



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**  
**“MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA  
DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA  
DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA SU USO  
COMO FERTILIZANTE”**

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

**PRESENTA**

**ADRIAN HIDALGO CHARPENEL**



**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN  
ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE





## **JURADO ASIGNADO:**

<b>PRESIDENTE:</b>	<b>Profesor: José Antonio Ortiz Ramírez</b>
<b>VOCAL:</b>	<b>Profesor: López Castillo Néstor Noé</b>
<b>SECRETARIO:</b>	<b>Profesor: Durán Moreno Alfonso</b>
<b>1er. SUPLENTE:</b>	<b>Profesor: García Reynoso José Agustín</b>
<b>2º SUPLENTE:</b>	<b>Profesor: García González Sergio Adrián</b>

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

**TORRE DE INGENIERÍA, UNAM**

### **ASESOR DEL TEMA:**

**Dr. Alfonso Durán Moreno**

### **SUSTENTANTE (S):**

**Adrian Hidalgo Charpenel**



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN  
ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE





## ÍNDICE

1. Resumen .....	1
2. Introducción .....	2
2.1. Objetivo general. ....	4
2.2 Objetivos particulares .....	4
3. Marco Teórico.....	5
3.1 Residuos.....	5
3.1.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU).....	7
3.1.3 Situación de los RSU en México .....	10
3.2 Manejo de los RSU. ....	12
3.3 Disposición final de los RSU .....	14
3.4 Legislación de los RSU. ....	18
3.5 Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos. (FORSU).....	21
3.5.1 Caracterización de la FORSU .....	22
3.6 Digestión Anaerobia (DA).....	27
3.6.1 Fundamentos.....	30
3.6.2 Sustrato .....	33
3.6.3 Tecnologías .....	35
3.6.4 Parámetros del proceso .....	38
3.6.5 Control del proceso. ....	39
3.7 Productos de la DA. ....	41
3.7.1 Producción de biogás.....	41
3.7.2 Producción de digestato.....	43
3.8 Digestato .....	44
3.8.1 Aplicaciones .....	45
3.8.2 Composición.....	46
3.8.3 Impurezas.....	49
3.8.4 Efecto de la DA .....	51
3.8.5 Procesamiento.....	52
3.8.6 Comercialización .....	55
3.8.7 Control de calidad .....	58
3.8.8 Disposición final. ....	59





3.8.9 Impacto ambiental .....	61
3.9 Fertilizantes .....	63
4. Metodología .....	68
5. Resultados.....	69
5.1 Propuesta Normativa Especificaciones para manejo del digestato .....	72
5.2 Propuesta Técnica de un Sistema de Procesamiento del Digestato .....	82
5.2.1 Definición del Producto .....	83
5.2.2 Estudio de mercado preliminar.....	85
5.2.3 Selección de alternativas tecnológicas .....	89
5.2.4 Caso de Estudio .....	92
5.2.5 Arreglo general .....	98
5.2.6 Balances de Materia y energía.....	101
5.2.7 Evaluación de costos .....	103
6. Análisis de Resultados. ....	111
7. Conclusiones. ....	113
8. Referencias .....	115
9. Anexos.....	126





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Generación de RSU por región.....	8
Figura 2. Composición de los RSU en México.....	9
Figura 3. Elementos de un sistema integral de manejo de los RSU.....	13
Figura 4. Diagrama de flujo de los residuos sólidos, 2011. ....	17
Figura 5. Subproductos orgánicos en muestras de residuos en el Distrito Federal .....	25
Figura 6. Esquema general de una planta de digestión anaerobia. ....	29
Figura 7. Fases de la DA.....	32
Figura 8. Metodología del Trabajo de Tesis.....	68
Figura 9. Etapas de análisis en la selección de tecnología para procesamiento del digestato.....	89
Figura 10. Procesamiento del digestato para la producción de fertilizante .....	90
Figura 11. Diagrama de bloques del procesamiento del digestato .....	92
Figura 12. Esquema de filtro prensa .....	95
Figura 13. Esquema de centrífuga .....	96
Figura 14. Esquema de evaporador al vacío .....	97
Figura 15. Esquema de Volute.....	98
Figura 16. Arreglo general de la planta de digestión anaerobia. ....	99
Figura 17. Datos generales de la ubicación de la planta de digestión anaerobia .....	100
Figura 18. Flujo de caja obtenidos con diferentes equipos de procesamiento.....	106
Figura 19. VPN a 20 años para diferentes equipos de procesamiento. ....	107
Figura 20. Flujo de caja para los productos con mayor atractivo económico.....	108
Figura 21. VPN a 20 años para los productos con mayor atractivo económico. ....	109
Figura 22. VPN de la obtención de fertilizantes vs la disposición final del digestato. ....	110

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores de Medio Ambiente, Residuos.....	7
Tabla 2. Proyección de la generación per cápita y total de RSU 2004-2020 .....	10
Tabla 3. Normas utilizadas para la caracterización de los Residuos.....	23
Tabla 4. Caracterización de la FORSU .....	24
Tabla 5. Caracterización de la FORSU en sitios de muestreo del D.F.....	27
Tabla 6. Ventajas de la digestión anaerobia húmeda y seca .....	36
Tabla 7. Balance de materia para el tratamiento de 1 tonelada de RSU .....	37





Tabla 8. Composición del Biogás.....	42
Tabla 9. Características de digestato típico .....	43
Tabla 10. Nutrientes presentes en productos Vegetales y Animales .....	46
Tabla 11. Efecto de la Relación C/N en el Suelo .....	47
Tabla 12. Variación del pH de una mezcla de Residuos .....	48
Tabla 13. Tratamientos del Digestato .....	53
Tabla 14. Eficiencia de Separación (%) de MS, N, P, y K .....	54
Tabla 15. Capacidad de Procesamiento del Digestato con diferentes Tecnologías .....	55
Tabla 16. Límites Máximos permisibles de metales pesados en biosólidos.....	59
Tabla 17. Requerimiento de nutrimentos (kg) para producir una tonelada de grano .....	64
Tabla 18. Comparación de Digestato vs Fertilizantes Sólidos para Jardín .....	66
Tabla 19. Consumo de fertilizantes (kilogramos por hectárea de tierras cultivables) .....	67
Tabla 20. Producción de Fertilizantes en México .....	82
Tabla 21. Aprovechamiento de biosólidos NOM-004-SEMARNAT .....	84
Tabla 22. Caracterización de la FORSU en sitios de muestreo del D.F.....	84
Tabla 23. Principales Productores de Fertilizantes Orgánicos en México.....	85
Tabla 24. Histórico de Demanda Nacional Aparente de Fertilizantes en México.....	87
Tabla 25. Balance de Materia del Procesamiento del Digestato generado en la planta piloto .....	93
Tabla 26. Selección de tecnologías para procesamiento de digestato.....	93
Tabla 27. Disminución de nutrientes en el digestato sólido después de su procesamiento .....	94
Tabla 28. Dimensiones de equipos de procesamiento del digestato.....	99
Tabla 29. Flujo de FORSU en planta piloto .....	102
Tabla 30. Balance para la producción de 178 kg de N. ....	102
Tabla 31. Inversión de los equipos de procesamiento del digestato. ....	104
Tabla 32. Producción Anual de fertilizante.....	104
Tabla 33. Costos anuales por procesamiento del digestato. ....	105
Tabla 34. Beneficios obtenidos por la venta de fertilizante.....	105
Tabla 35. Costo-beneficio de equipos con mayor atractivo económico.....	107





## 1. RESUMEN

El objetivo de este trabajo de tesis fue analizar las alternativas para el aprovechamiento del subproducto de la digestión anaerobia conocido como digestato. Para este análisis se tomó en cuenta el uso del digestato que resulta del uso de la tecnología de digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos "FORSU", así como los tratamientos sucesivos para su procesamiento. Se realizó un análisis de las diferentes alternativas de aprovechamiento disponibles y se encontró que su principal uso es como fertilizante. Además, en países europeos se cuenta con especificaciones para la producción de fertilizantes derivados de la digestión anaerobia y que en México no se cuenta con normativa específica para este producto. Por otro lado, se analizaron los aspectos técnicos para la producción de estos fertilizantes y se generaron propuestas con equipos de procesamiento que incluyen el filtro prensa, la centrífuga, el secador al vacío y un equipo conocido como Volute. Se tomó como caso de estudio la producción y el procesamiento del digestato generado por una planta piloto de digestión anaerobia, que utiliza como materia prima la FORSU de la Ciudad de México. Se realizó una comparación, técnica y económica, entre las diferentes propuestas de procesamiento del digestato y se seleccionó la opción más adecuada para este caso de estudio. Se encontró el uso del filtro prensa como la opción económicamente más rentable. Por último, se demostró la posibilidad de obtener productos competentes en el mercado de fertilizantes nacional, así mismo, que la selección de estas tecnologías permite la obtención de estos productos, ya que se dispone de equipos con diferentes capacidades y eficiencias que pueden adecuarse a cualquier planta.





## 2. INTRODUCCIÓN

La introducción de sustancias ajenas a la naturaleza o contaminación, rompe el equilibrio existente en la naturaleza y provoca daños en los ecosistemas, en algunos casos irremediables. La contaminación en el medio ambiente no es fija, ya que una serie de fenómenos físicos, químicos y biológicos provocan la dispersión de contaminantes más allá del lugar donde se generaron (LGEEPA, 2013).

Uno de los mayores problemas de contaminación es la generación de residuos sólidos. Estos residuos afectan los tres medios físicos existentes, agua, suelo y aire, por ello es de suma importancia resolver este problema como sea posible, afortunadamente se ha desarrollado la tecnología (pirólisis, digestión anaerobia, etc.) así como los métodos (físicos, químicos y biológicos) que permiten atender las necesidades de tratamiento adecuadas para estos residuos (SEMARNAT, 2012).

Entre los residuos sólidos existe una clasificación conocida como residuos sólidos urbanos, los cuales se componen principalmente de dos fracciones: una orgánica y otra inorgánica. La fracción inorgánica resulta difícil de incorporar al medio ambiente debido a su origen sintético, por otro lado, los residuos orgánicos, gracias a su degradación biológica, llevada a cabo por diversos microorganismos, permite la incorporación a la naturaleza de estos residuos, no obstante, éstos no dejan de representar un riesgo para el medio ambiente (LGPGIR, 2012). La degradación de la materia orgánica, es un proceso biológico que ocurre naturalmente, sin embargo, la concentración de residuos en las ciudades, industrias y otros centros de actividad humana, favorecen la acumulación de microorganismos, en algunos casos patógenos que ponen en riesgo la salud humana y rompe con el equilibrio del medio ambiente (LGEEPA, 2013).



Por otro lado, la descomposición de la materia orgánica libera gases a la atmósfera, principalmente  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , los cuales son partícipes del calentamiento global. No obstante, entre estos gases, el  $\text{CH}_4$  puede ser aprovechado para la generación de energía. El proceso por medio del cual se pueden recuperar estos gases generados a partir de la degradación de los residuos orgánicos se conoce como digestión anaerobia (INECC, 2007).

La digestión anaerobia (DA) consiste en utilizar una carga orgánica, como materia prima, dentro de un digester biológico en ausencia de oxígeno, para la producción de biogás. Se pueden utilizar diferentes residuos orgánicos como materia prima, ya sea individualmente o en una mezcla. Algunos residuos comúnmente empleados son: residuos orgánicos de la industria de alimentos, residuos purines de procedencia animal, cultivos específicos para el proceso, residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM) también conocidos como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), lodos de drenaje, entre otros (Gerardi, 2003).

Al mismo tiempo que se produce biogás durante la digestión anaerobia, se obtiene un subproducto, compuesto por los remanentes de la materia orgánica degradada, conocido como digestato. El digestato puede ser líquido o sólido según el tipo de proceso de digestión con el que se traten los residuos, este digestato, contiene nutrientes que pueden ser aprovechados para uso como fertilizantes (Tchobanoglous, 1994).

Este trabajo de tesis tiene como finalidad proponer las alternativas de manejo del digestato, adecuadas para el caso de estudio de la generación de digestato de la planta piloto que será construida dentro del marco del programa FORDECYT clave: 174710 “Generación de un sistema piloto de tratamiento de residuos sólidos orgánicos municipales RSOM”. En esta evaluación se propone una mejor forma de administrar los subproductos derivados de la digestión anaerobia.





---

## 2.1. Objetivo general.

---

Evaluar las alternativas de manejo del digestato, derivado de la digestión anaerobia (DA) de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), para su aprovechamiento como fertilizante, tomando en cuenta aspectos técnicos y normativos, ambientales y económicos.

---

## 2.2 Alcances

---

- Conocer el estado del arte del procesamiento del digestato.
- Conocer la normativa aplicable para el digestato derivado de la digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos
- Analizar las alternativas tecnológicas que puedan utilizarse para una planta piloto de digestión anaerobia
- Definir la mejor propuesta para la planta piloto de acuerdo con criterios técnicos, económicos y ambientales.



### 3. MARCO TEÓRICO.

En la naturaleza no existe tal cosa como un residuo, por ejemplo, las hojas que caen de un árbol funcionan como su propio abono y protección, en la naturaleza la mayoría de los residuos, son utilizados nuevamente. La idea de que un residuo es equivalente a un sobrante sin ningún valor, no siempre será cierta, un residuo tiene valor y este puede ser de igual, menor o mayor orden que el del sistema del que formó parte. A continuación se exponen los puntos clave para el entendimiento del uso de los residuos como productos nuevos (INEGI, 2011).

#### 3.1 Residuos.

Los problemas, en cuanto a residuos, se han rastreado hasta las primeras congregaciones humanas. En algunos casos, la mala disposición de los residuos atrajo enfermedades, por ejemplo, la fiebre bubónica en los pueblos medievales, ya que, en aquella época se acostumbraba tirar los restos de comida en las calles, lo cual, favoreció a la proliferación de plagas responsables de la infección en humanos (Tchobanoglous, 1998).

La generación de residuos es un proceso natural, sin embargo, el ritmo de vida moderno ha convertido a este proceso en algo más complejo introduciendo cada vez mayor cantidad y variedad de residuos. Al ser un problema cambiante, la correcta disposición de residuos debe adaptarse a la par de la generación de los nuevos residuos.

En general, las actividades humanas tienen como subproducto cierta cantidad de residuos, desde la extracción de materias primas hasta el consumo de productos, se desecha cierta cantidad de materiales. En teoría, estos materiales desechados deben ser llevados a centros de tratamiento donde puedan ser reciclados o reutilizados o en su defecto llevados a disposición final. Desafortunadamente, la realidad de los residuos es otra, los sitios de disposición



final han alcanzado sus topes y los centros de tratamiento son insuficientes, estos son los principales problemas del manejo de los residuos (Viveros, 2013).

En México, la regulación de los residuos es relativamente nueva, aproximadamente hace 20 años; se han decretado una serie de leyes donde se definen las características de los residuos, es decir, una clasificación con la cual se decide si son aptos para ser reciclados o si es necesario un proceso especial para tratarlos y que no representen un riesgo para la salud humana o para el medio ambiente. Actualmente, la gestión de los residuos es regulada por los gobiernos locales. Gracias a estas regulaciones, se ha podido establecer una clasificación de los residuos, con base en los usos posteriores que cada tipo de residuos puede tener, de esta división, se derivan las técnicas de recolección, tratamiento y disposición final necesarias para el manejo integral de los residuos (LGPGIR, 2012).

Por último se presenta la definición de residuos de acuerdo con el diccionario de la real academia española (RAE, 2013).

Residuo. (Del lat. residuum).

1. Parte o porción que queda de un todo.
2. Aquello que resulta de la descomposición o destrucción de algo.
3. Material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación.
4. Matemáticas. Resto de la sustracción y de la división.



### 3.1.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

El crecimiento urbano, ha propiciado un incremento en la generación de residuos provenientes de actividades que se desarrollan en casas-habitación, sitios de servicios privados y públicos, construcciones, demoliciones, establecimientos comerciales y de servicios (EPA, 2012). Estos son considerados como Residuos Sólidos Municipales (RSM) o Residuos Sólidos Urbanos (RSU), estos dos términos son equivalentes pues ambos hacen referencia a los residuos generados a raíz de la actividad humana, para fines prácticos, en esta tesis se referirá a este tipo de residuos como RSU. En la Tabla 1, se presentan algunos indicadores del medio ambiente sobre la generación de estos residuos dados por el INEGI sobre estadísticas nacionales (INEGI, 2011).

Tabla 1. Indicadores del Medio Ambiente, Residuos (INEGI, 2011)

Generación de Residuos		
Característica	Unidad de Medición	Valor
Reciclaje de Residuos Sólidos Urbanos	Porcentaje de material recuperado en sitios de disposición final.	13.6
Generación de Residuos Sólidos Urbanos	Kilogramo por habitante por día.	0.99
Generación de Residuos Sólidos Urbanos (Nacional)	Miles de toneladas por año	47811.3

La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), define a los RSU como los residuos del hogar (envases vacíos de leche, restos de café), rechazos de la producción (herrumbre, restos de muros, contenedores vacíos), lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, partículas dispersas en el aire así como otros materiales descartados incluyendo sólidos, líquidos, semisólidos o material gaseoso resultante de operaciones industriales,



comerciales, mineras, agrícolas o provenientes de comunidades o asentamientos humanos (EPA, 2012).

Se ha encontrado que existe una relación entre la composición de los RSU generados y las condiciones económicas de los países; aquéllos países con menores ingresos económicos generan menor cantidad de residuos y en su composición predomina la materia orgánica, este mismo comportamiento sucede en las diferentes regiones nacionales presentando mayor carga orgánica en los residuos de las localidades de menor índice poblacional. De igual forma, en la Figura 1, se puede apreciar que en las ciudades más urbanizadas se genera una mayor cantidad de residuos (SEMARNAT, 2012).

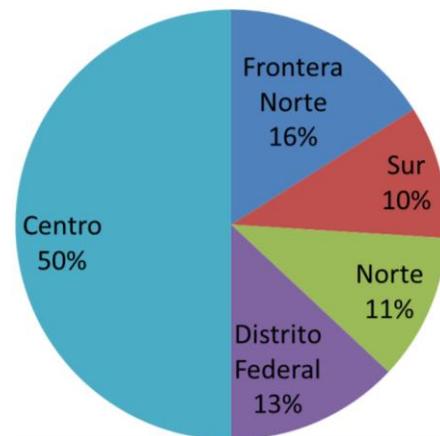
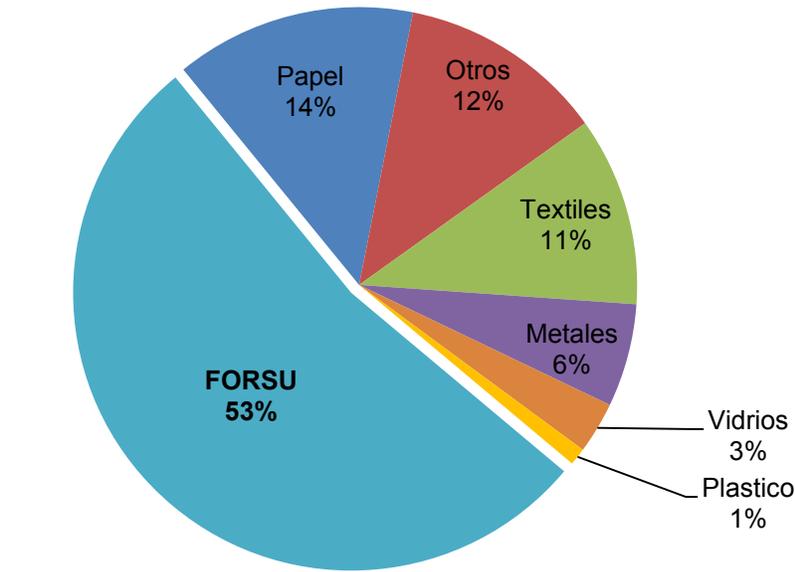


Figura 1. Generación de RSU por región (SEMARNAT, 2012).

La composición, así como la generación de los RSU, dependen de varios factores. En México, el proceso de urbanización acelerado, la modificación de los patrones de consumo, la extensión geográfica, la conformación de diversas regiones ecológicas dentro del país y la dispersión de la población mexicana determinan que la composición y la cantidad de los RSU varíen de acuerdo con la estación, la región, el modo de vida y el ingreso económico (Buenrostro, 2006). La Figura 2 muestra la composición de los RSU por subproductos, de estas



categorías el subproducto con mayor porcentaje es la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) (SEMARNAT, 2012).



Fuente: Dirección general de equipamiento e infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, SEDESOL, México, 2012

Figura 2. Composición de los RSU en México (SEMARNAT, 2012).

Como una primera aproximación, con los datos de la Figura 2 se puede observar que alrededor de la mitad de los residuos generados son de origen orgánico y la otra mitad pertenece a un grupo inorgánico de residuos. De acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), en las últimas cuatro décadas, la generación de RSU se incrementó nueve veces y sus características se transformaron de materiales mayoritariamente orgánicos, que se integraban fácilmente a los ciclos de la naturaleza, a elementos cuya descomposición es lenta, por lo que permanecen por más tiempo en el medio ambiente. En la Tabla 2 se observa el aumento de la generación de residuos nacional, lo cual aumenta junto con el número de habitantes (SEMARNAT, 2006).



Tabla 2. Proyección de la generación per cápita y total de RSU 2004-2020

<b>Año</b>	<b>Número de habitantes (miles)</b>	<b>Generación kg/hab/día</b>	<b>Toneladas Diarias</b>	<b>Toneladas anuales (miles)</b>
2004	105350	0.90	94800	34600
2005	106452	0.91	96900	35370
2010	111614	0.96	107100	39100
2015	116345	1.01	117500	42890
2020	120369	1.06	128000	46700

Fuentes:

1) Proyecciones de población 2000-2050. CONAPO, México 2003

2) Sedesol 2004

La estadística sobre residuos aún no es muy precisa debido al corto tiempo que se lleva de regulado este tema, sin embargo, diversas instituciones se encargan actualmente de analizar la situación de los residuos, no obstante, es muy importante reforzar los estudios en una escala local, ya que existen grandes diferencias entre los datos de fuentes oficiales y los reportes realizados por fuentes no gubernamentales (Buenrostro, 2006).

### 3.1.3 Situación de los RSU en México.

Las primeras cifras confiables en materia de RSU fueron generadas en la década de los ochenta por entidades como la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente de la entonces Secretaría de Salubridad y Asistencia, la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, y el Departamento del Distrito Federal, entre otras.

Los esfuerzos serios y metódicos con la utilización de herramientas profesionales para resolver la situación problemática alrededor de los residuos, iniciaron a finales de los sesentas y principios de los setentas, alcanzando niveles de cobertura del servicio de recolección formal en un 80% y del 50% en una disposición en rellenos sanitarios o sitios controlados (SEMARNAT, 2006).



El mal manejo de los residuos representa un serio riesgo a la salud pública, ya que la población se ve expuesta a los patógenos presentes en estos residuos, durante las jornadas de recolección, además en los municipios rurales, el control de los residuos es nulo, además, éstos se mezclan durante el proceso de colecta, pues no existe la infraestructura necesaria, por lo cual, los residuos terminan depositándose indistintamente en el tiradero (Buenrostro, 2006).

A partir del año 2003, en el Distrito Federal entró en marcha una variante al método convencional de recolección de los RSU, la cual consiste en los sistemas de recolección selectiva, esto se debe a los cambios en los ordenamientos legales y a la voluntad política o la presión de la sociedad, por alcanzar esquemas sustentables. No obstante, de las 32 entidades federativas, solo en 13 de ellas, se realizan actividades para la recolección selectiva de RSU y las restantes siguen empleando la recolección mixta. La separación en fuente da paso a nuevos sistemas de tratamiento que mitigan los riesgos a la salud humana y favorecen la valorización de productos que de otra forma se hubieran desechado. (SEMARNAT, 2012) .

Por último, en México, la mayor parte de los residuos son llevados a disposición final, lo que representa un problema. Así, los datos más recientes dan cuenta de la producción de 95 mil toneladas diarias de RSU, que representaron un acumulado anual de 40 millones de toneladas en todo el país (SEMARNAT, 2012). Del total de residuos generados, 13.8 por ciento eran productos de papel y cartón; 10.9 por ciento plásticos y 3.4 por ciento metales, los cuales, podrían ser reciclados por medio de sistemas de tratamiento (Marín, 2012).



---

### 3.2 Manejo de los RSU.

---

El gobierno federal en conjunto con los gobiernos estatales, han hecho un esfuerzo por remediar la situación actual sobre el manejo de los residuos para así hacer frente al futuro de la sociedad. Sin embargo, dado que cada orden de gobierno cambia después de periodos cortos (seis y tres años), el compromiso continuo, con los proyectos para el manejo de los residuos, es difícil de conseguir y muchos proyectos se quedan truncados o jamás son realizados (Marín, 2012).

