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia y los parámetros ambientales previamente establecidos(Cortinas de Nava 2009). La temperatura de flama se encuentra generalmente en el rango de 815 a 1650 °C, esta será dependiente de parámetros como el tipo de combustible, el oxidante, la estequiometría, el diseño del horno y la pérdida de calor (Hackett y Williams 2004)(Hackett y Williams 2004). En el diagrama 2 se puede observar una simplificación del proceso de incineración.

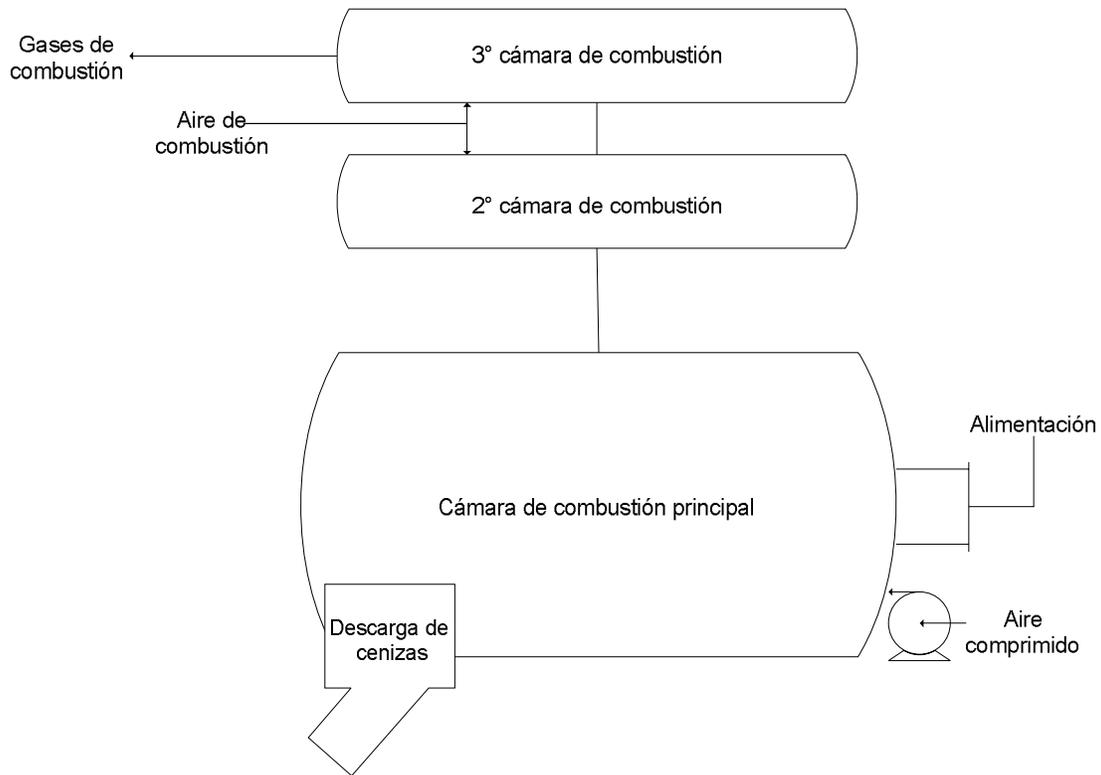


Diagrama 2. Proceso de incineración

Fuente: adaptado de Japan Society of Industrial Machinery Manufacturers, 2001.

b) Características de la alimentación

Puede incinerarse toda la fracción orgánica de los RSU. Dependiendo del tipo de incinerador, puede necesitar pretratamiento, como homogenización, sorteo de residuos y trituración.

c) Productos Principales

Los productos principales son gases calientes de combustión, que incluyen Agua, Cenizas y especies oxidadas como CO_2 y NO_x . En este caso generalmente se recupera energía mediante el intercambio de calor utilizando los gases calientes de combustión.

d) *Experiencia*

Se aplica a todos los RSU, no sólo a la FORSU.

ii. Pirólisis

a) *Descripción del proceso*

La pirólisis es el proceso de descomposición térmica directa de la materia orgánica en ausencia de oxígeno (Balat 2009). El proceso de pirólisis es altamente endotérmico, y las temperaturas de operación oscilan entre los 400 y 815 °C(Hackett y Williams 2004)(Hackett y Williams 2004). Este proceso puede apreciarse en el diagrama 3.

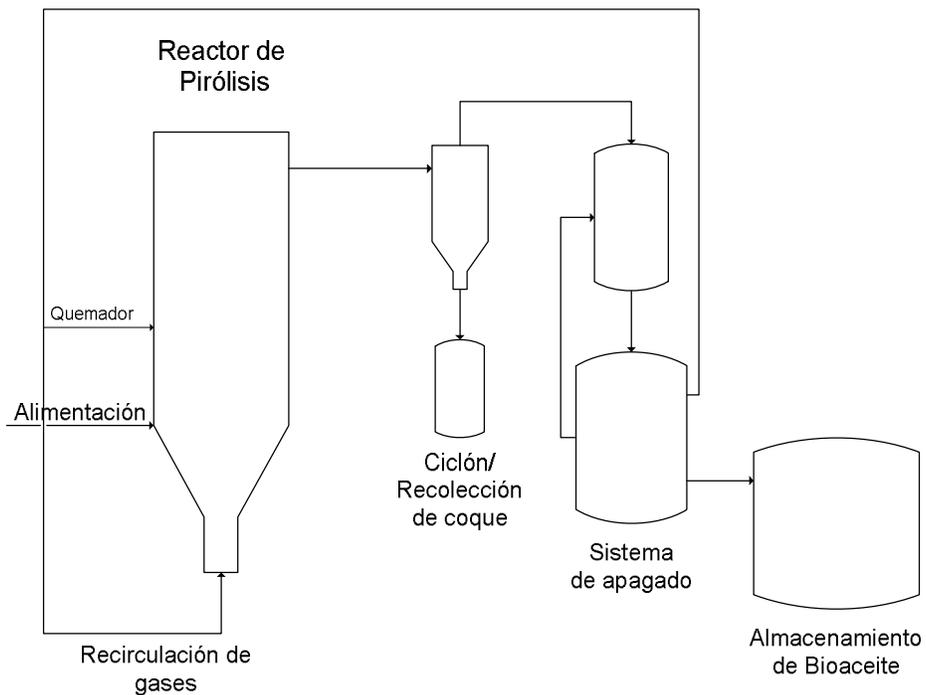


Diagrama 3. Proceso de pirólisis

Fuente: adaptado de Princeton University Blog Service, 2009.

b) Características de la alimentación

Toda la FORSU puede someterse a pirólisis, pero es necesario reducir el contenido de humedad. Generalmente se trabaja con el 15% de humedad.

c) Productos Principales

En este proceso se producen tres fracciones importantes, la primera de ellas es una corriente gaseosa que contiene principalmente hidrógeno, metano, monóxido de carbono y otros gases. La segunda es una corriente líquida constituida por un flujo de alquitrán o aceite que contiene ácido acético, metanol e hidrocarburos oxigenados. La tercera es el coque residual, formado en su mayoría por carbón casi puro y la fracción inorgánica que contenían originalmente los RSU. La fracción líquida puede ser utilizada como aceite combustible sintético, y si se procesa, puede producir adhesivos, productos químicos especializados entre otros(Hackett y Williams 2004)(Hackett y Williams 2004).

d) Experiencia

Es aplicable a todos los RSU, no sólo a la FORSU⁴.

iii. Gasificación

a) Descripción del proceso

La gasificación se refiere a la producción de gases de combustión mediante la conversión de materiales sólidos o líquidos con alto contenido de carbono por calentamiento interno directo procedente de la oxidación parcial utilizando cantidades subestequiométricas de oxígeno o aire. La temperatura de operación generalmente supera a los 705°C, y la presión va desde la presión atmosférica hasta por arriba de 5 atmósferas. En el diagrama 4 se presenta el proceso de

⁴ Para consultar una lista de las plantas de pirólisis que utilicen RSU mixtos, revisar la pg. 40 de Colin Hackett, 2004.

gasificación. Para mayor información sobre los procesos de gasificación, consultar (Cabrera 2010)

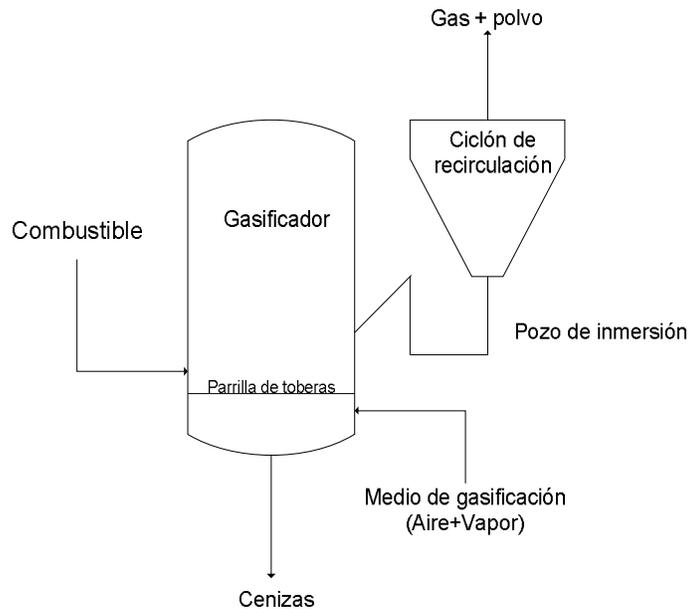


Diagrama 4. Proceso de gasificación

Fuente: adaptado de (Envirotherm GmbH s.f.)

b) Características de la alimentación

Toda la FORSU puede gasificarse. Es importante que la alimentación tenga un bajo contenido de humedad, ya que entre más humedad contenga la materia prima, mayor será la energía necesaria para secarla y posteriormente gasificarla. Como parte del pretratamiento es necesario triturar la basura, asimismo conviene remover la fracción que no puede gasificarse (como vidrio o metales).

c) Productos Principales

Se producen principalmente CO, Hidrógeno, metano e hidrocarburos más ligeros, al igual que CO₂ y NO₂. Los gases producidos pueden utilizarse en máquinas de combustión interna y externa, celdas de combustible y otras máquinas que producen calor, y energía mecánica o eléctrica. Si estos gases se procesan, se puede producir metanol, líquidos de Fischer-Tropsch (como gas LP, gasolina o

diesel), y otros productos químicos (como dimetileter o etanol)(Hackett y Williams 2004).

d) Experiencia

Hay experiencia en el tratamiento de biomasa en Alemania desde 1996 con una capacidad de 320 tpd(Gasification Technologies Council 2010).

2.4.2. Procesos de conversión Bioquímicos

La conversión bioquímica opera a temperaturas bajas y la rapidez de reacción es lenta, lo que permite una mayor selectividad en los productos. Se prefiere que los RSU tengan un alto contenido de humedad si se tratan por un proceso bioquímico, y cabe mencionar que los productos no biodegradables, tales como la mayoría de los plásticos, no pueden ser convertidos mediante estos procesos.

iv. Compostaje

a) Descripción del proceso

Este tratamiento utiliza oxígeno o aire para soportar el metabolismo de microorganismos aerobios que degradan al sustrato. Es importante considerar los valores nutrimentales de los RSU para que el proceso pueda funcionar adecuadamente. Estos tratamientos pueden operar desde cerca del punto de congelamiento y hasta los 70°C. El diagrama 5 ejemplifica el proceso de compostaje.

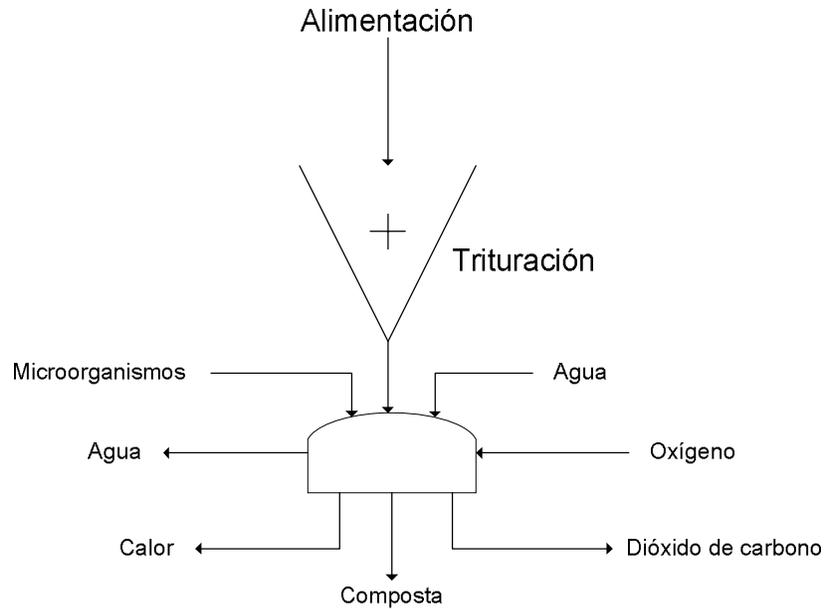


Diagrama 5. Proceso de compostaje

Fuente: elaboración propia.

b) Características de la alimentación

Toda la FORSU puede ser sometida al compostaje.

c) Productos Principales

En el caso del compostaje, los materiales orgánicos son degradados a un producto parecido al humus, con un pH entre 6.5 y 8, que favorece el crecimiento de las plantas y tiene la capacidad de retención de agua. Cabe mencionar que durante el proceso también se obtiene CO₂.

d) Experiencia

Hay plantas de compostaje en todo el mundo. La capacidad alcanza valores de hasta 1,200 tpd (Flukong Enterprise Inc. 2009).

v. Digestión Anaerobia

a) Descripción del proceso

La digestión anaerobia es un proceso de fermentación microbiana, que opera en ausencia de oxígeno y produce biogás. Este proceso se lleva a cabo entre los 20 y los 65 °C (Karagiannidis y Perkoulidis 2009). Es importante poner cuidado en las necesidades nutrimentales manteniendo una temperatura adecuada para que las bacterias facultativas y las metanogénicas que degradan al sustrato, se encuentren en cantidades adecuadas para que el proceso se realice. En el diagrama 6 se esquematiza el proceso general de digestión anaerobia.

