



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

---

***PROPUESTA CONCEPTUAL DEL APROVECHAMIENTO  
DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS  
MUNICIPALES GENERADOS EN EL ESTADO DE  
MORELOS MEDIANTE LA TECNOLOGÍA DE DIGESTIÓN  
ANAEROBIA***

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**Alfonso Castillo Hernández**



**MÉXICO, D.F. a 29 de Julio de 2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Ing. José Antonio Ortiz Ramírez  
**VOCAL:** Ing. Joaquín Rodríguez Torreblanca  
**SECRETARIO:** Dr. Alfonso Durán Moreno  
**1er. SUPLENTE:** Dr. Néstor Noé López Castillo  
**2° SUPLENTE:** Dra. Marisela Bernal González

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

Facultad de Química UNAM

## **ASESOR DEL TEMA:**

Dr. Alfonso Durán Moreno

## **SUSTENTANTE:**

Alfonso Castillo Hernández

## **Agradecimientos**

Este trabajo se lo quiero dedicar a mi madre, que sin su apoyo y motivación no hubiera sido posible cumplir con este sueño, le agradezco por estar estos 26 años a mi lado, a la memoria de mi abuelo que en paz descansa por sus sabios consejos brindados, a mi abuela por todos sus cuidados, y a mis hermanos por su apoyo incondicional.

Quiero agradecer en primer lugar a mi asesor de tesis al Dr. Alfonso Durán Moreno por haber compartido sus conocimientos, por haberme brindado la oportunidad de realizar el presente trabajo de tesis y por incluirme en un excelente equipo de trabajo.

Así mismo quiero expresar un especial agradecimiento Al ing. Julio Santiago Villegas, al ing. Mauro Aguilar Castro, a la M. Marisol Vázquez Cuevas y al M. Israel Islas Bernal, por su tiempo dedicado en apoyar mi trabajo, por haberse preocupado por mi desarrollo profesional y por su paciencia.

Al Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico Tecnológico y de Innovación (FORDECyT) del Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haber financiado el proyecto “Desarrollo de un sistema piloto para tratamiento de residuos sólidos orgánicos municipales RSOM”, proyecto en el que se desarrolló la presente tesis.

A todos mis amigos y compañeros de la torre de ingeniería, que siempre me brindaron su apoyo de la manera más amable: Ulises, Ever Paris. Leticia, Adrián, Antonio, Pedro, Iván, Ignacio, Hugo y Diego gracias por todos los conocimientos compartidos.

A todos mis profesores que me formaron como ingeniero químico a lo largo de la carrera. A mí querida Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de química por haberme abierto las puertas a la máxima casa de estudios del país.

Muchas gracias, todo esto no hubiera sido posible sin su apoyo.

	<b>Índice</b>
Introducción.....	1
Justificación .....	3
Objetivos .....	4
1. Antecedentes .....	5
2. Los residuos sólidos y su clasificación .....	7
2.1 Definición de residuo.....	7
2.2 Clasificación de los residuos .....	8
2.3 Marco legal de los residuos sólidos municipales.....	9
2.4 Gestión integral de los residuos sólidos municipales en el Estado de Morelos .....	17
2.5 Caracterización de residuos sólidos municipales.....	31
2.6 Muestreo de RSM .....	35
3. Digestión Anaerobia (DA).....	38
3.1 Procesos microbiológicos .....	38
3.2 Bioquímica .....	41
3.3 Producción de biogás.....	42
3.4 Parámetros que influyen en la DA.....	43
3.5 Tecnologías aplicadas .....	46
4. Metodología.....	54
5. Resultados y análisis de resultados .....	58
5.1 Muestreo de RSOM .....	58
5.2 Caracterización .....	83
5.3. Propuesta para tratar los RSOM generados en los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco .....	85
5.4 Balance de masa .....	95
5.5 Evaluación económica .....	106
5.6 Evaluación ambiental .....	118
6. Conclusiones y recomendaciones.....	120
7. Bibliografía .....	123

---



Anexo 1 Datos generales de los RSM en el Estado de Morelos .....127



## Figuras

Figura 1. Marco normativo a nivel federal en materia de residuos sólidos municipales .....	10
Figura 2. Gestión integral de los residuos sólidos municipales en el Estado de Morelos.....	17
Figura 3. Generación de RSM en El Estado de Morelos.....	19
Figura 4. Composición de los residuos en el Estado de Morelos.....	20
Figura 5. Estación de transferencia del Municipio de Cuernavaca Morelos.....	25
Figura 6: Estación de transferencia del Municipio de Jiutepec Morelos .....	25
Figura 7. Estación de transferencia del Municipio de Temixco.....	26
Figura 8. Esquema de degradación de RSOM por Digestión Anaerobia .....	39
Figura 9. Diagrama de flujo de proceso DRANCO.....	47
Figura 10. Diagrama de flujo del proceso Valorga.....	49
Figura 11. Diagrama de flujo del proceso húmedo BTA.....	50
Figura 12. Diagrama de flujo del proceso húmedo Ros Roca .....	52
Figura 13. Metodología para el diseño de una alternativa tecnológica para tratar los RSOM generados en el Estado de Morelos .....	54
Figura 14. Metodología de Muestreo de RSOM.....	59
Figura 15. Subproductos Residuos orgánicos promedio Municipio de Cuernavaca	73
Figura 16. Subproductos RSIM reciclables promedio Municipio de Cuernavaca ....	73
Figura 17. Subproductos RSIM no reciclables promedio Municipio de Cuernavaca .....	74
Figura 18. Subproductos Residuos orgánicos promedio Municipio de Temixco .....	75
Figura 19. Subproductos RSIM reciclables promedio Municipio de Temixco .....	76
Figura 20. Subproductos RSIM no reciclables promedio Municipio de Temixco .....	76
Figura 21. Subproductos RSOM promedio del Municipio de Jiutepec .....	77
Figura 22. Subproductos RSIM reciclables promedio Municipio de Jiutepec .....	78
Figura 23. Subproductos RSIM no reciclables promedio Municipio de Jiutepec. ....	78
Figura 24. Subproductos Residuos orgánicos promedio del Estado de Morelos ....	79
Figura 25. Subproductos RSIM reciclables promedio Estado de Morelos.....	80



Figura 26. Subproductos RSIM no reciclables promedio Estado de Morelos.....81  
Figura 27. Pesos volumétricos promedio en el Estado de Morelos 443.85 kg/m3. .82  
Figura 28. Regionalización de Estado de Morelos .....86  
Figura 29. Diagrama de bloques del centro de tratamiento de RSOM .....89  
Figura 30. Diagrama de flujo de proceso del centro de tratamiento de RSOM .....96  
Figura 31. Evaluación económica del centro de tratamiento de RSOM .....106  
Figura 32. Generación de RSM en el Estado de Morelos .....128



**Tablas**

Tabla 1. Composición de RSM en el Estado de Morelos .....	21
Tabla 2. Composición de RSM en los Municipios de Cuernavaca Jiutepec y Temixco.....	22
Tabla 3. Situación de la recolección en la zona Conurbada de Cuernavaca. ....	23
Tabla 4. Tiraderos a cielo abierto en el Estado de Morelos .....	29
Tabla 5. Rellenos sanitarios del Estado de Morelos.....	30
Tabla 6. Principales reacciones de metanogénesis .....	41
Tabla 7. Clasificación de la DA por temperatura .....	45
Tabla 8. Número de vehículos de recolección existentes en cada estación de transferencia.....	62
Tabla 9. Cálculo del tamaño de muestra que para el Municipio de Cuernavaca.....	66
Tabla 10. Cálculo del tamaño de muestra que para el Municipio de Temixco .....	66
Tabla 11. Calculo del tamaño de muestra que para el Municipio de Jiutepec.....	67
Tabla 12. Resumen de la determinación de tamaño de muestra .....	67
Tabla 13. Resultados de subproductos orgánicos presentes en muestras de residuos en centro de transferencia .....	72
Tabla 14. Caracterización de RSOM del Estado de Morelos. ....	83
Tabla 15. Características de los RSOM en diferentes países. ....	84
Tabla 16. Características de los RSOM utilizados en los procesos de la DA.....	85
Tabla 17. Recuperación de RSM reciclables en la planta de separación.....	99
Tabla 18. Resultados del balance de masa .....	105
Tabla 19. Otros costos de operación del centro de tratamiento .....	112
Tabla 20. Beneficios del centro de tratamiento .....	112
Tabla 21. Inversión y Costos de operación .....	116
Tabla 22. Evaluación Económica del centro de tratamiento.....	117
Tabla 23. Beneficios ambientales del centro de tratamiento .....	118
Tabla 24. Población y Generación de RSM en el Estado de Morelos.....	127
Tabla 25. Población del Estado de Morelos en el tiempo.....	128
Tabla 26. Ubicación geográfica de los municipios del Estado de Morelos .....	129



## Abreviaturas

CO <sub>2</sub>	Bióxido de carbono
CFE	Comisión federal de electricidad
CONACYT	Comisión Nacional de Ciencia y tecnología
CAE	Costo anualizada
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
DA	Digestión anaerobio
FORDECyT	Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico Tecnológico y de Innovación
P-T	Fosforo total
GIRS	Gestión integral de residuos sólidos
ICP	Índice de costos al productor
IPPC	Índice de costos para plantas de ingeniería química
INEGI	Instituto nacional de estadística geografía
LGEEPA	La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
CH <sub>4</sub>	Metano
N-K	Nitrogeno kjendal
NMX	Norma mexicana de referencia
NOM	Norma oficial mexicana
PC	Planta de composta
PTAR	Planta de tratamiento de agua residual
PET	Polietilen teraftalato
PBR	Reactor de flujo pistón
CSTR	Reactor de mezcla completa
RSIM	Residuos sólido inorgánicos municipales
RSM	Residuos sólidos municipales
RSOM	Residuos sólidos orgánicos municipales
SEMARNAT	Secretaria de marina y recursos naturales
SF	Sólidos fijo
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
TD	Tasa de descuento
TIR	Tasa interna de retorno
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
USD\$	Dólares americanos
VPN	Valor presente neto



## Introducción

---

En el año 2009 el Estado de Morelos contaba con una población de 1,675,608 habitantes (INEGI, 2012) generando 672,147.5 toneladas de residuos sólidos municipales por lo que la generación per cápita diaria fue de 1.1 kilogramos por habitante. Se conoce que más del 99% de los residuos sólidos municipales generados llegaron a sitios de disposición final, como son rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto, sin tratamiento o separación de algún tipo (Gobierno del Estado de Morelos, 2010).

En su mayor parte los sitios de disposición final del Estado no cuentan con instalaciones adecuadas y no cumplen con la norma oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 referente a los lineamientos que debe cumplir un sitio de disposición final.

Se estima que la composición de los RSM que llegan a sitios de disposición final es de 51% de residuos orgánicos y 49% de inorgánicos. (Gobierno del Estado de Morelos, 2010). Por residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM) se consideran aquéllos generados en casas habitación y lugares públicos, que provienen de materia orgánica viva, son biodegradables y están compuestos mayoritariamente por el elemento carbono (Flores , 2001).

Estos residuos al estar expuestos sin control adecuado en sitios de disposición final, como es el caso de los rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto causan diferentes impactos ambientales como la generación de gases de efecto invernadero, generación de lixiviados que contaminan los mantos acuíferos, atracción de fauna nociva portadora de enfermedades que afectan a la población, entre otros.



Actualmente con el fin de solucionar esta problemática existen varias alternativas tecnológicas (con diferentes características) para dar tratamiento a los RSOM, como son: procesos térmicos, procesos químicos, procesos biológicos, entre otros. Dentro de los procesos biológicos se cuenta con la Digestión Aerobia y la Digestión Anaerobia.

En el caso de la Digestión Anaerobia (DA) es un proceso biológico por el cual se degradan los residuos sólido orgánicos municipales en ausencia total de oxígeno, produciendo una mezcla gaseosa conocida como biogás (la cual está compuesta en mayor proporción de gas metano y bióxido de carbono), energía eléctrica y un digestato rico en nutrientes que se pueden aprovechar en el sector agrícola (GIZ, 2012).

A nivel internacional existe un número muy grande de plantas de Digestión Anaerobia que tratan los RSOM de una determinada región y producen biogás, energía eléctrica y productos agrícolas como composta y fertilizantes líquidos que comercializan con la población.

En el Estado de Nuevo León desde el año 2003 a la fecha se capta el biogás generado en el relleno sanitario del municipio de Salinas Victoria y se utiliza como combustible para generar energía eléctrica que se alimenta a la red de alumbrado público de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Considerando lo anterior se puede utilizar la Digestión Anaerobia para solucionar la problemática de generación de residuos sólidos orgánicos municipales en el Estado de Morelos y generar productos de valor agregado para la sociedad. De esta forma se reducirán los volúmenes de RSOM que llegan a disposición final, los impactos que causan.



## Justificación

---

En el año 2009 habitaban cerca de 659,690 personas en los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco (el 39.8% de la población del Estado de Morelos) y se estima se generaron en los tres municipios en conjunto aproximadamente 345,421 toneladas de RSM (51.3% de los RSM generados en el **Estado**) con una generación de RSM per cápita de 1,43 kg/hab\*día. Estos municipios no cuentan con sitios de disposición final por lo que sus residuos son enviados a otros municipios (Gobierno del Estado de Morelos, 2010).

Debido a los impactos ambientales que causan el mal manejo de los residuos sólidos orgánicos municipales en el Estado de Morelos, el presente trabajo pretende realizar a nivel conceptual una propuesta tecnológica para tratar por medio de la Digestión Anaerobia el 50% de los residuos sólidos orgánicos municipales que se generan en los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco (que corresponde 13.1% de los residuos sólidos municipales generados en el Estado) obteniendo además productos de valor agregado como lo son: biogás, energía eléctrica y composta de uso agrícola o fertilizante.

Esta propuesta además pretende ofrecer una alternativa de solución para reducir el volumen de RSOM que llegan a sitios de disposición final y así reducir los impactos ambientales negativos que causa un mal manejo.



## Objetivos

---

### Objetivo general

Desarrollar a nivel conceptual una propuesta tecnológica para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM) que se generan en los municipios de Cuernavaca Jiutepec y Temixco vía Digestión Anaerobia considerando aspectos, técnicos, económicos y ambientales.

### Objetivos particulares

- Revisar la situación actual de los RSOM generados en el Estado de Morelos y realizar un estudio del Estado del arte de las tecnologías de Digestión Anaerobia de residuos sólidos orgánicos municipales que se desarrollan a nivel mundial.
- Diseñar una metodología de muestreo de los residuos sólidos orgánicos municipales que se generan en los municipio de Cuernavaca Jiutepec y Temixco para determinar los parámetros físicos, químicos y biológicos
- Elaborar a nivel conceptual una propuesta para utilizar la DA en el tratamiento de los RSOM
- Realizar una evaluación económica de la propuesta planteada para tratar los RSOM de la zona de estudio.



## 1. Antecedentes

---

La Digestión Anaerobia tiene sus orígenes en el año de 1776, cuando, el científico italiano Alejandro Volta estudia los gases que se forman en los pantanos, y concluyó que había una relación entre la cantidad de material orgánico en descomposición y la cantidad de gas inflamable. Posteriormente en 1804, John Dalton describe la estructura química del metano y lo asocia con el biogás (Stafford & Hawkes, 1980).

A comienzos de 1866, el biólogo francés Antoine Béchamp, demostró; que la formación de metano era un proceso biológico. En 1875, Propoff descubrió que la formación de biogás sólo se producía en condiciones anaerobias. Más tarde, a finales de siglo XIX fue demostrada la presencia de microorganismos involucrados en el proceso de producción de biogás (Barker, 1956).

En la primera mitad del siglo XX se realizaron numerosas experiencias a escala laboratorio y piloto. En la India, a partir de los años 60 ´s se impulsó la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia con un doble objetivo de aprovechamiento energético y producción de productos de uso agrícola como la composta y fertilizantes.

En China en la década de los 70´s se impulsó la construcción de digestores, mediante programas de carácter nacional. En los países industrializados, el desarrollo de la Digestión Anaerobia ha sido influenciado por criterios ambientales en lugar de los energéticos (Lobera Lössel, 2011)

En el año 2010 Sofía Palacios de la Facultad de Química de la UNAM realizó una evaluación de alternativas tecnológicas para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM), de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), utilizando criterios técnicos, ambientales y económicos y haciendo uso de



un *software* especializado en tema de evaluación de alternativas multicriterio. El resultado de este trabajo fue haber identificado a la Digestión anaerobia como la mejor alternativa para el tratamiento de los RSOM (Palacios Gonzalez, 2010).

La presente tesis se desarrolló en el marco del proyecto “Desarrollo de un sistema piloto para tratamiento de residuos sólidos orgánicos municipales RSOM” con clave 174710, que se desarrolla en la Facultad de Química de la UNAM a cargo del Dr. Alfonso Durán Moreno, el cual atiende la convocatoria 2011-01 del Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico Tecnológico y de Innovación (FORDECyT) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Este proyecto tiene como objetivo el “escalamiento y validación en planta piloto de un sistema de tratamiento de residuos sólidos orgánicos producidos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, y las áreas conurbadas de las ciudades de Cuernavaca, Morelos, y del Valle de Toluca, que permita establecer procesos eficientes y las oportunidades económicas para la comercialización de los subproductos de interés”.



## 2. Los residuos sólidos y su clasificación

---

En este capítulo se revisan aspectos relacionados con la situación actual de los residuos sólidos municipales. Se presentan definiciones; clasificación; marco legal vigente, métodos de muestreo y caracterización de los RSM que se utilizan a nivel nacional y estatal como referencia.

### 2.1 Definición de residuo

---

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) presenta la siguiente definición;

**“Residuo:** Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó” (H. Congreso de la Unión, 2010).

Por su parte Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) define;

**“Residuo:** Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en Estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final” (H. Congreso de la Unión, 2003).

Con base en estas definiciones es posible definir residuo como un material generado por las actividades del hombre, que a causa de su Estado físico degradado no presenta alguna utilidad o valor considerando que el concepto residuo es un término propiamente humano, ya que en la naturaleza todo es reutilizado de alguna manera.



## 2.2 Clasificación de los residuos

---

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) clasifica a los residuos en las siguientes categorías;

- **“Residuos Peligrosos;** Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad (CRETIB), así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio”.
- **“Residuos de Manejo Especial;** son lo generados en los procesos productivos que no reúnen la característica para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos municipales o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos”
- **“Residuos Sólidos Urbanos (RSU) o Residuos Sólidos Municipales (RSM);** son los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos”.

En el presente estudio se utiliza el término residuos sólidos municipales (RSM) para referirse de igual forma al término residuos sólidos urbanos (RSU), definidos por LGPGIR.



## 2.2.1 Clasificación de los Residuos Sólidos Municipales

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) los residuos sólidos Municipales (RSM) se pueden clasificar de manera muy general en residuos orgánicos e inorgánicos.

- **Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM):** “Son aquellos residuos que provienen de restos de productos de origen orgánico, la mayoría de ellos son biodegradables (se descomponen naturalmente). Se pueden desintegrar o degradar rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica” (Flores , 2001), están representados principalmente por residuos alimenticios, de parques y jardines, rastros, mercados, industriales de alimentos.
- **Residuos Sólidos Inorgánicos Municipales (RSIM);** Son aquellos residuos provenientes de material no vivo, no son biodegradables o de muy difícil composición, conservan su forma y propiedades” incluye la mayoría de los residuos reciclables, telas, etc.

---

## 2.3 Marco legal de los residuos sólidos municipales

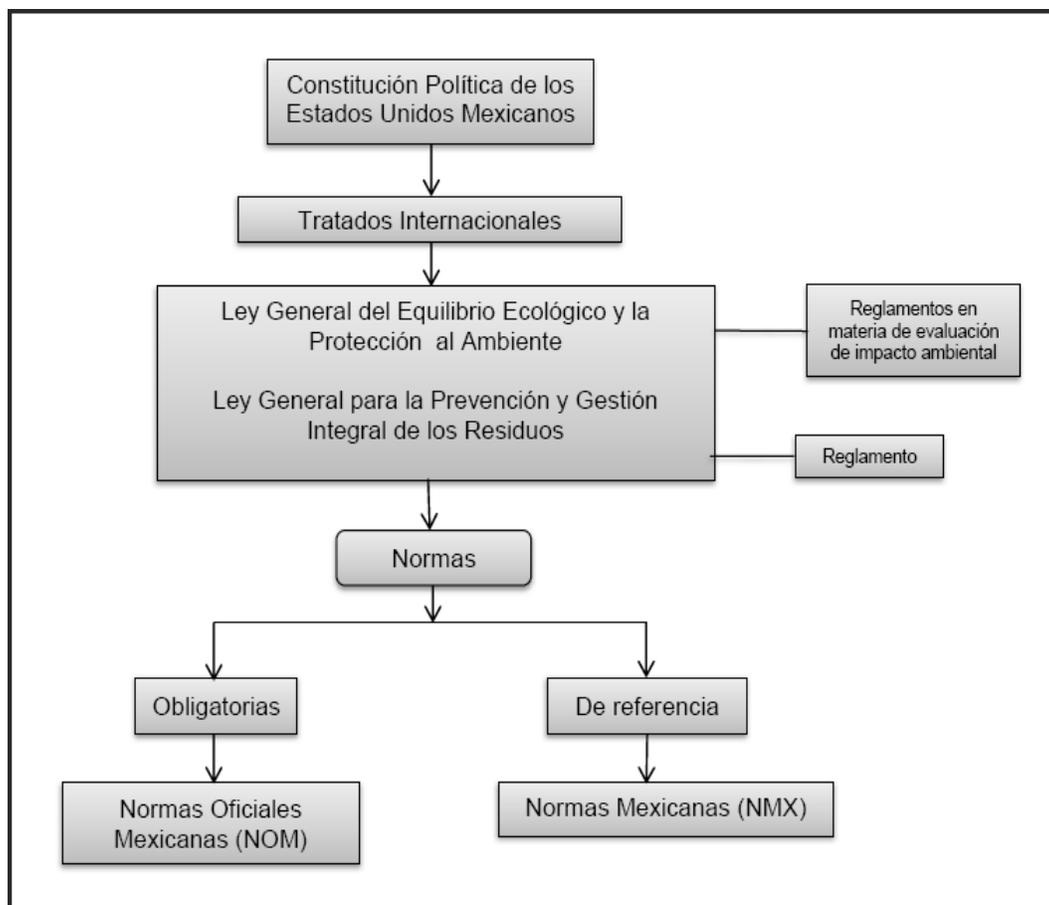
---

### 2.3.1 Federal.

El marco legal vigente a nivel federal en materia de residuos sólidos que rige en México presenta una estructura jerárquica. En la parte más alta se encuentra la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, le siguen los tratados internacionales, un rubro abajo se encuentran las leyes de las cuales surgen los reglamentos y en el siguiente nivel se encuentran las Normas oficiales Mexicanas (NOM), que son de carácter obligatorias, y las Normas Mexicanas Técnicas (NMX) que sirven como referencias y que son de tipo voluntario, a menos que se indiquen su uso en una norma oficial.



En Figura 1 se presenta un diagrama ilustrativo del marco normativo en México y en seguida se describe de forma breve el panorama actual del este.



**Figura 1. Marco normativo a nivel federal en materia de residuos sólidos municipales**

### ➤ Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su artículo 115 fracción III, párrafo C declara: “Los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes: Limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos” (H. Congreso de Union, 2013).

➤ **Convenios internacionales**

Existe una gran cantidad de tratados internacionales en materia ambiental, en el caso de residuos sólidos se presentan los siguientes;

- **El convenio de las Naciones Unidas (1991);** sobre el control de los Movimientos Fronterizos de los desechos Peligrosos y su eliminación. Suscrito en Basilea Suiza. Aquí se establece que si un País pretende enviar residuos fuera de su territorio debe cumplir con lo establecido en el convenio, y el país receptor tiene que estar informado y de acuerdo con la transferencia de los residuos.
  - **Programa 21 ONU. Rio de Janeiro (1992),** Compromiso 21, Gestión de Residuos Sólidos donde los acuerdos son básicamente contar con los mecanismos de control de los residuos de tal manera que las acciones tomadas no impacten globalmente y las políticas estén basadas en el desarrollo sustentable, de tal manera que las nuevas generaciones tengan un ambiente sano.
- **Ley General del Equilibrio Ecológico y protección al ambiente (LGEEPA)**

La ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA, 2007), en materia de manejo de residuos sólidos establece lo siguiente:

**Artículo 7** Corresponden a los Estados, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades:

**Fracción VI** La regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los



residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley.

**Artículo 8** Corresponden a los municipios, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades:

**Fracción IV** La aplicación de las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos, de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley.

**Artículo 137** Queda sujeto a la autorización de los municipios o del Distrito Federal, conforme a sus leyes locales en la materia y a las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reusó, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales

Expedirán las normas que deberán sujetarse los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de residuos sólidos municipales.

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



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

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

➤ **Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)**

Por su parte la ley general para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos señala;

Artículo 10 Los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos municipales.

Artículo 9 Las acciones que deben realizar las entidades y municipios para promover la reducción de la generación, valorización y gestión integral de los residuos sólidos municipales y de manejo especial.

Artículo 97 Las normas oficiales mexicanas establecerán los términos a que deberá sujetarse la ubicación de los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, en rellenos sanitarios o en confinamientos controlados.



➤ **Normas Oficiales Mexicanas (NOM)**

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son de carácter obligatorio, existen varias relativas al manejo y gestión integral de los residuos sólidos municipales. En el presente estudio se mencionan de manera especial las siguientes:

- **NOM-083-SEMARNAT-2003**, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
- **NOM.004-SEMARNAT-2002**, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
- **NOM-098-SEMARNAT-2002**, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes

➤ **Normas Mexicanas (NMX)**

Adicionalmente en México existen las Normas Mexicanas técnicas (NMX) que son de referencia (es decir no son de carácter obligatorio), existiendo algunas referentes a la caracterización de RSM y a la construcción de rellenos sanitarios, siendo descritas a continuación;

- **NMX-AA-015-1984** “Método de Cuarteo”. Establece el método de cuarteo para homogenizar residuos sólidos municipales y la obtención de muestras para análisis de laboratorio



- **NMX-AA-019-1985** “Determinación de Peso Volumétrico IN SITU”.  
Establece un método para determinar el Peso Volumétrico IN SITU de los residuos sólidos municipales.
- **NMX-AA-022-1985** “Selección y cuantificación de subproductos”.  
Establece la selección y el método para la cuantificación de subproductos contenidos en los residuos sólidos Municipales
- **NMX-AA-052-1985** “Preparación de Muestra en el Laboratorio para su Análisis” Establece el método de preparación de muestras en el laboratorio para su análisis físico químico y biológico.

### 2.3.2 Estatal

#### ➤ **Constitución Política del Estado Libre y Soberano de Morelos**

La Constitución Política del Estado Libre y Soberano de Morelos en referencia a las autoridades estatales, en su artículo 40 inciso L especifica las atribuciones del Congreso del Estado: Expedir leyes en el ámbito de su competencia, en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico; así como de protección civil, previendo la concurrencia y coordinación de los Municipios con el Gobierno del Estado y la Federación”.

Por otro lado en su artículo 114-bis manifiesta que los Ayuntamientos tendrán a su cargo el sistema de limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos (Gobierno del Estado de Morelos, 1930).

#### ➤ **Ley de Residuos Sólidos para el Estado de Morelos.**

La Ley de Residuos Sólidos del Estado de Morelos, tiene por objeto regular la generación, aprovechamiento y gestión integral de los residuos sólidos urbanos

---



generados en el Estado, y en su artículo 9, en resumen señala, que son los gobiernos municipales los encargados de la realizar la gestión integral de los residuos sólidos urbanos (Gobierno del Estado de Morelos, 2007). Esta ley es de carácter obligatoria para todo el Estado.

En lo que concierne a la separación y clasificación de los residuos sólidos en su artículo 50 señala que, los habitantes del Estado de Morelos tienen la obligación de separar los residuos sólidos desde la fuente, y su artículo 52 señala que “La separación de residuos sólidos es obligatoria y se hará conforme a sus características particulares en:

- I. Orgánicos
- II. Inorgánico
- III. Residuos provenientes de establecimientos
- IV. Aceites y otros materiales no peligrosos

Por otra parte en su artículo 8 delega a la Comisión Estatal del agua y Medio Ambiente (CEAMA) la expedición de normas ambientales en materia de reducción, manejo, tratamiento, reusó y disposición final de RSU; asimismo la autorización, instalación y operación de sistemas para su manejo.

➤ **Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEEPA) del Estado de Morelos.**

Por su parte la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Morelos, otorga el permiso al congreso del Estado a expedir leyes en el ámbito de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico. En su artículo 6, fracción III señala, que corresponde al ejecutivo estatal todo lo relacionado con la preservación del medio ambiente y el aprovechamiento de los recursos naturales (Gobierno del Estado de Morelos, 2007)



## 2.4 Gestión integral de los residuos sólidos municipales en el Estado de Morelos

La LGPGIR (2003) define la Gestión Integral de Residuos como: “Conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región” (H. Congreso de la Unión, 2003)

La gestión integral de los residuos sólidos en el Estado de Morelos comprende las etapas que se presentan en la Figura 2. Comprende las etapas de generación, recolección, transporte, transferencia, disposición final, tratamiento y recuperación energética. Se estima que más del 99% de lo RSM que se generan llegan a sitio de disposición final sin tratamiento o separación alguna (Gobierno del Estado de Morelos, 2010).

