



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**PRE-FACTIBILIDAD DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA EL TRATAMIENTO DE  
RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS MUNICIPALES PARA LA  
OBTENCIÓN DE BIOGÁS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**WILLIAMS ALLAN FIGUEROA DIEZ DE BONILLA**



**MÉXICO, D.F.**

**2015**



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: ISAÍAS ALEJANDRO ANAYA Y DURAND**

**VOCAL: Profesor: ALFONSO DURÁN MORENO**

**SECRETARIO: Profesor: JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO**

**1er. SUPLENTE: Profesor: FEDERICO CARLOS HERNÁNDEZ  
CHAVARRÍA**

**2° SUPLENTE: Profesor: LUIS ÁNGEL MORENO AVENDAÑO**

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**TORRE DE INGENIERÍA. 3ER PISO, ALA SUR, CIUDAD UNIVERSITARIA**

## **ASESOR DEL TEMA:**

**Dr. Alfonso Durán Moreno**

## **SUSTENTANTE:**

**Williams Allan Figueroa Diez de Bonilla**

## ÍNDICE

1.	RESUMEN.....	2
2.	INTRODUCCIÓN .....	3
2.1	PROBLEMÁTICA .....	5
2.2	JUSTIFICACIÓN .....	5
2.3	OBJETIVO GENERAL .....	6
2.4	OBJETIVOS PARTICULARES.....	6
2.5	ALCANCES.....	6
2.6	METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	7
3.	ANTECEDENTES.....	7
3.1	RESIDUOS SÓLIDOS ORGANICOS MUNICIPALES EN MÉXICO.....	9
3.1.1	Política ambiental .....	9
3.1.2	Generación de residuos sólidos urbanos en el Distrito Federal.....	11
3.1.3	Costos de la gestión de los RSM en el Distrito Federal.....	14
3.2	DIGESTIÓN ANEROBIA .....	18
3.2.1	Descripción del proceso .....	18
3.3	TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE RSOM.....	21
3.3.1	Tratamientos físicos.....	22
3.3.2	Procesos de reutilización (reciclado y recuperación).....	22
3.3.3	Eliminación en rellenos sanitarios.....	23
3.3.4	Tratamientos químicos .....	25
3.3.5	Tratamiento Térmico: Incineración .....	25
3.3.6	Tratamientos biológicos.....	26
3.3.7	Compostaje .....	26

3.4	ESTRATEGIAS DE EVALUACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN Y OPERACIÓN DE UNA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA. ....	27
3.4.1	Estimación de orden de magnitud .....	41
4.	MODELO DE NEGOCIO: ECOPARC DE BARCELONA S.A. ....	44
5.	PROPUESTA A NIVEL DE PREFACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RSOM EN BORDO PONIENTE.....	48
5.1	BASE DE DISEÑO.....	48
5.2	ESTUDIO DE MERCADO .....	53
5.2.1	BIOGÁS.....	53
5.2.2	COMPOSTA.....	56
5.2.3	BONOS DE CARBONO.....	58
5.3	CAPACIDAD .....	59
5.4	TECNOLOGÍA.....	59
5.5	LISTA DE EQUIPOS PRINCIPALES .....	61
5.6	LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA.....	63
5.7	ANÁLISIS COSTO BENEFICIO .....	64
5.7.1	Gastos .....	65
5.7.2	Ingresos.....	65
5.7.3	VPN, TIR y TRI.....	66
5.8	CONSTRUCCIÓN.....	67
5.9	NORMATIVA.....	68
6.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	70
6.1	SOCIAL.....	70

6.2	TÉCNICO .....	70
6.3	AMBIENTAL.....	70
6.4	ECONÓMICO.....	70
6.5	EJECUCIÓN DEL PROYECTO.....	71
7.	CONCLUSIONES .....	73
8.	REFERENCIAS .....	74
9.	ANEXOS.....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Costo de inversión. Fuente: Knoten Weimar (2009).....	<b>29</b>
Tabla 2.	Estimado de inversión y operación mínimo y máximo para planta de tratamiento de 1 000 toneladas diarias. ....	<b>31</b>
Tabla 3.	Costo de inversión y operación de una planta de DA.....	<b>36</b>
Tabla 4.	Resumen de costos. Creación propia a partir de la diapositiva de la presentación de Raibley.....	<b>37</b>
Tabla 5.	Estimado de inversión y operación (MXN), mínimo y máximo para un planta de tratamiento de DA.....	<b>37</b>
Tabla 6.	Costo de inversión y operación de una planta de DA.....	<b>41</b>
Tabla 7.	Orden de magnitud de la construcción de una planta de DA .....	<b>42</b>
Tabla 8.	Entradas del 2012. Fuente: Ecoparc de Barcelona S.A. ....	<b>45</b>
Tabla 9.	Salidas del 2012.....	<b>46</b>
Tabla 10.	Resumen generación e. eléctrica a partir del biogás.....	<b>55</b>
Tabla 11.	Ingresos a la planta de DA por concepto de energía eléctrica de “media” y “baja”. ....	<b>56</b>
Tabla 12.	Ingresos a la planta de DA por concepto de venta de composta. ....	<b>57</b>
Tabla 13.	Generación económica de flujo de efectivo generado por Bonos de carbono. ....	<b>58</b>
Tabla 14.	Composición de RSOM en el DF. Fuente: CONACyT-FORDECyT 174710 (2013).....	<b>59</b>
Tabla 15.	Caracterización fisicoquímica de RSOM en el DF. Fuente: CONACyT-FORDECyT 174710 (2013).....	<b>60</b>
Tabla 16.	Resumen de ingresos anuales.....	<b>65</b>
Tabla 17.	Resumen de ingresos anuales (GDF).....	<b>66</b>

Tabla 18.	VPN, TIR y TRI con ingresos de e. eléctrica y composta.....	<b>66</b>
Tabla 19.	VPN, TIR y TRI con ingresos de e. eléctrica, composta y presupuesto del GDF.....	<b>67</b>
Tabla 20.	Comparativa del proyecto. ....	<b>72</b>
Tabla 21.	Conclusiones de viabilidad económica para realizar el proyecto. ....	<b>73</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Generación de residuos sólidos por delegación política. Fuente: SEDESOL, 2012. ....	<b>12</b>
Figura 2.	Ubicación de sitios de disposición final. Fuente: SEDESOL. ....	<b>13</b>
Figura 3.	Esquema general del proceso de DA. Fuente: Departament of Energy and Climate Change, 2011.....	<b>19</b>
Figura 4.	Costo de inversión vs capacidad. Realización propia a partir de los datos de la Tabla 1.....	<b>29</b>
Figura 5.	Costo de operación vs capacidad. Realización propia a partir de los datos de la Tabla 1.....	<b>30</b>
Figura 6.	Gráfica, costo de inversión ( $\times 10^6$ CAD) vs capacidad ( $\times 10^3$ t/año) para una planta de DA (Raibley, 2012). ....	<b>34</b>
Figura 7.	Gráfica, costo de operación (CAD/t) vs capacidad ( $\times 10^3$ t/año) para una planta de DA (Raibley, 2012). ....	<b>34</b>
Figura 8.	Costo de inversión. Realización propia a partir de la función dada por Raibley. ....	<b>35</b>
Figura 9.	Costo de operación. Realización propia a partir de la función dada por Raibley. ....	<b>36</b>
Figura 10.	Costo de inversión vs capacidad. Realización propia a partir de la función dada por Tsilemou (2006).....	<b>40</b>

Figura 11.	Costo de operación vs capacidad. Realización propia a partir de la función dada por Tsilemou (2006).....	<b>40</b>
Figura 12.	Costos de inversión de planta de DA de 365 000 t/año. Creación propia a partir de datos obtenidos en la investigación bibliográfica. ....	<b>41</b>
Figura 13.	Equivalencias del poder calorífico del biogás frente a otras fuentes de combustión. Fuente: IDEA, 2007.....	<b>54</b>
Figura 14.	Arreglo general de una planta de DA. Fuente: Agencia de residuos de Cataluña, 2009.....	<b>62</b>
Figura 15.	Localización de la planta. Fuente: Google maps, 2014.....	<b>63</b>

## **ANEXOS**

ANEXO I.	ANTECEDENTES DE NORMATIVA EN MÉXICO.....	77
ANEXO II.	METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL CÁLCULO DE COSTO DE UN CAMBIO DE MONEDA Y REGIÓN A PESOS MEXICANOS EN MÉXICO.....	80
ANEXO III.	REGLA DE LOS SEIS DÉCIMOS.....	82
ANEXO IV.	PLANTAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN EL MUNDO.....	83

## **GLOSARIO DE SIGLAS**

BANCOMEXT	Banco Nacional de Comercio Exterior, S.N.C.
BANXICO	Banco de México
CONACyT	Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología
DA	Digestión Anaerobia
DOF	Diario Oficial de la Federación
FIRCO	Fideicomiso de riesgo compartido
FORDECyT	Fondo institucional de fomento regional para el desarrollo científico tecnológico y de innovación
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental
LPGGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
MXN	Pesos mexicanos
NADF	Norma ambiental para el Distrito Federal
NOM	Norma Oficial Mexicana
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Medio Ambiente
RSM	Residuos Sólidos Municipales
RSOM	Residuos Sólidos Orgánicos Municipales
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
USD	Dólar estadounidense (1USD = 14.9 MXN)

## **1. RESUMEN**

En este trabajo, se realizó la investigación sobre la posibilidad de la construcción de una planta municipal, para el tratamiento de mil toneladas diarias de residuos sólidos orgánicos municipales generados en el Distrito Federal por medio de la digestión anaerobia como tecnología con el aprovechamiento, valorización y disposición de éstos, obteniendo como beneficios la generación de biogás para utilizarlo como combustible de motogeneradores para generar energía eléctrica y como subproducto composta para su uso como mejorador de suelos, la cual puede tener un aprovechamiento por programas del gobierno y/o venta. Esto, por medio de un estudio a nivel de prefactibilidad sobre los costos de inversión inicial y operación anual a partir de fuentes encontradas, así como los ingresos generados por la venta de energía eléctrica, venta de composta y los beneficios en bonos de carbono que se generarían.

El resultado del presente, se obtuvieron casos en donde no es viable económicamente el proyecto y un caso a partir del cual se determinó su viabilidad. También realizó el análisis del proyecto, desde los aspectos social, técnico, ambiental y un análisis comparativo entre realizar el proyecto y seguir usando la gestión de RSOM actual en el DF.

## **2. INTRODUCCIÓN**

La ingeniería ambiental, es una disciplina que busca el desarrollo sustentable sin descuidar las cuestiones vinculadas a la ecología, la economía y los temas sociales.

El desarrollo de nuevos proyectos vinculados a la solución de problemas ambientales implica hacer una investigación de todos los factores que involucran el proyecto así como también los aspectos legales, los diferentes procesos o técnicas para llevarlo a cabo, la posibilidad de ser adaptado a la región, la disponibilidad de los insumos, la aceptación de los futuros usuarios, el beneficio que se tendrá, entre otros aspectos.

Para determinar si un proyecto es factible, es necesario llevar a cabo varias etapas con el fin de minimizar los riesgos y poder tomar una decisión, teniendo en cuenta todas las variables involucradas (o la mayoría según la etapa del proyecto), ya que el realizarlo sin tomar en cuenta estas etapas puede llevar a pérdidas económicas, sociales o ambientales que perjudiquen a la gente involucrada por dicha inversión (inversionistas y sociedad).

Algunas variables que se deben tomar en cuenta son: la rentabilidad, el impacto a la sociedad, el impacto ambiental, el desarrollo sustentable, la tecnología a usar, ubicación geográfica, costos de traslado, insumos requeridos, legislación, normativa, entre otras, así como los beneficios que genera dicha inversión, como lo es la infraestructura, reducción de olores, cultura en la población, generación de empleos, por mencionar algunos.

Para llegar a la etapa de inversión, es necesario la elaboración de algunos estudios con la finalidad de minimizar los riesgos de inversión, entre los que destacan:

- Estudio de mercado
- Estudio tecnológico
- Estudio financiero
- Estudio socioeconómico
- Estudio administrativo
- Estudio de impacto ambiental

Con estos estudios se pueden realizar los proyectos o programas de evaluación a nivel perfil, hacer una evaluación de prefactibilidad y posteriormente una evaluación de factibilidad con el fin de diseñar y realizar la ejecución del mismo. Teniendo en cuenta estos estudios y/o evaluaciones (del proyecto), se puede determinar si es o viable o factible llevar a cabo el proyecto (según sea el caso), con lo que se puede determinar seguir adelante con las etapas del proyecto o bien, tomar la decisión de invertir en éste. Es importante saber determinar en cualquier momento de las etapas del proyecto, si se necesita abandonarlo o postergarlo, y definir los motivos por los cuales se toma esa decisión.

Los problemas ambientales actuales generados en las grandes urbes implican emprender proyectos que les den una solución. Uno de ellos es la gran cantidad de generación de residuos poco aprovechados, los que provocan alteración del ecosistema.

Actualmente se está emprendiendo en América la construcción de plantas que traten la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos por un proceso de digestión anaerobia el cual consiste en degradar la materia en ausencia de oxígeno por microorganismos, obteniendo un gas que se puede aprovechar. En los continentes Europeo y Asiático existen plantas que funcionan perfectamente con esta tecnología y de las cuales obtienen productos que benefician a las poblaciones.

El presente, es una investigación sobre la evaluación a nivel de prefactibilidad, para la construcción de una planta de tratamiento por digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM).

## **2.1 PROBLEMÁTICA**

En México, no se tiene experiencia en la construcción de plantas de digestión anaerobia a nivel municipal para el tratamiento, valorización y disposición de los residuos sólidos orgánicos urbanos, por lo tanto hay muy poca información que respalde, promueva o apoye un proyecto para incentivar la construcción de una planta de estas características en el Distrito Federal.

## **2.2 JUSTIFICACIÓN**

Debido a la generación, manejo y/o disposición inadecuados de los residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM) en México (aproximadamente 52% del total de RSM<sup>1</sup>), es necesario implementar un plan de acción que tome en cuenta estos para mejorar el desarrollo sustentable propuesto en la *LGEPA*<sup>2</sup> y la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*<sup>3</sup>; así como para fomentar el *Plan Integral De Manejo de Residuos Sólidos 2013-2018*<sup>4</sup>, presentado por el Jefe de Gobierno de la Ciudad de México, el 16 de septiembre de 2013.

Con la debida disposición y tratamiento de los RSOM se fomenta una disminución de: emisión de gases de efecto invernadero (GEI), como bióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, sulfuro de hidrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COVs), como acetona, benceno, estireno, tolueno y tricloroetileno que generan malos olores y pueden ser peligrosos debido a su toxicidad o por su explosividad; así como la proliferación de fauna nociva y la transmisión de enfermedades causados por no tratarlos. También se reduce la acumulación de los RSOM en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto que son la principal causa de la generación de los contaminantes ya mencionados. Simultáneo al estudio de prefactibilidad, por ende se logra un avance en la información sobre la digestión anaerobia y así poder implementarla como opción en el manejo y disposición de RSOM en México, principalmente en zonas densamente pobladas.

---

<sup>1</sup> INEGI, 2011

<sup>2</sup> DOF, 1998

<sup>3</sup> DOF, 2003

<sup>4</sup> Sitio web del Distrito Federal "obras en mi ciudad"

### **2.3 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio a nivel de prefactibilidad de la construcción de una planta de digestión anaerobia que trate y valore mil toneladas diarias de residuos sólidos orgánicos municipales generados en el Distrito Federal, por medio de un análisis de información bibliográfica, para determinar la viabilidad del proceso y su ejecución.

### **2.4 OBJETIVOS PARTICULARES**

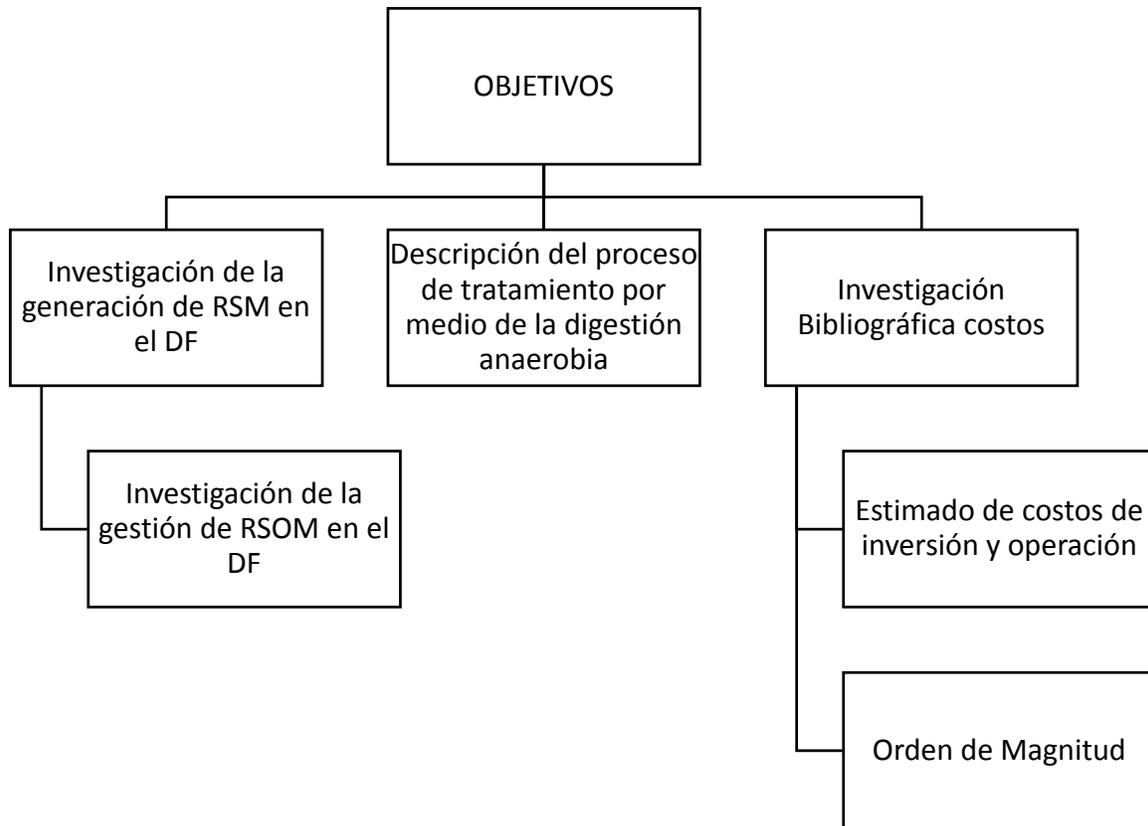
- Recopilar y analizar datos sobre la generación y gestión de los residuos sólidos orgánicos municipales en el Distrito Federal,
- Realizar un estudio a nivel de prefactibilidad para la construcción de una planta de digestión anaerobia para el tratamiento por medio de una investigación bibliográfica de los costos de construcción, operación y mantenimiento,
- Determinar la viabilidad de la construcción de una planta de digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM) para la obtención de biogás; así como el orden de magnitud correspondiente de la construcción.

### **2.5 ALCANCES**

Realizar una propuesta de un estudio a nivel de prefactibilidad para la construcción de una planta de tratamiento de RSOM usando como tecnología la digestión anaerobia.

No se busca resolver aspectos relacionados con el proceso de la digestión anaerobia; ya que sería tema de otros trabajos; no obstante, serán mencionados para tener una referencia sobre estos.

## 2.6 METODOLOGÍA DE TRABAJO



## 3. ANTECEDENTES

Para un mejor entendimiento de lo que conlleva un estudio a nivel de prefactibilidad, cito la definición de éste, tomada de los *“Lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión”*, emitido en el DOF en diciembre de 2013:

La preparación de Proyectos, es el proceso que permite establecer los estudios de viabilidad técnica, económica, financiera, social, ambiental y legal con el objetivo de reunir información para la elaboración del flujo de caja del proyecto, para tal efecto las entidades ejecutoras de proyectos deben realizar el estudio de prefactibilidad en sus proyectos de inversión, para la realización del mismo se deben aplicar metodologías de preparación y evaluación de proyectos.

El estudio de Prefactibilidad comprende el análisis Técnico – Económico de las alternativas de inversión que dan solución al problema planteado. Los objetivos de la prefactibilidad se cumplirán a través de la preparación y evaluación de proyectos que permitan reducir los márgenes de incertidumbre a través de la estimación de los indicadores de rentabilidad socioeconómica y privada que apoyan la toma de decisiones de inversión. La fuente de información debe provenir de otra secundaria.