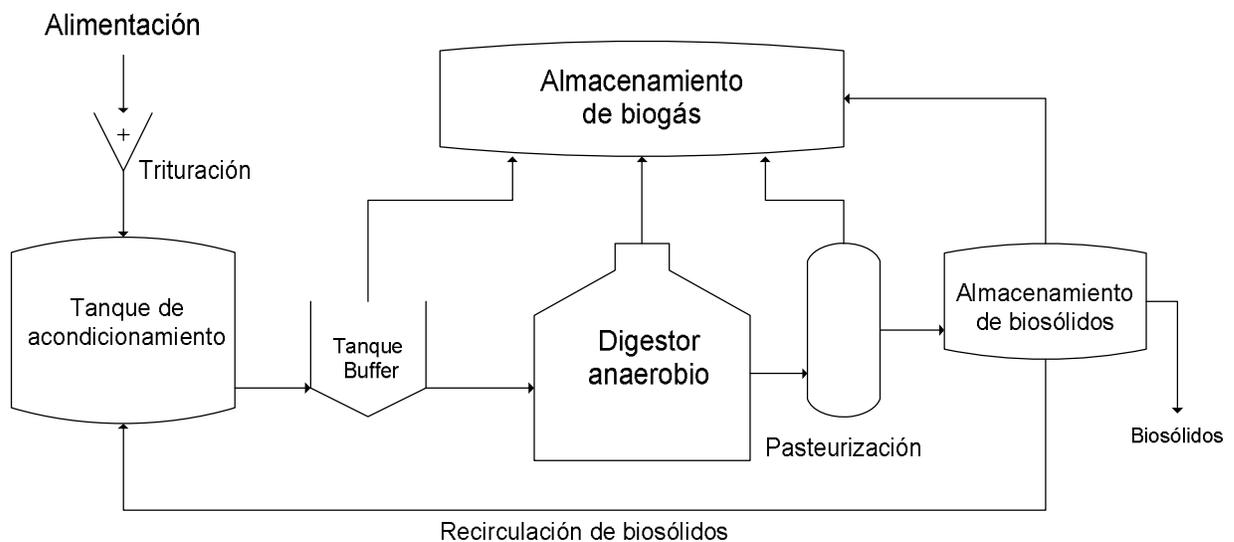


Diagrama 6. Proceso de digestión anaerobia

Fuente: adaptado de Renewable Energy Association, 2007.

b) Características de la alimentación

Es conveniente que la FORSU tenga un contenido de humedad alto, y baja concentración de lignina para tener una mayor conversión.

c) Productos Principales

El biogás contiene principalmente Metano y CO₂, pero frecuentemente acarrea humedad, H₂S y partículas sólidas que deben ser removidas antes de que se utilice. El biogás se puede utilizar (después de purificarlo) como combustible en máquinas, celdas de combustible, calentadores industriales, calderas y otros equipos, así como también en la fabricación de productos químicos(Hackett y Williams 2004).

d) Experiencia

Existen 115 plantas operando actualmente con la FORSU separada en sitio. Las capacidades de operación se encuentran entre 8 y 1,363 tpd, y principalmente se encuentran en Europa y en Japón(International Energy Agency 2008).

vi. Fermentación Alcohólica

a) Descripción del proceso

La fermentación generalmente se utiliza para convertir un sustrato (habitualmente glucosa) a etanol. Se requiere de un pretratamiento químico, físico o biológico de la materia prima para abrir la estructura de la biomasa, y convertir los carbohidratos complejos en azúcares simples. Posteriormente, se fermentan los azúcares mediante las levaduras o las bacterias, para producir etanol. Finalmente se destila el etanol obtenido para alcanzar un alto contenido de pureza. Es importante mencionar que la concentración de etanol inhibe el crecimiento microbiano, por lo que éste debe ser removido cuando se alcanza una concentración del 12% (concentración a la cual la fermentación se interrumpe durante el proceso)(Hackett y Williams 2004).

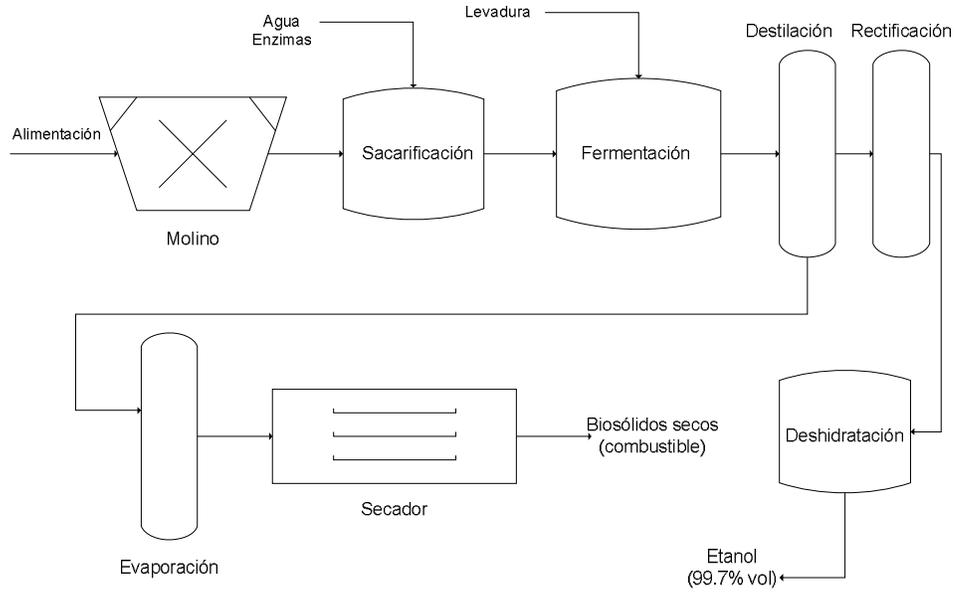


Diagrama 7. Proceso de fermentación alcohólica

Fuente: adaptado de Crop Energies, 2010.

b) Características de la alimentación

Es importante que la materia prima contenga un alto porcentaje de lignocelulosa o almidón, ya que ésta es la que puede producir mayor cantidad de azúcar, representando una mayor producción de etanol (Hackett y Williams 2004). Por lo anterior, los residuos sólidos orgánicos de origen urbano no son una buena opción de materia prima para este proceso, pues debido a que es más difícil hidrolizarlos requieren de un pretratamiento más exhaustivo.

c) Productos Principales

Etanol, Biosólidos.

d) Experiencia

En escala de laboratorio (Dogan, y otros 2008)

2.4.3. Procesos de conversión Físicoquímicos

La conversión fisicoquímica es en la que se sintetizan productos químicos mediante procesos físicos y químicos que operan a temperaturas y presiones cercanas a las del ambiente. Se asocia principalmente a la transformación de grasas y aceites vegetales y animales a combustibles líquidos, tales como el biodiesel. Aquí se agrega también la producción de comida para animales, aunque en este caso no se sintetice un nuevo producto.

vii. Transesterificación

a) Descripción del proceso

La transesterificación es una reacción química catalizada por un álcali en la que un grupo R de un éster se cambia por un grupo R' de un alcohol, dando lugar a otro éster y otro alcohol. En el caso de aceites y grasas de desecho, se dificulta la transesterificación debido al alto contenido de ácidos grasos libres. Estos forman jabón en la reacción catalizada por el álcali, reduciendo la producción de Biodiesel, y dificultando la remoción final del glicerol. En este caso, se requiere un pretratamiento de secado y de limpieza, seguido por una esterificación de los ácidos grasos libres, para poder continuar con la reacción de transesterificación. Se trabaja con temperaturas en el rango de los 25 a los 65 °C. En el diagrama 8 se muestra el proceso de transesterificación, para la producción de biodiesel.

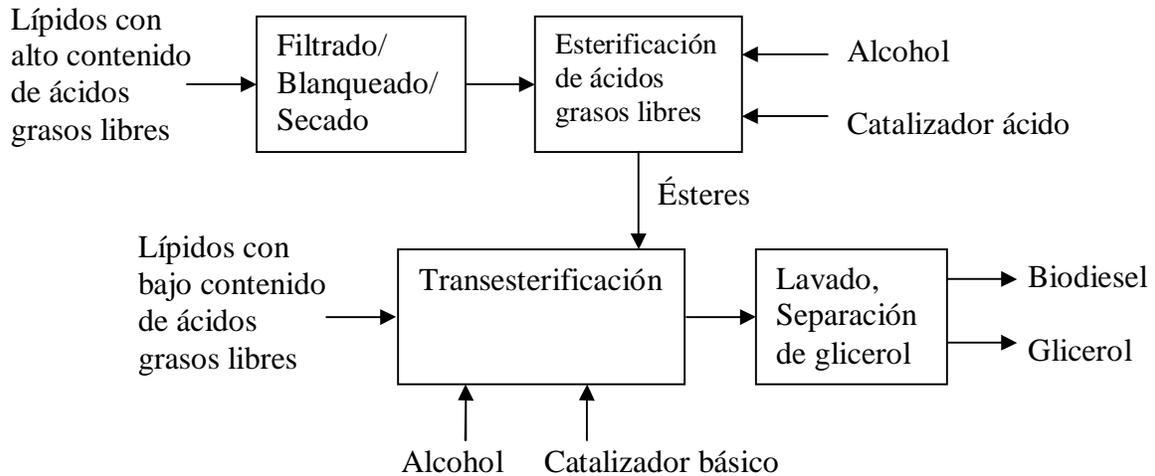


Diagrama 8. Proceso de transesterificación

b) Características de la alimentación

Aplica a grasas y aceites de la FORSU. Es recomendable que la alimentación tenga un bajo contenido de ácidos grasos libres.

c) Productos Principales

Biodiesel, Glicerol

d) Experiencia

En Estados Unidos existen 13 plantas instaladas operando con aceites residuales como materia prima, y la capacidad de producción se encuentra entre 3,000 y 15,500 L/día de biodiesel (The National Biodiesel Board 2011).

viii. Producción de comida para animales

a) Descripción del proceso

La fracción orgánica de los residuos sólidos se ha utilizado durante años como complemento en comida de animales, ya que tiene generalmente un alto nivel nutricional. Para que esta fracción se utilice como sustituto de alimento, y no como complemento, se debe asegurar que ciertos factores tales como las proteínas, las fibras, el extracto de éter y los minerales, se encuentren de manera balanceada. También se debe observar la normativa respectiva, pues generalmente depende del tipo de animal del que se trata (mascotas o animales para consumo humano) los límites máximos permisibles de ciertos compuestos. Es importante mencionar que se requiere de un tratamiento térmico para asegurar que los residuos se encuentren inocuos. En el diagrama 9 se ejemplifica el proceso que se sigue para producir comida de animales partiendo de FORSU.

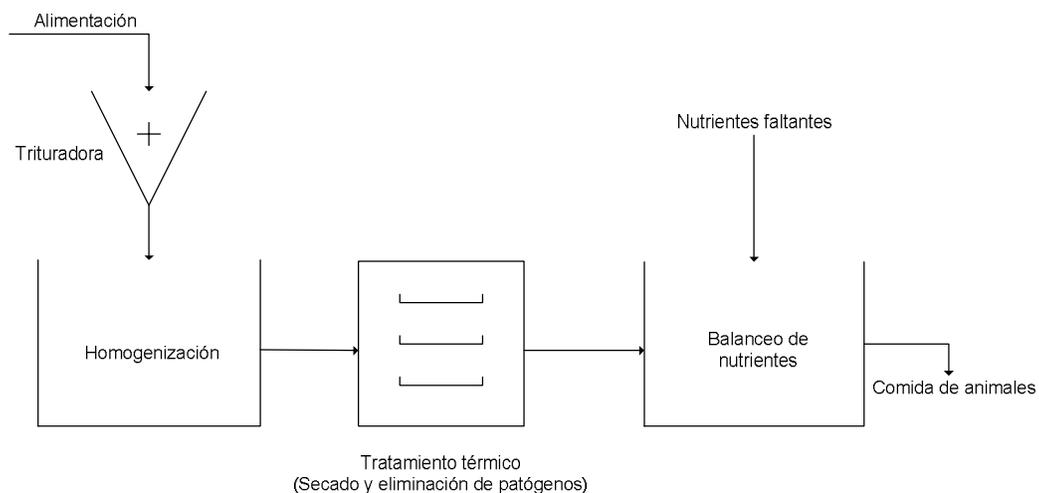


Diagrama 9 Proceso de producción de comida para animales

b) Características de la alimentación

Los residuos a utilizar deben provenir de mercados o tiendas de carne/pescado/frutas y verduras, ya que los residuos de restaurantes y los domiciliarios tienen un alto contenido de metales pesados tóxicos para los animales(García, y otros 2005).

c) Productos principales

Comida balanceada para animales. Se tiene referencias de comida para pollos (Vidales Olivo, y otros 2004) y cerdos(García, y otros 2005).

d) Experiencia

Escala laboratorio.

3. Metodología

Para poder seleccionar la mejor alternativa tecnológica para la valorización de la FORSU, se realizaron dos etapas de selección.

La primera fue una evaluación de viabilidad técnica realizada por medio de una matriz de decisiones. Para el llenado de una matriz de decisiones, se siguió la metodología propuesta por (Corzo 1972):

1. Determinación de los criterios
2. Asignación de valores a las alternativas
3. Asignación de valores a los criterios
4. Determinación de la función de criterio

Con el apoyo de la matriz de decisiones se realizó la preselección de las tecnologías de conversión técnicamente viables. De estas tecnologías, se hizo una investigación más detallada sobre alternativas tecnológicas disponibles en el mercado.

La segunda etapa de selección consistió en una evaluación técnica, económica y ambiental de estas alternativas tecnológicas. Esta se realizó con el soporte del software *Decision Lab*®, por lo que fue necesario seguir la siguiente metodología:

1. Determinación de los criterios
2. Asignación de valores a los criterios
3. Definición de la función de preferencia y sus parámetros
4. Determinación de la función de criterio

Con los resultados de estas tres evaluaciones, se procedió a una evaluación de desempeño global. El software *Decision Lab*® el cual arrojó los resultados

necesarios para determinar la mejor alternativa tecnológica para la valorización de la FORSU separada en sitio del D.F.

Esta metodología se esquematiza en el diagrama 10.

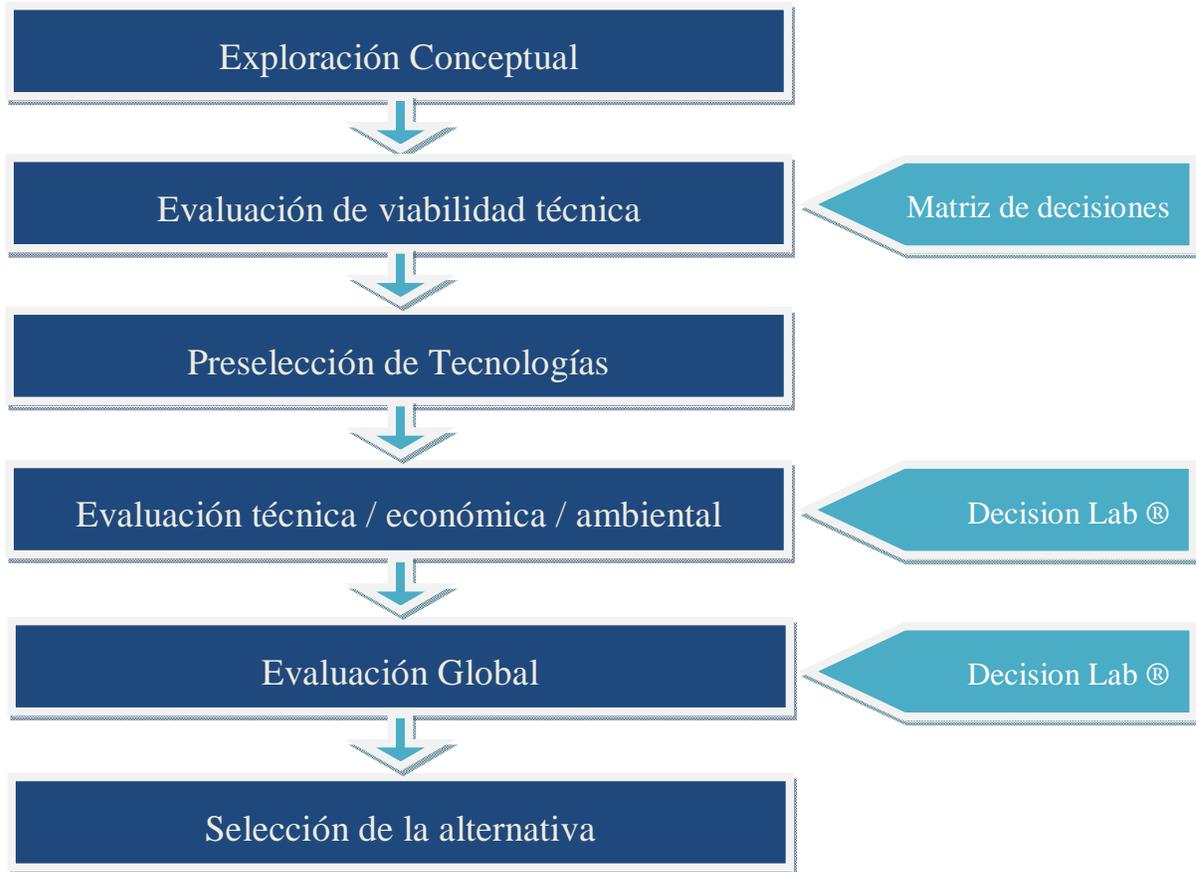


Diagrama 10. Metodología seguida para la selección de la mejor alternativa tecnológica

4. Resultados y Discusión

En este capítulo, se da un seguimiento detallado a la aplicación de la metodología presentada con anterioridad, y los resultados que se obtienen de esta.