El manejo de los RSU es llevado a cabo por el Sistema de Aseo Urbano (SAU), el cual, incluye la diaria recolección de los RSU, la transportación a las estaciones de transferencia para disminución de volumen y tratamiento de los residuos en plantas de selección, para después, terminar con el envío y depósito en centros de disposición final. Con el propósito de mejorar la eficiencia en la prestación de estos servicios, los gobiernos locales, desarrollan programas intensivos para el mantenimiento y la ampliación de la infraestructura y del equipamiento utilizado en el manejo y control de estos residuos (INECC, 2007) .

La finalidad de este sistema es disminuir el volumen de los residuos que serán llevados a disposición final, así como recircular los residuos que aún tienen una vida útil por medio de procesos de separación dentro de las estaciones de transferencia. Las estaciones de transferencia son instalaciones en donde se hace el traslado de los RSU de un vehículo recolector (camiones compactadores con capacidad de 10 m<sup>3</sup> a 15 m<sup>3</sup>, los cuales recolectan de 4 a 8 ton/viaje) a otro vehículo con mucha mayor capacidad de carga (trailers de 20 a 50 ton/viaje). Este segundo vehículo, es el que transporta los RSU hasta su destino final (Viveros, 2013) . En la Figura 3 se esquematiza un sistema integral del manejo de los RSU, en él se muestra la ruta que siguen los RSU desde su generación hasta su disposición final, su recirculación en la industria o su uso como productos para la agricultura (GIZ, 2012).

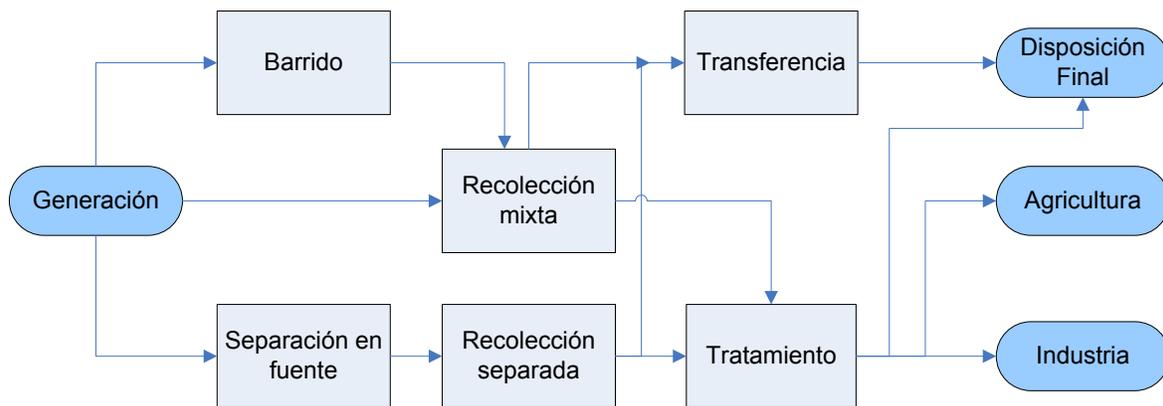


Figura 3. Elementos de un sistema integral de manejo de los RSU (GIZ, 2012).

Después de su generación, los RSU son transportados a estaciones de transferencia donde pueden ser sometidos a un tratamiento, después del tratamiento se pueden recuperar materiales útiles para la industria así como obtener productos útiles para la agricultura, un sistema de tratamiento también sirve para procesar residuos peligrosos que no pueden ser llevados directamente a disposición final.

Es importante destacar que la separación en fuente de los residuos (orgánicos e inorgánicos) facilita en gran medida la selección de materiales para reciclaje y permite el uso de una y cada vez más amplia gama de procesos de tratamiento biológico de los residuos sólidos orgánicos municipales. Los métodos de tratamiento de los RSU más comunes son los de compactación, trituración, selección de materiales y, por último, la incineración (Durán, 2013).

El tratamiento de los residuos tiene generalmente dos objetivos. El más común es disminuir el volumen de los residuos y así utilizar con más eficiencia la capacidad de transporte de los vehículos de transferencia. El otro objetivo es aprovechar la operación de traslado para hacer la selección de los RSU y así aprovechar los materiales reciclables y compostables. Se puede decir que la



estación de transferencia ayuda a reducir los costos y al mismo tiempo ahorra energía y permite la recuperación de los recursos (SEMARNAT, 2012).

Además de los esquemas de tratamiento mencionados, han existido esfuerzos para introducir otras opciones y tecnologías, algunas tradicionales y otras novedosas, como son el tratamiento térmico (incineración, pirólisis, gasificación, plasma); tratamiento mecánico (trituration, compactación, confinamiento); tratamiento biológico (Digestión Aerobia y Anaerobia, compostaje); tratamientos químicos (hidrólisis, ósmosis inversa) o la combinación de todos estos tipos de tratamientos (co-procesamiento), considerando la composición de los residuos a tratar. Sin embargo, el impacto en el mercado mexicano puede considerarse como irrelevante, debido al escaso éxito en la implantación de estas opciones en los municipios del país (Tchobanoglous, 1998).

Finalmente, tal vez el aspecto más acotado del SAU es la disposición final, principalmente por las precisiones señaladas en las normas oficiales mexicanas, las cuales tienen entre otros objetivos, impulsar la utilización de predios con vocación natural y establecer las condiciones que deben reunir los sitios de disposición final, así como su diseño, operación y clausura (NOM-83-SEMARNAT, 2003).

---

### 3.3 Disposición final de los RSU

---

La disposición final es la última etapa del manejo de los RSU y está íntimamente relacionada con la preservación del medio ambiente, así como con la salud de la población, por lo que su control y tratamiento debe ser mediante un sistema adecuado que minimice los impactos negativos hacia los ecosistemas (INEGI, 2011).

Una mala práctica de disposición final de los residuos sólidos urbanos puede causar efectos nocivos al medio ambiente y la salud, como los que se describen a continuación (SEMARNAT, 2012):



1. Riesgo debido a posibles infecciones y epidemias transmitidas por el aire, agua y fuentes de fauna nociva.
2. Flujo de contaminantes hacia el manto acuífero, el cual, puede incidir en la contaminación del suelo y del manto freático, lo que se traduce en un riesgo de afectación al ecosistema, recursos naturales y, finalmente, por vía indirecta a la salud humana.
3. Posibilidad de incendios.
4. El polvo y los residuos ligeros levantados por el viento, así como los materiales arrastrados por posibles escorrentías superficiales, pueden llegar a los terrenos de cultivo y caminos cercanos, estorbando la actividad agrícola y el tránsito vehicular, aunado al efecto antihigiénico e impacto estético desagradable que ello produce.
5. La descomposición de los RSU, que tiene un alto contenido de materia orgánica (más de 50% en México), conlleva a la generación de líquidos y gases indeseables, lo cual significa un riesgo, directo o indirecto, a la salud pública dependiendo del contacto de la población con dichas emisiones.
6. Proliferación de roedores, insectos e inclusive aves de carroña, asociados a la propagación de enfermedades y epidemias.
7. Y por último, se da un impacto estético negativo en el paisaje alrededor de los sitios de disposición final sin control adecuado, lo que afecta no solo a la gente que vive sola, sino también la plusvalía socio-económica de la región.

Lamentablemente en México, la totalidad de la disposición final de los RSU sigue depositándose en el suelo, en diferentes modalidades: en tiraderos a cielo abierto, en rellenos de tierra no controlados y en rellenos sanitarios, así como en cuerpos de agua como son ríos y mares. No obstante, que se ha incrementado el número de rellenos sanitarios y sitios de disposición final, el hecho es que en



México, estos sitios no funcionan de acuerdo con la normativa, ya que no existe un control de los residuos que ingresan y su cobertura es deficiente, debido básicamente a la presencia de grupos de pepenadores (Buenrostro, 2006).

Adicionalmente, aun llevando los RSU a disposición final, existe el riesgo de continuar contaminando. La contaminación puede presentarse en forma sólida (polvo y materiales ligeros arrastrados por el viento), líquida (lixiviado) y gaseosa (biogás), o incluso en el humo de incendios provocados y auto-incendios eventuales en los tiraderos (Köfalusi, 2006).

Aun teniendo control en el manejo de los residuos no existe una solución completa a la gestión de éstos, tal es el caso del relleno sanitario Bordo Poniente, éste recibía alrededor de ocho mil toneladas diarias de residuos que se generaban en la Ciudad de México; en diciembre de 2011 tuvo que ser cerrado pues alcanzó el límite de su capacidad, ya que cada día aumentaban las posibilidades de que la montaña de residuos derrumbara las paredes del canal de desagüe vecino y vertiera sus lixiviados en descomposición sobre los asentamientos humanos que lo rodean o que el suelo cediera por el peso de los residuos acumulados y que los lixiviados se filtraran y contaminaran las aguas subterráneas, misma agua que se distribuye al 70% de los habitantes del Distrito Federal y, con la cual, se riegan campos de cultivo o que los gases emanados por la descomposición provocaran un incendio de magnitudes colosales (Robles, 2010)

A continuación, en la Figura 4, se presenta la ruta que seguían los RSU en el D.F., para llegar a su disposición final en el relleno sanitario conocido como Bordo Poniente.

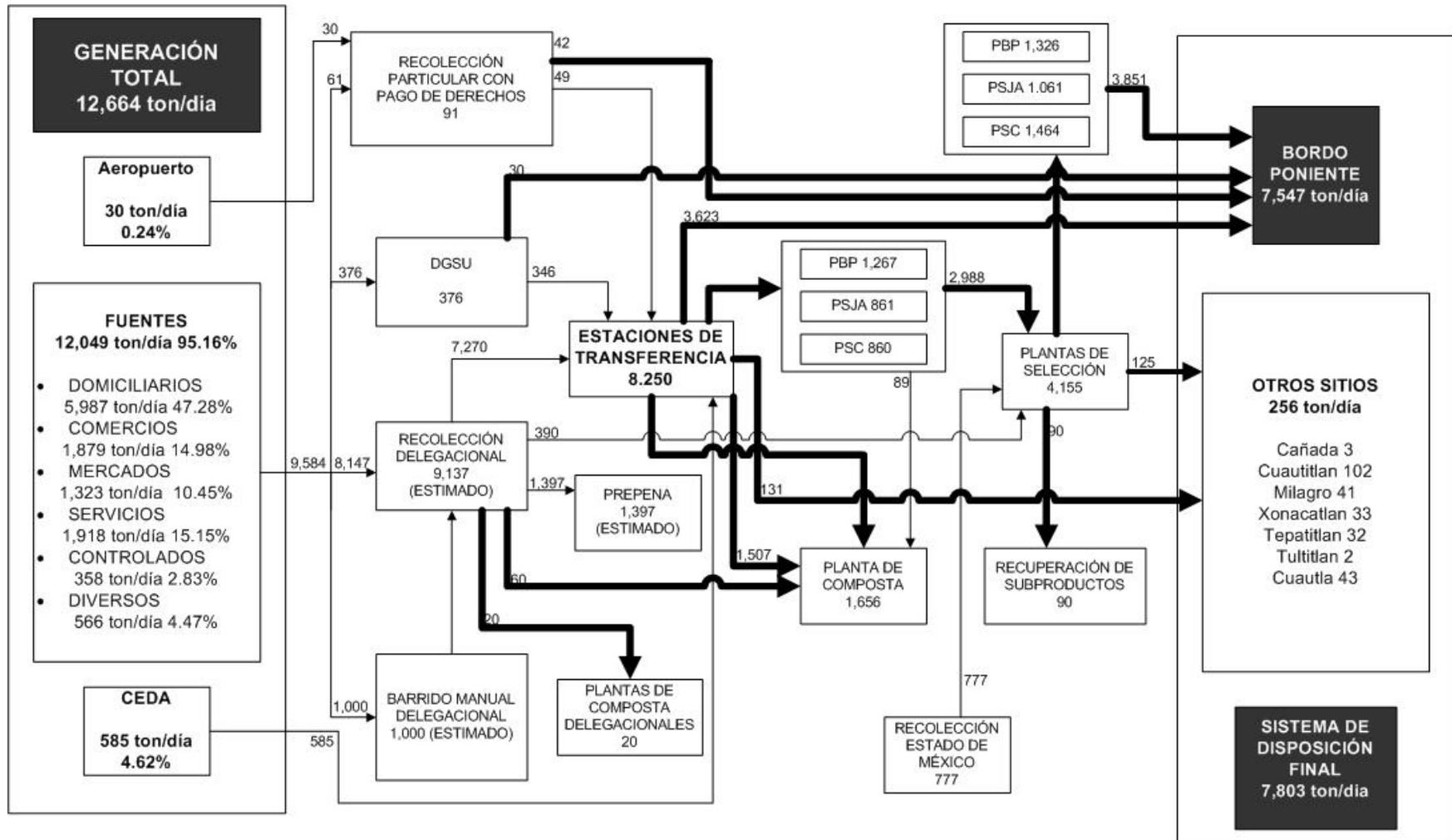


Figura 4. Diagrama de flujo de los residuos sólidos, 2011. (Ton/día) (SEMARNAT, 2012)



Como se aprecia en la Figura 4, la mayoría de los RSU generados en la Ciudad de México terminaban depositados en el relleno de Bordo Poniente. Este relleno cerró en el año 2011, con lo que se dejaron de recibir las casi ocho mil toneladas de RSU diarios que llegaban al sitio, para resolver este problema, el GDF, decidió llevar a nuevos rellenos sanitarios en el estado de México y, el estado de Morelos, los RSU generados en la ciudad que se llevan a “El Milagro” y “La Cañada”, en Ixtapaluca, “Bicentenario” en Cuautitlán Izcalli, “Xonacatlán”, en el municipio del mismo nombre y recientemente, el tiradero ubicado en el municipio de Tepetzotlán (GDF, 2012).

Después del cierre de este relleno sanitario, según la información proporcionada vía transparencia, el GDF erogó, desde el 1 de enero de 2012 al 15 de febrero de 2013, \$372,390,702.22 pesos en depositar los RSU en los cinco rellenos anteriormente mencionados. Entre los planes que ha señalado el gobierno actual está por habilitar un relleno sanitario seco, pero mientras esto ocurre, se seguirá depositando la mayor parte de los RSU de la capital en los rellenos sanitarios del Estado de México (Robles, 2013).

---

### 3.4 Legislación de los RSU

---

Como parte de las acciones generadas para mejorar la gestión y el manejo de los residuos en México, desde hace casi cinco lustros empezaron a gestarse grupos ecologistas en pro de la conservación y desarrollo sostenido del medio ambiente. Dependencias como la SEDESOL iniciaron programas y establecieron normas, reglamentos y leyes para el manejo de los residuos sólidos en el país (INECC, 2007).

No obstante, actualmente, no se cuenta con una política nacional que comprenda, de manera integral, a todas las categorías de residuos. Una política



orientada a cambiar patrones culturales para que la sociedad, como un todo, se oriente a esquemas de reducir, reusar y reciclar, considerando con ello los principios del desarrollo sustentable, así como los compromisos internacionales que en la materia han sido suscritos por México. Resulta imposible, o al menos difícil, intentar elaborar políticas e instrumentos de estrategia de manejo si se desconocen las dimensiones reales del problema, es decir, cuando se carece de indicadores o bien, los que existen, no se encuentran suficientemente sustentados.

El marco jurídico actual, en el ámbito de los residuos incluye un importante número de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Normas Mexicanas (NMX), emitidas por diversas dependencias del Gobierno Federal (principalmente la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Secretaría de Salud (SSA) y Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)). Por otro lado, el cumplimiento de estas leyes se sustenta en Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM), Leyes Federales, Códigos Civil y Penal Federales, Leyes Orgánicas de la Administración Pública Municipal de cada estado de la República Mexicana, Leyes Ambientales de cada estado de la República y cuatro Reglamentos de orden Federal (SEMARNAT, 2012).

Para extender la legislación sobre los residuos, la CPEUM se apoya de leyes como la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR). Estas leyes alientan a la participación de la sociedad, no solo en materia de residuos, sino también en la preservación del medio ambiente de forma colectiva a lo largo y ancho del país. Ambas forman parte de un conjunto de normas jurídicas, disposiciones y declaraciones del derecho público y tienen por objeto regular el impacto de la acción del ser humano sobre el entorno ecológico, con el objeto de asegurar la satisfacción de las necesidades del colectivo social en la perspectiva intergeneracional tomando como punto de partida la calidad de vida a esto se le conoce como Derecho Ambiental (Hernández, 2006).



Durante la última década, el tema de los residuos se ha tomado con mayor seriedad y para el año del 2003 se decretó la LGPGIR. En esta ley existe una mejor definición de qué son los residuos y como deben ser gestionados, así como, las dependencias del gobierno, responsables de los residuos generados en toda la república y de la importación de residuos foráneos, se describen planes de manejo para la prevención y gestión integral de los residuos y, por último, se habla de las sanciones a las que se harán acreedores aquellos que violen las normas estipuladas en esta ley. Esta ley abarca el tema de los residuos completamente y se aplica en toda la extensión del territorio mexicano, sin embargo, la situación de los residuos varía regionalmente y se han necesitado generar leyes que se aplican localmente en cada estado de la república (LGPGIR, 2012) (LGEEPA, 2013).

Para el Distrito Federal, aplica la “Ley de Residuos Sólidos Del Distrito Federal”, la cual fue publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el día 7 de octubre de 2008. Su objetivo más importante es disminuir la generación de los RSU a través de medidas de separación de residuos desde la fuente, es decir, desde las casas, escuelas, oficinas, comercios y empresas (GDF, 2003).

La separación en fuente da paso a nuevos sistemas de tratamiento que mitigan los riesgos a la salud humana y favorecen la valorización de productos que, de otra forma, se hubieran desechado, como por ejemplo, la composta. La composta es un abono orgánico que resulta de la descomposición biológica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (Guardado, 2007).



---

### 3.5 Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos. (FORSU)

---

Anteriormente se mencionó que los residuos orgánicos constituyen aproximadamente la mitad del total de los RSU (ver Figura 2), ésta fracción de residuos, se conoce homológamente como Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU). La FORSU, que se define como biodegradable, está compuesta por residuos como son: poda, restos de comida del hogar y restaurantes, entre otros residuos similares como restos de plantas de procesamiento de alimentos (EPA, 2010).

Para el aprovechamiento de la FORSU mediante un tratamiento, es necesario tenerla separada de los RSU. A pesar de que existen métodos de procesamiento para la separación mecánica de la FORSU, el mejor método para llevar a cabo esta tarea es la separación de los residuos desde el hogar (EC, 2012). Debido a los cambios en los ordenamientos legales y a la voluntad política o la presión de la sociedad, por alcanzar esquemas sustentables, la recolección selectiva se ha implementado en algunos estados del país. Se considera que este sistema será cada vez más generalizado en los municipios y localidades, pues tiene varias ventajas frente al método tradicional de recolección (Endar, 2009).

El seleccionar los residuos orgánicos dentro de una estrategia integral tiene varios beneficios, por ejemplo, convertirlos en un producto útil (composta) o recuperar energía (eléctrica y calorífica). Así mismo, separar la fracción húmeda de los residuos sólidos incrementa el valor de los otros residuos y reduce la cantidad de gas o lixiviado generado en los rellenos sanitarios (ESCAP, 2007).

La FORSU (entre otros materiales biodegradables) representa una amenaza ambiental que es la producción de gases de efecto invernadero, principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ), resultante de la descomposición de dichos residuos en tiraderos al aire libre. El  $\text{CH}_4$  es considerado como un gas de efecto invernadero proveniente de fuentes naturales (por ejemplo: humedales) y humanas (por ejemplo: agricultura, actividades que generan gas natural, rellenos



sanitarios). Una vez emitido, el  $\text{CH}_4$  permanece en la atmósfera por 12 años antes de su remoción y conversión a dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), principalmente por medio de la reacción química con un ion hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ).

El efecto globalmente nocivo del  $\text{CH}_4$  es, que cambia la radiación tanto entrante como saliente del sistema climático, alterando (ya sea enfriando o calentando) la temperatura ambiental. El metano atmosférico ha aumentado su concentración alrededor de un 150% (1.060 ppb) desde el año de 1750 (IPCC, 2007). Por lo anterior, se dice que una molécula de  $\text{CH}_4$  es 25 veces más dañina que una de  $\text{CO}_2$  (EPA, 2010). Debido a la emisión de estos gases al aire libre, los rellenos sanitarios o tiraderos al aire libre son la peor opción para la gestión de la FORSU, desafortunadamente, este método de disposición es el más comúnmente empleado. Sin embargo, existen otras opciones de tratamiento favorables para la gestión y aprovechamiento de este tipo de residuos antes de que lleguen a un relleno sanitario.

Una vez que se dispone de la FORSU, ésta puede someterse a un tratamiento biológico, el cual puede ser de utilidad para la obtención de beneficios tanto ambientales como sociales. El uso de este tratamiento solo será posible si las características de la FORSU son adecuadas, a continuación se analizan estas características.

### 3.5.1 Caracterización de la FORSU

---

La obtención de estadísticas de generación y composición de la FORSU será posible una vez que se implemente la recolección selectiva a nivel nacional. Mientras tanto, deben realizarse estudios minuciosos para caracterizar la FORSU. Afortunadamente existen normas que hacen referencia a la toma de muestras tanto en sitio (NMX) como muestras, para la posterior caracterización (NOM) de los residuos en el laboratorio, algunas de estas normas se presentan en la Tabla 3.



Tabla 3. Normas utilizadas para la caracterización de los Residuos  
(Durán,2013)

<b>Norma</b>	<b>Aspecto que cubren</b>
NOM-AA	
015-1984	Método de cuarteo
019-1985	Determinación de peso volumétrico in situ
022-1985	Selección y cuantificación de subproductos
052-1985	Preparación de muestras en el laboratorio para análisis
NMX-AA	
16-1984	Determinación de humedad
18-1984	Determinación de cenizas
24-1984	Determinación de nitrógeno total
25-1984	Determinación de pH, método potenciométrico
92-1984	Determinación de azufre
15-1985	Cuarteo
19-1985	Peso volumétrico in situ
21-1985	Determinación de materia orgánica
22-1985	Selección y cuantificación de subproductos
33-1985	Determinación de poder calorífico
52-1985	Preparación de muestras en laboratorio para su análisis
61-1985	Generación per cápita de residuos sólidos municipales
67-1985	Determinación de la relación carbono/nitrógeno
68-1986	Determinación de hidrógeno
90-1086	Determinación de oxígeno



Algunas de las determinaciones realizadas en el laboratorio derivan del análisis común para aguas residuales y para el caso de los residuos, es necesario realizar diluciones de las muestras que se desean caracterizar (Durán , 2013).

El uso de estas normas será de suma importancia para el desarrollo de proyectos de manejo de los RSU y el posible aprovechamiento de la FORSU. Los parámetros medidos, dependerán del tipo de proyecto o enfoque del estudio que se quiera realizar. En la Tabla 4, se presentan valores comunes de la caracterización de la FORSU.

Tabla 4. Caracterización de la FORSU.

Parámetro	Valor
Humedad (%)	75.52 ± 5.5
pH	5.35 ± 0.53
DQO (g/g)	0.645 ± 0.27
Proteínas (g/g)	0.069 ± 0.062
Carbohidratos (g/g)	0.036 ± 0.03
Grasas y aceites (g/g)	0.107 ± 0.12

Fuente: Simposio Internacional de digestión anaerobia de RSOM, Monroy, 2013

Durante la ejecución del proyecto FORDECYT clave: 174710, “Generación de un sistema piloto de tratamiento de residuos sólidos orgánicos municipales RSOM”, se realizó el muestreo y la caracterización de la FORSU procedente de tres estados del país (D.F., Estado de México y Morelos). En las secciones siguientes, se presentan algunos de los resultados obtenidos de esta caracterización y los parámetros de la FORSU (Durán, 2013).



### Caracterización de RSU del D.F.

Como una actividad del proyecto FORDECyT clave: 174710 “Generación de un sistema piloto de tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales RSOM”, se llevó a cabo un muestreo en el Distrito Federal en las estaciones de transferencia de las delegaciones Benito Juárez (BJ) y Gustavo A. Madero (GAM) así como en el relleno sanitario Bordo Poniente (BP) y de igual forma en Estado de México y Morelos. Posteriormente se obtuvo la caracterización de las muestras en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Química. Para los objetivos de esta tesis se tomaron en cuenta exclusivamente los resultados de la FORSU del Distrito Federal.

Para estudiar la composición de los residuos se seleccionaron y cuantificaron los subproductos, cabe destacar que resulta muy complicado hacer una separación exhaustiva de los RSU una vez que han sido mezclados durante su transferencia a los diferentes sitios de disposición. Los resultados, encontrados durante el muestreo se presentan en la Figura 5.