El estudio de prefactibilidad debe concentrarse en la identificación de alternativas y en el análisis técnico de las mismas, el cual debe ser incremental. Es decir, debe realizarse comparando la situación "con proyecto" con la situación "sin proyecto". El estudio de prefactibilidad debe tener como mínimo los siguientes aspectos:

- El diagnóstico de la situación actual, que identifique el problema a solucionar con el proyecto. Para este efecto, debe incluir el análisis de la oferta y demanda del bien o servicio que se pretende realizar.
- La identificación de la situación “Sin proyecto” que consiste en establecer lo que pasaría en caso de no ejecutarlo. Considerando la mejor utilización de los recursos disponibles.
- El análisis técnico de la ingeniería del proyecto de las alternativas técnicas que permitan determinar los costos de inversión, operación y mantenimiento. .
- El tamaño del proyecto que permita determinar su capacidad instalada.
- La localización del proyecto, que incluye el análisis del aprovisionamiento y consumo de los insumos, así como la distribución de los productos.
- El análisis de la legislación vigente aplicable al proyecto en temas específicos como contaminación ambiental y eliminación de desechos.

Es necesario realizar una ficha ambiental, la cual contenga lo siguiente:

- La evaluación socioeconómica del proyecto que permita determinar la conveniencia de su ejecución y que incorpora los costos ambientales generados por las externalidades consistentes con la ficha ambiental.

- La evaluación financiera privada del proyecto sin financiamiento que permita determinar su sostenibilidad operativa.
- El análisis de sensibilidad y/o riesgo, cuando corresponda, de las variables que inciden directamente en la rentabilidad de las alternativas consideradas más convenientes.
- Las conclusiones del estudio que permitan recomendar alguna de las siguientes decisiones:
  - Postergar el proyecto.
  - Reformular el proyecto.
  - Abandonar el proyecto.
  - Continuar su estudio a nivel de factibilidad.

### **3.1 RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS MUNICIPALES EN MÉXICO**

#### **3.1.1 Política ambiental**

En nuestro país, el manejo de los residuos sólidos urbanos<sup>5</sup> (RSU) es un servicio que está a cargo de los municipios y delegaciones del país, como lo establecen los artículos 115 y 122 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, respectivamente. Dichos servicios deben ser proporcionados en todas las zonas urbanas y rurales del territorio, y pueden ser gestionados directamente por los propios ayuntamientos o indirectamente a través de otras entidades jurídicas, privadas o públicas (Censo Nacional de Gobierno, 2011).

La *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente* establece en su artículo 109 BIS que la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, deberán integrar un registro de emisiones y transferencia de contaminantes al aire, agua, suelo y subsuelo, materiales y residuos de su competencia; así como de aquellas sustancias que determine la autoridad correspondiente.

---

<sup>5</sup> Antes residuos sólidos municipales (RSM); Descrito en las definiciones de la LGPGIR (DOF, 2003)

La *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* en su artículo 39, menciona que “Las autoridades de los tres órdenes de gobierno, elaborarán, actualizarán y difundirán los inventarios de generación de residuos peligrosos, residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial, de acuerdo con sus atribuciones respectivas, para lo cual se basarán en los datos que les sean proporcionados por los generadores y las empresas de servicios de manejo de residuos, conforme a lo dispuesto en la presente Ley y en los ordenamientos jurídicos que de ella deriven”.

De la misma manera, la *Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal*, en su artículo 9, fracción XXXVIII, segundo párrafo, señala que “La Secretaría debe integrar el registro de emisiones y transferencia de contaminantes al aire, agua, suelo y subsuelo, materiales y residuos de su competencia, así como de aquellas sustancias que determine la autoridad correspondiente, cuya información se integrará con los datos e información contenida en las autorizaciones, cédulas, informes, reportes, licencias, permisos, y concesiones en materia ambiental que se tramiten ante la Secretaría o autoridades competentes del Distrito Federal y sus demarcaciones territoriales”.

Asimismo, la *Ley de Residuos Sólidos* del Distrito Federal, en su artículo 6, fracciones V y VI, refiere que corresponde a la Secretaría del Medio Ambiente “integrar un inventario de los residuos sólidos y sus fuentes generadoras, en coordinación con la Secretaría de Obras y Servicios y las Delegaciones”, así como, “difundir en materia ambiental, los asuntos derivados de la generación y manejo de los residuos”. Esta obligación se fortalece al reiterarse, en los artículos 19 y 27 de la misma Ley, que “las autoridades sistematizarán y pondrán a disposición del público la información vinculada a la generación y manejo integral de los residuos sólidos” y la Secretaría “elaborará y mantendrá actualizado un inventario que contenga la clasificación de los residuos y sus tipos de fuentes generadoras, con la finalidad de orientar la toma de decisiones tendientes a la prevención, control y minimización de dicha generación”.

La dimensión que alcanza la generación de residuos sólidos urbanos y el incremento de las preocupaciones por el impacto que esto tiene sobre el medio ambiente, ejerce una presión para que se proporcionen los servicios municipales de recolección, traslado, tratamiento y disposición adecuada de ellos (Censo Nacional de Gobierno, 2011).

Actualmente, cada entidad es responsable de la recolección de los RSU generados en sus comunidades, aunque no todas cuentan con este servicio (cerca del 7% (INEGI, 2011)). En el Distrito Federal una vez recolectados, los RSU son enviados a zonas de transferencia donde deben de separarse para su aprovechamiento o disposición, lamentablemente hay una carencia de cultura e infraestructura para ésto, por lo que existen muchos desperdicios con un mal tratamiento; así como sin el aprovechamiento (reciclaje) de los mismos. De la separación realizada, los desperdicios de los RSU (aquéllos que necesitan disposición) deberían de ser llevados a rellenos sanitarios para el cumplimiento de la normativa vigente, la cual plantea que no exista un impacto ambiental, pero debido a que muchos de los rellenos sanitarios no cumplen con la misma, son llevados a tiraderos a cielo abierto como medida para el “cumplimiento” con la sociedad.

Como consecuencia, es importante determinar las entidades que tienen una mayor generación de residuos, para así localizar posibles lugares (municipios o delegaciones) donde se pueda obtener de manera más accesible la fracción orgánica de los residuos urbanos (FORSU) para la implementación de plantas de manejo por digestión anaerobia simultáneamente las que tienen una generación menor, se pueden planear programas de separación, reciclaje y manejo de residuos acorde con el presupuesto definido a cada entidad y/o sus necesidades.

### **3.1.2 Generación de residuos sólidos urbanos en el Distrito Federal**

La generación de RSU en el Distrito Federal es de 12,740 toneladas por día. Las delegaciones que encabezan son: Iztapalapa, seguida por Gustavo A. Madero y Cuauhtémoc, con el segundo y tercer lugar respectivamente; en las que se concentra el 41.13% del total generado (SEDEMA, 2012).

En contraste, Milpa Alta es la delegación con menor generación de residuos sólidos, con el 0.9%. Cabe señalar que los desechos acumulados en la Central de Abasto se reportan independientemente de las delegaciones, dado que la cantidad supera el índice que a diario se originan en siete de las 16 delegaciones, representando el 4.6% del total generado (SEDEMA, 2012).

La Figura 1 muestra el total de los residuos sólidos urbanos generados por día en el DF, desglosado por delegaciones.

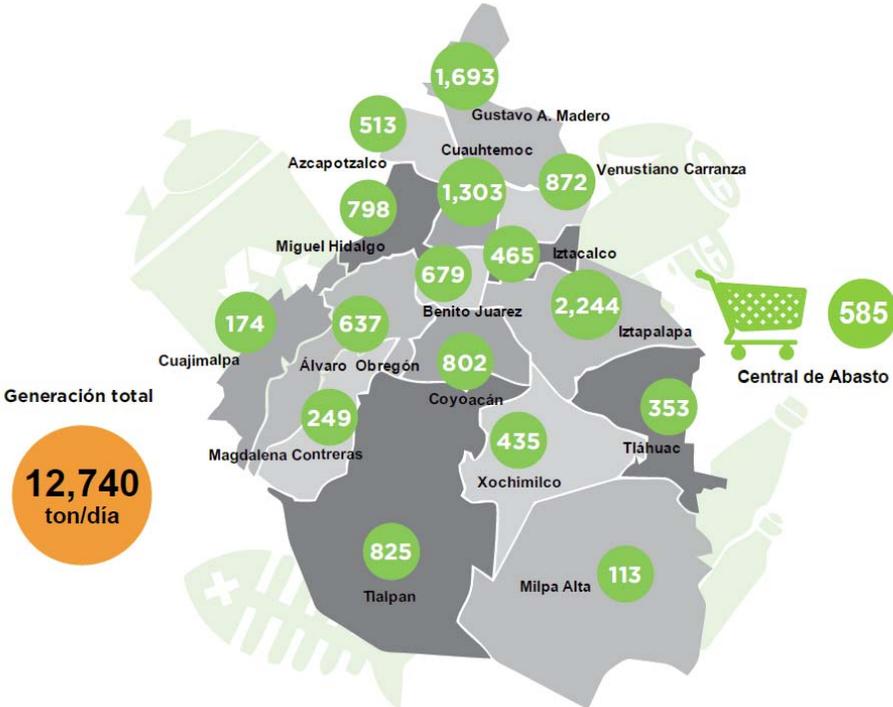


Figura 1. Generación de residuos sólidos por delegación política. Fuente: SEDESOL, 2012.

La cantidad de RSOM generados por cada delegación en el Distrito Federal se calcula basado en datos del INEGI, que reportan que el 52% de los RSU, son orgánicos (**6 625 ton/día**), los cuales son llevados a 13 estaciones de transferencia distribuidas en 12 de las delegaciones políticas, en donde se concentran los residuos sólidos provenientes de los servicios de recolección pública y privada.

Las plantas de selección se encuentran a un costado de la estación de transferencia de San Juan de Aragón y dentro de las instalaciones del sitio de disposición final



De los residuos captados en las estaciones de transferencia, el 30% se transporta directamente a la planta de composta para su posterior tratamiento, garantizando su aprovechamiento. El 32% se envía directo a disposición final, lo cual representa un potencial de aprovechamiento de los residuos sólidos con valor ambiental.

### **3.1.3 Costos de la gestión de los RSM en el Distrito Federal**

La situación que se tiene en México sobre la transparencia de los recursos no es muy clara, por lo que para este trabajo, se usaron noticias publicadas en diversos periódicos que circulan en México. Algunos datos que se pueden encontrar en medios electrónicos sobre los costos generados por la recolección, tratamiento y disposición de los residuos reflejan principalmente los costos que se usa del erario para la disposición de los RSOM.

En el sitio web de la SEDEMA, al responder la pregunta sobre *¿Cuánto cuesta deshacerse de la basura?*, responden, *“llevar la basura a un relleno sanitario en el Estado de México nos cuesta a las ciudadanas y los ciudadanos \$360 por tonelada, dinero mal empleado si consideramos que al cabo de algunos años esos rellenos serán una fuente de nuevos problemas ambientales”*. *“Cada año, nuestra ciudad destina 3 mil millones de pesos de nuestros impuestos al manejo de nuestros residuos. Estos recursos se emplean en el barrido, recolección, transporte, selección, compostaje y disposición final de los desechos”*.

En algunos periódicos, se encuentran también noticias relacionadas como las siguientes:

- El Economista (Méndez, 2012). *CUESTA 40% MÁS A GDF EL TRASLADO DE BASURA*. “Recolectar y llevar la basura de la ciudad de México a sitios de disposición final en el Estado de México le cuesta al gobierno local **40% más de lo que se destinaba cuando la basura terminaba en el relleno sanitario Bordo Poniente**, clausurado el 19 de diciembre del 2011, informó el coordinador de la Comisión para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos del Distrito Federal, Fernando Méndez”.

“La suma de los gastos totales de recolección y disposición final de la basura en tiempos del Bordo Poniente ascendía a **2,918 millones de pesos al año, precio que se incrementará 40%** debido a un mayor uso de transporte privado, así como el uso de gasolina para el traslado al Estado de México”.

“Detalló que los residuos sólidos se mandan a Ixtlahuaca, Ixtapaluca, Cuautitlán Izcalli y Tecámac. Este gasto **se pretende recuperar** una vez que la **planta de biogás** planeada para obtener energía de las emisiones generadas de la basura en Bordo Poniente comience a generar electricidad, lo que implicaría un ahorro “significativo” para la capital, indicó”.

“La construcción de esta planta se presentará luego de que el gobierno capitalino lance una **licitación internacional** para seleccionar a la empresa a quien será concesionada la obra y quien se encargará de la construcción de la misma. Además del biogás, la composta que llegue y se trate en el Bordo Poniente tiene mercados específicos en las que puede distribuirse, expuso el funcionario”.

“**Estos residuos pueden ser aprovechados** por la industria de la construcción, la jardinería privada, el sector agrícola, en el mantenimiento de parques, jardines, camellones de la ciudad o en las zonas montañosas que rodean al DF, suelos que al ser enriquecidos funcionarían mejor para recargar los mantos acuíferos”.

- El Universal (Fernández, 2012) publicó; *EDOMEX PAGA \$210 POR TONELADA DE BASURA EN EL MILAGRO*, donde se menciona “que los camiones cargados con desechos que utilicen la vía de peaje aumenta los costos de traslado de la basura. Los operadores de las unidades tienen que pagar **365 pesos de peaje de ida y otra cantidad similar de regreso** por utilizar la caseta de San Marcos Huixtoco para acceder al vertedero privado por la autopista México-Puebla”.
- El Universal (Robles, 2012). *EL GOBIERNO CAPITALINO LLEVA SU BASURA A CUAUTLA*. “El costo por el depósito por cada tonelada es de 140 pesos, en comparación con los **167 pesos que el GDF paga, por tonelada,**

a cada uno de los cuatro municipios donde traslada los residuos en el Estado de México”.

**“El GDF está trasladando cerca de cinco mil toneladas diarias a rellenos sanitarios fuera del DF, lo que ha significado una inversión de entre 400 a 500 millones de pesos”**

“Fernando Aboitiz precisó que se continúan utilizando los rellenos sanitarios de Xonacatlán, Cuautitlán Izcalli y dos en Ixtapaluca. Estimó que se envían **cuatro mil 600 toneladas de basura a la entidad mexiquense y 400 toneladas a Morelos**”.

- La jornada (Cruz, 2013). *PRESENTAN EL PLAN DE BASURA CERO EN EL DF*. “El Gobierno del Distrito Federal presentó ayer su Plan Integral de Manejo de Residuos Sólidos, con el que, se **pretende que sean reutilizadas las más de 12 mil toneladas de basura** que se generan diariamente en la ciudad de México y con esto prescindir de los rellenos sanitarios”.

“En el acto, el Ejecutivo local, Miguel Ángel Mancera Espinosa, señaló que con esta estrategia se pretende llegar al concepto de basura cero y que los residuos sólidos puedan servir para **generar energía eléctrica, material para construcción y composta**. Para lo anterior, explicó, **se utilizarán máquinas con tecnología japonesa y alemana**, de las cuales se contempla adquirir seis para el tratamiento de cascajo, con un esquema de cuidado del medio ambiente”.

“Asimismo, se contempla instalar **plantas de biodigestión y una de revalorización energética**, en las que se realizará la transformación de los residuos y se espera, dijo el jefe de Gobierno, que para 2015 estén consolidados los nuevos tratamientos de la basura”.

“Al respecto, el director de Servicios Urbanos de la Secretaría de Obras y Servicios, Rodrigo Atilano Carsi, indicó que **de esta manera se dejarán de depositar 7 mil 500 toneladas** de basura en las rellenos sanitarios de los estados de México y Morelos, **cuyo costo es de 280 pesos** por acarreo y depósito por tonelada de desechos”.

“Agregó que para esta estrategia **se requiere una inversión de más de 100 millones de euros** para la compra de maquinaria, como biodigestores, para lo cual se trabajará en un esquema de coinversión con la iniciativa privada”.

“Atilano Carsi explicó que el proceso consistirá en que **el gobierno de la ciudad pondrá los predios**, y la iniciativa privada, previa licitación, la tecnología. Inicialmente, dijo, **se contempla instalar tres centros de biodigestión** en las zonas centro, norte y sur de la ciudad.

- En el sitio web de la Agencia de Gestión Urbana de la Ciudad de México (AGU), se publicó una nota llamada *TONELADAS DE BASURA, MILLONES EN COSTO* (Monitoreo de medios, publicada en el periódico *máspormás*), donde se puede leer: “Trasladar la basura, ha costado 240 millones de pesos este año. Los costos de traslado varían. Según la dirección de Transferencia y Disposición Final, van de 82 pesos por tonelada de composta orgánica, hasta los 273 pesos si se llevan a Cuautla mediante un servicio contratado y en una caja de la empresa que presta el servicio”.

Así como mencionan que el destino final de los residuos (RSM) es en ocho puntos ubicados en DF, Estado de México y Morelos. La basura orgánica pasa por un proceso de selección, primero en el camión que la recoge en las casas, luego es llevada a los Centros de Transferencia delegacionales, donde se realiza una nueva separación antes de trasladarla a la Planta de Composta de Bordo Poniente Nezahualcóyotl.

Como reporta SEDEMA, el costo de disposición de cada tonelada de RSM es de \$360, considerando desde que se recoge en los domicilios hasta su llegada a los rellenos sanitarios. Si a esto le restamos el 40% que se menciona en uno de los artículos sobre el aumento por llevar los residuos fuera de bordo poniente, podemos decir que costaría \$220 aproximadamente por tonelada.

Robles (2012) reporta que se pagan \$140 por la disposición de cada tonelada, por lo que costaría \$80 el traslado y los restantes se podrían derogar para el mantenimiento de la planta una vez que esté operando. Como resultado, si se reportan **\$360 pesos por la disposición de cada tonelada** y de estos \$80 serían

del traslado, estamos hablando que más de 100 millones de pesos anuales podrían usarse para el sustentamiento de la planta de digestión anaerobia una vez puesta en operación.

### **3.2 DIGESTIÓN ANAEROBIA**

La digestión anaerobia<sup>6</sup> es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias y arqueas específicas, se descompone en un producto gaseoso llamado “biogás”.

La producción de biogás por descomposición anaerobia es un modo considerado útil para tratar residuos biodegradables, ya que produce un alto porcentaje de metano, por lo que es susceptible un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas; así como reduce las emisiones de gas de efecto invernadero, además de generar un digestato como efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico.

El producto de la DA es una mezcla gaseosa constituida por metano (CH<sub>4</sub>) en una proporción que oscila entre un 50% y un 70%, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S); también se obtiene un subproducto, el digestato, que es una mezcla de sustancias minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación (IDAE, 2007).

#### **3.2.1 Descripción del proceso**

La mayoría de los procesos industrializados de tecnología de la DA constan de tres etapas principales (Figura 3): pre-tratamiento, fermentación y el post-tratamiento; donde la energía generada por la producción del biogás es aprovechada *in situ* para las mismas necesidades del proceso y el remanente puede recibir un valor comerciable (Department of Energy and Climate Change, 2011).

---

<sup>6</sup> También conocida como Biometanización.

En el ANEXO IV se encuentra una lista de las diferentes plantas en el mundo y sus capacidades, año de construcción y datos reportados según cada empresa.