4.1. Evaluación de Viabilidad Técnica

Como se ha mencionado, la primera etapa de selección constó de una evaluación de viabilidad técnica, en la que se hizo uso de una matriz de decisiones. Para llenar la matriz de decisiones, se empleó la siguiente metodología (Corzo 1972):

4.1.1. Determinación de los criterios.

Para poder comparar las distintas alternativas (Tecnologías de Conversión), es necesario medirlas contra un patrón común. Para la evaluación técnica, los patrones, o criterios seleccionados son los que se muestran a continuación:

- a) Características en la alimentación: Se toma en cuenta si se puede tratar toda la FORSU, y la complejidad del pretratamiento necesario.
- b) Productos principales: Se toma en cuenta la valorización de los productos principales.
- c) Experiencia en FORSU separada: Contempla el número de plantas en operación que tratan únicamente la FORSU separada.
- d) Capacidad de operación: Considera la capacidad de las plantas en operación.

En la tabla 7 se presenta un resumen de los cuatro criterios a evaluar de las tecnologías consideradas en este trabajo.

Tabla 7. Resumen de las tecnologías de conversión

| Tecnología de conversión | Características en la alimentación | Productos principales | Experiencia en FORSU Separada | Capacidad de operación |
|------------------------------------|---|---|-------------------------------|-------------------------|
| Incineración | Toda la FORSU | CO ₂ , NO _x , ceniza y Agua | 0 | 0 |
| Pirólisis | Toda la FORSU | Biogás, bioaceite, coque | 0 | 0 |
| Gasificación | Es conveniente que tenga un bajo contenido de humedad | Gas de Síntesis | 1 | 320 tpd |
| Compostaje | Toda la FORSU | Composta | Miles | Hasta 1,200 tpd |
| Digestión Anaerobia | Hasta 40% de sólidos, con bajo contenido de lignina | Biogás | 134 | De 2.7 a 740 tpd |
| Fermentación Alcohólica | Es conveniente que tenga un alto contenido de lignocelulosa o almidón. | Etanol | Escala de laboratorio | Escala laboratorio |
| Transesterificación | Únicamente residuos de aceites y grasas | Biodiesel | Si | De 3,000 a 15,500 L/día |
| Producción de comida para animales | Únicamente residuos de verduras y vegetales, o de industrias de pescado y carne. Necesitaría separación en sitio. | Comida de animales | Escala de laboratorio | Escala laboratorio |

4.1.2. Asignación de valores a las alternativas.

Los valores asignados a cada alternativa se encontrarán entre 0 y 4. Para poder asignar los valores de cada criterio a las alternativas, se establecieron las bases que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Bases para la asignación de valores a las tecnologías de conversión

| Valor | Criterios de Evaluación | | | |
|-------|--|--|-------------------------------|------------------------------|
| | Características en la alimentación | Productos principales | Experiencia en FORSU Separada | Capacidad de operación (tpd) |
| 0 | No aplica a la FORSU | No hay productos valorizables | No hay plantas instaladas | No hay plantas instaladas |
| 1 | No aplica a toda la FORSU, requiere pretratamiento | Los productos casi no tienen valor agregado | De 1 a 5 plantas | De 1 a 100 |
| 2 | Aplica a toda la FORSU, requiere mucho pretratamiento | Los productos tienen un valor agregado bajo | De 5 a 10 plantas | De 100 a 250 |
| 3 | Aplica a toda la FORSU, requiere pretratamiento | Los productos tienen un valor agregado medio | De 10 a 50 plantas | De 250 a 500 |
| 4 | Aplica a toda la FORSU, no requiere mucho pretratamiento | Los productos tienen un valor agregado alto | Más de 50 plantas | Más de 500 |

Con estas bases, fueron asignados a las alternativas los valores que se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Valores asignados a las tecnologías de conversión

| Tecnología de conversión | Características en la alimentación | Productos principales | Experiencia en FORSU Separada | Capacidad de operación |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------|
| Incineración | 3 | 2 | 0 | 0 |
| Pirólisis | 3 | 4 | 0 | 0 |
| Gasificación | 2 | 4 | 1 | 3 |
| Compostaje | 4 | 1 | 4 | 4 |
| Digestión Anaerobia | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Fermentación Alcohólica | 2 | 4 | 0 | 0 |
| Transesterificación | 1 | 4 | 2 | 1 |
| Producción de comida para animales | 1 | 2 | 0 | 0 |

4.1.3. Asignación de valores a los criterios:

Debido a que los criterios considerados no tienen la misma importancia a la hora de garantizar la viabilidad técnica de las alternativas, se asignaron los valores porcentuales mostrados en la tabla 10 para poder jerarquizar a los criterios.

Tabla 10. Valores porcentuales asignados a los criterios de evaluación

| Criterio de evaluación | Valor % | Razonamiento |
|------------------------------------|---------|---|
| Características en la alimentación | 35 | Es indispensable que se pueda tratar toda la FORSU, y que no se requiera de mucho pretratamiento. |
| Productos principales | 15 | Es recomendable que los productos que se generen en el proceso puedan ser comercializados. |
| Experiencia en FORSU Separada | 30 | Es necesario contar con experiencias previas para asegurar que el tratamiento en cuestión funcione a gran escala. |
| Capacidad | 20 | Es importante contar con experiencia que se acerque a la capacidad de operación solicitada (500 tpd). |

4.1.4. Determinación de la función de Criterio

La función de criterio es la ponderación de cada valor asignado a las alternativas por el valor porcentual asignado al criterio correspondiente. Para aprobar la primera etapa, las alternativas debieron tener un valor de por lo menos 2.4 puntos sobre 4.

En la tabla 11 se aprecian los resultados finales de la matriz de decisiones.

Tabla 11. Resultados de la matriz de decisiones

| Tecnología de conversión | Características en la alimentación | Productos principales | Experiencia en FORSU Separada | Capacidad | Valor Total |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------|-------------|
| Valor del criterio | 35% | 15% | 30% | 20% | |
| Incineración | 1.05 | 0.3 | 0 | 0 | 1.35 |
| Pirólisis | 1.05 | 0.6 | 0 | 0 | 1.65 |
| Gasificación | 0.7 | 0.6 | 0.3 | 0.6 | 2.2 |
| Compostaje | 1.4 | 0.15 | 1.2 | 0.8 | 3.55 |
| Digestión Anaerobia | 1.4 | 0.6 | 1.2 | 0.8 | 4.0 |
| Fermentación Alcohólica | 0.7 | 0.6 | 0 | 0 | 1.3 |
| Transesterificación | 0.35 | 0.6 | 0.6 | 0.1 | 1.65 |
| Producción de comida para animales | 0.35 | 0.3 | 0 | 0 | 0.65 |

La segunda etapa de selección, fue una evaluación de las opciones tecnológicas disponibles de las tecnologías seleccionadas en la primera etapa. Para esta sección se realizó un breve análisis económico, técnico y de impacto ambiental, para seleccionar la mejor alternativa, contando con información de fuentes secundarias en lo que respecta a los costos y emisiones.

4.2. Resumen de Opciones Tecnológicas

Dentro de las tecnologías seleccionadas (Digestión anaerobia y compostaje), se han desarrollado varios diseños de plantas comerciales que presentan características distintas entre ellas. Cada una de estas opciones presenta ventajas y desventajas, que son exhibidas en este capítulo. A continuación se profundiza en las bases de estas tecnologías, y se presenta una breve descripción de las opciones tecnológicas para cada tecnología de conversión.

4.2.1. Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia de la materia orgánica se lleva a cabo mediante un consorcio de bacterias que trabajan sinérgicamente. Esta se lleva a cabo en tres etapas principales:

1. Hidrólisis:

En esta etapa, se rompen las estructuras moleculares de la fracción biodegradable que contiene lípidos, proteínas y carbohidratos. Los lípidos se transforman en ácidos grasos volátiles y en aminoácidos. Las proteínas y carbohidratos hidrolizan en aminoácidos y azúcares, respectivamente.

2. Acetogénesis:

En la acetogénesis las bacterias productoras de ácido crean productos intermediarios como el propionato y butirato, que posteriormente son degradados a hidrógeno y acetato.

3. Metanogénesis:

Las bacterias metanogénicas consumen el hidrógeno y el acetato para producir metano y CO₂.

En el diagrama 11 se aprecia un esquema representativo de la secuencia seguida durante la digestión anaerobia de la materia orgánica.

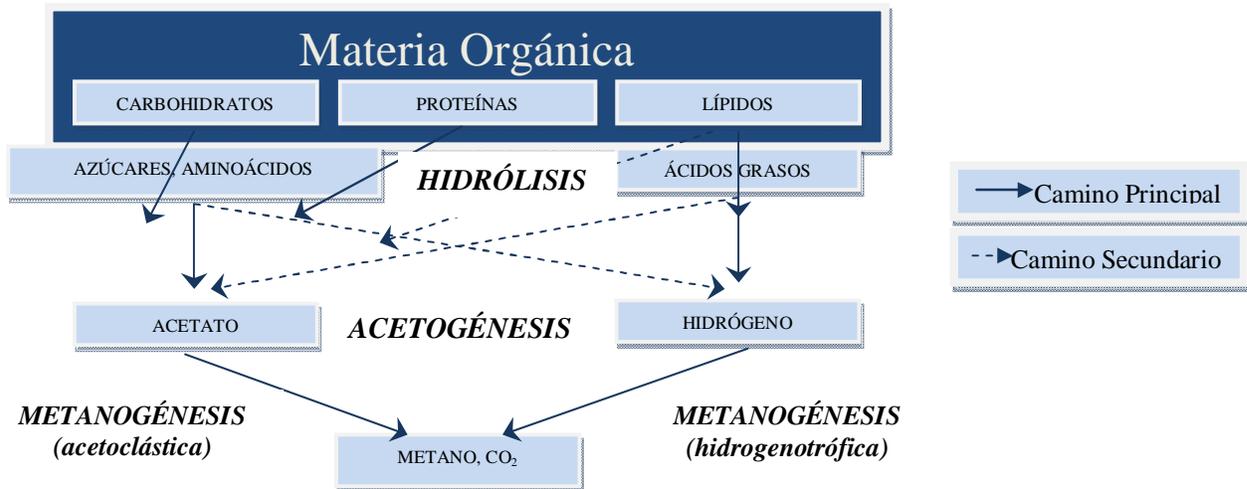


Diagrama 11. Pasos en la digestión anaerobia

Fuente: adaptado de Colin Hackett, 2004.

La digestión anaerobia opera en ausencia de oxígeno y produce biogás, que consiste principalmente en metano y dióxido de carbono, y contiene ciertas impurezas como humedad, H₂S y partículas sólidas. El biogás se puede utilizar como combustible para máquinas, gas para turbinas, celdas de combustible, calderas, calentadores industriales, u otros procesos.

Es importante prestar atención a los requerimientos nutrimentales de las bacterias encargadas de la degradación, en especial a la relación carbono/nitrógeno (C/N) que se considera óptima entre el rango de 20 y 30. El pH óptimo es entre 5.5 y 8.5, dependiendo de la etapa del proceso de digestión anaerobia (Verma 2002), pues cada tipo de bacteria tiene un pH óptimo.

Los sistemas de digestión anaerobia se clasifican según la entrada de la alimentación como procesos *batch* (en lote) o continuos. Estos, se clasifican a su vez según el número de etapas durante el proceso como sistemas de una etapa, o de etapas múltiples.

Los sistemas de una sola etapa son los más fáciles de operar, tienen menos componentes para mantenimiento/falla y conllevan a un menor costo capital. Los sistemas multietapa ofrecen la posibilidad de aumentar la producción de metano y la biodegradación de la materia orgánica, al separar y optimizar los diferentes pasos del proceso bioquímico.

Otro sistema de clasificación depende de la concentración de sólidos en el reactor, generalmente expresada como el porcentaje en peso de sólidos sobre el total alimentado al reactor. Los sistemas que trabajan con un contenido de sólidos menor al 15% son considerados sistemas de bajos sólidos o sistemas húmedos, mientras que los que trabajan con un contenido de sólidos mayor al 15% son considerados sistemas de altos sólidos o sistemas secos.

En base a las definiciones anteriores, podemos considerar para la evaluación los siguientes sistemas:

- i. Sistemas húmedos de una etapa
- ii. Sistemas secos de una etapa
- iii. Sistemas de etapas múltiples

i. Sistema húmedo de una etapa

Este sistema consiste en un *pulper*⁵ vertical, que recibe a la FORSU, la homogeniza la separa por densidad. La FORSU fraccionada por densidad, es bombeada a una precámara de un tanque de agitación continua, donde se inocula mediante una pequeña recirculación con la finalidad de prevenir la acumulación de ácido (Joshua Rapport 2008).

En este sistema, se degrada materia orgánica con un contenido de sólidos volátiles (SV) del 10-15%, consumiendo 1m³ de agua por tonelada tratada (Verma 2002), puede operar en condiciones termofílicas o mesofílicas, con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 10 a 20 días. La producción es de 100-150 m³ de biogás /t de FORSU en dos reactores paralelos (Karagiannidis y Perkoulidis 2009), generando 546 kWh/t⁶ y 28 kg equivalentes de CO₂/t⁷ emitidos. También se generan 300 kg de composta por tonelada de FORSU (Karagiannidis y Perkoulidis 2009). Actualmente se cuenta con 6 plantas que operan con FORSU separada en sitio (listadas en la tabla 12), las capacidades de estas son de 8 a 41 tpd (International Energy Agency 2008), los requerimientos de espacio son de 91 m²/tpd (RIS International 2005). Los costos de instalación son de \$85,103⁸ por tonelada al día (RWBeck 2004) y los de operación de \$20 por tonelada⁹. Suponiendo una vida de 20 años, y con una tasa de descuento del 12%¹⁰, se tiene un VPN de \$35,399,291 y una TIR de 29%¹¹.

⁵ El pulper es un tanque donde se diluye la FORSU, se mezcla y se separa por densidad.

⁶ En el Anexo I se explica cómo se calculó la generación de energía con biogás.

⁷ En el Anexo II se muestra el procedimiento utilizado para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero.

⁸ Todos los valores monetarios son en dólares americanos de Abril, 2010. Se utilizó el índice ENRCCI para convertir los valores de otros años a valor actual.

⁹ En el Anexo III se mencionan los detalles del cálculo de costos de operación para plantas de digestión anaerobia.

¹⁰ Esta es la tasa que se utiliza en el DF para residuos.

¹¹ En el Anexo IV se explica que herramientas se utilizaron para estos cálculos.