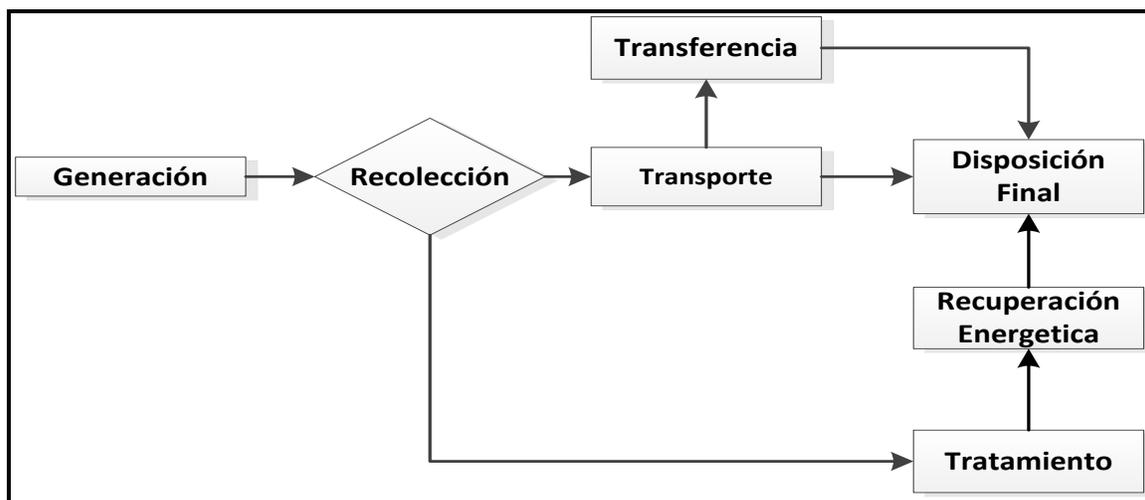


Figura 2. Gestión integral de los residuos sólidos municipales en el Estado de Morelos.

Fuente: (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

Respecto a la infraestructura disponible para el manejo de los RSU en el Estado de Morelos se cuenta con 201 vehículos de recolección, dos estaciones de transferencia con 10 tracto camiones, ocho centros de acopio, una planta de composta y 27 sitios de disposición final, de los cuales cuatro son rellenos sanitarios, un relleno controlado y 22 tiraderos a cielo abierto (Gobierno del Estado de Morelos, 2010).

### 2.4.1 Generación

La generación “es la acción de producir RSM a través del desarrollo de procesos productivos o de consumo” (H. Congreso de la Unión, 2003). Esta varía de acuerdo con la modificación de los patrones de consumo de la población y depende esencialmente de los siguientes factores (Runfola & Gallardo, 2009);

- Tamaño población de Generadores
- Nivel de vida de la población.
- Hábitos de Consumo de la población
- Estación del año
- Época del año y día de la semana
- Costumbres de los habitantes
- Zona donde se habita

En los últimos años en el Estado de Morelos, al igual que en todo el país, la generación de RSM ha venidos aumentando lo cual ha causado problemáticas tales como la dificultad para su recolección; el agotamiento rápido de la vida útil de los rellenos sanitarios y problemas de contaminación ambiental.

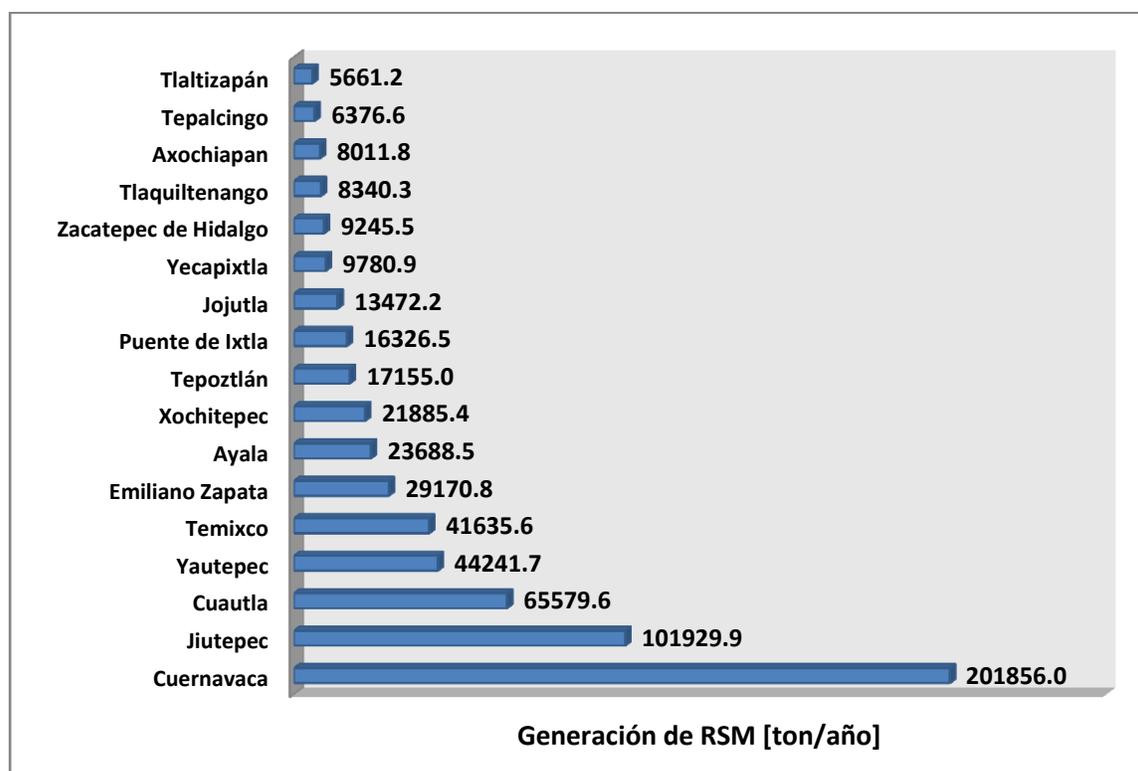
Por otra parte el aumento de la generación y disposición de RSOM en rellenos sanitarios provoca el aumento de producción gases de efecto invernadero como



bióxido de carbonó CO<sub>2</sub>, y gas metano CH<sub>4</sub> (INEGI, 2012), (Gobierno del Estado de Morelos, 2010).

En una población, la generación per capita de RSM de se mide en kilogramos (kg) por habitante (hab) por día y se obtiene a partir de la información obtenida de un muestreo aleatorio en campo, en cada uno de los sectores socioeconómicos de la población (Tchobanoglous & Theisen, 1994).

En la Tabla 24 del anexo 1 y en la Figura 3 se presenta la población y la generación de RSM del Estado de Morelos en el año 2009. La generación de todo el Estado fue de aproximadamente 672,147.5 toneladas, con una generación per cápita promedio de 1.10 kg/hab/día. (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)



**Figura 3. Generación de RSM en el Estado de Morelos.**

**Fuente: (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)**

Con base en la gráfica de la Figura 3 y la Tabla 24 del anexo 1, la zona Conurbada de Cuernavaca (ZCC), es la zona con mayor densidad poblacional y por ende la de mayor generación de RSM. Aquí se generan el 59% de los RSM del Estado de Morelos. Mientras que en los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco se generan el 51.30%.

## 2.4.2 Composición de los residuos sólidos

La composición de los residuos sólidos municipales es un espejo de los patrones de consumo, hábitos alimenticios, estructura social etc., de las sociedades (Ludwig, 2003) y es una de las propiedades más importante para desarrollar planes adecuados de manejo

En la Figura 4 se observa que la composición de los RSM generados en el Estado de Morelos es de 51 % RSOM y 49 % RSIM. Los RSIM están compuestos en mayor proporción de plásticos y papel (23%) y en menor proporción de metales y vidrio (6%).

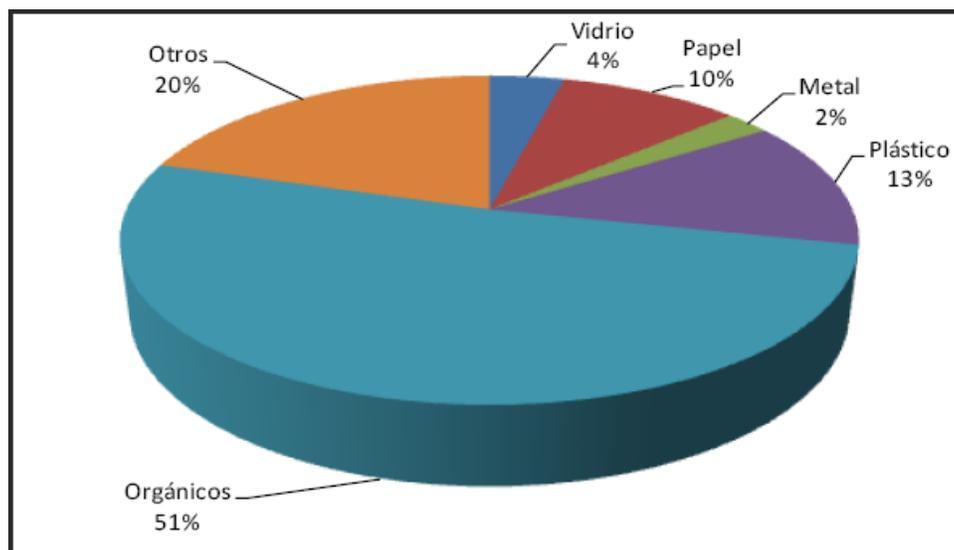


Figura 4. Composición de los residuos en el Estado de Morelos.

Fuente: (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

La composición de los RSM en el Estado de Morelos varía de manera significativa de una región o zona a otra, como se puede ver en la

Tabla 1. En general se repite el siguiente patrón; se presentan en mayor proporción los RSOM (mayor a 50%), los reciclables (papel, metal, plástico, vidrio) se encuentran en menor proporción (con un porcentaje menor a 10%).

**Tabla 1. Composición de RSM en el Estado de Morelos**

<b>Región o Zona</b>	<b>Vidrio</b>	<b>Papel</b>	<b>Metal</b>	<b>Plástico</b>	<b>Orgánicos</b>	<b>Otros</b>
Conurbada de Cuernavaca	3.8	9.1	2.2	14.2	55	15.6
Nororiental	5.8	10.6	3.5	19	38.7	22.3
Poniente	7.4	10.7	3.2	14.2	33.7	30.75
Centro Sur	3.4	9.5	1.3	14	48.5	23.3
Sur oriente	2.3	10.3	0.7	14.2	55	15.6
Altos de Morelos	2.7 – 5	4.7 - 8.18	1.6 - 3.4	3.6 - 5.6	47.6 - 56.4	26.6 - 37.1
Centro	3.9 – 5.2	8.4 – 9.9	2 - 4.5	4.6 – 7.3	29 – 44.8	32.5 – 46.4
Cuatla Huitzilac	2.98 10.3	11.34 9.3	3.03 2.56	8.86 14.2	55.70 38.2	18.09 25.2

Fuente: (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

En la Tabla 2 se presenta la composición de los RSM de los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco. En los tres casos los RSOM se encuentran en mayor proporción con más del 50% y en menor los RSIM menor a 50%. Los materiales reciclables como el aluminio, los metales, los plásticos, el papel y cartón tienen una presencia menor a 10% (Thesis Consulting, 2005).



**Tabla 2. Composición de RSM en los Municipios de Cuernavaca Jiutepec y Temixco**

	Cuernavaca [%]	Jiutepec [%]	Temixco [%]
Residuos Alimenticios	52.85	52.36	50.33
Residuos de Jardinería	3.09	3.28	4.08
Aluminio	0.27	0.06	0.14
Latas de Alimento	1.39	1.04	1.39
Otros Metales	0.27	0.1	0.27
PET	3.46	2.61	3.48
Plástico	2.01	2.95	4.07
Otros plásticos	6.23	6.45	8.37
Papel y Cartón	10.64	10.87	7.77
Vidrio	4.12	4.04	4.58
Residuos Sanitarios	12.2	12.62	11.94
Residuos Especiales	0.22	0.07	0.78
Otros	3.24	3.57	2.74

Fuente: (Thesis Consulting, 2005)

### 2.4.3 Recolección

Como lo marca el marco normativo federal y estatal, en el Estado de Morelos los Municipios tienen a su cargo el sistema de recolección, transporte, transferencia y disposición final de RSM (Gobierno del Estado de Morelos, 2007). El servicio de recolección de RSM en el Estado de Morelos lo realizan los municipios y en algunos casos empresas privadas concesionadas a través de vehículos de carga con diferentes características.

En el caso del Municipio de Cuernavaca cuenta con 111 rutas de recolección asignadas, 28 vehículos pertenecientes al ayuntamiento; en el Municipio de Jiutepec se cubren 30 rutas con una frecuencia de dos veces por semana a través de 10 vehículos de recolección concesionados y en Temixco atienden 28 rutas dos veces por semana a cargo de 11 vehículos de los cuales: cuatro son



compactadores de carga trasera; cuatro son camionetas levanta contenedores (roll on-of); dos camiones volteo y una camioneta Pick-Up (Thesis Consulting, 2005)

Como se puede ver en la Tabla 3 el Municipio con la mayor cobertura es el de Cuernavaca, que además de contar con el mayor parque vehicular también se caracteriza por no tener vehículos de recolección doméstica concesionados. En los Municipios en que se presta el servicio tanto por particulares como por el Ayuntamiento la cobertura del servicio está por debajo del 60% del total de la población (Thesis Consulting, 2005)

El Municipio de Jiutepec en el que se registra la cobertura del servicio más baja de la región, se debe en mayor medida a la carencia de equipo y a la gran cantidad de residuos de origen no doméstico (Thesis Consulting, 2005).

**Tabla 3. Situación de la recolección en la zona Conurbada de Cuernavaca.**

	Habitantes (hab)	Recolección Diaria (Ton/día)	Generación Per cápita (Kg/día/hab)	Población Atendida (Hab)	Cobertura (%)	Eficiencia del Personal (Ton/Te/Jor)
Cuernavaca	436,562	470.83	1.23	382,930	87.72	3.16
Jiutepec	201,622.	49.27	1.34	36,646.	18.18	2.87
Temixco	100,720	61.71	1.10	56,142.	55.74	2.06
Zona Conurbada de Cuernavaca	863,206	440.39	1.22	360,563	41.77	2.65
Ciudades medias	---	---	---	---	75 a 85	
OMS	---	---	---	---	---	2 a 5

Fuente: (Thesis Consulting, 2005)



#### 2.4.4 Transferencia

El propósito de los sistemas de transferencia es recibir los residuos sólidos de vehículos recolectores para transferirlos a un vehículo de mayor capacidad y así ser transportados a la planta de tratamiento o al sitio de disposición final, estos grandes vehículos suelen ser tracto camiones, vagones de ferrocarril o barcos (Carabias Lilo & Quadri de la Torre, 1996)

La función de una estación de transferencia es mejorar la eficiencia del servicio de recolección, al evitar que los vehículos de recolección transporten los RSM directamente a los sitios de disposición final. El Estado de Morelos cuenta con 28 estaciones de transferencia con diferentes características y capacidades, en general todas se encuentran sobre terrenos no aptos para realizar las operaciones necesarias, tienen instalaciones inadecuadas, no cuentan con un registro y control de los RSM que entran y salen, y no existe separación de RSM algún tipo (Gobierno del Estado de Morelos, 2010).

El Municipio de Cuernavaca cuenta con una estación de transferencia de nombre “El Polvorín” ubicada en la calle de Minerva en la colonia Loma Bonita, a un lado de la autopista México-Acapulco en las coordenadas: latitud; 18°52'51.51"N y longitud; 99°13'35.76"O; se encuentra sobre un terreno a desnivel el cual se aprovecha para transferir los RSM de los vehículos de recolección a los tráiler.

En la Figura 5 se presenta una foto panorámica de la estación de transferencia de Cuernavaca donde se observan las condiciones en las que se encuentra.





**Figura 5. Estación de transferencia del Municipio de Cuernavaca Morelos.**

**Fuente: (Google Maps, 2012)**

La estación de transferencia de Jiutepec conocida como “Joaquín Cabello” se ubica en la calle de Agua Fría en el Camino Viejo a San Gaspar en las coordenadas Latitud; 18°52'14.64"N Longitud; 99°10'6.51"O. En la Figura 6 se presenta una foto panorámica de esta estación.



**Figura 6: Estación de transferencia del Municipio de Jiutepec Morelos**

**Fuente: (Google Maps, 2012)**

El Municipio de Temixco tiene una estación de transferencia temporal, ubicada en las coordenadas latitud; 18°50'34.41"N longitud; 99°12'30.38"O. Se encuentra ubicada en un terreno a desnivel que se aprovecha para la transferencia de los RSM. A esta estación llegan un porcentaje muy bajo de los RSM que se generan en el Municipio, la mayor parte se lleva a la estación de transferencia de Cuernavaca. En la Figura 7 se presenta una foto panorámica de esta estación.



**Figura 7. Estación de transferencia del Municipio de Temixco**

**Fuente: (Google Maps, 2012)**

La mayoría de las estaciones de transferencia del Estado de Morelos no cuentan con las instalaciones adecuadas y no llevan un control de los RSM que entran y salen. En general todas las operaciones se realizan al aire libre .ya que no cuentan con un techo y se encuentran en terrenos poco aptos para las operaciones.

### 2.4.5 Tratamiento

La LGPGIR (2003) define tratamiento como: “procedimientos físicos, químicos, biológicos o térmicos, mediante los cuales se cambian las características de los residuos y se reduce su volumen o peligrosidad”.

En el Estado de Morelos más del 99% de los RSM generados llegan a sitios de disposición final sin ningún tipo de tratamiento. Sin embargo en el área conurbada de Cuernavaca se encuentran dos centros de composteo, ubicados en los Municipios de Jiutepec y Cuernavaca (Gobierno del Estado de Morelos, 2010).

El centro composteo de Jiutepec lleva un año en operación y ha procesado más de 25,000 metros cúbicos de materia orgánica; el centro composteo de Cuernavaca ubicado en la avenida Estado de Puebla no. 59, Colonia Chipitlan lleva operando desde el año 2010 pero no han publicado datos.

### 2.4.6 Disposición final

La norma oficial mexicana NOM-083-SERMANAT-2003 establece; “Un sitio de disposición final es un lugar donde se depositan los residuos sólidos municipales y de manejo especial en forma definitiva. Los métodos más utilizados en el Estado de Morelos son el de relleno sanitario y tiraderos a cielo abierto

Según la definición brindada por la Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en inglés), el relleno sanitario es la técnica para la disposición de los residuos sólidos en el suelo que puede implementarse “sin causar perjuicio al medio ambiente y sin ocasionar molestias o peligros para la salud y seguridad pública



Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos sólidos en la menor superficie posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable por medio de la compactación. Los residuos sólidos así depositados se cubren con una capa de tierra con la frecuencia necesaria, por lo menos al fin de cada jornada

Según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos “un tiradero a cielo abierto es un lugar donde se depositan los residuos sólidos a la superficie sin tener un control de las cantidades que ingresan y salen (H. Congreso de la Unión, 2003)

En el Estado de Morelos en el año 2009 se generaron 160,800 toneladas de RSM de los cuales el 66.8 %llegaron los rellenos sanitarios, el 8.0% llegaron a tiraderos a cielo abierto y el resto a celdas emergentes (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

En el Estado de Morelos hay 32 tiraderos a cielo abierto que son generadores de gases de efecto invernadero (metano y bióxido de carbono) y, por lo tanto, precursores del cambio climático y calentamiento global, 8 están clausurados, 2 en operación 2, 2 en desarrollo y 16 se encuentran fuera de operación. Todos estos son considerados como sitios inadecuados de disposición final que no cumple con los requisitos establecidos en la NOM-083-SEMARNAT-2003 (Gobierno del Estado de Morelos, 2010).|

En la Tabla 4 se presenta la información de los tiraderos a cielo abierto en el Estado de Morelos.



**PROPUESTA CONCEPTUAL DEL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS  
MUNICIPALES GENERADOS EN EL ESTADO DE MORELOS MEDIANTE LA TECNOLOGÍA DE  
DIGESTIÓN ANAEROBIA**

**Tabla 4. Tiraderos a cielo abierto en el Estado de Morelos**

<b>Municipio</b>	<b>Población</b>	<b>Generación [ton/día]</b>	<b>Tiradero a cielo abierto</b>	<b>Superficie [Ha]</b>	<b>Situación Actual</b>
Jojutla	50.196	36.91	El Higuerón	1.42	Clausurado
Mazatepec	8583	7.27	El Jabonero	7.46	Clausurado
Miacatlan	22276	14.79	La Palma	2.19	Clausurado
Temixco	104.102	114.07	Tetlama	14.48	Clausurado
Temoac	12.824	6.57	Ejido Tecajec	0.20	Clausurado
Tetecala	6.232	4.76	El Charco	0.61	Clausurado
Tlanepantla	5.919	3.56	Chantepec	0.87	Clausurado
Totolapan	11.168	8.2	Santa Barabara	4.50	Clausurado
Huzilac	15.291	12.26	El Tezontle	2.80	En proceso
Yautepec	86.581	62.25	El Zarco	2.50	En proceso
Jonacatepec	13.696	7.23	El Mirador	2.00	Con proyectos
Tlayacapan	59.091	12.41	Paraiso de Sol	1.56	Con proyectos
Puente de Ixtla	59.01	44.73	El Estudiante	8.00	Pendientes
			Rancho el Coronel	2.00	Pendientes
Tlaltizapán	44.87	15.51	Cualotla	2.30	Fuera de operación
			El Chiquihuite	18.00	Fuera de operación
Tlaquitenango	29.201	22.85	La Mina	1.00	Pendientes
Zacatepec	33.906	25.33	El Deposito	2.00	Pendientes
			El Papayo	4.20	Pendientes
			Atlahualoyac	0.60	Pendientes
Axochiapan	30.454	21.95	Ejido de Almolonca	0.70	Pendientes
			Ahuxtla	2.00	Pendientes
			Libramiento	0.43	Pendientes
			Tetelilla	0.30	Pendientes
Jonacatepec	13.696	7.23	Amacultlapilco	0.20	Pendientes
			Cerro del Horno	0.70	Pendientes
Tepalcingo	22.453	17.47	Zacapalco	0.40	Pendientes
			Ixtilico	0.30	Pendientes
Atlatlahucan	14.177	8.97	Tescalpa	1.00	Fuera de operación
Ocuituco	15.632	8.97	"Sin Datos"	0.50	Fuera de operación
Tetela del Volcán	18.179	7.88	El Calabazo	1.00	Fuera de operación
Yecapixtla	42.353	9.16	"Sin Datos"	1.00	Fuera de operación
Ayala	70.179	26.8	Moyotepec	6.00	Pendientes
Tepoztlan	39.361	40.56	Amilcingo	4.00	Pendientes
Jiutepec	190.27	23.5	Universidad politécnica	2.00	Fuera de operación
Temixco	104.12	179.26	Mina san Felipe	5.01	Fuera de operación
Amacuzac	14.555	114.07	El Cujil	1.50	Fuera de operación
			La Segunda	0.20	Pendientes

Fuente: (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

Por otra parte en el Estado se encuentran 5 rellenos sanitarios. El relleno sanitario “La Perseverancia” ubicado en el Municipio de Cuautla, es el de mayor capacidad, se disponen 226 ton/día de RSM provenientes de los Municipios de Cuautla, Zacualpan, Jatetelco y del Distrito Federal.



El Municipio de Cuernavaca dispone sus residuos generados en el relleno sanitario “Loma Mejía” concesionado a la empresa PASA. El municipio de Jiutepec no cuenta con un sitio de disposición final, es desconocido por la CEAMA a donde llegan sus RSM, el Municipio de Temixco disponen sus RSM en rellenos sanitarios del Estado de México.

La situación actual de estos rellenos sanitarios es alarmante por que no cumplen con los requisitos que señala la NOM-083-SEMARNAT-2003, presentan malos olores, moscas, incendios y dan mal aspecto. En General no hay un procedimiento que permita reducir los tiempos de maniobras de entrada, espera, descarga y salida de los vehículos que acuden a depositar los RSM.

**Tabla 5. Rellenos sanitarios del Estado de Morelos**

<b>Nombre</b>	<b>Municipio</b>	<b>Población</b>	<b>Generación [ton/día]</b>	<b>Superficie [Ha]</b>
Relleno sanitario región Poniente	Coatlan del Rio	7629	5.67	7.64
	Mazatepec	8583	7.27	
	Miacatlan	22276	14.79	
	Tetela	6232	4.76	
	<b>Total regional</b>	<b>44720</b>	<b>32.49</b>	
Relleno sanitario región nor-oriente	Atlatlahuacan	14177	8.97	24
	Ocuituco	15632	7.88	
	Tetela del volcán	18179	9.16	
	Yecapixtla	42353	26.8	
	Tlanepantla	5919	3.56	
	Totolapan	11168	8.2	
	Temoac	12828	6.57	
<b>Total regional</b>	<b>90341</b>	<b>71.14</b>		
Loma Mejía	Cuernavaca	362300	553.03	8.51
	El Tezontle	Huizilac	15291	12.26
La perseverancia	Cuatla	167919	179.67	12
	Zacualpan	7842	4	
	Jantetelco	13911	8.75	
			<b>192.42</b>	

Fuente: (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)



## **2.5 Caracterización de residuos sólidos municipales**

---

La caracterización de residuos RSM se puede definir como “un conjunto de acciones en base a una metodología para recolectar los datos que nos permitan determinar las propiedades; físicas químicas y biológicas en una determinada localidad y en un tiempo determinado” (Runfola & Gallardo, 2009).

A nivel internacional, nacional y estatal se cuenta con muy poca información acerca de la caracterización de RSOM. Sin embargo existen muchas técnicas para caracterizar RSM que se pueden adaptar para caracterizar RSOM. Dentro de estas técnicas se encuentran las que presentan las normas mexicanas (NMX) y los métodos (APHA, 2005). En los siguientes apartados se describen algunas de estas técnicas.

### **2.5.1 Humedad y sólidos totales (ST)**

El contenido de humedad y de sólidos son parámetros muy importantes en la DA. Estas propiedades indican la cantidad de agua que se necesita agregar a los RSOM para obtener la concentración de sólidos adecuada para la correcta operación del proceso (GIZ, 2012).

Para determinar el contenido de humedad y sólidos totales, la norma mexicana NMX-AA-016-1984 presenta un método gravimétrico que consiste en pesar una muestra de RSOM, posteriormente calentarla en una estufa a 105 °C para evaporar el agua que contiene. Una vez hecho esto, se vuelve a pesar la muestra y por diferencia de peso se calcula la humedad y los sólidos totales.



### **2.5.2 Determinación sólidos fijos (SF) y sólidos volátiles (SV)**

La determinación de los sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF) es importante para el proceso de la DA, ya que representan una aproximación del contenido de materia orgánica e inorgánica en los RSOM (Metcalf y Eddy, 2003).

Los sólidos fijos y volátiles son indicadores del potencial de generación de metano, en los procesos de la DA. La literatura reporta: entre mayor cantidad de sólidos volátiles mayor rendimiento de producción de metano.

Para determinar los sólidos fijos y volátiles se utiliza el método que presenta la norma mexicana NMX-AA-016-1984. Las muestras secas provenientes de la determinación de sólidos totales, se introducen a una mufla de ignición a 550 °C, por un tiempo mínimo de 40 min, se enfrían en un desecador hasta la temperatura ambiente, después se ingresan nuevamente a la mufla (a 105°C) hasta que se obtiene un peso constante.

El cálculo de sólidos fijos se realiza utilizando la relación de peso de la muestra calcinada en la mufla y el peso de la muestra base húmeda multiplicada por un factor para homogenizar unidades. Por otra parte se calcula la cantidad de los sólidos volátiles utilizando la relación de la diferencia de pesos de la muestra calcinada y la muestra base seca, dividiéndola entre el peso de la muestra base seca.

### **2.5.3 Determinación de cenizas**

El contenido de cenizas es una propiedad importante para la DA ya que está relacionada con la cantidad de materia inorgánica resultante de la reacción de combustión por lo que su valor se relaciona con los sólidos fijos SF.



Para determinar el contenido de cenizas de los RSOM, existe el método de calcinación a alta temperatura que presenta la norma mexicana de referencia NMX-AA-018-1984. Este método consiste en calcinar una muestra de RSOM en una mufla a 800°C hasta que se obtiene un peso constante y se deja enfriar en un desecador. Posteriormente se pesa la muestra y se realizan los cálculos para determinar el contenido de cenizas.

#### **2.5.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

La demanda química de oxígeno es importante en la DA debido a que representa una aproximación del contenido de materia orgánica biodegradable presente en un sustrato (Metcalf y Eddy, 2003).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de los RSOM. Para determinar este parámetro la norma mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001 presenta un método que consiste en estimar la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana para oxidar la materia orgánica de dichas muestras en un periodo de 5 días.

La DBO<sub>5</sub> se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto final al cabo de cinco días de incubación a 20°C. La determinación del oxígeno disuelto en una muestra de agua se realiza por el método de Winkler (explicado en la misma norma mencionada).

#### **2.5.5 Demanda química de oxígeno (DQO)**

La determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro importante en los procesos de la DA debido a que representa una aproximación de la cantidad de materia orgánica necesaria para el crecimiento de los microorganismos, a partir del oxígeno equivalente requerido para su oxidación.



La demanda química de oxígeno (DQO) es una medida aproximada del contenido total de materia presente en una muestra RSOM que puede ser oxidada en condiciones naturales. En las pruebas de DQO se acelera el proceso de oxidación de la materia orgánica, mediante un proceso de oxidación forzada, utilizando oxidantes químicos y métodos estandarizados.

Para determinar este parámetro se cuenta con el método indicado en la norma americana (APHA-AWWA-WPCF, 1995). En éste, se utiliza ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  para oxidar la muestra de RSOM y se determina la absorbancia para calcular las concentraciones de materia orgánica a partir de una curva de calibración.

### **2.5.6 Fósforo total**

El fósforo al igual que el nitrógeno es uno de los nutrientes importantes para el desarrollo de las bacterias implicadas en el proceso de biodegradación de los RSOM por medio de la DA.

El fósforo se encuentra en los RSOM como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos órgano fosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, entre otros.

La norma mexicana NMX-AA-029-1985 presenta el método de digestión ácida para determinar el contenido total de fósforo presente en una muestra de RSM. Este método consiste en dos pasos principales; El primero consiste en la conversión de todas las diferentes formas de fósforo presentes en la muestra de RSOM a ortofosfatos. El segundo paso consiste en la detención del ortofosfatos en solución por el método de absorbancia.