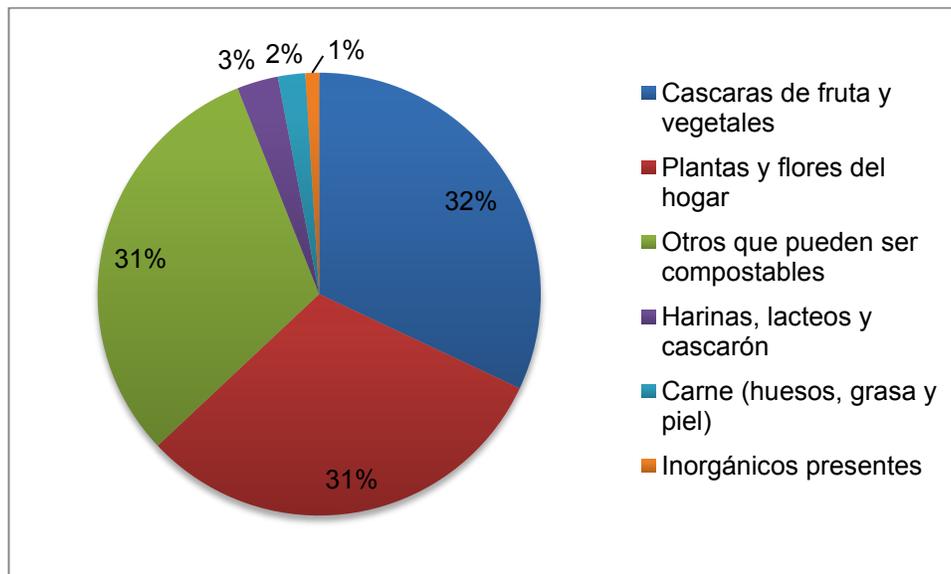


Figura 5. Resultados de subproductos orgánicos presentes en muestras de residuos en el Distrito Federal (Durán , 2013).



La composición de la FORSU se constituye principalmente: (94%) de cáscaras de fruta y vegetales, plantas y flores de hogar, residuos de alimento, entre otros materiales; el resto (5%) son materiales difíciles de degradar y existe una pequeña porción de inorgánicos presentes y (1%) compuesto por papeles, bolsas de plástico, empaques y metales.

Un factor importante a considerar en la selección de alternativas de manejo de los RSU es su peso volumétrico. Este puede variar de 170 a 330 kg/m<sup>3</sup> sin compactar y depende en gran medida del contenido de materia orgánica y su grado de humedad. El peso volumétrico promedio de los residuos orgánicos en el D.F. es de 647.51 kg/m<sup>3</sup>, el cual es mayor al indicado para los residuos de comida húmedos típicos comerciales (540 kg/m<sup>3</sup>) y más del doble del valor reportado para residuos de comida mezclados tipo domésticos (291 kg/m<sup>3</sup>) (Tchobanoglous, 1998). Esto indica que el contenido de humedad en estos residuos es superior a los valores típicos, lo cual aumenta su densidad y que debe ser un valor importante a considerar para el manejo de este tipo de residuos (Durán, 2013).

Las muestras levantadas durante el muestreo se enviaron al laboratorio para realizar la caracterización de los residuos recogidos en los distintos sitios de muestreo. Los resultados de esta caracterización se presentan a continuación.

#### Resultados de caracterización de muestras de la FORSU

El estudio de caracterización de una muestra de residuos incluye la determinación de su composición física (caracterización física), y la caracterización fisicoquímica, en la que se determina el porcentaje de los diferentes componentes estructurales que la definen (Durán, 2013). Los resultados de esta caracterización se presentan en la Tabla 5.



Tabla 5. Caracterización de la FORSU en sitios de muestreo del D.F.

(Durán , 2013).

Sitio	Humedad (%)	PT (g/kg)	N-K (g/kg)	Cenizas (g/kg)
GAM día 1	82.9	0.7	8	15.7
GAM día 2	76.2	1.5	5.2	36.5
GAM día 3	77.8	1.2	6.1	27.8
BJ día 1	75.6	1.8	6.4	47.1
BJ día 2	78.3	1.3	5.8	37.7
BP día 1	78.6	0.9	10.5	31.1
BP día 2	73.7	1.2	5.4	74.7

Sitio	COD (g/kg)	DBO (g/kg)	DQO (g/kg)	Fibras (g/kg)
GAM día 1	16.5	129.4	286.9	27.4
GAM día 2	14.8	104.2	245.3	49.9
GAM día 3	15.5	110.7	214.4	43.3
BJ día 1	15	106.6	247.1	51.4
BJ día 2	16.5	92.8	228.8	44
BP día 1	13	62.5	206.6	44.8
BP día 2	15	101.6	206	58.5

En la Tabla 5, se presentan las determinaciones realizadas para las muestras tomadas en los sitios de muestreo del Distrito Federal. Se incluye la humedad, el fósforo total (PT), nitrógeno Kjeldhal (N-K), cenizas, carbono orgánico disuelto (COD), demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y Fibras. Estos parámetros se definen en la sección de anexos.

### 3.6 Digestión Anaerobia (DA).

Los capítulos anteriores se refieren a la problemática que existe alrededor de los RSU, se abordan temas como su generación y composición, su situación en México, los medios por los cuales son llevados a disposición final así como la normativa; en lo sucesivo, se hablará del tratamiento biológico propio de la fracción orgánica de estos de residuos (FORSU), conocido como digestión anaerobia (DA) para finalizar con el análisis de las alternativas de uso o disposición final del subproducto de la DA conocido como digestato.



Como ya se mencionó, la mitad de los residuos sólidos son de origen orgánico, fracción a la que nos referimos como FORSU. Los procesos de tratamiento comúnmente aplicados a la FORSU, con el fin reducir estos residuos, son aquellos del tipo biológico (digestión aerobia, digestión anaerobia y compostaje), estos tratamientos ofrecen una estrategia sustentable que combina la estabilización y la recuperación de nutrientes que forman parte de los residuos. La recuperación de nutrientes será útil para la aplicación en suelos como fertilizantes o mejoradores de suelo, y al mismo tiempo, esta tecnología de tratamiento de la FORSU ofrece el beneficio de la obtención de energía proveniente de la combustión de los gases de descomposición generados a partir de los residuos orgánicos (Hartmann, 2006).

El tratamiento aerobio tiene la ventaja de ser más económico, sin embargo, como desventaja, no se podrá recuperar energía y se emitirán gases de efecto invernadero a la atmósfera. En cambio, la DA si permite la obtención de energía a la par que los residuos del tratamiento (conocidos como digestato), se pueden recuperar y utilizar como productos de interés agrícola (fertilizantes y mejoradores de suelo). No obstante, los productos obtenidos de la DA no tienen la misma calidad que los del proceso aerobio en cuanto a fitotoxicidad, viscosidad, hedor, difícil manejo y técnicas de aplicación al suelo, las cuales requieren de maquinaria compleja y costosa (Tchobanoglous, 1998). Consecuentemente estos productos requerirán de un “pulido” para mejorar su valor. El “pulido” se hace estabilizando los productos en un proceso aerobio, el cual reduce la humedad, el hedor así como el contenido de carbono y los patógenos presentes (Abdullahia, 2008).

La DA es un proceso mediante el cual, en ausencia de oxígeno, se degrada la materia orgánica, resultando como principal producto el biogás, una mezcla de aproximadamente 65% CH<sub>4</sub> y 35% CO<sub>2</sub>, a la par que se produce materia orgánica reducida por la acción bacteriana conocida como digestato (Borrello, 2011).



Tradicionalmente, la DA se ha utilizado como tratamiento de efluentes líquidos como aguas residuales y lodos de drenaje, sin embargo, existen diversas referencias hoy en día sobre residuos sólidos tratados mediante esta tecnología, por ejemplo: residuos de agricultura, procesamiento de alimentos y residuos urbanos. A causa de su alto contenido de materia orgánica, este tipo de residuos ofrecen un gran potencial de producción de biogás (Mata, 2003).

La FORSU se compone de materiales biodegradables diversos y una de sus características principales es que en conjunto, estos residuos forman una mezcla heterogénea cuyas propiedades no siempre serán constantes. Adicionalmente, la FORSU no siempre estará separada de los RSU, por lo que será necesario un pretratamiento previo a la DA (Fulvia Tambone, 2009). En la Figura 6 se muestran las áreas comunes de una planta de DA, cabe destacar que en este esquema no se incluye un área de pretratamiento, sin embargo, si se presenta un área para la generación de energía y otra para el procesamiento de los residuos del tratamiento (Varnero, 2011).

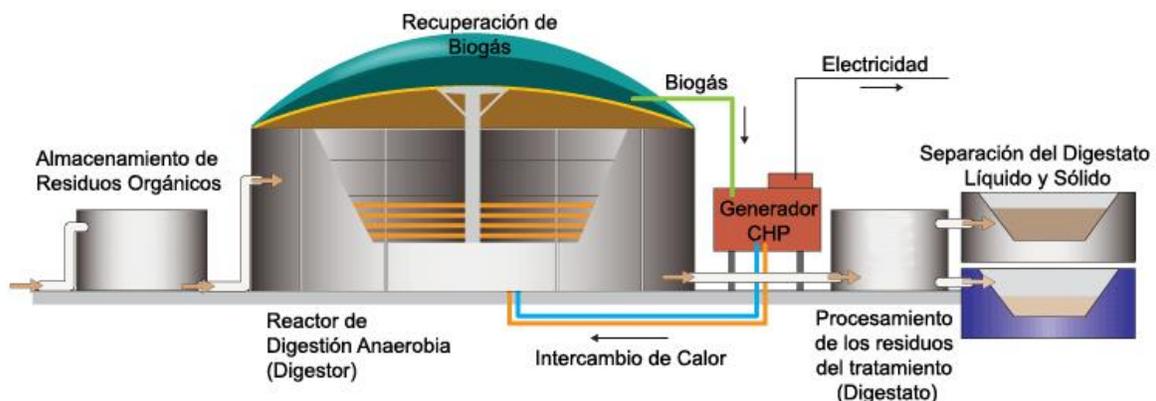


Figura 6. Esquema general de una planta de digestión anaerobia.

Una planta de DA cuenta comúnmente con cuatro áreas, la primera de ellas es la de recepción y almacenamiento de los residuos orgánicos que serán alimentados al digestor, en esta etapa existe la opción de un pre tratamiento, el



cual, consiste en la separación de impurezas mediante la trituración y cribado de los residuos. La segunda área es el digestor anaerobio la se podría llamar el corazón del proceso ya que es donde se lleva a cabo la digestión anaerobia. Las últimas dos áreas pueden o no existir y se trata de la zona de los motores CHP (por sus siglas en inglés Combined Heat and Power) para el aprovechamiento del biogás y la de almacenamiento de los residuos del tratamiento para su uso como fertilizantes (Guardado, 2007).

Muchos aspectos deben de ser examinados, tanto teóricos como prácticos, algunos de los más relevantes son la descripción de las vías metabólicas por las cuales se degrada la materia orgánica, la termodinámica del proceso, la importancia de los intermediarios de la reacción, los factores ambientales, la presencia de nutrientes, inhibidores y toxicidad, el efecto de la temperatura, entre otros. Es importante entender el fenómeno que ocurre dentro del digestor para poder predecir las cualidades de los productos finales del proceso. Por último, debe de tenerse una estrategia para el control de los digestores anaerobios pues como en todo proceso existe la fase de arranque, estabilización, operación y paro de la planta. (J. Mata, 2003)

### 3.6.1 Fundamentos

---

El proceso de DA, está medido por la acción de un grupo de bacterias específicas que en ausencia de oxígeno transforman la materia orgánica en una mezcla de gases, fundamentalmente metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), a esta mezcla se le conoce como biogás. Paralelamente a la producción de este biogás, se genera un residuo denominado digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación (GIZ, 2012).

La generación de biogás, se realiza en estanques herméticamente cerrados, llamados digestores, aquí se lleva a cabo la degradación de la materia orgánica, en condiciones húmedas o secas. Como consecuencia de la



descomposición de los sustratos orgánicos y la consecuente producción de energía, la DA presenta tanto beneficios ambientales como económicos (Chagumaira, 2011).

La biomasa utilizada para la producción de biogás se conoce con el nombre de sustrato o ingestato, éste puede originarse de diversas fuentes ya sean residuos agrícolas, purines e inclusive RSU (específicamente la FORSU), la combinación de estos sustratos orgánicos se conoce como codigestión. La codigestión permite la solución de problemas durante el proceso de DA, sustituyendo las características de un residuo por las de otro (GIZ, 2012). Las únicas premisas que el sustrato debe cumplir, son las siguientes:

- Que los residuos empleados contengan material biodegradable.
- Que los residuos mantengan una composición y concentración relativamente estable.
- Que los residuos no contengan sustancias bactericidas o inhibitorias del proceso de DA.

El proceso de DA de la materia orgánica involucra un amplio número de reacciones bioquímicas y de la acción de microorganismos, este proceso se puede dividir en cuatro fases principales:

1. Hidrólisis.
2. Acidogénesis.
3. Acetogénesis.
4. Metanogénesis.

La primer fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, hidratos de carbono y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas



extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga), éstos son fermentados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrogeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono, durante la acetogénesis, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  (Mata, 2003). En la Figura 7, se muestra un esquema simplificado de la vía por la cual se degrada la materia orgánica dentro de un digestor empezando por las cadenas largas de compuestos orgánicos y terminando en el metano y dióxido de carbono y otros subproductos (Williams, 2011).

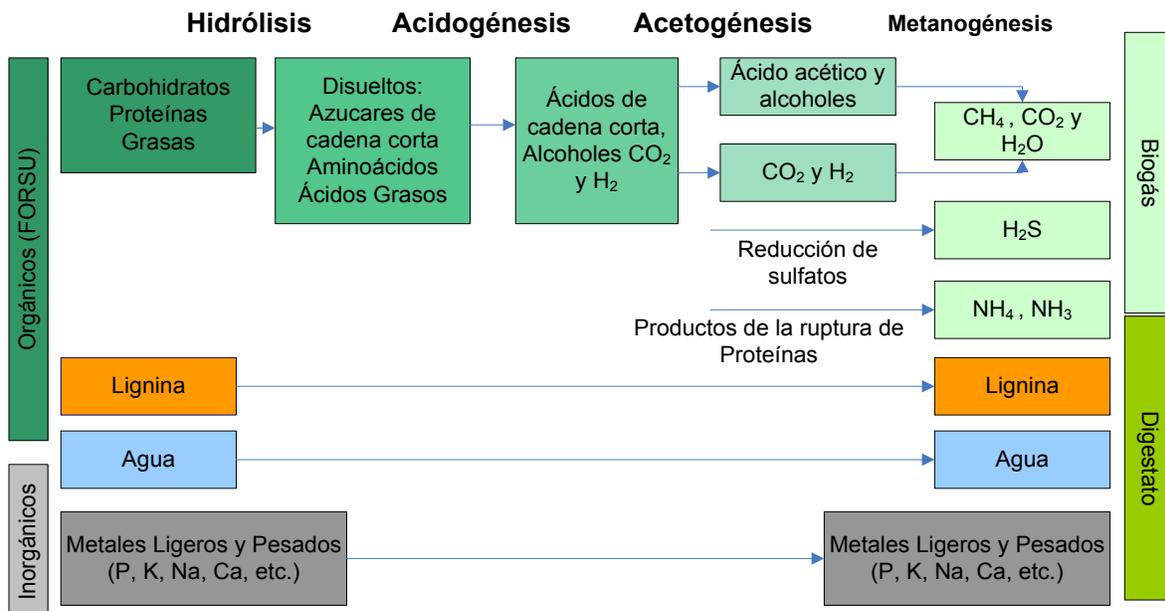


Figura 7. Fases de la DA (Williams, 2011)

La FORSU, es un sustrato complejo, compuesto por diversos productos, por ello requiere de una vía metabólica más compleja para su degradación. Los intermediarios para llegar a la producción final de  $\text{CH}_4$  han sido ampliamente



estudiados y es necesario comprenderlos para llevar control en el arranque y operación de una planta de DA. La degradación anaerobia de la FORSU requiere de la acción concreta de una población microbiana variada consistente de grupos de bacterias estrictas y facultativas (las facultativas pueden crecer en presencia o ausencia de oxígeno, las estrictas no) (Gerardi, 2003).

Por último, se puede observar que durante la vía metabólica, otro de los productos es el hidrógeno ( $H_2$ ), el cual participa como reactivo limitante para la producción de  $CH_4$  por hidrogenación. Cabe destacar que el  $H_2$  tiene un potencial energético mayor al del biogás y actualmente hay estudios que se encaminan a la producción de este combustible, a la vez que la tecnología para su aprovechamiento se encuentra en desarrollo.

### 3.6.2 Sustrato

---

Los materiales comúnmente empleados en las plantas de DA son los siguientes (Al Seadi, 2012):

- Residuos Purines.
- Residuos de Cultivo y Poda.
- Residuos Vegetales Industriales.
- Residuos Animales Industriales.
- Residuos orgánicos digeribles y agua residual proveniente de la actividad humana.
- Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (origen animal y vegetal).
- Otros residuos industriales orgánicos digeribles (residuos de producción).



La presencia de impurezas en el sustrato puede inhibir el proceso, disminuir la calidad de productos finales como es el digestato o averiar el sistema de tratamiento. Algunos de los residuos, anteriormente mencionados, contienen impurezas en menor proporción que otros; los residuos de poda contienen arena y algunas piedras a diferencia de la FORSU que contiene una gran variedad de plásticos, metales, vidrios entre otros residuos.

Debido a la presencia de estas impurezas en ocasiones es necesario someter al sustrato a un pretratamiento antes de alimentarlo al proceso de DA. Acciones como la separación en fuente de los RSU disminuyen la cantidad de impurezas presentes en la FORSU proveniente de estos residuos y abren la posibilidad a que puedan utilizarse como sustrato en la DA. Para asegurar la calidad del sustrato, se debe de llevar un control de calidad sobre éste (Al Seadi, 2012).

Antes de entrar a la DA, la FORSU puede ser tratada de varias formas, ya sea por acción mecánica o térmica. A continuación se desarrollan los procesos que modifican las características de esta materia prima (WRAP, 2011).

#### I. Presanitización

El proceso de DA tiene un efecto de sanitación del sustrato. A pesar de que los patógenos y virus comunes son eliminados durante la digestión termofílica y mesofílica puede ser necesario un pretratamiento de sanitación o un proceso suplementario después de la DA, esto para ciertos sustratos específicos antes de mezclarlos con la biomasa.



## II. Mejora de la degradabilidad

Los pretratamientos incluyen operaciones básicas como la separación mecánica de impurezas, el triturado y la homogenización del sustrato. Otros pretratamientos más complejos incluyen la maceración, hidrólisis (química y térmica), ultrasonido, entre otros. El fin de estos tratamientos es facilitar la degradación de estructuras complejas, reduciéndolas y dejándolas de alguna forma más accesible para los microorganismos encargados de la degradación (Mata, 2003).

### 3.6.3 Tecnologías

El propósito de esta sección es mencionar la tecnología que involucra el proceso de DA, para la producción tanto de biogás como otros subproductos típicos de este proceso (fertilizantes y mejoradores de suelo), la materia prima que se utiliza en el proceso es la FORSU aunque de igual forma, se pueden utilizar materiales de procedencia orgánica. Estas tecnologías se desarrollan principalmente en Europa aunque actualmente Estados Unidos realiza investigaciones en este campo. A lo largo de las últimas décadas se han destacado las compañías : BTA, Ros Roca, STRABAG Y Weltec, quienes ofrecen una tecnología de DA por vía húmeda y por otro lado las compañías : Valorga, Dranco, Kompogas y BEKON quienes ofrecen una tecnología de digestión anaerobia seca (Villavicencio, 2014).

Como se menciona en el párrafo anterior, la DA puede tener dos configuraciones diferentes ya sea por vía seca o vía húmeda (se considera digestión húmeda cuando la humedad del material que se procesa es mayor al 15%), la única diferencia entre ambas tecnologías, es la cantidad de agua presente durante la descomposición de la FORSU (Mata, 2003). Cada configuración ya sea húmeda o seca tiene sus propias ventajas de operación y resultados del proceso. La selección de una configuración sobre la otra se verá reflejado principalmente en los tiempos necesarios para llevar a cabo el proceso,



los recursos necesarios y la calidad y cantidad de los productos finales. Algunas características de cada configuración, se presentan en la Tabla 6 (Hagenmeyer, 2003).

Tabla 6. Ventajas de la digestión anaerobia húmeda y seca.

(Hagenmeyer, 2003).

Húmeda	Seca
<ul style="list-style-type: none"><li>• Facilita el manejo de residuos municipales que se caracterizan por un importante contenido de contaminantes y humedad.</li><li>• Efectúa una considerable remoción adicional de contaminantes por el pretratamiento en húmedo.</li><li>• Se aceleran los procesos de transferencia de masa y energía en un sistema líquido con homogeneización continua los cuales estimulan un óptimo metabolismo biológico.</li><li>• Facilita la liberación del biogás porque las burbujas formadas se separan de las células bacterianas y de los sólidos suspendidos sin dificultades y con alta eficiencia.</li><li>• Reducción de olores por transformación inmediata de los residuos a la fase líquida y uso de contenedores cerrados.</li><li>• Empleo de bombas estándar y diseño simple del digestor</li><li>• Alta disponibilidad de la planta y seguridad de operación.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• El flujo secuencial permite el control del tiempo de residencia de la masa y asegura la higienización en el proceso termófilo.</li><li>• El proceso es variable referente a contenido de sólidos totales (hasta 40% ST) y se minimiza el agua recirculada en la planta.</li><li>• Independientemente del diseño se puede elegir el proceso termófilo o mesófilo.</li><li>• El digestor horizontal maximiza la superficie de salida de biogás.</li><li>• Se puede variar tanto la altura de carga del digestor como el tiempo de residencia para equilibrar diferencias en la recepción de residuos.</li><li>• La recirculación de lodos permite una estabilización del proceso biológico y la inoculación de la materia fresca.</li><li>• El piso móvil transporta los sedimentos en el digestor y asegura que no se acumulan los inertes en el digestor.</li><li>• Sistema modular permita ampliaciones</li></ul>



Húmeda	Seca
<ul style="list-style-type: none"><li>• Amortiguamiento (buffer) y estabilización del sistema por la etapa de hidrólisis que facilita una alimentación semi-continua del digestor.</li><li>• Se pueden medir y regular los parámetros del proceso más fácilmente.</li></ul>	<p>posteriores de la planta.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Pulmón y estabilización del sistema por la etapa de precompostaje que facilita una alimentación semi-continua del digestor.</li></ul>

La principal diferencia entre ambos arreglos es el uso de agua de proceso, lo cual modifica las condiciones de operación para cada proceso. En la Tabla 7 se muestran los resultados de un balance de materia para la DA por vía húmeda y por vía seca (Banks, 2009).

Tabla 7. Balance de materia para el tratamiento de 1 tonelada de RSU DA Seca vs DA Húmeda

Parámetro	SECO <sup>1</sup>	HUMEDO <sup>2</sup>
RSU	100%	100%
FORSU	50-55 %	40%
Biogás	6-8 %	3%
Sustrato	40-50 %	26.10%
Rechazo	4-5 %	10%
Subproductos	30%	10%
Pérdidas	8-10 %	13.30%
Agua de proceso	-	16%

<sup>1</sup> Proceso Kompogas MBT

<sup>2</sup> Planta Vargon, NL tecnología Valorga

Existen ligeras diferencias entre las dos tecnologías y la selección de cada tecnología dependerá de las necesidades de tratamiento (tipo de sustrato) así como la escala a la que se quiera llevar un proyecto de esta índole.



### 3.6.4 Parámetros del proceso

---

El comportamiento de los microorganismos dentro del digestor se ve modificado por diversos factores, éstos han sido extensamente estudiados para fines de control del proceso. Los principales factores involucrados en el proceso son:

- I) *Concentración de Oxígeno.*- Debido a que un proceso anaerobio se caracteriza por la ausencia de oxígeno, éste se utiliza para detener la DA, por ejemplo, para detener la degradación del digestato se lleva a cabo un proceso que se conoce como estabilización aerobia (GIZ, 2012)
- II) *Temperatura.*- La temperatura, modifica las condiciones termodinámicas de las reacciones que se llevan a cabo dentro del digestor, en particular las bacterias metanogénicas son influenciadas por este parámetro. La DA puede funcionar en un amplio intervalo de temperaturas: desde psicrófilas, alrededor de 10°C hasta condiciones termófilas extremas arriba de los 70 °C, sin embargo, se han identificado dos intervalos óptimos de temperaturas: mesófilas, alrededor de 35 °C y termófilas, alrededor de 55 °C (J. Mata, 2003).
- III) *pH.*- La actividad enzimática o el desempeño del digestor, es influenciado por el pH, el pH óptimo para la DA oscila entre valores de 6.8 y 7.2, es difícil de definir ya que ciertas bacterias prefieren condiciones de pH más ácidas que otras (Gerardi, 2003).
- IV) *Nutrientes e inhibidores.*- los microorganismos requieren de nutrientes para su desarrollo, éstos se dividen en macronutrientes (N, P) y micronutrientes (Co, Ni, Fe, S) llamados así por la cantidad necesaria de cada. Así como existen ciertas sustancias benéficas para el proceso de DA, existen una variedad de residuos orgánicos e inorgánicos que pueden provocar la



intoxicación del digestor. En el caso de las sustancias inhibidoras del proceso, es importante observar que incluso los nutrientes en cantidades excesivas pueden provocar la inhibición bioquímica (Gerardi, 2003).