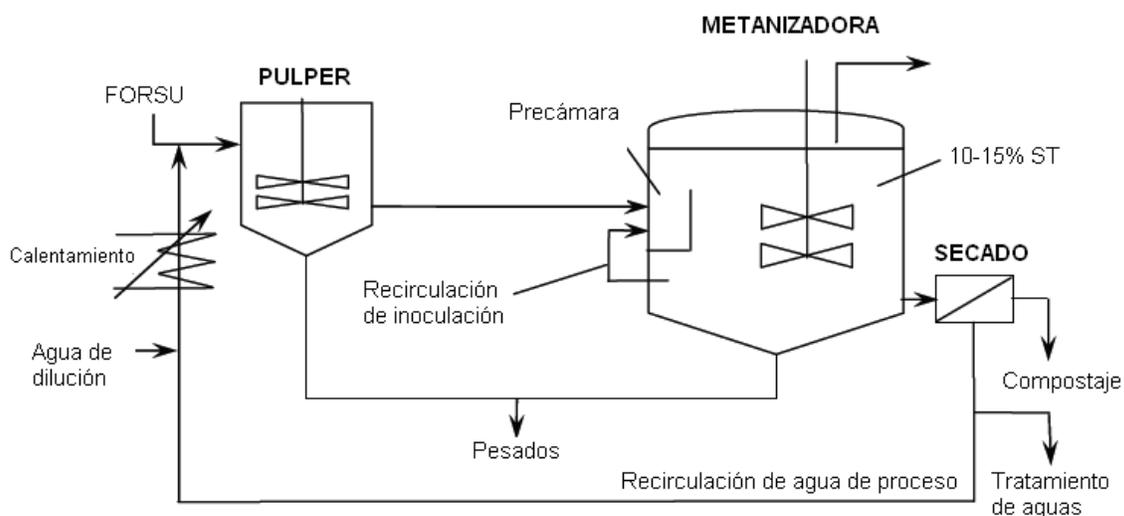


Diagrama 12. Proceso de digestión anaerobia en un sistema húmedo de una etapa

Fuente: Adaptado de Joshua Rapport, 2008.

En la tabla 12 se presentan las plantas en operación de estos sistemas:

Tabla 12. Plantas en operación de sistemas húmedos de una etapa

| Sistema | País | Lugar | Alimentación | Capacidad (tpd) | Año |
|---------|----------|-----------|----------------|-----------------|------|
| Waasa | Japón | Ikoma | FORSU Separada | 8.2 | 2001 |
| Waasa | Japón | Jouetsu | FORSU Separada | 32.9 | 2001 |
| Waasa | Japón | Shimonia | FORSU Separada | 13.7 | 2001 |
| Waasa | Suecia | Jönköping | FORSU Separada | 41.1 | 2003 |
| Waasa | Suecia | Kil | FORSU Separada | 8.2 | 1998 |
| Waasa | Alemania | Bottrop | FORSU Separada | 17.8 | 1995 |

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de International Energy Agency, 2008.

ii. Sistema seco de una etapa

Los sistemas secos de una etapa pueden ser verticales u horizontales, y operan en condiciones mesofílicas o termofílicas, dependiendo de las características de alimentación y de los requisitos económicos. Dependiendo del sistema comercial, estos pueden contar o no con un sistema de mezclado, y con recirculación de biosólidos y/o biogás.

Las plantas trabajan con un contenido de SV que va del 15-40%, consumiendo 0.1m^3 de agua por tonelada tratada (Verma 2002), tienen un TRH que oscila entre 15 y 20 días, y produciendo de 80 a 200 m^3 de biogás/t (Karagiannidis y Perkoulidis 2009). A estas condiciones se generan 539 kWh/t, emitiendo 28 kg CO_2 eq/ t, y se producen 277 kg de composta por tonelada de FORSU (Karagiannidis y Perkoulidis 2009). Actualmente se tienen 43 plantas en operación que tratan la FORSU separada en sitio, con capacidades de entre 27 y 1,363 tpd (International Energy Agency 2008), que ocupan $107\text{ m}^2/\text{t}$ (RIS International 2005). Los costos de instalación son de \$213,127 por tonelada al día (RIS International 2005), y los de operación de \$30 por tonelada. Suponiendo una vida de 20 años, y con una tasa de descuento del 12%, se tiene un VPN de -\$11,978,410 y una TIR de 9%.

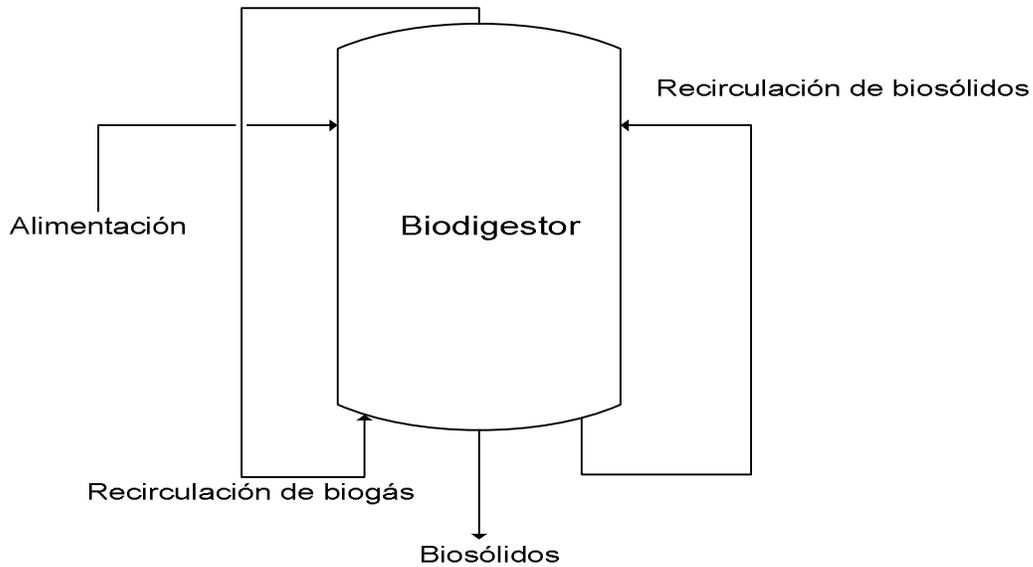


Diagrama 13. Proceso de digestión anaerobia en un sistema seco de una etapa

Fuente: elaboración propia

En la tabla 13 se aprecian las plantas en operación de estos sistemas:

Tabla 13. Plantas en operación de sistemas secos de una etapa

| Sistema | País | Lugar | Alimentación | Capacidad (Tpd) | Año |
|----------|----------|--------------|-----------------------|-----------------|------|
| Dranco | Austria | Siggerwiesen | FORSU Separada | 54.8 | 1993 |
| Dranco | Bélgica | Brecht I | FORSU Separada, papel | 54.8 | 1992 |
| Dranco | Bélgica | Brecht II | FORSU Separada, papel | 137.0 | 2000 |
| Dranco | Alemania | Leonberg | FORSU Separada | 82.2 | 2004 |
| Dranco | Corea | Pusan | FORSU Separada | 191.8 | 2005 |
| Dranco | España | Vitoria | FORSU Separada, RSU | 328.8 | 2006 |
| Dranco | Suiza | Villeneuve | FORSU Separada | 27.4 | 1999 |
| Kompogas | Austria | Lustenau | FORSU Separada | 27.4 | 1996 |
| Kompogas | Austria | Roppen | FORSU Separada | 27.4 | 2001 |

| Sistema | País | Lugar | Alimentación | Capacidad (Tpd) | Año |
|----------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------|------|
| Kompogas | Caribe | Martinique | FORSU Separada | 54.8 | 2005 |
| Kompogas | Francia | Le Robert, Martinique | FORSU Separada | 54.8 | 2006 |
| Kompogas | Alemania | Alzey | FORSU Separada | 71.2 | 1999 |
| Kompogas | Alemania | Braunschweig | FORSU Separada | 71.2 | 1997 |
| Kompogas | Alemania | Frankfurt | FORSU Separada | 41.1 | 1999 |
| Kompogas | Alemania | Hunsrück | FORSU Separada | 27.4 | 1997 |
| Kompogas | Alemania | Kempten | FORSU Separada | 27.4 | 1995 |
| Kompogas | Alemania | München/Erding | FORSU Separada | 71.2 | 1997 |
| Kompogas | Alemania | Passau | FORSU Separada | 106.8 | 2005 |
| Kompogas | Alemania | Simmern | FORSU Separada | 27.4 | 1997 |
| Kompogas | Alemania | Weissenfels | FORSU Separada | 34.2 | 2003 |
| Kompogas | Japón | Kyoto | FORSU Separada | 54.8 | 2004 |
| Kompogas | España | Rioja | FORSU Separada | 205.5 | 2005 |
| Kompogas | Suiza | Aarberg | FORSU Separada | 34.2 | 2006 |
| Kompogas | Suiza | Bachenbülach | FORSU Separada | 27.4 | 1994 |
| Kompogas | Suiza | Jona | FORSU Separada | 21.9 | 2005 |
| Kompogas | Suiza | Lenzburg | FORSU Separada | 13.7 | 2005 |
| Kompogas | Suiza | Otelfingen | FORSU Separada | 34.2 | 1996 |
| Kompogas | Suiza | Ottenbach | FORSU Separada | 43.8 | 2006 |
| Kompogas | Suiza | Pratteln | FORSU Separada | 34.2 | 2006 |
| Kompogas | Suiza | Samstagern | FORSU Separada | 27.4 | 1995 |
| Kompogas | Suiza | Utzenstorf | FORSU Separada | 34.2 | 2005 |
| Kompogas | Suiza | Volketswil | FORSU Separada | 13.7 | 2001 |
| Valorga | China | Beijing | FORSU Separada | 287.7 | 2007 |
| Valorga | China | Shanghai | FORSU Separada,RSU | 735.6 | 2007 |
| Valorga | Francia | Calais | FORSU Separada, papel | 74.0 | 2006 |
| Valorga | Francia | Fos sur Mer | FORSU Separada,RSU | 1363.3 | 2008 |

| Sistema | País | Lugar | Alimentación | Capacidad (Tpd) | Año |
|---------|--------------|-------------------|--------------------|-----------------|------|
| Valorga | Alemania | Engelskirchen | FORSU Separada | 95.9 | 1998 |
| Valorga | Alemania | Freiburg | FORSU Separada | 98.6 | 1999 |
| Valorga | Italia | Bassano di Grappa | FORSU Separada,RSU | 150.7 | 2003 |
| Valorga | Países Bajos | Tilburg | FORSU Separada | 142.5 | 1994 |
| Valorga | Portugal | Tdela | FORSU Separada,RSU | 95.9 | 2007 |
| Valorga | España | Barcelona | FORSU Separada,RSU | 657.5 | 2004 |
| Valorga | Suiza | Geneva | FORSU Separada | 27.4 | 2000 |

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de International Energy Agency , 2008.

iii. Sistemas multietapa

En los sistemas multietapa se llevan a cabo las etapas de reacción en diferentes reactores, con la finalidad de poder controlar mejor las condiciones de cada una de las etapas, y así reducir los tiempos de retención aumentando la producción de biogás. Generalmente se separan la hidrólisis de la metanogénesis, constando el sistema de dos etapas, para permitir un contenido de sólidos totales mayor, o mejorar la estabilidad del proceso.

Los sistemas analizados trabajan con un contenido de sólidos totales que van del 15 al 45%, consumiendo 0.1m³ de agua por tonelada tratada (Verma 2002), con un TRH de aproximadamente 6 días, la producción de biogás oscila entre 100 y 150 m³/t (Joshua Rapport 2008). Con este biogás se generan 590kWh/t, se emiten 326 kg CO₂ eq/t, y se producen 280 kg de composta por tonelada de FORSU. Actualmente existen 20 plantas operando, con una capacidad que va de 8 a 233 tpd (International Energy Agency 2008) que necesitan 53m²/t (Verma 2002). Los costos de instalación son de \$179,182/tpd (RIS International 2005), y

los de operación son de \$28/t. Suponiendo una vida de 20 años, y con una tasa de descuento del 12%, se tiene un VPN de -\$9,054,131 y una TIR de 10%.

En el diagrama 14 se puede apreciar este proceso.

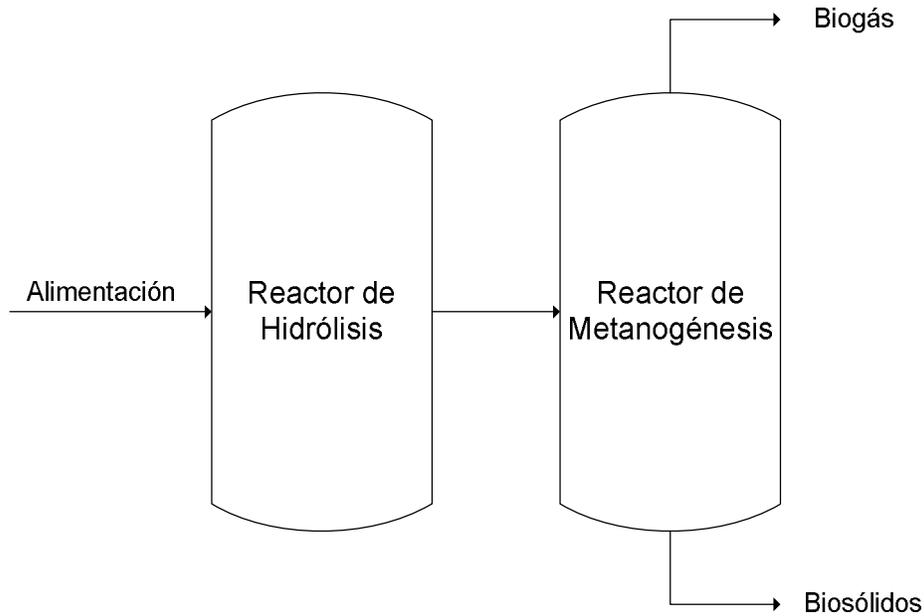


Diagrama 14. Proceso de digestión anaerobia en un sistema multietapa

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 14 se presentan las plantas en operación de estos sistemas:

Tabla 14. Plantas en operación de sistemas multietapa

| Sistema | País | Lugar | Alimentación | Capacidad (Tpd) | Año | Tipo |
|---------------------------|----------|----------------------------|--------------------------------|-----------------|------|--------|
| BTA | Bélgica | Leper | FORSU Separada | 137.0 | 2003 | Húmedo |
| BTA | Corea | Ko-Sung | FORSU Separada | 8.2 | 2003 | Húmedo |
| BTA | Alemania | Baden-Baden | FORSU Separada | 13.7 | 1993 | Húmedo |
| BTA | Alemania | Dietrichsdorf | FORSU Separada, ROI | 46.6 | 1995 | Húmedo |
| BTA | Alemania | Erkheim | FORSU Separada, ROI | 31.5 | 1997 | Húmedo |
| BTA | Alemania | Karlsruhe | FORSU Separada | 21.9 | 1996 | Húmedo |
| BTA | Alemania | Kirchstockach | FORSU Separada | 54.8 | 1997 | Húmedo |
| BTA | Alemania | Mertingen | FORSU Separada | 30.1 | 2001 | Húmedo |
| BTA | Alemania | Mühlheim | FORSU Separada, ROI | 60.3 | 2003 | Húmedo |
| BTA | Alemania | Schwabach | FORSU Separada | 32.9 | 1996 | Húmedo |
| BTA/MAT | Alemania | Kehlheim/ Volkenschwamm | FORSU Separada | 35.6 | | Húmedo |
| BTA/MAT | Alemania | München | FORSU Separada | 54.8 | 1997 | Húmedo |
| BTA/Roediger | Alemania | Kaufbeuren | FORSU Separada, ROI | 16.4 | 1992 | Húmedo |
| Linde BRV/ Strabag BRV | Alemania | Lemgo | FORSU Separada, ROI | 104.1 | 2000 | Seco |
| Linde BRV/ Strabag BRV | Suiza | Baar | FORSU Separada | 16.4 | 1994 | Seco |
| Linde BRV/Strabag | Austria | Wels | FORSU Separada | 41.1 | 1997 | Húmedo |
| Linde KCA/ Strabag-KCA | Alemania | Fürstenwalde | FORSU Separada, Estiércol, ROI | 232.9 | 1998 | Húmedo |
| Linde/ Strabag | España | Valladolid | FORSU Separada | 41.1 | 2001 | |
| Linde/Strabag- BRV | Alemania | Hoppstätten- Weiersb. | FORSU Separada | 63.0 | 2002 | Seco |
| Linde-BRV/ Strabag-BRV | Alemania | Sagard (Rügen) | FORSU Separada, Estiércol, ROI | 131.5 | 1996 | Húmedo |

ROI: Residuos Orgánicos Industriales

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de International Energy Agency, 2008.