### 2.5.7 Nitrógeno Kjeldahl

La determinación de Nitrógeno es importante debido a que es uno de los nutrientes esenciales para el desarrollo metabólico de las bacterias que producen el metano en el proceso de la DA (Metcalf y Eddy, 2003).

El método de nitrógeno Kjeldahl consiste en determinar el contenido total de nitrógeno en una muestra de RSOM. Para esto, mediante una digestión ácida, se efectúa la transformación de nitrógeno orgánico a nitrógeno mineral y posteriormente se cuantifica el contenido total en forma de nitrógeno mineral.

En el método Kjeldahl presentado en la norma mexicana NMX-AA-026-SCFI-2001, la muestra es digerida con ácido sulfúrico, y el nitrógeno orgánico se convierte en sulfato de amonio. La solución es entonces alcalinizada. El amoníaco  $\text{NH}_3$  desprendido es recuperado en una solución de ácido sulfúrico y se titula con una solución de hidróxido de sodio estandarizada, con el objetivo de conocer la concentración de ácido sulfúrico que indirectamente concentración de nitrógeno.

---

### 2.6 Muestreo de RSM

---

Para diseñar e implementar sistemas de manejo y tratamiento de RSM para una determinada localidad se requiere conocer varias características de los RSM en relación con la generación, composición y peso volumétrico, según el tipo de manejo o tratamiento que se pretenda realizar (Cantanhede, et al., 2005)

Esto implica realizar un muestreo bajo una metodología dirigida a cumplir un objetivo específico, y que permita obtener datos de generación, composición y peso volumétrico y preparar muestras lo más representativo posible de una determinada localidad. Un muestreo se realiza en dos etapas: en la primera se diseña un plan de muestreo y en la segunda se desarrolla la metodología planteada en la primera etapa (Runfola & Gallardo, 2009).



En la etapa de diseño se define el objetivo del muestreo, se determina el tamaño de muestra a extraer, se diseña la metodología de homogenización y preparación de las muestras y se definen las propiedades físicas a medir en el sitio de muestreo.

Durante la etapa de desarrollo se homogeniza y preparan las muestras que se enviarán al laboratorio para su posterior caracterización elemental, por otro lado se determinan en sitio el peso volumétrico, la composición de los subproductos y la generación de RSM.

Con este propósito a nivel internacional, nacional y municipal existen varios métodos y técnicas para el diseño y ejecución de un muestreo de RSM, cada una con diferentes objetivos (Runfola & Gallardo, 2009). En México para el caso de muestreo de RSM se tienen las normas mexicanas de referencia (NMX). Estas normas están dirigidas a la toma de muestra desde la fuente de generación y a la realización de un muestreo por estratos socioeconómicos.

Para el caso de muestreo de RSOM, a nivel internacional y nacional no existe una metodología general o estándar. Por tal situación se utilizan los métodos de muestreo de RSM con notables modificaciones.

En este sentido para la toma y procesamientos de muestras se aplica la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-15-1985 y la NOM-AA-19-1985. Para determinar el peso volumétrico se utiliza el método de la norma NMX-AA-019-1985 y para determinar la generación de residuos aplican la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-61-1985.

En el caso del método de cuantificación de subproductos de RSM, se utiliza la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-022-1985. Esta norma presenta una clasificación de los RSOM de solo dos categorías. Por lo tanto, para una clasificación más completa se utiliza la norma técnica estatal del Estado de México NTEA-013-SMA-RS-2000.



Los muestreos se pueden clasificar de la siguiente manera: muestreos del tipo estadístico y muestreos aleatorios. En un muestreo estadístico se aplica el tratamiento de datos históricos de generación y composición en función de una distribución normal, para calcular el tamaño de muestra representativa. En el muestreo aleatorio se define de manera arbitraria el tamaño de muestra y la forma de extraer la muestra,



### 3. Digestión Anaerobia (DA)

---

La digestión anaerobia (DA) o biometanización es un proceso microbiológico que se realiza por la acción de grupos de bacterias anaerobias, que en ausencia de oxígeno, degradan la materia orgánica en una mezcla de gases, fundamentalmente metano (CH<sub>4</sub>) y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (conocida como biogás) y un residuo sólido (denominado digestato), que es una mezcla de productos minerales (N; P; K; Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación (GIZ, 2012).

Este proceso puede ser utilizado para recuperar la energía y nutrientes contenidos en la fracción biodegradable de los RSOM. La DA para la generación de biogás se realiza normalmente en tanques, denominados biodigestores, y presentan beneficios económicos y ambientales como consecuencia de la descomposición de los RSOM, la producción de energía eléctrica y la producción de composta para uso agrícola.

---

#### 3.1 Procesos microbiológicos

---

Cuando los RSOM se mantienen en un ambiente en ausencia de oxígeno O<sub>2</sub>, bacterias anaerobias especializadas se desarrollan y utilizan el exceso de materia orgánica para sus procesos metabólicos. Los productos finales son principalmente metano y dióxido de carbono (Mata Alvarez, 2003).

El proceso global de la conversión de la materia orgánica compleja en metano y dióxido de carbono puede dividirse en las siguientes cuatro etapas que se muestra en Figura 8; la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (van Haandel & van der Lubbe, 2007).

Como se presenta en la en Figura 8, la biodegradación de RSOM vía DA, un número de microorganismos trabajan en secuencia, el productos de un grupo sirve

---

---



de sustrato a otro. Un grupo es responsable de la hidrólisis de polímeros orgánicos y lípidos, un segundo grupo de bacterias anaerobias fermentan los productos del primer grupo a simples ácidos orgánicos. Finalmente un tercer grupo de microorganismos utiliza hidrógenos y ácido acético para formar metano ( $\text{CH}_4$  gaseoso y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Gerardi H., 2003)

A continuación se hará una descripción más detallada de las etapas que componen el proceso de degradación anaerobia.

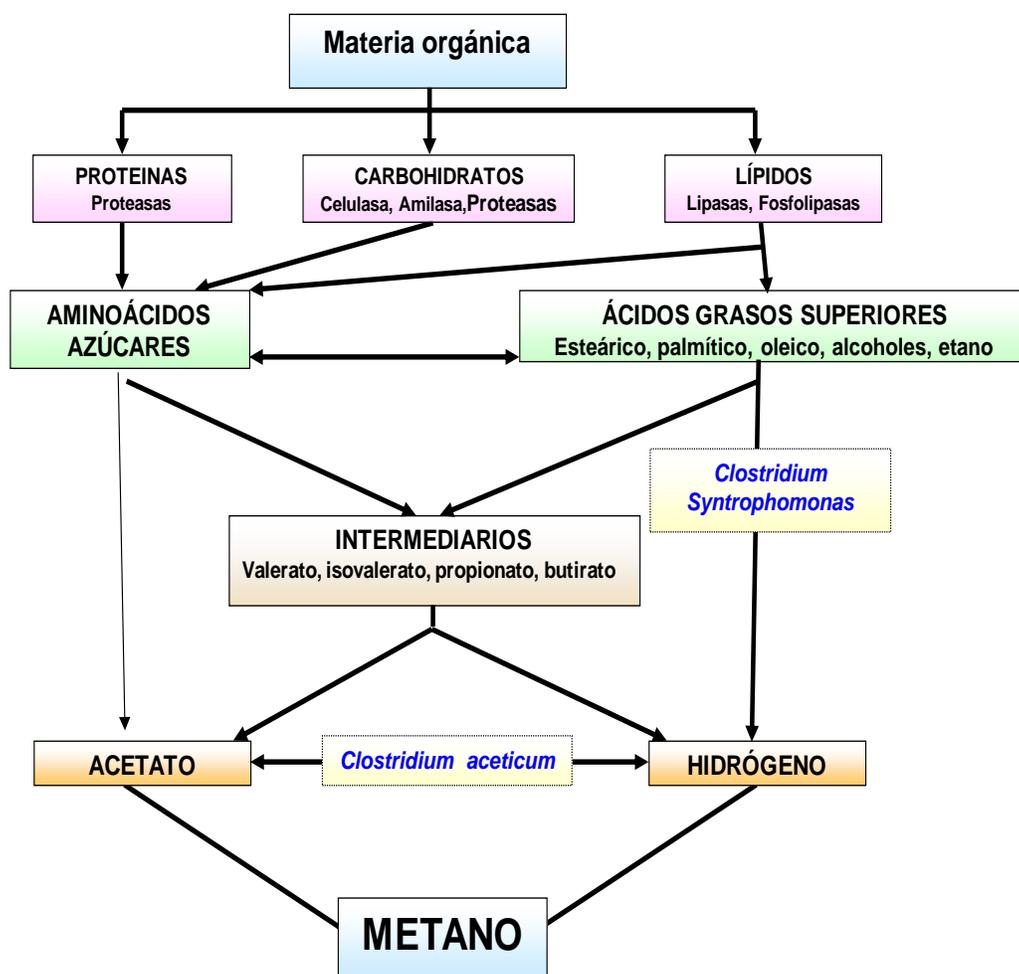


Figura 8. Esquema de degradación de RSOM por Digestión Anaerobia

Fuente. Adaptación de (Mata Alvarez, 2003)

➤ **Etapa de Hidrolisis**

En esta etapa macromoléculas como las proteínas, carbohidratos y los lípidos son hidrolizados por microorganismos en moléculas de menor peso atómico como son: péptidos, sacáridos y ácidos grasos. Estos microorganismos tienen la capacidad de descomponer las grandes cadenas de las macromoléculas orgánicas naturales en compuestos de peso molecular intermedio. (Gerardi H., 2003).

➤ **B. Etapa de Acidogénesis**

En la etapa de formación de ácidos o acidogénesis, compuestos solubles producidos a través de la hidrólisis o descargados al digestor son degradados por una gran diversidad de microorganismos anaerobios a través de muchos procesos de degradación fermentativa.

La degradación de estos compuestos resulta en la producción de dióxido de carbono, hidrógeno, alcoholes, ácidos orgánicos, algunos compuestos orgánicos de nitrógeno y azufre.

➤ **C. Etapa de Acetogénesis**

En la etapa de acetogénesis, los compuestos formados en la acidogénesis son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono por bacterias acetogénicas.

➤ **D. Etapa de Metanogénesis**

En la etapa metanogénica, el metano se forma principalmente a partir de acetatos y dióxido de carbono con hidrógeno. El metano también se forma a partir de algunos compuestos orgánicos diferentes al acetato. Por lo tanto, todos los productos



fermentativos son convertidos en compuestos que pueden ser utilizados directa o indirectamente por las bacterias metanogénicas

Ácidos, alcoholes, y compuestos orgánicos de nitrógeno, que no son degradados por las bacterias metanogénicas, se acumulan en el sobrenadante de digestor. La acumulación de estos compuestos se debe al alto contenido orgánico, o demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del sobrenadante.

### 3.2 Bioquímica

Se conoce que las bacterias metanogénicas pueden utilizar un número limitado de sustratos para la formación de metano. Estos microorganismos utilizan los siguientes sustratos: bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Hidrogeno (H<sub>2</sub>), acetato, ácido fórmico, metanol, monóxido de carbono, metilaminas y algunos metales (Chynoweth, 1996). Las reacciones de estos sustratos se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6. Principales reacciones de metanogénesis**

Precursor	Reacción	
Hidrogeno	$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	<b>Ecuación 1</b>
Acetato	$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$	<b>Ecuación 2</b>
Ácido fórmico	$4HCOOH \rightarrow CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O$	<b>Ecuación 3</b>
Metanol	$4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2H_2O$	<b>Ecuación 4</b>
Monóxido de carbono	$4CO + 2H_2O \rightarrow CH_4 + 3H_2CO_3$	<b>Ecuación 5</b>
Trimetilamina	$4(CH_3)_3N + 6H_2O \rightarrow 9CH_4 + 3CO_2 + 4NH_3$	<b>Ecuación 6</b>
Dimetilamina	$2(CH_3)_2NH + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2NH_3$	<b>Ecuación 7</b>
Monometilamina	$4(CH_3)NH_2 + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 4NH_3$	<b>Ecuación 8</b>
Metil Mercaptano	$2(CH_3)_2S + 3H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + H_2S$	<b>Ecuación 9</b>
Metales	$4Me^0 + 8H^+ + CO_2 \rightarrow 4Me^{2+} + CH_4 + 2H_2O$	<b>Ecuación 10</b>

Fuente; (Chynoweth, 1996)

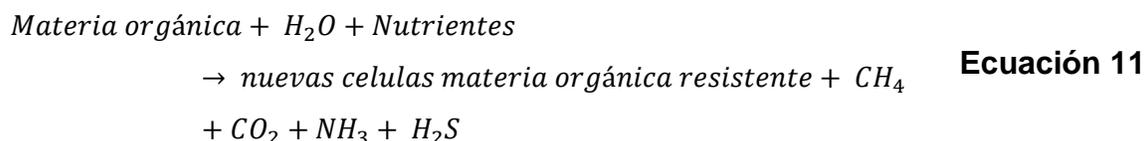
En la digestión anaerobia las dos principales vías involucradas para la formación de metanos son; la conversión de hidrógeno y dióxido de carbono a metano y agua mostrada en la Ecuación 1 y en la Ecuación 2, la conversión del acetato y ácido fórmico a metano dióxido de carbono y agua (Chynoweth, 1996).



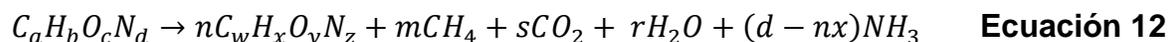
### 3.3 Producción de biogás

---

La biodegradación de los RSOM por el proceso de Digestión Anaerobia puede estar representada de forma general por la Ecuación 11 (Tchobanoglous & Theisen, 1994):



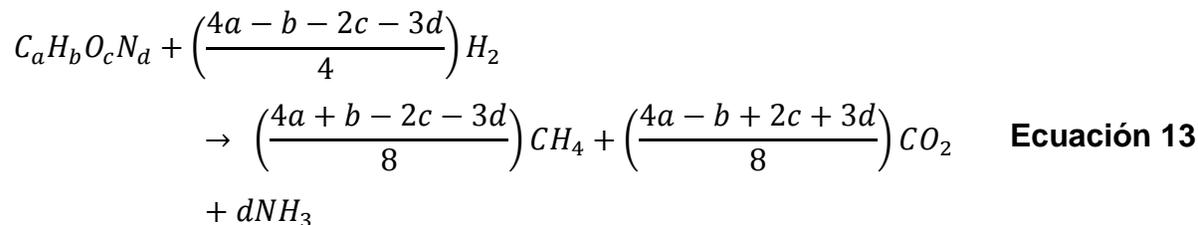
Para fines prácticos la eficiencia de la conversión general de la materia orgánica a metano, dióxido de carbono y amoníaco puede estar representada por la Ecuación 12,



Donde:

$$s = a - nw - m, \quad r = c - ny - 2s$$

Si se asume que los RSOM están estabilizados completamente, la biodegradación de los RSOM por DA le corresponde la expresión presentada en la Ecuación 13 (McCarty, 1964);



En la operación de plantas de tratamientos por DA, los RSOM deben mezclarse con lodos diluidos de proceso provenientes del biodigestor. Se ha encontrado que el gas colectado del digestor tiene entre 50 y 60 % de metano.



### 3.4 Parámetros que influyen en la DA

---

Los parámetros más relevantes para la Digestión Anaerobia de RSOM son; el tipo de régimen de operación del proceso (continuo, discontinuo y semicontinuo), las etapas de proceso (una o dos etapas), temperatura de operación (mesofílica, termofílica), contenido de sólidos, el pH del medio de cultivo y los nutrientes de los microorganismos (Lissens, et al., 2001)

#### 3.4.1 Régimen de operación

Los procesos de DA que pueden clasificarse como discontinuos o por lotes, continuos y semicontinuos. Antes de desarrollar el balance de materia es necesario conocer a cuál de estas categorías pertenece (Felder & Rousseau, 2006).

- **Proceso Continuo;** Las corrientes de alimentación y descarga fluyen de manera continua. En un proceso de DA, la alimentación de RSOM e inóculo, la producción de biogás y digestato, fluyen de manera continua durante todo el proceso.
- **Proceso discontinuo o por lotes.** La alimentación se carga a un recipiente al comienzo del proceso y trascurrido un tiempo se retira el contenido de dicho recipiente. En un proceso discontinuo de DA, el bioreactor se llena con materia orgánica junto con el inóculo y permanecen juntos hasta un intervalo de tiempo necesario.
- **Proceso semicontinuo;** la alimentación o descarga se llevan de forma periódica. En un proceso semicontinuo de DA consiste en introducir materia orgánica, el inóculo o ambos de en cargas en intervalos de tiempo



### 3.4.2 Etapas del proceso

Uno de los parámetros más importantes para la clasificación de procesos de DA, son el número de etapas. La biometanización de materia orgánica se lleva a cabo por una serie de transformaciones bioquímicas que se pueden separar en una primera etapa en la que se realizan la hidrólisis y la acidogénesis y una segunda etapa donde tienen lugar las etapas acetogénesis y la metanogénesis (Lissens, et al., 2001). Los dos principales procesos existentes son;

- **Proceso de una etapa;** todas las reacciones bioquímicas y todos los procesos biológicos se llevan a cabo en un reactor.
- **Procesos de dos etapas;** las reacciones se llevan un sistema en serie de dos reactores. El primer reactor llamado ácido o acidogénico se llevan simultáneamente las etapas hidrolíticas y acidegénica, En un segundo reactor llamado metanogénico se realizan las etapas acetogénica y metanogénica

### 3.4.3 Temperatura

La temperatura es una de las principales variables físico-químicas ya que afecta a la velocidad global del proceso, la actividad de los microorganismos, la constante de equilibrio, la solubilidad de los gases y al tipo de microorganismos presente en el medio.

La temperatura puede controlar el proceso de digestión anaerobia, ya que por una parte selecciona los microorganismos preponderantes en el mismo y, por otra, controla la velocidad de crecimiento de los mismos, por lo que pequeñas oscilaciones del orden de 2°C, pueden ocasionar el desequilibrio de las velocidades de producción y de utilización de un determinado producto, conduciendo a grandes distorsiones del proceso (Romero, 1991).



Las bacterias se pueden clasificar atendiendo el intervalo de temperatura para su desarrollo. En la Tabla 7 se presenta la clasificación de las bacterias de acuerdo al intervalo de temperatura

**Tabla 7. Clasificación de la DA por temperatura**

Clasificación	Temperatura optima
Psicrofilica	$T < 15^{\circ}\text{C}$
Mesofilica	$15 < T < 45^{\circ}\text{C}$
Termofilica	$50 < T < 70^{\circ}\text{C}$

Fuente: (Tchobanoglous & Theisen, 1994)

La digestión anaerobia se puede realizar en un rango de temperatura que va desde los 10 °C hasta los 70 °C como se presenta en la Tabla 7. Este Rango se clasifica de acuerdo a la temperatura de desarrollo de los microorganismos.

### 3.4.4 Contenido de sólidos

Los procesos de Digestión Anaerobia para tratamiento de RSOM se pueden clasificar de acuerdo a la concentración de sólidos en; procesos con un alto contenido de sólidos y procesos con bajo contenido de sólidos (Lissens, et al., 2001).

- **Digestión anaerobia con alto contenido de sólidos o seca;** en estos sistemas la materia orgánica dentro del reactor mantiene una concentración mayor a 15% de contenido de sólidos. En consecuencia solo materia orgánica muy seca ( $\text{TS} > 60\%$ ) necesitan ser diluidas con agua de proceso.
- **Digestión anaerobia con bajo contenido de sólidos o húmeda;** La materia orgánica dentro del biodigestor tiene una concentración menor a 15 % de sólidos. Los residuos se diluyen con agua hasta alcanzar la concentración adecuada.



### 3.5 Tecnologías aplicadas

---

Las tecnologías aplicadas para la degradación de RSOM vía DA, se clasifican principalmente por el contenido de sólidos que ingresan al biodigestor. Se tienen tecnologías con alto contenido de sólidos o secas donde se encuentre el proceso Dranco y Valorga y tecnologías con bajo contenido de sólidos o húmedas donde se encuentran los procesos BTA y Ross Rocca.

#### 3.5.1 Con alto contenido de sólidos o secas

##### ➤ Proceso DRANCO

El proceso DRANCO ha sido desarrollado para la conversión de los residuos sólidos orgánico específicamente los residuos sólidos orgánicos Municipales (RSOM) a energía y un producto final llamado Humus (Six & De Baere, 1992). El esquema básico para el proceso DRANCO está representado en la Figura 9, y enseguida se describe:

1. Se recolectan residuos sólidos mezclados el primer paso en el proceso DRANCO consiste en disminuir el tamaño de partícula hasta un tamaño menor a 40 mm y separar los residuos de mayor tamaño como plásticos, textiles y algunos otros en una criba. Los metales pueden ser recuperados para propósitos de reciclaje con una banda magnética. Las piedras vidrio y plástico duro deben ser eliminarse tanto como sea posible. Este proceso puede manejar altas concentraciones de contaminantes y no degradables en la fracción orgánica en el digestor
2. La fracción orgánica pretatada con un tamaño menor a 40 mm se mezcla con una gran cantidad de residuos digerido proveniente del digestor. La relación de la mezcla es generalmente alrededor de 1 tonelada de materia orgánica fresca con 6 a 8 toneladas de residuos digerido. Todo esto tiene



lugar en la parte de mezclado de la bomba de. Una pequeña cantidad de vapor se añade a la mezcla para elevar con el fin de elevar la temperatura hasta 35 a 40 °C para operación mesofílica y hasta 50 a 55 °C para la operación y termofílica

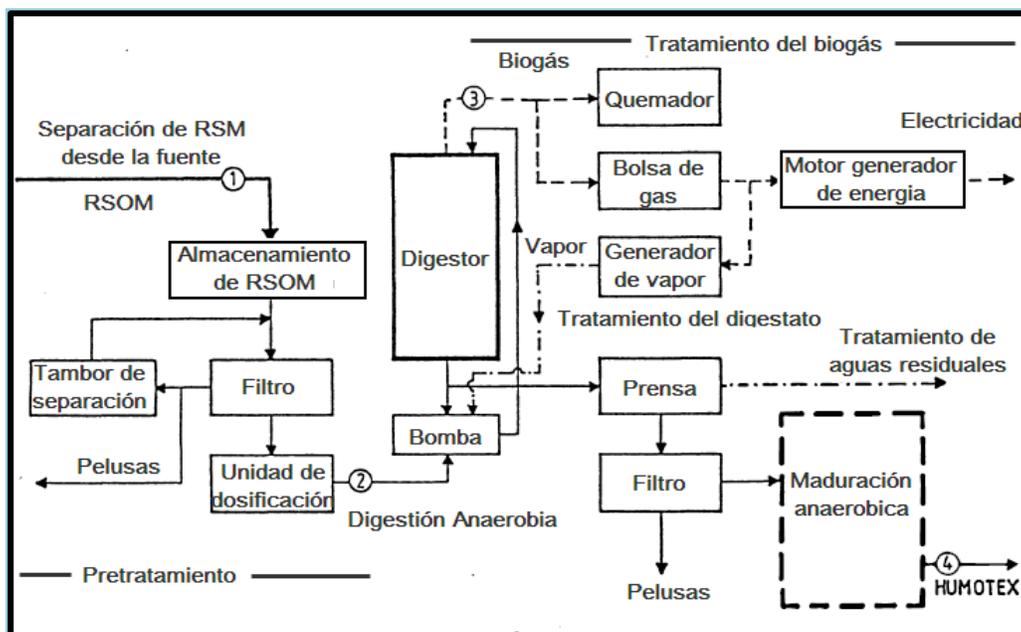


Figura 9. Diagrama de flujo de proceso DRANCO.

Fuente: (DRANCO, 2010)

3. La mezcla precalentada de residuos orgánicos se bombea a la parte superior del digestor a través de una línea de alimentación.
4. Una vez que el material entra en el cuerpo principal del digestor, se tarda de 2 a 4 días para alcanzar el fondo del digestor dependiendo del flujo de alimentación. La materia orgánica digerida desciende a través del digestor solamente por gravedad. El biogás se va a la parte superior del digestor y fluye hacia el almacenamiento y tratamiento de biogás.
5. El residuo digerido o digestato se extrae de la parte inferior del digestato por medio de extrusores. La mayor parte del digestato extraído es recirculado

para mezclarse con la alimentación de materia orgánica pretatada. La parte restante se desvía hacia un tratamiento adicional. El tiempo de retención promedio del digestor es alrededor de 20 días.

### ➤ **Proceso Valorga**

Este proceso fue desarrollado en Francia en 1981 y fue diseñado inicialmente para tratar los RSOM y más tarde adaptado al tratamiento de RSM mezclados (Shefali, 2002). La planta piloto se instaló 1982 en Montpellier, Francia. La Primera planta a escala industrial, de 50.000 ton/ año, se abrió agosto de 1988 en Amiens, Francia, como la primera planta de DA para el tratamiento de RSM con el alto contenido de sólidos totales en todo el mundo (Laclos, et al., 1997).

Antes de que los residuos entren al reactor de DA pasan por un pretratamiento que consiste en una separación en automático de los contaminantes no biodegradables tales como bolsas de plástico, vidrio, metales. Después del tratamiento previo los residuos se mezclan con un lodo espeso hasta obtener una concentración de 25-32% de TS y se introduce en la parte inferior del reactor de DA.

El reactor del proceso Valorga tiene una posición vertical, con un flujo tipo pistón en dirección inversa de la gravedad, es cilíndrico y está separado en dos compartimentos por una división vertical. Esta pared se extiende 2/3 del diámetro y de la altura total del reactor. El diseño del reactor asegura que el material se mueve hacia arriba y alrededor de la división.

El biogás se recircula a través de la parte inferior del reactor para proporcionar mezcla y la suspensión de los sólidos como la suspensión se mueve a través del reactor (Laclos, et al., 1997). Típicamente, el proceso Valorga se hace funcionar a alta concentración de sólidos 25-32%, y puede ser operado a temperatura de tanto mesofílica y termofílica.



El material digerido se deshidrata y la parte sólida es tratada aeróbicamente a completamente estabilizado compost. El biogás producido en estas plantas se utiliza para la producción de calor, electricidad o se purifica, para una calidad de gas natural y se vende como un combustible.

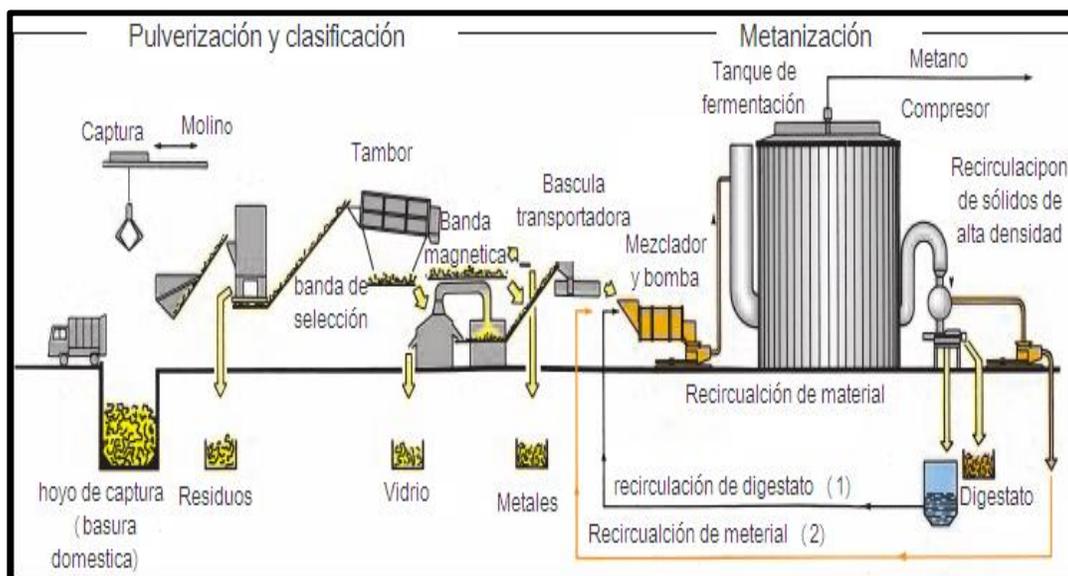


Figura 10. Diagrama de flujo del proceso Valorga.

Fuente: (Valorga, 2008)

### 3.5.2 Con bajo contenido de sólidos o húmedas

#### ➤ Proceso BTA

El proceso BTA fue desarrollado en 1983 en Alemania, como un sistema de una sola etapa con bajo contenidos de sólidos para tratar RSM mezclados o RSOM separados desde fuente. Este proceso combina sofisticados pretratamientos de aguas de proceso y técnicas de separación con instalaciones completamente cerradas y automatizadas.

El esquema de procedimiento de una planta BTA de una sola etapa se muestra en la Figura 11.

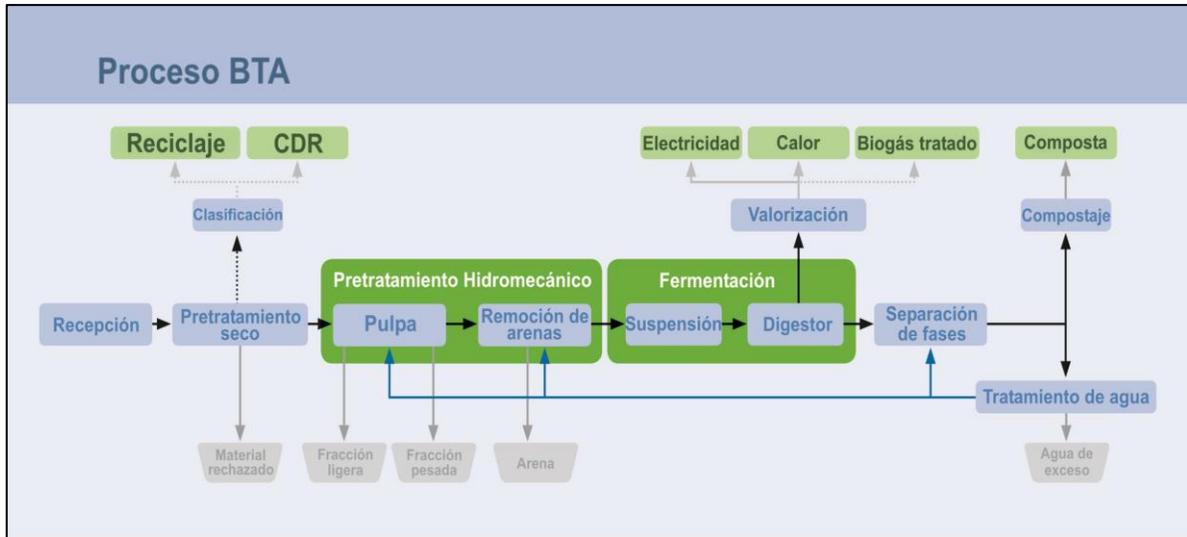


Figura 11. Diagrama de flujo del proceso húmedo BTA

Fuente: (BTA Internacional, 2009)

El paso inicial es la alimentación del sistema con los residuos biológicos húmedo y molienda de la misma. La solución mezclada se envía a la trituradora y se mezcla con agua de proceso, donde se retira la fracción ligera (plásticos) y la fracción pesada (vidrio, piedras y baterías).