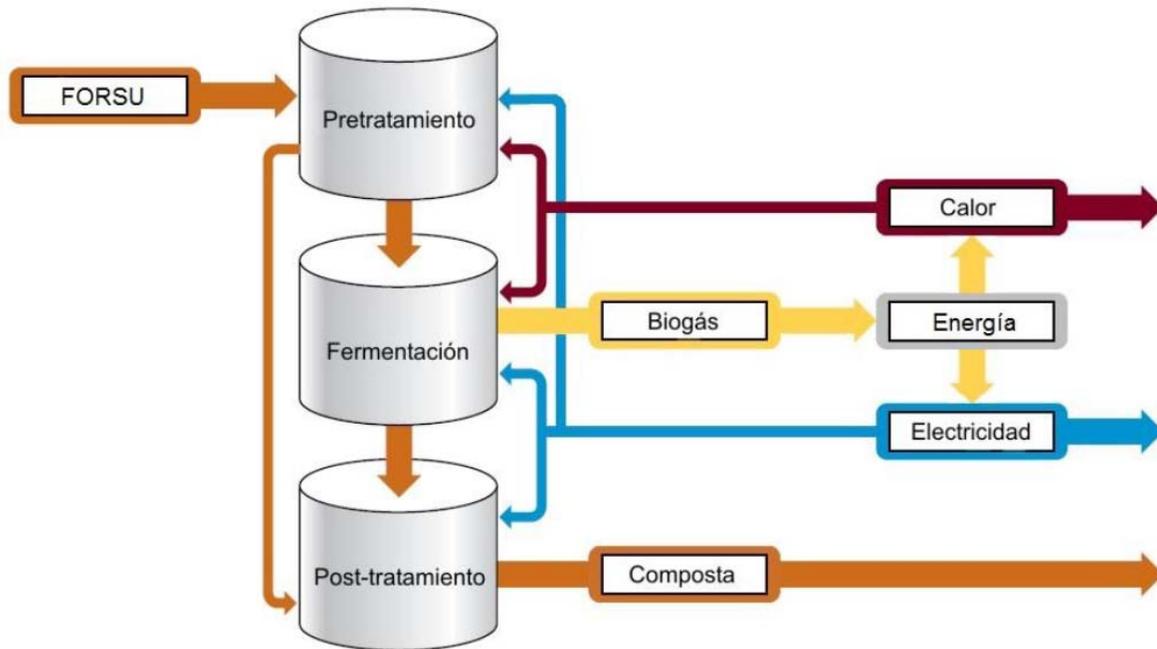


Figura 3. Esquema general del proceso de DA. Fuente: Department of Energy and Climate Change, 2011.

**PRE-TRATAMIENTO:** Esta sección involucra la separación de los materiales inertes y pesados que aún se pueden encontrar en los RSOM obteniendo la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), ésta se puede realizar de manera manual o automática agregando agua de proceso (de ser necesario) para formar una pulpa. Puede requerir un proceso de reducción de tamaño de partícula, mediante trituradores y mallas, mejorando la eficiencia del proceso (Palmowski y Müller, 2000). También existen procesos que involucren calor, reacciones químicas y enzimáticas para dar estabilidad, incrementar la producción y aumentar la conversión de residuos a biogás (Shieder y Schneider, 2000).

**FERMENTACIÓN (DIGESTIÓN ANAEROBIA):** Esta etapa del proceso es la principal; ya que es aquí donde se lleva a cabo la transformación de la materia (sustrato). Puede realizarse en una etapa o varias, a diferentes condiciones de

temperatura, en biodigestores o reactores (horizontales o verticales), de manera continua o por lotes; dependiendo principalmente de la tecnología utilizada.

En la mayoría de los tratamientos por DA una parte del líquido obtenido al final de la digestión (digestato) se recircula hacia el pre-tratamiento, ya que posee un alto contenido de nutrientes y bacterias que sirven de inóculo en el proceso, con lo cual se reduce el tiempo del proceso de pre-tratamiento.

*POST-TRATAMIENTO:* Esta etapa se lleva a cabo tanto en el producto (biogás) como en el subproducto (digestato, principalmente lodos y lixiviados). El biogás producido debe ser purificado, debido a las impurezas contenidas que pueden reducir la vida útil de los motores que lo usen e incluso causar daños al sistema, si a éste se remueve el CO<sub>2</sub> se convierte en gas natural (biometano) el cuál se puede alimentar a la red doméstica de consumo de gas. El digestato se separa en sólidos (lodos) y líquidos (lixiviados), normalmente por medio de filtros prensa. El lodo se lleva a un tratamiento de compostaje para una valorización como mejorador de suelos o abono. Los lixiviados pueden usarse directamente como fertilizante.

En lo descrito anterior se ha expuesto con un nivel de detalle intermedio, el proceso de la producción de biogás y composta como subproducto. A continuación se hace un breve resumen del proceso.

El biogás producido mediante el proceso anaerobio en el biodigestor, debe ser purificado para cumplir los requerimientos de acuerdo a su uso. En este proceso de purificación se eliminan el sulfuro de hidrogeno, el dióxido de carbono, el agua, así como las trazas de otros compuestos en forma gaseosa. Una vez filtrado y purificado el gas, se envía a un tanque o bolsas de almacenamiento, posteriormente es bombeado hacia el generador eléctrico (motogenerador) que proveerá a la planta, a los equipos y a la red suministro de energía eléctrica. En esta etapa, los gases producidos por la combustión del metano, son utilizados como fuente de suministro de calor para el secador rotatorio y suministrar calor al biodigestor en el caso de que sea requerido.

El proceso de producción de composta, inicia con la recolección de residuos sólidos orgánicos, éstos son almacenados previamente y transportados a través de una banda hacia un molino, en esta etapa del proceso es necesaria una criba la cuál tendrá la función de homogenizar la materia prima para que su tratamiento sea eficiente. Una vez concluida esta etapa del proceso este es enviado a un macerador, que permitirá pre tratar la materia orgánica la cual es necesaria pasar por un proceso de oxigenación antes de ser degradada. Posteriormente se pasa a través de un extrusor para que vaya entregando la materia prima a un tanque de realimentación del reactor en el cual se depositará toda la materia orgánica procesada a manera de lodos. El tanque de pre alimentación proveerá de material suficiente al reactor (digestor) que se encuentra cerrado debido al proceso anaerobio que se está llevando a cabo en su interior. En el interior del digestor se proveerán de las condiciones de humedad, presión y temperatura necesarias para que la reacción sea llevada a cabo de manera eficiente hasta obtener un nivel de degradado optimo, como resultado de esta degradación se obtendrá como el biogás, en la otra salida se obtiene la pre composta, la cual está compuesta por una fibra degradada por el proceso anaerobio con un exceso de agua, este lodo se hace pasar por un filtro prensa, el cual eliminara en su mayoría el agua que contiene. El agua resultante de este proceso, es nuevamente reutilizada por el macerador, y la fibra obtenida es pasada a través de un secador rotatorio el cual entregará composta lista para ser tratada o utilizada en la industria agrícola o en los programas del GDF que correspondan.

### **3.3 TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE RSOM**

La adopción de un sistema adecuado de disposición final de los residuos urbanos tiene una serie de connotaciones políticas, sociales y económicas, siendo fundamentales los siguientes aspectos: bajo coste de inversión, reciclaje y reutilización de productos, mínima afección al medio ambiente, y escasa necesidad de espacio. A escala mundial se ha estimado que hasta un 95% de los RSU generados son aún depositados en rellenos (Orcajo, 2001). El modelo de gestión predominante en México ha sido la recogida de los RSU y posterior eliminación

mediante depósito en rellenos sanitarios, aunque se utilice también el compostaje y reciclaje.

La materia orgánica, como componente mayoritario del residuo debe aprovecharse siempre que sea posible, como recurso biológico. Sin embargo, actualmente, dicho aprovechamiento no siempre es factible, y hay casos en los que la solución más económica es la disposición del residuo en el relleno. Por todo ello, la solución que permite un aprovechamiento integral del RSU está formada por un sistema mixto de reciclaje de materiales inertes (vidrio, metales) y de materiales combustibles (papel, cartón, madera, plásticos, textiles), compostaje y digestión anaerobia de la fracción orgánica fermentable y revalorización energética del resto mediante tratamiento térmico y aprovechamiento del biogás.

### **3.3.1 Tratamientos físicos**

El tratamiento físico de un residuo sólido no produce un cambio de composición. Pueden citarse los siguientes tratamientos:

- Separación de los componentes identificables de los RSU: o procesos de recuperación y separación por medios manuales y/o mecánicos utilizados para transformar un residuo heterogéneo en componentes más homogéneos
- Reducción del volumen: proceso mediante el que se reduce el volumen inicial ocupado por un residuo (por la fuerza o presión)
- Reducción mecánica: utilizado para reducir el tamaño de los materiales residuales con el fin de obtener un producto final razonablemente uniforme y de menor tamaño que el original

### **3.3.2 Procesos de reutilización (reciclado y recuperación)**

Los principales objetivos de la recuperación de los RSU pueden ser resumidos como:

- Minimizar los efectos contaminantes en agua, aire y suelos, resultantes del vertido o del tratamiento en condiciones poco adecuadas.

- Aprovechar los elementos valorizables contenidos en los residuos, para preservar materia prima poco abundante y de alto valor económico.

En la actualidad la reutilización se realiza, mayoritariamente, al ámbito de los envases de vidrio, en especial en las industrias relacionadas con la cerveza, aguas, refrescos y vinos. La recuperación y posterior reciclaje de los componentes de los RSU se ha desarrollado a través de dos líneas de actuación: una mediante la implantación de contenedores y recogida selectiva (papel-cartón y vidrio), apoyada y favorecida por los sectores industriales (fabricantes de papel y de envases de vidrio), y otra a través del tratamiento de los RSU en plantas Compostaje. El reciclado de materiales preserva los recursos naturales además de liberar espacio en los rellenos. El éxito de un programa de reciclaje depende de una fuerte demanda de los RSU recuperados y un valor de mercado para los residuos suficiente para cubrir los gastos de energía y transporte.

### **3.3.3 Eliminación en rellenos sanitarios**

Los rellenos son las instalaciones físicas más utilizadas para la evacuación, en la superficie de la tierra, de los rechazos procedentes de los residuos sólidos.

- Tiraderos a cielo abierto: consiste en el vertido de residuos por descargas directas en canteras abandonadas o en terrenos no apropiados por su configuración. Los principales impactos causados en el medio ambiente son: la contaminación del aire (gases y olores) y de las aguas subterráneas y superficiales (lixiviados altamente contaminantes).
- Relleno sanitario: es una instalación para la evacuación controlada de RSU. El proceso consiste en acumular el máximo volumen de residuos sobre el terreno en un espacio “mínimo”, de tal forma que se eviten molestias y riesgos para la salud pública, y que no cause deterioro del medio ambiente, durante las operaciones del vertido y después de su clausura.

Las consideraciones más importantes a la hora de proyectar un relleno se resumen en las cuatro fases descritas a continuación:

1. Selección del emplazamiento: varía según las condiciones geográficas y geológicas del terreno. La importancia de este estudio está en la mejor ubicación del relleno.
2. Proyecto de construcción: estudio de la evaluación del impacto ambiental previo a la construcción del relleno.
3. Proyecto de explotación: la ubicación de residuos suele hacerse en terrazas (una capa de residuos de un espesor máximo de 20 metros).
4. Clausura del relleno: consiste en establecer un perfil final del relleno con materiales que favorezcan su sellado e impermeabilización (arcilla, arena, arbustos, árboles, etc.).

Un relleno sanitario puede llegar a producir gases hasta 50 años después de su clausura. Por ello es necesario planificar una gestión adecuada de los gases, buscando la forma de dar salida a los mismos, que se generan como consecuencia de la fermentación biológica de los residuos en su interior (Vesilind *et al.*, 1988). Los factores ambientales a considerar son:

- × Fermentación biológica de los residuos.
- × Seguimiento y control de la producción de lixiviados: los sistemas de tratamiento de lixiviados en la actualidad son el tratamiento por membranas, ósmosis inversa, carbón activado, tratamiento biológico, evaporación, secado térmico y otros.
- × Proliferación de fauna nociva.
- × Producción de gases: los principales gases que generan en los rellenos son el anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y sulfuro de hidrógeno (SH<sub>2</sub>) y otros (Bueno *et al.*, 1997). El control de los gases puede hacerse mediante instalación de ventiladores o quemadores para la rebaja de la presión lateral, o de zanjas perimetrales de intercepción o de barrera, o mediante sistema tipo activo (instalación de chimeneas o zanjas de extracción de los gases).

### **3.3.4 Tratamientos químicos**

Los tratamientos químicos de RSU normalmente implican un cambio de composición, como por ejemplo: la oxidación química (reacción química del oxígeno con materia orgánica), la pirolisis (ruptura en fracciones de las sustancias orgánicas mediante la aplicación de una elevada temperatura en un medio libre de oxígeno) y la gasificación (combustión parcial de un combustible carbonado para generar un gas combustible).

### **3.3.5 Tratamiento Térmico: Incineración**

La incineración es el proceso químico más frecuentemente utilizado para la transformación de la fracción orgánica de los RSU, consiguiéndose reducir el volumen original hasta 85-95%. Las incineradoras de gran tamaño ( $\geq 500$  t/día) operan a temperaturas cercanas a los 1000°C (CEPIS, 2004) y transforman los residuos en materiales inertes (cenizas) y gases. Las moléculas orgánicas e inorgánicas sufren una ruptura, originando moléculas de menor tamaño y otros productos finales propios de la combustión completa ( $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ), permitiendo el aprovechamiento térmico y producción de energía eléctrica (aunque existen plantas incineradoras sin estos procedimientos). La incineración se realiza en hornos que incorporan dispositivos extractores de escorias y cenizas y depuradores de los gases de salida. La destrucción térmica de RSU implica la exposición controlada del residuo a elevadas temperaturas en un medio oxidante (6% de oxígeno) con control de la cantidad de aire en el sistema mediante un ventilador.

Bajo condiciones ideales, el producto final gaseoso de la incineración de los residuos sólidos urbanos incluye el dióxido de carbono, agua, nitrógeno y pequeñas cantidades de dióxido de azufre. El producto final está formado por tres tipos de residuos: escorias, cenizas volantes derivadas de la combustión y por los residuos no combustibles.

Las incineradoras se clasifican en dos tipos, de acuerdo con el tipo de combustible:

- Combustión directa de la masa: utiliza como combustible el residuo urbano en bruto. Se produce un procesamiento mínimo de los residuos, por lo que cualquier objeto dentro del flujo de RSU puede terminar en la incineradora.
- Combustión de residuos procesados: la combustión está precedida de tratamientos fisicoquímicos que generan productos combustibles derivados de residuos (CDR). Estos productos presentan diversas propiedades muy ventajosas: diseño de la planta menor, incineración de CDR triturados o densificados (fáciles de transportar y almacenar), emisiones gaseosas menos nocivas y alto contenido energético.

Por todo ello, el producto final de la incineración, o escorias, aun siendo un material inerte, necesita, salvo aprovechamiento esporádico, una disposición final en relleno controlado. Además se produce un residuo peligroso procedente de la depuración de los gases de combustión llamado cenizas volante o polvo que es necesario tratar previamente a su disposición final en relleno, vía inertización o bien mediante otras tecnologías avanzadas como la vitrificación.

### **3.3.6 Tratamientos biológicos**

Los tratamientos biológicos también implican un cambio de composición, y se utilizan para reducir el volumen y el peso del RSU. Los tratamientos biológicos más importantes son los procesos aerobios y los anaerobios. En la gestión de residuos sólidos urbanos los dos tratamientos que aglutinan el grueso de las tecnologías desarrolladas para el tratamiento de la FORSU son el compostaje aerobio y la biometanización. El compostaje aerobio requiere una aportación neta de energía, mientras que a partir de la biometanización (DA) se genera energía.

### **3.3.7 Compostaje**

El compostaje es un proceso biooxidativo de descomposición biológica de la materia orgánica contenida en los RSOM en condiciones controladas y tiene como objeto su transformación en un producto orgánico que se utiliza como “enmienda” de suelos para la agricultura (Fernández y Ollay, 1997). En el proceso intervienen numerosos y variados microorganismos, en condiciones de humedad adecuadas y

con sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido, implicando el paso por una etapa termofílica y una producción temporal de fitotoxinas. Al final se producen productos de degradación, dióxido de carbono, agua y minerales, así como una materia orgánica estabilizada (composta), libre de fitotoxinas, y adecuada para su empleo en agricultura sin que provoque fenómenos adversos.

Durante el proceso se pueden diferenciar dos etapas. La primera de ellas está caracterizada por una elevada actividad microbiana y en ella se metabolizan los sustratos fácilmente biodegradables, alcanzándose valores elevados de temperatura. Posteriormente, tiene lugar la fase de estabilización/maduración, durante la cual desciende la actividad celular, limitándose a reacciones de humificación por poli condensación y polimerización, que dan lugar, finalmente, a la composta.

En México, los usos más comunes de disposición de los RSOM son en tiraderos a cielo abierto, rellenos sanitarios así como plantas de composta e incineración, siendo esta última la más contaminante y rellenos con mayor problemática al medio ambiente, pero se usa debido su eficiencia en la reducción de los RSU.

### **3.4 ESTRATEGIAS DE EVALUACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN Y OPERACIÓN DE UNA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

En este punto, se hará hincapié en algunos de los ejemplos más relevantes para el estimado de orden de magnitud.

El costo de construcción (inversión) de otras plantas en el mundo se pueden usar como referencia para usar algún método con el cual se obtenga un orden de magnitud para una evaluación a nivel de prefactibilidad basado en referencias encontradas según los *“lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión”* (DOF, 2013).

A partir de los datos encontrados se pueden realizar:

- Operaciones simples a partir de tablas.
- Operaciones simples a partir de funciones encontradas.

- Estimación a partir especificaciones similares (capacidad, tecnología, etc.).
- Escalamiento o extrapolación basada en otra planta o referencias (uso de la “regla de los seis décimos”).

Los valores encontrados pueden tomarse como una referencia para comparar los costos estimados a partir de diversas fuentes. Mientras más específicos sean los datos reportados, se puede ir corroborando la veracidad del costo estimado (u orden de magnitud) y así acotar a un valor o intervalo de costo.

Para el estimado de costo de la planta se realizó una investigación bibliográfica de varias fuentes, algunas se describen en los siguientes puntos, así como solo se describen algunos de los principales y se usan con la finalidad de ejemplificar el método realizado para este trabajo. Bajo las condiciones que se describen a continuación, se analizaron, entre otros, los siguientes documentos:

➤ **Taller de planificación de tecnologías de plantas de biogás**

A partir de los resultados dados en el “*Workshop, Biogas-Plant-technology planning, Beijing, 22nd – 24th of November 2009*” para estimar los costos de inversión para el tratamiento anaeróbico de sustancias orgánicas, se describe que las plantas de DA difieren en sustancia, en condiciones para la biodegradación y en la forma de los sistemas de reactores utilizados.

Los procedimientos alternativos posibles descritos son:

- Procedimientos de una etapa, dos etapas o múltiples etapas,
- Digestión anaerobia seca / digestión anaerobia húmeda,
- Condiciones mesófilas (35-37 ° C) / termófilas (55-60 ° C) de la metanización,
- Alimentación continua / discontinua.

La Tabla 1 muestra los costos de inversión en Alemania para las plantas de biogás que incluye las siguientes etapas de tratamiento:

- Recepción
- Preparación

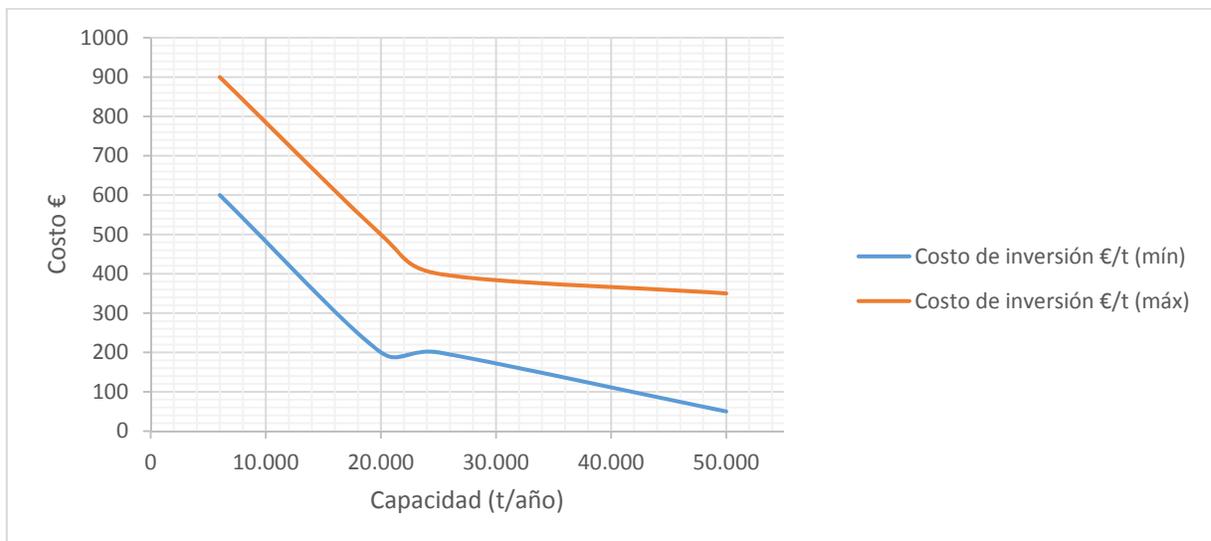
- Control visual, remoción de residuos de gran tamaño,
- Remoción de metales,
- Trituración de los residuos (por lo general entre 10 y 45 cm),
- Clasificación para producir varios tamaños de fracción,
- Separación de los residuos en fracción ligera y pesada,
- Digestión anaerobia.