4.2.2. Compostaje

El compostaje es un proceso que convierte residuos orgánicos en un material estable con bajo contenido de materia orgánica rápidamente biodegradable y sin fitotoxicidad para las plantas.

Generalmente se distinguen cuatro etapas principales durante el proceso de compostaje, dependiendo de la temperatura que llegue a alcanzar la pila de composta (Yong y Guang-Ming 2009). A continuación se da una breve descripción de cada una de ellas:

1. Etapa mesofílica:

Es dominada por microorganismos mesofílicos. Durante esta etapa la actividad metabólica produce un aumento de temperatura (40°C), y la producción de ácidos orgánicos disminuye el pH.

2. Etapa termofílica:

Es dominada por bacterias termofílicas y hongos. En esta etapa, como consecuencia del aumento de la temperatura, los hongos transforman el nitrógeno en amoníaco, produciendo un pH alcalino. Cerca de los 60°C, las bacterias esporígenas y actinomicetos descomponen las ceras, proteínas y hemicelulosas. Se debe mantener una temperatura entre los 40-60°C y un contenido de humedad entre el 50-60%, para asegurar la actividad biológica necesaria.

3. Etapa de enfriamiento:

Es dominada por microorganismos mesofílicos, cuando las temperaturas descienden de los 40°C estos reinician su actividad disminuyendo ligeramente el pH. En esta etapa la composta todavía no está madura, y puede tener un alto contenido de ácidos orgánicos, una proporción C/N alta, valores de pH extremos y un alto contenido de sales, que pueden matar a las plantas.

4. Etapa de maduración:

Es dominada por microorganismos mesofílicos. La maduración es un indicador del grado de conversión de compuestos orgánicos a compuestos húmicos, que son resistentes a la degradación microbiana.

El proceso de compostaje requiere niveles óptimos de carbono, nitrógeno, oxígeno y agua. El tamaño de partículas debe ser apropiado para permitir un buen mezclado y un adecuado flujo de aire a través de la pila. Se puede trabajar con proporciones de C/N entre 20:1 y 40:1. El contenido óptimo de humedad va de 50-60%, pero bajo ciertas condiciones se puede trabajar con humedad del 40-65%(Sherman 2006).

Una clasificación de los sistemas de compostaje, separa a los que operan al aire libre (generalmente compostaje en pilas) de los que operan en un reactor cerrado (conocido como compostaje cerrado). Cabe mencionar que el tipo de compostaje que se evalúa en esta parte es únicamente el que se lleva a cabo por acción de bacterias y hongos, se deja de lado otros sistemas de producción de composta, como el vermicompostaje, ya que estos sistemas son difíciles de operar a gran escala por la delicadeza de los organismos que en ellos participan.

Algunas ventajas del sistema de pilas, si se compara con los sistemas cerrados, son el bajo costo de inversión, y la adaptabilidad al cambio en la alimentación. Por otro lado, estos sistemas requieren mucha área para operar, son sensibles al clima, y en caso de mala operación es difícil controlar olores si se comparan con los sistemas cerrados.

De acuerdo a la clasificación de este tipo de sistemas, se evaluaron las siguientes opciones tecnológicas:

- iv. Sistemas de compostaje abierto
- v. Sistemas de compostaje cerrado

iv. Sistemas de compostaje abierto

El compostaje abierto es comúnmente conocido como compostaje en pilas, debido a que se forman pilas con el material orgánico a tratar. Es importante el tamaño y la forma de las pilas, para permitir una correcta aireación, no perder demasiado calor, y controlar la humedad. Generalmente las pilas son de 3-4 metros de ancho y de 1-4 metros de alto al inicio del compostaje (Sherman 2006), y tienen una forma triangular para drenar el agua de lluvia. En meses secos, se puede aplanar la parte superior para retener más agua. En la fotografía 6 se presenta un sistema de compostaje abierto.



Fotografía 6. Sistema de compostaje abierto

Fuente: Compost Canarias, 2011.

Existen diferentes tipos de sistemas de compostaje abiertos, los cuales se diferencian principalmente por el sistema de aireación que tienen. Los sistemas de pilas con volteo se oxigenan mediante el mezclado periódico del material a tratar. Con este movimiento se controla la temperatura y la humedad de la pila.

Los sistemas de pilas con aireación pasiva incluyen la inserción de pipas de aireación dentro o debajo de las pilas; las pilas son ventiladas por convección natural, ya que el aire caliente que sube por el interior de las pilas crea un vacío parcial que arrastra el aire de abajo o de los lados. Las pilas con aireación forzada cuentan también con pipas de aireación insertadas a lo largo de la pila, pero a diferencia del sistema con aireación pasiva, la corriente de aire se debe a insuflado o succión por medio de un ventilador. Es importante tener una mezcla homogénea y el contenido óptimo de humedad, ya que generalmente estos sistemas no se voltean.

Generalmente los sistemas de compostaje en pilas tardan de 3 meses a un año en procesar la materia orgánica, trabajan con un contenido de sólidos totales entre 35 y 60%, consumiendo 0.35 m³ de agua por tonelada tratada (Sustainability in Industry, Energy and Transport European IPPC Bureau 2005), y producen de 600 a 800 kg de composta por tonelada de FORSU (Farrell y Jones 2009). En el transcurso del proceso, liberando 300 kg CO₂ eq/t, y consumiendo 4 kWh/t (Brown, Kruger y Subler 2008). Hay miles de plantas de compostaje en pilas en todo el mundo, con capacidades que van desde 1 a 1200 tpd, ocupando 207 m²/t (Geesing y Paul s.f.). Los costos de operación para este tipo de plantas son en promedio de \$9/t, dependiendo del sistema (Environmental Protection Agency 1999) y los de instalación de \$13,349 a \$26,698/tpd (Kreith y Tchobanoglous 2002). Suponiendo una vida de 20 años, y con una tasa de descuento del 12%, se tiene un VPN de -\$21,518,549 y sin una tasa interna de retorno.

v. Sistemas de compostaje cerrado

Estos sistemas se caracterizan por llevar a cabo el compostaje en reactores cerrados, lo cual permite controlar de la mejor manera los diferentes parámetros del proceso y el desprendimiento de olores, contar con un menor tiempo de residencia y en algunos casos, operar de manera continua.

El diseño de estos reactores cubre una amplia gama, que incluyen reactores horizontales o verticales, mecanismos de aireación, forzada, volteo, o incluso sistemas estáticos, pero con modificaciones para proveer una mejor aireación, y evitar la formación de puntos calientes de digestión anaerobia(Aslam 2010). En la fotografía 7 se muestra un sistema de compostaje cerrado, con un reactor horizontal.



Fotografía 7. Sistema de compostaje cerrado

Fuente: Advanced Technology Applications Corp., 2011.

El proceso en el reactor es de 5 a 28 días(Center for a Competitive Waste Industry 2010), y para después madurar afuera cerca de un mes(Aslam 2010)(Aslam 2010), resultando en un tiempo de procesamiento es de 37 a 59 días. En la producción de composta se consumen en promedio 0.33 m³ de agua por tonelada tratada y 90 kWh/t de RSU. Se producen 650 kg de composta /t de

RSU, y se emiten a la atmósfera el equivalente a 445 kg de CO₂ (Brown, Kruger y Subler 2008). Actualmente hay 587 plantas en operación (Spencer 2007), con capacidades que van de 1 a 137 tpd y que necesitan 134 m²/tpd. Los costos de operación son de \$29/t (Block y Farrell 1998) y los de instalación de \$33,373 a \$66,746/tpd (Kreith y Tchobanoglous 2002). Suponiendo una vida de 20 años, y con una tasa de descuento del 12%, se tiene un VPN de -\$62,472,708 y sin una TIR

4.3. Evaluación de Opciones Tecnológicas

En esta segunda etapa de selección se evaluaron por separado los criterios técnicos, económicos y ambientales, y posteriormente se realizó una evaluación global con los resultados anteriores. Cabe mencionar que para esta etapa de selección se utilizó como herramienta de jerarquización el software *Decision Lab*®, que utiliza el algoritmo de *PROMETHEE* para la evaluación de alternativas.

Para poder hacer uso del software *Decisión Lab*®, se siguió la metodología que se presenta a continuación:

4.3.1. Determinación de los criterios

En esta segunda etapa, se realizaron tres evaluaciones, una técnica, una económica y una ambiental. En seguida se presentan los criterios utilizados para cada evaluación:

1. Evaluación Técnica:
 - a) Área: Considera los metros cuadrados necesarios para tratar una tonelada de FORSU.

- b) Plantas: Contempla el número de plantas en operación para esa opción tecnológica.
- c) Capacidad máxima: Toma en cuenta la mayor capacidad de operación de las plantas para esa opción tecnológica
- d) Tiempo de procesamiento promedio: Considera el número de días necesarios para procesar a la FORSU.

2. Evaluación Ambiental:

- a) Gases de Efecto Invernadero: Contempla los kilogramos emitidos de gases de efecto invernadero, en equivalencia de potencial de calentamiento global a CO₂, por tonelada de FORSU tratada.
- b) Consumo de agua: Considera los metros cúbicos de agua necesarios para tratar una tonelada de FORSU.

3. Evaluación Económica:

- a) Costo total: Toma en cuenta el costo necesario para tratar una tonelada de FORSU.
- b) Valor Presente Neto: Refleja las ganancias o pérdidas a tiempo actual, que representa el proyecto sobre una tasa de descuento del 12% (tasa propuesta por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público para los proyectos de manejo de residuos sólidos del Distrito Federal).
- c) Tasa Interna de Retorno: Muestra la tasa a la que el proyecto no representaría ni una ganancia ni una pérdida económica.

En la tabla 15 se muestra un resumen de los criterios tomados en cuenta en las tres evaluaciones, para cada opción tecnológica presentada.

Tabla 15. Resumen de criterios utilizados para la evaluación técnica, económica y ambiental de opciones tecnológicas.

| | Evaluación | Técnica | | | | Económica | | | Ambiental | |
|---------------------|-------------------------------|--------------------------|---------|------------------------|---|--------------------|-----------------|-------|---|-------------------------------------|
| | Característica | Área (m ² /t) | Plantas | Capacidad máxima (tpd) | Tiempo de procesamiento promedio (días) | Costo total (\$/t) | VPN | TIR | Gases de Efecto Invernadero (kg CO ₂ eq/t) | Consumo de agua (m ³ /t) |
| Compostaje | Compostaje Abierto | 207 | 1000 | 1200 | 214 | 12 | - 21,518,549 | 0 | 319.31 | 0.45 |
| | Compostaje Cerrado | 134 | 587 | 137 | 48 | 36 | - 62,472,709 | 0 | 324.76 | 0.33 |
| Digestión Anaerobia | Sistemas húmedos de una etapa | 91 | 6 | 41 | 15 | -42 | 35,399,292 | 29.00 | 27.95 | 1.00 |
| | Sistemas multietapa | 53 | 13 | 137 | 6 | -27 | -9,054,131 | 10.00 | 30.19 | 0.10 |
| | Sistemas secos de una etapa | 107 | 43 | 1363 | 20 | -21 | - 11,978,410 | 9.00 | 27.58 | 0.10 |

4.3.2. Asignación de valores a los criterios

Debido a que los criterios considerados no tienen la misma importancia a la hora de garantizar la viabilidad técnica, económica o ambiental de las opciones tecnológicas, se asignaron los valores porcentuales. Así mismo, a cada evaluación se le asignó un valor porcentual que refleja su peso en la evaluación global. Estos valores son mostrados en la tabla 16 para poder jerarquizar a los criterios.

Tabla 16. Criterios de evaluación de las opciones tecnológicas

| Criterio | Porcentaje | Descripción |
|---|------------|--|
| Evaluación Técnica | 40 | Esta evaluación tiene un mayor peso que las otras dos, ya que lo primero que se debe asegurar del proyecto es la factibilidad técnica |
| Área (m ² /t) | 45 | Dentro de la evaluación técnica, el área requerida por tonelada a tratar es el criterio de mayor peso, ya que en el distrito federal es difícil y caro conseguir espacios muy extensos. |
| Plantas | 15 | El número de plantas en operación demuestra que el proceso tiene experiencia. |
| Capacidad máxima (tpd) | 30 | La capacidad máxima de plantas instaladas es de gran importancia, ya que ésta determina la facilidad de escalar el proyecto a la capacidad deseada (500 Tpd) |
| Tiempo de procesamiento promedio (días) | 10 | Tiempos de procesamiento grandes tienen consecuencias indeseables, como mayor requerimiento de área, más problemas en casos de paro de la planta, mayor requerimiento de personal, entre otros. |
| Evaluación Ambiental | 35 | La evaluación ambiental es la segunda en importancia, ya que para este tipo de proyectos es indispensable minimizar el impacto ambiental, aún cuando esto implique que el proyecto no origine ganancias económicas. |
| Gases de Efecto Invernadero (kg CO ₂ eq/t) | 70 | Las emisiones de gases de efecto invernadero representan un impacto ambiental mayor en los tratamientos bioquímicos, que los efluentes. Por esta razón este criterio tiene un peso tan elevado. |
| Consumo de agua (m ³ /t) | 30 | El consumo de agua por tonelada refleja la cantidad de agua que se contamina en el proceso, y que posteriormente debe ser tratada. Como generalmente se da tratamiento al agua residual, ésta no representa un impacto tan alto al medio ambiente. |
| Evaluación Económica | 25 | La evaluación económica refleja la viabilidad financiera del proyecto. Aunque es importante que el proyecto pueda ser rentable económicamente, primero se deben asegurar los dos aspectos anteriores. |
| Costo total (\$/t) | 30 | El costo total refleja la viabilidad económica del proyecto, y aunque no es tan claro, es el que se utiliza generalmente en materia de residuos sólidos. Por estas razones tiene un peso menor que los otros criterios. |
| VPN | 35 | El valor presente neto refleja las ganancias o pérdidas del proyecto sobre la tasa de descuento de residuos sólidos (12%), a tiempo actual. Esta herramienta es más clara que el costo total, por eso tiene un peso mayor. |
| TIR | 35 | La TIR refleja a que tasa el proyecto no representaría ni pérdidas ni ganancias. En este caso, se desprecian las alternativas con TIR menor a la tasa de descuento de residuos sólidos. |

4.3.3. Definición de las funciones de preferencia y sus parámetros

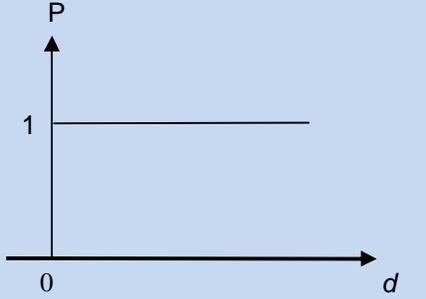
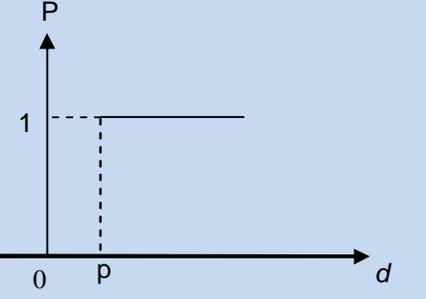
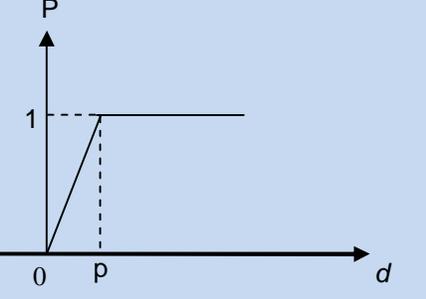
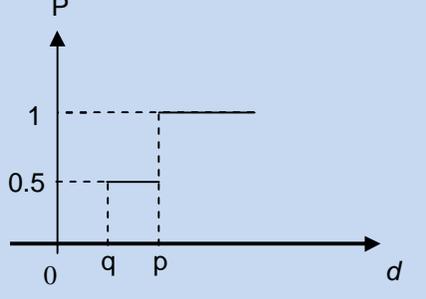
La estructura de preferencias del algoritmo *PROMETHEE* se basa en comparaciones de pares de alternativas evaluadas en los criterios. Se considera la desviación entre las evaluaciones de dos alternativas. Para desviaciones pequeñas, el evaluador asignará una preferencia pequeña, o incluso puede decidir que no hay preferencia si la desviación es insignificante.