A continuación, el hidrociclón separa los sólidos (arena) de los líquidos, produciendo una pulpa digestión limpia, homogénea y listo para. La pulpa se calienta y entra en el reactor donde hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis tener lugar. El contenido digestores se mezcla continuamente con biogás comprimido Figura 11.

El biogás se quema en una CHP para producir energía térmica y eléctrica, mientras que el resto del sustrato se deshidrata mecánicamente y se envía a post-compostaje (CCL Bioenergy, 2013)

➤ **Proceso Húmedo Ros Roca**

Para el proceso húmedo se aplica un pretratamiento que depende del tipo de residuo a tratar. Si se trata de FORSU, se implementa un sistema de separación manual o automática de los materiales no biodegradables más grandes que aún contengan los residuos (Korz, 2010).

Los residuos se colocan en un búnker para ser llevados a una trituradora y de esta forma reducir su tamaño de partícula. Después pasan a un tanque de mezclado donde se añade agua de proceso para mantener un porcentaje de Sólidos totales menor al 20% formando una pulpa.

En este tanque son separados algunos materiales pesados como piedras, arena y fragmentos de vidrio. Inmediatamente después, los residuos pasan por un tromel o tamiz que se encarga de remover la fracción ligera para continuar el proceso con la fracción restante. Esta fracción se lleva a un tanque para formar una suspensión homogénea y precalentarse a 37 °C antes de entrar al biodigestor (Korz, 2010).

En algunas plantas, el proceso se adapta para incluir un sistema de pasteurización que se lleva a cabo en un tanque a 70 °C con un tiempo de retención hidráulico de una hora. Este post-tratamiento se aplica sobre residuos provenientes de subproductos de origen animal, además para asegurar la producción de fertilizantes de alta calidad. Cuando esta etapa se lleva a cabo, es necesario disminuir la temperatura a condiciones termofílicas (Korz, 2010).



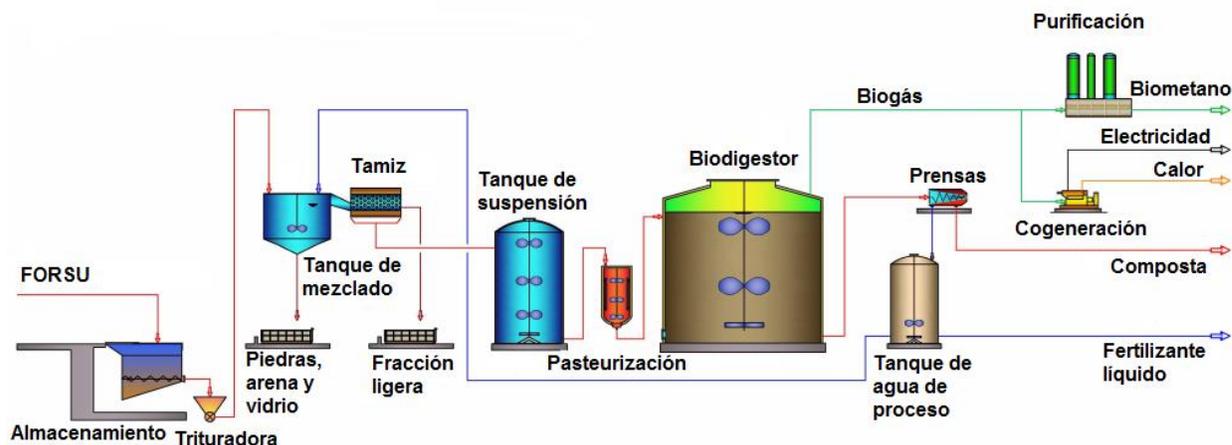


Figura 12. Diagrama de flujo del proceso húmedo Ros Roca

Fuente: (Ros Roca SA, 2013).

El biodigestor es vertical de forma cilíndrica con un domo en la parte superior para almacenar todo el biogás producido. Posee un sistema de agitación inyectando una parte del biogás a través de tubos desde la parte superior, con lo cual se reduce el mantenimiento al no tener instrumentos de agitación al interior (Ros Roca SA, 2013).

El digestato resultante de la digestión, se dirige a un sistema de deshidratación por medio de centrífugas rotatorias y una solución polimérica que se añade antes de éstas para flocular los sólidos, facilitando la separación. La mayoría del agua recuperada en esta etapa es recirculada hacia las etapas de pretratamiento, la otra parte se utiliza directamente como fertilizante líquido (Korz, 2010).

El digestato sólido se lleva a un tratamiento aerobio para estabilizar sus componentes y convertirlo en composta. Este proceso se puede llevar a cabo de dos formas: en sistemas estáticos o en sistemas dinámicos semicerrados. Todo el aire que se utiliza en ambos procesos recibe un tratamiento de purificación para poder ser liberado al exterior nuevamente (Ros Roca SA, 2013).

El biogás recolectado recibe un tratamiento para reducir la humedad y la cantidad de H<sub>2</sub>S, que depende del uso final de éste. La mayoría de las plantas utilizan un sistema de cogeneración (electricidad y calor), a través de un motor tipo Otto. La planta consume generalmente el calor generado y sólo una parte de la electricidad producida la parte restante que típicamente es mayor al 60 % de la producción total se envía a la red eléctrica local (Ros Roca SA, 2013).



## 4. Metodología

La metodología desarrollada en el presente estudio se realizó conforme a las diferentes etapas indicadas en la figura 13 y está dirigida a obtener a nivel conceptual una propuesta para tratar los RSOM generados en el Estado de Morelos vía DA, transformándolos en recursos aprovechables para la sociedad, tales como el biogás, la energía eléctrica y la composta fina de uso agrícola, además de contribuir a la disminución de los volúmenes de RSOM que llegan en la actualidad a los diferentes sitios de disposición final con que cuenta el Estado de Morelos .

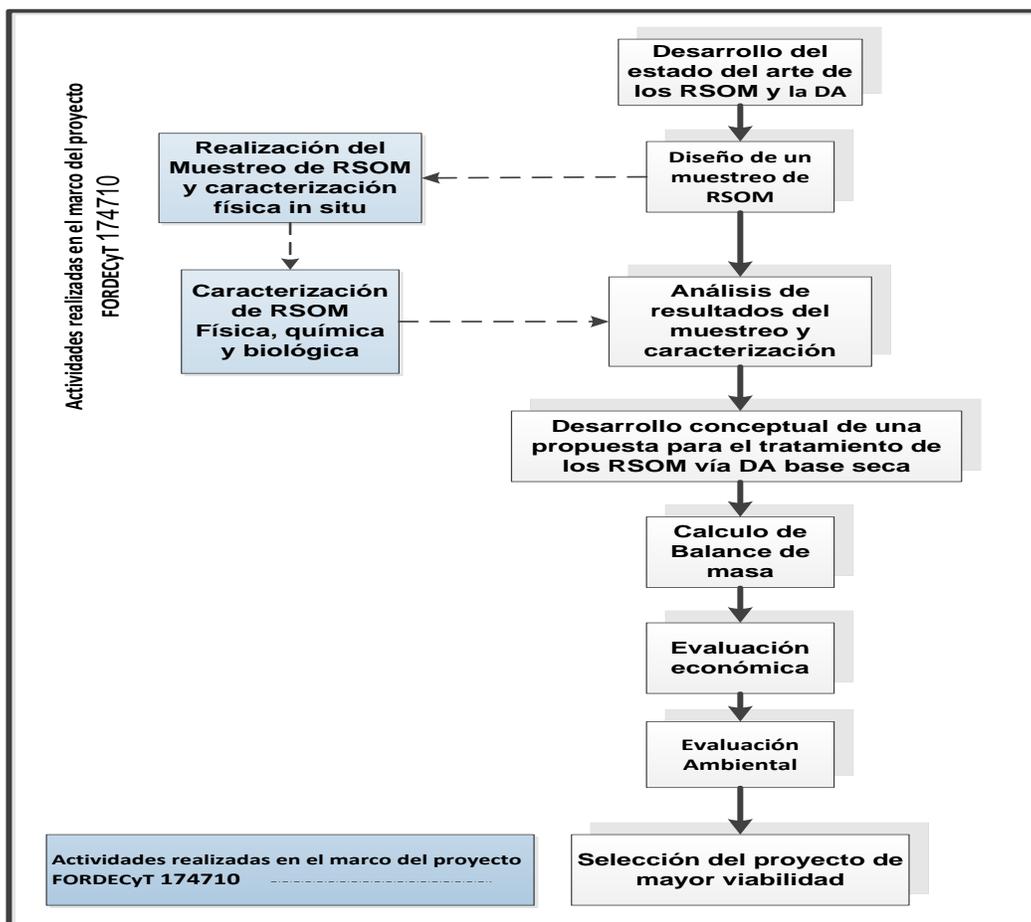


Figura 13. Metodología para el diseño de una alternativa tecnológica para tratar los RSOM generados en el Estado de Morelos

La metodología propuesta tuvo en primer término la realización de una revisión bibliográfica y consulta con personal de ecología del gobierno acerca del panorama actual de los RSOM generados en el Estado de Morelos. En esta etapa también se conformó un estudio acerca del Estado del arte de la Digestión Anaerobia. La información recopilada en esta etapa se utilizó para realizar el marco teórico de esta tesis.

Durante la segunda etapa y con la información obtenida, se realizó el diseño de un plan de muestreo de los RSOM generados en el Valle de Cuernavaca, conformado por los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco. En este plan se determinó el tamaño de muestra de cada municipio; se diseñó la logística para la toma de muestra y la caracterización física in situ utilizando técnicas y normas nacionales como referencia.

Una vez diseñado el plan de muestreo, en el marco del proyecto “Generación de un sistema piloto de tratamiento de residuos sólidos municipales” mencionado anteriormente, se contrató a la empresa ambiental “Tecnología Ambiental Integral” (TAI) para que realice esta actividad. Como resultado de esta etapa se obtuvieron siete muestras de los 3 municipios sujetos a estudio así como la caracterización física de los RSOM muestreados.

Las muestras recopiladas en el muestreo fueron enviadas al laboratorio 301 del conjunto E de la facultad de química, donde se determinaron las siguientes propiedades físicas, químicas y biológicas; humedad, ST, SV, DQO, N-K, P-T, pH, entre otras.

Con los resultados del muestreo y la caracterización se obtuvieron datos valiosos acerca del potencial de los RSOM del Estado de Morelos para ser tratados vía DA, comparando las propiedades de los RSOM de los municipios en estudio con propiedades de los RSOM que se alimentan a los procesos de DA y factores a considerar para el sistema de tratamiento vía DA a proponer.

---



Una vez analizado el potencial de los RSOM de los municipios, se realizó a nivel conceptual el diseño de una propuesta para tratar los RSOM de los municipios de estudio vía DA. Se propone un centro de tratamiento de RSM, donde se disponga la mayor parte de los residuos generados en los municipios de Cuernavaca Jiutepec y Temixco.

Para esta propuesta se consideró que en el Estado de Morelos no se realiza ningún tipo de separación de los RSM desde fuente de generación hasta la disposición final. Por lo que al centro de tratamiento propuesto se prevé que ingresarán un porcentaje de los RSM que se generan en el valle de Cuernavaca. Este centro estará dividido en las siguientes secciones de tratamiento;

- Una planta de separación donde se recuperaran RSM reciclables que serán comercializados en plantas de reciclaje y RSOM que una parte se enviaran a la planta de digestión anaerobia y otra a la planta de composta.
- Una planta de tratamiento de RSOM vía DA base seca que genere biogás, energía eléctrica y composta de uso agrícola.
- Una planta de composta donde se trate el digestato generado en la DA y los RSOM que provienen de la planta de separación de RSOM produciendo composta para uso agrícola.
- Una planta de tratamiento de agua residual donde se envié el agua residual generada en todo el proceso.

Una vez que se diseñó la propuesta, se realizó un balance de materia de los procesos, utilizando valores promedio. Se estimaron los siguientes parámetros; la producción de biogás, energía eléctrica, composta, agua residual entre otras.



Para conocer la factibilidad de la propuesta, se realizó una evaluación económica, evaluando principales indicadores económicos como son; inversión, costos de operación, valor presente neto, tasa interna de retorno entre otros.

Para finalizar se realizó una evaluación ambiental, donde se identificaron los principales beneficio ambientales como son; las mitigaciones de emisiones de metano a la atmosfera, reducción de volumen de RSOM que llegan a sitios de disposición final, energía eléctrica generada entre otras.



## 5. Resultados y análisis de resultados

---

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis fueron los siguientes productos.

- Diseño de un plan de muestreo de los RSOM en los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco.
- Datos de composición, clasificación en subproductos y peso volumétrico de los RSOM a partir de un muestreo realizado por una empresa privada, en los municipios mencionados.
- Datos de caracterización física, química y biológica de los RSOM a partir de las muestras enviadas al laboratorio.
- Propuesta a nivel conceptual de un centro de tratamiento de RSOM para la región del Valle de Cuernavaca.
- Un balance de masa de los procesos que se desarrollaran en la propuesta.
- Evaluación económica de la propuesta.

En los siguientes capítulos se presentan los resultados obtenidos descritos con mayor detalle.

---

### 5.1 Muestreo de RSOM

---

El diseño de la metodología de muestreo que se desarrolló para este proyecto se presenta en la Figura 14, consistió de las siguientes etapas: El diseño del plan de muestreo; la toma de muestra; separación y homogenización de los RSOM; determinación del peso volumétrico de RSOM; determinación de subproductos y preparación y acondicionamiento de muestras de RSOM para el laboratorio.

Debido a que actualmente no existen antecedentes que sirvan como una referencia que aplique al muestreo y caracterización de residuos sólidos orgánicos

---

---



municipales (RSOM), se decidió adaptar algunas de las técnicas mencionadas en las normas mexicanas NMX.

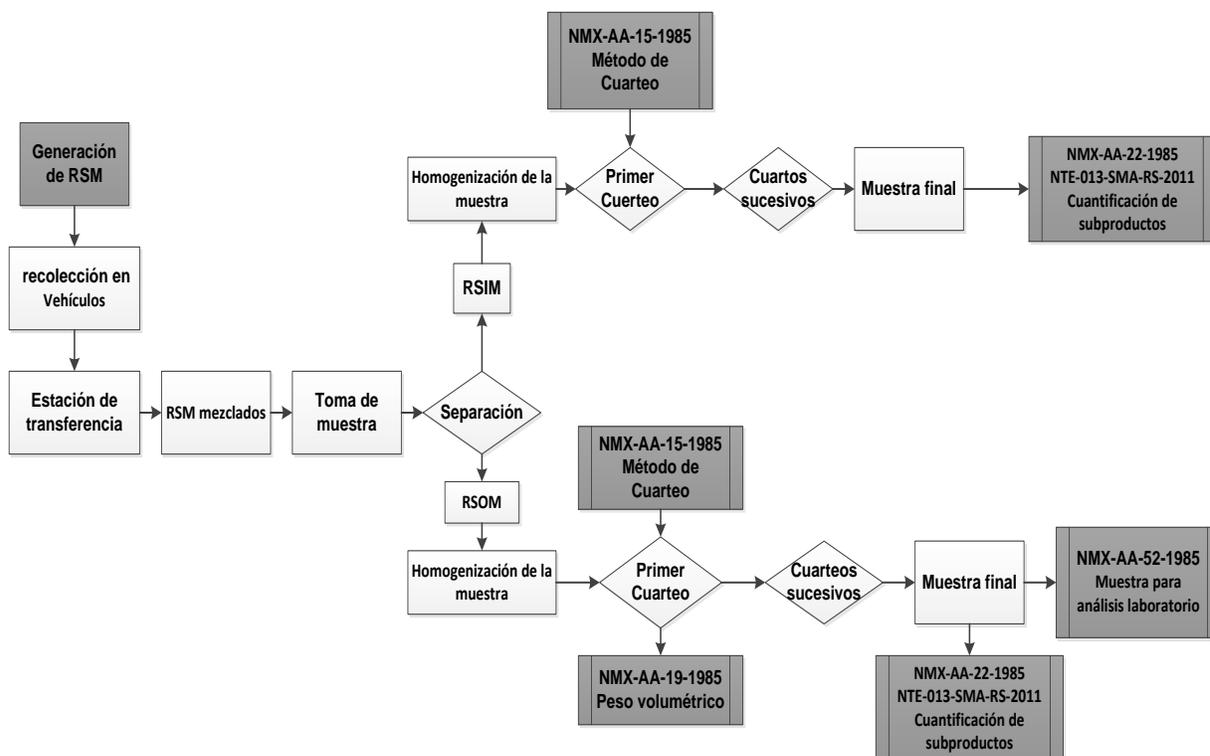


Figura 14. Metodología de Muestreo de RSOM

### 5.1.1 Diseño del plan de muestreo

#### ➤ Sitios de muestreo

En el marco del proyecto “Generación de un sistema piloto de tratamiento de residuos sólidos municipales” CONACyt-UNAM-Estado de Morelos se realizó un foro técnico celebrado con las autoridades del Estado de Morelos en donde se acordó realizar los muestreos en las estaciones o centros de transferencia de los Municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco, extrayendo siete muestras representativas para caracterizar los residuos del Estado de Morelos, esto debido a

que en estos municipios habitan más del 40% de la población y también se generan más del 40% del RSM del total del Estado de Morelos.

En el mismo foro se acordó realizar visitas previas a los sitios de muestreo con el objetivo de recopilar la información necesaria para el diseño del plan de muestreo, así como para dar aviso a los encargados de los centros donde se ubican los puntos de muestro, con el objeto de tener su colaboración en el desarrollo del muestreo.

➤ **Visitas previas a los sitios de muestreo**

Se organizaron visitas a cada uno de los sitios donde se realizaría la toma de muestra, a fin de cumplir con los siguientes objetivos:

1. Presentarse con los responsables de operación de los sitios de disposición de residuos para informarles sobre los alcances del proyecto y los objetivos de la etapa de muestreo.
2. Obtener información acerca de la generación de residuos en el sitio, así como de las operaciones de llegada, descarga y disposición de los residuos.
3. Ubicar lugares para realización de las actividades por parte del laboratorio y los requerimientos para la realización de las operaciones de muestreo en cada sitio
4. Tramitar accesos, informarse acerca de instituciones y personas con los cuales se deben tramitar los permisos y autorizaciones para el ingreso a los lugares seleccionado.

➤ **Determinación de la muestra.**

Para determinar una muestra representativa de cada estación de transferencia de la zona conurbada de Cuernavaca para la caracterización de residuos sólidos



orgánicos municipales (RSOM) se aplicó una metodología estadística basada en las normas y técnicas nacionales e internacionales referentes al tema.

Esta metodología consistió de tres etapas: en la primera se determinó el número de vehículos a muestrear, en la segunda el tamaño de muestra de RSOM que se extraen de cada estación de transferencia y en la tercera se determinó el tamaño de muestra a extraer de cada camión de recolección

➤ **Calculo del Número de Camiones Muéstrales.**

Debido a que el tamaño de muestra esperado era menor a 30 vehículos de recolección en los 3 sitios de muestreo, para calcular el tamaño de muestra se utilizó la Ecuación 14. Esta considera un nivel de confianza, una desviación estándar y un error que se deriva de la toma de muestra.

$$n_v = \frac{(ts)^2}{e^2} \qquad \text{Ecuación 14}$$

Dónde:

$n_v$ : Número de vehículos de recolección de RSM muéstrales

s: Desviación estándar

e: Error muestral.

n: Tamaño de la población de los vehículos de recolección

$1-\alpha$ : Nivel de confianza

El parámetro de confianza t de Student depende de los grados de libertad y el nivel de confianza.

$$t = t(v, 1 - \alpha) \qquad \text{Ecuación 15}$$

Los grados de libertad están definidos como se presentan en la Ecuación 16.



$$v = N - 1 = \text{grados de libertad}$$

**Ecuación 16**

En la Tabla 8 se presenta el número de vehículos de recolección existentes en las estaciones de transferencia de Cuernavaca, Temixco, Jiutepec, que conforman datos necesarios que conforman para el cálculo del número de vehículos a muestrear. El nivel de confianza considerado en el presente estudio es de 95% ( $1-\alpha=0.95$ ). El error máximo admitido en este estudio es de 3.2% del número de camiones existentes en cada estación de transferencia de la zona de estudio esto es  $e=0.032$ . En seguida se presenta el algoritmo de cálculo de los vehículos de recolección a muestrear.

**Tabla 8. Número de vehículos de recolección existentes en cada estación de transferencia.**

Sitio	No. De Camiones
Cuernavaca	27
Temixco	11
Jiutepec	12

Fuente CEAMA, 2005

### Algoritmo de cálculo

1. Búsqueda y determinación de la población de vehículos de recolección existentes en cada una de las 3 estaciones de transferencia N.
2. Con la Ecuación 16 calcular los grados de libertad v.
3. Búsqueda en tablas del parámetro de confianza t de Student.
4. Con la Ecuación 14 calcular el número de vehículos de recolección a muestrear.

A manera de ejemplo se presenta se presenta el método para calcular el número de vehículos de recolección a muestrear en la estación de transferencia de Cuernavaca. El método de cálculo para los Municipios de Jiutepec y Temixco se realizó de manera similar.



Primero se calcula los grados de libertad con la Ecuación 16

$$v = N - 1 = 27 - 1 = 26$$

De la tabla de valores se saca el parámetro de confianza t de Student para un nivel de confianza de 95% y 26 grados de libertad.

$$t(26,0.95) = 1.71$$

Utilizando la Ecuación 14 obtenemos.

$$n_v = \frac{(1.71 * 0.25)^2}{0.03} = 6 \text{ camiones}$$

En la Tabla 12 se presenta los resultados del cálculo de los vehículos de recolección de los 3 Municipios de estudio.

#### ➤ Cálculo del tamaño de muestra

La técnica estadística utilizada para calcular el tamaño de muestra, en un muestreo para la caracterización física de los RSM, es el muestreo de proporciones representado en la Ecuación 17.

$$n = \frac{z^2 p q}{d^2}$$

**Ecuación 17**

Dónde:

*n*: Tamaño de la muestra en unidades de peso

*z*: Factor de la distribución normal, para una confianza del 95% ( $\alpha=0.05$ ) que es la utilizada habitualmente  $z=1.96$

*p*: Proporción del total que posee la característica deseada

*q*: Proporción del total que no posee la característica deseada ( $q = 1 - p$ )



d: Precisión deseada en la proporción. Para efectos de muestreo de residuos sólidos, es razonable un valor de 2.5% (0.025).

A continuación se presenta el algoritmo para calcular el tamaño de muestra de RSOM que se tiene que extraer de las estaciones de transferencia de los municipios mencionados.

### Algoritmo de cálculo.

1. Se Definió el nivel de confianza, en nuestro caso de estudio es de 95%.
2. Se buscó en tablas de distribución normal el parámetro  $z=1,96$ .
3. Se estableció del porcentaje de error máximo admitido  $e=0.032$ .
4. Se calculó el tamaño de muestra de cada subproducto con la Ecuación 17.
5. Se eligió el tamaño de muestra más grande ya que es el que dará mayor precisión al muestreo.

A manera de ejemplo se describe el método para calcular el tamaño de muestra que se tiene que extraer de la estación de transferencia de Cuernavaca, el cálculo para las dos estaciones restantes se realizó de manera similar.

En primer lugar se calculó el tamaño de muestra que se tiene que extraer de cada subproducto utilizando la Ecuación 17, a manera de ejemplo se calcula la cantidad de residuos alimenticios que se tienen que extraer, el cálculo para los demás subproductos se hace de manera similar. En la Tabla 9 se presentan los resultados de este cálculo para cada subproducto.

$$n_i = \frac{1,96^2 * 0.529 * 0.472}{0.032^2} [kg] = 935kg$$

Una vez calculado el tamaño de muestra de cada subproducto se elige el de mayor tamaño ya que con esto se garantiza tener la cantidad mínima del subproducto deseado en la muestra de acuerdo a la proporción que se cuenta como

---



antecedente, por lo que obtendrá una mayor precisión en los datos del muestreo. En el caso de Cuernavaca el subproducto con mayor tamaño son los restos de alimentos y Jardinería, por lo tanto el tamaño de muestra es de 934 kg de RSM.

➤ **Tamaño de muestra a extraer de cada vehículo de recolección**

Definido el tamaño de muestra que se tiene que extraer de cada estación de transferencia se calculó el tamaño de muestra a extraer de cada vehículo de recolección utilizando la Ecuación 18.

$$n_{v1} = \frac{n}{n_v} [=]kg \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde

$n_{v1}$ : Tamaño de muestra a extraer de cada vehículo de recolección [kg]

$n$ : Tamaño de muestra a extraer de cada estación de transferencia [kg]

$N_v$ : Número de vehículos de recolección muestrales.

Para seguir con los ejemplos se calcula los vehículos de recolección muestrales para la estación de transferencia de Cuernavaca utilizando la Ecuación 18.

$$n_{v1} = \frac{935kg}{6} = 153.5 kg$$

El tamaño de muestra que se tiene que extraer de cada vehículo de recolección muestral de la estación de transferencia de Cuernavaca es de 153.5 kg. En las Tabla 9, Tabla 10 y en la Tabla 11 se presentan los resultados del cálculo de tamaño de muestra de los municipios mencionados.



**Tabla 9. Cálculo del tamaño de muestra que para el Municipio de Cuernavaca**

<b>Tipo de residuo</b>	<b>Composición física [%]</b>	<b>Proporción esperada p</b>	<b>Proporción no esperada q=1-p</b>	<b>Tamaño de la muestra n [kg]</b>
Residuos				
Alimenticios	52.85	0.529	0.472	934.843
Residuos de				
Jardinería	3.09	0.031	0.969	112.341
Aluminio	0.27	0.003	0.997	10.102
Lastas de Alimento	1.39	0.014	0.986	51.422
Otros Metales	0.27	0.003	0.997	10.102
PET	3.46	0.035	0.965	125.313
Plástico	2.01	0.020	0.980	73.891
Otros plásticos	6.23	0.062	0.938	219.161
Papel y Cartón	10.64	0.106	0.894	356.695
Vidrio	4.12	0.041	0.959	148.196
Residuos Sanitarios	12.20	0.122	0.878	401.852
Residuos Especiales	0.22	0.002	0.998	8.235
Otros	3.24	0.032	0.968	117.612

**Tabla 10. Cálculo del tamaño de muestra que para el Municipio de Temixco**

<b>Tipo de residuo</b>	<b>Composición física [%]</b>	<b>Proporción esperada p</b>	<b>Proporción no esperada q=1-p</b>	<b>tamaño de la muestra n [kg]</b>
Residuos				
Alimenticios	50.33	0.503	0.497	937.850
Residuos de				
Jardinería	4.08	0.041	0.959	146.819
Aluminio	0.14	0.001	0.999	5.245
Lastas de Alimento	1.39	0.014	0.986	51.422
Otros Metales	0.27	0.003	0.997	10.102
PET	3.48	0.035	0.965	126.011
Plástico	4.07	0.041	0.959	146.474
Otros plásticos	8.37	0.084	0.916	287.723
Papel y Cartón	7.77	0.078	0.922	268.847
Vidrio	4.58	0.046	0.954	163.952
Residuos Sanitarios	11.94	0.119	0.881	394.453
Residuos Especiales	0.78	0.008	0.992	29.034
Otros	2.74	0.027	0.973	99.976



**Tabla 11. Calculo del tamaño de muestra que para el Municipio de Jiutepec**

<b>Tipo de residuo</b>	<b>Composición física [%]</b>	<b>Proporción esperada p</b>	<b>Proporción no esperada q=1-p</b>	<b>tamaño de la muestra n [kg]</b>
Residuos Alimenticios	52.36	0.524	0.476	935.80
Residuos de Jardinería	3.28	0.033	0.967	119.02
Aluminio	0.06	0.001	0.999	2.25
Lastas de Alimento	1.04	0.010	0.990	38.61
Otros Metales	0.10	0.001	0.999	3.75
PET	2.61	0.026	0.974	95.36
Plástico	2.95	0.030	0.971	107.41
Otros plásticos	6.45	0.065	0.936	226.37
Papel y Cartón	10.87	0.109	0.891	363.47
Vidrio	4.04	0.040	0.960	145.44
Residuos Sanitarios	12.62	0.126	0.874	413.70
Residuos Especiales	0.07	0.001	0.999	2.62
Otros	3.57	0.036	0.964	129.15

➤ **Resumen de la determinación de tamaño de muestra.**

En la Tabla 12 se presenta un resumen de los procedimientos desarrollados en la determinación del tamaño de muestra a partir de datos de generación y población de los Municipios de estudio en el Estado de Morelos.