**Tabla 1. Costo de inversión. Fuente: Knoten Weimar (2009).**

Capacidad de la planta	6000 t/a		20000 t/a		25000 t/a		50000 t/a	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Costo de inversión €/t	0	900	200	500	200	400	50	350
Costo de operación €/t	80	120	40	120	35	100	30	90

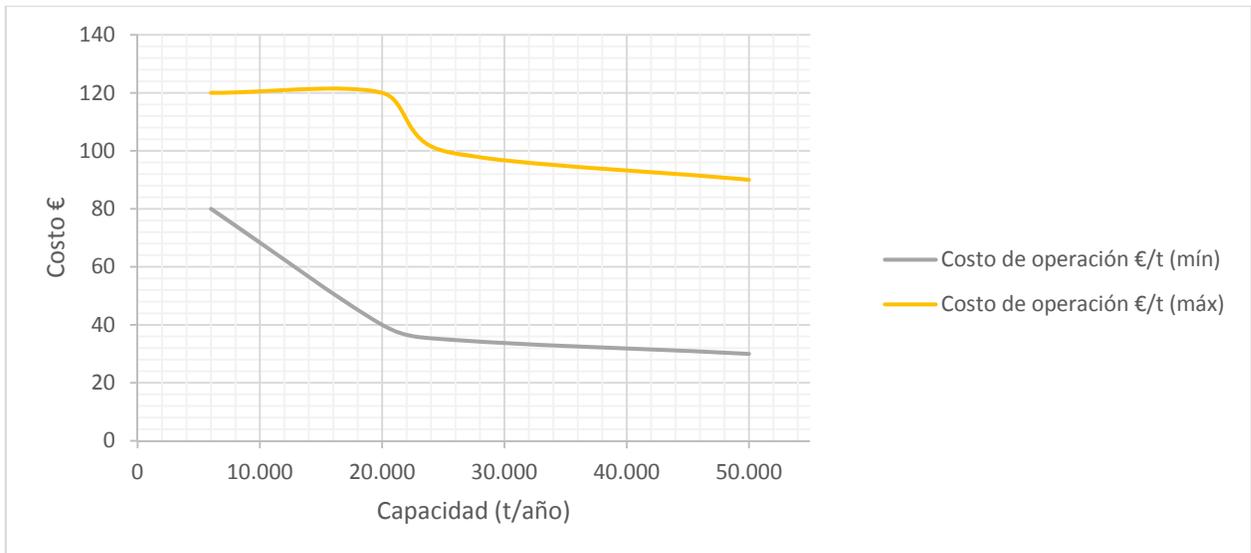
*NOTA: Estos costos de inversión y operación dados para plantas de digestión anaerobia dependen del mercado alemán. Los costos consideran material de construcción, equipo técnico, parcela de tierra y otros gastos. Para ello las cifras sólo pueden dar una primera visión de la estructura de costos.*

Los datos obtenidos en la Tabla 1 describen el costo mínimo y máximo de inversión y operación de plantas con diferentes capacidades de tratamiento. En el caso de la inversión mínima para plantas de 6'000 toneladas anuales indicado como cero, se corrigió, ya que en el documento no explica el porqué de ese costo y el valor indicado no tiene sentido. Se corrige poniendo un valor de 600 €/t para dar un aproximado que coincida con los valores mínimos de las otras plantas.



**Figura 4. Costo de inversión vs capacidad. Realización propia a partir de los datos de la Tabla 1.**

En la Figura 4 (corrigiendo el costo mínimo de inversión antes mencionado), se observa una tendencia a disminuir el costo de inversión por tonelada al aumentar la capacidad de operación.



**Figura 5. Costo de operación vs capacidad. Realización propia a partir de los datos de la Tabla 1.**

Así mismo, en la Figura 5 se puede observar que el costo de operación por tonelada también disminuye al aumentar la capacidad de operación, con la diferencia que tiene una tendencia más lineal, por lo que este valor es más preciso.

A partir de estos datos, se puede calcular un estimado de la inversión para la construcción de la planta de mil toneladas diarias, para lo cual, se usaron como referencia los costos de inversión para plantas de tratamiento de 50,000 toneladas anuales descritos en la Tabla 1 (costo de inversión €/t 50-350, costo de operación €/t 30-90).

El resultado de la inversión, se realizó multiplicando el costo respectivo para cada celda (inversión/operación, mínimo/máximo) por la capacidad anual deseada, posteriormente se pasó a dólares (USD) según el tipo de cambio (TC) en su año (2009), una vez realizado esto se estimó el costo de inversión usando un factor de cambio (FC) a Estados Unidos para determinar el costo de construcción en ese

país<sup>7</sup>. Una vez obtenido el costo en dólares de construcción en Estados Unidos, por medio del CEPCI respectivo a su año (521.9 para 2009 y 570 para 2014) se calculó el factor de cambio ( $FC_{CEI}$ ) al año vigente para determinar cuál sería su costo actual. Para tener el resultado en México, se usó un FC de 1.06 (correspondiente a México) y posteriormente se pasó a pesos mexicanos (14.9MXN=1USD)<sup>8</sup>, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 2 (ANEXO II).

**Tabla 2. Estimado de inversión y operación mínimo y máximo para planta de tratamiento de 1 000 toneladas diarias.**

	<b>MÍNIMO</b>	<b>MÁXIMO</b>
Capacidad de la planta (t/año)	365,000	365,000
Costo de inversión (millones MXN)	<b>420</b>	<b>3,000</b>
Costo de operación (millones MXN)	250	750

El resultado de la Tabla 2 refleja un intervalo de costos generalizado (en MXN) y sirve como una referencia inicial. Se debe tener en cuenta que no incluye el post-tratamiento y que no especifica nada sobre el tipo de tecnología, ni condiciones de operación, para lo cual se debe seguir haciendo estudios de costos con la finalidad de acotar los costos de inversión.

También, a partir de estos resultados se puede buscar una correlación sobre el costo de inversión-operación, con la cual se puede predecir un costo entre uno y otro, usando los valores mínimos (Tabla 2), podemos determinar que del costo de inversión, anualmente se gastara en la operación de la planta 60% de éste. Y usando los valores máximos (Tabla 2), se puede calcular que del costo de inversión, se gastaría alrededor del 25% de éste para la operación anual de la planta. Con este análisis, podemos resumir que el costo de inversión tiene poco impacto con el costo de operación y que no necesariamente tienen una correlación al aumentar uno u otro.

---

<sup>7</sup> TC, FC obtenidos en: The 2009 Global Construction Cost and Reference Yearbook, 9th Annual edition. Compass International Consultants, Inc. Morrisville, PA, USA

<sup>8</sup> BANXICO, febrero, 2015.

➤ **Variables económicas en plantas de digestión anaerobia.**

La información presentada corresponde al documento elaborado por Tim Raibley, (2012) en el cual incluye una presentación sobre las variables que involucran los costos en la digestión anaerobia. El autor describe los tipos de tecnología, sustrato y condiciones de operación generales, a partir de las cuales determina un par de gráficas de estimación de costos de inversión y otra de costos de operación, según la capacidad anual de la planta. Estos datos sirven para corroborar y/o acotar el estimado del documento anterior.

En la descripción general de la presentación, se muestran los siguientes puntos a ser tomados en cuenta:

- Las variables en los sistemas de digestión.
- Pretratamiento (industrial/agrícola).
  - Tipo de residuos.
  - Baja cantidad de sólidos (3-15%).
  - Alta cantidad de sólidos (<15%).
  - Tratamiento (DA).
  - Recolector de biogás.
  - Post-tratamiento.
- Componentes generales de la instalación (20-40% del costo de la instalación)
  - Entrada.
    - Calidad del sustrato,
    - Equipo de pre-tratamiento,
    - Digestión anaerobia.
      - Recolección de biogás,
      - Control de olores.
  - Salida
    - Tratamiento del digestato,
    - Limpieza de biogás,
    - Utilización de biogás,

- Cogeneración,
  - Sistemas auxiliares.
- Rangos de costo de capital.
  - Pre-tratamiento,
  - Digestión Anaerobia,
  - Limpieza del biogás,
  - Generación de energía,
  - Calidad del aire (control de olores).
- Rangos de costos de operaciones.
  - Magnitud. Tamaño de la instalación,
  - El tratamiento y gestión del concentrado,
  - Ubicación (urbana o rural),
  - Medios para la utilización del biogás,
  - Gestión de olores.
- Flujos de Ingresos.
  - Honorarios,
  - Venta de energía eléctrica,
  - Biocombustibles,
  - Fertilizantes,
  - Composta.

A partir de estas consideraciones, el autor reporta una gráfica (Figura 6) para el costo de inversión (en dólares canadienses, CAD), así como también una función que se aproxime a ésta. Con este dato, se puede obtener un costo de inversión (puntual) para tenerlo como una referencia.

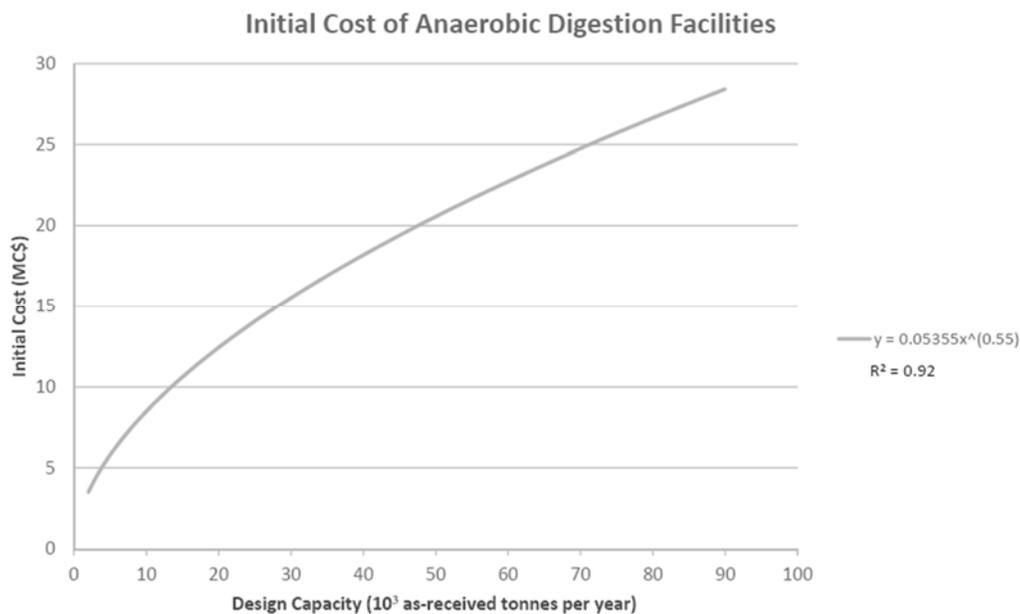


Figura 6. Gráfica, costo de inversión ( $\times 10^6$  CAD) vs capacidad ( $\times 10^3$  t/año) para una planta de DA (Raibley, 2012).

De la misma forma, reporta una gráfica (Figura 7) para el costo de operación (en CAD), así como también una función que se aproxime a esta. Con este dato, se puede obtener un costo de operación (puntual) para tenerlo como una referencia.

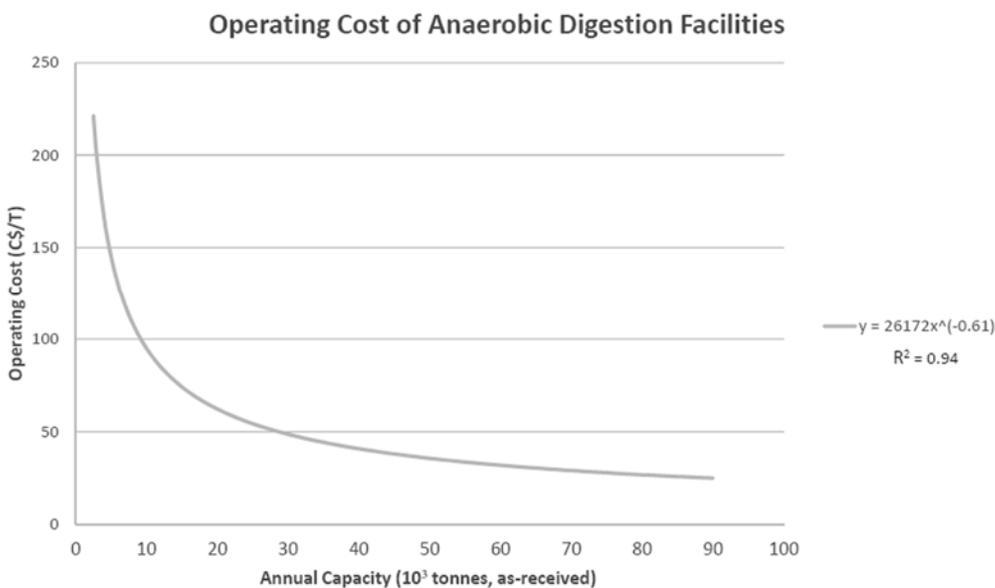
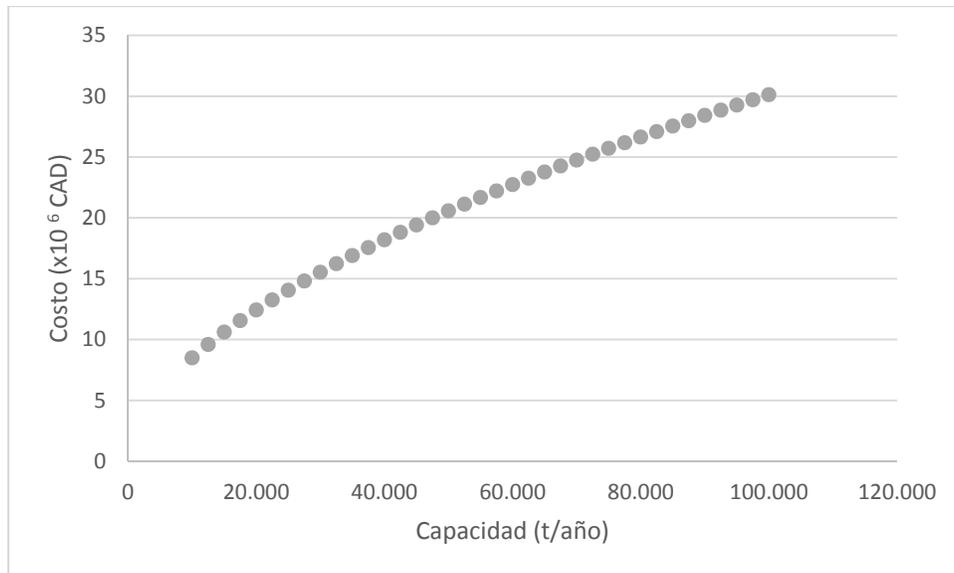


Figura 7. Gráfica, costo de operación (CAD/t) vs capacidad ( $\times 10^3$  t/año) para una planta de DA (Raibley, 2012).

Con los resultados reportados en esta presentación se puede observar que la función dada para el costo de inversión es:

$$y = 0.05355x^{0.55}$$

Con esta función se realizó una gráfica (Figura 8) para comprobar que la tendencia descrita en la gráfica del autor (Figura 6) sobre el costo de inversión se cumpla.



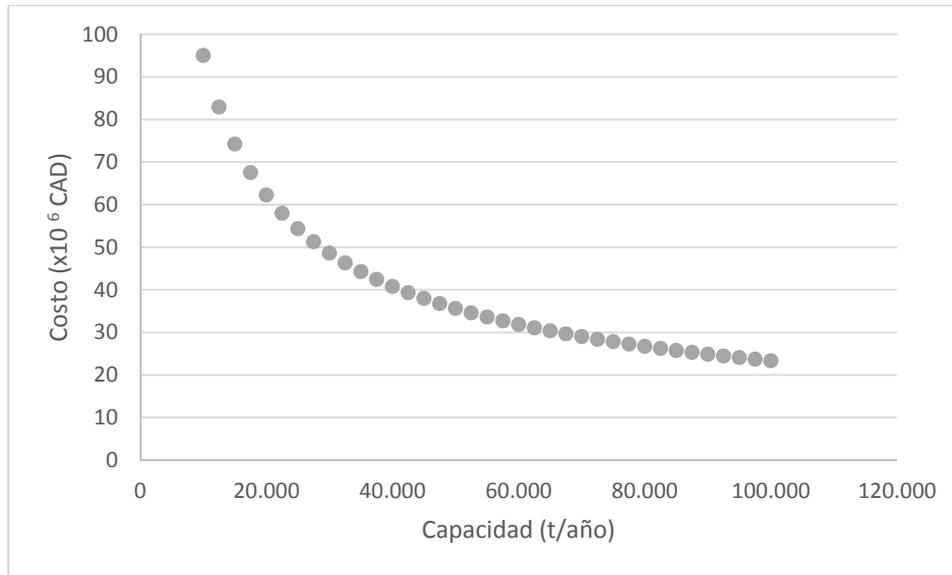
**Figura 8. Costo de inversión. Realización propia a partir de la función dada por Raibley.**

La Figura 8 representa la tendencia dada por la función, sobre los costos de inversión para la construcción de una planta de DA.

Así como la función dada para el costo de operación es:

$$y = 26172x^{-0.61}$$

Con cual se realizó una gráfica (Figura 9) para comprobar que la tendencia descrita en la gráfica del autor (Figura 7) sobre el costo de operación se cumpla.



**Figura 9. Costo de operación. Realización propia a partir de la función dada por Raibley.**

La Figura 9 representa una tendencia dada por la función, sobre los costos de operación para la construcción de una planta de DA.

Para determinar un costo puntual, haciendo uso de estas funciones, se determinó una capacidad anual de 100 mil toneladas (ya que se describe en la presentación que hasta ese intervalo son válidos los resultados), posteriormente se usó la regla de los “seis décimos” (ANEXO III) y al final se determinó su costo en pesos mexicanos (ANEXO II), con estos cálculos, se encontraron los costos de inversión y operación reportados en la Tabla 3.

**Tabla 3. Costo de inversión y operación de una planta de DA.**

Capacidad de la planta (t/año)	365,000	365,000
Costo de inversión	<b>1,325 millones MXN</b>	<b>89 million USD</b>
Costo de operación	1,025 millones MXN	68 million USD

De forma similar al caso anterior (*Taller de planificación de tecnologías de plantas de biogás*), en la presentación de Raibley a manera de resumen describe el costo de tratamiento por tonelada mínimo y máximo como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4. Resumen de costos. Creación propia a partir de la diapositiva de la presentación de Raibley.**

Costos	Mín	Máx
Inversión CAD/t	250	700
Operación CAD/t	60	200

*Notas de la tabla:*

- *CAD: Dólares canadienses*
- *Rango basado en las capacidades de rendimiento variable y diversos tipos de tecnología*
- *Los ingresos se limitan a las ventas de energía, poco o ningún valor en el compost*
- *Incluye el costo de capital amortizado suponiendo 20 años a un interés del 6% y los ingresos de compensación*

Con los valores reportados en esta Tabla 4, se realizó un cálculo para encontrar un intervalo de costos para la inversión y operación de la planta de DA al día de hoy (ANEXO II), con la finalidad de comprobar que los valores determinados en la Tabla 3 sean correctos al estar dentro del intervalo.

**Tabla 5. Estimado de inversión y operación (MXN), mínimo y máximo para un planta de tratamiento de DA.**

	<b>MÍNIMO</b>	<b>MÁXIMO</b>
Capacidad de la planta (t/año)	365,000	365,000
Costo de inversión (millones MXN)	<b>1,575</b>	<b>4,410</b>
Costo de operación (millones MXN)	380	1,260

En los resultados obtenidos en la Tabla 5, deberían de encontrarse los costos determinados a partir de las funciones determinadas anteriormente, sin embargo, si analizamos la Tabla 3 se puede observar que el costo de inversión, está por debajo del costo mínimo reportado por el autor. Sin embargo, si analizamos la Tabla 2, podemos observar que si se encuentra en el intervalo descrito en ésta. Esto conlleva a determinar que estos métodos son sólo para tener una idea aproximada y que no se puede resumir que sean precisos, sólo determinan un orden de magnitud.