### 3.6.5 Control del proceso.

---

Durante el arranque, operación y cierre de una planta de DA se puede llevar control total sobre el proceso, por medio de un sistema de control. Las medidas de control, deben asegurar condiciones constantes de temperatura, pH y composición de la materia prima que es alimentada al digestor, con la finalidad, de controlar la actividad microbológica y las condiciones ambientales en los estanques de digestión anaerobia, existen diversos parámetros ambientales operacionales que permiten manejar el proceso y controlar las reacciones que se producen al interior del digestor (GIZ, 2012). Algunos de estos parámetros se citan a continuación:

- I) *Tiempo de retención hidráulica.* El tiempo de retención hidráulica (TRH) es el intervalo de tiempo promedio que el sustrato es retenido dentro del digestor. El TRH está correlacionado con el volumen del digestor y la cantidad de sustrato alimentado al mismo por unidad de tiempo. Para hacer cálculos al respecto se utiliza la Ecuación 1 (IDAE, 2007):

#### Ecuación 1. Tiempo de Retención Hidráulica

Donde:

$$TRH = \frac{V_R}{V}$$

TRH : tiempo de retención hidráulica [días]

VR : Volumen del digestor [m<sup>3</sup>]

V : Volumen de sustrato alimentado por unidad de tiempo [m<sup>3</sup>/d]

*Velocidad de carga orgánica.*- La carga orgánica al interior del digestor, indica la cantidad de materia orgánica seca que puede alimentarse al digestor, por unidad de volumen y tiempo, y se calcula con la Ecuación 2 (Al Seadi, 2008):



## Ecuación 2. Carga Orgánica en el Digestor

Dónde:

BR : carga orgánica [kg/d\*m<sup>3</sup>]

m : masa de sustrato alimentada por unidad de tiempo [kg/d]

c : concentración de materia orgánica [%]

VR : volumen del digestor [m<sup>3</sup>]

$$B_R = m * \frac{c}{V_R}$$

- II) *Grado de mezcla en el digestor.* La práctica común es utilizar agitadores de rotación lenta y mezclas discontinuas a intervalos de tiempo para asegurar una mezcla suficiente y evitar la separación de las poblaciones bacterianas (GIZ, 2012).
- III) *Temperatura.-* En términos generales la temperatura puede influenciar la actividad de determinadas familias de microorganismos metanogénicos y que la velocidad de descomposición de la materia orgánica aumenta a la par del aumento de la temperatura, de igual manera la velocidad de degradación del nitrógeno y fósforo natural, aumenta junto a este parámetro (Zhang Ji shi, 2006).
- IV) *pH.-* El pH varia debido a que ciertas especies químicas intermediarias del proceso biológico (ácido carbónico, bicarbonato, amoníaco y amonio), modifican el pH constantemente, comúnmente se utilizan los bicarbonatos de sodio y potasio para regular la alcalinidad y pH dentro de un digestor. Se debe tener mucho cuidado con los químicos utilizados ya que se puede provocar la precipitación de sólidos o el envenenamiento del digestor (Gerardi, 2003).



- V) *Volumen del digestor.*- El corazón de una planta de DA es el digestor. El tamaño de los digestores determina la escala de las plantas de biogás y varía de unos cuantos metros cúbicos, en el caso de instalaciones agrícolas, a los miles de metros cúbicos, para plantas comerciales, en este último caso se emplean varios digestores en diferentes arreglos (Al Seadi, 2008).

---

### 3.7 Productos de la DA.

---

Como producto de la DA, se obtiene biogás de elevado poder energético (11-13 kcal/kg) y un producto estabilizado (mezcla de agua y sólidos), que se conoce como digerido o digestato, este digestato, como se hará referencia de ahora en adelante, contiene materia no orgánica, materia orgánica no digerida, biomasa bacteriana y los nutrientes que se encuentran en la materia orgánica digerida. El biogás se considera comúnmente como el producto principal de este proceso, sin embargo, no se puede dejar a un lado la posibilidad de utilizar el digestato como fertilizante o mejorador de suelo por sus propiedades orgánicas (GIZ, 2012).

En este trabajo de tesis se considera al digestato como un subproducto, no obstante, debe dejarse en claro que el digestato podría ser el producto principal de la DA si así se desea. A continuación se aborda brevemente ambos productos, para después ahondar en las propiedades del digestato.

#### 3.7.1 Producción de biogás.

---

El biogás producido por la descomposición microbiana está compuesto por metano y por dióxido de carbono. Dependiendo de los contenidos de grasas, carbohidratos y proteínas de los distintos sustratos, la fracción de metano contenida en el biogás varía entre 50% y 75% en volumen. En la Tabla 8 se presentan un promedio de la composición del biogás, ésta composición varía



dependiendo del sustrato con el que se lleva a cabo la DA así como las condiciones de operación del proceso (Deublein, 2008).

Tabla 8. Composición del Biogás (Deublein, 2008).

Compuesto	Símbolo	Contenido (% Vol.)
Metano	CH <sub>4</sub>	50 - 75
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	25 - 45
Vapor de Agua	H <sub>2</sub> O	2 (20°C) - 7 (40°C)
Oxígeno	O <sub>2</sub>	< 2
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	< 2
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	< 1
Hidrógeno	H <sub>2</sub> O	< 1
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	< 1

Como se observa en la Tabla 8, el biogás, además de metano, contiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas, tales como agua, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, siloxanos, etc. Según el uso final que se proyecte para el biogás producido, se le deben realizar distintos tratamientos con el fin de eliminar estas impurezas para el uso del biogás como combustible (Cavinato, 2011).

La producción y el uso del biogás generado por la DA, provee beneficios sociales y económicos. El uso del biogás dentro de la cadena de consumo de energía fortalece la capacidad económica, asegura nuevos empleos y disminuye la demanda energética de la localidad. La incorporación del biogás mejora el estándar de vida y contribuye al desarrollo económico y social ya que es una tecnología fácil de implementar tanto en asentamientos urbanos como rurales (Borrello, 2011).



Actualmente, los combustibles fósiles son la principal fuente de energía en el mundo. El uso del biogás trae consigo el beneficio de la obtención de energía proveniente de fuentes renovables lo cual convierte a este en el producto principal en la DA (Avendaño, 2010).

### 3.7.2 Producción de digestato.

El digestato es el subproducto generado a la par de la producción de metano en una planta de biogás, proveniente de residuos orgánicos. Independientemente del tipo de tecnología de DA que se empleó en la planta de biogás (tecnología húmeda o seca) se obtendrán dos fracciones de digestato, un material sólido fibroso y un líquido rico en nutrientes (Makádi, 2012). En la Tabla 9 se presentan valores comunes de los componentes de un digestato típico.

Tabla 9. Características de digestato típico (Makádi, 2012).

Parámetro	Valor
Sólidos Totales (ST) %	4.5
Sólidos Volátiles (SV) %ST	75
pH	8.1
N- Total [kg/m <sup>3</sup> ]	7.2
N-Amoniacal [kg/m <sup>3</sup> ]	4.9
P [kg/m <sup>3</sup> ]	0.7
K [kg/m <sup>3</sup> ]	1
Pb [mg/kg]	<5.0
Cd [mg/kg]	0.12
Cu [mg/kg]	71
Cr [mg/kg]	5.7
Hg [mg/kg]	<0.05
Ni [mg/kg]	5.2
Zn [mg/kg]	309

Fuente: Nordberg & al, 2002  
kg de Sólidos Totales

Como se puede observar, el digestato contiene una alta porción de nitrógeno mineral (N), especialmente bajo la forma de amoníaco, el nitrógeno forma parte de los elementos necesarios para la vida y está presente en todos los organismo vivo. Más allá del nitrógeno el digestato contiene macronutrientes y



micronutrientes que favorecen el crecimiento de las plantas. La disponibilidad de estos elementos hacen del digestato un producto atractivo para la producción agrícola (Makádi, 2012).

Además de estas ventajas de aprovechamiento como acondicionador de suelos, actualmente se realizan estudios para implementar el uso del digestato sólido como combustible fósil y el digestato líquido como materia prima en procesos de producción de etanol (Teater, 2011).

---

### 3.8 Digestato

---

La finalidad de este trabajo de tesis es analizar las alternativas para el uso del digestato y en su defecto la disposición final de este. Para este análisis se tomará en cuenta la tecnología de DA y los tratamientos sucesivos, con los cuales se obtenga digestato como producto final. A raíz de este análisis, se propusieron escenarios para el caso particular de la obtención de digestato utilizando como materia prima la FORSU de la ciudad de México.

El uso del digestato da un valor agregado a residuos que de otra forma se hubiesen desaprovechado en situación de disposición final. El mayor uso que se le da al digestato, es la aplicación en la agricultura como fertilizante. Sin embargo, es necesario llevar a cabo trabajos de investigación para desarrollar un mercado más extenso para estos productos (ESCAP, 2007).

La expansión del mercado del digestato mas allá de su uso agrónomo es importante para generar una mayor oportunidad a tecnologías sustentables que permitan reusar los residuos biodegradables a la vez que se aprovecha la obtención de energía sustentable. Es así como se logrará alcanzar metas gubernamentales al reducir los residuos enviados a sitios de disposición final y aumentar la cantidad de energía generada por recursos renovables (ONU, 1998).



### 3.8.1 Aplicaciones

---

Algunas aplicaciones del digestato con mayor oportunidad de comercialización son las siguientes (Al Seadi, 2012):

Tecnología Actual (Tecnología desarrollada y comercializada de la que se necesita mayor investigación para establecer en mayor escala):

- Extracción de nutrientes y producción de combustibles fósiles. La extracción de nutrientes en concentración tiene la ventaja de producir un biofertilizante rentable y comercializable. Se necesita continuar con la investigación con distintos sustratos para analizar más a fondo la economía del proceso y desarrollar el mercado para estos productos.

Tecnología en desarrollo (Tecnología no desarrollada aun para la gestión del digestato en una escala comercialmente viable):

- Reforestación: la fracción sólida o fibrosa del digestato mezclada con paja o serrín, tiene el potencial de usarse como un material para cubrir superficies en parques y lugares públicos con un efecto estético en el paisaje. Alternativamente puede usarse como lecho o asiento en la siembra de árboles dentro de la ciudad. Estas aplicaciones tienen la ventaja de estar abiertas a diversos usos a diferencia de la composta.
- Fertilizante de prados: la fracción líquida del digestato puede usarse como fertilizante en extensiones de pasto como campos para la práctica de deportes pues contienen los nutrientes equivalentes a los fertilizantes químicos utilizados hoy en día. Además, el digestato líquido proporciona agua necesaria para la irrigación de estos campos. Sin embargo, esta opción puede no ser económicamente viable si el transporte de grandes volúmenes de agua sobrepasa el beneficio de fertilización. Se necesita hacer mayor investigación sobre la concentración de nutrientes, por ejemplo a través de membranas.



### 3.8.2 Composición

El digestato podrá ser utilizado siempre y cuando cumpla con las características de composición y calidad necesarias de acuerdo con las especificaciones estipuladas en la normativa local. Así mismo, el sustrato que se alimente al proceso de DA será determinante en la composición y la calidad del digestato. Por último, se deberá de tomar en cuenta que la efectividad del proceso de DA así como el procesamiento del digestato, influirán en la calidad final del digestato. Comúnmente, será necesario someter el digestato a otro tratamiento de “pulido” para su aprovechamiento o en su defecto de “estabilización” para llevarse a disposición final (Al Seadi, 2012).

Los parámetros que determinaran la calidad del digestato se abordan a continuación. Estos parámetros definirán si el digestato es óptimo para su uso como fertilizante son los siguientes:

- l) *Contenido de nutrientes.*- La relación adecuada de nutrientes, favorece el crecimiento y la reproducción de los seres vivos en nuestro planeta. En la Tabla 10 se dividen los nutrientes en tres grupos (Macronutrientes, Micronutrientes y Metales Pesados) (Gerardi, 2003).

Tabla 10. Nutrientes presentes en productos Vegetales y Animales

<b>Nutrientes presentes en productos Vegetales y Animales</b>	
Macronutrientes	Nitrógeno (N), Fosforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre (S) Boro(B), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cloro (Cl),
Micronutrientes	Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Molibdeno(Mo), Nickel (Ni), Selenio, (Se), Zinc (Zn)
Metales Pesados	Plomo (Pb), Cromo (Cr), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg)



El carbono y el nitrógeno forman parte del grupo de macronutrientes. El contenido de estos dos elementos en el digestato hace que este producto pueda ser aprovechado como fertilizante (Uicab, 2003). El carbono sirve como fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno es necesario para la síntesis protéica. En la Tabla 11 se presentan los efectos que tiene la relación C/N en el suelo.

Tabla 11. Efecto de la Relación C/N en el Suelo (Uicab, 2003).

Relación C/N del Suelo	Interpretación
<5	Excesiva mineralización. El contenido en materia orgánica es bajo. Escasa fertilidad. Destrucción de la Microflora y Microfauna.
5 a 8	Tendencia hacia la mineralización de la materia orgánica. La fertilidad es de baja a moderada. Puede aumentarse la tasa orgánica del suelo mediante aportaciones grandes y continuas.
8 a 12	Equilibrio entre mineralización y humificación. La fertilidad es elevada. Para conservar esta tasa es recomendable realizar aportes periódicos.
>12	Tendencia a la humificación Poco frecuente en suelos cultivados.

La relación C/N inicial, dependerá del sustrato que se alimente al digestor anaerobio, la relación C/N de la FORSU oscila en un intervalo de 20 a 30. Los residuos de origen vegetal, presentan por lo general una relación C/N elevada, en contraparte con los de origen animal que la relación es relativamente baja. Estos residuos en la mayoría de los casos se pueden mezclar, incluso con otros materiales, para lograr una relación de C/N deseada. (Sztern, 2001).

II) *pH*.- Por lo general el digestato tiene un pH ligeramente alcalino esto podría deberse a la formación de amoníaco. En el caso de la DA húmeda el pH se acerca al neutro por existir cierta disolución con agua. Durante el proceso de DA, aumenta, como se indica en la Tabla 12, el intervalo final que se obtiene



varía dependiendo también del tipo de sustrato que se esté tratando, así como las condiciones bajo las que se lleve a cabo el proceso (Makádi, 2012).

Tabla 12. Variación del pH de una mezcla de residuos de cultivo, Residuos purines y FORSU, Digestión termofílica húmeda (Makádi, 2012).

<b>Variación del pH de una mezcla de residuos de cultivo, Residuos purines y FORSU, digestión termofílica húmeda.</b>	
pH ingestato	4
pH digestor	8.1
pH digestato	8.3

La variación del pH tiende a aumentar, ésta puede ser una propiedad benéfica del digestato como producto final debido a que existe un problema global conocido como acidificación de los suelos. El digestato es útil ya que la acidificación, puede ser amortiguada con la aplicación de digestato cuyas características alcalinas son favorables para el amortiguamiento de suelos.

III) *Materia Seca y Materia Orgánica* .- La materia orgánica del suelo se compone de vegetales, animales y microorganismos vivos, sus restos, y las sustancias resultantes de su degradación físico-química. Es de gran importancia por su influencia en la estructura, en la capacidad de retención de agua y nutrientes, y en los efectos bioquímicos que causa sobre los vegetales (López, 2005-2006).

IV) *Homogeneidad*.- Numerosos materiales pierden rápidamente su estructura física cuando ingresan al proceso de degradación y otros son muy resistentes a los cambios, tal es el caso de materiales leñosos y fibras vegetales en general. Cuando se tiene una mezcla de residuos, éstos se deben de someter a un pre tratamiento antes de entrar al proceso de DA, con el fin de realizar las correcciones necesarias según sea el caso para conseguir un diámetro promedio máximo de partículas de 20 mm el cual repercute en la biodisponibilidad y tiempo de compostaje ( $T_c$ ) en comparación con partículas mayores a 80 mm (Salazar, 2003).



- V) *Pureza*.- En el digestato se encuentran diferentes impurezas, estas pueden ser físicas (arena, piedras plásticos vidrios etc.), químicas (metales pesados y contaminantes orgánicos) y biológicas (bacterias, virus y parásitos) (PAS-110, 2010).
- VI) *Sanitizado*.- Un proceso de DA estable tiene un efecto positivo en la calidad del digestato, hasta cierta extensión es capaz de degradar la mayoría de los compuestos y contaminantes (químicos, biológicos e incluso algunos físicos como papel) presentes en el sustrato. Determinados tipos de sustrato pueden ser pretratados por procesos mecánicos, químicos y térmicos con el fin de remover, degradar o desactivar dichas impurezas no deseables. Por último, el digestato puede ser sometido a procesos que aseguren su sanitizado (Al Seadi, 2012).

### 3.8.3 Impurezas

---

En el capítulo anterior, se hace hincapié en que la calidad del digestato depende en gran medida del sustrato. Esto implica, que la mejor forma de garantizar la calidad del digestato, es usando sustratos libres de impurezas y de alta calidad. Sin embargo, no hay que dejar a un lado la posibilidad de dar un pretratamiento a los sustratos no tengan alta calidad (PAS-110, 2010).

En el caso específico del uso de la FORSU, como sustrato, se debe de tener mucho cuidado, esto debido a que este tipo de residuos contiene gran variedad de impurezas. La DA es capaz de degradar algunas de estas impurezas, sin embargo, la presencia algunas de estas determinarán si es necesario un tratamiento antes o después de haber entrado al proceso de DA. Las impurezas del digestato se pueden dividir en tres grupos: Físicas, Químicas y Biológicas. A continuación se mencionan brevemente.



I) *Impurezas Físicas.*- Un amplio intervalo de materiales se consideran como impurezas físicas. Estos incluyen tanto materiales no digeribles como materiales digeribles con tamaños de partícula muy grandes. La FORSU contiene comúnmente plásticos, empaques, utensilios de cocina, residuos de jardinería, etc. Estas impurezas pueden removerse efectivamente por separación en fuente y recolección separada de la FORSU.

II) *Impurezas Químicas.*- Existe una amplia gama de contaminantes químicos que circulan en la FORSU, estos contaminantes pueden provenir de plaguicidas usados en los alimentos que consumimos, así como el uso de materiales de empaque y el contacto con otros materiales, éstas se dividen en dos grupos como se muestra a continuación:

- *Metales Pesados.*- En pequeñas cantidades los metales pesados (referidos también como trazas) como hierro, manganeso y zinc actúan como nutrientes esenciales. Estos elementos se encuentran naturalmente en alimentos, frutas y vegetales y se incluyen en suplementos alimenticios y multivitamínicos. Sin embargo, estos elementos se vuelven tóxicos cuando no son metabolizados, resultando en su acumulación en tejidos blandos.
- *Contaminantes Orgánicos.*- Los contaminantes Orgánicos son compuestos químicos no deseables en el proceso de DA, estos contaminantes se encuentran en concentraciones variables en materiales digeribles como lodos de drenaje, residuos mezclados, aguas residuales, residuos orgánicos industriales, y en menor grado en la FORSU y residuos de agricultura. Algunos contaminantes orgánicos conocidos como Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP por sus siglas), que tienen un tiempo de persistencia en el medio ambiente muy largo, las bacterias y demás organismos no pueden descomponerlo y degradarlos fácilmente y muchos tienen efectos acumulativos, ya que se almacenan en los tejidos



grasos fijándose en la cadena alimenticia y pueden tener efectos hormonales.

III) *Impurezas Biológicas*.- Para el uso del digestato como fertilizante se debe de asegurar que no se transmitirán bacterias, virus, parásitos intestinales, hierbas o plagas vegetales. La selección del sustrato y la exclusión de materiales con alto riesgo de contaminación biológica son vitales para el control de la calidad del digestato.

#### 3.8.4 Efecto de la DA

---

En esta sección se desarrollan las características de la DA que modifica la calidad del digestato. El tiempo de residencia que el sustrato permanezca en el digestor (tiempo de retención hidráulica), a temperatura constante, influye en la calidad del digestato. Como se había mencionado antes, estos dos factores pueden ser modificados para la obtención de un digestato de mayor calidad o una mayor obtención de biogás. A su vez, la modificación tanto del tiempo de retención como de la temperatura tendrá un impacto en los costos de operación de la planta de DA (WRAP, 2011).

- I) *Sanitizado*.- La combinación de temperaturas termofílicas o mesofílicas junto con un tiempo de retención hidráulica mínimo (TRHM), pueden promover una reducción de los patógenos presentes en los residuos purines o aguas residuales. Esta reducción de patógenos puede llevar al digestato a los límites permitidos en los estándares de sanitizado.
- II) *Control de patógenos animales*.- La inactivación/destrucción de parásitos y otros patógenos animales es un resultado nuevamente de la combinación de temperatura y el tiempo de residencia en el proceso de DA. El digestato resultante de la DA carece de estos patógenos a diferencia de los residuos tratados por compostaje.



- III) Control de plagas agrícolas.- La DA desactiva eficientemente las plagas agrícolas que puedan presentarse en el sustrato. Se ha demostrado que incluso a temperaturas mesofílicas, la DA ofrece una destrucción significativa o total de la mayoría de las esporas de plagas que propagan enfermedades en los cultivos
- IV) Eliminación de semillas de hierbas.- Por último, se ha encontrado también que la DA reduce el poder de germinación de las semillas que puedan formar parte del sustrato.

### 3.8.5 Procesamiento

---

El digestato será tratado de manera similar a los lodos de aguas residuales. Para el diseño de un sistema de tratamiento de lodos, o en este caso digestato, será necesario responder a las siguientes preguntas:

- 1) ¿Cuál es la calidad del lodo/digestato que será tratado?
- 2) ¿Qué cantidad de sólidos suspendidos serán procesados?
- 3) ¿Qué intenciones o uso final tendrá el lodo/digestato tratado?

La calidad del digestato se discute más adelante. Por otro lado, la cantidad de sólidos suspendidos del digestato implica la inversión en equipos necesarios para la separación de los lodos en una fracción sólida y una líquida. La separación de los lodos tiene como finalidad reducir la cantidad de residuos generados por la DA, esto será de utilidad al momento de la disposición final de los residuos o en su defecto, para el procesamiento del digestato si se pretende utilizar como fertilizante (Degremont, 2007).

El procesamiento del digestato puede implicar el uso de diferentes métodos y tecnologías en diferentes etapas tomando en cuenta que cada tecnología de procesamiento tiene su propia capacidad y eficiencia así como sus propios costos



de inversión y operación (WRAP, 2011). En la Tabla 13 se presentan los diferentes tratamientos que se dan al digestato.

Tabla 13. Tratamientos del Digestato (EPA, 1987)

Estabilización	Reducción de volumen
<ul style="list-style-type: none"><li>• La DA</li><li>• Estabilización aerobia</li><li>• Estabilización química</li><li>• Procesos de secado</li><li>• Incineración</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• “Thickening” o espesamiento (concentración de la materia sólida)</li><li>• Separación mecánica (filtración, centrifugación)</li><li>• Separación térmica (secado solar, secado al vacío)</li></ul>

Como se puede observar en la Tabla 13, el procesamiento del digestato se enfoca en la reducción de la capacidad de degradación biológica (estabilización) y la remoción de humedad (reducción de volumen) (Degremont, 2007).

Dependiendo del tipo de DA (seca o húmeda), se obtendrá en mayor proporción digestato sólido o líquido. Esto influirá en la selección del equipo necesario para el procesamiento del digestato (WRAP, 2011). Los medios comúnmente empleados para la separación en dos fracciones del digestato (sólida y líquida), consta de los siguientes métodos (Williams, 2011):

- Sedimentación
- Flotación
- Separación por Filtros y Membranas
- Filtro prensa
- Filtro de Bandas
- Centrífuga
- Filtro de Tornillo
- Tecnologías de Secado /Evaporación



La fracción sólida del digestato, contendrá la mayoría de los fosfatos y materia orgánica seca mientras la fracción líquida se compondrá de nitrógeno y potasio principalmente. Por estas razones, la fracción sólida puede ser granulada y utilizada como combustible fósil o puede mezclarse para producir composta y la fracción líquida se usará principalmente como fertilizante (Williams, 2011). En la Tabla 14 se muestran valores de la eficiencia de separación de los principales componentes del digestato que son de interés para la producción de fertilizantes y mejoradores de suelo.