**Tabla 12. Resumen de la determinación de tamaño de muestra**

<b>Municipio</b>	<b>Cuernavaca</b>	<b>Jiutepec</b>	<b>Temixco</b>
Habitantes	436562	201622	100720
Generación de RSM [ton/día]	536.77	271.05	110.72
Generación Per cápita de RSM [Kg/día/hab]	1.23	1.34	1.1
Porcentaje de RSOM[%]	55.94	55.64	54.41
Porcentaje de RSIM[%]	44.06	44.36	45.59
Número de vehículos por ET	27	11	12
Vehículos a muestrear por ET	6.	7	7
Tamaño de Muestra por ET [kg/ET]	935	936	938
Tamaño de Muestra por ET redondeado [kg/ET]	950	950	950
Tamaño de muestra por Unidad [kg/ET]	155.95	139.19	140.74



En el Municipio de Cuernavaca el tamaño de muestra calculado fue de 935 kg, y por razones prácticas se redondearon a 950 kg; 6 vehículos de recolección a muestrear de los cuales se extrajeron 156 kg. de RSM.

En el caso del Municipio de Jiutepec el tamaño de muestra calculado fue de 936 kg. de los cuales se redondearon a 950 kg y 7 vehículos de recolección a muestrear de los cuales se extrajeron 139.19 kg de RSM.

Por último el Municipio de Temixco el tamaño de muestra calculado fue de 936 kg de los cuales se redondearon a 950 kg y 7 vehículos de recolección a muestrear de los cuales se extrajeron 156 kg de RSM.

### **5.1.2 Desarrollo del muestreo.**

#### **➤ Toma de muestra**

Después de haber elegido un área de trabajo adecuada e instalar los equipos requeridos para realizar las pruebas, se realizó una selección aleatoria de los vehículos de recolección que se presentaban a la estación de transferencia, tomándose la muestra correspondiente de RSM (mezclados).

Quince minutos después se eligió al azar otro camión y se realizó la misma operación. Estas muestras se utilizaron para determinar la proporción de orgánicos e Inorgánicos y para clasificar subproductos inorgánicos.

Después cada quince minutos se seleccionaba al azar un vehículo de los que arribaban al centro; se extrajo únicamente la muestra de residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM) determinada. Una vez completados el número de camiones seleccionados y el volumen estimado de RSOM, Esta muestra se utilizaba para homogenizarse y caracterizarse en sitio.



➤ **Homogenización de la muestra**

La finalidad de éste procedimiento es que los RSOM extraídos en cada muestra apartada de los camiones de recolección se mezclen de la mejor manera posible , con la finalidad de obtener una mezcla de residuos que tengan la misma composición, de manera que al retirar una pequeña porción, ésta resulte representativa de todas las muestras seleccionadas. Esta metodología se realizó con base en la norma mexicana NMX-AA-15-198 “Método de Cuarteo” relativa al método para homogenizar una muestra de residuos sólidos con unos cuantos cambios.

El procedimiento consistió en formar un montón de residuos sólidos orgánicos de forma manual, dividirse en cuatro partes iguales y eliminar dos partes opuestas (con los cuales se determinaba el peso volumétrico), esta operación se repitió hasta obtener 70 kg como mínimo de muestra homogenizada, de los cuales 50 kg se utilizaron para clasificar subproductos orgánicos y 20 kg adicionales para preparar las muestras requeridas por el laboratorio para realizar las pruebas indicadas con anterioridad.

**Determinación de peso volumétrico.**

La determinación de peso volumétrico se realizó en los sitios de muestreo basándose en el método que describe en la norma mexicana “NMX-AA-19-1985” Peso Volumétrico “IN SITU” realizando algunos cambios a fin de adaptarla a los requerimientos de la investigación.

Este procedimiento consistió en tomar de las partes eliminadas del primer cuarteo, aproximadamente 200 kg de RSOM y colocarse en un recipiente cilíndrico metálico de volumen conocido previamente pesado (se realizan las mediciones y cálculos necesarios para tal efecto); se realizaron las maniobras de llenado, procurando no picar o aplastar los residuos que se depositaban en el recipiente con las palas u



otros utensilios, por lo que el asentamiento de los residuos en el recipiente es resultado del propio peso de los residuos, siguiendo la técnica descrita en la norma NMX.

Finalmente se determinó el peso de los residuos en una báscula de capacidad de 200 kg, obteniendo por diferencia el peso de los RSOM al restarse el valor inicial del recipiente vacío.

### ➤ Selección y cuantificación de subproductos

Después de revisar las diferentes clasificaciones que se realizan en las normas federales y reglamentos en México, así como en la literatura consultada, la selección y cuantificación de subproductos se realizó utilizando la clasificación de la norma técnica estatal del Estado de México NTEA-013-SMA-RS-2001 y el método de la norma “NMX-AA-22-1985, Selección y cuantificación de subproductos”.

Este procedimiento consistió en tomar 50 kg de las partes no eliminadas del cuarteo y colocarlos en una superficie plana cubierta con un plástico y libre de otros residuos que interfieran con la cuantificación, para después ser separada manualmente en los diferentes subproductos a partir de la lista de subproductos mencionada. Cada subproducto fue pesado por separado en una balanza analítica y su peso fue registrado en los formatos de campo.

### 5.1.3 Datos obtenidos del muestreo

Como resultado del muestreo se obtuvieron los siguientes datos:

- a). El porcentaje de la fracción de RSOM producidos en los sitios muestreados con respecto al total de RSM generados en el lugar.



b). El tipo de RSOM manejados en los sitios (poda, alimentos, huesos, cuero) y la cantidad de impurezas inorgánicas presentes en los sitios donde se realice separación.

c). Se identificó el potencial de los sitios que proveen residuos orgánicos que pueden ser alimentados al digestor y que presenten un mejor valor para la generación de biogás.

Los datos obtenidos del muestreo se presentan en la Tabla 14 en los siguientes capítulos se discuten estos resultados.

#### **5.1.4 Centro de transferencia municipio de Cuernavaca**

El muestreo en el Centro de Transferencia de “El Polvorín” ubicado en el Municipio de Cuernavaca se realizó durante 3 días y se obtuvieron 2 muestras para análisis de laboratorio y registro de campo de peso volumétrico y composición de los RSOM.

Como se presenta en la Tabla 13, los RSOM generados en el Municipio de Cuernavaca durante los 3 días de muestreo estuvieron compuestos en mayor proporción por restos de cascaras de frutas, vegetales y restos de jardinería con un porcentaje promedio mayor a 82.19%. Los subcomponentes que no se presentaron en ninguna muestra fueron; los restos de galletas, pasteles, bolsas de filtros de café, tierra y los restos de animales. La presencia de inorgánicos en la muestra de orgánicos fue siempre menor a 4.5%.

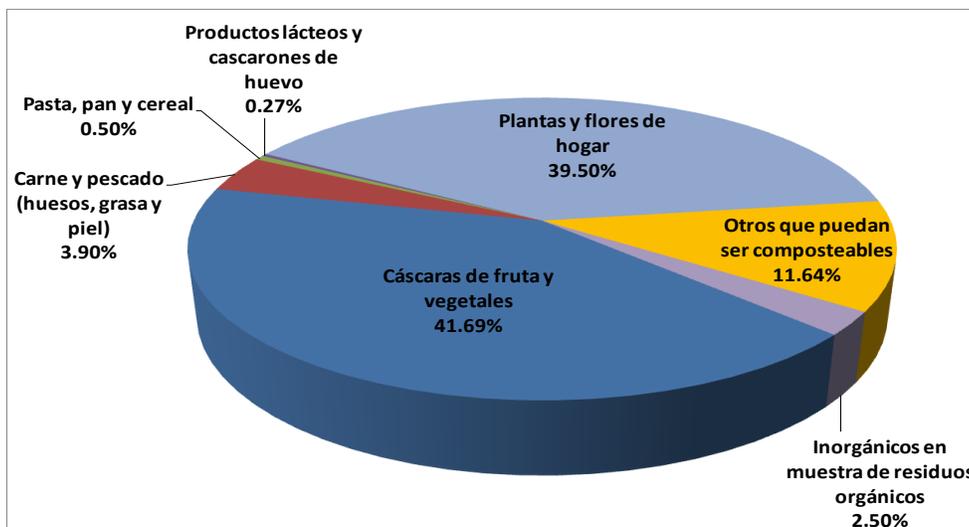
Con base en los resultados que se presentan en la Figura 15 la composición promedio de los RSOM generados en el Municipio de Cuernavaca Morelos es de; 41.69% de cascaras de frutas y vegetales, 39.50% de plantas y flores de hogar, 3.9% de carne y pascado, 2.50% de inorgánicos en muestra de residuos orgánicos, 0.50% de pan y cereal y 0.27 de productos lácteos



**Tabla 13. Resultados de subproductos orgánicos presentes en muestras de residuos en centro de transferencia**

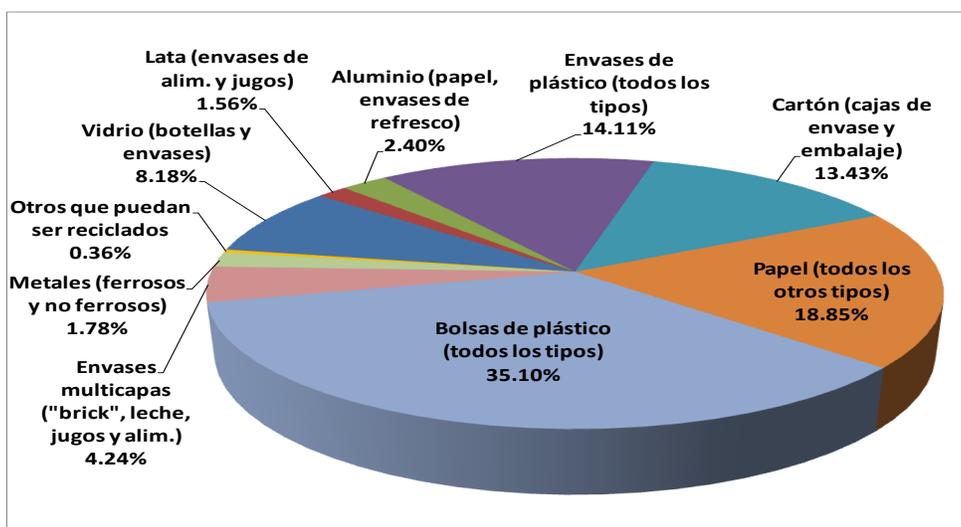
Municipio de estudio y días de muestreo		Cáscaras de frutas y vegetales	Carne y pescado (huesos, grasa y piel)	Pasta, pan y cereal	Productos lácteos y cascarones de huevo	Dulces, galletas y pasteles	Bolsas de té, filtros de café y tierra	Plantas y flores de hogar	Restos de animales	Otros que puedan ser composteables	Inorgánicos en muestra de residuos orgánicos	total de suma de residuos por separado
<b>C.T. CUERNAVACA, 1ER. DIA</b>	peso (kg)	16.17	2.855	0.0	0.0	0.0	0.0	18.045	0.0	4.26	2	43.33
	% del subproducto	<b>37.32</b>	<b>6.59</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>41.65</b>	<b>0.00</b>	<b>9.83</b>	<b>4.62</b>	<b>100.00</b>
<b>C.T. CUERNAVACA, 2DO. DIA</b>	peso (kg)	12.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.8	0.0	9.2	0.1	42.3
	% del subproducto	<b>28.84</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>49.17</b>	<b>0.00</b>	<b>21.75</b>	<b>0.24</b>	<b>100.00</b>
<b>C.T. CUERNAVACA, 3ER. DIA</b>	peso (kg)	24.2	0.42	0.21	0.115	0.0	0.0	10.96	0.0	1.22	0.0	37.125
	% del subproducto	<b>65.19</b>	<b>1.13</b>	<b>0.57</b>	<b>0.31</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>29.52</b>	<b>0.00</b>	<b>3.29</b>	<b>0.0</b>	<b>100.00</b>
<b>PROMEDIO C.T. CUERNAVACA</b>	peso (kg)	17.523	1.6375	0.21	0.115	0.0	0.0	16.60	0.0	4.893	1.050	42.03
	% del subproducto	<b>41.69</b>	<b>3.90</b>	<b>0.50</b>	<b>0.27</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>39.50</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>2.50</b>	<b>100.00</b>
<b>C.T. TEMIXCO, 1ER. DIA</b>	peso (kg)	8.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0		11.6
	% del subproducto	<b>74.14</b>	<b>10.34</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>15.52</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>		<b>100.00</b>
<b>C.T. TEMIXCO, 2DO DIA</b>	peso (kg)	17.6	2.6	3	0.0	0.0	0.0	13.8	0.0	3	5	45
	% del subproducto	<b>39.11</b>	<b>5.78</b>	<b>6.67</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>30.67</b>	<b>0.00</b>	<b>6.67</b>	<b>11.11</b>	<b>100.00</b>
<b>PROMEDIO C.T. TEMIXCO</b>	peso (kg)	13.1	1.9	3	0.0	0.0	0.0	7.8	0.0	3	5	33.80
	% del subproducto	<b>38.76</b>	<b>5.62</b>	<b>8.88</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>23.08</b>	<b>0.00</b>	<b>8.88</b>	<b>14.79</b>	
<b>C.T. JIUTEPEC, 1ER DIA</b>	peso (kg)	19.4	0.26	0.855	0.06	0.0	0.0	12	0.0	14.6		47.175
	% del subproducto	<b>41.12</b>	<b>0.55</b>	<b>1.81</b>	<b>0.13</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>25.44</b>	<b>0.00</b>	<b>30.95</b>		<b>100.00</b>
<b>C.T. JIUTEPEC, 2DO DIA</b>	peso (kg)	19	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	13	0.0	10.8	2.6	46.1
	% del subproducto	<b>41.21</b>	<b>1.30</b>	<b>0.22</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>28.20</b>	<b>0.00</b>	<b>23.43</b>	<b>5.64</b>	<b>100.00</b>
<b>PROMEDIO JIUTEPEC</b>	peso (kg)	19.2	0.43	0.4775	0.06	0.0	0.0	12.5	0.0	12.7	2.6	47.97
	% del subproducto	<b>40.03</b>	<b>0.90</b>	<b>1.00</b>	<b>0.13</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>26.06</b>	<b>0.00</b>	<b>26.48</b>	<b>5.42</b>	<b>100.00</b>





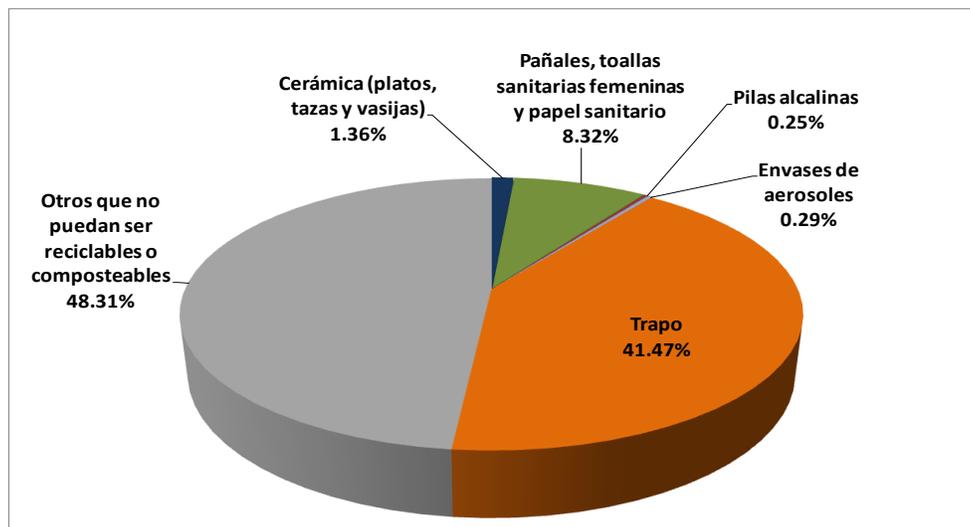
**Figura 15. Subproductos Residuos orgánicos promedio Municipio de Cuernavaca**

En la Figura 16 se observa que los RSIM reciclables de este Municipio están compuestos en su mayor proporción por bolsas de plástico con 35.10%; papel de todo tipo con 18.85%; los envases de plástico se encuentran en tercer sitio con un 14.11% y el cartón con 13.43%; el resto de residuos inorgánicos se presenta en conjunto en una proporción menor al 18.51 %.



**Figura 16. Subproductos RSIM reciclables promedio Municipio de Cuernavaca**

Por otra parte, de la Figura 17, los RSIM no reciclables están compuestos en su mayor proporción de trapos (41.7%) y otros que no puedan ser reciclables y compostables (48.31%) con un porcentaje promedio mayor a 90%. El resto de los subproductos se presentó con un porcentaje menor al 10%.



**Figura 17. Subproductos RSIM no reciclables promedio Municipio de Cuernavaca**

### 5.1.5 Centro de transferencia municipio de Temixco

El muestreo en el centro de transferencia de Temixco Morelos se realizó durante 2 días, obteniendo 2 muestras para análisis de laboratorio, formatos de campo con los resultados de peso volumétrico y composición de RSOM y la proporción de RSIM vs RSOM.

Con base en los resultados presentados en la Tabla 13, los RSOM generados en el Municipio de Temixco estuvieron compuestos en mayor proporción por cascara de frutas, vegetales y residuos de jardinería de hogar con un porcentaje promedio mayor al 61.8%, los restantes presentaron un porcentaje menor al 39%. Los subproductos no presentes en los 2 días de muestreo fueron; los restos de galletas,

pasteles, bolsas de filtros de café, tierra y los restos de animales. La presencia de inorgánicos en la muestra de orgánicos fue siempre menor a 15%.

En la Figura 18 se observa que la composición promedio de los RSOM generados en el Municipio de Temixco Morelos es de; 38.76% de cáscaras de frutas y vegetales, 39.50% de plantas y flores de hogar, 5.62% de carne y pescado, 14.79% de inorgánicos en muestra de residuos orgánicos, 8.88% de pan y cereal y 0.27 de productos lácteos.

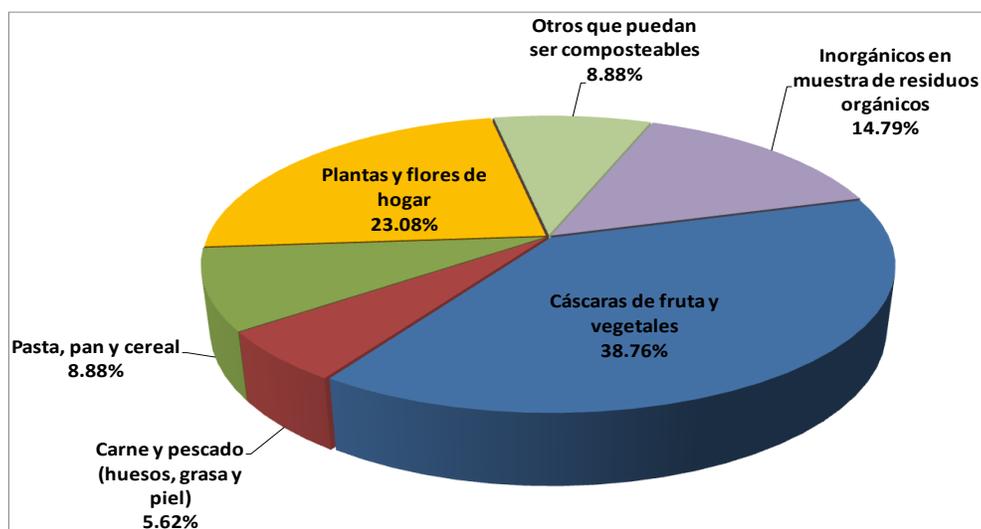


Figura 18. Subproductos Residuos orgánicos promedio Municipio de Temixco

Como se presenta en la Figura 19, Los RSIM reciclables del Municipio de Temixco están compuestos en mayor proporción de bolsas de plástico (44.81%), papel de todo tipo (13.38), cartón (14.26) y botellas de plástico (20.42) con un porcentaje mayor al 88.2%. Los subproductos restantes equivalen al 8%.

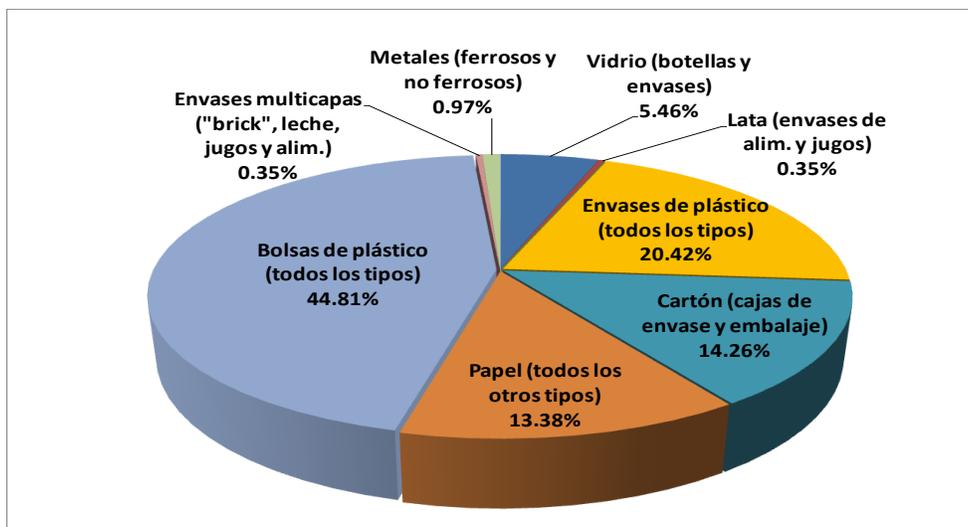


Figura 19. Subproductos RSIM reciclables promedio Municipio de Temixco

Por otra parte de la Figura 20 los RSIM no reciclables esta compuesto de los siguientes tres subproductos; trapo en mayor proporción con 52.7%, seguido de pañales, toallas y papel sanitario con 44.4% y en menor proporción envases de aerosoles con un valor de 2.78%.

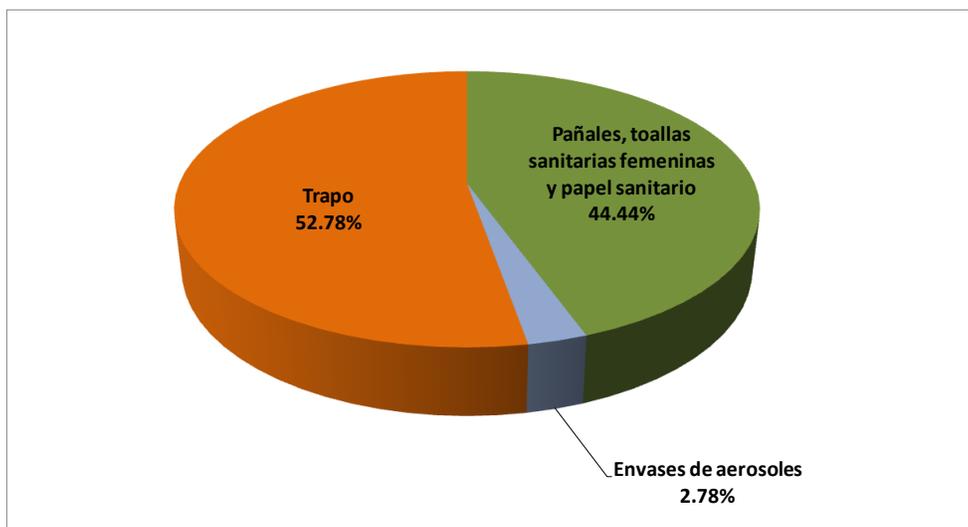


Figura 20. Subproductos RSIM no reciclables promedio Municipio de Temixco

### 5.1.6 Centro de transferencia municipio de Jiutepec

El en centro de transferencia del municipio de Jiutepec se realizaron 2 muestreos, se obtuvieron 2 muestras para su posterior caracterización en el laboratorio y registros de campo con los datos composición y peso volumétrico de los RSOM generados en esta entidad.

Basándonos en la Figura 21 los RSOM generados en el municipio de Jiutepec están compuestos en mayor proporción por cascaras de futas y vegetales (40.03%), planta de flores de hogar (26.06%) y otros compostables (26.48%) con un porcentaje mayor a 92.7%. La presencia de RSIM en RSOM fue menor 5.42%.

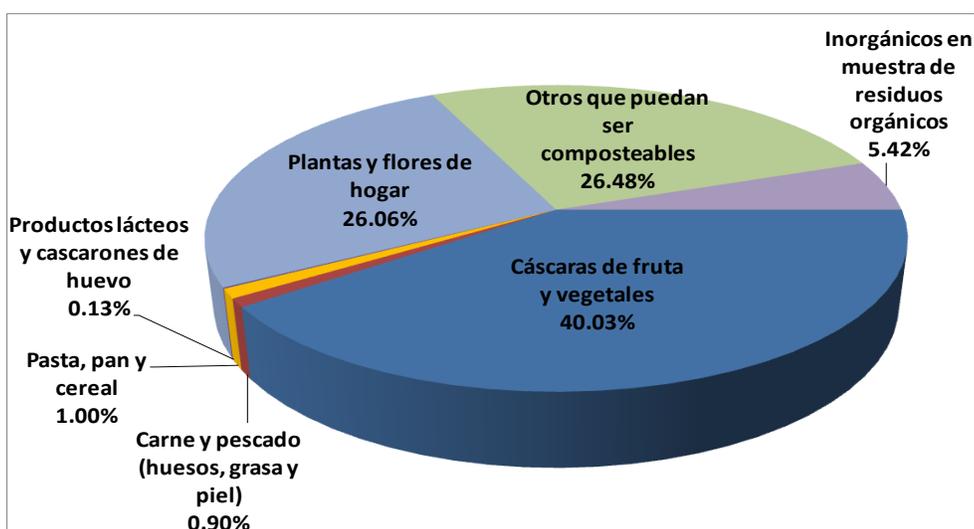


Figura 21. Subproductos RSOM promedio del Municipio de Jiutepec

En la gráfica de Figura 22 se presenta la composición de lo RSIM no reciclables del municipio de Jiutepec, Se observa que están compuestos de en mayor proporción de papel (41.46%), cartón (25.09%), envases de plástico (18.82%). Los residuos como el aluminio, vidrio y bosas de plástico se encuentran en menor proporción

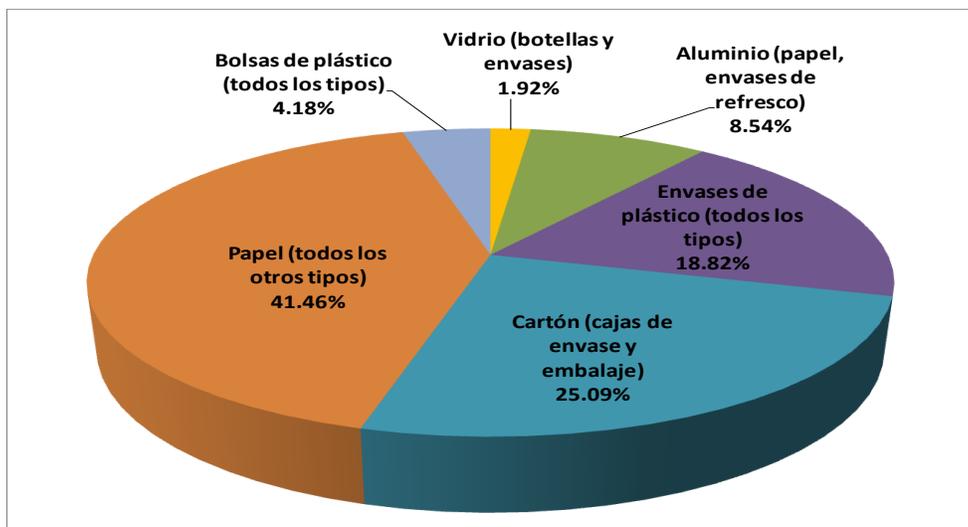


Figura 22. Subproductos RSIM reciclables promedio Municipio de Jiutepec

En la gráfica de la Figura 23 se presenta la composición de lo RSIM no reciclables del municipio de Temixco, Se observa que solo se encuentra presentes residuos de trapo (70.83%) y pañales, toallas sanitarias y femeninas. y papel sanitario (29.17%).

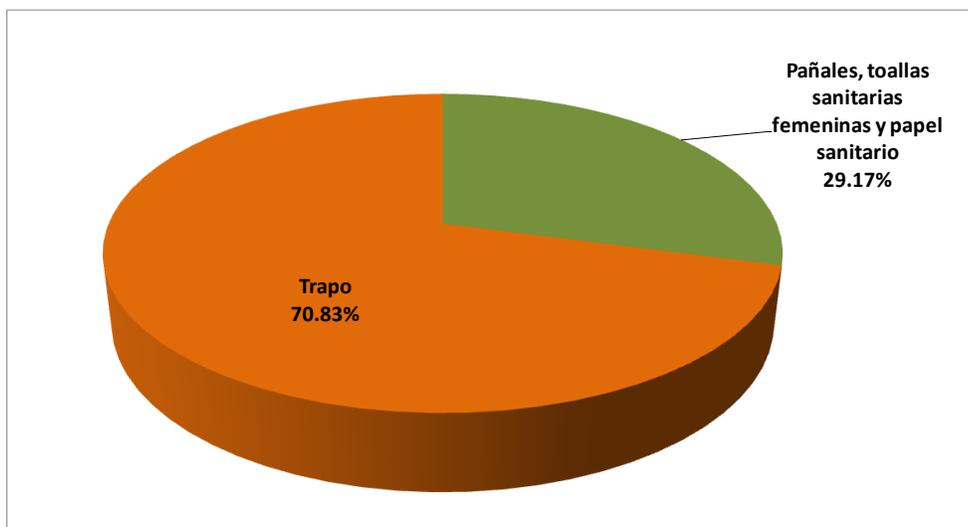
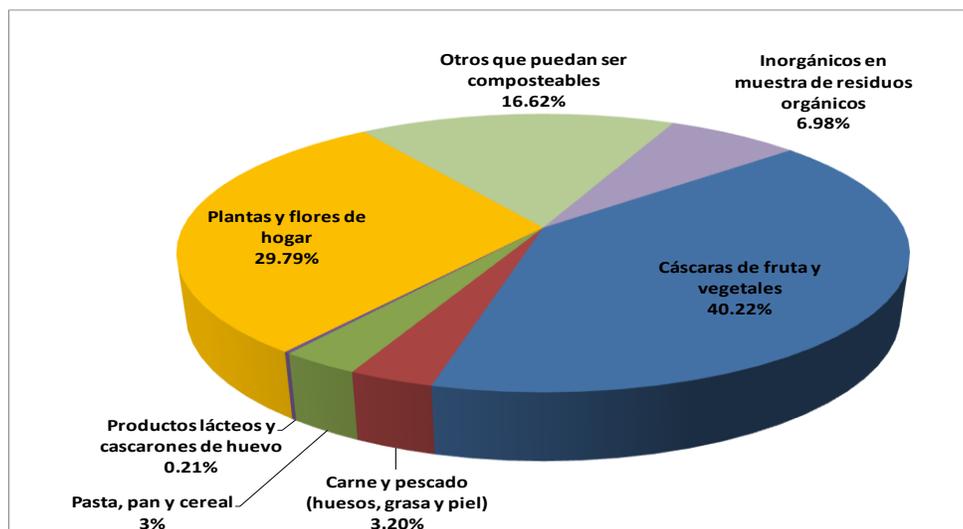


Figura 23. Subproductos RSIM no reciclables promedio Municipio de Jiutepec.