➤ **Funciones de costos aproximados para las instalaciones de tratamiento de residuos sólidos**

Basado en los resultados realizados en el artículo “Approximate cost functions for solid waste treatment facilities” (Tsilemou, K., 2006), sobre la estimación de costos, se menciona que son un requisito básico para la planificación de los sistemas de gestión de residuos sólidos municipales. “La variedad de esquemas financieros de gestión de la organización y los avances tecnológicos en desarrollo de forma continua, hacen que el análisis económico de una tarea compleja, se haga más difícil por la falta de datos reales sobre los costos”.

En este artículo se consideran las siguientes características para la elaboración de los resultados:

- Digestión anaerobia.
  - Termófilo,
  - Seca,
  - Una fase.
- El biogás se usa para producir electricidad y calor,
- El digestato se usa la producción de compost,
- Se asume una tasa de descuento del 6% y una vida útil de 20 años.

En este trabajo, las curvas de costos se generan con el costo inicial de puesta en marcha y con el costo de operación, que están constituidos de la siguiente manera:

- El costo inicial = costos pre desarrollo (caracterización del sitio, evaluación ambiental, investigación hidrogeológica, adquisición de terrenos, diseño de ingeniería) + costos de construcción (limpieza de tierras, excavación, edificios y otras construcciones obras, equipamiento y mobiliario de las instalaciones, equipos técnicos, por ejemplo, para el transporte de residuos y tratamiento mecánico de residuos, para la recuperación de energía, la conexión de las redes (camino de acceso, agua y suministro de energía, sistema de alcantarillado), etc.).

- El costo de operación incluye los gastos de: materias primas, análisis de laboratorio (reactivos, productos químicos, etc.), energía y otros servicios públicos, eliminación de aguas residuales, mano de obra, supervisión, mantenimiento de instalaciones y equipos, seguros, gastos de administración, programas de formación, etc. El costo de operación no incluye costo de recuperación de capital.
- Costo equivalente anual total = Recuperación capital anual del costo inicial incluida su depreciación + costo anual a fondo perdido para el cierre.

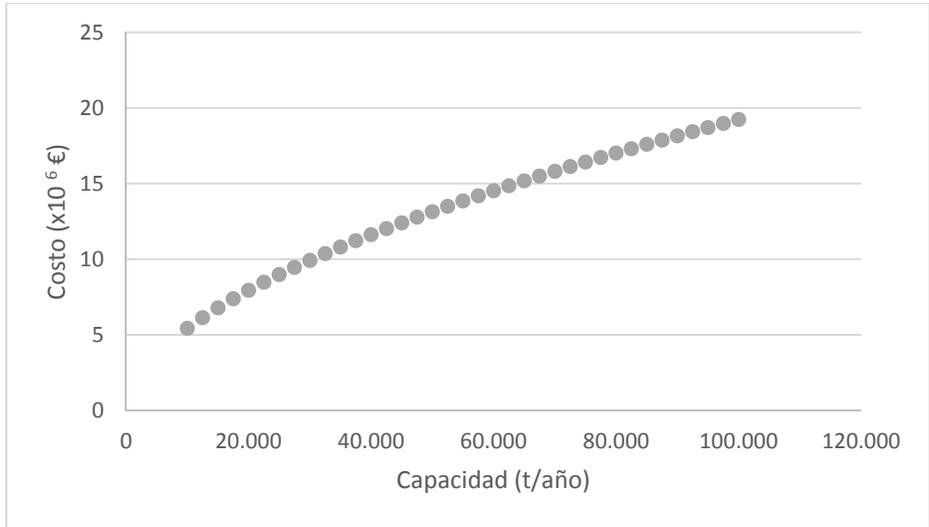
“Las cifras de costos reportados en la literatura, en algunos casos incluyen (y en otros no) los gastos para el tratamiento y el transporte de los desechos residuales a sitios de disposición final o los ingresos de material y/o energía recuperada; en este documento, tales gastos y los ingresos no se tienen en cuenta y si las cifras reportadas no los incluyen, se realizan ajustes.” Tsilemou, 2006.

En general, se analizan los costos de diversas plantas en el mundo y con los datos obtenidos se realizan gráficas para obtener una función sobre el costo de inversión y del costo de operación. Con la información obtenida se realizó un cálculo sobre una planta de 100 mil toneladas anuales, ya que está estimado a esa capacidad máxima (la función) para posteriormente usar la “regla de los seis décimos” para calcularla con una capacidad de 365 mil toneladas anuales.

La función dada para el costo de inversión es:

$$y = 0.0342x^{0.55}$$

De la cual se obtiene la Figura 10.



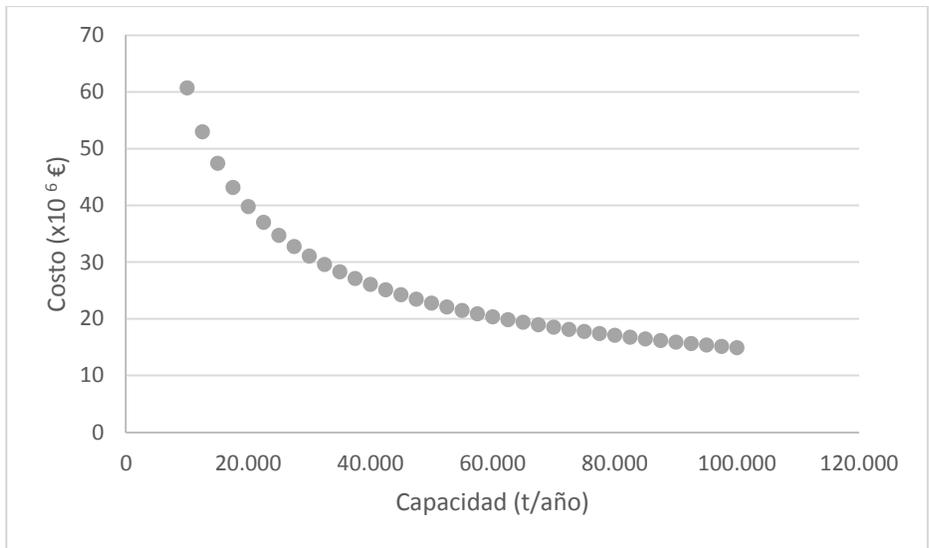
**Figura 10. Costo de inversión vs capacidad. Realización propia a partir de la función dada por Tsilemou (2006).**

La Figura 10 representa una tendencia sobre los costos de inversión basada en datos encontrados de plantas desde las 2500 hasta las 100 mil toneladas anuales.

La función dada para el costo de operación es:

$$y = 16722x^{-0.61}$$

De la cual se obtiene la Figura 11.



**Figura 11. Costo de operación vs capacidad. Realización propia a partir de la función dada por Tsilemou (2006).**

La Figura 11 representa una tendencia dada por la función, sobre los costos de operación basada en datos encontrados de plantas desde las 2500 hasta las 100 mil toneladas anuales.

Para determinar un costo puntual, haciendo uso de estas funciones, se determinó una capacidad anual de 100 mil toneladas (ya que hasta esa capacidad es válida la función), posteriormente se usó la regla de los “seis décimos” (ANEXO III) y al final se determinó su costo en pesos mexicanos (ANEXO II), con estos cálculos, se encontraron los costos de inversión y operación reportados en la Tabla 6.

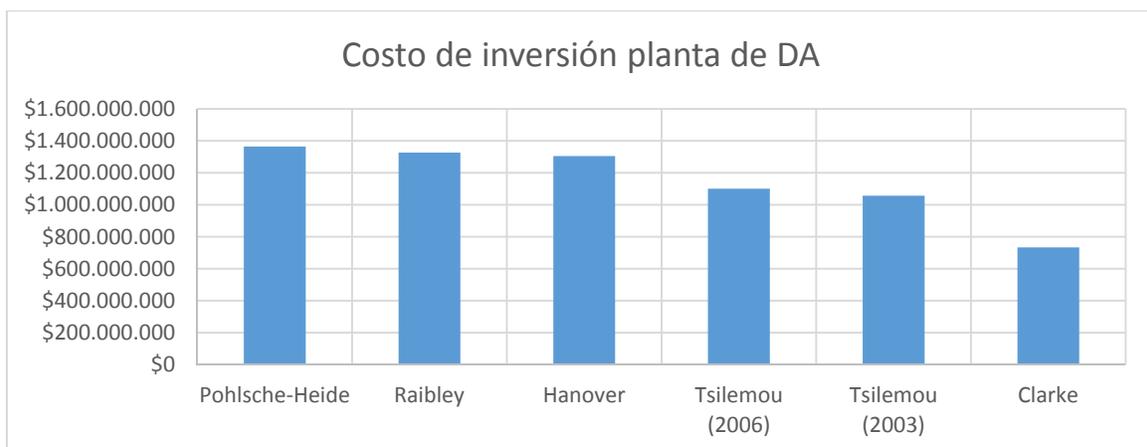
**Tabla 6. Costo de inversión y operación de una planta de DA.**

Capacidad de la planta (t/año)	365,000	365,000
Costo de inversión	<b>1,100 millones MXN</b>	<b>73 million USD</b>
Costo de operación	850 millones MXN	57 million USD

Del mismo modo que de la presentación de Raibley, se logra obtener un costo puntual sobre el costo de inversión y de operación anual sobre la planta de DA para el tratamiento de los RSOM. Con estos valores se tienen más datos para acotar un estimado de orden de magnitud.

### **3.4.1 Estimación de orden de magnitud**

En la Figura 12 se puede observar los resultados obtenidos por diferentes métodos y fuentes.



**Figura 12. Costos de inversión de planta de DA de 365 000 t/año. Creación propia a partir de datos obtenidos en la investigación bibliográfica.**

Como se puede observar en la Figura 12, se representan los estudios analizados en este trabajo. Estos estimados del costo de la planta varían según el método empleado. Los casos de Pohlsche-Heide y Hanover (CONACyT-FORDECyT 174710, 2013), son valores estimados usando la regla de los “seis décimos”. Se tienen dos resultados al emplear las funciones de Tsilemou, ya que se encontró en dos fuentes (Tsilemou, 2006 y Adams, 2008) y se obtuvo una variación entre sus estimaciones. El caso de la estimación empleando la función de Clarke, fue la que tuvo un valor más bajo, lo cual se puede deber al tiempo de esa publicación (2000).

Debido a la carencia de información en los costos de operación, no se puede realizar una gráfica similar a la anterior, pero a partir de los datos obtenidos se puede determinar que se necesitan estudios más específicos, ya que casos como el de Raibley y Tsilemou se determina una correlación del costo de operación anual cercana al 77% respecto al costo de inversión inicial. En cambio, en los casos donde se dan costos por tonelada mínimo y máximo se encuentran valores de operación anuales por debajo del 30% del costo inicial de inversión. Debido a esto, se tomó en cuenta los casos con los valores de las funciones ya que es donde más se repetía este comportamiento, donde se puede determinar un orden de magnitud estimado como se muestra en la Tabla 7, con una correlación mayor al 75% (operación/inversión).

**Tabla 7. Orden de magnitud de la construcción de una planta de DA**

	MXN	USD*
Costo de inversión (x10 <sup>-6</sup> )	<b>1,365</b>	<b>92</b>
Costo de operación (x10 <sup>-6</sup> )	1,025	69

\*USD=14.9 MXN (febrero, 2015)

Con el estimado de la Tabla 7 se puede tener una idea de los costos de inversión y operación a nivel de prefactibilidad, los cuales se referencian también en dólares por ser una divisa internacional. En todas las fuentes encontradas, no se considera el costo de traslado de los residuos a la planta.

- El costo de inversión de la planta es alrededor de 1,365 millones de pesos (~90 millones de dólares).
- El costo de operación anual de la planta es de alrededor de 1,025 millones de pesos (~70 millones de dólares).

En estos costos no se considera el terreno donde se construirá la planta, así como el transporte y recolección de los RSOM ya que estos serán “donados” o ya existe una infraestructura sobre la cual trabajar ellos.

#### **4. MODELO DE NEGOCIO: ECOPARC DE BARCELONA S.A.**

Para lograr una mejor comprensión de la magnitud del proyecto, se investigó y estudió un caso real con un tratamiento de 675 toneladas por día en la *Planta metropolitana de tratamiento integral de residuos* ubicada en Barcelona, España mejor conocida como **Ecoparc de Barcelona S.A.** La cual describe de manera general su proceso, datos de construcción y operación en su dirección electrónica: <http://ecoparcbcn.com> (junio de 2014).

El Ecoparc de Barcelona es un equipamiento ambiental que se dedica a tratar de manera integral los residuos del área metropolitana de Barcelona. En el área metropolitana de Barcelona los ciudadanos producen cada año alrededor de 1,6 millones de toneladas de residuos (excluyendo los residuos industriales). El Ecoparc de Barcelona trata aproximadamente un 12% de estos residuos. Reciben un promedio de 675 toneladas de residuos al día. Su función es aprovechar los residuos orgánicos a través de diversos tratamientos: selección de materiales reciclables, compostaje y metanización.

El Ecoparc de Barcelona se dedica a tratar dos tipos de residuo: la orgánica de recogida selectiva (separación de los RSOM) y los residuos indiferenciados, conocidos como resto (RSM). De los residuos indiferenciados, el Ecoparc extrae los materiales reciclables y la materia orgánica que no se ha seleccionado correctamente en origen. Con esta última se produce composta, mediante un proceso aerobio. Con la fracción orgánica, de recolección selectiva se genera biogás (mezcla de metano y dióxido de carbono), mediante una fermentación anaerobia conocida como biometanización. A continuación, se utiliza este biogás para obtener electricidad.

La instalación está integrada por las siguientes áreas:

1. **Área de recepción** de los diversos residuos.
2. **Área de pretratamiento** de residuos indiferenciados y de orgánica de recolección selectiva. Incluye los bio estabilizadores rotativos (BRS), que desfibran el papel y el cartón para incorporarlos a la materia orgánica extraída del resto, previo paso a los túneles de compostaje.

3. **Área de compostaje** de la materia orgánica extraída del resto.
4. **Área de pretratamiento húmedo** de la materia orgánica.
5. **Línea de biometanización** de la orgánica de recolección selectiva.
6. **Línea de clasificación y almacenamiento** del rechazo.
7. **Planta de cogeneración**, que transforma el biogás, generado en el tratamiento anaerobio, en electricidad.
8. **Depuradora** de aguas residuales.
9. **Tratamiento del aire** de la planta, mediante procesos químicos y biológicos.

## DATOS DE PRODUCCIÓN DE 2012

El reporte de entradas para el tratamiento en la planta se divide en residuos de poda, en fracción orgánica de residuos metropolitanos (FORM) y restantes. Éstos se describen de manera mensual como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Entradas del 2012. Fuente: Ecoparc de Barcelona S.A.

MES	Poda* (t)	RSOM (t)	Resto* (t)	Total Entradas (t)
Enero	-	6211.14	14335.78	20546.92
Febrero	36.94	5663.21	13451.16	19151.31
Marzo	26.00	6472.54	14429.84	20928.38
Abril	104.08	6075.98	13571.08	19751.14
Mayo	37.64	6730.28	14578.00	21345.92
Junio	2.68	6763.76	13052.31	19818.75
Julio	48.80	6487.30	12588.78	19124.88
Agosto	7.00	5519.36	9883.73	15410.09
Septiembre	54.56	5958.16	11935.22	17947.94
Octubre	42.26	6589.28	11316.92	17948.46
Noviembre	95.50	6013.78	11260.90	17370.18
Diciembre	62.44	6067.66	12757.08	18887.18
<b>TOTAL</b>	<b>517.9</b>	<b>74552.45</b>	<b>153160.8</b>	<b>228231.15</b>

\* Poda= Residuos de Jardinería; Resta= Residuos indeferenciados.

En la Tabla 9 se muestran las salidas que se generan después de ser seleccionadas, tratadas y transformadas (el biogás a energía eléctrica).

Tabla 9. Salidas del 2012

MES	Rechazo (t)	Composta (t)	Material recuperado (t)	Total (t)	Electricidad (MWh)	Rechazos/ Entradas
Enero	3501.12	2214.20	1201.94	14371.56	1212490	17.04%
Febrero	3485.92	2447.32	1121.34	13646.28	974190	18.20%
Marzo	6107.60	2696.44	1168.62	13459.08	1147500	29.18%
Abril	6273.56	3128.48	1278.70	13687.84	999360	31.76%
Mayo	7124.22	3149.54	1364.52	14146.50	1139890	33.38%
Junio	3571.44	2995.62	1205.28	13525.72	1035400	18.02%
Julio	4306.98	2965.68	1244.08	13108.34	1033210	22.52%
Agosto	3535.54	3170.76	907.50	12297.72	881160	22.94%
Septiembre	4286.82	2372.32	1099.04	11234.46	986920	23.88%
Octubre	1603.88	3167.36	1236.04	11210.70	978300	8.94%
Noviembre	5602.90	3040.66	1162.44	12190.78	1080780	32.26%
Diciembre	1888.86	2592.66	1098.56	12182.98	1126070	10.00%
<b>TOTAL</b>	<b>51288.84</b>	<b>33941.04</b>	<b>14088.06</b>	<b>155061.96</b>	<b>12595270</b>	<b>22.47%</b>

## CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN

**Titular:** Entidad Metropolitana de Servicios Hidráulicos y Tratamiento de Residuos.

**Gestión:** Sociedad Ecoparc de Barcelona (Urbaser, COMSA EMTE, Tersa)

**Construcción:** UTE Ecoparc.

**Ubicación:** Polígono industrial de la Zona Franca. Barcelona

**Capacidad de tratamiento:** 245 000 t/año

**Superficie de la parcela:** 6 Ha

**Superficie de la nave principal:** 37 645 m<sup>2</sup>

**Arquitectura del centro:** Espinet i Ubach

**Inversión:** 48 250 000 €

***Entradas:***

**FORM:** 85 000 t/año

**RESTO:** 160 000 t/año

**Fracción vegetal:** 10 000 t/año

***Salidas:***

**Compostaje:** 24 000 t/año

**Biogás:** 4 000 000 m<sup>3</sup>

**Electricidad:** 13 000 MWh/año

**Productos valorizables:** 11 000 t/año

## **5. PROPUESTA A NIVEL DE PREFACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RSOM EN BORDO PONIENTE**

### **5.1 BASE DE DISEÑO**

La planta que se quiere construir para el tratamiento y disposición de mil toneladas diarias de los residuos sólidos orgánicos municipales de la Ciudad de México por medio de un proceso de digestión anaerobia con la obtención de biogás, tiene como finalidad alimentar motogeneradores para su conversión a energía eléctrica. Así como digestato, subproducto del proceso, el cual se puede tratar para la obtención de composta y usarlo como mejorador de suelos.

Para el éxito en la ejecución del proyecto se consideran los siguientes supuestos:

#### **Factores políticos**

- Las autoridades municipales reconocen que las plantas de digestión anaerobia ofrecen beneficios ambientales, sociales y políticos.
- Los actores políticos reconocen el valor del tratamiento como una solución viable para reducir el volumen de los RSU en los municipios e incrementar la restauración del suelo.
- La población es consciente de los beneficios de la digestión anaerobia.
- Se logra asegurar la continuidad de operación de los programas de separación de orgánicos y la operación de la planta, de una administración municipal a la siguiente.
- La autoridad ofrece garantías a los diferentes actores que producen y consumen la energía eléctrica.

#### **Factores económicos**

- Se considera un 10% de tasa social de descuento (TSD).
- Existe un sistema para recolectar y trasladar los RSU a sitio.
- Se hace un uso adecuado de la energía eléctrica.
- Se reutiliza la composta en programas del DF y/o programas agrícolas.
- Se produce una composta de calidad que es factible vender.

- Existe demanda para los productos generados en la zona (ya sea en áreas urbanas o rurales).

### **Factores administrativos y de planeación**

- Existe seriedad en el acopio y se garantiza la puntualidad del material de entrada.
- Están previstos recursos para el mantenimiento y reemplazo del equipo y maquinaria.
- Existe suficiente espacio en la planta para almacenar la composta producida mientras se distribuye.
- Existe colaboración y buena voluntad del personal de recolección de los residuos.
- Existe una recolección separada de los residuos.
- Se tiene acceso a una fuente de agua.
- La operación y la administración de la planta es igual a la de una pequeña o mediana empresa privada.