Tabla 14. Eficiencia de Separación (%) de MS, N, P, y K (Williams, 2011)

<b>Tecnología</b>	<b>MS</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>
Filtro prensa	65	32	29	27
Centrífuga	54 - 68	20 - 40	52 - 78	5 - 20
Filtro de Tornillo	20 - 65	5 -28	7 -33	5 – 18
Evaporación		55	40	

Independientemente de la tecnología que se ocupe para el procesamiento del digestato, será necesario contemplar la inversión y los servicios (reactivos y energéticos) requeridos por este proceso alterno a la producción del biogás .En la Tabla 15, se presentan datos en los cuales se puede apreciar la capacidad de tratamiento así como el consumo energético para diferentes equipos de procesamiento.



Tabla 15. Capacidad de Procesamiento del Digestato con diferentes Tecnologías (Williams, 2011)

Tecnología	% Materia Seca a la Entrada	% Materia Seca a la Salida	Consumo de Energía kWh/ton*	Flujos Típico m <sup>3</sup> /h
Sedimentación	0.5	5	-	-
Flotación	0.5	5	-	-
Filtros de tela	0.5 - 5	10	0.2 - 0.9	10
Filtro prensa	3 - 7	21 -25	0.08 - 0.12	10 - 40
Centrífuga	1.7 - 8	18 -30	1.8 - 7	0.7 - 40
Filtro de Tornillo	1 - 16	25 - 40	0.24 - 1.1	2 -100
Evaporación	-	-	5 - 8	

\*1 Ton = 1 m<sup>3</sup> aprox

Por último, cabe destacar que se dispone de otras opciones de uso del digestato como combustible o materia prima para generación de etanol (Teater, 2011), las cuales mejoran la perspectiva económica de proyectos para el tratamiento de la FORSU y generación de plantas de biogás. Cada opción tiene sus ventajas y desventajas y estas deberán seleccionarse de acuerdo a las necesidades de cada proyecto así como las propiedades del sustrato que se tratará.

### 3.8.6 Comercialización

Actualmente el mayor uso que se le da al digestato líquido es la aplicación en la agricultura, sin embargo, actualmente se llevan a cabo investigaciones para habilitar el uso del digestato líquido como mejorador de suelo, fertilizante para jardines domésticos, medio de crecimiento (algas y microorganismos), o su uso estético para praderas y jardines públicos. Ahora bien, centrándonos en el uso actual del digestato como fertilizante para uso agrícola es necesario también asegurarse de que la calidad y las propiedades del digestato sean similares o mejores que la de los fertilizantes comerciales.



Los residuos orgánicos por sí mismos, contribuyen en la mantención de los nutrientes y la fertilidad del suelo. Debido a la naturaleza del digestato (producido con residuos orgánicos como principal sustrato), este procesarse y utilizarse como fertilizante orgánico. No obstante hay que tener cuidado en su aplicación los distintos tipos de suelo, considerando que es un material complejo y su uso tendrá efectos físicos, químicos y biológicos en el suelo (Makádi, 2012). El efecto del digestato sobre el suelo se desarrolla más adelante en la sección de impacto ambiental.

Antes de utilizar el digestato como fertilizante, su composición debe de ser analizada y declarada. La declaración de los macro y micronutrientes así como el contenido de materia seca son parte de los esquemas de aseguramiento de la calidad en la mayoría de los países donde se ha implementado con éxito la DA. Se han incluido laboratorios en las instalaciones de las plantas de biogás con la finalidad de monitorear la calidad del digestato, la frecuencia y los procedimientos empleados para el muestreo y la caracterización se estipulan en normas como las que se han mencionado anteriormente en esta tesis (Al Seadi, 2012).

La aplicación con mayor potencial del digestato para su uso en jardines domésticos son:

- i) uso del digestato fibroso como medio de cultivo (mezcla de compostaje)
- ii) uso del digestato líquido como fertilizante para pasto.

No obstante, debido a los costos de transporte del digestato diluido, la comercialización de este producto podría ser inasequible y por ésta misma dilución podrían presentarse características inadecuadas en el producto. La solución a estos problemas es la concentración de los nutrientes y existen diversas tecnologías para ésta tarea (WRAP, 2011) . Así como la concentración de nutrientes, en la sección siguiente se engloban algunos tratamientos para el procesamiento del digestato



## Especificaciones para fertilizantes orgánicos en México

En México no se cuenta con especificaciones para los fertilizantes obtenidos por digestión anaerobia, por otro lado, en países europeos donde esta tecnología lleva más tiempo en uso si se cuenta con este tipo de especificaciones. No obstante, existen algunas leyes que hacen referencia a los nutrientes vegetales, las cuales podrían tomarse como referencia para los fertilizantes derivados del digestato.

La Asociación Mexicana de Productores, Formuladores y Distribuidores de Insumos Orgánicos, Biológicos y Ecológicos, A. C. (AMPFYDIOBE, A. C.) en conjunto con el gobierno han publicado reglamentos y propuestas de normas que regulan los productos orgánicos entre ellos los nutrientes vegetales. En la “Ley de Productos Orgánicos” se regulan los criterios y/o requisitos para la conversión, producción, procesamiento, elaboración, preparación, acondicionamiento, almacenamiento, identificación, empaque, etiquetado, distribución, transporte, comercialización, verificación y certificación de productos producidos orgánicamente (DOF-07-02, 2006). En reglamentos complementarios, se pretende clasificar los Nutrientes vegetales (Inorgánicos, Orgánicos y Órgano- Metálicos), Mejoradores de suelo (Inorgánicos, Orgánicos), Inoculantes, Humectantes y Reguladores de crecimiento. Se establecen también los parámetros que deben tener este tipo de productos como composición y pH (AMPFYDIOBE, 2013).

Los países que cuentan con un sector de biogás desarrollado y políticas de seguridad ambiental rigurosas, tienen protocolos donde se estipulan las características de calidad que deben de cumplir los productos de la DA incluyendo listas de los sustratos aceptados para la producción de fertilizantes (PAS-110, 2010) . En el caso de México, existe normativa similar aplicable para residuos de tratamiento de aguas (NOM-004- SEMARNAT), sin embargo, esta normativa no es específica para los productos de la DA de la FORSU. Por otro lado, las especificaciones que se proponen en la Comisión Federal para la Protección



contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) hacen referencia a los límites máximos permisibles, así como el etiquetado de fertilizantes orgánicos, estas se presentan en la sección de anexos (DOF-07-02, 2006).

Las normas mexicanas (principalmente la NOM-004-SEMARNAT-2012), sirven como referencia. Sin embargo, es necesario crear una norma específica para los productos de la DA, como las que existen en países donde esta tecnología ya se encuentra desarrollada, con fines de extender su uso en nuestro país.

### 3.8.7 Control de calidad

La calidad mínima del digestato será definida por la normativa local, sin embargo, como se menciona en el apartado anterior, en México no se cuenta con normativa específica para el digestato. Por este motivo, es necesario tomar como ejemplo las normas utilizadas por los países que cuentan con un sector de biogás desarrollado para así poder obtener productos competentes en el mercado. A continuación en la Tabla 16 se presenta una comparación entre los límites máximos permisibles de los biosólidos de la NOM-004-SEMARNAT-2012, contra los propuestos en el protocolo británico PAS 110 (Por sus siglas en inglés “Publicly Available Specification”), en el cual, se citan los pasos a seguir para la obtención de fertilizantes provenientes de la digestión anaerobia (PAS-110, 2010). Como se puede observar en la Tabla 16, los requisitos de calidad de los fertilizantes producidos en países europeos, son más estrictos que los requisitos citados en las normas nacionales. Esto quiere decir que deberá hacerse una revisión a la normativa local para definir los límites en México, para que estos productos puedan competir en el mercado nacional e internacional.



Tabla 16. Límites Máximos permisibles de metales pesados en biosólidos (mg/kg de materia seca)

Metal	PAS 110	NOM 004
Cadmio	1.5	39 - 85
Cromo	100	1200 - 3000
Cobre	200	1500 - 4300
Plomo	200	300 - 840
Mercurio	1	17 - 57
Nickel	50	420
Zinc	400	2800 - 7500

Los productos que no cumplan con las características mínimas de calidad deberán ser llevados a disposición final lo cual se aborda a continuación.

### 3.8.8 Disposición final.

El tratamiento de la FORSU vía DA ofrece la oportunidad de disminuir el volumen que ocupa ésta fracción en los sitios de disposición final obteniendo a la par beneficios de los productos obtenidos durante y después del tratamiento. Sin embargo, si estos productos no cumplen con los requisitos de seguridad necesarios, deberán someterse a un tratamiento posterior para ser llevados a disposición final. (Al Seadi, 2012)

Para la disposición final del digestato tendrá que considerarse:

- Si el digestato debe ser estabilizado
- Si el digestato debe ser sanitizado
- Si el digestato debe ser procesado antes de disponerlo

Durante la DA, se extrae la misma cantidad de digestato como sustrato se ha ingresado al digestor. El digestato que abandona el digestor se almacena en un tanque, una fracción se vuelve a alimentar al proceso y la otra parte se procesa para la obtención de subproductos y en último caso, se lleva a disposición final



(Borrello, 2011). El digestato puede recircularse varias veces al proceso de DA, con ello se consigue la optimización del proceso y una apropiada eficiencia en cuanto al uso de recursos. Al recircular el digestato, será necesario contar con tanques para su almacenamiento temporal, los cuales, deberán de estar diseñados en función de las características del digestato. La materia prima (FORSU), y todos los pasos a seguir hasta la producción del digestato deberán estar aislados entre sí para evitar la contaminación cruzada (PAS-110, 2010).

Ahora bien, partiendo de la tecnología de DA seleccionada (seca o húmeda), se obtendrán en mayor cantidad digestato sólido o líquido y la forma de disponer de cada uno de estos digestatos será diferente. En el caso del digestato sólido, se tendrá que almacenar en contenedores o bodegas separadas del proceso y de la materia prima, para el digestato líquido se tendrá que contar con tanques o lagunas artificiales, en ambos casos el digestato se somete a un periodo de estabilización, algunas veces este puede incluir técnicas de sanitizado como la pasteurización o simplemente la estabilización aerobia (Al Seadi, 2012).

La correcta disposición final de los residuos de la DA, es responsabilidad de quienes producen estos residuos. En México se cuenta con la NOM-004-SEMARNAT-2012 para lodos y biosólidos generados por el tratamiento de aguas residuales, en ella se estipula que para la disposición final de los lodos y biosólidos éstos deben de cumplir con la especificación 4.1 (constancia de no peligrosidad SEMARNAT-07-007) y con los límites máximos permisibles para el contenido del indicador de contaminación, patógenos y parásitos establecidos en la tabla 2 para clase C (usos agrícolas, forestales y mejoramiento de suelos). Los sitios para la disposición final de los lodos y biosólidos, serán los que autorice la autoridad competente, conforme a la normatividad vigente en la materia.

En países europeos en los cuales se ha desarrollado la tecnología de DA, existen compañías que se encargan por completo de la disposición final del Digestato. Estas compañías recolectan y procesan el digestato (sólido y/o líquido)



para obtener los subproductos comercializables que se han mencionado anteriormente (Digestate-Solutions, 2013).

En el caso de la disposición final en México, no se ha desarrollado un sector que se encargue exclusivamente de la disposición final de los residuos de la DA. Por este motivo, las plantas de biogás en territorio nacional tendrán que hacerse cargo de la disposición final del digestato producido durante el proceso. Por este motivo, es muy importante que en el diseño de una planta de biogás, se consideren todos los componentes de la instalación, la obra civil y la mano de obra local, dedicados para el tratamiento o disposición final del digestato.

### 3.8.9 Impacto ambiental.

---

Por medio de la DA, se consigue la optimización sobre el manejo de la FORSU, con lo cual se obtienen los siguientes beneficios ambientales:

- Los residuos orgánicos, que son el componente más reactivo en los residuos no peligrosos, son estabilizados a través de la descomposición controlada de manera más rápida que cuando se dispone en un sitio de disposición final.
- La descomposición genera gases contribuyentes al calentamiento global, éstos pueden ser capturados y aprovechados.
- El producto resultante del tratamiento puede utilizarse como un acondicionador de suelo que no dañe el medio ambiente, para promover la vegetación. Esta situación incrementará el valor ambiental y estético del área, creando una zona de amortiguación alrededor del sitio de disposición final o incluso se podrá utilizar como herramienta agrícola dependiendo de las características finales que este tenga.

El mayor aporte ambiental de la DA es entonces la reducción de emisiones de gases invernadero a la atmósfera. Además de la obtención y el uso de energía eléctrica que a su vez disminuye la emisión de más de estos gases derivados de



la combustión de hidrocarburos para la generación eléctrica tradicional. De igual manera, gracias a la DA se reduce el volumen de residuos generados por la actividad humana y se aprovechan éstos mismos.

El uso del digestato producido mediante DA conlleva también beneficios ambientales. El cambio de los fertilizantes minerales por los orgánicos puede reducir costes en los cultivos, al mismo tiempo, la menor producción de fertilizantes minerales de síntesis ayuda a la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Por último, la disponibilidad del digestato y la posterior producción de fertilizante permite la restauración de suelos erosionados así como la conservación de los suelos de cultivo. La forma más sencilla e inmediata de valorización de cualquier residuo orgánico es la aplicación directa del mismo al suelo agrícola, pero debe de existir una evaluación previa del valor fertilizante de estos materiales y sus efectos sobre las plantas y el suelo (Vila, 2009).

#### Efectos en las propiedades del suelo

La proporción de digestato aplicado al suelo no debe exceder los requerimientos de nutrientes por parte de los cultivos y para ello será necesario que se considere un análisis del suelo. El digestato es un material complejo, por este motivo, su uso tiene distintos efectos físicos, químicos y biológicos sobre el suelo. Dependiendo del tipo de suelo sobre el que se aplique el digestato estos efectos pueden ser benéficos o nocivos (Digestate-Solutions, 2013). A continuación se discuten algunos de los efectos que el digestato tiene sobre el suelo.

- 1) *pH del suelo.*- Se ha determinado que la aplicación a largo plazo del digestato sobre el suelo (M. Odlarea, 2008), no modifica su pH más de media unidad. El pH del digestato generalmente será alcalino sin embargo, el digestato se considera como una mezcla coloidal en la cual se incluyen algunos ácidos



orgánicos. Por estos motivos es conveniente monitorear el pH del suelo en el cual se aplica el digestato (Makádi, 2012).

II) *Contenido de macroelementos del suelo.*- Los macroelementos (N, P y K) son elementos que se consideran esenciales para la vida o para la subsistencia de organismos determinados. Estos elementos, presentes en el digestato, guardan cierto equilibrio con el cual se debe de tener cuidado. El digestato principalmente contiene N, este elemento se presenta en el suelo como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), mediante el proceso de desnitrificación este se fija al aire como  $\text{N}_2$ . Un exceso de nitrógeno en el suelo podría provocar la filtración de éste al manto freático. De igual manera la presencia del fósforo y el potasio son necesarios en el suelo y el exceso de estos no permitirá la correcta fijación de ellos en los ciclos vitales (Gerardi, 2003).

III) *Contenido de microelementos del suelo.*- El control de calidad del digestato estipula los límites máximos permisibles de metales pesados y otros compuestos inorgánicos presentes en el digestato. Si existe un buen control de calidad en el digestato, estos elementos no representan ningún problema. Sin embargo, la inclusión excesiva de estos elementos en el suelo podría ser causa de contaminación del mismo por lo que se debe de contar con un buen control de calidad del digestato (Gerardi, 2003).

IV) *Contenido de materia orgánica del suelo.*- El digestato contiene cadenas de ácidos grasos volátiles (C2-C5) los cuales pueden ser descompuestos en pocos días al estar en el suelo. La descomposición de estas cadenas lleva a la mineralización del carbono la cual es benéfica .

---

### 3.9 Fertilizantes

---

Los suelos contienen todos los elementos esenciales que las plantas requieren para su desarrollo y reproducción; sin embargo, en la mayoría de los



casos, no en las cantidades suficientes para obtener rendimientos altos y de buena calidad, por lo que es indispensable agregar los nutrimentos por medio de fertilizantes.

Los fertilizantes se deben seleccionar en función de su disponibilidad, costo, concentración, ion acompañante (se refiere a otros nutrimentos diferentes del N, K y P), índice salino (efecto en la presión osmótica del suelo), índice de acidez (efecto en el pH del suelo), facilidad de manejo (transporte, almacenamiento y aplicación) y compatibilidad para hacer mezclas. Dependiendo del tipo de fertilizante, cultivo y momento de aplicación, el fertilizante se puede aplicar en banda o al voleo, inyectando directamente al suelo o al tronco de un árbol, asperjando al follaje o mediante el agua de riego. En la Tabla 17 se presentan cantidades de nutrimentos requeridas para la cosecha de diversos granos.

Tabla 17. Requerimiento de nutrimentos (kg) para producir una tonelada de grano (SAGARPA, 2012)

<b>Requerimiento de nutrimentos (kg) para producir una tonelada de grano</b>					
<b>Cultivo</b>	<b>N</b>	<b>P2O5</b>	<b>K2O</b>	<b>Mg</b>	<b>S</b>
Maíz	23.8	10.2	23.8	5.8	2.9
Soya	87.5	16.1	56.9	6.7	5.6
Algodón	160	48	140	21.3	24
Trigo	34.6	11.2	38.3	3.5	4.2
Sorgo	29.8	10.5	30	5	4.8
Arroz	16	8.6	24	2	1.7
Cebada	31.3	11.5	31.3	3.5	4.2
Frijol	17.2	4.4	18.9	2.2	-

La dosis de nutrimento a aplicar se obtiene al considerar el suministro del suelo, la demanda del cultivo para el rendimiento esperado y la eficiencia de recuperación del fertilizante (fracción del fertilizante que no se filtra a las capas inferiores de suelo). En la actualidad, solo la determinación química de N inorgánico ( $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ ) en el suelo, es considerada una medición de la cantidad



de N disponible para el cultivo. Para los otros nutrimentos existen publicaciones especializadas que indican la cantidad equivalente de nutrimento disponible para un cultivo determinado en función del análisis del suelo. A continuación se presenta un ejemplo para calcular la dosis de N suministrada para un cultivo de maíz (SAGARPA, 2012).

Ejemplo para calcular dosis de fertilizantes (SAGARPA, 2012).

El análisis del suelo reporta 5 ppm de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (N en forma de amonio) y 10 ppm N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (N en forma de nitrato). Considerando una capa arable de 20 cm de profundidad y una densidad del suelo de 1 g/cm<sup>3</sup>, entonces el suministro de N de dicho suelo es de 2 x (5+10) =30 kg de N/ha.

Si se pretende obtener una producción de 5 ton de grano/ha, la demanda de N reportada en la Tabla 17 es de 23.8 kg de N/ha, por lo tanto para este rendimiento se necesitan 119 kg de N/ha. La eficiencia de recuperación del N es de 50 % en promedio.

$$\text{Dosis de N} = \frac{\text{Demanda en kg} - \text{Suministro en kg}}{\text{Eficiencia del fertilizante}} = \frac{119 - 30}{0.50} = 178 \text{ kg N/ha}$$

Por último queda calcular el porcentaje de nitrógeno contenido en el fertilizante para la aplicación de la dosis final, suponiendo una concentración de 46% de N en el fertilizante la dosis a aplicar será la siguiente:

$$\text{Dosis de Fertilizante a aplicar} = \frac{\text{Dosis de N}}{\text{Fracción de N en el fertilizante}} = \frac{178}{0.46} = 387 \text{ kg/ha}$$



Los productos fertilizantes abarcan los fertilizantes nitrogenados, el abono potásico y los fertilizantes fosfatados (por ejemplo, la fosforita molida) (WRAP, 2011). Los fertilizantes tienen varios usos por ejemplo, fertilizante granulado para uso general o nutriente líquido para cultivos. En la Tabla 18, se presenta un comparación entre un fertilizante nitrogenado para uso en jardín contra un posible fertilizante derivado del digestato.

Tabla 18. Comparación de digestato vs fertilizantes sólidos para jardín (WRAP, 2011)

Parámetro (%MS*)	Digestato	Fertilizantes
N Total	11.9 - 20.5	5 -6
P Total	0.3 - 2.0	2.2 - 5
K	1.4 - 9.3	5 - 10
Mg	0 - 0.48	1.8 - 4
Cu	0.0019 - 0.0043	0 - 0.017
Mo	0.0027 - 0.003	n.d.
Zn	0.007 - 0.014	n.d.

\*MS = Materia Seca

Cabe destacar que las propiedades nutricionales así como los requerimientos físicos del suelo varían dependiendo de la región por lo cual se debe de conocer las características del suelo de igual manera que las características de los acondicionadores de suelo. En la Tabla 19, se presentan datos de la FAO sobre el consumo de fertilizantes en diferentes países incluido México (BM, 2010).



Tabla 19. Consumo de fertilizantes por país (BM, 2010)

<b>Consumo de fertilizantes (kilogramos por hectárea de tierras cultivables)</b>		
<b>País</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
México	54.8	61.7
EU	107	120.5
Brasil	108.4	142.5
Colombia	489.5	578.6
China	578.4	548.3

El consumo de fertilizantes en México, no es tan alto como en otros países por lo que es necesario aumentar el consumo de este tipo de productos en el mercado nacional o en todo caso, estos productos tiene la posibilidad de ser exportados.



## 4. METODOLOGÍA

Con base en la información recopilada durante la ejecución de esta tesis, se realizó un análisis de las diferentes alternativas de manejo que existen cuando se dispone de digestato. La Figura 8, muestra un esquema de la metodología empleada para este trabajo de tesis.

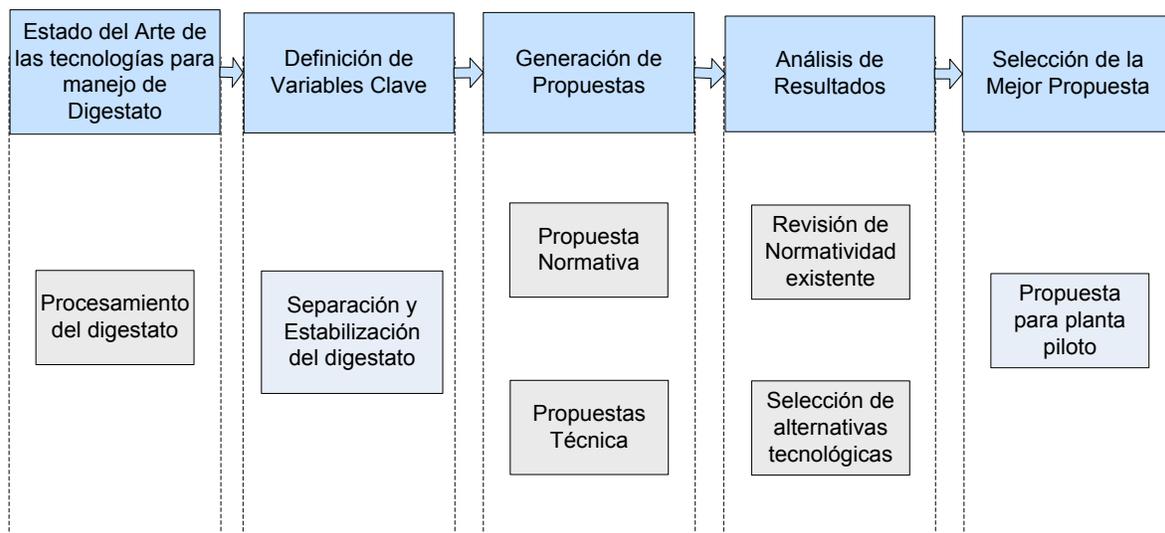


Figura 8. Metodología del Trabajo de Tesis.

La elaboración de esta tesis inició con la recopilación de información, del estado actual de la tecnología empleada para el procesamiento del digestato derivado de la digestión anaerobia de la FORSU. De lo cual, se determinó que el uso principal que se da al digestato es como fertilizante.

Posteriormente, se identificó que el procesamiento para la elaboración de fertilizantes consiste principalmente en la separación sólido-líquido y la estabilización del digestato. Además, se encontró que la calidad del digestato será determinada por la normativa local, la cual, no se ha especificado en México.



A raíz de estos antecedentes, se elaborará una propuesta normativa para la especificación de fertilizantes derivados de la DA, así como una propuesta técnica para el procesamiento del digestato derivado de una planta piloto de DA, de la cual se seleccionó la mejor propuesta para la planta piloto tomando en cuenta aspectos técnicos, económicos y ambientales. Los resultados se presentan a continuación.