### 5.1.7 Estado de Morelos.

En el Estado Morelos se realizaron en total 7 muestreos en los municipios del Valle de Cuernavaca y se obtuvieron 7 muestras para su posterior análisis de laboratorio, también se obtuvieron datos de la composición y peso volumétrico de los RSOM muestreados los cuales se presentan en la Tabla 13 y en la Figura 27 respectivamente.

Como se presenta en la Figura 24 la composición promedio de los RSOM del Estado de Morelos presento en mayor proporción a las cascarras de frutas y vegetales con 40.22%, le sigue plantas y flores de hogar (o jardinería) con 27.79 %, juntos suman en promedio más del 77.9% de la composición total. El resto de los subproductos se presentan con un porcentaje menor a 21.1 %. La presencia de RSIM en la muestras de RSOM fue en promedio de 6.98%.



**Figura 24. Subproductos Residuos orgánicos promedio del Estado de Morelos**

Los subcomponentes que se encuentran presentes en los RSOM, en general, tienen un alto potencial para la generación de Metano y pueden ser utilizados en la DA como materia prima para generar biogás y energía eléctrica.

Con base en la gráfica que se presenta en la Figura 25, los RSIM reciclables están compuestos en su mayoría por subcomponentes con bajo valor para el reciclaje; como lo son; bolsas de plástico (37.78%), papel (17.85%), cartón (14.49%) y un subcomponente de mayor valor que es son las botellas de plástico (13.84%). Los subcomponentes de mayor valorización se encuentran presentes en cantidades muy pequeñas como los metales ferrosos y no ferrosos.

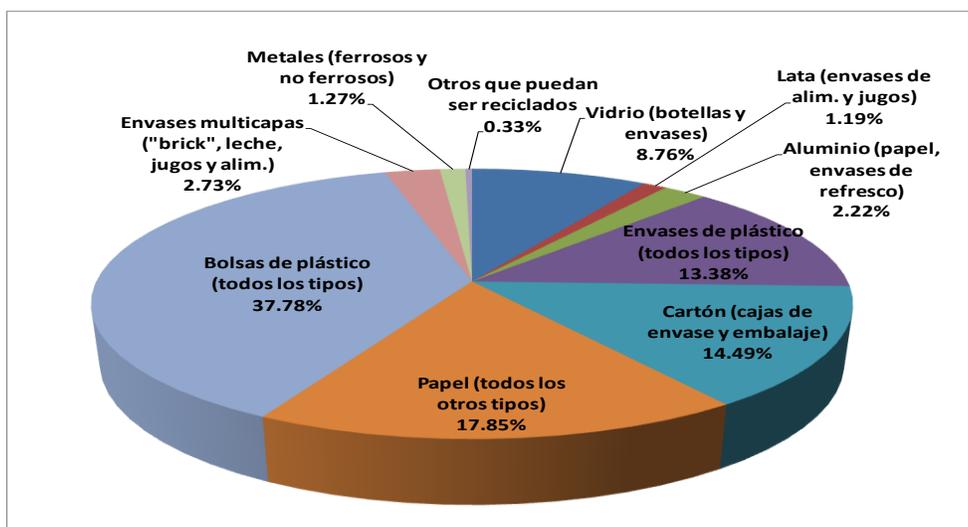


Figura 25. Subproductos RSIM reciclables promedio Estado de Morelos

En la Figura 26 se presenta la composición promedio los RSIM no reciclables obtenidas durante los muestreos en el Estado de Morelos. Se observa que se encuentran en mayor proporción residuos de trapo, pañales, toallas sanitarias, papel sanitario y otros con un porcentaje mayor a 98.44%. Todos estos residuos ser de difícil tratamiento llegan a sitios de disposición final.

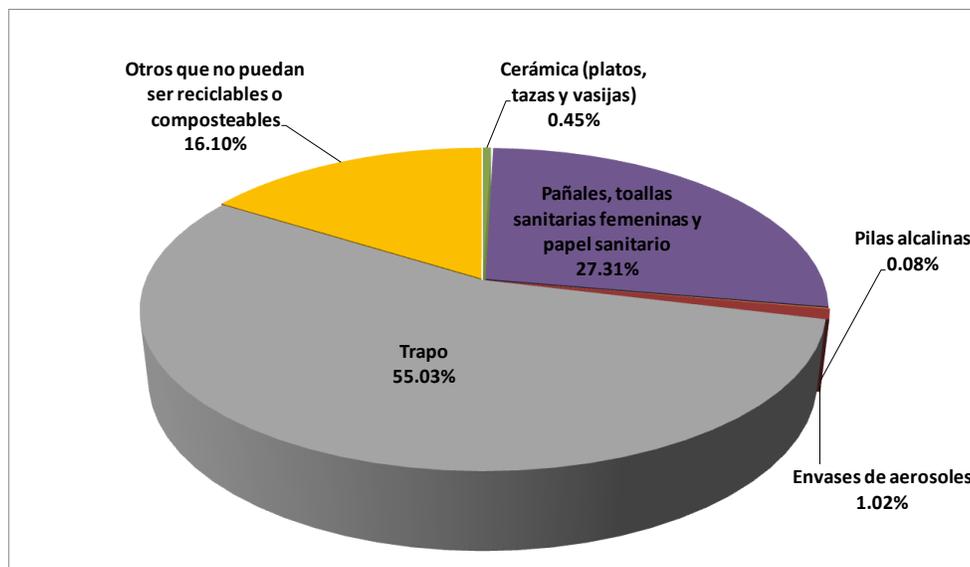


Figura 26. Subproductos RSIM no reciclables promedio Estado de Morelos

Con base en la Figura 27 durante los 7 muestreos realizados en los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco Morelos, la determinación del peso volumétrico de los RSOM presento grandes variaciones. El peso volumétrico promedio de los municipios de estudio es  $443.85 \text{ kg/m}^3$ . En el municipio de Cuernavaca corresponde a  $401.60 \text{ kg/m}^3$ , En el municipio de Jiutepec el peso volumétrico promedio corresponde a  $486 \text{ kg/m}^3$  y en Temixco tiene un valor de  $464.65 \text{ kg/m}^3$ .

Los pesos volumétricos de los RSOM obtenidos en los tres sitios del Estado indican una tendencia a estar por encima de los valores promedios de comida mezclada y residuos de jardinería húmedos, pero por debajo del valor típico de residuos de comida húmedos comercial, datos presentados por (Tchobanoglous & Theisen, 1994).

PROPUESTA CONCEPTUAL DEL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS MUNICIPALES GENERADOS EN EL ESTADO DE MORELOS MEDIANTE LA TECNOLOGIA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

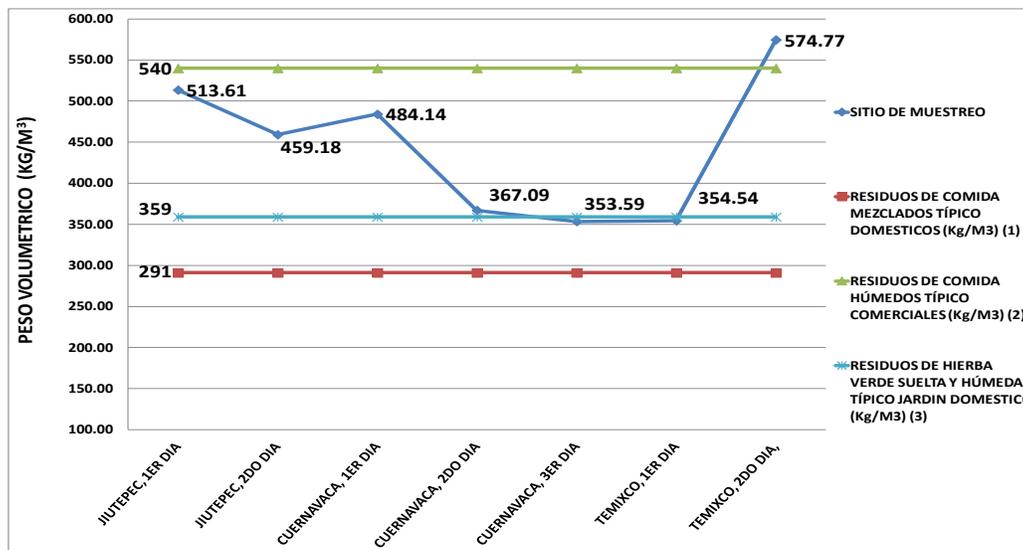


Figura 27. Pesos volumétricos promedio en el Estado de Morelos 443.85 kg/m3.

En la Figura 27 se observa que existe una diferencia significativa en los residuos generados en el municipio de Cuernavaca y los de los otros dos municipios, ya que en Cuernavaca se generan residuos orgánicos con mayor composición en porcentaje de residuos de jardinería (cerca de 40%), mientras que en los otros dos municipios la composición de este tipo de residuos tiene una menor presencia (cerca en ambos casos al 25% del total) lo que justifica la diferencia en los pesos volumétricos registrados entre municipios.

### 5.1.8 Preparación de muestras para el laboratorio

La preparación de las muestras para el laboratorio se realizó siguiendo el siguiente algoritmo

1. Toma de muestra de 20 kg de RSOM provenientes de las partes no eliminadas del método de cuarteó.
2. Se trituraron 2 veces en una trituradora mecánica,
3. Se introducían un molino de 5mm de tamaño de partícula.



4. Se pesaron 5 bolsas de aproximadamente 2kg con los RSOM molidos previamente identificados.
5. Se transportaron a laboratorio en una hilera conservando la temperatura por debajo de 4°C.
6. Se conservaron en el laboratorio en un refrigerador a menos de 0°C hasta su posterior análisis de laboratorio

Se obtuvieron 7 muestras de RSOM de las estaciones de transferencia de la región del valle de cuernavaca: 3 provenientes del de municipio de Cuernavaca 2 del municipio de Jiutepec y 2 del municipio de Temixco, todas las muestras recolectadas fueron analizadas en el laboratorio para conocer sus propiedades físicas químicas y biológicas.

## **5.2 Caracterización**

Los resultados de la caracterización de los RSOM generados en los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco, presentados por el laboratorio, se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14. Caracterización de RSOM del Estado de Morelos.**

		Humedad (%)	ST (%)	SF (%)	SVT (%)	DQO (mg/kg)	PT (mg/kg)	N-K (mg/kg)	Cenizas (% ST)
Cuernavaca	1er día	74.36	25.64	4.55	21.09	203089	1198	5689	13.1
	2do día	68.99	31.01	8.98	22.03	332289	---	10084	21.8
	Promedio	71.68	28.32	6.77	21.56	267689	1198.13	7886	17.4
Temixco	1er día	65.91	34.09	12.75	21.34	303333	---	13432	31.3
	2do día	71.02	28.98	8.43	20.55	254100	1603	9165	19.6
	Promedio	68.47	31.53	10.59	20.95	278716	1603.14	11298.38	25.46
Jiutepec	1er día	77.22	22.78	5.62	17.16	236000	1028	7182	20.3
Morelos	Promedio	71.50	28.50	8.07	20.43	265762	1276	9110	21.22

Como se puede ver las propiedades físicas, químicas y biológicas de los RSOM varían de un municipio de estudio a otro, esto se explica por qué su composición



presenta el mismo comportamiento. Si varía la composición de los RSOM también varía sus propiedades.

El contenido de humedad promedio de los RSOM de la zona de estudio es de 71.5 %, con una carga orgánica con las siguientes propiedades; contenido de sólidos totales de 28.5%, sólidos volátiles totales de 20.43 %, una demanda química de oxígeno de 0.2 kg /kg de RSOM, con un porcentaje de cenizas de 21.2 % de los ST, y un contenido de metales con 1276 mg de fósforo total/ kg de RSOM y 9110 mg de nitrógeno /kg de RSOM.

De la Tabla 15 se puede observar que los RSOM generados en los municipios de estudio tienen gran cantidad de materia orgánica. La humedad y el contenido de cenizas es más grande comparada con los RSOM similares de otros países, donde se tratan vía DA. El contenido de Sólidos volátiles y nitrógeno están por debajo de los RSOM de estos países.

**Tabla 15. Características de los RSOM en diferentes países.**

Características	Chile	Usa	Argentina	Ciudad de la Habana	Región Cuernavaca
Humedad [%]	66-57.7	25.0-30.1	51.4	60.3	71
Sólidos Volátiles [%]	93.9-80.0	84.77	80	81.3	71
Cenizas [%]	6.1-20.0	15.23	20	18.7	21
Nitrógeno[%]	1.16	1.14	1.5	1.7	0.009

Fuentes: Adaptado de (Espinosa L. & Lopez T., 2007)

Comparando los resultados de la caracterización de los RSOM de los municipios de estudio contra los valores típicos de composición que se utilizan en la DA húmeda y seca (Tabla 16), se observa que tienen mayor cantidad de sólidos totales y sólidos volátiles.

Por lo tanto para tratar los RSOM de los municipios de estudio es más conveniente utilizar la DA base seca. Debido a que si se quieren igualar los parámetros de los



RSOM generados en estos municipios con los ocupados en la DA seca se ocuparán menos requerimientos y por lo tanto serán menores los costos.

**Tabla 16. Características de los RSOM utilizados en los procesos de la DA.**

	Digestión seca de RSOM <sup>1</sup>	Digestión Húmeda RSOM <sup>1</sup>	Región Cuernavaca
pH	7.9	8	N/D
Sólidos totales ST	21.5.	6.69	28.5
Sólidos Volátiles SV	11.3	3.93	20.3
SV/ST	54	59	71.4

Fuentes: (Raposo, 2011)<sup>1</sup>

---

### **5.3. Propuesta para tratar los RSOM generados en los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco**

---

En este capítulo se elaboró una propuesta a nivel conceptual para integrar el tratamiento de RSOM vía DA al sistema de GIRS de los municipios de Cuernavaca Jiutepec y Temixco del Estado de Morelos.

Se propone una regionalización del Estado como un instrumento de la gestión integral de RSM y un centro de tratamiento de RSOM y recuperación de RSM reciclables. En seguida se presenta una descripción más detallada de esta propuesta.

#### **5.3.1 Regionalización del Estado como instrumento de la gestión integral de RSM**

Para resolver el problema de la generación de RSM en el Estado de Morelos se propone dividir el Estado en siete zonas geográficas. Utilizar la división regional existente que se muestran en la Figura 28.



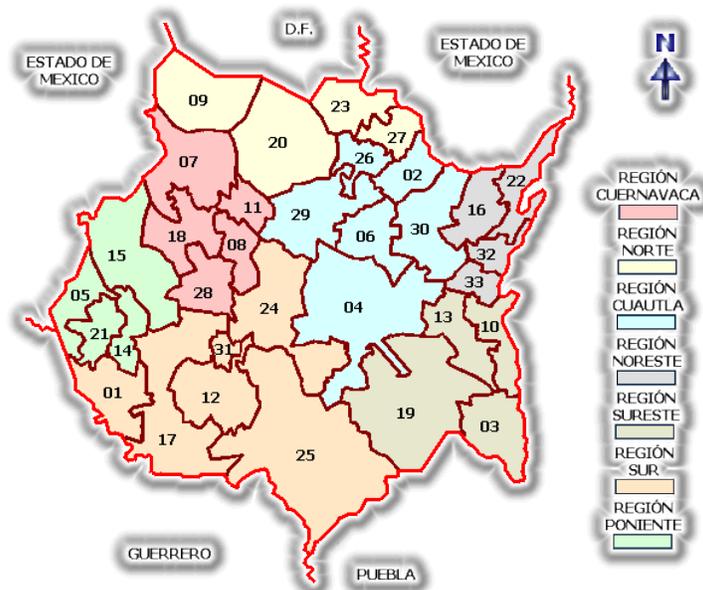


Figura 28. Regionalización de Estado de Morelos

Lo que se pretende es que los municipios que se encuentran dentro de una región determinada, se coordinen para realizar la gestión integral de los RSM, de esta forma, se reducen costos de operación al disminuir los viajes y las distancias de recorrido a los sitios de disposición final.

Cada región deberá tener un centro de tratamiento de RSM donde se recuperen los RSIM reciclables y se valore energéticamente los RSOM utilizándolos en procesos biológicos como la digestión aerobia para producir composta que pueda ser utilizada en el sector agrícola y la Digestión Anaerobia para producir biogás, composta y energía eléctrica. Además deberán contar con un relleno sanitario que cumpla con la normatividad la para la disposición final.

En la presente trabajo de tesis se elaboró una propuesta para tratar los RSOM generados en la región Cuernavaca, debido a que es la región donde se genera más de 50% de los RSM generados en el Estado de Morelos . Resolver el problema en esta zona implica resolver más de 40 % del problema degeneración de RSM del Estado.

### 5.3.2 Caso de estudio región Cuernavaca

El Estado de Morelos se localiza en la parte central del país, con una superficie 4958 km<sup>3</sup>, colinda al Norte con el Distrito Federal; al noreste y noroeste con el Estado de México; al Este con los Estados de Puebla y Guerrero y al oeste con el Estado Guerrero.

La zona conurbada de Cuernavaca se localiza a una altura de 1480 msnm promedio en el municipio de Cuernavaca; a 1280 en Temixco y a 1350 en Jiutepec.

El clima que predomina es el cálido subhúmedo ya que se presenta en el 87 % de la superficie del Estado, el 11% está representado por el clima templado húmedo, localizado en la parte norte del Estado, el 2% está representado por clima templado subhúmedo, el cual se localiza hacia la parte noreste y un clima frio se presenta en algunas zonas del área norte (0.04% aproximadamente).

La temperatura media anual del Estado es de 21.5 °C, la temperatura mínima promedio es de 10 °C. La precipitación pluvial media del Estado es alrededor de 900 mm anuales

Para esta propuesta se estudiaron los municipios Cuernavaca Jiutepec ubicados en la zona conurbada de Cuernavaca debido a que en esta región habita más de 40% de la población y se generan más del 49% de los RSM que se generan en el Estado de Morelos



### 5.3.3 Centro de tratamiento de RSOM región Cuernavaca

Se propone un centro de transferencia y aprovechamiento de RSM como se muestra en la Figura 29 compuesto de un área de recepción, una planta de separación y selección de materiales recuperables, una planta de digestión anaerobia, una planta de generación de energía eléctrica, una planta de composta. y una planta de tratamiento de agua residual (PTAR).

### 5.3.4 Descripción del centro de tratamiento

#### ➤ Área de recepción

Los RSM ingresarán al centro de transferencia en vehículos de recolección. Los vehículos pasarán al entrar y salir por una báscula de pesaje, con el objetivo de tener un control de los RSM que ingresan al centro de tratamiento.

La báscula de pesaje se instalará junto a la caseta de control de accesos y salidas, tendrá una capacidad de 30 toneladas y contará con las dimensiones necesarias para facilitar la operación de los vehículos de recolección al entrar y salir.

Los vehículos después de ser pesados ingresarán al área de recepción para descargar los RSM. Esta área contará con las dimensiones necesarias para que los vehículos puedan realizar las maniobras necesarias para descargar y desplazarse libremente.

Será un área cerrada y contará con un sistema de ventilación y tendrá doble puerta de tal manera que cuando una se abra la otra se cierre, con esto, se evitará las emisiones de polvo en el momento que los vehículos realizan las maniobras de descarga.



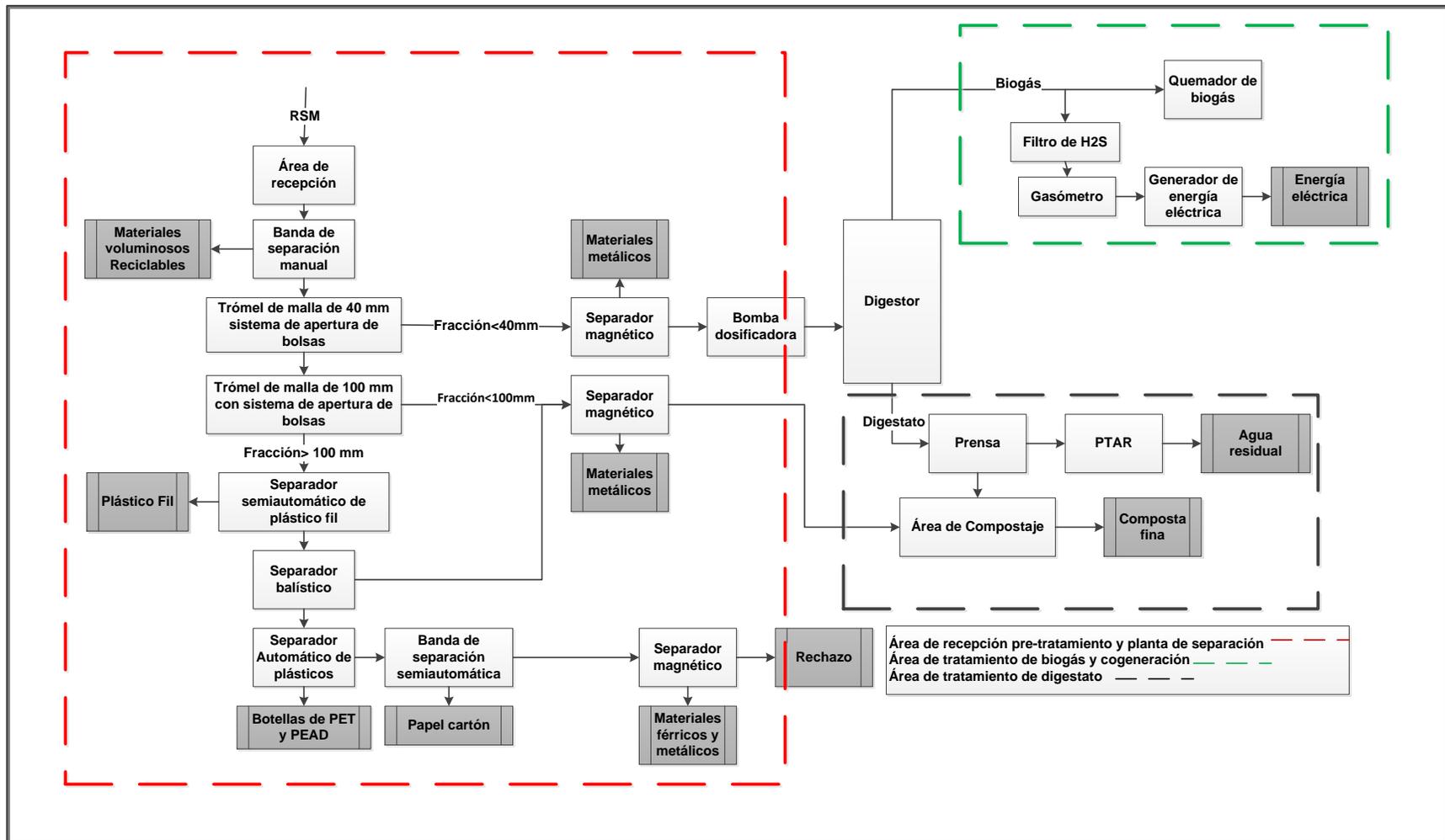


Figura 29. Diagrama de bloques del centro de tratamiento de RSOM



➤ **Planta de separación y selección**

La función de la planta de selección es separar los RSOM que serán utilizados en la DA y en la planta de composta y los RSM reciclables que se comercializarán. Contará con una sección de separación de RSOM y una de separación de RSM reciclables.

Desde los alimentadores los RSM serán conducidos a una cabina de selección manual de elementos voluminosos. En esta cabina se eliminarán objetos voluminosos que pudieran dañar o interferir con el correcto funcionamiento de los equipos del proceso y se depositarán en contenedores bajo la cabina

Los residuos restantes entrarán en seguida a dos equipos tipo trómel de malla de 40 mm y 100 mm con sistema de apertura de bolsas, ya que los RSM generados en el área de estudio se entregan en su mayor parte en bolsas de basura.

La fracción menor de 40 mm pasará por un separador mecánico que eliminará metales y será enviada a la planta de DA. La otra fracción entre 40 y 100 mm también pasará por un separador magnético y será enviada a la planta de composta.

La fracción mayor a 100 mm será conducida con una cinta transportadora a una cabina de separación de pastico film, donde se separara la mayor parte de las bolsas de plástico. En seguida se pasarán por un separador balístico que separará esta corriente en las siguientes tres fracciones:

- Fracción ligera compuesta de elementos planos y ligeros como papel y cartón,
- Fracción fina entre 40 mm y 100 mm compuesta mayoritariamente por RSOM que se envía a la plata de compostaje



- Fracción de cuerpos rodantes (botellas en su mayor parte) compuesta por elementos planos y cúbicos como plástico de PEAD y PET.

La fracción ligera y de cuerpos rodantes será enviada a un sistema de separación de PEAD y PET.

Una vez eliminado el plástico de la corriente, se hará pasar por una cabina con sistema de aspiración de plástico film donde se clasificará de manera manual los materiales aprovechables como papel, cartón y serán colocados en contenedores ubicados bajo la cabina

Después de esta etapa se eliminarán los materiales férricos y no férricos mediante un separador magnético que elimina elementos metálicos, latas de aluminio, bricks entre otros. Se instalará una prensa de metales recuperables. Los metales no recuperables serán enviados a una prensa de rechazo.

Los RSM rechazados pasarán por una prensa para su compactación y se almacenarán temporalmente hasta que se reúna la cantidad necesaria para realizar un viaje al sitio de disposición final. Los materiales reciclables se almacenarán y serán enviados a centros de reciclaje y valorización para su venta.

#### ➤ **Planta de Digestión Anaerobia**

La planta de DA estará compuesta por una sección de pre-tratamiento, una sección de digestión anaerobia y una sección de cogeneración.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la fracción orgánica procedente del hundido de trómel menor a 40 mm (fracción fina) y libre de elementos férricos se conduce hacia la bomba de dosificación. Esta bomba tendrá una capacidad superior a las necesidades reales, para de esta forma prevenir averías.



Antes de transferir los residuos al digestor, la fracción será conducida a un extrusor equipado con tornillos mezcladores donde se mezclará con el digestato recirculado procedente del digestor. A continuación se procederá a su calentamiento hasta una temperatura de 35°C mediante una inyección de vapor.

El objetivo de la mezcla es favorecer el proceso de la DA al entrar al digestor. Para el suministro de este vapor se instalará una caldera de vapor. Una bomba de alimentación conducirá la mezcla recientemente calentada al digestor vertical a través de unos conductos que terminan en el techo del digestor.

La mezcla será digerida a un digestor, durante un periodo aproximado de 28 días en condiciones mesofílicas de 33 a 38 °C. Transcurrido este tiempo y a través de los procesos biológicos se producirá biogás, se ha estimado una producción anual de 12,890 toneladas con un contenido de metano mayor a 55% y un contenido de 500 ppm de sulfuro de hidrogeno H<sub>2</sub>S

El residuo digerido o digestato se extraerá mediante un extrusor, situado en la parte inferior del digestor, una parte será recirculada hacia la bomba mezcladora de alimentación y la mayor parte será conducida a la planta de compostaje.

La instalación de la planta de DA tendrá un depósito de lixiviados de 15m<sup>3</sup> que posteriormente se alimentarán a la planta de compostaje.

El biogás producido se almacenará temporalmente en un gasómetro de membrana con una capacidad mínima de 2 horas de almacenamiento para prevenir posibles averías o por motivos de mantenimiento de la planta de cogeneración



➤ **Planta de Compostaje**

La planta de compostaje tendrá instalaciones cerradas, que cuenten con un sistema de aeración forzada, extracción y depuración de aire. El objetivo de este sistema es eliminar malos olores que puedan desprenderse de él.

• **Fase de fermentación Aerobia**

La fracción orgánica procedente del hundido de los trómelos de la planta de separación y recuperación de tamaño entre 40 y 100 mm, será sometida a un proceso de fermentación aerobia acelerada, en unas pilas de concreto. Después esta fracción será conducida a la zona de pilas de maduración.

El diseño de la planta incluirá las pilas de fermentación necesarias para que los residuos se distribuyan en función de su procedencia. Será un sistema de fermentación dinámico y con ventilación forzada para el control del proceso aerobio

Los RSOM provenientes de la planta de separación serán transportados mediante una cinta mecánica hacia las pilas de compostaje, donde permanecerán por un periodo de 14 a 20 días. El sistema de carga contará con una cinta mecánica que recorrerá todas las pilas. Una vez que se llenaron las pilas, el sistema contará con una máquina que voltea el material aerándolo, homogenizándolo y desplazándolo hacia el sistema de descarga que se ubicará en el extremo de las pilas.

Durante los 14 días de permanencia de los RSOM en las pilas, se controlarán todos los parámetros que afectan el proceso de fermentación; temperatura, oxígeno y aporte de agua, mediante un sistema de control.



- **Fase de maduración**

Durante esta fase se realiza la maduración tanto del digestato proveniente de la planta de DA como la fracción procedente de las pilas primarias de compostaje. El tiempo de residencia será aproximadamente de 8 semanas y semanalmente se procederá a una remoción para aportar el oxígeno necesario

El área de maduración anaerobia estará dividida en diferentes zonas en función de la procedencia del material

- **Fase de afino**

Transcurrido 8 semanas, la composta madurada pasara a la zona de afino que tendrá un diseño con instalaciones cerradas y extractor de polvos.