### **Factores técnicos**

- Se considera que el 8% de la generación eléctrica de la planta es para la misma.
- El personal que opera la planta de digestión anaerobia está capacitado y motivado.
- La planta cuenta con laboratorio para monitorear el proceso de producción.
- Se preselecciona el material en la planta.
- La producción del biogás y composta es continuo, sin interrupciones.
- Existe un efectivo proceso de separación y un buen control de la calidad de los residuos que entran a la planta

### **Factores sociales**

- La sensibilización y buena disposición de la población para separar los residuos en los domicilios.

- La población y los tomadores de decisiones ven resultados concretos. Una planta bien operada, un programa de separación bien llevado, la disponibilidad y el uso de composta de buena calidad.
- Se conjugan esfuerzos personales con esfuerzos individuales, y se cuenta con el apoyo de la población civil.

Para tener una base de riesgo en la ejecución del proyecto, se mencionan los supuestos que de ser llevados a cabo, pueden ocasionar el fracaso del proyecto:

### **Factores políticos**

- La falta de prioridad dada por la autoridad municipal porque percibe otros problemas urbanos como más urgentes.
- La falta de continuidad de los proyectos en la administración municipal.
- La falta de iniciativa por parte de la autoridad municipal.
- La falta de involucramiento del sindicato o los trabajadores de limpia.
- La falta de veracidad o de verificación de la información que proporcionan los distribuidores de ciertas tecnologías.
- La suerte de la elaboración del proyecto dependa de las decisiones de las autoridades y de los años electorales.
- La corrupción que puede existir en torno a la construcción y operación de una planta de gran escala.
- Las limitantes legales relacionadas con la comercialización de los productos por parte de los municipios.

### **Factores económicos**

- La percepción de que es más costoso el tratamiento por digestión anaerobia que disponer de la basura orgánica en un relleno sanitario.
- La percepción de amenaza por parte de quienes actualmente se benefician económicamente del manejo de los residuos.
- La incorrecta percepción de que la composta debe competir con los fertilizantes.
- No se cobra el ingreso de la basura en los sitios de disposición final.

- La composta no es rentable para muchos agricultores, el costo del transporte es elevado, la calidad y los tiempos de entrega no son confiables.
- La falta de subsidio para operar las plantas de compostaje.
- Problemas de flujo de dinero relacionados con contrataciones y concesiones privadas para el manejo de la energía eléctrica y los centros de compostaje.

### **Factores sociales**

- Falta de cultura del manejo de la digestión anaerobia, existe un desconocimiento de los usos y beneficios de esta.
- Las plantas de digestión anaerobia en México no son conocidos.
- La digestión anaerobia ha sido estigmatizada y tiene una mala reputación a raíz de algún antecedente, hoy en día los posibles compradores desconfían del producto.
- Falta de apoyo o rechazo de la planta de digestión anaerobia por parte de la sociedad civil, vecinos inconformes por olores y ruido.

### **Factores de planeación y administrativos**

- La producción de la composta es mayor que la demanda en varios municipios, falta un mayor aprovechamiento del producto.
- No existe un mercado desarrollado para la composta.
- La comercialización de la composta no se considera como parte integral del proyecto de planeación y manejo de la digestión anaerobia.
- Falta estructurar a largo plazo el manejo de una planta de digestión anaerobia de gran escala.
- Estudios de factibilidad mal realizados, falta una mayor transparencia y claridad en los costos de producción de la planta de digestión anaerobia.
- La inadecuada ubicación de la planta de digestión anaerobia, su lejanía con respecto a sitios de transferencia, al origen de los residuos o al mercado de consumo.
- La falta de espacio para la elaboración de la planta de digestión anaerobia.

- Faltan vehículos y recursos para garantizar el acopio, ineficiencia en el acopio del material en los mercados y en el sector industrial.
- La falta de un programa incentivos para la comunidad causa una baja eficiencia en la separación de los residuos.
- La falta de cooperación de los recolectores quienes no entregan el producto orgánico a la planta o la separan inadecuadamente.
- Falta de comunicación y coordinación entre los recolectores y los trabajadores de la planta de digestión anaerobia.
- La burocracia causa atrasos en la operación de la planta.
- Poca motivación de los recolectores para capacitar a la población y recolectar la basura separada.
- La producción de los productos no está bien distribuida en la ciudad.

### **Factores técnicos**

- No se realizan pruebas preliminares del proceso antes de la instalación de la planta, los cambios al proceso se efectúan conforme se presentan los problemas en la construcción.
- La vulnerabilidad de las plantas digestión anaerobia ante la alta probabilidad de incendio.
- Falta de adecuada separación del material en el servicio de acopio y transferencia, la limpieza de residuos mal separados en la planta toma mucho tiempo y esfuerzo.
- Falta de capacitación del personal en la planta de digestión anaerobia.
- Fallas mecánicas que causan atrasos en la producción.
- Introducción de tecnologías extranjeras incompatibles o que no se han probado localmente, el diseño y el funcionamiento de la maquinaria no se adapta a las características del residuo mexicano.
- Compra de maquinaria muy especializada cuyas refacciones resultan difíciles de conseguir localmente.

- La falta de equipamiento y maquinaria adecuada para operar las plantas de compostaje causa atrasos considerables en la producción.
- La pobre estimación del volumen de residuos a recibir, sus características y composición, por estaciones del año.
- Problemas de abastecimiento de agua en la planta.
- Pobre control de calidad de la composta y producción de energía eléctrica bajo.
- Falta de control de calidad de las pilas de composta y las dificultades en el proceso de volteo.
- Diseños inadecuados de la maquinaria (motogeneradores, contenedores, bandas transportadoras y grúas excavadoras).
- Los sistemas automatizados de control de la maquinaria no han dado buenos resultados.
- Existe una constante fuente de problemas de mantenimiento creando altos costos, los martillos de los molinos se desgastan rápidamente debido a que son muy abrasivos los residuos mexicanos.
- Alta intensidad de ruido
- Baja productividad de los trabajadores.

## **5.2 ESTUDIO DE MERCADO**

### **5.2.1 BIOGÁS**

El biogás contiene un alto porcentaje en metano, CH<sub>4</sub> (entre 50-70%), por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible. Debido a su alto contenido en metano, tiene un poder calorífico algo mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural. Un biogás con un contenido en metano del 60% tiene un poder calorífico de unas 5500 kcal/Nm<sup>3</sup> (6,4 kWh/Nm<sup>3</sup>). Es decir, salvo por el contenido en H<sub>2</sub>S, es un combustible ideal, con unas equivalencias que se muestran en la Figura 13 (IDEA, 2007).

El mercado principal de la energía eléctrica generada es:

- Red de suministro de energía eléctrica (para su uso en casa-habitación, población general y cedes y edificios gubernamentales).
- Alumbrado de vía pública (calles, avenidas, parques, etc.).

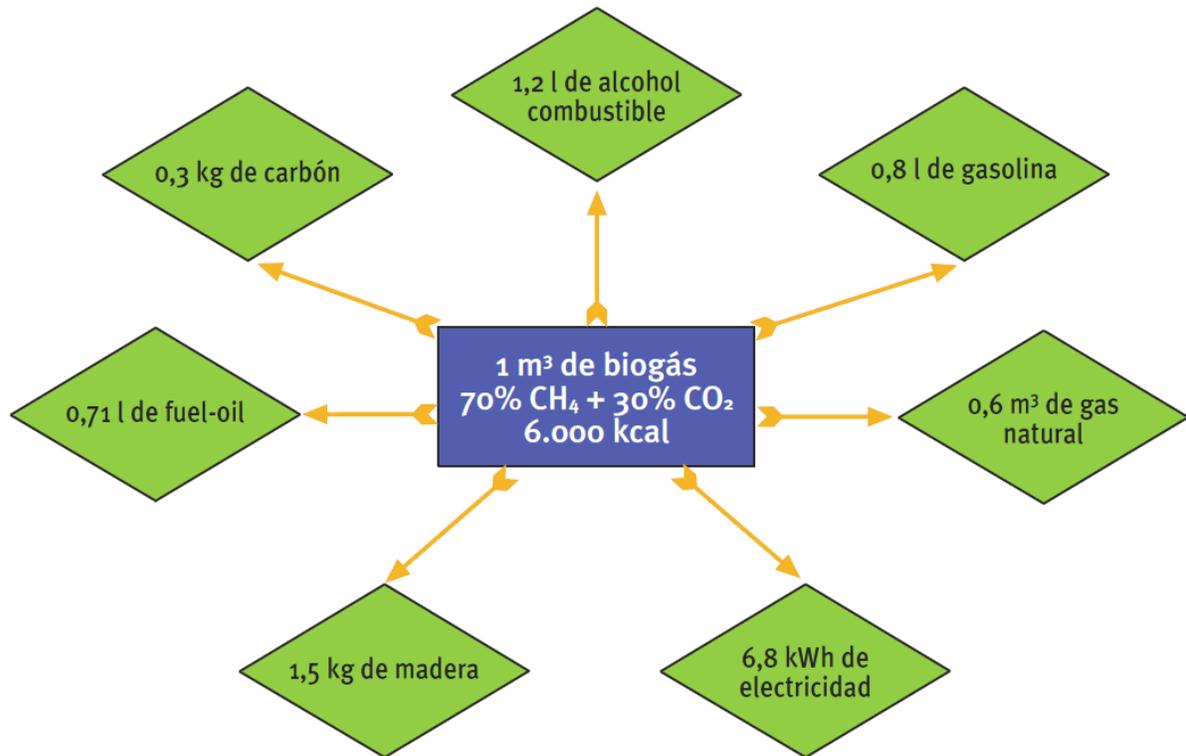


Figura 13. Equivalencias del poder calorífico del biogás frente a otras fuentes de combustión.

Fuente: IDEA, 2007.

A partir de las referencias, se encontró que la relación de generación de biogás es equivalente a

$$DQO_{afuente} = DQO_{efluente} + DQO_{biogás}$$

Si se considera un biogás formado exclusivamente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, y teniendo en cuenta que la DQO del CO<sub>2</sub> es nula, la DQO eliminada en el residuo se correspondería con la DQO obtenida en forma de metano, lo cual significa 2857 kg DQO por m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>, ó 0.35 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por kg de DQO eliminada, a P=1 atm y T=0 °C, ó 0.38 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> a P=1 atm y T=25 °C. Atendiendo a la potencia calorífica del metano, estos valores corresponderían aproximadamente a 3,5 kW·h/kg DQO

eliminada, en unidades de energía primaria. Esta conservación de la DQO en el proceso de digestión anaerobia para un residuo con un 10% de la DQO no biodegradable, en el que el 90% de la DQO inicial se transforma en CH<sub>4</sub> (IDEA, 2007).

Basado en el estudio realizado por CONACyT-FORDECyT 174710 (2013), se determino en la caracterización fisicoquímica de los RSOM que se encuentra una relación de 231 g de DQO por kilogramo de la fracción orgánica con un contenido mínimo del 60% de metano.

Basado en estos datos, se puede determinar que hay una generación de 231 kg de DQO por tonelada de RSOM. Usando la conservación antes mencionada se determina que 208 kg de DQO por tonelada de RSOM se convierten a biogás lo que equivale a 79 m<sup>3</sup> de éste por tonelada tratada (0.38 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> a condiciones estándar de presión y temperatura).

Con estos datos, se determinó la energía eléctrica generada diaria para el tratamiento de mil toneladas diarias de RSOM como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Resumen generación e. eléctrica a partir del biogás

Concepto	Cantidad	Unidades
Generación de biogás	0.38	m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> /kg de DQO eliminado
DQO	231	g/kg de RSOM
DQO <sub>biogás</sub>	208	g/kg de RSOM
Generación de biogás	79	m <sup>3</sup> /tonelada
1 m <sup>3</sup> de biogás	6.8	kWh
RSOM a tratar	1000	T
Biogás día	79002	m <sup>3</sup>
E. generada día	537214	kW
E. generada	22384	kWh
<b>E. generada</b>	<b>22</b>	<b>MWh</b>

Una rubro muy importante a determinar para la viabilidad del proyecto, son los ingresos anuales generados, por lo que es de suma importancia determinar cuánto equivale (costo) la producción de la energía eléctrica generada, para lo cual, se consultaron las tarifas del mes de febrero de 2015 consultadas en el sitio web de la CFE, donde se encontró que la energía “de media” tiene un costo de 2.801 pesos

por kWh y que la energía “de baja” 3.334 pesos por kWh, por lo que se hizo un análisis para determinar los ingresos de cada una de estas como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Ingresos a la planta de DA por concepto de energía eléctrica de “media” y “baja”.

Concepto	TIPO DE ENERGÍA		Unidades
	Media	Baja	
Costo de la energía	\$ 2,80	\$ 3,33	MXN
E. generada día	22384	22384	kWh
t generación	24	24	hr
t generación	365	365	días
Ingreso aparente	\$ 549	\$ 654	M MXN <sup>1</sup>
<b>Ingresos real<sup>2</sup></b>	<b>\$ 505</b>	<b>\$ 601</b>	<b>M MXN<sup>1</sup></b>

<sup>1</sup>M MXN = Millones de pesos mexicanos

<sup>2</sup>Se considera el autoconsumo de la planta de un 8%

Estos ingresos se deben de tomar en cuenta para determinar la viabilidad en el análisis costo-beneficio. Adicional a este cálculo, en los antecedentes de los costos de la gestión de los RSOM en el DF, se determinó que al realizar este proyecto, de las mil toneladas tratadas se ahorra cerca de **130 millones** de pesos anuales derogados por el gobierno por el traslado y disposición de estas.

### **5.2.2 COMPOSTA**

Para asegurar la utilización de la composta producida es necesario identificar posibles usuarios o programas del gobierno antes, así como los mecanismos de entrega. Los usuarios pueden incluir, entre otros, a las áreas encargadas de parques y jardines del municipio (incluyendo aplicación en camellones), instituciones y empresas que cuenten con grandes extensiones de áreas verdes, agricultores de la región y público en general (SEMARNAT, 2006).

Dentro de las opciones de destino de la composta, se plantean los siguientes posibles:

- Delegaciones
- Áreas verdes
- Viveros

- Parques
- Camellones
- Glorietas
- Ejidos
- Suelo de conservación
- Barrancas
- Vecinos (público en general)
- Terrenos con aptitud de aprovechamiento
- Suelo agrícola
- Cultivos
- Programas relacionados
- Venta

Para ello se pueden aplicar los modelos de negocio existentes en las plantas de composta del DF.

Para el cálculo de los ingresos por la venta de composta se usó como base de diseño que por cada tonelada de RSOM tratada se generan 0.5 toneladas de composta y que el precio final de venta es de \$3 000 MXN por tonelada, con lo cual obtenemos la Tabla 12.

**Tabla 12. Ingresos a la planta de DA por concepto de venta de composta.**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
RSOM	365000	t/año
Composta	182500	t/año
Costo composta	3000	\$/t
<b>Ingresos por composta</b>	<b>547,5</b>	<b>M MXN/año</b>

Este resultado considera que la generación total de composta es vendida, así como considera la venta sin especificación de si es embalada, solo considera el ingreso mínimo de venta. Para tomar en cuenta datos más cuantificables, se deben de realizar los cálculos basados en estudios de mercado más específicos. El presente solo considera el precio mínimo de venta en el mercado mexicano de \$3 pesos por kilogramo.

### 5.2.3 BONOS DE CARBONO

En el marco del mercado de carbono, que nació a partir del Protocolo de Kioto, con el Mecanismo del Desarrollo Limpio (MDL), los países desarrollados (Anexo 1 del Protocolo) están obligados a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero que produce el calentamiento global. Y una opción es pagar por un proyecto de captación de esos gases en cualquier país en desarrollo o pagar por proyectos que eviten la emisión de más gases contaminantes, se considera 1 bono de carbono igual a una tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) expuesta a la atmósfera (Caballero, 2011).

Producir metano de desechos es el principal negocio, ya que una tonelada de este gas equivale a 21 toneladas de CO<sub>2</sub>. Los bonos se pagan por CO<sub>2</sub> equivalente (1 ton. CH<sub>4</sub> = 21 ton. CO<sub>2</sub>). Basta con producir una tonelada de metano para lograr 21 bonos. Esta diferencia se debe a que el metano es 21 veces más dañino que el CO<sub>2</sub> como gas de efecto invernadero y, por tanto, se paga más para evitar su emisión.

Debido a que el Protocolo de Kioto ya concluyó no se tomara en cuenta este rubro en la generación de ingresos, aunque se muestran los resultados obtenidos de este rubro en la Tabla 13. Los costos por bono de carbono oscilan entre los 3-10 USD según la característica de las emisiones,

Tabla 13. Generación económica de flujo de efectivo generado por Bonos de carbono.

	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	Unidades
Generación día	4.8	2.4	t/día
Generación año	1755.7	877.8	t/año
B. de carbono	36868.7	877.8	B. C.
Venta de B. de carbono	\$ 110 606	\$ 2 633	@3 USD
	\$ 221 212	\$ 5 267	@6 USD
	\$ 368 687	\$ 8 778	@10 USD
Venta de B. de carbono (m MXN)	\$ 1 648	\$ 39	@3 USD
	\$ 3 296	\$ 78	@6 USD
	\$ 5 493	\$ 131	@10 USD
<b>Total (M MXN)</b>	\$ <b>2</b>		@3 USD
	\$ <b>3</b>		@6 USD
	\$ <b>6</b>		@10 USD

El resultado obtenido se da con la analogía anterior (1 t CH<sub>4</sub> = 21 t CO<sub>2</sub> = 21 bonos de carbono), el resultado total, es la suma de la venta de bonos generado por el metano y el dióxido de carbono reportada en millones de pesos.

### 5.3 CAPACIDAD

La capacidad de la planta a construir será de 1000 toneladas diarias de RSOM recibidos de sitios de transferencia. Ya que la capacidad de la planta tratará cerca del 15% de los RSOM generados diariamente se debe prever una ampliación futura o bien el uso otras tecnologías para el tratamiento de la restante materia orgánica.

### 5.4 TECNOLOGÍA

Basados en estudios realizados por CONACyT-FORDECyT 174710 (2013), sobre caracterización física y fisicoquímica de los RSU se observa que en la Ciudad de México, los materiales en mayor proporción de la materia orgánica generada, son los residuos de frutas, verduras y jardinería, los cuales representan en conjunto al menos el 64% del total de la fracción orgánica. Por otra parte, los residuos de alimentos, como carne, pescado, pasta, cereal, lácteos y huevos representan un porcentaje mucho menor, en un intervalo del 4.4 al 6.4 % como se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Composición de RSOM en el DF. Fuente: CONACyT-FORDECyT 174710 (2013).

Tipo de residuo	Composición (%)
Frutas y verduras	40.1
Jardinería	29.2
<b>Composteables</b>	<b>23.7</b>
Carne y pescado	3.7
Pasta y cereal	0.6
Restos de animales	0.5
Lácteos y huevo	0.1
Otros	2.1

Los resultados muestran que el volumen de residuos de alimentos está por encima de los residuos de jardinería (Durán *et al.*, 2013). La variación en la relación y generación de estos residuos depende del nivel de riqueza e industrialización de cada país. En general se espera que los países con mayores riquezas generen

residuos con una mayor cantidad de subproductos inorgánico (TWB, 2012). Este resultado es importante para determinar la DA anaerobia como método para el tratamiento, ya que es la materia prima del proceso.

En la Tabla 15 se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica realizada en laboratorio (Durán *et al.*, 2013).

Tabla 15. Caracterización fisicoquímica de RSOM en el DF. Fuente: CONACyT-FORDECyT 174710 (2013).

Característica	Cantidad (g/kg)	Porcentaje (%)
<b>Humedad</b>	-	77%
<b>Sólidos Totales</b>	226.0	19%
<b>Sólidos Fijos</b>	49.3	4%
<b>Sólidos Volátiles</b>	177.7	15%
<b>Demanda Química de Oxígeno</b>	231.0	19%
<b>Fósforo Total</b>	1.2	0%
<b>Nitrógeno-Kjeldahl</b>	6.8	1%
<b>Cenizas</b>	40.6	3%
<b>Grasas</b>	18.2	1%
<b>Proteínas</b>	42.7	4%
<b>Carbono Orgánico Total</b>	151.2	12%
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno</b>	98.8	8%
<b>Carbohidratos</b>	125.1	10%
<b>Fibras</b>	46.5	4%

Como se puede observar en la Tabla 15, los RSOM presentan un 77% de humedad, así como un 19% de sólidos totales, con lo cual **se puede definir** que es viable el uso de la **DIGESTIÓN ANAEROBIA VÍA SECA**.