## 5. RESULTADOS

Se determinó que el principal uso del digestato es como fertilizante o mejorador de suelos, por otro lado, para la disposición final de éste, será necesario un proceso de estabilización, previo a su depósito en sitios controlados, ya sea en rellenos sanitarios (digestato seco) o por vertidos (digestato líquido). Cabe destacar que a raíz del estudio del estado del arte del procesamiento del digestato se obtuvieron los siguientes resultados:

- El digestato podrá utilizarse sólo si su calidad es la adecuada y ésta será determinada según la normativa local.
- La calidad del digestato está ligada directamente a la calidad del sustrato que se alimenta al proceso de DA.
- La DA juega un papel crucial sobre las características finales del digestato.
- Las condiciones de operación de la DA pueden modificarse para obtener un producto con las propiedades deseadas.
- Las tecnologías para el procesamiento del digestato constan de equipos de separación y concentración como filtros prensa, centrífugas, sistemas de membranas ósmosis inversa o evaporación.



- La disposición final del digestato se realizará únicamente si la calidad del digestato no es la indicada y no existe posibilidad de procesamiento.
- Deberá considerarse que es necesario que el digestato pase por un proceso de estabilización antes de llegar a su disposición final para evitar riesgos sanitarios.
- La calidad mínima que debe tener el digestato será definida bajo la normativa local.

El escenario más común, para el manejo de digestato, será en el que se implementa un tratamiento posterior a la DA, con el fin de aumentar la calidad o disminuir su volumen. El tratamiento del digestato funcionará para producir fertilizantes así como para prepararlo para su disposición final.

El tratamiento o procesamiento del digestato consta de la estabilización para detener la degradación biológica y la separación sólido/líquido con el fin de concentrar los nutrientes presentes en ambas fases. Las características que el digestato debe tener para ser utilizado como fertilizante o mejorador de suelo se determinan en función de su calidad. La calidad mínima del digestato, se mide en función de los límites permisibles de impurezas físicas, químicas y biológicas, presentes en el digestato, así mismo, se debe de cumplir con ciertos parámetros para poder utilizarse como fertilizante. Cabe destacar que estas características están ligadas a las propiedades iniciales del sustrato que se alimenta a la DA. Los parámetros que determinan la calidad del digestato, son los siguientes:

- Contenido de nutrientes
- Humedad
- Sanitizado
- Estabilizado
- Pureza
- pH
- Homogeneidad
- Materia orgánica



En México, aún no se ha expandido el uso de la digestión anaerobia, por lo cual, no se cuenta con normas de especificación para la optimización del proceso así como el manejo de sus productos. Por este motivo, se generó una propuesta de especificación para el digestato obtenido durante la DA de la FORSU, con base en la normativa que podría ser aplicable localmente para este producto así como la normativa existente en países europeos donde la DA se ha desarrollado ampliamente.

Por otro lado, se encontró que el tratamiento que se le dé al digestato influirá sobre las propiedades de éste, por este motivo se analizaron tres equipos para el procesamiento del digestato, con el fin de ejemplificar como la selección de la tecnología será determinante para la producción de fertilizantes.

Los resultados obtenidos constan de una comparación entre diferentes equipos para procesamiento del digestato y una propuesta de especificación para el digestato derivado de la DA de la FORSU. A continuación se desarrollan estas propuestas.



---

## 5.1 Propuesta normativa

---

### ESPECIFICACIONES PARA DIGESTATO ENTERO, LÍQUIDO Y SÓLIDO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

En México, no se cuenta con una industria de digestión anaerobia establecida y mucho menos con normativa referente a los productos derivados de ésta. Para el desarrollo de la DA en nuestro país y la comercialización de los productos obtenidos por este proceso, será necesario contar con normas donde se estipulen las características de calidad necesarias para que estos productos puedan comercializarse.

Los grandes productores europeos, que cuentan con una industria de digestión anaerobia desarrollada, tienen también normas con las especificaciones necesarias sobre la producción del digestato derivado de este tratamiento. Para poder competir con estos productores será necesario instalar un sistema de calidad similar al que ellos tienen. En esta tesis se presenta una propuesta para especificación del digestato basada tanto en estas normas europeas como en las normas nacionales (PAS-110, 2010).

#### A.- Alcance

---

Esta especificación aplicará para el digestato entero (DE), líquido (DL) y sólido (DS) derivado de la digestión anaerobia de la fracción orgánica de residuos urbanos. En ella se especifican:

- Control en las materias primas y gestión del proceso de digestión anaerobia



- La calidad mínima del digestato para su uso agrónomo
- La información que es necesaria para la venta del digestato
- Los requerimientos para el digestato que no esté en conformidad a esta norma

## B.- Normas de referencia

Las siguientes normas de la Tabla B.1 son de utilidad para la aplicación de este documento para llevar a cabo caracterización del digestato, conocer los límites permisibles de impurezas así como los requerimientos para su aprovechamiento y disposición final.

Tabla B.1 Normas de Referencia para las especificaciones del digestato derivado de la DA de FORSU

Norma	Descripción
NOM-001-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
NOM-004-SEMARNAT-2002	Lodos y biosólidos - Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
NMX-AA-15-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método de cuarteo.
NMX-AA-16-1984	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales - determinación de humedad.
NMX-AA-18-1984	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales - determinación de cenizas.
NMX-AA-19-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales - Muestreo- Determinación del peso volumétrico "In situ".



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

Norma	Descripción
NMX-AA-21-1985	Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales - Determinación de materia orgánica.
NMX-AA-22-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales - Selección y cuantificación de subproductos.
NMX-AA-24-1984	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales - determinación de nitrógeno total.
NMX-AA-25-1984	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales - determinación del pH - método potenciométrico.
NMX-AA-33-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos - Sólidos Municipales - Determinación de poder calorífico superior.
NMX-AA-46-1981	Análisis de agua - Determinación de Arsénico.
NMX-AA-52-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos - Sólidos Municipales - Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis.
NMX-AA-57-1981	Análisis de agua - Determinación de Plomo - Método colorimétrico de la ditizona.
NMX-AA-060-1981	Análisis de agua - Determinación de Cadmio - Método colorimétrico de la ditizona.
NMX-AA-61-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos - Sólidos Municipales - Determinación de la generación.
NMX-AA-64-1981	Análisis de agua - Determinación de Mercurio - Método colorimétrico de la ditizona.
NMX-AA-66-1981	Análisis de agua - Determinación de Cobre - Método colorimétrico de la neocuproina.
NMX-AA-67-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos - Sólidos Municipales - Determinación de la relación carbono/nitrógeno.
NMX-AA-68-1986	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos - Sólidos Municipales - Determinación de hidrogeno a partir de materia orgánica.
NMX-AA-78-1982	Análisis de agua - Determinación de Zinc
NMX-AA-90-1086	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos - Sólidos Municipales - Determinación de neblina de ácido fosfórico en los gases que fluyen por un conducto.
NMX-AA-92-1984	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos Municipales -Determinación de azufre.
NMX-AA-044-SCFI-2001	Análisis de agua - Determinación de Cromo hexavalente en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba.
NMX-AA-048-SCFI-2006	Residuos - Determinación de metales por espectrofotometría de absorción atómica en productos de extracción de constituyentes tóxicos (PECT) - Método de prueba
NMX-AA-103-SCFI-2006	Residuos - Determinación de compuestos orgánicos volátiles por cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas en productos de extracción de constituyentes tóxicos (PECT) - Método de prueba



Norma	Descripción
NMX-AA-132-SCFI-2006	Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.
NMX-Y-035-1988	Fertilizantes - Líquidos, polvos y gránulos procedimiento de muestreo.
NOM-021-RECNAT-2000	Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis
NOM-083-ECOL-1993	Que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales.
PROY-NOM-210-SSA1-2013	Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos y toxinas microbianas.

### C.- Definiciones

Se deben de incluir algunas definiciones importantes para el entendimiento de estas normas:

- 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 conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven;
- Residuos Sólidos Urbanos (RSU).- 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, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole;
- Digestión Anaerobia (DA) .- tratamiento biológico en ausencia de oxígeno de los residuos orgánicos, para la obtención de biogás.



- Digestato.- Residuo sólido o líquido de la digestión anaerobia el cual puede ser tratado para su uso o disposición final.

Estos son solo algunos ejemplos de las definiciones que debe incluir una norma de este tipo, las definiciones deben ser tan amplias como sea posible para el entendimiento del público en general.

#### D.- Materia Prima / Sustrato

---

Los productores Europeos, cuentan con un convenio donde se estipulan los materiales que pueden utilizarse como materia prima para la DA, los cuales están permitidos para su procesamiento y cuyos residuos permanecen en el digestato.

Los materiales utilizados, deben ser: separados en fuente, biodegradables y/o una mezcla de ambos. No se deben de incluir materiales contaminados. Algunos otros materiales como alimentos procesados, residuos de alimentos y otros tipos de residuos de origen animal solo se aceptaran para el proceso de DA si han sido previamente tratados. Los pretratamientos de la materia prima, deberán remover cualquier material no biodegradable. Así mismo es de suma importancia llevar un control del sustrato que se alimente a la DA.

Para llevar un control sobre los residuos que se recibirán como sustrato para la DA se recomienda tomar los siguientes datos como descripción de la materia prima.

- Origen: nombre y dirección del productor del sustrato/ compañía que lo produce.
- FORSU: área de recolección; si es separada en fuente o no; tipo de contenedores de recolección (bolsas de plástico, papel, botes, otros) .
- Potencial de Metano.



- Descripción: color, textura, consistencia, hedor, etc.
- Caracterización química: pH, contenido de materia seca, contenido de materia orgánica, macroelementos y microelementos.
- Contenido de contaminantes químicos.
- Contenido de patógenos.
- Disponibilidad: periodo en el que el material será provisto.
- Cualquier otra información relevante (transporte, manejo especial, etc.

#### E.- Sistema de control de calidad

---

En caso de querer comercializar productos derivados del digestato, será necesario instalar y mantener un sistema de control de calidad. El fin de este sistema es asegurar la calidad de los productos de la DA. Este sistema deberá contar con las siguientes características:

#### Política de calidad

Para todo tipo de digestato los productores deberán cumplir con los requerimientos de calidad mínima estipulados en la normativa aplicable, además de aquellos otros que los consumidores requieran. La política de calidad debe de incluir, datos sobre el sitio de origen del digestato, el tipo de proceso empleado y el tipo de producto obtenido.

#### Personal capacitado

La política de calidad así como toda la información sobre el sistema de calidad debe ser informada a todas las personas que operen en la planta de DA. Todo el personal debe tener conocimiento de la importancia de sus actividades y



de cómo estas contribuyen a la obtención de productos con las cualidades indicadas. Todo el personal debe recibir capacitación para operar dentro y fuera de la planta de DA, esto se puede lograr por medio de pláticas y entrenamientos.

### Documentación

Es importante mantener un registro del sistema de control de calidad con el cual se puedan determinar fallas en la producción y, así mismo, se puedan resolver los problemas que afecten al producto final. Además, estos documentos serán de utilidad durante las auditorías.

### Auditorías

Los productores deberán programar auditorías internas, con el fin de llevar un registro continuo sobre el funcionamiento del sistema de control de calidad. Las auditorías deben de planearse tomando en cuenta el status de cada sección del proceso así como su importancia dentro del mismo. Los criterios, la frecuencia y demás temas asociados a la auditoría deben definirse con respecto a los resultados que se deseen obtener. Por último la selección de los auditores deberá asegurar la objetividad e imparcialidad por el bien del proceso.

### F.- Validación

---

En un contexto de conformidad con relación a la calidad, es necesario tomar muestras del digestato entero (DE) así como los productos separados, digestato líquido (DL) y digestato sólido (DS). Este muestreo es solo necesario en caso de que se desee colocar el digestato en el mercado como un fertilizante. Para llevar a cabo la documentación de este muestreo se hacen las siguientes recomendaciones:



- a) Fecha de muestreo
- b) Tipo de digestato muestreado (DE, DL, DS)
- c) Código o referencia del lote de digestato muestreado
- d) Nombre del lugar donde se produjo el digestato
- e) Nombre del encargado del muestreo

Las pruebas realizadas durante el muestreo serán de utilidad para determinar si el digestato cumple con las condiciones mínimas de calidad, necesarias para su uso como fertilizante. A continuación se presentan las características con las que debe de contar el muestreo.

Tabla F.1 Parámetros de caracterización

Parámetros	Métodos de prueba	Límites Permisibles
pH	NMX-AA-013-SCFI-2006	7 - 12
Nitrógeno Total	NMX-AA-026-SCFI-2001	
Fosforo Total	NMX-AA-029-SCFI-2001	
Potasio Total	NMX-AA-051-SCFI-2001	Declarado como característica de producto final.
Nitrógeno amoniacal	NMX-AA-026-SCFI-2001	(Ver Tabla 18)
Cloro soluble en agua	NMX-AA-051-SCFI-2001	
Sodio soluble en agua	NMX-AA-051-SCFI-2001	
Materia Seca (Sólidos Totales)	NMX-AA-034-SCFI-2001	
Materia orgánica (Sólidos Volátiles)	NMX-AA-034-SCFI-2001	

El proceso de DA así como los productos obtenidos, deben ser validados en conformidad con las especificaciones indicadas en la normativa local. Una vez que se ha realizado esta validación deberá guardarse un registro, en el cual, los resultados correspondan a los límites permisibles de composición de los productos. Esta validación aplicará para todo tipo de digestato (DE, DL, DS) producidos a partir de materias primas aprobadas por la normativa. Los



parámetros que deben ser examinados para la determinación mínima de calidad se presentan a continuación en las Tablas F.2, F.3, F.4 y F.5.

Tabla F.2 Calidad mínima del digestato, contenido de patógenos.

Parámetros	Métodos de prueba	Límites Permisibles
Especies indicadoras de patógenos humanos y animales.	PROY-NOM-210-SSA1-2013 NOM-004-SEMARNAT-2002	En función del tipo y clase de biosólidos

Tabla F.3 Calidad mínima del digestato, contenido de elementos tóxicos.

Parámetros	Métodos de prueba	Límites Permisibles NOM-004-SEMARNAT-2002
Determinación de metales por espectrofotometría de absorción atómica en productos de extracción de constituyentes tóxicos (PECT).	NMX-AA-048-SCFI-2006	Dependiendo del tipo de metal
Determinación de compuestos orgánicos volátiles por cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas en productos de extracción de constituyentes tóxicos (PECT).	NMX-AA-103-SCFI-2006	Dependiendo del compuesto
Arsénico (As)	NMX-AA-46-1981	41-75 mg/kg
Cadmio (Cd)	NMX-AA-060-1981	39-85 mg/kg
Cromo (Cr)	NMX-AA-044-SCFI-2001	1200-3000 mg/kg
Cobre (Cu)	NMX-AA-66-1981	1500-4300 mg/kg
Plomo (Pb)	NMX-AA-57-1981	300-840 mg/kg
Mercurio (Hg)	NMX-AA-64-1981	17-57 mg/kg
Niquel (Ni)	NMX-AA-76-1982	420 mg/kg
Zinc (Zn)	NMX-AA-78-1982	2800-7500 mg/kg



Tabla F.4 Calidad mínima del digestato, Estabilidad.

Parámetros	Métodos de prueba	Límites Permisibles
Ácidos grasos volátiles	NMX-F-017-SCFI-2011	-
Potencial de biogás residual	NOM-083-SEMARNAT-2003	-
Determinación de Inflamabilidad	NMX-AA-041-SCFI-2006	-
Determinación de reactividad	NMX-AA-043-SCFI-2006	-

Tabla F.5 Calidad mínima del digestato, contenido de impurezas físicas.

<b>Contaminantes Físicos</b>		
Parámetros	Métodos de prueba	Límites Permisibles
Vidrio, Metal, Plástico Totales > 2mm	REA-DM-PC&S. Methodology for determination of physical contaminants and stones in digestates, Renewable Energy Association, London.	-
Piedras > 5mm		

#### H.- Disposición Final

La disposición final del digestato líquido se hará conforme a las normas oficiales mexicanas: NOM 001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, en aguas y bienes nacionales así como para su uso como agua tratada destinada a servicios públicos. El digestato sólido que se lleve a disposición final, será clasificado según la LGPGIR y podrá llevarse a los sitios de disposición final .



## 5.2 Propuesta Técnica de un Sistema de Procesamiento del Digestato

En México, durante muchos años, la producción y distribución de fertilizantes, estuvieron controladas por el Estado a través de FERTIMEX. A inicios de la década de los noventas, se llevó a cabo la privatización de esta subsidiaria (Avila, 2006). A partir de esta política se originaron problemas ya que se incumplieron las condiciones comprometidas para el suministro de amoníaco por parte de Pemex, lo cual llevó al cierre parcial de plantas productoras de fertilizantes. Finalmente, para el año 2000, se registró una caída en la producción de fertilizantes equivalente a un 46% con respecto a 1995 (Ávila, 2001). En la Tabla 20 se muestra un histórico donde puede verse la caída de la producción de fertilizantes.

Tabla 20. Producción de Fertilizantes en México

Año	Nitrogenados (ton)	Fosfatados (ton)
1980	4 445 572	744 902
1990	4 267 131	1 256 408
1997	3 495 713	847 460
2000	1 459 799	963 432
2001	1 306 621	774 892
2002	662 710	242 268
2003	658 091	221 297
2004	834 259	309 162
2005	796 712	298 510
2006	735 702	333 616
2007	797 689	353 479
2008	750 712	329 193

Fuente: Estadísticas históricas de México, INEGI, 2009

Actualmente, existen las condiciones económicas y de mercado propicias para reactivar la producción de fertilizantes en México. Debido a la creación de gasoductos, Pemex reactivará la producción de gas y de amoníaco en México lo cual, permitirá, a su vez, reactivar la producción de fertilizantes y reducir importaciones (Perea, 2013).



El ingreso de Pemex al mercado de fertilizantes, en alianza estratégica con la iniciativa privada, no asegura que los agricultores puedan adquirir los fertilizantes. La producción de fertilizantes, está íntimamente relacionada con la actividad agrícola y la producción de alimentos. Es prioritario conocer el mercado de los fertilizantes por ser un insumo estratégico que sirve de arrastre al uso de otros y promueve el crecimiento del mercado de los otros insumos y el agrícola (Ávila, 2001). Por este motivo, es recomendable impulsar programas estatales de consumo de fertilizantes a precios subsidiados, buscando un impacto positivo en la producción agrícola y en el bolsillo de los agricultores.

### 5.2.1 Definición del Producto

---

En esta propuesta, se pretende demostrar la viabilidad de fabricar abono orgánico a partir del digestato derivado de la DA (vía húmeda) de la FORSU.

De acuerdo con la norma para productos orgánicos un fertilizante orgánico, es un insumo de nutrición vegetal cuya función principal es aportar nutrientes para las plantas, los cuales contienen carbono de origen animal y/o vegetal (DOF-07-02, 2006). En esta norma se especifican también los límites máximos permisibles para metales pesados así como las especificaciones de etiquetado de producto final. Es de suma importancia que el fertilizante producido a partir del digestato cumpla con especificaciones que hagan de este producto un insumo de calidad comparable con los estándares mundiales.

Dependiendo de las características finales del digestato, después de la DA, éste deberá ser procesado de diferente forma, ya sea si se necesita o no de estabilización, o si es necesario disminuir su humedad. El procesamiento del digestato tiene como finalidad mejorar la calidad final del fertilizante orgánico, según la cual, pueda ser aprovechado como se presenta en la Tabla 21 en correspondencia con las normas oficiales para los biosólidos resultantes del tratamiento de aguas residuales por medio de la DA.



Tabla 21. Aprovechamiento de biosólidos NOM-004-SEMARNAT-2002

Tipo	Clase	Aprovechamiento
EXCELENTE	Clase A	<ul style="list-style-type: none"><li>• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.</li><li>• Los establecidos para clase B y C</li></ul>
EXCELENTE o BUENO	Clase B	<ul style="list-style-type: none"><li>• Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación</li><li>• Los establecidos para clase C</li></ul>
EXCELENTE o BUENO	Clase C	<ul style="list-style-type: none"><li>• Usos forestales</li><li>• Mejoramientos de suelos</li><li>• Usos agrícolas</li></ul>

Las propiedades del fertilizante orgánico que se pretende producir se encuentran estrechamente relacionadas a las características iniciales de la FORSU que se alimenta a la DA, el análisis de esta tesis se basa en la información obtenida en la caracterización de la FORSU, durante la ejecución del proyecto FORDECyT clave: 174710 “Generación de un sistema piloto de tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales RSOM”. De esta, caracterización, se obtuvieron los valores máximos, mínimos y promedio de algunos parámetros de la FORSU generada en el D.F. misma que se ocupará como materia prima una vez que se construya la planta piloto de este proyecto, éstos parámetros se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Caracterización de la FORSU en sitios de muestreo del D.F.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio
Humedad (%)	73.7	82.9	77.6
P-T (g/kg)	0.7	1.8	1.2
N-K (g/kg)	5.2	10.5	6.8

(Durán, 2013)

El contenido de nitrógeno y fósforo es de suma importancia si se planea utilizar el digestato como fertilizante. La FORSU contiene entre 1 y 10 g/kg de nutrientes (enfocándonos en el N y P), sin embargo, esta cantidad disminuye



durante el procesamiento del digestato, motivo por el cual, se analizaron equipos empleados comúnmente para este procesamiento, considerando la remoción de humedad y estabilización del digestato este análisis se presenta más adelante.

### 5.2.2 Estudio de mercado preliminar

Actualmente el consumo de fertilizantes orgánicos está en aumento debido a la demanda de alimentos orgánicos y sanos para el consumo humano, así como la concientización en el cuidado del ecosistema y del medio ambiente. Los principales productores de fertilizantes orgánicos en México, según la SAGARPA se presenta en la Tabla 23 (SAGARPA, 2014).

Tabla 23. Principales Productores de Fertilizantes Orgánicos en México.

Productora	Descripción	Costo
Agrotech	Derivado de biomasa de cocotero, rico en potasio, mejora el manejo en el tamaño de la planta. Útil en hidroponía como fijador de nutrientes.	Bolsa de 100x15x10 M.N.\$17.00/pza Bolsa de 25x18x15 M.N.\$10.50/pza
Ankarte	Elabora varios productos, entre ellos MICOROOT, producto resultado de la descomposición de materia orgánica minerales y de extractos vegetales. Contiene hongos benéficos.	M.N.\$ 220.00/L
Coirtech	Producto obtenido de la maduración de estopas de coco y la molienda, estandarizada de sus partículas. Contiene hongos benéficos.	Pacas de 200 y 3,300 g Bolsas de 10 a 22 L
Guanomeros	Biofertilizante 100% orgánico certificado, mejorador de suelos, regulador d crecimiento, señalador de energía, protector de enfermedades.	(1, 2, 4, 5, 10, 20, 200 L) M.N. \$ 260/L
Microsoil	Producto líquido grado alimento, formulado en base a bacterias y enzimas naturales.	1-24 L M.N. \$ 560.00 25-250 L M.N. \$ 551.60 (Mayoreo)



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

Productora	Descripción	Costo
Palau Bioquin	Elabora varios productos. Entre ellos ALGAENZIMS. Extracto de Algas Marinas, vigorizante de plantas 100% Orgánico, mejorador de suelos y potenciador de insumos agrícolas, para ser usado en todo tipo de cultivos.	250 mL M.N. \$72.00 1 L M.N. \$240.00 5 L M.N. \$1100.00 20 L M.N. \$4.260.00
Promotora Técnica	Elabora varios productos. Entre ellos NUTRIBIO. Abono microbiótico, regenerador y mejorador de suelos, aporta a los cultivos nutrientes de fácil asimilación, aumenta los niveles de materia orgánica, eleva la fertilidad de los suelos y la disponibilidad de nutrientes.	50 Kg M.N. \$150.00
Humus del Sol	Fertilizante orgánico sólido derivado de la acción digestiva de la lombriz roja californiana y fertilizante foliar lixiviado del proceso de producción de lombricomposta.	50 kg M.N. \$280.00 5L M.N. \$210.00 10 L M.N. \$360.00 20 L M.N. \$650.00
Organic	Inoculante para semillas de maíz y gramíneas en general a base de bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico, fósforo y otros elementos existentes en el suelo.	1 DOSIS = (bolsa de 800 g + 250 mL de adherente) \$160.00 / dosis.
Humus Bioterra	Humus es abono orgánico SÓLIDO y LÍQUIDO generado por desechos de Lombriz Roja Californiana, alimentadas con residuos sólidos orgánicos.	50 kg M.N. \$375.00 20 L M.N. \$800.00 1 m <sup>3</sup> M.N. \$3000.00

Existe una amplia gama de fertilizantes orgánicos en el mercado, en presentaciones sólidas y líquidas, cuyos costos van de \$30.00 a \$200.00 por litro y de \$3.00 a \$150.00 por kilogramo de fertilizante. Los productos más parecidos al que se obtendrá con el digestato son aquellos elaborados por: Ankarte, Guanomeros, Humus del sol y Humus Bioterra, debido a que estos productos son resultantes de la degradación de la materia orgánica y ofrecen beneficios similares a los que se obtendrán con el digestato.