La composta proveniente de la fase de maduración, se depositará en una banda de trasportación mecánica, que la conducirá hasta un trómel de malla de 40 mm. La fracción menor a 15 mm (hundido del trómel) será trasportada por una banda mecánica situada en la parte inferior hasta una mesa disimétrica, dotada de un ciclón decantantador para captar polvos.

La fracción más pesada (impropios como piedras, vidrios entre otros) será rechazada y se almacenarán para posteriormente mandarlos a disposición final. El rebose del trómel de afino (fracción mayor a 15 mm), será recirculada a la etapa de maduración.

➤ **Planta de cogeneración**

El biogás producido en la planta de biometanización será recuperado con el fin de proceder a su aprovechamiento energético. El aprovechamiento se realizará en un



motor de combustión para producir energía eléctrica y calor para la caldera generadora de vapor que eleva la temperatura de los RSOM alimentados al digestor.

La instalación de cogeneración estará formada por un motor de aproximadamente 716 kw-h de potencia eléctrica, la cual utilizará como combustible el biogás generado en el digestor. Para asegurar una correcta combustión se instalará a la entrada del motor un sistema de refrigeración de gases que se encargará de regular la temperatura del biogás alimentado

Las instalaciones contarán con un quemador de gases, previsto para caso de fallas en el funcionamiento del motor generador o acumulación de biogás en el digestor.

---

#### **5.4 Balance de masa**

---

Se realizó un balance de masa de los procesos que se llevaran a cabo en el centro de transferencia y aprovechamiento de RSM propuesto, con la finalidad de conocer la cantidad de RSM que ingresaran, la cantidad de biogás, composta, energía eléctrica y agua residual que se producirá, la cantidad RSM que se espera recuperar y enviar a disposición final.

El balance de masa se calculó utilizando el diagrama de flujo de proceso que se presenta en la

Figura 30, donde se considera que este centro estará dividido a grandes rasgos en tres secciones una planta de separación, una planta de DA y una planta de composta.

El presente balance de masa se realizó en dos etapas: En primer lugar se realizó el balance para la planta de separación, para la planta de DA y para la planta de composta y se finalizó con un balance global.



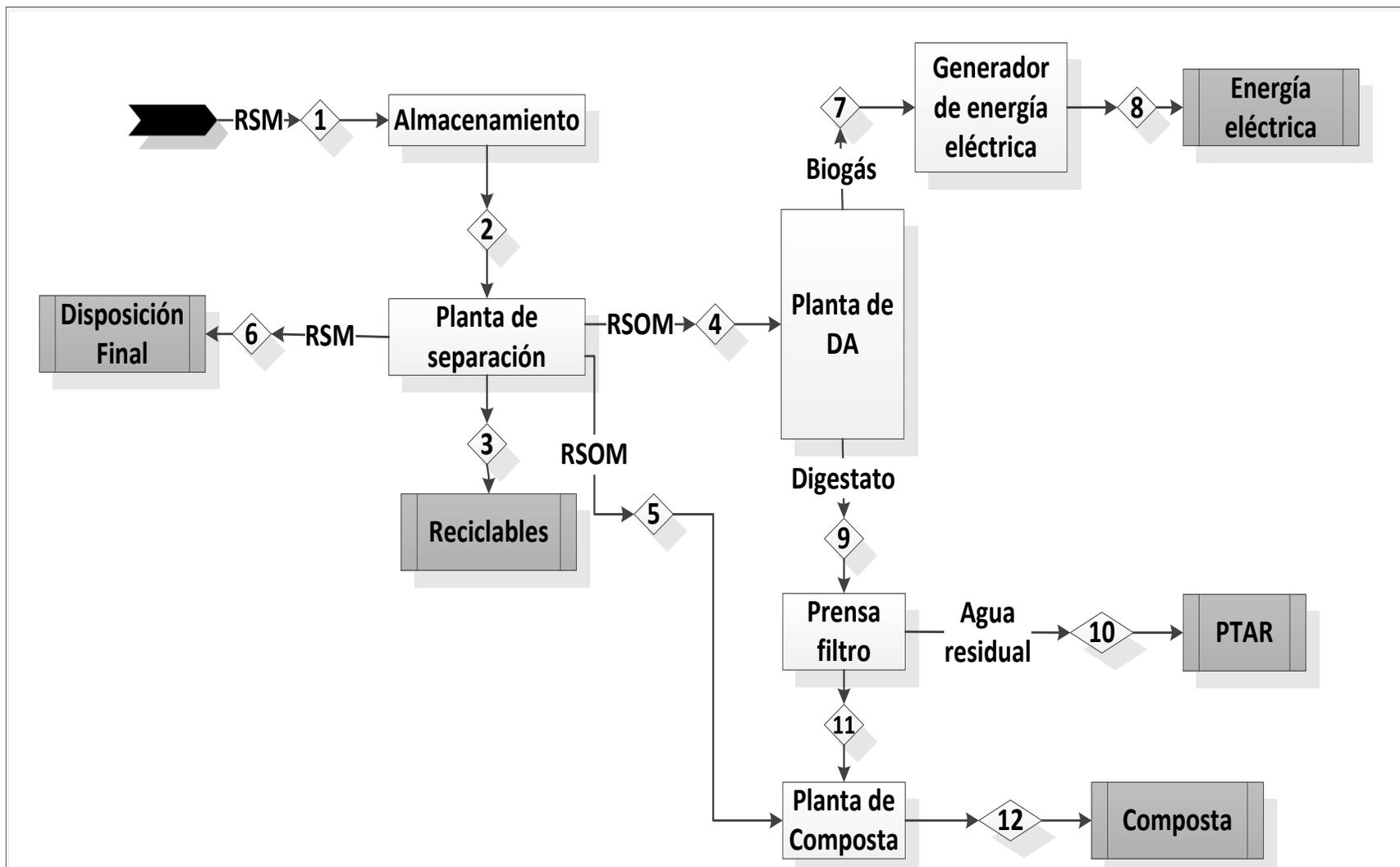


Figura 30. Diagrama de flujo de proceso del centro de tratamiento de RSOM

Para el presente balance de masa se consideró que al centro de tratamiento ingresaran 345,385 ton/año de RSM que se generan en la región del valle de Cuernavaca, con una composición aproximada de 51.8% de orgánicos y 48.2% de inorgánicos. A continuación se describen de forma general las actividades que se realizaron en el balance de masa.

#### 5.4.1 Planta de separación

El balance de la planta de separación requirió del cálculo de las corrientes; 1, 2, 3, 4, 5, 6 que se presentan en la **Figura 30**. A continuación se describe el método de cálculo de cada corriente.

##### ➤ Corriente 1

La corriente 1 corresponde a la cantidad de RSM que ingresaran al centro de aprovechamiento, y es igual a los RSM que se generan en los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco (Ecuación 19).

$$C_1 = 345,385 \text{ ton RSM/año} \quad \text{Ecuación 19}$$

##### ➤ Corriente 2

La cantidad de RSM que sale del área de almacenamiento (corriente 2) es igual a la corriente 1 (Ecuación 21).

$$C_2 = C_1 = 345,385 \text{ ton RSM/año} \quad \text{Ecuación 20}$$



➤ **Corriente 3**

La corriente 3 está integrada por los RSM reciclables que se esperan recuperar en la planta de separación. El método de cálculo de la corriente 3 se presenta a continuación:

1. En primer lugar se buscaron los datos más actuales de la generación y composición de RSM reciclables en los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco. Estos datos se presentan en la Tabla 17.
2. En segundo término se buscaron en la literatura datos de eficiencia de recuperación de RSM reciclables en plantas de separación. Estos datos se presentan en la Tabla 17.
3. . Por último se calculó la cantidad de RSM reciclables que se recuperaran en la planta de separación utilizando Ecuación 21. Los resultados se presentan en la Tabla 17.

$$Gi = \frac{G * Ci * ER_i}{100} \quad \text{Ecuación 21}$$

Dónde:

*Gi*: Generación del componente i [ton/año]

*G*: Generación de los RSM = 345,385 ton/año (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

*Ci*: Composición de componente i [%] (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

*ERi*: Eficiencia de recuperación de componente i



**Tabla 17. Recuperación de RSM reciclables en la planta de separación.**

<b>RSM</b>	<b>Composición [%]</b>	<b>ER [%]</b>	<b>Cantidad [ton/año]</b>
Aluminio	0.16	60	325
Metales	1.49	60	3081
PET	3.18	55	6047
Plásticos	10.03	55	19047
Papel y cartón	9.76	45	15169
Vidrio	4.25	75	11001
Reciclables	28.86	16	54669

Fuente: (Rodriguez Lobajos & Davila Real, 2002)

➤ **Corriente 4**

La corriente 4 corresponde a la cantidad de RSOM que ingresaran a la planta de Digestión Anaerobia. Se caculo utilizando la Ecuación 22.

$$C_4 = \frac{G * Cor * ER_{or} F_{DA}}{100} \qquad \text{Ecuación 22}$$

Donde

$C_4$ : RSOM recuperados en la planta de separación que ingresaran a la planta de planta de DA o la capacidad de la planta [ton/año]

$G$ : Generación de RSM = 345,385 ton/año (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

$Cor$ : Composición de RSOM = 51.85% (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

$ER_{or}$ : Eficiencia de recuperación de RSOM = 0.90 (Rodriguez Lobajos & Davila Real, 2002)

$F_{DA}$ : Fracción de RSOM recuperados en la planta de separación que ingresaran a la planta de DA =0.80



➤ **Corriente 5**

La corriente 5 corresponde a la fracción de RSOM recuperados en la planta de separación que ingresaran a la planta de composta. Se calculó utilizando la Ecuación 23.

$$C_5 = \frac{G * Cor * ER_{or}(1 - F_{DA})}{100} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

$C_5$ : RSOM recuperados en la planta de separación que ingresaran a la planta de composta [ton/año]

$G$ : Generación de RSM 345,385 ton/año (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

$Cor$ : Composición de los RSOM = 51.85% (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

$ER_{or}$ : Eficiencia de recuperación de RSOM = 0.90 (Rodriguez Lobajos & Davila Real, 2002)

$F_{DA}$ : Fracción de RSOM recuperados en la planta de separación que ingresaran a la planta de DA

$(1 - F_{DA})$ : Fracción de RSOM recuperados en la planta de separación que ingresaran a la planta de composta

➤ **Corriente 6**

La corriente 6 corresponde a la cantidad de RSM que serán rechazados en el centro de transferencia y tratamiento, los cuales serán enviados a sitios de disposición final, se calculó utilizando la Ecuación 24

$$C_6 = C_2 - C_3 - C_4 - C_5 \quad \text{Ecuación 24}$$



## 5.4.2 Planta de Digestión Anaerobia

La planta de Digestión Anaerobia tendrá las siguientes condiciones de operación: proceso seco con 22% de sólidos totales, temperatura termofilica en un intervalo de 32-38 °C y tiempo de retención de 28 días.

Con base en el diagrama de flujo de proceso de la Figura 30, la corriente 4 es la que alimentara la planta de DA, las corrientes 7, 8, 9 corresponden al biogás, a la energía eléctrica y el digestato producido. La corriente 10 es la cantidad de agua removida del digestato en el filtro prensa que será enviada a una la planta de tratamiento de agua residual. Enseguida se describe el método de cálculo de cada corriente.

### ➤ Corriente 7

Por la corriente 7 fluirá el biogás producido en la planta de DA el cual se enviará a la planta de generación de energía eléctrica. Esta corriente se calculó utilizando la Ecuación 25 y Ecuación 26.

$$c_7 = C_4 * r_b \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

$c_7$ : Producción de biogás [ton biogás/año]

$r_b$ : Rendimiento biológico de producción de biogás = 0.10 (Partl, 2007)

$C_4$ : La capacidad del biodigestor [ton RSOM/año]

$$C_7 = C_4 * R_b \quad \text{Ecuación 26}$$

Dónde:

$C_7$ : Producción de biogás [ $\text{Nm}^3$  biogás/año]



$R_b$ : Rendimiento biológico de producción de biogás = 125 Nm<sup>3</sup> biogás/ton RSOM  
(Arsova, 2010)

$C_4$ : Capacidad de la planta de DA [ton RSOM/año]

➤ **Corriente 8**

La energía eléctrica generada en la planta de DA corresponde a la corriente 8 y se calculó utilizando Ecuación 27.

$$C_8 = C_4 * P_e \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

$C_8$ : Energía eléctrica producida en la planta de DA [kW-h/año]

$C_4$ : Capacidad de la planta de DA [ton/año]

$P_e$ : Producción unitaria de energía eléctrica = 128 kW-h/ton (Arsova, 2010)

➤ **Corriente 9**

El digestato producido en la planta de DA que será utilizado para producir composta para uso agrícola corresponde a la corriente 9, se calculó utilizando Ecuación 28.

$$C_9 = C_4 * (1 - r_b) \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

$C_9$ : Producción de digestato [ton/año]

$r_b$ : Rendimiento biológico de producción de biogás = 0.1 (OWS Dranco, 2007)

$C_4$ : Capacidad de la planta de DA [ton RSOM/año]



➤ **Corriente 10**

Por la corriente 10 pasara la cantidad de agua residual proveniente de filtro prensa que será enviada a una planta de tratamiento de aguas residuales y se calculó por medio de la Ecuación 29.

$$C_{10} = C_9 * H * E_{H2O} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

$C_{10}$ : Agua residual que sale del filtro prensa

$C_9$ : Digestato que sale de la planta de DA

$H$ : Humedad del digestato que sale de la planta de DA (OWS Dranco, 2007)

$E_{H2O}$ : Eficiencia de remoción de agua en un filtro prensa (OWS Dranco, 2007)

### 5.4.3 Planta de Composta

A la planta de composta se alimentaran el digestato proveniente del filtro prensa (corriente 11) y los RSOM provenientes de la planta de separación (corriente 5). La producción de la planta de composta será el 70% de la alimentación, debido a que en el proceso de producción de composta la masa alimentada pierde peso en un 30%. Enseguida se describe como se calculó cada una de las corrientes mencionadas.

➤ **Corriente 11**

La corriente 11 es la correspondiente al digestato proveniente del filtros prensa que ingresara a la planta de composta y se calculó con la Ecuación 30.

$$C_{11} = C_{10} - C_9 \quad \text{Ecuación 30}$$

Dónde:



$C_{11}$ : Digestato a planta de composta [ton/año]

$C_{10}$ : Digestato producido en la planta de DA [ton/año]

$C_9$ : Agua residual removida en el filtro prensa [ton/año]

➤ **Corriente 12**

En el caso de la corriente 12 corresponde a la producción de composta fina para uso agrícola y se determinó con la Ecuación 37.

$$C_{12} = (C_{11} + C_5) * FC \quad \text{Ecuación 31}$$

Dónde:

$C_{12}$ : Producción de composta [ton /año]

$C_{11}+C_5$ =Capacidad de la planta de composta [ton /año]

$Fc$ : Factor de reducción de peso del digestato en un planta de composta = 0.30

#### 5.4.4 Resultados del balance de masa

Los resultados del balance de masa se presentan en la Tabla 18. En ellas se describen cada una de las corrientes que se presenta en el diagrama de la Figura 30.

Con base en los resultados del balance de masa que se presentan en la Tabla 18, el centro de tratamiento tendrá una capacidad de 345,385 ton/año de RSM, de los cuales en la planta de separación se recuperarán 54,669 ton/año de RSM reciclables y 161,164 ton/año de RSOM de las cuales el 80% se enviaran a la planta de DA y 20% a la planta composta.

Por su parte la planta de DA tendrá una capacidad de 128,931 ton/año de RSOM y producirá 16,116,350 Nm<sup>3</sup>/año de biogás, 16,503,143 kW-h/año de energía eléctrica y de 116,038 ton/año de digestato. Las condiciones de operación del



digestor serán las siguientes; base seca (contenidos de sólidos totales de 22%), temperatura termofilica (37°C), tiempo de retención de 28 días

**Tabla 18. Resultados del balance de masa**

<b>Corriente</b>	<b>Material</b>	<b>Unidades</b>	<b>Cantidad</b>
1	RSM	[ton/año]	345385
2	RSM almacenados	[ton/año]	345385
3	Aluminio	[ton/año]	325
	Metales	[ton/año]	3081
	PET	[ton/año]	6047
	Plásticos	[ton/año]	19047
	Papel y cartón	[ton/año]	15169
	Vidrio	[ton/año]	11001
	Reciclables	[ton/año]	54669
4	RSOM a PDA	[ton/año]	128931
5	RSOM a PC	[ton/año]	32233
6	RSM rechazados	[ton/año]	129552
7	Biogás	[ton/año]	12893
		Nm3 biogás/año	16116350
8	Energía eléctrica	[kWh/ t año]	16503143
9	Digestato	[ton/año]	116038
10	Agua residual	[ton/año]	66142
11	Digestato seco	[ton/año]	49896
12	Composta	[ton/año]	57490

En el caso de filtro prensa tendrá una capacidad de 116,038 ton/año de digestato y removerá 66,142 ton/año de agua residual que será tratada en una planta de tratamiento de agua residual (PTAR por sus siglas). Las 49,896 ton/año de digestato remanentes serán tratadas en la planta de composta.

Por otro lado la de planta de composta tendrá una capacidad de 82,129 ton/año, producirá 57,490 toneladas de composta fina para uso agrícola comerciable.

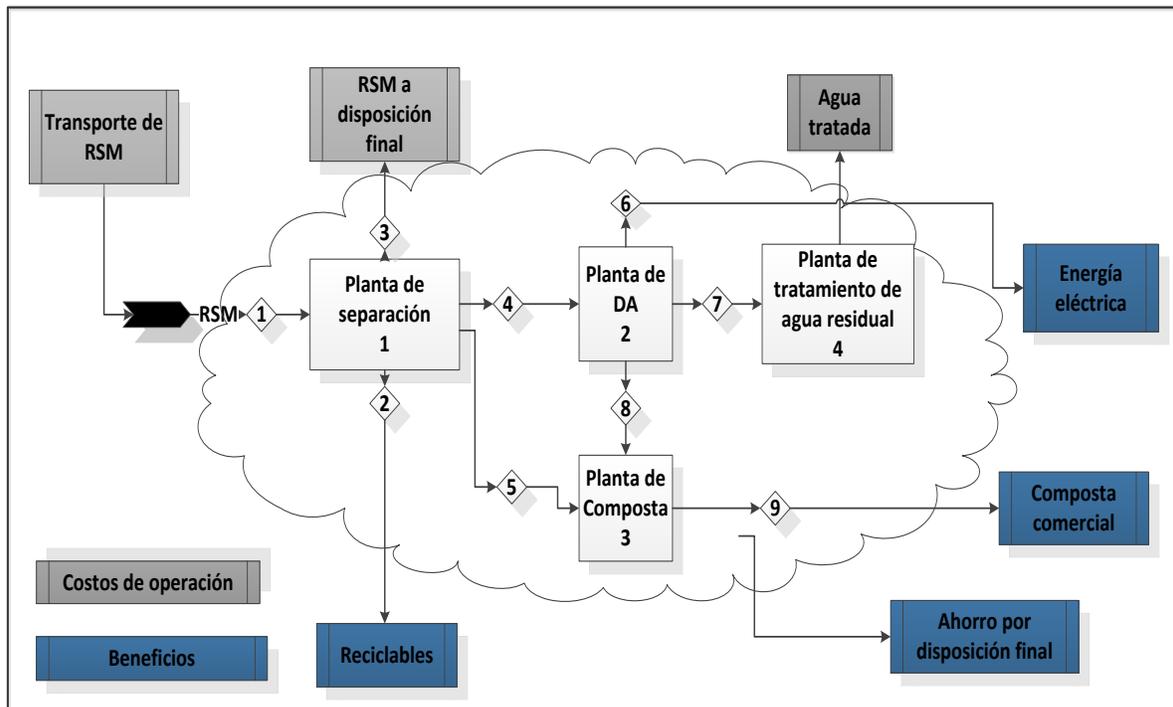


## 5.5 Evaluación económica

Se realizó una evaluación económica del centro de tratamiento de RSOM, con la finalidad de conocer que tan viable es la presente propuesta. Se analizaron los siguientes indicadores económicos: inversión, costos de operación, valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), periodo de retorno de la inversión (PRI) entre otros.

Para la presente evaluación económica se dividió el centro de tratamiento en 4 secciones como se presenta en la Figura 31. La primera sección está compuesta de la planta de separación, la segunda de la planta de DA, la tercera de la planta composta y la cuarta de la planta de tratamiento de aguas residuales.

**Figura 31. Evaluación económica del centro de tratamiento de RSOM**



En el diagrama de la Figura 31 lo que se encuentra dentro de la nube corresponde a todas aquellas instalaciones que representarían una inversión y unos costos de

operación, los rectángulos grises son costos de operación adicionales a las instalaciones y los rectángulos azules son los beneficios del centro de tratamiento.

El método para la evaluación económica consistió de dos etapas: en la primera etapa se realizó una evaluación económica de las siguientes instalaciones: la plantas de DA, separación, composta y tratamiento de agua residual y se finalizó con una evaluación general del centros de tratamiento. A continuación se describe de forma detallada el método de la evaluación económica.

### 5.5.1 Planta de separación

La evaluación económica de la planta de separación abarco el área de recepción de RSM, la sección de separación de RSOM y la sección de separación de RSIM reciclables. Sea realizo utilizando los siguientes modelos:

Inversión de la planta de separación en el año 1998 (JICA, 1999):

$$I_{S1998} = 7M \quad \text{Ecuación 32}$$

Inversión de la planta de separación en el año 2013:

$$I_S = I_{S1998} \left( \frac{IPP_{2013}}{IPP_{1998}} \right) \quad \text{Ecuación 33}$$

Costos de operación en el año 2013 (JICA, 1999):

$$C_{OS} = 0.3I_S \quad \text{Ecuación 34}$$

$I_S$ : Inversión de la planta de separación [USD]

$I_{S1998}$ : Inversión de la planta de separación en el año 1998 [USD]

$C_{OS}$ : Costos de operación de la planta de separación [USD/año]



$M$ : Capacidad de la planta de separación [ton/año]

$IPP_{2013}$ : Índice de precios al productor 2013 (INEGI, 2013)

$IPP_{1998}$ : Índice de precios al productor 2013

### 5.5.2 Planta de Digestión Anaerobia

La evaluación económica de la planta de DA comprendió los equipos que integran las etapas del pretratamiento de los RSOM, las instalaciones del biodigestor, la planta de generación de energía eléctrica y el compostaje del digestato. Se realizó utilizando los siguientes modelos económicos;

Inversión de la planta en el año 2008 (Rapport, et al., 2008);

$$I_{D2008} = 1.7171(W)^{0.5581} \quad 2500 < W < 100000 \quad \text{Ecuación 35}$$

Inversión de la planta en el año 2013:

$$I_D = I_{D2008} \left( \frac{i_{2013}}{i_{2008}} \right) f_r \quad 2500 < W < 100000 \quad \text{Ecuación 36}$$

Costos de operación en el año 2008 (Rapport, et al., 2008):

$$C_{OD2008} = 305.62W^{-0.617} \quad 2500 < W < 100000 \quad \text{Ecuación 37}$$

Costos de operación en el año 2013:

$$C_{OD} = C_{OD2008} \left( \frac{i_{2013}}{i_{2008}} \right) \quad \text{Ecuación 38}$$



Dónde:

$I_D$ : Inversión de la planta de DA en el 2013 [USD]

$I_{D2008}$ : Inversión de la planta de DA en el 2008 [USD]

$C_{OD}$ : Costos de operación de la planta de DA en el 2008 [USD/a]

$C_{OD2008}$ : Costos de operación de la planta de DA en el 2013 [USD/a]

$W$ : Capacidad de la planta de DA [ton/año]

$i_{2013}$ : Índice de costos de plantas de ingeniería química para el 2013 (575)  
(Chemical Engenering, 2013)

$i_{2008}$ : Índice de costos de plantas de ingeniería química para el 2008 (575)  
(Chemical Engenering, 2013)

$fr$ : factor de regionalización = 0.94 (Blank, 2002)

### 5.5.3 Planta de composta

La evaluación económica de la planta de composta se realizó considerando que tiene la capacidad para tratar los RSOM provenientes de la planta de separación, debido a que la evaluación de la planta de DA ya incluye el tratamiento del digestato por compostaje.

La presente evaluación se realizó utilizando modelos de curvas de costos y valores promedio que se presentan a continuación

Inversión de la planta de composta en el año 2006 (Tsilemou, 2006):

$$I_C = 0.044x^{0.66} \quad \text{Ecuación 39}$$

Inversión de la planta de composta en el año 2013:

$$I_C = I_{C2006} * \left( \frac{i_{2013}}{i_{2006}} \right) * fr \quad \text{Ecuación 40}$$



Costos de operación de la planta de composta en el 2006 (Tsilemou, 2006):

$$C_{OC2006} = 6889.3x^{-0.61} \quad \text{Ecuación 41}$$

Costos de operación de la planta de composta en el 2013:

$$C_{OC} = C_{OC2006} * \left( \frac{i_{2013}}{i_{2006}} \right) * fr \quad \text{Ecuación 42}$$

Dónde:

$I_{c2006}$ : Inversión de la planta de composta en el 2006 [USD \$/año]

$I_c$ : Inversión de la planta de composta en el 2013 [USD \$/año]

$C_{oc}$ : Costos de operación de la planta de composta en el año 2013 [USD \$/año]

$i_{2013}$ : Índice de costos de plantas de ingeniería química para el 2013 (570)  
(Chemical Engenering, 2013)

$i_{2006}$ : Índice de costos de plantas de ingeniería química para el 2013 (499.6)  
(Chemical Engenering, 2013)

$fr$ : factor de regionalización = 0.94 (Blank, 2002)

#### 5.5.4 Planta de tratamiento de agua residual

La planta de tratamiento de agua residual tendrá una capacidad para tratar el agua residual que sale del filtro prensa. Las ecuaciones para calcular la inversión y los costos de operación se muestran a continuación.

Inversión de la planta de tratamiento de agua residual en el año 2002 (Mantilla Morales , et al., 2002):

$$I_{PTAR2002} = 1272Q^{0.6843} \quad \text{Ecuación 43}$$

Inversión de la planta de tratamiento de agua residual en el año 2013;



$$I_{PTAR} = I_{PTAR2002} \left( \frac{IPP_{2013}}{IPP_{2002}} \right) \quad \text{Ecuación 44}$$

Costo de operación de la planta de tratamiento de agua residual en el año 2013 (Mantilla Morales , et al., 2002):

$$C_{OPTAR} = I_{PTAR} 0.1 \quad \text{Ecuación 45}$$

Dónde:

$I_{PTAR2002}$ : Inversión de la planta de tratamiento de agua residual en el año 2012 [USD \$/año]

$I_{PTAR}$ : Inversión de la planta de tratamiento de agua residual en el año 2013 [USD \$/año]

Q: Flujo del agua residual [L/s]

$C_{OPTAR}$ : Costos de operación de la planta de tratamiento de agua residual [USD\$/año]

### 5.5.5 Otros costos de operación (oC)

Adicionalmente a los costos de operación internos se encuentran los costos de operación externos (nombrados otros costos de operación), estos costos provienen del transporte de la fuente de generación al centro de tratamiento, el costo de la disposición final de los RSM rechazados en el centro de tratamiento, como se presentan en la Figura 31.

Los costos de operación adicionales se presentan en la Tabla 19. Los datos de producción de cantidad provienen del balance de materia y los datos de costos unitarios son datos del gobierno del Estado de Morelos



**Tabla 19. Otros costos de operación del centro de tratamiento**

	Cantidad [ton/año]	CU [USD \$/ton]	Costos [millones USD \$/año]
Transporte	345385	4.82	2.04
Costos de DF	129552	2.42	0.38
<b>Total</b>			<b>2.42</b>

Fuente: (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

La mayor contribución en los costos adicionales proviene del transporte de los RSM desde la fuente de generación al centros de tratamiento con 2.04 millones de dólares anuales.

### 5.5.6 Beneficios

Los principales beneficios del centro del tratamiento que se esperan obtener se muestran en la Tabla 20, corresponden principalmente a las ventas de; RSM reciclables, composta energía eléctrica y ahorros por dejar de disponer los RSM recuperados. Los datos de producción provienen del balance de masa y los precios de venta son datos de campo.

**Tabla 20. Beneficios del centro de tratamiento**

	Unidades	Producción	Precio de venta unitario [USD \$/año]	Ventas [millones UDS\$/año]
Aluminio	[ton/año]	1786	325	0.58
Metales	[ton/año]	250	3081	0.77
PET	[ton/año]	429	6047	2.59
Plásticos	[ton/año]	214	19047	4.08
Papel y cartón	[ton/año]	179	15169	2.71
Vidrio	[ton/año]	71	11001	0.79
Composta	[ton/año]	57490	71	4.11
Ahorros de disposición final	[ton/año]	215833	2.42	0.52
energía eléctrica	[kW-h/año]	16503143	0.16	2.70
<b>Total</b>				<b>18.85</b>

Con base en la Tabla 20 los principales beneficios del centro de tratamiento provienen de la venta de materiales reciclables con y 61.1% de las ventas totales,



la venta de composta contribuye en 22.52%, la venta de energía contribuye en 14.32%, la menor contribución provienen del ahorro por dejar de disponer los RSM recuperados y los RSOM tratados.