Los principales beneficios de esta tecnología son:

- Se puede controlar el tiempo de residencia,
- Su flexibilidad en la temperatura,
- Tiene una menor acumulación de inertes,
- Permite una posterior ampliación de la planta.

Por lo que se utilizará la digestión anaerobia para el tratamiento de los RSOM.

Así como los siguientes módulos o áreas:

- Área de recepción y almacenaje de los RSOM
- Tratamiento del aire (eliminación de olores y de GEI)
- Planta de composta
- Área de almacenamiento de biogás
- Refinación del biogás
- Planta de generación eléctrica

Además de la digestión anaerobia para el tratamiento de los RSOM, han existido esfuerzos para introducir otras opciones y tecnologías, algunas tradicionales y otras novedosas, como son la incineración, pirolisis, gasificación, mineralización, hidrólisis, tratamiento mecánico-biológico, co-procesamiento, plasma, relleno seco (considerado en su componente de tratamiento), etc. Sin embargo, el impacto en el mercado mexicano puede considerarse como irrelevante, debido al escaso éxito en la implantación de estas opciones en los municipios del país.

### **5.5 LISTA DE EQUIPOS PRINCIPALES**

En la siguiente lista se pueden observar los equipos principales que contempla la planta de tratamiento de RSOM de forma general, los cuales deben de ser corroborados por la(s) empresa(s) que obtengan la licitación para la construcción de la misma determinando el arreglo que mejor cumpla con los requisitos.

- Banda transportadora
- Trituradora de rodillos
- Transportadora de tornillo
- Criba
- Macerador
- Extrusor
- Tanque pre-alimentación
- Tanque biodigestor (digestor anaerobio)
- Antorcha (quemador de gas)
- Tanque de recuperación de agua

- Tanque o bolsas de almacenaje de gas
- Filtro para gas
- Motogeneradores
- Filtro prensa
- Secador rotatorio
- Generador eléctrico
- Embaladora
- Bombas
  - Bomba de recirculación
  - Bomba agua proceso
  - Bomba de lodos
  - Bomba de agua de recuperación

En la Figura 14 se puede observar un arreglo general de una planta de DA.



Figura 14. Arreglo general de una planta de DA. Fuente: Agencia de residuos de Cataluña, 2009.

Donde:

1. Edificio de servicios y oficinas
2. Zona de recepción de RO líquidos
3. Zona de recepción de los RSOM
4. Acondicionamiento y/o mezcla de residuos
5. Alimentación del digestor
6. Digestor
7. Deshidratación del digerido
8. Digerido deshidratado (fibra)
9. Fracción líquida
10. Gasómetro
11. Antorcha de seguridad
12. Adecuación del biogás
13. Motores de cogeneración
14. Distribución de E. Eléctrica
15. Aprovechamiento de energía térmica

## 5.6 LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

El estudio considera la construcción de la planta en el antiguo relleno sanitario conocido como **Bordo Poniente**, ubicado en la Autopista Peñón Texcoco, km 2.5. Zona Federal de Texcoco.



Figura 15. Localización de la planta. Fuente: Google maps, 2014.

Se requiere una superficie aproximada de 10 hectáreas, espacio requerido para la recepción, almacenamiento, pretratamiento, tratamiento, recuperación de biogás, generación de energía eléctrica, planta de compostaje, embalado y bodegas.

## **5.7 ANÁLISIS COSTO BENEFICIO**

Es la evaluación que permite determinar la rentabilidad de un programa o proyecto de inversión considerando los costos y beneficios monetarios en que incurre la entidad o dependencia ejecutora. Dicha evaluación permite determinar si el proyecto es capaz de generar un flujo de recursos suficiente para hacer frente a todas sus obligaciones, incluyendo las financieras y fiscales, así como sus gastos de operación y mantenimiento (SHCP, 2013).

Bajo esta perspectiva, se deben incluir todos los costos y beneficios privados que genera el programa o proyecto para la dependencia o entidad ejecutora, incluidos los costos financieros por préstamos de capital, pago de impuestos e ingresos derivados de subsidios y transferencias, entre otros. Los precios empleados serán de mercado, incluyendo el costo de oportunidad de los recursos (SHCP, 2013).

Para determinar un orden de magnitud del costo de inversión, se pueden usar varios métodos, considerando parámetros similares de lugar de construcción, divisa, capacidad y tipo de planta (tecnología).

Con la finalidad de tener un orden de magnitud preciso, se debe de realizar el planteamiento del costo probable de la elaboración de la planta, para lo cual se usaron los siguientes métodos:

- Investigación bibliográfica.
- Estimación de orden de magnitud.

A partir de los datos encontrados se realizaron:

- Operaciones simples a partir de tablas.
- Operaciones simples a partir de funciones encontradas.
- Estimación a partir especificaciones similares (capacidad, tecnología, etc.).

- Escalamiento o extrapolación basada en otra planta o referencias (uso de la “regla de los seis décimos”).

### 5.7.1 Gastos

Con el estimado de la Tabla 7 se puede tener una idea de los costos de inversión y operación a nivel de prefactibilidad, los cuales se referencian también en dólares por ser una divisa internacional. En todas las fuentes encontradas, no se considera el costo de traslado de los residuos a la planta

- El costo de inversión de la planta es alrededor de 1,365 millones de pesos (~90 millones de dólares).
- El costo de operación y mantenimiento anual de la planta es de alrededor de 1,025 millones de pesos (~70 millones de dólares).

En estos costos no se considera el terreno donde se construirá la planta, así como el transporte y recolección de los RSOM ya que estos serán “donados” o ya existe una infraestructura sobre la cual trabajar ellos.

### 5.7.2 Ingresos

En la Tabla 16 se muestran los resultados obtenidos en el estudio de mercado previo.

**Tabla 16. Resumen de ingresos anuales**

INGRESOS (M MXN)				
Energía eléctrica*		Composta	TOTALES (e+c)	
Media	Baja		Media	Baja
\$ 505	\$ 601	\$ 548	<b>\$ 1 053</b>	<b>\$ 1 149</b>

\*Se restó el consumo de energía eléctrica de la planta de 8% de la generación anual

M MXN = millones de pesos mexicanos

Con estos resultados se determina un ingreso anual de:

- \$1053 millones de pesos para la venta de energía “de media”
- \$1149 millones de pesos para la venta de energía “de baja”

En la Tabla 17 se muestran los resultados obtenidos en el estudio de mercado previo más el ahorro que tendría el GDF

**Tabla 17. Resumen de ingresos anuales (GDF)**

INGRESOS (M MXN)					
Energía eléctrica*		Composta	GDF	TOTALES (e+c)	
Media	Baja			Media	Baja
\$ 505	\$ 601	\$ 548	\$ 102	\$ 1.155	\$ 1.251

\*Se restó el consumo de energía eléctrica de la planta de 8% de la generación anual

Con estos resultados se determina un ingreso anual de:

- \$1155 millones de pesos para la venta de energía “de media”
- \$1251 millones de pesos para la venta de energía “de baja”

### **5.7.3 VPN, TIR y TRI**

Supuestos

- Se considera una tasa social de descuento (TSD) del 10 % (DOF, 2013)
- No se considera tasa de interés
- Se consideran 20 años de vida útil
- Se considera una inversión inicial de \$1365 millones de pesos
- Se considera un gasto anual de operación y mantenimiento de \$1025 millones de pesos

Se realizaron 2 ejercicios para el cálculo del VPN, TIR y TRI, en el primero de ellos, se consideraron los ingresos determinados en la Tabla 16. Dando como resultado la Tabla 18 con los resultados obtenidos.

**Tabla 18. VPN, TIR y TRI con ingresos de e. eléctrica y composta**

	Media	Baja	TSD
<b>VPN</b>	-805	1118	SI
	-1044	59	NO
<b>TIR</b>	<b>-7,3%</b>	<b>6,5%</b>	
<b>TRI</b>	2,1%	9,1%	

En estos resultados se determina que ninguna de las opciones es viable económicamente, ya que aunque en el caso de la venta de energía “de baja” la TIR es positiva, es menor a la Tasa Social de Descuento, lo que resulta en pérdidas económicas.

En el segundo ejercicio, se considera como un ingreso adicional lo que el gobierno gasta actualmente (\$100 millones de pesos anuales) por la disposición de las mil toneladas diarias mostrando los resultados en la Tabla 17.

Tabla 19. VPN, TIR y TRI con ingresos de e. eléctrica, composta y presupuesto del GDF.

	Media	Baja	TSD
<b>VPN</b>	8042	14989	SI
	128	1231	NO
<b>TIR</b>	<b>7,1%</b>	<b>15,7%</b>	
<b>TRI</b>	9,5%	16,6%	

Con estos resultados se puede determinar que el proyecto es viable con la venta de energía eléctrica “de baja”, pero significa que el gobierno seguirá derogando un gasto por disposición de los RSOM de alrededor de \$40 millones de pesos equivalente a \$110 pesos por tonelada.

## **5.8 CONSTRUCCIÓN**

Se requiere un *know how* para la construcción de la planta, ya que no existe información precedente en México de esta tecnología, así como no hay una planta de esta magnitud construida en ninguna parte del mundo, por lo que es necesario que el GDF realice las bases de una licitación para el proyecto, así como de tomar la decisión de realizarlo bajo régimen público, privado o mixto.

Algunos apoyos a este tipo de proyectos son los siguientes:

- FIRCO. Proyectos de generación y aprovechamiento de biogás en explotaciones pecuarias
- SEMARNAT. Recursos de la Unión Europea a proyectos que combaten el cambio climático
- BANCOMEXT. programas de apoyo para proyectos sustentables
- CFE/FIDE. Financiamiento proyectos de generación de energía eléctrica con biogás
- Otros programas Estatales y Federales

Para llevar a cabo la construcción de la planta de DA, se considera la ejecución de PROYECTOS DE ASOCIACIÓN PÚBLICO-PRIVADA descritos en el sitio web de la SHCP<sup>9</sup>, donde se puede encontrar (descargar) el *Manual que establece las disposiciones para determinar la rentabilidad social, así como la conveniencia de llevar a cabo un proyecto mediante el esquema de Asociación Público-Privada*, así como el *Índice de Elegibilidad de Proyectos en Asociaciones Público Privadas en Infraestructura y Servicios*, en los cuales se describe la información necesaria para el cumplimiento para la elaboración del proyecto.

## **5.9 NORMATIVA**

Las siguientes leyes o reglamentos se deben de cumplir para la construcción de la planta de digestión anaerobia en el DF:

- Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados.
- Ley de Desarrollo Rural Sustentable.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
- Ley Ambiental del Distrito Federal.
- Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal.
- Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
- Reglamento de la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal.

Una vez puesta en operación la planta, se deben considerar las siguientes normas:

Efluentes Sólidos

- NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
- NADF-020-AMBT-2011 que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos

---

<sup>9</sup> [http://www.shcp.gob.mx/EGRESOS/ppi/Paginas/Proyectos\\_APP.aspx](http://www.shcp.gob.mx/EGRESOS/ppi/Paginas/Proyectos_APP.aspx) (febrero, 2015).

sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el distrito federal.

#### Efluentes Líquidos

- NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residual en agua y bienes nacionales.
- NOM-120-SSA1-1993 Requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados.

#### Efluentes gaseosos

- NOM-086-ECOL-1994 Especificaciones sobre protección ambiental que deben de reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles.
- NOM-085-SEMARNAT-1994 Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establecen los niveles máximos permisibles de emisión a la atmosfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxidos de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión
- NMX-AA-009-1993-SCFI Contaminación Atmosférica - fuentes fijas - determinación de flujo de gases en un conducto por medio de tubo pitot.
- NMX-AA-010-SCFI-2001 contaminación atmosférica - fuentes fijas - determinación de la emisión de partículas contenidas en los gases que fluyen por un conducto - método isocinético.

## **6. ANALISIS DE RESULTADOS**

### **6.1 SOCIAL**

La elaboración del proyecto, puede realizar mejoras de infraestructura en los alrededores de bordo poniente; así como controlar los problemas existentes de la fauna y malos olores existentes en dicha zona. La cantidad de gente beneficiada con un tratamiento de los RSOM por este proyecto hace que sea real la promoción del mismo.

### **6.2 TÉCNICO**

La construcción del proyecto debe de realizarse por alguna empresa con experiencia en la tecnología de la digestión anaerobia vía seca como una obra de ingeniería “llave en mano” (turnkey contract), después de haberse realizado las licitaciones correspondientes.

### **6.3 AMBIENTAL**

Al tener un avance en el desarrollo sustentable con este proyecto, la reducción de los gases de efecto invernaderos generados en rellenos sanitarios y los beneficios a la sociedad, hacen de este proyecto una necesidad prioritaria en la ciudad de México. Un ejemplo de ello, es que el metano tiene 33 veces mayor efecto invernadero que el anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>), (Sáez, 2009), por lo que el evitar a éste (el metano) llegue a la atmósfera, debe de ser una prioridad.

### **6.4 ECONÓMICO**

De realizarse el proyecto, el GDF reducirá gastos significativos de traslado a rellenos sanitarios y pagos por disposición a terceros de alrededor de 100 millones de pesos anuales de las mil toneladas diarias que comprende este trabajo (ésto aumentaría mientras más RSOM se tratasen).

La generación de energía eléctrica se puede aprovechar para calles y avenidas, reduciendo los gastos erogados de los mismos a la CFE.

## **6.5 EJECUCIÓN DEL PROYECTO**

Del impacto potencial en la elaboración del proyecto se determinan los siguientes supuestos:

1. Incremento en el aprovechamiento y comercialización de los RSOM.
2. Reducción del riesgo de focos de infección en los sitios de disposición de residuos.
3. Reducción del riesgo de contaminación de suelos y acuíferos.
4. Incremento en la inversión en sistemas de tratamiento de RSOM.
5. Incremento en el número de recursos humanos calificados en el tratamiento de RSOM.
6. Incremento en el concomitamiento, desarrollo e innovación de tecnologías de procesamiento de materiales estratégicos.
7. Incremento en la caracterización de los RSOM para su tratamiento.
8. Incremento en la optimización del mejor sistema generado para la región.
9. Incremento en la creación y fortalecimiento de redes de conocimiento entre instituciones de investigación, universidades y empresas nacionales, en materia de tratamiento de RSOM.

En resumen, en la Tabla 20, se puede analizar lo que ocurre en la actualidad sobre el tratamiento y gestión de los RSOM y lo que pasaría con la realización del proyecto.

Tabla 20. Comparativa del proyecto.

	<b>SIN PROYECTO</b>	<b>CON PROYECTO</b>
Sociales	Problemas de salud e higiene Molestia de la sociedad	<b>Se promueve el desarrollo sustentable</b> <b>Promoción a una cultura de RRR*</b>
Políticos	Incumplimiento de normativa Carencia de separación de los RSU en el DF Saturación de rellenos sanitarios en las proximidades al DF	<b>Se cumple con la normativa correspondiente</b> <b>Tratamiento y aprovechamiento de los RSOM</b> <b>Se usa un área definida para la disposición</b>
Ambientales	Acumulación de RSOM Generación de GEI  Malos olores en las inmediaciones Fauna nociva	<b>Se reduce el envío a rellenos sanitarios</b> <b>Reducción de GEI a la atmósfera y aprovechamiento del biogás</b> <b>Eliminación de malos olores a la atmósfera</b> <b>Se elimina la fauna nociva en el lugar al estar en movimiento para su tratamiento</b>
Económicos	Tiempos de traslado largos y en aumento Aumento del costo de traslado con el tiempo Gastos por disposición a terceros	<b>Tiempo de traslado bajo y fijo</b> <b>Costo de traslado bajo</b>  <b>Aprovechamiento de los RSOM en biogás y/o energía eléctrica</b> <b>Uso de la energía eléctrica para calles y avenidas</b> <b>Generación de ingresos al GDF</b>

\*Reducir, reusar y reciclar

Como se puede observar en la Tabla 20 los beneficios de este proyecto, cubren los aspectos más importantes para la realización del mismo.

## 7. CONCLUSIONES

Los datos reportados en la SEDEMA, el INEGI y BANOBRAS sobre la generación de RSOM en el DF son suficientes para respaldar la viabilidad de la construcción del proyecto en este aspecto, al encontrarse que la gente beneficiada y los residuos generados diarios sirven para cubrir las mil toneladas diarias para la planta de DA.

Se logró realizar el estudio a nivel de prefactibilidad para la construcción de la planta de tratamiento de mil toneladas diarias de RSOM por medio de la digestión anaerobia como tecnología. La inversión del proyecto sería de \$1 365 millones, y el costo de operación y mantenimiento anual de \$1 025 millones.

Con los resultados obtenidos, se puede determinar que es viable la ejecución del proyecto considerando que la gestión de los RSOM todavía tendría un costo aproximado de \$110 por tonelada. Se debe considerar que este trabajo es solo un estimado de orden de magnitud, pero sirve para determinar que se puede continuar la realización de un estudio de factibilidad. En la Tabla 21 se muestran los factores de viabilidad económica que permiten respaldar con la ejecución del proyecto.

Tabla 21. Conclusiones de viabilidad económica para realizar el proyecto.

	Baja	TSD
VPN	14989	SI
	1231	NO
TIR	15,7%	
TRI	16,6%	

## 8. REFERENCIAS

- Adams, L. S. (2008). *California Integrated Waste Management Board*. California: California Environmental Protection Agency.
- BANXICO. (febrero de 2015). *Bánco de México*. Obtenido de <http://www.banxico.org.mx/dyn/portal-mercado-cambiario/index.html>
- Cámara de Diutados. (23 de Marzo de 2014). *Cámara de Diutados*. Obtenido de H. Congreso de la Unión: <http://www.diputados.gob.mx/>
- Ciudad de México. (16 de Septiembre de 2013). *Obras en mi ciudad*. Obtenido de PRESENTA MANCERA PLAN INTEGRAL DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS 2013-2018: <http://www.obrasenmiciudad.df.gob.mx/?p=73297>
- Ciudad de México. (Abril de 2014). *Secretaría del Medio Ambiente*. Obtenido de SEDEMA: <http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/>
- Clarke, W. P. (2000). Cost-benefit analysis of introducing technology to rapidly degrade municipal solid waste. *Waste Management & Research*, 510-524.
- Compass International Consultants, Inc. (2009). *The 2009 Global Construction Cost and Reference Yearbook, 9th Annual edition*. Morrisville, PA, USA.
- CONACyT-FORDECyT 174710. (Mayo de 2013). *Generación de un sistema piloto de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales*. México, Distrito Federal, Facultad de Química, UNAM.
- Cruz, A. (17 de Septiembre de 2013). Presentan el plan basura cero en el DF. *La jornada*.
- Departament of Energy and Climate Change. (Junio de 2011). *Anaerobic Digestion. Strategy and Action plan*. Londres, Reino Unido.
- Díaz, J. A. (s.f.). *Introducción a la INGENIERÍA AMBIENTAL*. (IPN, Ed.) Alfaomega.
- Fernández, E. (8 de Febrero de 2012). Edomex paga \$210 por tonelada de basura en El Milagro. *El Universal Estado de México*.

- Gobierno de España. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios. Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía, IDAE. BESEL, S.A. Departamento de Energía.*
- Heinke, J. G. (1999). *Ingeniería Ambiental.* Prentice Hall.
- IDAE. (2007). *Biomasa. Digestores anaerobios.* España.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA. (FEBRERO de 2014). *INEGI.* Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/>
- Jiménez, A. (2003). *Diseño de procesos en Ingeniería Química".* Reverté.
- Knoten Weimar. (22-24 de Noviembre de 2009). Workshop „Biogas-Plant-technology planning. 6-costs of anaerobic digestion, (pág. 5). Beijing.
- Max S. Peters, K. D. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers.* McGraw-Hill.
- Méndez, F. (16 de Enero de 2012). Cuesta 40% más a GDF el traslado de basura. *El economista.*
- Monitoreo de Medios. (6 de Noviembre de 2014). *Toneladas de basura, millones en costo.* Obtenido de Agencia de Gestión Urbana (AGU): <http://www.agu.df.gob.mx/sintesis/index.php/toneladas-de-basura-millones-en-costo/>
- Perry, R. G. (1997). *Manual del Ingeniero Químico (6ª ed. (3ª en español) ed.).* McGraw-Hill.
- Raibley, T. (30 de Mayo de 2012). Economics of Anaerobic Digestión.
- Robles, J. (2 de Octubre de 2012). El gobierno capitalino lleva su basura a Cuautla. *El universal Distrito Federal.*
- Sáez, D. A. (30 de octubre de 2009). *Dirección general de comunicaciones.* Obtenido de Universidad Técnica Federico Santa María: <http://www.dgc.usm.cl/2009/10/30/los-secretos-del-gas-metano/>

- Schieder, D. &. (2000). Thermal Hydrolysis (TDH) as a pretreatment method for the digestion of organic waste.
- SEMARNAT. (12 de 09 de 2001). *Minimización y manejo ambiental de los Residuos Sólidos*. Obtenido de <http://librosdeingenieriagratis.com/minimizacion-y-manejo-ambiental-de-los-residuos-solidos-semarnat/>
- SEMARNAT. (2006). *Manual de compostaje municipal*. México: ISBN: 970-9983-05-9.
- SEMARNAT. (2013). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave de Desempeño Ambiental. Edición 2012*. Compendio de Estadísticas Ambientales, Semarnat, México. Obtenido de <http://www.semarnat.gob.mx>
- SEMARNAT. (2013). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave de Desempeño Ambiental (2012 ed.)*. México. Obtenido de <http://www.semarnat.gob.mx>
- SHCP. (2013). *Lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión*. México: DOF.
- Silvenses., H. N. (2009). *Decisiones de inversión en Plantas Químicas modelos y criterios*. MÉXICO: FACULTAD DE QUÍMICA UNAM.
- Tsilemou K., D. P. (2006). Approximate cost functions for solid waste. *Waste Management & Research*, 310-322.
- TWB, T. W.-T. (2012). *WHAT A WASTE A Global Review of Solid Waste Management*. Urban Development Series Knowledgepapers.