El algoritmo *PROMETHEE* considera que las preferencias son números reales, que varían entre 0 y 1. Esto significa que para cada criterio, el evaluador tiene en mente una función de preferencia, basada en la desviación de las evaluaciones.

El software *Decision Lab*®, propone seis tipos de funciones de preferencia (que se muestran en la tabla 17), en las que se necesitan definir 0, 1 o 2 parámetros con un significado muy claro. (Brans y Mareschal 2005)

1. Límite de indiferencia (q): es la desviación más grande que se considera insignificante por el tomador de decisiones.
2. Límite estricto de preferencia (p): es la desviación más pequeña que se considera como suficiente para generar una preferencia amplia.
3. Límite Gaussiano (s): es un valor intermedio entre p y q , que define el punto de inflexión de la función de preferencia.

Tabla 17. Funciones de preferencia

| Tipo de función | Forma de función | Definición | Parámetros necesarios |
|-----------------|---|---|-----------------------|
| 1 Usual |  <p>The graph shows a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. A horizontal line is drawn at P=1 for all d ≤ 0. At d=0, there is a vertical drop to P=0, and the function remains at P=0 for all d > 0.</p> | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$ | -- |
| 2 Forma de U |  <p>The graph shows a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. The function is at P=0 for d ≤ p. At d=p, there is a vertical jump to P=1, and the function remains at P=1 for all d > p. Dashed lines indicate the point (p, 1) on the graph.</p> | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$ | p |
| 3 Forma de V |  <p>The graph shows a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. The function starts at (0,0) and increases linearly to (p,1). For d > p, the function remains constant at P=1. Dashed lines indicate the point (p, 1) on the graph.</p> | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$ | p |
| 4 Nivel |  <p>The graph shows a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. The function is at P=0 for d ≤ q. At d=q, it jumps to P=0.5. At d=p, it jumps to P=1. For d > p, it remains at P=1. Dashed lines indicate the points (q, 0.5) and (p, 1) on the graph.</p> | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$ | p, q |

| Tipo de función | Forma de función | Definición | Parámetros necesarios |
|-----------------|------------------|--|-----------------------|
| 5 Lineal | | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$ | p, q |
| 6 Gaussiana | | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$ | s |

Fuente: (Brans y Mareschal 2005)

Para todos los criterios, se utilizó la función de preferencia lineal. En las evaluaciones, los límites arriba mencionados se expresan como un porcentaje. Esto significa que si la desviación entre las alternativas representa un porcentaje menor a q, no habrá preferencia entre las alternativas, si el porcentaje cae dentro de q y p, la preferencia será lineal, y si es mayor a p, la preferencia será total. Para la evaluación global, los límites se expresan como un valor absoluto.

En seguida se muestran en la tabla 18 los parámetros utilizados en las diferentes evaluaciones:

Tabla 18. Parámetros utilizados en el software *Decision Lab* ®

| Evaluación | Criterio | Función | Límite de Indiferencia (q) | Límite de Preferencia (p) |
|------------|-----------------------------|-----------|----------------------------|---------------------------|
| Técnica | Área | Minimizar | 5% | 100% |
| | Plantas | Maximizar | 10% | 150% |
| | Capacidad Máxima | Maximizar | 5% | 200% |
| | Tiempo de procesamiento | Minimizar | 5% | 100% |
| Económica | Costo Total | Minimizar | 3% | 100% |
| | VPN | Maximizar | 3% | 100% |
| | TIR | Maximizar | 3% | 100% |
| Ambiental | Gases de Efecto Invernadero | Minimizar | 5% | 100% |
| | Consumo de agua | Minimizar | 5% | 200% |
| Global | Técnica | Maximizar | 0.001 | 2 |
| | Económica | Maximizar | 0.001 | 2 |
| | Ambiental | Maximizar | 0.001 | 2 |

Los límites de indiferencia, son las variaciones que en cada criterio se consideraron insignificantes. Para las variaciones económicas, se tomaron valores más pequeños, ya que al tratarse de sumas grandes, un cambio por encima del 3% ya resulta significativo. Para las demás evaluaciones, una variación por debajo del 5% se consideró despreciable.

Para la evaluación final, se tomó 0.001 como límite de indiferencia, esto representa un 0.5% de la desviación máxima que podrían tener las evaluaciones.

Los límites de preferencia, son las variaciones en cada criterio que se consideraron suficientemente grandes como para mostrar una preferencia total. En la mayoría de los criterios, una desviación del 100% fue suficiente, exceptuando los criterios en donde margen mayor de variación no representa un problema tan grande (como por ejemplo la capacidad máxima). Para la evaluación final, se tomó 2 como límite de preferencia, ya que esta desviación es la máxima que puede haber en las evaluaciones (recordando que los flujos de preferencia netos pueden tomar valores de -1 a 1) y esta desviación equivale a una preferencia total.

4.3.4. Determinación de la función de criterio

Al realizar las evaluaciones utilizando el Software *Decision Lab*®, se obtuvieron los flujos netos de preferencia (Φ) que se aprecian en la tabla 19.

Tabla 19. Flujos netos de preferencia para las evaluaciones de opciones tecnológicas

| | Técnico | Ambiental | Económico |
|-------------------------------|---------|-----------|-----------|
| Compostaje Abierto | 0.0293 | -0.5204 | -0.6437 |
| Compostaje Cerrado | -0.0883 | -0.4938 | -0.7378 |
| Sistemas húmedos de una etapa | -0.3425 | 0.2126 | 0.9656 |
| Sistemas multietapa | 0.1567 | 0.3951 | 0.2797 |
| Sistemas secos de una etapa | 0.2447 | 0.4066 | 0.1361 |

Estos flujos marcan la diferencia entre los flujos de preferencia positivos ($\Phi+$) y los flujos de preferencia negativos ($\Phi-$). Los flujos de preferencia positivos miden en qué extensión esa acción es preferible que las demás, tomando valores de 0 cuando nunca se prefiera esa acción con respecto a las demás y de 1 cuando se prefiere completamente esta acción sobre las demás. Los flujos de preferencia negativos miden hasta qué punto otras acciones son preferidas que la acción en cuestión, tomando valores de cero cuando ninguna otra acción es preferida a la acción en cuestión, y valores de uno cuando todas las otras acciones son completamente preferidas a esa acción. Con estas definiciones, los flujos netos de preferencia (Φ) pueden tomar valores de -1 a 1, siendo mejores opciones las acciones que tienen valores cercanos a 1.

Con los datos mencionados anteriormente se realizó la evaluación final, y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Flujos de preferencia para la evaluación final

| | $\phi+$ | $\phi-$ | ϕ |
|-------------------------------|---------|---------|---------|
| Compostaje Abierto | 0.0273 | 0.2342 | -0.207 |
| Compostaje Cerrado | 0.0138 | 0.259 | -0.2452 |
| Sistemas húmedos de una etapa | 0.2137 | 0.1019 | 0.1119 |
| Sistemas multietapa | 0.1954 | 0.0262 | 0.1691 |
| Sistemas secos de una etapa | 0.2015 | 0.0304 | 0.1711 |

El Software *Decision Lab*® cuenta con dos algoritmos de análisis, *PROMETHEE I* y *PROMETHEE II*. *PROMETHEE II* realiza una jerarquización completa, tomando en consideración los flujos netos de preferencia, esta evaluación es la presentada arriba, y muestra que la mejor opción es la digestión anaerobia de sistemas secos de una etapa.

El algoritmo *PROMETHEE I* realiza una jerarquización parcial, tomando en cuenta los flujos negativos y positivos de preferencia, que no siempre inducen a los mismos resultados. Con esta jerarquización, se obtienen los resultados que se muestran en el diagrama 15.

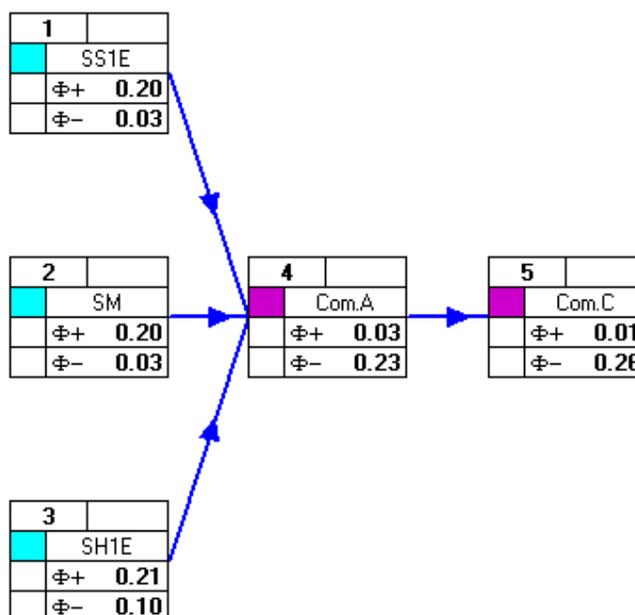


Diagrama 15 PROMETHEE I Jerarquización Parcial

Fuente: Extracción de la evaluación total realizada en *Decision Lab*

Donde:

SS1E: Sistemas Secos de una Etapa

SH1E: Sistemas Húmedos de una Etapa

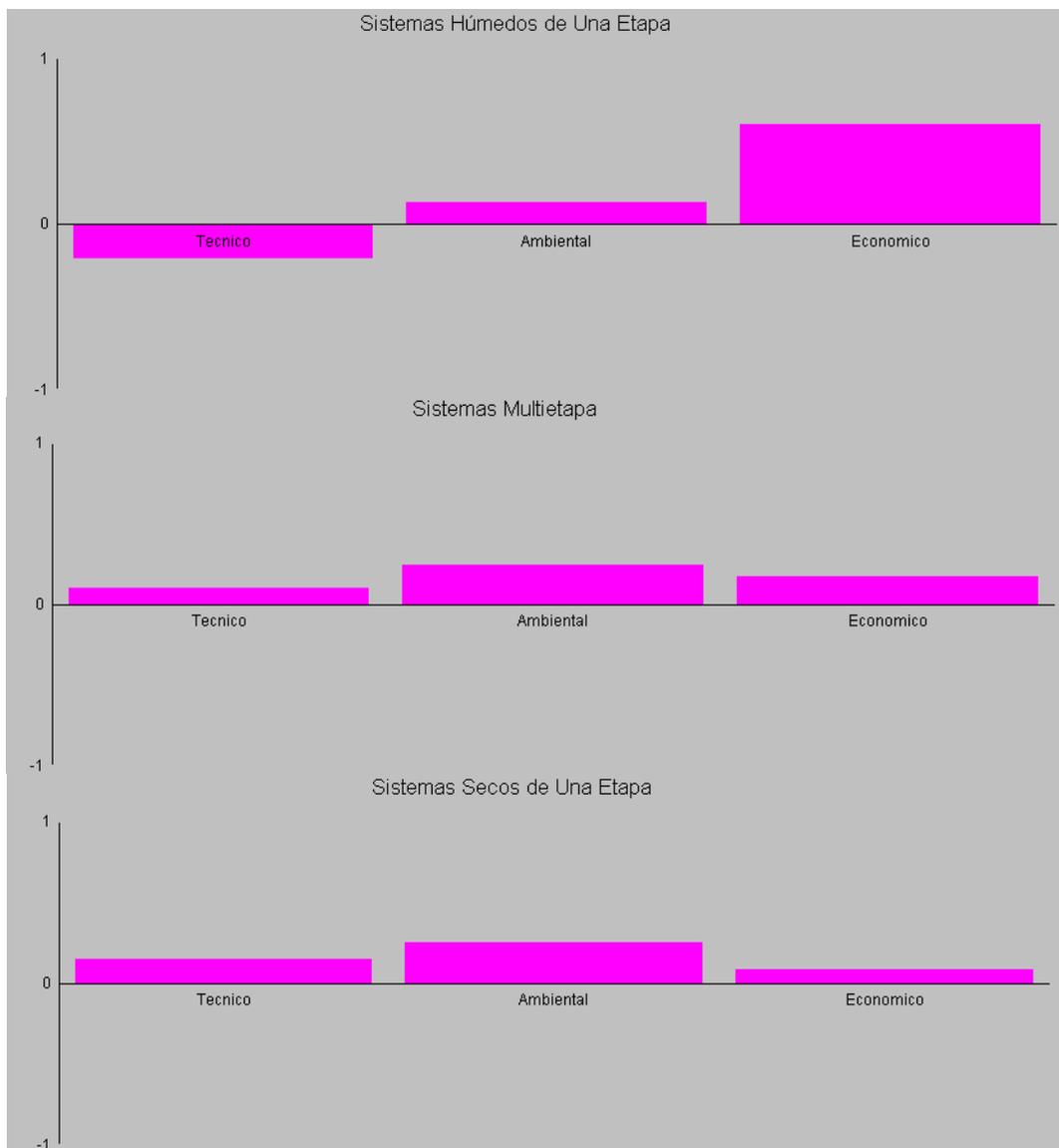
SM: Sistemas de etapas Múltiples

Comp.A: Compostaje Abierto

Comp.C: Compostaje Cerrado

El algoritmo *PROMETHEE I* plantea que los sistemas de digestión anaerobia son comparables como primera opción, ya que las fortalezas de un sistema en un criterio contrarrestan sus debilidades en otro. En el gráfico 2 se comparan los flujos de preferencia netos para los tres sistemas.

Gráfico 2. Comparación de flujos de preferencia netos de sistemas de digestión anaerobia.



En el gráfico 2 se aprecia que tanto los sistemas multietapa, como los sistemas secos de una etapa tienen un Φ positivo en todos los aspectos evaluados (técnicos, económicos y ambientales). La diferencia entre estos sistemas radica en que los sistemas multietapa son preferidos en el aspecto económico y los sistemas secos de una etapa son preferidos en el aspecto técnico. Por el otro lado, los sistemas húmedos de una etapa, tienen un Φ negativo en el aspecto técnico, pero este se contrarresta al tener un Φ cercano a 1 en el aspecto económico.

Esta evaluación considera incomparables a los sistemas de digestión anaerobia, pues la información proporcionada por los flujos de preferencia no es consistente. Esto se debe a que en el criterio en los que una alternativa es fuerte, las otras son débiles, y viceversa.

Por esta razón, el resultado tomado en cuenta para seleccionar al sistema comercial preferido es el del algoritmo *PROMETHEE II*.

Con estos argumentos, de este capítulo se puede concluir lo siguiente:

- Las tecnologías de conversión bioquímicas son las más aptas para el tratamiento de la FORSU, ya que como esta fracción tiene un alto contenido de humedad las tecnologías termoquímicas se vuelven muy costosas, y no toda la fracción orgánica puede ser utilizada en tratamientos fisicoquímicos.
- La digestión anaerobia es la mejor tecnología de conversión para la FORSU separada en sitio, pues genera productos de alto valor agregado, puede tratar a toda la fracción orgánica, y no implica costos tan altos como las tecnologías de conversión termoquímicas.
- Dentro de las opciones tecnológicas de digestión anaerobia, los sistemas secos de una etapa presentan el mejor desempeño global, considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos, basándonos en la jerarquía mencionada durante este capítulo.