### 5.5.7 Evaluación económica general

Una vez terminada la evaluación económica de la plantas: de separación, de la planta de DA y de la planta de composta se procedió con la evaluación del centro de tratamiento. Para este caso se determinaron los siguientes indicadores económicos: inversión total, costos de operación, valor presente neto, tasa interna de retorno, periodo de recuperación de la inversión, costo anualizado, costo por tonelada tratada utilizando los modelos que se presenta a continuación:

Inversión del centro de tratamiento

$$I = I_S + I_D + I_C + I_{PTAR}$$

**Ecuación 46**

Costos de operación;

$$Co = C_{OD} + C_{OS} + C_{OC} + C_{OPTAR} + OC$$

**Ecuación 47**



Balance económico (Blank, 2002)

Beneficios
-Costos de operación
<hr/>
Ganancia bruta
-Depreciación
<hr/>
Ganancia antes de impuesto
-Impuesto sobre la renta (ISR)
-Impuestos
<hr/>
Ganancia después de impuestos
+Depreciación
<hr/>
Flujo de efectivo neto $F_i$

Valor presente neto (VPN) (Blank, 2002)

$$VPN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{\left(1 + \frac{TD}{100}\right)^i} \quad \text{Ecuación 48}$$

Tasa interna de retorno (TIR) (Blank, 2002)

$$VPN = 0 = -I + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{\left(1 + \frac{TIR}{100}\right)^i} \quad \text{Ecuación 49}$$

Valor presente de los costos (VPC) (Blank, 2002)

$$VPC = -I + \sum_{i=1}^n \frac{C_o}{\left(1 + \frac{TD}{100}\right)^i} \quad \text{Ecuación 50}$$



Costo anualizado (CAE) (Blank, 2002)

$$CAE = VPC \left[ \frac{TD(1 + TD)^n}{(1 + TD)^n - 1} \right] \quad \text{Ecuación 51}$$

Costo por tonelada (Blank, 2002)

$$C_{ton} = \left( \frac{CAE}{M} \right) \quad \text{Ecuación 52}$$

*I*: Inversión del centro de tratamiento [USD \$]

*Co*: Costos de operación del centro de tratamiento [USD \$/a]

*VPN*: Valor presente neto [USD]

*TD*: Tasa de descuento (En México se utiliza 0.12 )

*TIR*: Tasa interna de retorno (Para un proyecto rentable  $TIR > VPN$ )

*VPC*: Valor presente de los costos [millones de USD]

*CAE*: Costo anualizado [USD \$/año]

*Ct*: Costos por tonelada [USD \$/ton]

*i*: Horizonte de operación (Se consideran 20 años)

### 5.5.8 Datos de la evaluación económica.

Los resultados de la evaluación económica de cada área del centro de tratamiento se presentan en la Tabla 21.

**Tabla 21. Inversión y Costos de operación**

	Capacidad [mil ton/año]	Inversión [millones USD \$/año]	Costos de operación [ millones USD \$/año]
Planta de separación	345	5.8	0.7
Planta de DA	129	24.4	2.4
Planta de composta	32	5.1	0.4
PTAR	66	3.0	0.4
Otros	-----	-----	2.4
Centro de tratamiento		38.4	6.3

Como se muestra en la Tabla 21, la inversión del centros de tratamiento de RSOM región Cuernavaca es de 38.4 millones de dólares, los costos de operación son de 6.3 millones de dólares por año. El costo de operación es el 16.4% de la inversión.

Con base en la Tabla 21, la inversión de la planta de Digestión anaerobia corresponde al 63.5% de la inversión total, mientras que sus costos de operación son el 38.1% de los costos de operación totales, por lo que la planta de DA es la sección más cara del centro de tratamiento.

En la Tabla 22 se presenta los resultados de la evaluación económica del centro de transferencia y aprovechamiento región Cuernavaca propuesto en el presente trabajo de tesis.



**Tabla 22. Evaluación Económica del centro de tratamiento**

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Cantidad</b>
Inversión	[millones USD \$]	\$38.4
Costos de operación	[millones USD \$/año]	\$6.2
Costos anualizado	[millones USD \$/año]	\$6.5
Costo por tonelada tratada	[USD \$/ton]	\$17.4
Flujo de efectivo	[millones USD \$/año]	\$6.91
VPN	[millones USD \$/año]	\$13.2
TIR	[%]	17.2%
PRI	[año]	6

Nota: VPN: Valor presente neto, TD: Tasa de descuento y TIR: Tasa interna de retorno, PRI: periodo de retorno de la inversión

Como se presenta en la Tabla 22 los costos asociados al centro de tratamiento presentan el siguiente comportamiento: la inversión es de 38.4 millones de dólares, los costos de operación de 6.2 millones de dólares, costo anualizado de 6.5 millones de dólares y costo por tonelada tratada de 17.4 dólares.

Con base en la Tabla 22 los parámetros económicos analizados son aceptables debido a que el flujo de efectivo (FE) es de 6.9 millones de dólares anuales, el valor presente neto (VPN) es de 13.2 (mayor a cero), Tasa interna de retorno (TIR) de 17.2% es mayor a la tasa de descuento (12%) y el periodo de retorno de la inversión de 6 años es aceptable.



## 5.6 Evaluación ambiental

---

Los beneficios ambientales que pueden obtener de la presente propuesta, entre otros, es la producción de energía eléctrica, disminución de emisión de gases de efecto invernadero (metano), la reducción del volumen de RSM que ingresan a sitios de disposición final, y la mejora de suelos de cultivo como se presenta en la Tabla 23.

**Tabla 23. Beneficios ambientales del centro de tratamiento**

Beneficios ambientales	Unidades	Cantidad
Reducción de RSM a disposición Final	[ton/año]	172,164
Metano	[ton/año]	7,736
Producción de composta	[ton/año]	57,490
Producción de Energía eléctrica	[kW-h/ año]	16,503,143

Con base en la Tabla 23 con el centro de tratamiento de RSOM propuesto el presente trabajo de tesis se dejara de disponer 172,164 ton/año de RSM en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto, con lo que se estaría resolviendo el problema de generación de RSM en el valle de Cuernavaca en un 62.5%.

Por otro lado se dejaría de emitir a la atmosfera 7,736 ton/año de metano (ver Tabla 23), debido a que, el metano generado en la planta de DA, será utilizado para producir energía eléctrica y calor por medio de la reacción de combustión, en la cual se produce, vapor de H<sub>2</sub>O. y CO<sub>2</sub>.

En este sentido el vapor de H<sub>2</sub>O no tiene impacto en el efecto invernadero y el CO<sub>2</sub> tiene un impacto 25 veces menor al CH<sub>4</sub>. (Naciones Unidas, 2013) (Mahan, 2007). Por lo tanto al capturar el metano que se genera en la DA y utilizarlo para producir energía eléctrica, se está mitigando el efecto invernadero 25 veces la producción de metano.



Las 57,490 ton/año de composta que se producirá en el centro de tratamiento podrán utilizarse en el sector agrícola como fertilizantes de suelos de cultivo (ver Tabla 23).

Con las 16.5 millones de kW-h/año de energía eléctrica que se generaran el centro de tratamiento región Cuernavaca (ver Tabla 23), se podrá abastecer de este servicio aproximadamente a 3100 hogares. Con lo que se estaría ayudando a la reducción de usos de combustibles fósiles y al aumento del consumo de energías renovables.



## 6. Conclusiones y recomendaciones

---

La generación de RSOM en el Estado de Morelos es un problema por causa de un mal manejo. Esto se debe principalmente a las siguientes ineficiencias que presenta la gestión integral de residuos sólidos: no existe separación de RSM de algún tipo desde la fuente de generación hasta de la disposición final, no integra las etapas de tratamiento y recuperación energética, y los sitios de disposición no cuentan con las instalaciones adecuadas por lo que no cumplen con la normatividad correspondiente.

Después de una revisión bibliográfica exhaustiva acerca del estado del arte de la DA se encontró que, las tecnologías de DA secas presentan mayores beneficios debido a que presentan mayor rendimiento de producción de biogás energía eléctrica y composta, además de un menor requerimiento en inversión, costos de operación, y consumo de servicios auxiliares en comparación con las tecnologías húmedas.

Asimismo, una vez realizada la investigación para el diseño del muestreo de RSOM, se observó que no hay una metodología general o estándar a nivel internacional y nacional, por lo que para este fin, se utilizaron métodos estadísticos para calcular el tamaño de muestra, y los métodos para muestreo que se presentan en las normas (NMX). Esto con el objetivo de obtener muestras representativas con las que se puedan hacer estudios de caracterización y obtener datos representativos y confiables.

Los RSOM de los municipios de Cuernavaca, Jiutepec y Temixco tienen el potencial necesario para ser utilizados en la DA para producir biogás energía eléctrica y composta de uso agrícola, debido a que están compuestos en mayor proporción por de residuos de alimentos y jardinería que son las fracciones con mayor potencial para generar biogás.



Por medio del centro de tratamiento planteado se pretende aprovechar 62.4% de los RSM que se generan en el valle de Cuernavaca, ya que se recuperan 15.8% de materiales reciclables en la planta de separación, se trataran 37.3% de RSOM en la planta de digestión anaerobia y 9.3% en la planta de composta, se rechazaran 37.6% de RSM que se enviaran a disposición final. Para la fracción rechazada se recomienda hacer un estudio para que puedan ser utilizados en tratamientos térmicos como la incineración.

La presente propuesta es técnica y ambientalmente viable debido a que presenta los siguientes beneficios; reducirá 62.4% el volumen de RSM que llegan a sitios de disposición final, producirá anualmente 16 millones de kwh-h de energía eléctrica que podrá ser utilizada para suministrar de este servicio a 3,100 hogares y en consecuencia se dejara de emitir a la atmosfera anualmente 7,736 toneladas de metano, también se producirán anualmente 57 mil toneladas por año de composta para mejorar aproximadamente 100 mil hectáreas de suelo para uso agrícola.

En este sentido, los parámetros económicos analizados valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR) y periodo de retorno de la inversión (PRI) indicaron que la presente propuesta es económicamente viable. El valor presente neto es de 13 millones de dólares (mayor a cero) es aceptable, la tasa interna de retorno es mayor a la tasa de descuento y el periodo de retorno de la inversión es aceptables.

Los principales beneficios económicos que presentara el centro de tratamiento son; las ventas de energía eléctrica, materiales reciclables, composta de uso agrícola y un ahorro por disposición final. En el caso de la venta de materiales reciclables representa los mayores beneficios del centro de tratamiento.

Así mismo la inversión y los costos de operación de la planta de Digestión Anaerobia representan 62.4% y 36.2% de la inversión y los costos de operación totales del centro de tratamiento, esto hace a la planta de digestión anaerobia la sección más cara del centro de tratamiento



Para obtener más beneficios de la presente propuesta se recomienda realizar estudios para buscar más aplicaciones del digestato producido en la DA y la forma de comercializarlo y un estudio técnico económico de formas para comercializar el biogás.



## 7. Bibliografía

---

1. APHA-AWWA-WPCF, 1995. *Standar Mehods for the Examintation of Water and Wasterwater*. 21 ed. Washintón D.C.: American Public Health Association.
2. Arsova, L., 2010. *Anaerobic digestion of food waste:Current status, problems and an alternative product*. New York : Columbia University.
3. Barker, H. A., 1956. Biological Formation of Methane. *lindustrial and Engenering Chemistry*, 40(9), pp. 1438-1443.
4. Blank, L., 2002. *Ingenieria Economica*. Mexico D. F.: Mac Graw Hill.
5. Cantanhede, A., Sandoval Alavarado, L. & Monge, G., 2005. *Procedimientos estadísticos para los estudios de caracterización de residuos sólidos*. Lima: CEPIS.
6. Carabias Lilo, J. & Quadri de la Torre, G., 1996. *Estaciones de transferencia de residuos sólidos en areas urbanss*. Primera ed. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
7. CCL Bioenergy, 2013. *CCL Bioenergy*. [En línea] Available at: <http://www.ccbioenergy.com/index.html>
8. Chemical Engenering, 2013. *Chemical Engenering*. [En línea] Available at: <http://www.che.com/pci> [Último acceso: 23 Enero 2013].
9. Chynoweth, D. P., 1996. Enviromental impact of biomethanogenesis. *Enviromental Monitoring and Assessment* 42, pp. 3-18.
10. Espinosa L., M. d. C. & Lopez T., M., 2007. La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos como fuente potencial de producción de biogás. *CENIC Ciencias Biológicas*, 38(1), pp. 33-37.
11. Felder, R. M. & Rousseau, R. W., 2006. *Principios elementales de los procesos químicos*. México: Limusa Wiley.
12. Flores , D., 2001. *Guía practica No. 2 Para el Aprovechamiento de los Residuos sólidos Orgánicos*. Quito Ecuador: s.n.
13. Gerardi H., M., 2003. *The Microbiology of Anaerobic Digester*. Primera ed. New Jersey: Jonh Wiley & Sons.
14. GIZ, 2012. *Guía de planificación para proyectos de biogas en chile*. Primera ed. Santiago de Chile: Coperación alemana en Chile.
15. Gobierno del Estado de Morelos, 1930. *Constitución Política del Estado Libre y Soberano de Morelos, del 20 de septiembre de 1888, con reformas hechas hasta 1912*, Cuernavaca: Imprenta del Gobierno del Estado.
16. Gobierno del Estado de Morelos, 2007. Ley de Residuos Sólidos del Estado de Morelos. *Peridico Oficial Sección Segunda "Tierra y Libertad*, 18 Octubre, pp. 1-48.
17. Gobierno del Estado de Morelos, 2007. Ley del Equilibrio Ecologico y Protección al Ambiente del Estado de Morelos. *Tierra y Libertad*, 22 Diciembre, pp. 1-78.



18. Gobierno del Estado de Morelos, 2010. Programa de Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial del Estado de Morelos. *Tierra y libertad*, 21 Julio, pp. 1-204.
19. Google Maps, 2012. *Google Maps 2012*. [En línea] Available at: <http://maps.google.com.mx/> [Último acceso: 23 Diciembre 2012].
20. H. Congreso de la Unión, 2003. Ley General para la Prevención y Gestión Interl de los Residuos. *Diario Oficial*, 30 Mayo, pp. 1-43.
21. H. Congreso de la Unión, 2010. Ley General de Equilibrio Ecologico y Protección al Ambiente. *Diario Oficial*, 15 Mayo, pp. 1-116.
22. H. Congreso de Union, 2013. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que reforma a la de 5 de Febrero de de 1857. *Diario Oficial*, 26 Febrero, pp. 1-194.
23. INEGI, 2012. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. [En línea] Available at: <http://www3.inegi.org.mx> [Último acceso: 12 10 2012].
24. INEGI, 2013. *Instituto Nacional de Estadística y geografía*. [En línea] Available at: <http://www.inegi.org.mx> [Último acceso: 23 Enero 2013].
25. JICA, 1999. *Estudio sobre el manejo de residuos sólidos para la ciudad de México de loa Estados Unidos Mexicanos*, Distrito Federal: KOKUSAI KOGYO CO., LTD..
26. Korz, D., 2010. *Anaerobic Digestion and Biogas Upgrading*, s.l.: Ros Roca SA.
27. Lacos, H. F., Desbois, S. & Saint-Joly, C., 1997. Anaerobic digestion of Municipal Solid Organic Waste: Valorga full-scale plant in Tilburg, the Netherlands. *Water, Science Technology*, pp. 457-462.
28. Lissens, G. y otros, 2001. Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion. *Water science & Technology*, pp. 44. 91-102.
29. Lobera Lössel, J. B., 2011. *Metabioresor*. [En línea] Available at: <http://www.metabioresor.eu>
30. Ludwig, C., 2003. *Municipal Solid Waste Management; Strategies and Technologies for Sustainable Solution*. Primera ed. New York: Springer.
31. Mahan, S. E., 2007. *Introducción a la química ambiental*. Primera ed. México D.F.: Reverte.
32. Mantilla Morales , G., Servín Jungdorf, C. A. & Montesillo Cedillo, J. L., 2002. *Costos índices de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México*, México D. F.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
33. Mata Alvarez, J., 2003. *Biometanization of the organic fraction of municipal solid waste*. Primera ed. London: IWA publishing.
34. McCarty, P. L., 1964. Anaerobic Waste treatment fundamentals. *Public Works*, pp. 107-112.
35. Metcalf y Eddy, 2003. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. Cuarta ed. New York: Mc Graw Hill.



36. Naciones Unidas, 2013. *Global Warming Potentials*. [En línea] Available at: [http://unfccc.int/ghg\\_data/items/3825.php](http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php) [Último acceso: 23 3 2013].
37. OWS Dranco, 2007. *Planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos mediante biometanización y compostaje de Vitoria Gasteiz*, Vitoria Gasteiz: Infoenviro.
38. Palacios Gonzalez, S., 2010. *Tesis: Propuesta tecnologica para la valorización de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos generados en el Distrito Federal*. D.F.: s.n.
39. Partl, H., 2007. *KOMPOGAS process description and costings*, Sydney Australia: Hyder Consulting.
40. Raposo, F. e. a., 2011. Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaborator e. *journal of chemeical technology and biotechnology*, pp. 1088-1098.
41. Rapport, J., Zhang, R. & Jenkins, B., 2008. *AgencyCurrent Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste*, California: California Environmental Protection AgencyCurrent.
42. Rodriguez Lobajos, B. & Davila Real, A., 2002. *Impactos económicos y ambientales de una sobre oferta de materiales en el mercado de reciclaje en el distrito federal*. Cancún: AIDIS.
43. Ros Roca SA, 2013. *Ros Roca environment*. [En línea] Available at: <http://www.rosroca.com> [Último acceso: 22 Octubre 2012].
44. Runfola, J. & Gallardo, A., 2009. Analisis de factores que influyen en la generación y composición de los residuos sólidos urbanos a considerar para un modelo de caracterización. *3º Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, pp. 1-9.
45. Shefali, V., 2002. *Anaerobic Digestion of biodegradable organics in Municipal Solid Waste*. Bogota: Columbia University.
46. Six, W. & De Baere, L., 1992. Dry anaerobic conversion of municipal solid waste by means of the DRANCO process. *Organic Waste System*, pp. 295-300.
47. Stafford, A. D. & Hawkes, L. D., 1980. *Metane production from waste organic matter*. Boca Ratón (Florida): CRC Press, Inc.
48. Tchobanoglous, G. & Theisen, H., 1994. *Integrated solid waste management*. Primera ed. Singapur: McGraw-Hill.
49. Thesis Consulting, 2005. *Caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos; Regional*, Cuernavaca: Thesis Consulting.
50. Thesis Consulting, 2005. *Descripción del Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos; Cuernavaca*, Cuernavaca: s.n.
51. Thesis Consulting, 2005. *Descripción del Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos; Regional*, Cuernavaca: s.n.
52. Thesis Consulting, 2005. *Descripción del Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos; Regional*, Jiutepec: s.n.



53. Tsilemou, K., 2006. Approximate cost functions for solid waste treatment facilities. *Waste Management & research*, pp. 310-322.
54. van Haandel, A. & van der Lubbe, J., 2007. *Handbook Biological Waste Water Treatment*. Leidschendam Holanda: Vitgeverij Quist.



## Anexo 1 Datos generales de los RSM en el Estado de Morelos

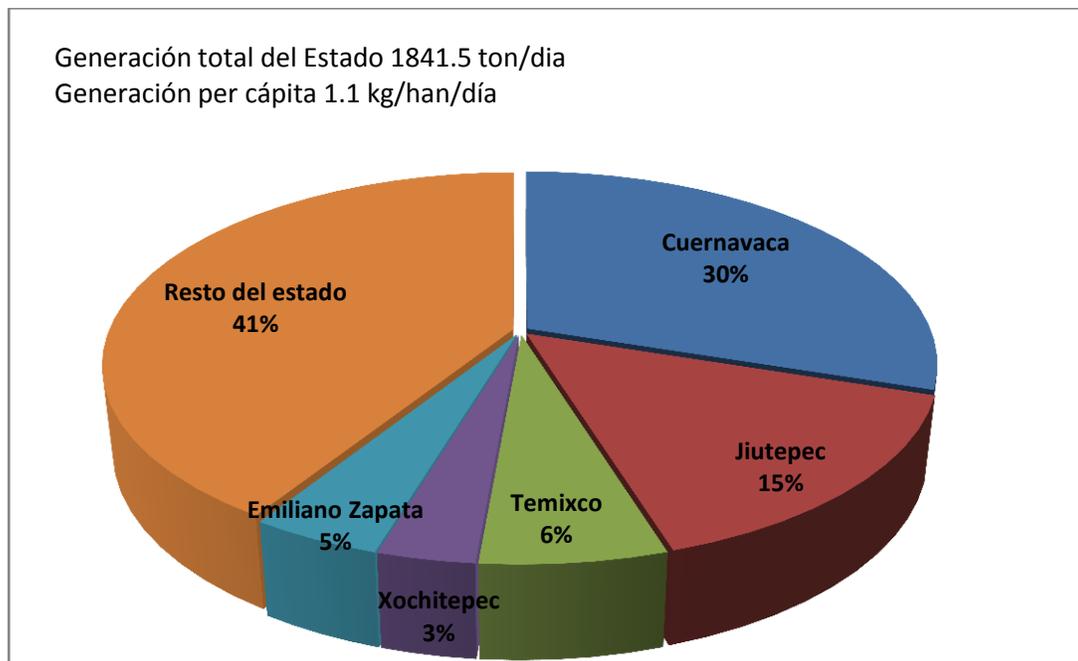
Tabla 24. Población y Generación de RSM en el Estado de Morelos

Zona o Región	Municipio	Habitantes (2009)	Habitantes [%]	Generación [ton/día]	Generación [%]
Zona Conurbada de Cuernavaca	Cuernavaca	362,300	21.6	553.03	30
	Emiliano Zapata	78,704	4.7	79.92	4.3
	Jiutepec	190,270	11.4	279.26	15.2
	Temixco	104,120	6.2	114.07	6.2
	Xochitepec	60,359	3.6	59.96	3.3
	<b>Total regional</b>	<b>795,753</b>	<b>47.5</b>	<b>1,086.26</b>	<b>59</b>
Región Nor Oriente 2	Atlatlahucan	14,177	0.8	8.974	0.5
	Ocuituco	15,632	0.9	7.876	0.4
	Tetela del Volcán	18,179	1.1	9.159	0.5
	Yecapixtla	42,353	2.5	26.797	1.5
	<b>Total regional</b>	<b>90,341</b>	<b>5.4</b>	<b>52.8</b>	<b>2.9</b>
Región Poniente 3	Coatlan del Rio	7,629	0.5	5.67	0.3
	Mazatepec	8,583	0.5	7.27	0.4
	Miacatlán	22,276	1.3	14.79	0.8
	Tetecala	6,232	0.4	4.76	0.3
	<b>Total regional</b>	<b>44,720</b>	<b>2.7</b>	<b>32.5</b>	<b>1.8</b>
Región Centro Sur 4	Amacuzac	14,555	0.9	9.43	0.5
	Jojutla	50,196	3	36.91	2
	Puente de Ixtla	59,091	3.5	44.73	2.4
	Tlaltizapán	44,870	2.7	15.51	0.8
	Tlaquiltenango	29,201	1.7	22.85	1.2
	Zacatepec de Hidalgo	33,906	2	25.33	1.4
	<b>Total regional</b>	<b>231,819</b>	<b>13.8</b>	<b>154.75</b>	<b>8.4</b>
Región Sur Oriente 5	Axochiapan	30,454	1.8	21.95	1.2
	Jantetelco	13,911	0.8	8.75	0.5
	Jonacatepec	13,696	0.8	7.23	0.4
	Temoac	12,828	0.8	6.57	0.4
	Tepalcingo	22,453	1.3	17.47	0.9
	Zacualpan de Amilpas	7,842	0.5	4	0.2
	<b>Total regional</b>	<b>101,184</b>	<b>6</b>	<b>65.98</b>	<b>3.6</b>
Región de los Altos de Morelos	Tlalnepantla	5,919	0.4	3.56	0.2
	Tlayacapan	15,373	0.9	12.41	0.7
	Totolapan	11,168	0.7	8.2	0.4
	<b>Total regional</b>	<b>32,460</b>	<b>1.9</b>	<b>24.17</b>	<b>1.3</b>
Región Centro	Ayala	70,179	4.2	64.9	3.5
	Tepoztlán	39,361	2.3	47	2.6
	Yautepec	86,581	5.2	121.21	6.6
	<b>Total regional</b>	<b>196,121</b>	<b>11.7</b>	<b>233.11</b>	<b>12.7</b>
Otros Municipios	Cuautla	167,919	10	179.67	9.8
	Huitzilac	15,291	0.9	12.26	0.7
	<b>Total regional</b>	<b>183,210</b>	<b>10.9</b>	<b>191.93</b>	<b>10.4</b>
<b>Total Estatal</b>		<b>1,675,608</b>		<b>1,841.50</b>	

Fuente: (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)



**PROPUESTA CONCEPTUAL DEL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS  
MUNICIPALES GENERADOS EN EL ESTADO DE MORELOS MEDIANTE LA TECNOLOGIA DE  
DIGESTIÓN ANAEROBIA**



**Figura 32. Generación de RSM en el Estado de Morelos**

**Tabla 25. Población del Estado de Morelos en el tiempo**

ENTIDAD Y MUNICIPIO	POBLACION						
	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
<b>Morelos</b>	<b>272,842</b>	<b>386,264</b>	<b>616,119</b>	<b>947,089</b>	<b>1,195,059</b>	<b>1,555,296</b>	<b>1,777,227</b>
Amacuzac	3,720	5,375	6,748	10,118	13,659	16,482	17,021
Atlatlahucan	2,462	3,193	5,167	8,300	9,255	14,708	18,895
Axochiapan	8,437	11,262	15,323	21,404	26,283	30,436	33,695
Ayala	11,614	16,113	28,099	43,200	52,969	69,381	78,866
Coatlán del Río	4,293	5,039	7,727	7,996	8,665	9,356	9,471
Cuautla	29,995	42,601	69,020	94,101	120,315	153,329	175,207
Cuernavaca	54,928	85,620	160,804	232,355	281,294	338,706	365,168
Emiliano Zapata	4,532	5,237	10,670	20,977	33,646	57,617	83,485
Huitzilac	3,668	4,238	6,010	8,388	10,573	15,184	17,340
Jantetelco	3,926	4,704	6,902	9,585	11,475	13,745	15,646
Jiutepec	4,096	8,448	19,567	69,687	101,275	170,589	196,953
Jojutla	14,493	22,081	32,213	44,902	47,021	53,351	55,115
Jonacatepec	4,131	5,876	7,379	9,394	11,255	13,623	14,604
Mazatepec	2,714	3,077	4,797	6,108	7,142	8,821	9,456
Miacatlán	8,143	10,898	11,740	18,874	19,069	23,984	24,990
Ocuituco	5,308	6,588	8,657	10,634	13,079	15,090	16,858
Puente de Ixtla	12,611	16,682	24,189	34,810	43,930	54,149	61,585
Temixco	5,081	8,817	19,053	45,147	67,736	92,850	108,126
Tepalcingo	7,549	8,185	13,211	18,786	20,553	24,133	25,346
Tepoztlán	7,264	8,265	12,855	19,122	27,646	32,921	41,629
Tetecala	2,805	3,948	4,514	5,606	6,057	6,917	7,441
Tetela del Volcán	5,778	7,319	8,625	10,638	13,805	16,428	19,138
Tlalnepantla	1,721	1,948	2,627	3,441	4,376	5,626	6,636
Tlaltizapán	9,351	13,772	19,695	29,302	37,497	45,272	48,881
Tlaquiltenango	7,751	11,867	17,135	24,136	27,322	30,017	31,534
Tlayacapan	3,037	3,728	5,235	7,950	9,868	13,851	16,543
Totolapan	2,345	2,642	4,059	5,498	6,351	8,742	10,789
Xochitepec	5,632	8,368	11,425	16,413	27,828	45,643	63,382
Yautepec	13,274	17,214	26,918	44,026	60,258	84,405	97,827
Yecapixtla	6,806	8,052	11,360	19,923	27,032	36,582	46,809
Zacatepec	8,831	16,475	23,412	31,354	30,661	33,331	35,063
Zacualpan	6,546	8,632	10,983	6,248	6,924	7,962	9,087
Xicozac***	---	---	---	8,666	10,240	12,065	14,641

Fuente: (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)



**Tabla 26. Ubicación geográfica de los municipios del Estado de Morelos**

	Latitud norte	Latitud oeste	Altura m.s.n.m.	Extensión km <sup>2</sup>
Ayala	18°46'	98°59'	1,220	345.69
Cuautla	18°49'	98°57'	1,330	153.65
Atlatlahucan	18°56'	98°54'	1,640	71.43
Totolapan	18°59'	98°55'	1,900	67.80
Tlayacapan	18°57'	98°59'	1,640	52.13
Tlalnepantla	19°00'	99°00'	2,060	124.09
Yautepec	18°58'	99°04'	1,210	202.00
Jojutla	18°37'	99°11'	860	142.63
Puente de Ixtla	18°36'	99°19'	906	299.17
Tlaquiltlenango	18°37'	99°10'	911	581.79
Tlaltizapán	18°41'	99°07'	940	236.66
Zacatepec	18°40'	99°11'	910	28.53
Yecapixtla	18°53'	98°52'	1,580	170.00
Ocuituco	18°54'	98°47'	2,220	112.00
Tétela del Volcán	18°53'	98°44'	1,920	80.00
Axochiapan	18°30'	98°45'	1,030	147.45
Jantetelco	18°43'	98°46'	1,420	165.84
Jonacatepec	18°41'	98°48'	1,290	97.79
Tepalcingo	18°36'	98°51'	1,160	360.05
Zacualpan	18°47'	98°46'	1,640	105.90
Temoac	18°46'	98°47'	1,580	86.66
Amacuzac	18°35'	99°22'	900	125.04
Coatlán del Río	18°44'	99°26'	1,010	102.57
Mazatepec	18°43'	99°22'	980	45.92
Miacatlán	18°46'	99°22'	1,000	233.64
Tetecala	18°43'	99°24'	980	53.26
Tepoztlán	18°59'	99°06'	1,700	242.65
Huitzilac	19°02'	99°16'	2,550	190.18
Cuernavaca	18°55'	99°14'	1,480	207.80
Temixco	18°51'	99°14'	1,280	87.69
Jiutepec	18°53'	99°11'	1,350	49.24
Emiliano Zapata	18°50'	99°11'	1,250	64.98
Xochitepec	18°47'	99°14'	1,110	89.14

Fuente: (Gobierno del Estado de Morelos, 2010)