## **9. ANEXOS**

### **ANEXO I. ANTECEDENTES DE NORMATIVA EN MÉXICO<sup>10</sup>**

En las últimas décadas los aspectos del cuidado y conservación del medio ambiente, junto con el económico y social, se ha convertido en factor clave para los países de todo el mundo.

Esto como resultado del interés y reclamo de la sociedad para atender los cada vez más sensibles problemas ambientales derivados del crecimiento de las sociedades modernas. Las enfermedades asociadas a la contaminación del aire, agua y suelos, la mayor severidad de los fenómenos meteorológicos y el agotamiento de muchos recursos naturales contribuyeron, sin duda, a marcar la necesidad de considerar el componente ambiental en las políticas de desarrollo.

En México, la necesidad de atender los problemas ambientales confrontó al gobierno con la preocupante realidad de la insuficiencia de conocimiento e información que le permitiera evaluar objetivamente la situación del ambiente y los recursos naturales, así como de los factores que los afectan y el resultado de las acciones implementadas para detener y revertir su deterioro. En este contexto, uno de los pasos necesarios para formular estrategias y políticas de gobierno que conjunten armónicamente el desarrollo económico y la conservación del ambiente es contar con información suficiente y confiable.

“Los primeros antecedentes de la política ambiental en México fueron en los años cuarenta, con la promulgación de la Ley de Conservación de Suelo y Agua. Tres décadas más tarde, al inicio de los años setenta, se promulgó la Ley para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental.

En 1972, se instituye la Subsecretaría para el mejoramiento del ambiente en la Secretaría de Salubridad y Asistencia.

A lo largo de cuatro décadas (1940-1980), la estrategia de desarrollo nacional se centró en el impulso a la industrialización a través de la sustitución de importaciones.

---

<sup>10</sup> Fuente: SEMARNAT. Informe de Situación del Medio Ambiente en México... Edición 2012.

A partir de 1982, la política ambiental mexicana comenzó a adquirir un enfoque integral y se reformó la Constitución para crear nuevas instituciones y precisar las bases jurídicas y administrativas de la política de protección ambiental. En este año fue creada la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), para garantizar el cumplimiento de las Leyes y reorientar la política ambiental del país y en este mismo año se promulgó la Ley Federal de Protección al Ambiente.

En 1987, se facultó al Congreso de la Unión para legislar en términos de la concurrencia a los tres órdenes de gobierno, en materia de protección al ambiente. Con base en esa reforma y con base en las leyes anteriores, en 1988 fue publicada la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEEPEA), misma que hasta la fecha, ha sido la base de la política ambiental del país.

En 1989, se creó la Comisión Nacional del Agua (CNA).

En 1992, se transformó la SEDUE en la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y se crearon el Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).

En diciembre de 1994, se creó la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), dicha institución nace de la necesidad de planear el manejo de recursos naturales y políticas ambientales en nuestro país desde un punto de vista integral, articulando los objetivos económicos, sociales y ambientales. Esta idea nace y crece desde 1992, con el concepto de "desarrollo sustentable". Con este cambio, desaparece la Secretaría de Pesca (SEPESCA) y la SEMARNAP queda conformada de la siguiente forma:

Subsecretaría de Recursos Naturales.- Sus funciones anteriormente estaban en la SARH, SEDESOL.

- Subsecretaría de Pesca.- Sus funciones anteriormente estaban en la SEPESCA.
- Instituto Nacional de Ecología, el cual dependía de la SEDESOL.
- Instituto Nacional de la Pesca, el cual dependía de la SEPESCA.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, el cual dependía de CNA.
- Comisión Nacional del Agua (CNA).

- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).
- Comisión para el Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO).

El 30 de noviembre del año 2000, se cambió la Ley de la Administración Pública Federal dando origen a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). El cambio de nombre, va más allá de pasar el subsector pesca a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), la SEMARNAT ha adoptado un nuevo diseño institucional y una nueva estructura ya que actualmente la política ambiental es una política de estado, por lo que el medio ambiente adquiere gran importancia al establecerse como un tema transversal inserto en las agendas de trabajo de las tres comisiones de gobierno: Desarrollo Social y Humano, Orden y Respeto y Crecimiento con calidad.”<sup>11</sup>

Con estos avances, las dependencias gubernamentales han logrado un avance en programas para la conservación del medio ambiente, así como el desarrollo sustentable.

---

<sup>11</sup> Fuente: Sitio web de la SEMARNAT, Antecedentes;  
<http://web2.semarnat.gob.mx/conocenos/Paginas/antecedentes.aspx> visto el 4/04/2014

## ANEXO II. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL CÁLCULO DE COSTO DE UN CAMBIO DE MONEDA Y REGIÓN A PESOS MEXICANOS EN MÉXICO

Las consideraciones principales que se deben tomar en cuenta para homologar los costos de plantas en cualquier región del mundo y así realizar estimados de inversión correctos, son:

- Capacidad
- Tecnología
- Año de inversión
- Lugar de la referencia
- Moneda de inversión (o divisa)

A partir de su capacidad se puede realizar un escalamiento (extrapolación), reportando los datos encontrados en una hoja de cálculo y encontrando una función que represente las inversiones estimadas, donde se destaca que mientras los datos sean más específicos (condiciones de operación), se obtendrá una ecuación más precisa.

El siguiente paso es homologar los datos obtenidos, ya que si bien, la mejor práctica es usar datos recientes, en ocasiones no se encuentran reportados los costos de inversión. Para esto, se usan los siguientes pasos:

1. *Factor de Cambio* (FC)<sup>12</sup>. Se usa para homologar la inversión a una divisa igual, según el año correspondiente. Primero se homologará a Estados Unidos y posteriormente a México. Ejemplo: 1 USD  $\approx$  13 MXN en el año 2014.
2. *Factor de Localización* (FL)<sup>13</sup>. Este representa el costo de la inversión en un país diferente al que se realizó. Primero se homologará a Estados Unidos y posteriormente a México. Ejemplo: En México cuesta 1.06 veces la construcción de una planta respecto a Estados Unidos (6% más).
3. *Indicador Económico*. Se usa para determinar cuál sería la inversión en el año deseado. Para este estudio se utilizará el *Chemical Engineering Plant*

---

<sup>12</sup> Compass International Consultants (2009)

<sup>13</sup> Compass International Consultants (2009)

*Cost Index* (CEPCI, por sus siglas en inglés). Con estos índices se determina un *Factor de Costo* ( $FC_{CPI}$ ) sobre cuanto equivale el costo de inversión a un año deseado según la siguiente fórmula:

$$FC_{CPI} = \frac{CEPCI_2(2014)}{CEPCI_1(\text{índice del año en que se elaboró})}$$

Al realizar los pasos 1. y 2., se determina el costo de inversión en dólares (USD) al realizar el proyecto en Estados Unidos de América (EUA), o bien USD/EUA.

Una vez realizados los pasos 1. – 3., de cada planta, se considera el costo que saldría la construcción del proyecto en México usando un *factor de localización* (FL), el cual es de 1.06 y el tipo de cambio a pesos mexicanos (MXN).

Si la capacidad de la planta es menor a la requerida, el siguiente paso es usar la regla de los “seis décimos” para calcular un estimado de inversión.

### ANEXO III. REGLA DE LOS SEIS DÉCIMOS

Para que se pueda entender el uso de esta “regla”, datos históricos de inversiones de diferentes tecnologías muestran que el ajuste de la inversión por efecto de la capacidad del proceso sigue una regla exponencial:

$$\frac{Costo_2}{Costo_1} = \left( \frac{Capacidad_2}{Capacidad_1} \right)^m$$

Donde  $m$  es un exponente característico de cada tecnología. En caso de no estar disponible, se usa típicamente  $m=0.6$ , por lo que esta regla se la conoce como regla de los seis décimos. Desarrollos tecnológicos conducen muchas veces a procesos con exponentes menores que los que previamente se tenían con las tecnologías anteriores. El hecho de que  $m$  sea menor que uno implica que una planta de mayor capacidad se traduce en una menor inversión unitaria al hacer el análisis económico del proceso, de ahí el concepto de economías de escala. Es decir, si la capacidad de una planta se incrementa en un 20% y el exponente es inferior a 1, entonces el costo se incrementa menos de un 20%. La ecuación anterior indica que una representación doblemente logarítmica de la capacidad en función del costo del equipo, para cierto tipo de equipo, debe resultar una recta de pendiente igual a 0,6 (Jiménez, 2003).

## ANEXO IV. PLANTAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN EL MUNDO

Ciudad	Año de arranque	Capacidad (t/año)	# Reactores	Tipo o tamaño digestor (m3)	Vol. Total (m3)	Uso del biogas	Potencia generada	Tiempo de residencia	Biogás (Nm3/t en el digestor)
<b>EMPRESA</b>	<b>AXPO (KOMPOGAS)</b>								
Rümlang, Suiza	1991	8500	1	Acero		Electricidad			
Bachenbülach 1	1994	8000	1	Acero					
Samstagern	1995	10000	1	Acero					
Otelfingen	1996	12500	1	Concreto					
Kempten	1996	10000	1	Acero					
Braunschweig	1997	26000	1	Acero					
München-Erding	1997	26000	1	Acero					
Hunsrück	1997	10000	1	Acero					
Lustenau	1997	10000	1	Acero					
Uzwil 1	1998	20000	1	Acero					
Alzey-Worms	1999	28000	1	Acero					
Frankfurt	1999	30000	1	Concreto					
Oetwil am See 1	2001	10000	1	Acero					
Roppen	2001	10000	1	Acero					
Bachenbülach 2	2003	4000	1	Acero					
Weissenfels 1	2003	12500	1	Concreto					
Passau	2004	39000	1	Concreto					
Kyoto	2004	15000	1	Acero					
Lenzburg	2005	5000	1	Acero					
Uzwil 2	2005	20000	1	Concreto					
Jona	2005	5000	1	Concreto					
La Rioja	2005	75000	1	Concreto					

Ciudad	Año de arranque	Capacidad (t/año)	# Reactores	Tipo o tamaño digester (m3)	Vol. Total (m3)	Uso del biogas	Potencia generada	Tiempo de residencia	Biogás (Nm3/t en el digester)
Martinique	2005	20000	1	Acero					
Aarberg	2006	16000	1	Concreto					
Langenthal	2006	4000	1	Acero					
Ottenbach	2006	16000	1	Concreto					
Pratteln	2006	15000	1	Concreto					
Reimlingen	2006	20000	1	Concreto					
Weissenfels 2	2006	12500	1	Concreto					
Utzenstorf	2007	12000	1	Concreto					
Oetwil am See 2	2007	5000	1	Acero					
Regen	2007	18000	1	PF 1300-2					
Ilbenstadt	2007	18000	1	PF 1300-2					
Amtzell	2007	18000	1	PF 1300-2					
Gröbern	2007	17000	1	Concreto					
Rostock	2007	40000	1	PF 1300-2					
Lavigny	2008	16000	1	Concreto					
Inwil	2008	16000	1	Concreto					
Klingnau	2008	20000	1	Concreto					
Montpellier, Francia	2008	203000	4	PF 1300-2		Electricidad			
Wilp-Achterhoek	2008	60000	2	PF 130-2					
Flörsheim-Wocker	2008	45000	1	PF 1300-3					
Saint Lô	2009	54000	1	PF 1300-2					
Altdorf	2009	5000	1	Acero					
Oensingen	2009	18000	1	PF 1300					
Volketswil	2009	20000	1	PF 1300					

Ciudad	Año de arranque	Capacidad (t/año)	# Reactores	Tipo o tamaño digestor (m3)	Vol. Total (m3)	Uso del biogas	Potencia generada	Tiempo de residencia	Biogás (Nm3/t en el digestor)
Doha	2009	274000	5	PF 1300-3					
Rijsenhout	2010	40000	1	PF 1300-2					
Zwolle	2010	45000	1	PF 1300-2					
Villeneuve	2010	20000	1	PF 1300					
Aurich	2010	18000	1	PF 1300					
Wauwil	2011	16000	1	PF 1300					
Chavornay	2011	22000	1	PF 1500					
Ennigerloh	2011	20000	1	PF 1300					
Backnang	2011	36000	1	PF 1300-2					
Belluno	2011	20000	1	PF 1300					
Ingolstadt	2011	18000	1	PF 1300					
Angers	2012	50000	2	PF 130-2					
Vannes	2012	15000	1	PF 1300					
Forbach	2012	42000	1	PF 1300-3					
Witten	2013	20000	1	PF 1300					
Trittau	2013	20000	1	PF 1300					
Novi Ligure	2013	20000	1	PF 1300					
Terni	2013	20000	1	PF 1300					
Faedo	2013	32000	1	PF 1300-2					
Clermont-Ferrand	2013	15000	1	PF 1300					
Weurt	2013	40000	1	PF 1300-2					
Nantan	2013	9000	1	Acero					
Hofu	2013	17500	1	Acero					
Coesfeld	2013	40000	1	PF 1300-2					

Ciudad	Año de arranque	Capacidad (t/año)	# Reactores	Tipo o tamaño digestor (m3)	Vol. Total (m3)	Uso del biogas	Potencia generada	Tiempo de residencia	Biogás (Nm3/t en el digestor)
Tilburg	2013	36000	1	PF 1300-2					
Zürich	2013	20000	1	PF 1500					
Fulda, Alemania	2013	32000	1	PF 1300-2					
<b>EMPRESA</b>	<b>VALORGA</b>								
Bayonne (Francia)	2013	83696	2	3800	7600	Electricidad			140
Abrunheira (Portugal)	2010	160000	2	3700	7400	Electricidad			130-150
Romainville-Bobigny (Fr)	2013	322000	6	3300	19800	Electricidad			130-140
Pionte à Pitre (Francia)	2011	140000	2	3800	7600	Electricidad	8 GW/año		106
La Paloma (España)	2008	110000	4	3600	14400	Automóviles			127
Saint Priest La Roche (Fr)	2010	85000	3	2200	6600	Electricidad			130-140
Zaragoza (España)	2008	95000	4	3600	14400	Electricidad	4 MWe		120
Las Dechesas (España)	2008	195200	6	3600	21600	Electricidad		25	130
Tondela (Francia)	2009	30000	1	3500	3500	Electricidad			162
Fos sur Mer (Francia)	2008	410000	2	4200	8400	Calor y Electricidad			162
Varenes-Jarcy (Francia)	2002	1000	2	8700	12900	Calor y Electricidad	3 Mwe	25	154
Tilburg (Países Bajos)	1994	52000	2	3300	6600	Purificación		20	90-110
Shangai (China)	2008	268500	6	4500	27000	Cogeneración		25	100
Mons (Bélgica)	2000	58700	2	3800	7600	Calor y Electricidad		25	110-120
La Coruna (España)	2001	182000	4	4300	17200	Calor y Electricidad	5*1.25 Mwe	16-20	130-150
Hanover (Alemania)	2005	100000	3	4200	12600	Calor y Electricidad		25	90

Ciudad	Año de arranque	Capacidad (t/año)	# Reactores	Tipo o tamaño digestor (m3)	Vol. Total (m3)	Uso del biogas	Potencia generada	Tiempo de residencia	Biogás (Nm3/t en el digestor)
Geneva (Suiza)	2000	10000	1	1300	1300	Calor y Electricidad		24	110-120
Freiburg (Alemania)	1999	36000	1	4000	4000	Calor y Electricidad	1.48 Mwe	25	110-120
Engelskirchen (Alemania)	1998	35000	2	3000	6000	Electricidad	0.94 Mwe	25	100-110
Calais (Francia)	2007	28000	1	3100	3100	Cogeneración	0.944 Mwe	25	110-120
Beijing (China)	2008	105000	3	4500	13500	Cogeneración		25	116
Bassano (Italia)	2003	52400	3	2400	7200	Electricidad		33	129
Barcelona (España)	2004	240000	3	4500	13500	Electricidad	4 Mwe	25	114
Amiens (Francia)	1988 (1996)	85000	3	2400-3500	10700	Industrial	5.5 Mw	18-22	140-160
<b>EMPRESA</b>	<b>BEKON</b>								
Munich	2007	25000					0.57 MW		
Saalfeld	2007	20000					1.05 MW		
Rendsburg	2008	30000					1.05 MW		
Vechta	2008	10000					0.33 MW		
Kusel	2007	7500					0.33 MW		
Schmölln	2009	16000					1.00 MW		
Ostrhauderfehn	2008	12000					0.53 MW		
Melzingen	2008	13000					0.53 MW		
Göhren	2008	14000					0.63 MW		
Erfurt	2008	20000					0.66 MW		
Pohlsche Heide	2009	40000					0.50 MW		
Bassum	2009	18000					0.53 MW		
Steinfurt	2013	50000					1.05 MW		

Ciudad	Año de arranque	Capacidad (t/año)	# Reactores	Tipo o tamaño digestor (m3)	Vol. Total (m3)	Uso del biogas	Potencia generada	Tiempo de residencia	Biogás (Nm3/t en el digestor)
<b>EMPRESA</b>	<b>ORGANIC WASTE SYSTEM (OWS), (DRANCO)</b>								
Seoul (Asia)	2010	30000	1	2950	2950				
Pusan (Asia)	2005	70000	2	3150	6300				
North Yorkshire (Europa)	2016	40000	1	2900	2900				
Bourg en Bresse (Europa)	2015	40000			0				
Changny (Europa)	2014	35000	2	1450	2900				
Wijster II (Europa)	2013	40000	1	2630	2630				
Mirandela	2013	10000	1	750	750				
Wijster (Europa)	2012	57000	1	3960	3960				
Hengelo (Europa)	2011	50000	1	3450	3450				
Leszno (Europa)	2010	26000	1	1990	1990				
Tenneville (Europa)	2009	39000	1	3150	3150				
Kempton (Europa)	2009		1	1200	1200				
Alicante (Europa)	2008	30000	1	2650	2650				
Vitoria (Europa)	2006	20000	1	1770	1770				
Terrassa (Europa)	2006	25000	1	1626	1626				
Münster (Europa)	2005	24000	1	1640	1640				
Hille (Europa)	2005	38000	1	2260	2260				
Leonberg (Europa)	2004	30000	1	2440	2440				
Rome (Europa)	2003	40000	1	3200	3200				
Brecht II (Europa)	2000	50000	1	3150	3150		2.4 Mw		
Villeneuve (Europa)	1999	10000	1	940	940				
Kaiserslautern (Europa)	1999	20000	1	1500	1500				
Aarberg (Europa)	1998	11000	1	1500	1500				

<b>Ciudad</b>	<b>Año de arranque</b>	<b>Capacidad (t/año)</b>	<b># Reactores</b>	<b>Tipo o tamaño digestor (m3)</b>	<b>Vol. Total (m3)</b>	<b>Uso del biogas</b>	<b>Potencia generada</b>	<b>Tiempo de residencia</b>	<b>Biogás (Nm3/t en el digestor)</b>
Bassum (Europa)	1997	13500	1	1200	1200				
Salzburg (Europa)	1993	20000	1	1800	1800				
Brecht I (Europa)	1992	20000	1	800	800				