4.4. Propuesta tecnológica de la alternativa seleccionada

En el capítulo anterior, se concluyó que la mejor alternativa para tratar la FORSU del Distrito Federal es la digestión anaerobia, en un sistema seco de una etapa. A continuación se muestra la tabla 21, donde se resumen de las características que tendría esta planta.

Tabla 21. Propuesta tecnológica de la alternativa seleccionada

| | |
|--|---------------------------|
| Alternativa tecnológica | Digestión anaerobia |
| Opción tecnológica | Sistema seco de una etapa |
| Tipo de residuos | FORSU separada en sitio |
| Capacidad (tpd) | 500 |
| Espacio requerido (m ²) | 53,288 |
| Costo de instalación (dólares) | 79,504,164 |
| Costo de operación (dólares/año) | 3,681,844 |
| Energía eléctrica ¹² (kWh/año) | 48,887,749 |
| Composta como producto secundario (tpa) | 54,369 |
| Ganancias por venta de productos (dólares/año) | 13,217,799 |
| Ahorro por desviación de RSU a relleno sanitario (dólares/año) | 1,523,516 |
| Valor Presente Neto (dólares) | -11,978,410 |
| Tasa Interna de Retorno (%) | 9.00 |

De la tabla 21 se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Tomando una TIR del 12%, que corresponde a la TIR mínima de acuerdo a la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, para los proyectos de manejo de residuos sólidos del Distrito Federal, el proyecto no implicaría un incremento en la riqueza, pues el valor presente neto es negativo.

¹² En el Anexo I se muestran los parámetros utilizados para calcular la energía eléctrica que se genera por medio de biogás.

- El proyecto puede aumentar su utilidad, ya que con este sistema, se está evitando la emisión de casi 29 mil toneladas equivalentes de CO₂, y con esto se podría entrar al mercado de bonos de carbono. Hoy en día no es tan factible, ya que en México todavía no se tiene mucha consciencia sobre la compra/venta de bonos de carbono, pero hay una tendencia marcada hacia la comercialización de dichos bonos.
- Hay que remarcar que el ahorro por desviación de residuos al relleno sanitario no se está tomando en consideración para la evaluación económica, ya que si se toma en cuenta, entonces la tasa interna de retorno del proyecto es 11.88%, haciendo que el valor presente del proyecto sea muy cercano a cero. Esto significa que la inversión no generaría aumento o disminución en el valor, y sería indiferente la inversión, económicamente hablando.
- Si se compara esta alternativa con un relleno sanitario, el área requerida para tratar 500 tpd con digestión anaerobia seca de una etapa es el 11% de la que se requeriría en el caso de un relleno sanitario.

5. Conclusiones

El manejo actual de los residuos orgánicos en el Distrito Federal es inadecuado. A continuación se mencionan algunos de los problemas:

- La población no está consciente de la necesidad de separar los residuos, por lo que el porcentaje de separación es bajo (9.5% de FORSU).
- Los sistemas de recolección no siempre cuentan con compartimentos de separación de residuos, por lo que se mezclan los residuos separados con el resto de los RSU.
- Las plantas de compostaje no cuentan con la capacidad necesaria para tratar la FORSU separada en sitio, por lo que el 77% de estos son mezclados nuevamente con los RSU. El 98.33% de la FORSU se dispone en un relleno sanitario, implicando un costo de \$38,320 /d.
- Las plantas de compostaje no operan de manera eficiente, por falta de recursos para mantenimiento y actualización de equipos. Esto trae como consecuencia la producción de composta de baja calidad (no apta para su comercialización), y la emisión de gases con alto potencial de calentamiento global, como el metano.
- Se emiten al día 8,369 t CO₂ eq, por la disposición de la FORSU en Bordo Poniente, esto equivale al 6.7% de emisión de GEI de la Zona Metropolitana del Valle de México (Murphy y McKeogh, Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste 2004) (Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal 2008).

Las tecnologías bioquímicas son las más idóneas para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos que se encuentran separados, pues esta fracción se constituye de residuos biodegradables, que pueden convertirse a productos de alto valor agregado sin necesidad de alcanzar temperaturas y presiones

extremas. Las tecnologías termoquímicas requieren mucha energía para secar esta fracción por su alto contenido de humedad, y las tecnologías fisicoquímicas no aplican para toda la fracción orgánica, por lo que no resultan tan eficientes para tratar esta fracción de los RSU.

Dentro de las tecnologías bioquímicas, el compostaje y la digestión anaerobia fueron las tecnologías más apropiadas para el tratamiento de la FORSU. La fermentación alcohólica aún no se considera como buena opción, ya que el alto contenido de celulosa en la FORSU conlleva a altos costos o baja conversión a azúcar; y esto tiene como consecuencia baja producción de etanol.

Dentro de las opciones tecnológicas de compostaje y de digestión anaerobia, el sistema seco de una etapa de digestión anaerobia presenta el mejor desempeño global, seguidos cercanamente por los sistemas multietapa. Los sistemas de compostaje resultaron inferiores en el desempeño en comparación con los sistemas de digestión anaerobia.

El algoritmo *PROMETHEE I* no puede marcar una diferencia entre las opciones tecnológicas de digestión anaerobia, por lo que, en caso de seguir con el proyecto, sería recomendable hacer un análisis más profundo tomando en consideración variantes comerciales de los sistemas.

Considerando los resultados arrojados por el algoritmo *PROMETHEE II*, se eligió a los sistemas de digestión anaerobia secos de una etapa como la mejor alternativa. Esto resulta en una planta de 5.3 hectáreas, que procesa 500 t/d de FORSU separada en sitio produciendo 5.4×10^4 t de composta y 4.9×10^7 kWh al año.

La propuesta representa una mejora sustancial al manejo actual de la FORSU separada en sitio, ya que, como se ha mencionado a lo largo del trabajo, el 82.4% de la FORSU separada en sitio, se vuelve a mezclar con los RSU, y son

depositados en Bordo Poniente. Si se considerara a este proyecto, se ahorrarían \$1,523,516 USD al año en disposición de residuos, y se ganarían \$13,217,799 USD por venta de energía eléctrica.

Es evidente que el sistema de manejo actual de residuos sólidos en el Distrito Federal es inadecuado. Un sistema de manejo de residuos sólidos debe ser integral, contando con recuperación de materiales reciclables, y dando un tratamiento adecuado a las diferentes fracciones de los residuos. El sistema de manejo de residuos sólidos del Distrito Federal debe tender hacia la generación cero, teniendo un centro integral de reciclado y energía donde ingresen residuos sólidos, y se genere energía y materiales útiles. Como parte de esta estrategia, es importante tener una parte para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos, y la manera más fácil de comenzar es con los residuos que ya están separados.

6. Bibliografía consultada

1. Advanced Technology Applications Corp. «Swine Mortality Disposal Using an In-Vessel Composting System.» *Texas A&M University Commerce*. 2011. <http://www.tamu-commerce.edu/agscience/res-dlc/atacorp/ata-hog.html> (último acceso: 1 de Enero de 2011).
2. Agrivert. «Case Study: In-Vessel composting.» *Agrivert*. 2005. <http://www.agrivert.co.uk/assets/casestudies/invessel.pdf> (último acceso: 8 de Abril de 2010).
3. Asamblea Legislativa del Distrito Federal II Legislatura. «Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal.» *Movimiento Pro-Vecino*. 22 de Abril de 2003. http://www.provecino.org.mx/pdfs/leyes/Ley_Residuos_Solidos_DF.pdf (último acceso: 6 de Noviembre de 2009).
4. Asha, Aalok, A.K. Tripathi, y P. Soni. «Vermicomposting: A Better Option for Organic Solid.» *J. Hum. Ecol.*, 2008: 59-64.
5. Aslam, Danielle. «The science behind In-Vessel composting.» *California Integrated Waste Management Board*. 2010. <http://www.calrecycle.ca.gov/LEA/Conference/07conf/Presentations/Day1/Compost101/Aslam.ppt> (último acceso: 8 de Abril de 2010).
6. Ayala Hernández, Cristal Berenice. «Análisis de la evolución de la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal: 1980-2008.» *División Técnica de Residuos Sólidos*. 2009. <http://www.dirsa.org/pgirsu/articulos/8.pdf> (último acceso: 9 de Noviembre de 2009).
7. Balat, M. «Mechanisms of Thermochemical Biomass Conversion Processes. Part 1.» *Energy Sources*, 2009: 620-635.
8. Bertolino, Ricardo, Elizabeth Fogwill, Martina Chidiak, Santiago Cinquangelis, y María Noelia Fergione. «Participación ciudadana y gestión integral de residuos.» *Experiencias urbanas de gestión integral de residuos en 10 municipios de argentina*. 20 de Marzo de 2009. www.unicef.org/argentina/spanish/EcoclubesbajaWEB.pdf (último acceso: 9 de Abril de 2011).
9. Block, Dave, y Molly Farrell. «Variety is spice of on-sight composting.» *BioCycle* 39, n° 4 (1998).
10. Brans, Jean-Pierre, y Bertrand Mareschal. «PROMETHEE Methods.» En *Multiple Criteria Decision Analysis*, de Jose Figueira, Salvatore Greco y Matthias Ehrgott, 163-195. USA: Springer Science + Business Media Inc. , 2005.
11. Brentwood Recycling Systems. «Gicom in Vessel Composting.» *Brentwood Recycling Systems*. Junio de 1996. http://www.brentwood.com.au/com_gicom.htm (último acceso: 8 de Abril de 2010).
12. Brown, Sally, Chad Kruger, y Scott Subler. «Greenhouse Gas Balance for Composting Operations.» (*Journal of Environmental Quality*), n° 37 (2008).

13. Cabrera, Nayeli. *Opciones de tecnologías de conversión térmica para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos generados en el Distrito Federal*. D.F.: Facultad de Química, UNAM, 2010.
14. Center for a Competitive Waste Industry. *Beyond Recycling, Composting food scraps and soiled paper*. U.S. Environmental Protection Agency, 2010.
15. Comisión Federal de Electricidad. «Conoce tu tarifa.» *Comisión Federal de Electricidad*. 2010. <http://www.cfe.gob.mx/casa/ConocerTarifa/Paginas/Conocetutarifa.aspx> (último acceso: 4 de Marzo de 2010).
16. Compost Canarias. «Historia del Compost.» *Compost Canarias*. 2011. <http://compostcanarias.com/HISTORIA.html> (último acceso: 1 de Enero de 2011).
17. Cortinas de Nava, Dra. Cristina. «Regulación de la incineración de residuos sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos en México.» *Instituto Nacional de Ecología*. 2009. http://siscop.ine.gob.mx/novedades/regulacion_incineracion_residuos_en_mexico.pdf (último acceso: 13 de Noviembre de 2009).
18. Corzo, Miguel Angel. *Introduccion a la ingeniería de proyectos*. Limusa, 1972.
19. Crop Energies. «Bioethanol production process.» *Crop Energies*. 2010. <http://www.cropenergies.com/en/Bioethanol/Produktionsverfahren/> (último acceso: 9 de Febrero de 2010).
20. Dogan, E., T. Dunaev, T.H. Erguder, y G.N. Demirer. «Performance of leaching bed reactor converting the organic fraction of municipal solid waste to organic acids and alcohols.» *Chemosphere*, 2008: 797–803.
21. Ecopoda, S.L. «Estudio de maquinaria idónea para las labores de compostaje de alperujos.» *Junta de Andalucía*. Noviembre de 2005. http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/www/portal/com/bin/portal/DGAEcológica/estudiototales/documento_completo.pdf (último acceso: 11 de Febrero de 2010).
22. Engineering News Record. «Construction Economics.» *Engineering News Record*, Junio 2004: p25-26.
23. Engineering News-Record. «Construction Economics.» (ENR: Engineering News-Record) 216, n° 5 (2008).
24. Environmental Protection Agency. «Organic Materials Management Strategies.» *Environmental Protection Agency*. Julio de 1999. <http://www.epa.gov/wastes/conservation/rrr/composting/pubs/omms.pdf> (último acceso: 22 de Marzo de 2010).
25. Envirotherm GmbH. «LFC Lecho Fluidizado Circulante.» *Envirotherm GmbH*. http://envirotherm.de/content/e39/e137/e43/index_es.html (último acceso: 13 de Octubre de 2009).
26. Farrell, M., y D.L. Jones. «Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets.» *Bioresource Technology*, 2009: 4301–4310.
27. Flukong Enterprise Inc. «From Solid Waste to Compost.» *Flukong Enterprise Inc.* 2009. <http://www.flukong.ca/pdf/compost.pdf> (último acceso: 18 de Agosto de 2009).

28. Fondo Mixto CONACyT - GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. «Obtención de energía eléctrica mediante la gasificación de residuos sólidos urbanos para su implementación en el Distrito Federal.» *Proyecto No. DF-2008-C01-94261*. México, Distrito Federal, 2009.
29. García, A.J., M.B. Esteban, M.C. Márquez, y P. Ramo. «Biodegradable municipal solid waste: Characterization and potential use as animal feedstuffs.» *Waste Management*, 2005: 780-787.
30. Gasca Álvarez, Sergio. «¿Cuáles han sido las experiencias y retos del gobierno respecto al manejo de pilas?» *Foro Internacional de Pilas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. 17 de Julio de 2007.
<http://www.semarnat.gob.mx/gestionambiental/fomento/Documents/Programa%20de%20Manejo%20Responsable%20de%20Pilas%20en%20el%20DF%20-%20Versi%C3%B3n%20Estenogr%C3%A1fica.pdf> (último acceso: 9 de Noviembre de 2009).
31. Gasification Technologies Council. «World Gasification Database.» *Gasification Technologies Council*. 2010. <http://www.gasification.org/database1/search.aspx?a=66&b=3> (último acceso: 05 de Marzo de 2010).
32. Geesing, Dieter, y John Paul. «Aerated Windrow Composting, (Un-) covered.» *Transform Compost Systems Ltd.*
<http://www.transformcompost.com/tf%20web%20NEWSLETTER/Aerated%20Windrow%20Composting%20Un%20covered.pdf> (último acceso: 05 de Abril de 2010).
33. Grogan, Tim. «Construction Cost Index History (1918-2006).» *Engineering News-Record* 256, n° 11 (2006).
34. Hackett, Colin, y Robert B. Williams. *Evaluation of Conversion Technology*. Center for Environmental Research and Technology, Dept. of Biological and Agricultural Engineering; University of California, Integrated Waste Management Board, Sacramento, CA: Publications Clearinghouse, 2004.
35. Instituto de Acceso a la Información Pública del Distrito Federal. «Recurso de Revisión Recurrente.» *Instituto de Acceso a la Información Pública del Distrito Federal*. 15 de Mayo de 2007.
http://www.infodf.org.mx/pdfs/resoluciones/RECUR07/RR219_07.pdf (último acceso: 9 de Noviembre de 2009).
36. International Energy Agency . «Operating Anaerobic Digestion Plants of Commercial Scale.» *IEA Bioenergy*. 2008. http://www.iea-biogas.net/anlagelisten/Plantlist_08.pdf (último acceso: 18 de Enero de 2010).
37. Japan Society of Industrial Machinery Manufacturers. «Basic Incinerator.» *Japanese Advanced Environmental Equipment*. 2001.
http://www.gec.jp/JSIM_DATA/WASTE/WASTE_3/html/Doc_450.html (último acceso: 18 de Agosto de 2009).
38. Joshua Rapport, Ruihong Zhang, Bryan M. Jenkins, Robert B. Williams. *Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste*. Reporte del contratado al California Integrated Waste Management Board, Department of Biological and Agricultural