La demanda se define como la cantidad y calidad de bienes y servicios que pueden ser adquiridos en los diferentes precios del mercado por un consumidor o conjunto de consumidores, en un momento determinado. Puede estimarse la demanda como el Consumo Nacional Aparente (CNA) que es la cantidad de determinado bien o servicio que el mercado requiere. En la Tabla 24 se presenta el CNA de Fertilizantes en México calculado de la siguiente forma:

$$\text{Demanda} = \text{CNA} = \text{producción nacional} + \text{importaciones} - \text{exportaciones.}$$

Tabla 24. Histórico de Demanda Nacional Aparente de Fertilizantes en México.

Año	Total Producido	Total Importaciones	Total Exportaciones	Demanda Nacional aparente
1994	3662.22	496.36	795.94	3362.64
1995	3866.26	88.00	934.05	3020.21
1996	4477.45	318.66	1002.63	3793.48
1997	3495.71	546.73	510.25	3532.19
1998	3047.79	999.24	458.02	3589.01
1999	2377.19	1252.33	219.35	3410.17
2000	1459.80	1441.31	38.92	2862.19
2001	1306.62	1470.63	43.13	2734.12
2002	662.71	1470.22	4.43	2128.50
2003	658.09	1574.62	12.11	2220.60
2004	834.26	1622.01	3.57	2452.70
2005	796.71	1716.81	7.42	2506.10
2006	735.70	1656.91	3.77	2388.84
2007	797.69	1669.44	32.68	2434.45
2008	750.71	1,525.35	134.76	2141.30

Fuentes:

Estadísticas históricas de México, INEGI, 2009

Compendio de Estadísticas Ambientales, SEMARNAT, 2010

Puede apreciarse que el consumo de fertilizantes descendió desde 1997 a la fecha, además, las importaciones aumentaron y las exportaciones disminuyeron por lo que podría decirse que la participación de México en mercados



internacionales es casi nula. Sin embargo, aún existe una necesidad por este insumo.

Es necesario realizar un estudio del comportamiento del mercado de fertilizantes actual y futuro, en el cual se apliquen encuestas a los agricultores consumidores de este insumo, el objetivo de estas encuestas será determinar entre otras cosas, los porcentajes de consumo de abono, volúmenes de compra, preferencia en cuanto a presentación y marcas, etc.

Se sabe que la adquisición de fertilizantes por los agricultores es asequible por medio de programas como PROCAMPO, el cual, surge a finales de 1993 como un apoyo compensatorio ante la apertura comercial derivada del Tratado de Libre Comercio de América del Norte, que implicaría una desventaja competitiva para los productores nacionales dados los altos subsidios otorgados a sus contrapartes en los países socios. El objetivo de este programa es complementar el ingreso económico de los productores del campo mexicano mediante el otorgamiento de apoyos monetarios por superficie inscrita al programa. Sin embargo, el consumo de fertilizantes orgánicos no es el esperado debido a que algunos agricultores producen sus propios abonos (Ávila, 2001).

Por último, cabe destacar que existe la posibilidad de financiar proyectos para la producción de fertilizantes por medio de organismos como la Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de mercados Agropecuarios (ASERCA), la cual, a través de los incentivos para la comercialización, busca apoyar a los productores agropecuarios, pesqueros, acuícolas y otros agentes económicos del sector rural para la prevención, manejo y administración de riesgos, a través de instrumentos que atiendan problemas de mercado y de financiamiento, sanidad e inocuidad y ocurrencia de desastres naturales (ASERCA, 2014).



### 5.2.3 Selección de alternativas tecnológicas

Se pretende obtener un fertilizante orgánico por medio del procesamiento del digestato. El procesamiento consta esencialmente de la remoción de humedad, para disminuir el volumen, al mismo tiempo que se concentran los nutrientes, y se realiza la estabilización para detener la descomposición orgánica. A raíz de este procesamiento se obtendrá un fertilizante como producto final y se obtendrán como residuos, principalmente líquidos los cuales pueden recircularse al proceso de DA o en su defecto enviarse a un sistema de tratamiento de aguas residuales. La estrategia para la selección de un tren de procesamiento para el digestato requerirá de hasta cinco etapas de análisis, las cuales se muestran en la Figura 9 (EPA, 1987).

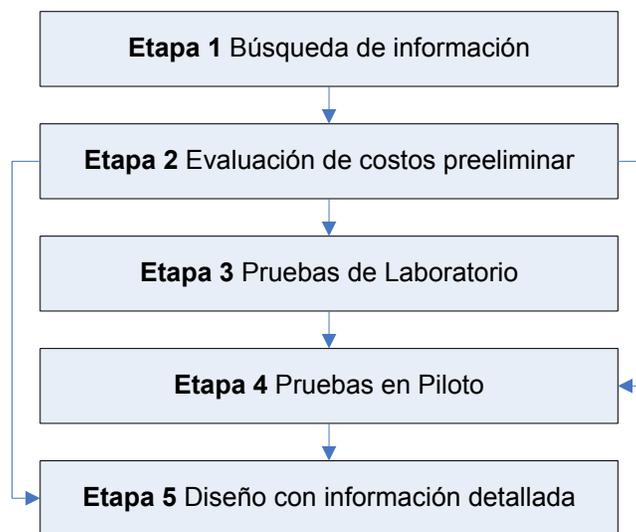


Figura 9. Etapas de análisis en la selección de tecnología para procesamiento del digestato (EPA, 1987).

En esta tesis se cubre la búsqueda de información y la evaluación de costos preliminar, estas etapas servirán como base para la construcción del sistema de procesamiento del digestato de una planta piloto de DA. Se plantea que el procesamiento del digestato sea como se muestra en la Figura 10:

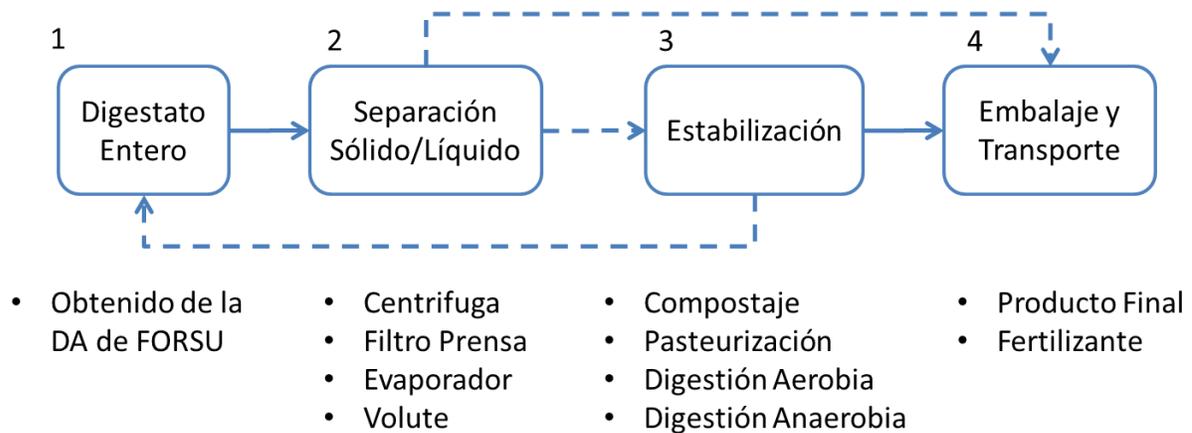


Figura 10. Procesamiento del digestato para la producción del fertilizante.

Puede presentarse el caso de que el orden de procesamiento varíe al no ser necesaria la estabilización, esto debido a que la DA puede fungir como proceso de estabilización o incluso durante la separación el digestato puede ser estabilizado. En todo caso, es recomendable que, ya sea el digestato entero o el fertilizante obtenido, se almacenen por un periodo de al menos 28 días durante los cuales, el digestato se estabilizará por medio de un proceso aerobio.

Antes de elegir los equipos necesarios para procesar el digestato es necesario definir cuál será el uso final del digestato (véase Tabla 21), o en su defecto, la vía por la cual se llevará a disposición final. A continuación se enlistan los principales factores a considerar para definir el objetivo del procesamiento del digestato (Degremont, 2007):

- 1) Análisis de la disposición final.- se deben de tomar en cuenta el sitio donde se llevará a cabo la disposición final así como lo que dice la legislación actual al respecto, es de suma importancia considerar que la legislación puede modificarse y por ello, se debe de procurar que el equipo de procesamiento del



digestato permita adecuaciones que aseguren la operación de la planta aunque la legislación sea modificada.

- 2) ¿Qué clase de fertilizante se desea obtener?.- Existen diferentes clases de fertilizantes procedentes de biosólidos (Clase A, B o C según la NOM-004-SEMARNAT, ver Tabla 21). La selección de tecnología debe realizarse con base en la clase de fertilizante que se desee obtener.
- 3) ¿Qué otras opciones existen, además de la producción de fertilizantes? Debe analizarse las alternativas que existen a la producción de fertilizantes, con el fin de aumentar la rentabilidad del proceso de DA.
- 4) Condiciones de operación.- Se debe de contar con información detallada del proceso que se llevará a cabo. Los principales parámetros que se deben de tomar en cuenta se presentan a continuación:
  - Flujos de proceso
  - Contenido de sólidos totales
  - Horas de operación
  - Humedad del producto final
  - Uso de polímero (en caso de espesamiento)
  - Retención de nutrientes
  - Potencia
  - Consumo de servicios auxiliares
  - Costos de mantenimiento
  - Requerimiento de operadores (automático, semiautomático o manual)

En términos generales, el procesamiento se enfocará, principalmente, en la separación sólido/líquido del digestato entero. Los métodos más comunes para llevar a cabo la separación son el espesamiento (dinámica y floculación), la separación mecánica y la separación térmica. Entre estos métodos, el espesamiento suele ser opcional, sin embargo, es un factor que puede ayudar a disminuir los costos debido a que aumenta la eficiencia de separación



(Degremont, 2007). La siguiente etapa para la evaluación técnica, es una comparación que nos permita determinar cuál de los equipos propuestos se acoplará mejor a las necesidades del proyecto (EPA, 1987).

#### 5.2.4 Caso de Estudio

En el marco del proyecto FORDECyT clave: 174710, se contempla la construcción de una planta piloto de DA en Cuautitlán de Romero Rubio, Estado de México, con una capacidad de tratamiento de aproximadamente media tonelada diaria. A continuación se analiza el procesamiento del digestato para producir fertilizante, con base en este caso de estudio.

Dentro de la ingeniería básica de la planta piloto, se propone que el digestato sea procesado. De este procesamiento se pretende obtener un lodo desaguado, y un líquido filtrado que se llevará a tratamiento. En términos generales, el procesamiento del digestato se presenta en la Figura 11:

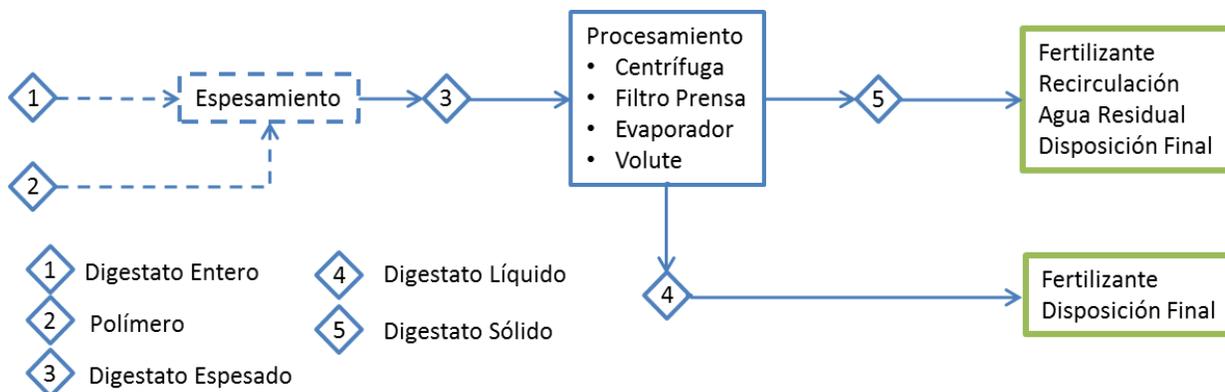


Figura 11. Diagrama de bloques del procesamiento del digestato

En la Figura 11, se propone, que se lleve a cabo un espesamiento antes del procesamiento del digestato, este servirá para mejorar el procesamiento del digestato. Por otro lado, con la información del DFP de la planta piloto, se elaboró el balance de materia para la sección de procesamiento del digestato, el cual se presenta en la Tabla 25.



Tabla 25. Balance de materia del procesamiento del digestato generado en la planta piloto (Usando Filtro Prensa).

Balance de Materia del Proceso					
	1	2	3	4	5
QT (m <sup>3</sup> /h)	0.079	0.001	0.080	0.010	0.070
MST (kg/h)	3.354	-	3.354	3.201	0.153
MH <sub>2</sub> O (kg/h)	75.213	-	75.213	7.468	67.745

Los equipos de separación (mecánica y térmica) permiten la remoción de humedad en diferentes proporciones. Sin embargo, se encontró que durante este proceso, se presenta una pérdida de nutrientes, ya sea en menor o mayor grado, dependiendo de la eficiencia de cada equipo de procesamiento. En la Tabla 26 se presentan datos de capacidad y eficiencia de recuperación de nutrientes, para el filtro prensa, la centrífuga, el evaporador al vacío y un equipo paquete conocido como Volute (una combinación entre el filtro prensa y un filtro tornillo), mismos equipos que se seleccionaron para análisis de esta tesis.

Tabla 26. Selección de tecnologías para procesamiento de digestato.

Tecnología	Capacidad				Recuperación	
	% Materia Seca a la Entrada	% Materia Seca a la Salida	Consumo de Energía n/t*	Flujos Típico m <sup>3</sup> /h	N %	P %
Filtro prensa	3 - 7	21-85	0.08 - 3	10 - 40	32	29
Centrífuga	1.7 - 8	16 - 40	1.8 - 7	0.7 - 40	20 - 40	52 - 78
Evaporador	1 - 8	97	5 - 8	4 - 1000	55	40
Volute	0.2 - 3	20 - 35	0.8 - 6	0.2 - 26	-	-

\* 0.95 m<sup>3</sup> = 1 t

SIEMENS, HUBER SE 2013  
Williams, 2011  
EPA 1987  
AMCON INC 2013

Se puede apreciar, que el filtro prensa y la centrífuga no son tan eficientes, en cuanto a la recuperación de nutrientes, como la evaporadora al vacío, sin embargo, esta última requiere de un mayor consumo energético. La eficiencia de recuperación de nitrógeno es mayor en el evaporador, aunque, la centrífuga



permite una mayor recuperación de fósforo y una mediana recuperación de nitrógeno. En la Tabla 27 se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la disminución de estos nutrientes después del procesamiento del digestato, tomando en cuenta las condiciones iniciales de la FORSU (Williams,2013). Estos son datos estadísticos disponibles para estos equipos que son comúnmente utilizados en el tratamiento de aguas residuales, para el caso del Volute no se cuenta con datos estadísticos aunque su función es similar a la del filtro prensa, por lo cual, se consideró que su eficiencia de recuperación de nutrientes será equivalente para ambos equipos.

Tabla 27. Disminución de nutrientes en el digestato sólido después de su procesamiento

<b>Nutriente / Procesamiento</b>	<b>N-T ( g N /kg FORSU )</b>	<b>P-T ( g P /kg FORSU )</b>
Inicial	10.5	1.8
Filtro Prensa	3.36	0.52
Centrífuga	4.2	1.4
Evaporador	5.78	0.72

Puede apreciarse que dependiendo del equipo de separación empleado, se obtendrán fertilizantes con diferentes proporciones de nutrientes, así mismo los nutrientes podrán presentarse en la fase sólida o la fase líquida nuevamente en función del equipo que se utilice. A continuación se presenta una breve descripción de los equipos analizados.



- I) *Filtro prensa*.- El filtro prensa es un equipo de separación sólido/líquido que funciona de acuerdo con el principio de filtración de alta presión y comúnmente se utiliza un medio fino de filtrado como son membranas y otros medio filtrantes. Junto con la centrífuga forma parte de los equipos de separación mayormente utilizados para el tratamiento de lodos procedentes de aguas residuales, sin embargo, el filtro prensa permite la obtención del mayor contenido de sólidos totales entre todos los equipos de desaguado mecánico (Degremont, 2007) ver Figura 12.

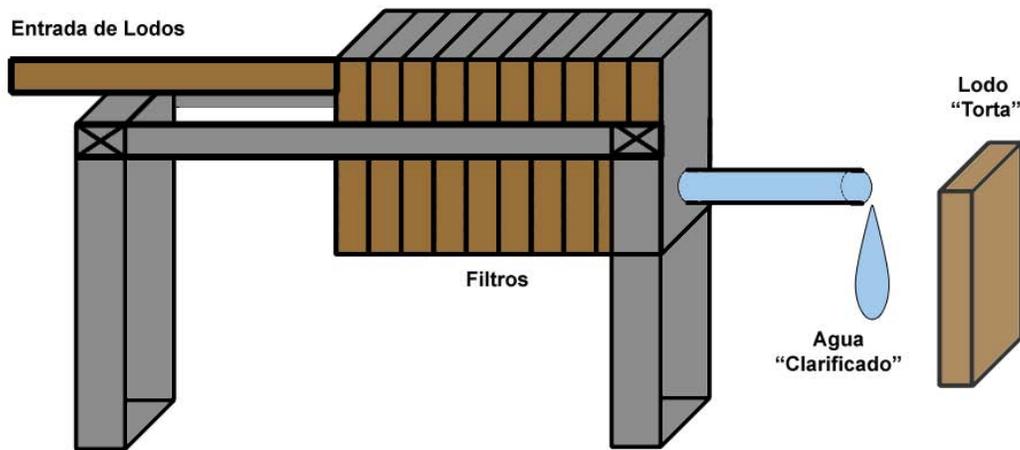


Figura 12. Esquema de filtro prensa

- II) *Centrífuga*.- Los equipos de centrifugado ocupan la acción de la fuerza centrífuga para la separación sólido/líquido. Los equipos de centrifugado se pueden adquirir en diferentes presentaciones, sin embargo, las centrífugas que se pueden ocupar para el tratamiento de lodos son las continuas y los decantadores conico-cilindricos. Este tipo de equipos requiere del uso de un polímero floculante con el cual se obtiene un sedimento homogéneo y un clarificado pues de otra forma, sin el uso de floculante, se obtienen dos fases de sedimentos (Degremont, 2007) ver Figura 13.

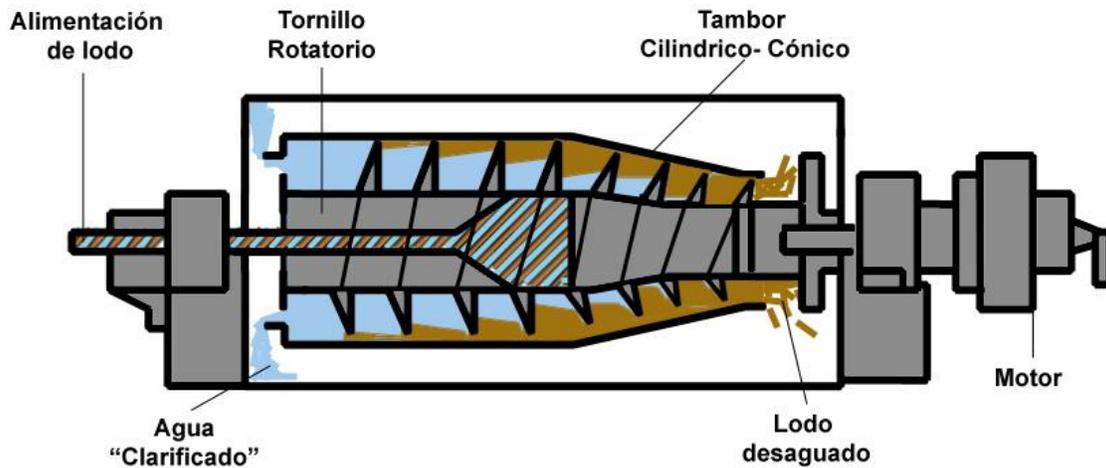


Figura 13. Esquema de centrifuga.

III) *Evaporador al vacío.*- La evaporación al vacío consiste en reducir la presión del interior de la caldera del evaporador por debajo de la presión atmosférica. Esto permite reducir la temperatura de ebullición del líquido a evaporar, lo que reduce la cantidad de calor a aportar/eliminar en el proceso de ebullición y de condensación, además de otras ventajas técnicas como la de poder destilar líquidos con alto punto de ebullición, evitar la descomposición de sustancias sensibles a la temperatura, etc. Existen diferentes tipos de evaporadores como son Evaporadores al vacío por bomba de calor, evaporadores al vacío mediante agua caliente/fría y evaporadores de recompresión mecánica del vapor ver Figura 14.

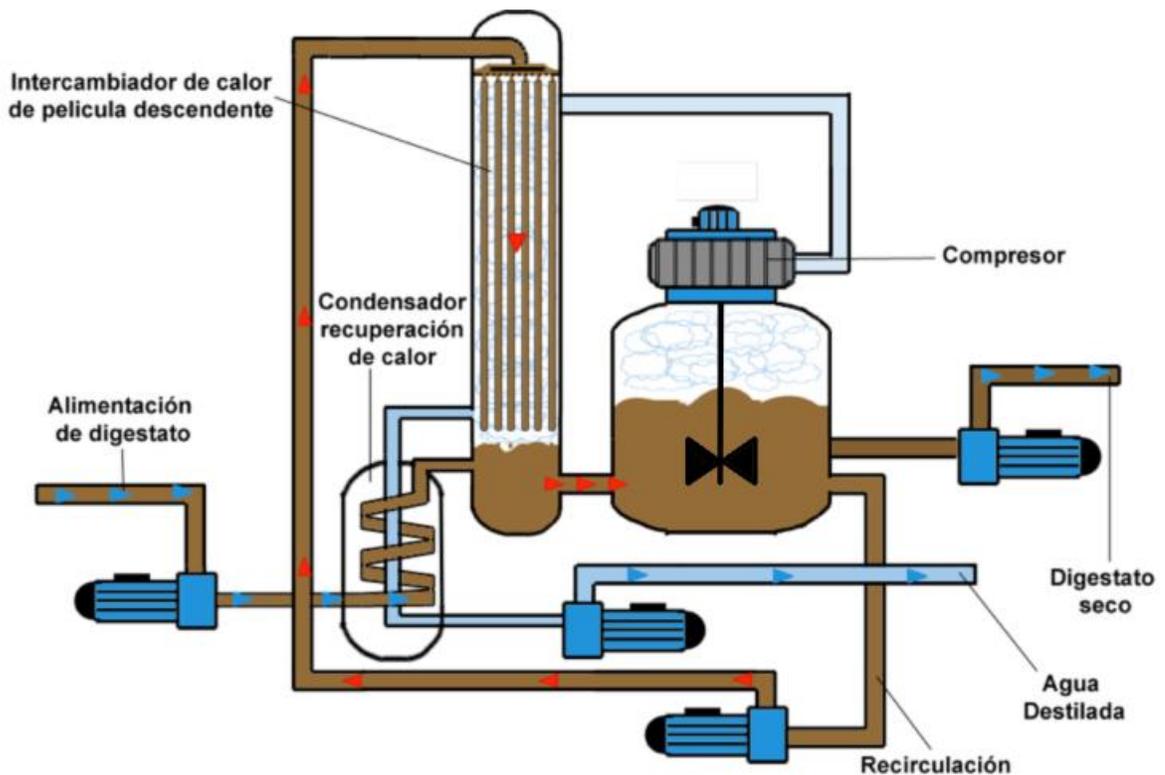


Figura 14. Esquema de evaporador al vacío

IV) *Volute*.- Consiste en un elemento de filtración formado por dos anillos; uno fijo y uno móvil, y un tornillo el cual atraviesa todo el filtro transfiriendo y presurizando el lodo. Los espacios entre los anillos están diseñados para irse estrechando gradualmente en la dirección de salida del lodo desaguado lo cual lleva a un aumento en la presión del elemento filtrante debido a un efecto de compresión de volumen favoreciendo el espesamiento y desaguado del lodo ver Figura 15.