- Engineering, University of California, California Integrated Waste Management Board, Sacramento, CA: Publications Clearinghouse, 2008.
39. Karagiannidis, A., y G. Perkoulidis. «A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion.» *Bioresource Technology*, 2009: 2355–2360.
 40. Kreith, Frank, y George Tchobanoglous. *Handbook of solid waste management*. McGraw-Hill Professional, 2002.
 41. López Jardinez, Judith, entrevista de Norma Angélica Delgadillo Hernández. *Fucionamiento actual y planes a futuro para la planta de composta de Bordo Poniente*. D.F., (05 de Octubre de 2010).
 42. Martin, Hugh. «Agricultural Composting Basics.» *Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs of Ontario*. Marzo de 2005. <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/05-023.htm> (último acceso: 11 de Febrero de 2010).
 43. Muñoz Meza, Ing. Juan Manuel. «La disposición de RSU en la Ciudad de México.» *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. 15 de Octubre de 2008. http://www.giresol.org/joom1/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=306&Itemid=105 (último acceso: 9 de Noviembre de 2009).
 44. Murphy, J.D., E. McKeogh, y G. Kiely. «Technical/economic/environmental analysis of biogas utilisation.» *Applied Energy*, 2004: 407–427.
 45. Murphy, J.D., y E. McKeogh. «Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste.» *Renewable Energy*, 2004: 1043-1057.
 46. Pichtel, John. *Waste management practices: municipal, hazardous, and industrial*. CRC Press, 2005.
 47. Princeton University Blog Service. «Conversion of Biomass to Bio-Oil.» *Biomass Blog*. http://blogs.princeton.edu/chm333/f2006/biomass/bio_oil/02_chemistryprocessing_the_basics/02_processing/ (último acceso: 18 de Agosto de 2009).
 48. ProMéxico. «Costos Industriales en México 2008.» *ProMéxico*. 2008. http://www.promexico.gob.mx/work/sites/Promexico/resources/LocalContent/207/2/Costos_completo_2008.pdf (último acceso: 21 de Abril de 2010).
 49. Renewable Energy Association. «Benefits of AD.» *Renewable Energy Association*. 2007. <http://www.r-e-a.net/biofuels/biogas/anaerobic-digestion/benefits-of-ad> (último acceso: 25 de Agosto de 2009).
 50. RIS International. *Feasibility of generating green power through anaerobic digestion of garden refuse form the Sacramento area*. Sacramento: Advanced Renewable and Distributed Generation Program, 2005.
 51. Rodríguez Salinas, Marcos Arturo. «Manual de Compostaje Municipal.» *Instituto Nacional de Ecología*. 2006. <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/499/experiencias.html> (último acceso: 19 de Abril de 2010).
 52. RWBeck. *Anaerobic Digestion Feasibility Study*. Iowa: Bluestem Solid Waste Agency, 2004.

53. Sabino, Irma, Porfirio Caballero, Martín Bremer, y Alberto Mendoza. «Evaluación técnica de la factibilidad de aprovechamiento energético de RSM en México.» *Instituto de Investigaciones Eléctricas*. 2004. <http://genc.iie.org.mx/genc/biomasa/segundo%20coloquio/Incineraci%C3%B3n%20y%20gasificaci%C3%B3n%20de%20basura/Irma%20Sabino.pdf> (último acceso: 10 de Julio de 2010).
54. Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal. «Cómo y por qué separar la basura.» *Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal*. <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/02/03clave.pdf> (último acceso: 17 de Octubre de 2009).
55. —. «Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2008.» *Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal*. 2008. <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario-08/5-resultados.pdf> (último acceso: 14 de Enero de 2010).
56. —. «Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2006.» *Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal*. 2006. http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario_residuos_solidos.pdf (último acceso: 6 de Noviembre de 2009).
57. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. «http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM%20081%20ECOL_1994_DOF.pdf.» *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. 22 de Junio de 1994. http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM%20081%20ECOL_1994_DOF.pdf (último acceso: 18 de Enero de 2010).
58. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. «Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2007.» *Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal*. 2007. <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario/resultados.pdf> (último acceso: 26 de Julio de 2009).
59. —. «Programa de Capacitación para promotores de la separación de residuos sólidos en el Distrito Federal.» *Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal*. <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/02/04clave.pdf> (último acceso: 2 de Septiembre de 2009).
60. —. «Programa de gestión integral de los residuos sólidos para el Distrito Federal.» *Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal*. 1 de octubre de 2004. http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/programa_gestion_residuos_solidos_df_2004_2008.pdf (último acceso: 3 de Abril de 2011).
61. Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. «Inventario de Emisiones, Gases de Efecto Invernadero.» *Secretaría del Medio Ambiente*. 2008. <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=528> (último acceso: 31 de Julio de 2010).
62. Sherman, Rhonda. «Large-Scale organic materials composting.» *North Carolina Department of Environment and Natural Resources*. 30 de Agosto de 2006. <http://www.p2pays.org/ref/02/01372.pdf> (último acceso: 14 de Abril de 2010).
63. Spencer, Robert L. «What's new - in-vessel composting.» (BioCycle) 48, n° 5 (2007).

64. Sustainability in Industry, Energy and Transport European IPPC Bureau. «Additional Information submitted during the information exchange on Waste Treatments Industries.» *Joint Research Center*. Octubre de 2005. ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/wt_AddInfo_1005.pdf (último acceso: 23 de Abril de 2010).
65. The National Biodiesel Board . «NBB Member Plants.» *The National Biodiesel Board* . 1 de Enero de 2011. <http://www.biodiesel.org/buyingbiodiesel/plants/showall.aspx> (último acceso: 1 de Enero de 2011).
66. The Walt Disney Company . «Disneyland Resort Wins California's Top Environmental Leadership Award.» *The Walt Disney Company*. 2009. http://corporate.disney.go.com/corporate/moreinfo/dlr_environmental_award.html (último acceso: 9 de Enero de 2010).
67. Verma, ShefaliI. «Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes.» Tesis para obtener un Master of Science Degree in Earth Resources Engineering, Department of Earth & Environmental Engineering, Columbia University, 2002.
68. Vidales Olivo, Amelia, Virginia Chávez Santillán, Erika Anahy García Rodríguez, y María Teresa Gómez García. «Alimentos balanceados para animales a partir de residuos orgánicos.» *Conciencia Tecnológica* 26 (2004).
69. Williams, Robert B. «Biofuels from Municipal Wastes.» *The California Biomass Collaborative*. 28 de Marzo de 2007. http://biomass.ucdavis.edu/materials/reports%20and%20publications/2007/2007_Annual_Forum_Background_Paper.pdf (último acceso: 21 de Enero de 2010).
70. X-rates. «2008 - American Dollars to 1 Euro.» *X-rates*. 2010. <http://www.x-rates.com/d/USD/EUR/hist2008.html> (último acceso: 13 de Abril de 2010).
71. Yong, Xiao, y Zeng Guang-Ming. «Continuous thermophilic composting (CTC) for rapid biodegradation.» *Bioresource Technology*, 2009: 4807–4813.

Anexo I. Generación de Energía con Biogás

Para calcular la energía que se genera por tonelada de FORSU, se utilizaron los mismos parámetros que RWBeck y Bluestem Solid Waste Agency, en su estudio de viabilidad de digestión anaerobia (RWBeck 2004).

- El biogás tiene un contenido energético de 6.2 kWh/m³
- La eficiencia de generación de energía eléctrica es de 35%

En seguida se presenta la tabla 22 con la generación de energía eléctrica por medio de Biogás.

Tabla 22. Generación de energía eléctrica con Biogás

| Característica | Sistemas húmedos de una etapa | Sistemas secos de una etapa | Sistemas multietapa |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Biogás (m ³ /t) | 125 | 123 | 135 |
| Energía (kWh/t) | 776 | 765 | 838 |
| Energía Eléctrica (kWh/t) | 271 | 268 | 293 |

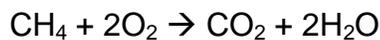
Anexo II. Emisiones de gases de efecto invernadero

Para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas de digestión anaerobia, se consideró lo siguiente:

- Se emite el 6.3% del biogás generado en los sistemas de digestión anaerobia (Murphy y McKeogh, Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste 2004) a
- La composición del biogás es 55.5% CH₄, 44.5% CO₂
- El biogás que no se emite a la atmósfera es quemado para producir energía (93.7%)
- El potencial de calentamiento global (PCG) del metano es 21 veces el del dióxido de carbono
- Por cada kWh de energía eléctrica que se produce, se ahorran 1.01 kg eq CO₂(Brown, Kruger y Subler 2008).

Con estas consideraciones, se puede encontrar lo siguiente:

Combustión de biogás



1 mol de metano
carbono

Peso molecular: 16

1 kg CH₄

1 mol de dióxido de

Peso molecular: 44

2.75 kg CO₂

Densidad del metano 0.714 kg/m³, el biogás contiene 55.5% de metano

1m³ CH₄

0.714 kg CH₄

0.555 m³ CH₄

0.714 kg CH₄

1.96 kg CO₂

1.09 kg CO₂

Densidad del dióxido de carbono 1.96 kg/m³, el biogás contiene 44.5% de dióxido de carbono

| | |
|--------------------------------------|-------------------------|
| 1m ³ CO ₂ | 1.96 kg CO ₂ |
| 0.445 m ³ CO ₂ | 0.87 kg CO ₂ |

Emisiones de biogás

| | |
|---|---|
| 55.5% CH ₄ | 0.396 kgCH ₄ /m ³ |
| PCG de CH ₄ =21 PCG de CO ₂ | 8.32 kg CO ₂ /m ³ |
| 44.5% CO ₂ | 0.87 kg CO ₂ /m ³ |

Combustión de 0.937 m³ de biogás: 1.84 kg CO₂

Disipación de 0.063 m³ de biogás: 0.58 kg CO₂

Emisiones por m³ de biogás producido: 2.42 kg CO₂

A continuación se muestra en la tabla 23, los equivalentes de CO₂ para los sistemas de digestión anaerobia.

Tabla 23. Equivalencias de CO₂ para sistemas de Digestión Anaerobia

| Característica | Sistemas húmedos de una etapa | Sistemas secos de una etapa | Sistemas multietapa |
|---|-------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Biogás (m ³ /t) | 125 | 123 | 135 |
| Energía producida (kWh/t) | 271 | 268 | 293 |
| Gases de efecto invernadero (kg CO ₂ /t) | 28 | 28 | 30 |

Para el caso del compostaje, se consideró lo siguiente en la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero:

- 1.5% del nitrógeno inicial en la FORSU se convierte en N₂O(Brown, Kruger y Subler 2008)

- 2.5% del carbono inicial en la FORSU se convierte en CH₄(Brown, Kruger y Subler 2008)
- Los residuos sólidos del D.F contienen 23.6% de carbono y 0.82% de nitrógeno(Fondo Mixto CONACyT - GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL 2009)(Fondo Mixto CONACyT - GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL 2009)(Fondo Mixto CONACyT - GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL 2009)
- El PCG del N₂O es 320 veces el del CO₂
- Por cada kWh de energía que se utiliza, se emiten 1.01 kg CO₂ equivalentes(Brown, Kruger y Subler 2008).
- La diferencia entre el compostaje abierto, y el cerrado, consiste en la energía que se utiliza. Para el compostaje abierto, se utilizan 3.75 kWh/t y para el cerrado 29.79 kWh/t.

La tabla 24 tiene los equivalentes de CO₂ para los sistemas de compostaje.

Tabla 24. Equivalencias de CO₂ para sistemas de Compostaje

| Característica | Compostaje Abierto | Compostaje Cerrado |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Energía Consumida (kWh/t) | 24.38 | 29.79 |
| CH ₄ (kg/t) | 7.88 | 7.88 |
| NO ₂ (kg/t) | 0.40 | 0.40 |
| Total GEI (kg CO ₂ /t) | 319 | 325 |

Anexo III. Consideraciones para calcular el costo de operación de plantas de digestión anaerobia

Para calcular el costo de operación de plantas de digestión anaerobia, se utilizaron las consideraciones de RWBeck en su estudio de factibilidad de digestión anaerobia (RWBeck 2004). Estas son las siguientes:

- Se necesitan \$3/t para el procesamiento de biosólidos.
- Para la operación y mantenimiento de la planta de producción de energía eléctrica a partir de biogás, se necesitan ¢1.25/kWh.
- Para la operación y mantenimiento de la planta de digestión anaerobia, se necesitan 2.25% del costo de inversión.
- Se debe incluir \$3.56/t, para salarios del personal de la planta.

Cabe mencionar que todos los valores se actualizaron a dólares de enero de 2010 con el índice ENRCCI(Engineering News Record 2004). Se presenta en seguida el resumen de los cálculos realizados en la tabla 25.

Tabla 25. Resumen de los cálculos de costo de operación de plantas de digestión anaerobia

| Característica | Sistemas húmedos de una etapa | Sistemas secos de una etapa | Sistemas multietapa |
|---|-------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Energía (kWh/t) | 546.25 | 538.97 | 589.95 |
| Composta (kg/t) | 300.00 | 276.67 | 280.00 |
| Costo de Instalación (dólares 2010/tpd) | 85102.63 | 213126.83 | 179181.82 |
| Operación de planta de digestión anaerobia (\$/t) | 5.25 | 13.14 | 11.05 |
| Operación de planta de energía (\$/t) | 6.83 | 6.74 | 7.37 |
| Procesamiento de biosólidos (\$/t) | 0.90 | 0.83 | 0.84 |
| Pago a trabajadores (\$/t) | 3.56 | 3.56 | 3.56 |
| Total (\$ 2004/t) | 17 | 24 | 23 |
| Total (\$ 2010/t) | 20 | 30 | 28 |

Anexo IV. Cálculo del Valor Presente Neto y la Tasa Interna de Retorno

Para calcular el valor presente neto y la tasa interna de retorno, se visualizaron los ingresos y egresos que presenta cada sistema comercial durante la vida de la planta. En seguida se ejemplifican en el diagrama 13 los ingresos y egresos considerados:

Diagrama 16. Ingresos y egresos de la planta de tratamiento

| Ingresos | <input type="checkbox"/> Venta de productos | <input type="checkbox"/> Venta de productos | <input type="checkbox"/> Venta de productos | <input type="checkbox"/> Venta de productos | <input type="checkbox"/> Venta de productos |
|----------|---|---|---|---|---|
| Año | 1 | 2 | 3 | ... | 20 |
| Egresos | <input type="checkbox"/> Costo del terreno | <input type="checkbox"/> Costo de operación |
| | <input type="checkbox"/> Costo de instalación | | | | |
| | <input type="checkbox"/> Costo de operación | | | | |

Los costos se calcularon para una planta que procesa 500 t/d de FORSU, y se consideraron los siguientes aspectos:

- Para la venta de productos, solamente se tomó en cuenta la energía eléctrica generada, ya que la composta no tiene un mercado asegurado en el Distrito Federal. Actualmente, la composta que se genera de residuos sólidos en el D.F. se regala. El precio de la energía eléctrica es de $\phi 27/\text{kWh}$ (Comisión Federal de Electricidad 2010).
- El costo promedio del terreno en el Distrito Federal es de $\$1.72 / \text{m}^2$ (ProMéxico 2008):

Con estos datos, se tienen los costos de operación presentados en la tabla 26.

Tabla 26. Cálculos de costo de operación para plantas de compostaje

| | Sistemas húmedos de una etapa | Sistemas secos de una etapa | Sistemas multietapa | Compostaje Abierto | Compostaje Cerrado |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Costo de operación (\$/t) | 3,681,844 | 5,403,821 | 5,081,914 | 1,642,500 | 5,292,500 |
| Costo de instalación (\$/tpd) | 42,551,316 | 79,504,164 | 89,590,909 | 10,011,750 | 25,029,750 |
| Costo de terreno (\$) | 78,514 | 91,700 | 45,754 | 177,964 | 115,153 |
| Ganancias (\$/t) | 13,396,418 | 13,217,799 | 14,468,131 | 0 | 0 |

Posteriormente, se calculó el VPN y la TIR en Excel, con una tasa del 12%.