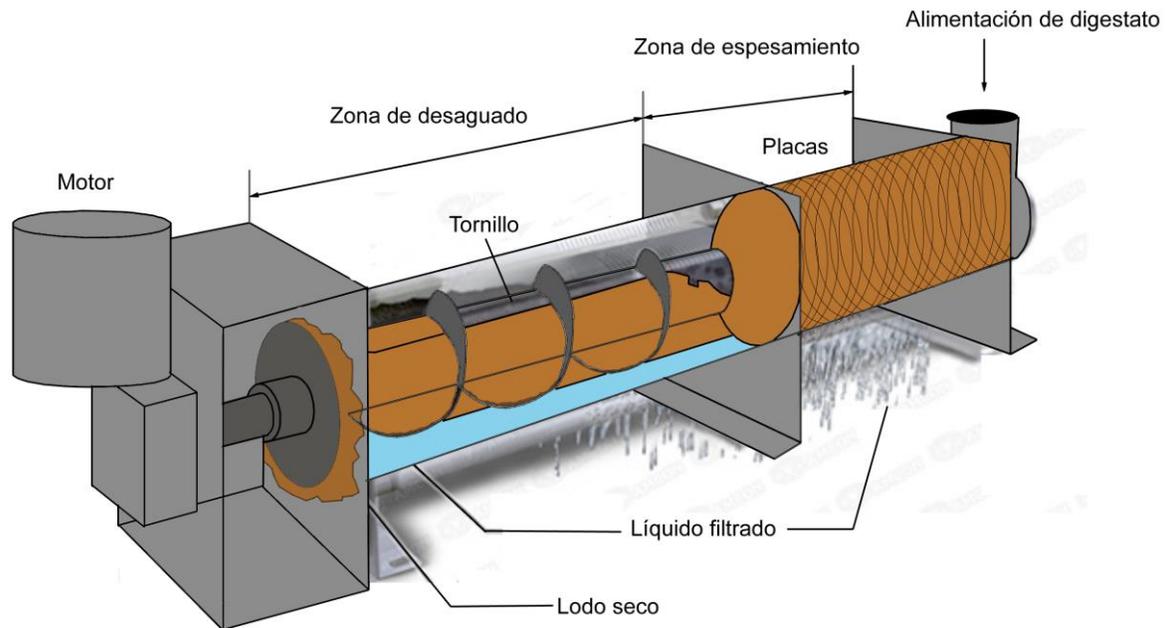


Figura 15. Esquema de Volute

Por último deberá considerarse las dimensiones de estos equipos así como la capacidad con la que cada uno de ellos cuenta. Así mismo deberá considerarse un espacio destinado para el almacenamiento del fertilizante producido. En la siguiente sección se desarrolla el arreglo general de los equipos de procesamiento del digestato dentro de la planta piloto de DA.

### 5.2.5 Arreglo general

Tendrá que considerarse un espacio dentro de la planta piloto destinado al procesamiento del digestato y el almacenamiento del fertilizante que se pretenda obtener. De igual forma debe considerarse un espacio destinado para la estabilización del digestato en caso de disposición final. En la Tabla 28 se presentan las dimensiones de los equipos de procesamiento anteriormente mencionados, las cuales se tomaron en cuenta para el arreglo general de equipos en la planta piloto.



Tabla 28. Dimensiones de equipos de procesamiento del digestato

Equipo	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Capacidad (m <sup>3</sup> /h)	Operación
Filtro Prensa	1 - 5	0.8 - 1.8	1.2 - 2.2	0.02 - 1.5	Batch- Automático/Manual
Centrífuga	4 - 6.5	1.8 - 2.5	1.8 - 2.5	1 - 250	Continuo - Automático
Evaporador	0.5 - 3.5	0.7 - 2.2	1.1 - 3.1	0.04 - 12	Continuo - Automático
Volute	1.7 - 4.9	0.7 - 1.9	1.7 - 2.0	1 - 90	Continuo - Automático

La planta piloto cuenta con cinco secciones, la sección 2 se seleccionó para la instalación de los equipos de procesamiento del digestato, esto debido a que esta sección se encuentra separada del área donde se reciben los residuos sin tratar (sección 4), esto es importante debido a que de esta forma se evita la contaminación cruzada entre los residuos y el fertilizante. A continuación se presenta un esquema de las secciones según la ingeniería conceptual de la planta piloto de DA.

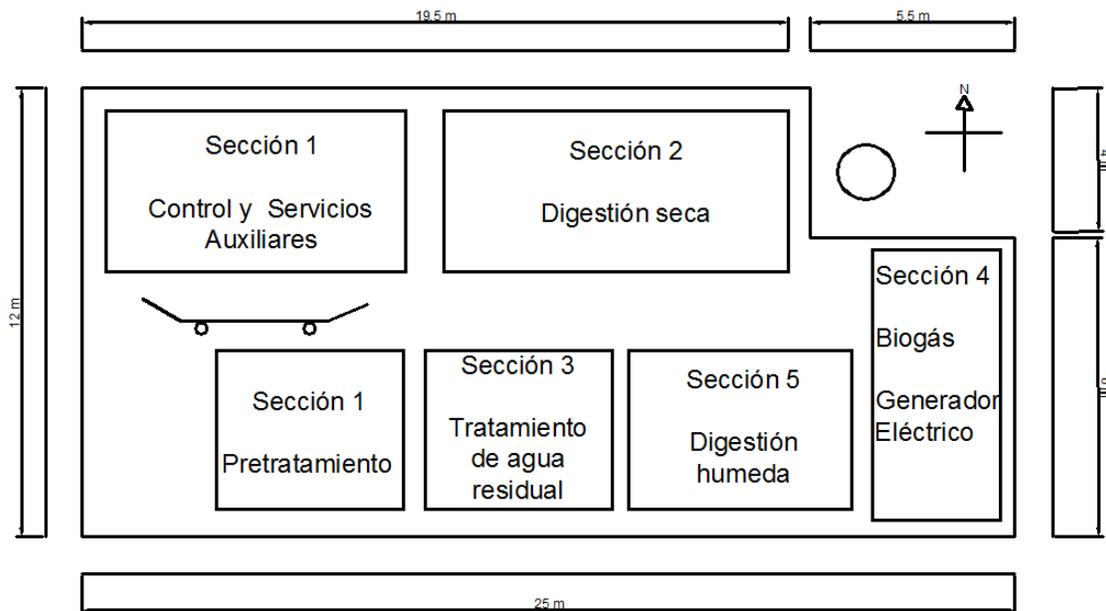


Figura 16. Arreglo general de la planta de digestión anaerobia.



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

La construcción de la planta piloto será en un terreno proporcionado por la UNAM dentro de la Facultad de Estudios Superiores FES Iztacala, hay que recordar, que la localización de la planta es de suma importancia para considerar la distribución del fertilizante producido, a continuación se presentan datos generales de la localización de la planta en la Figura 17.

<p>Dirección:</p> <p>Centro universitario de salud integral (Almaraz), San Sebastián Xhala, C.P. 54714 Cuautitlán Izcalli, Estado de México.</p>	
<p>Temperaturas: 15 – 30 °C</p>	
<p>Vientos reinantes: Sur Oeste, velocidad promedio de 3 m/h</p>	
<p>Humedad: Promedio de 60 %</p>	

Figura 17. Datos generales de la ubicación de la planta de digestión anaerobia

La localización de la planta es fundamental para determinar quienes serán los consumidores del fertilizantes que será producido. Para este caso de estudio se considero un radio de 300 km a la redonda con el cual se logra la distribución



del fertilizante en todo el centro de la república, como se muestra a continuación en la Figura 18.



Figura 18. Distribución de Fertilizante

Por último, la capacidad de la planta se planea que sea de aproximadamente de 700 kg diarios, esta capacidad se tomó en cuenta para realizar un balance de materia y energía consumida para la producción de fertilizante, estos balances se presentan a continuación.

#### 5.2.6 Balances de Materia y energía

La planta piloto procesará más de media tonelada de FORSU diariamente lo cual anualmente representa alrededor de 250 toneladas tratadas. El balance de materia de la planta se presenta en la Tabla 29. Como se menciona anteriormente



los equipos de procesamiento del digestato, permiten determinada capacidad diaria de tratamiento, con su propia eficiencia de separación y recuperación de nutrientes. Lo cual deberá considerarse para el balance de fertilizante producido. Además, es necesario considerar que las necesidades de fertilizantes dependen del suelo donde se desee aplicar este insumo.

Tabla 29. Flujo de FORSU en planta piloto

m <sup>3</sup> /día	m <sup>3</sup> /año	t/año
0.64	233.6	245.89

Según los datos presentados en la Tabla 17, el requerimiento de nutrientes para cosechar una tonelada de grano oscila de 1 a 100 kg/t dependiendo del nutrimento y el grano que se quiera producir. Así mismo, suponiendo que se quieran cosechar 5 t de grano de maíz en una hectárea, se requerirán aproximadamente 178 kg de N (véase § 3.15). Para producir esta cantidad de nutrientes, se necesitaran procesar entre 30 y 60 toneladas de FORSU. Considerando el procesamiento del digestato con los equipos de procesamiento, se elaboró un balance para producir fertilizantes cuyo contenido de Nitrógeno sea de 178 kg, los resultados de este balance se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30. Balance para la producción de 178 kg de N.

Equipo de Procesamiento	FORSU Tratada (t)	Masa H2O (t)	Peso final de fertilizante (t)	Energía Consumida ( kWh)	Humedad (%)	Tiempo de operación (d)
Filtro Prensa	52.98	45.03	7.95	158.93	15	79
Centrífuga	42.38	16.95	25.43	296.67	60	63
Evaporador	30.80	29.87	0.92	246.37	3	46
Volute	52.98	34.44	18.54	42.38	65	79

a) 0.95 m<sup>3</sup> = 1 t

b) El consumo energético se calcula con base en operación de 20 h/d y 30 d/m.  
(Williams, 2011)

Se puede observar que la cantidad de FORSU tratada, para la producción del fertilizante, es menor con el evaporador al vacío, lo cual se ve reflejado



también en un menor tiempo de operación. Sin embargo, el filtro prensa cuenta con el menor consumo energético. Por otro lado, la centrifuga produce el mayor peso final de fertilizante, esto debido a que el producto obtenido con este equipo de procesamiento tendrá características de un lodo, también se obtendrá un producto de este tipo con el Volute y de igual forma pero con menor grado de humedad con el filtro prensa, en contraste con el evaporador al vacío se obtendrá un sólido poroso.

Cabe destacar que el producto final, resulta poco rentable si se trata de trasladar grandes volúmenes por largas distancias, por lo cual, se recomienda el uso en granjas próximas al lugar donde se localiza la planta de tratamiento para el caso de productos voluminosos. A continuación se analiza la viabilidad económica de este proyecto.

#### 5.2.7 Evaluación de costos

---

Antes de implementar un nuevo proyecto, es necesario evaluar la viabilidad de este mismo. Uno de los métodos mas comunes es un análisis costo-beneficio. Para este estudio se consideró como beneficio la venta de un fertilizante orgánico y como costos la inversión de los equipos de procesamiento junto con sus costos de operación. A continuación se presenta la información considerada (Peters, 2003):

- Inversión ( equipo principal de procesamiento multiplicado por un factor de 5, debido a la instalación del equipo y servicios auxiliares), estos datos se presentan en la Tabla 31, estos datos se obtuvieron de cotizaciones realizadas durante la ejecución del proyecto.



Tabla 31. Inversión de los equipos de procesamiento del digestato.

Equipos	Inversión	
	Equipo principal	Costo Total
Filtro Prensa	\$200,000.00	\$1,000,000.00
Centrífuga	\$500,000.00	\$2,500,000.00
Evaporador	\$250,000.00	\$1,250,000.00
Volute	\$400,000.00	\$2,000,000.00

Cotizaciones 2012-2013, precio aproximado en pesos mexicanos

- Gasto Energético (se consideraron los datos de la Tabla 26 con un precio de venta del kWh de \$ 3.30 M.N.)
- Mantenimiento (3% de la inversión de equipos principales)
- Mano de Obra (operador con sueldo mensual de \$ 8000.00 M.N.)
- Costos de distribución (considerando la distribución a un radio de 300 km)
- Se propone el uso de la mitad del volumen del líquido obtenido con el filtro prensa y el Volute para la producción de fertilizantes líquidos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Producción Anual de fertilizante

Equipo de procesamiento	Toneladas de Fertilizante Anuales
Filtro Prensa (sólido)	36.71
Filtro Prensa (líquido)	104.51
Volute (sólido)	86.06
Volute (líquido)	79.92
Centrífuga	52.70
Evaporador al vacío	4.27



El Resumen de los costos generados por el procesamiento del digestato se presenta a continuación en la Tabla 33.

Tabla 33. Costos anuales por procesamiento del digestato.

Equipos	Energía	Mantenimiento	Mano de Obra	Distribución
Filtro Prensa Sólido	\$2,434.36	\$6,000.00	\$326,400.00	\$9,177.50
Centrífuga	\$5,680.17	\$15,000.00	\$163,200.00	\$29,372.50
Evaporador	\$6,491.62	\$7,500.00	\$163,200.00	\$1,067.50
Filtro Prensa Líquido	\$4,868.72	\$6,000.00	\$326,400.00	\$26,352.50

- Precio de Venta del Fertilizante (dependiendo de la calidad de producto que se obtiene se determinaron los precios de venta del fertilizante; 15 \$/kg y 25 \$/L para el filtro prensa, 5 \$/kg para la Centrífuga y 150 \$/kg para el caso del evaporador, estos precios se establecieron de acuerdo a los precios del mercado actual (según se muestra en la Tabla 23). Estos precios de venta así como las ganancias esperadas anualmente se presentan en la Tabla 34.

Tabla 34. Beneficios obtenidos por la venta de fertilizante

Equipo	Precio de Venta	Ganancias Anuales
Evaporador al vacío (EV)	\$150/Kg	\$427,000.00
Filtro Prensa Sólido (FPS)	\$15/Kg	\$550,650.00
Filtro Prensa Líquido (FPL)	\$25/L	\$2,612,625.00
Centrífuga (C)	\$3/L	\$352,470.00
Volute Sólido (VS)	10/kg	\$860,600.00
Volute Líquido (VL)	25/L	\$1,997,875.00



Con los datos anteriores se calculó el flujo de efectivo, a 20 años, para cada producto obtenido con los diferentes equipos propuestos. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 19.

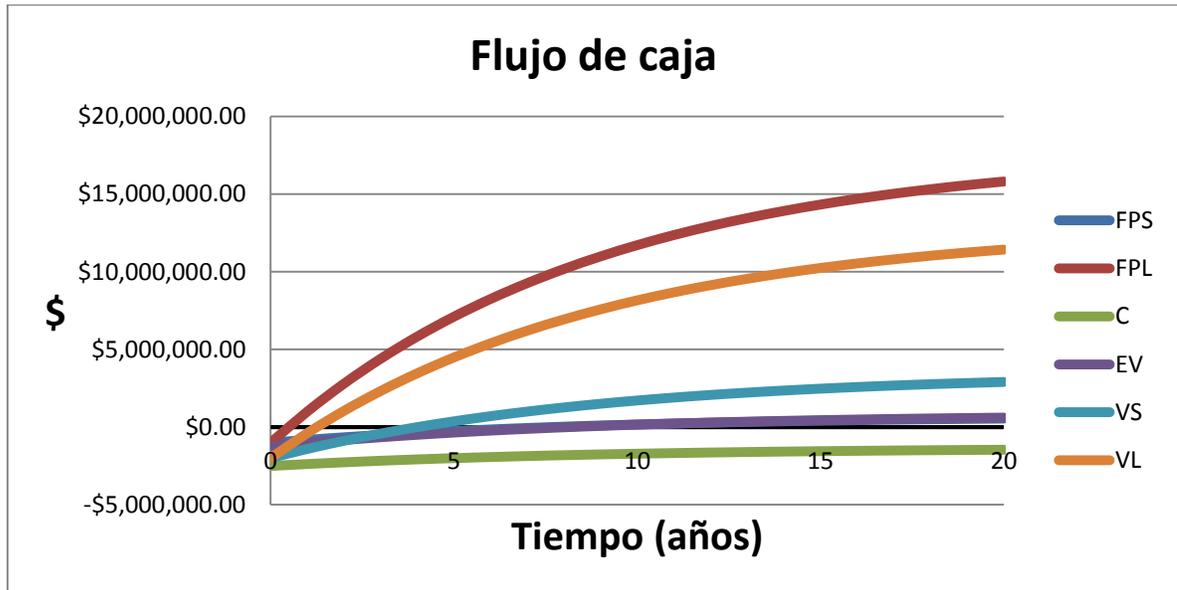


Figura 19. Flujo de caja para los productos obtenidos con diferentes equipos de procesamiento.

Se calculó el valor presente neto (VPN) a 20 años considerando estas propuestas, con el fin de seleccionar el equipo que pueda ser mas atractivo económicamente para la planta. Los resultados para los tres equipos se presentan en la Figura 20.

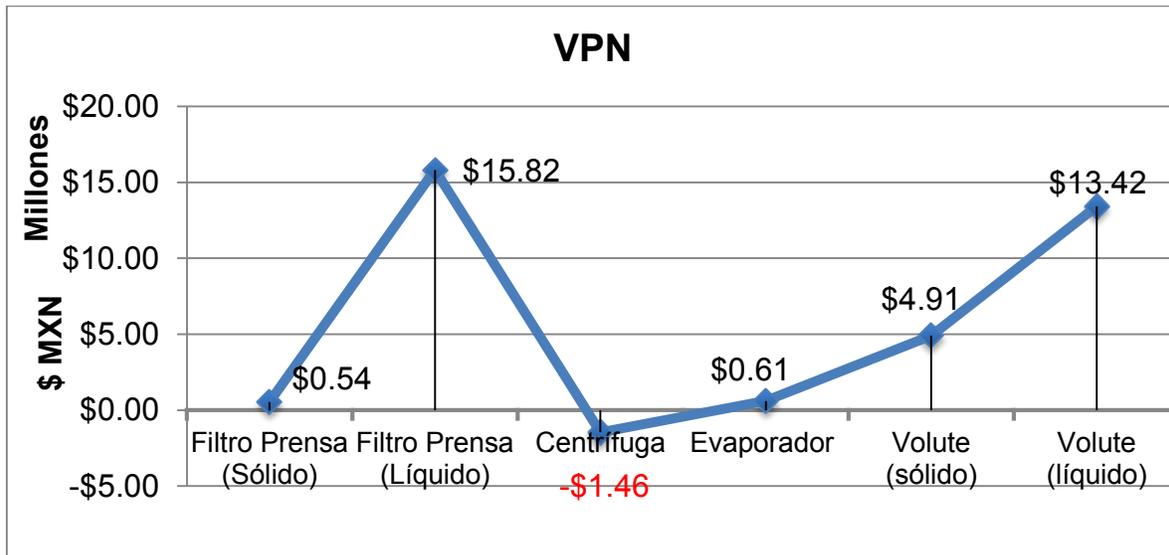


Figura 20. VPN a 20 años para los productos obtenidos con diferentes equipos de procesamiento.

Se determinó que la centrifuga no era conveniente para este proyecto por lo cual se eliminó del análisis y se realizó un análisis más detallado para los otros equipos. Obteniendo nuevos valores como se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35. Costo-beneficio de equipos con mayor atractivo económico.

Equipo de Procesamiento	Inversión	Costos Anuales	Ganancias Anuales
Evaporador al vacío	\$2,250,000.00	\$184,767.50	\$427,000.00
Filtro Prensa Líquido	\$4,500,000.00	\$512,175.75	\$2,587,294.71
Filtro Prensa Sólido	\$2,000,000.00	\$187,377.50	\$550,650.00
Volute Líquido	\$5,500,000.00	\$485,016.06	\$1,978,410.26
Volute Sólido	\$3,000,000.00	\$209,215.00	\$430,300.00

Para la producción de fertilizantes líquidos con el filtro prensa y el Volute, se agregó la adquisición de tanques de almacenamiento temporal del fertilizante, así como herramientas que permitan su administración en el campo (un tractor y un aspersor), además, se agregaron gastos de mantenimiento, mano de obra y costos por energía. En el caso de la producción de fertilizantes sólidos con los



equipos anteriores y el evaporador, se consideró la adquisición de equipos de embalaje (ensacado) y los costos actualizados por el consumo energético de un equipo de esta índole.

En la Figura 21 se muestra el flujo de caja considerando la producción y venta de fertilizante obtenido con el filtro prensa en una presentación líquida y el fertilizante sólido obtenido con el evaporador al vacío.

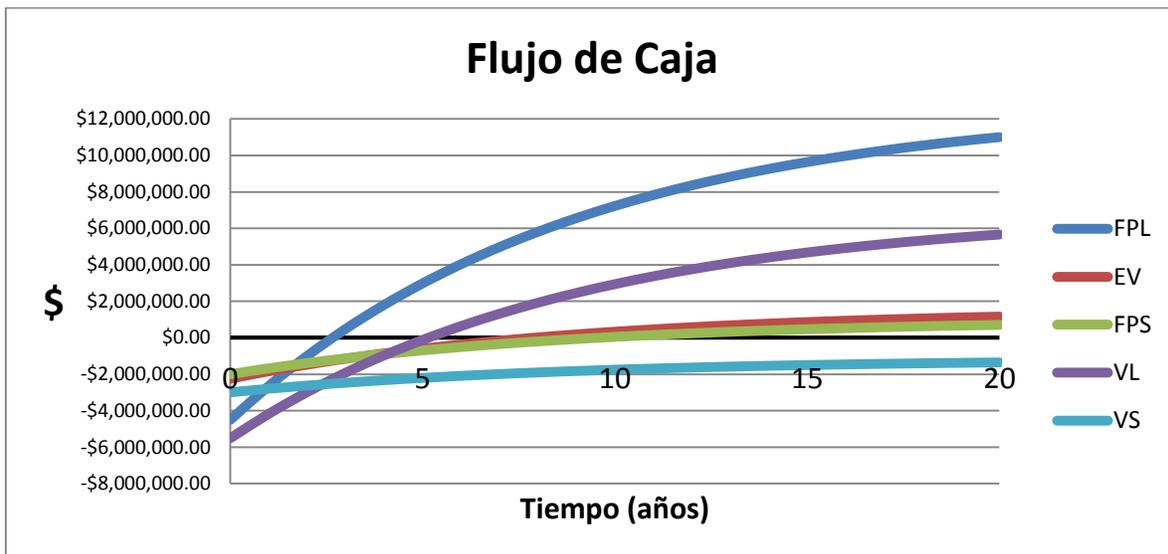


Figura 21. Flujo de caja para los productos con mayor atractivo económico.

Al parecer el fertilizante líquido, obtenido con el filtro prensa es la opción mas atractiva económicamente. En la Figura 22 se muestran los resultados obtenidos con estas consideraciones y se observa que el VPN a 20 años para el filtro prensa es el más alto.

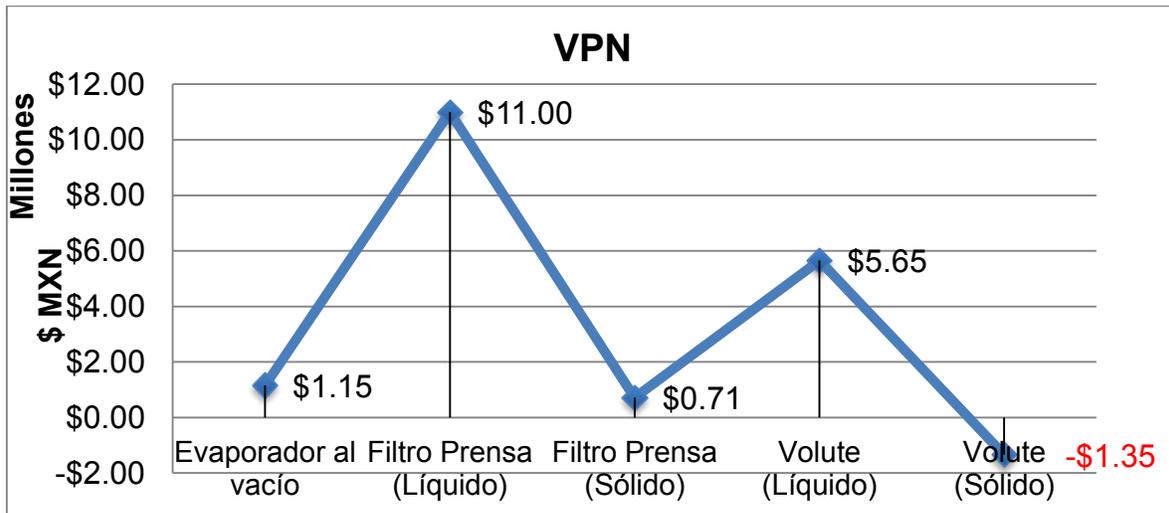


Figura 22. VPN a 20 años para los productos con mayor atractivo económico.

Por último se debe considerar la disposición final del digestato producido por el tratamiento de FORSU en una planta de DA, para esto será necesario someter el digestato a un proceso de separación sólido/líquido por medio de un filtro prensa, esto con el motivo de reducir los costos de transporte de los lodos que se quieran llevar a disposición final. Las consideraciones para la disposición final del digestato se presentan a continuación:

- Uso de filtro prensa para separación sólido/líquido
- Transporte de los lodos a un relleno sanitario
- Estabilización y vertido de la fracción líquida

Bajo estas consideraciones se calculó el VPN a 20 años para los costos que implican la disposición final del digestato. En la Figura 23 se muestra una comparación entre la producción de fertilizante y la disposición final del digestato.

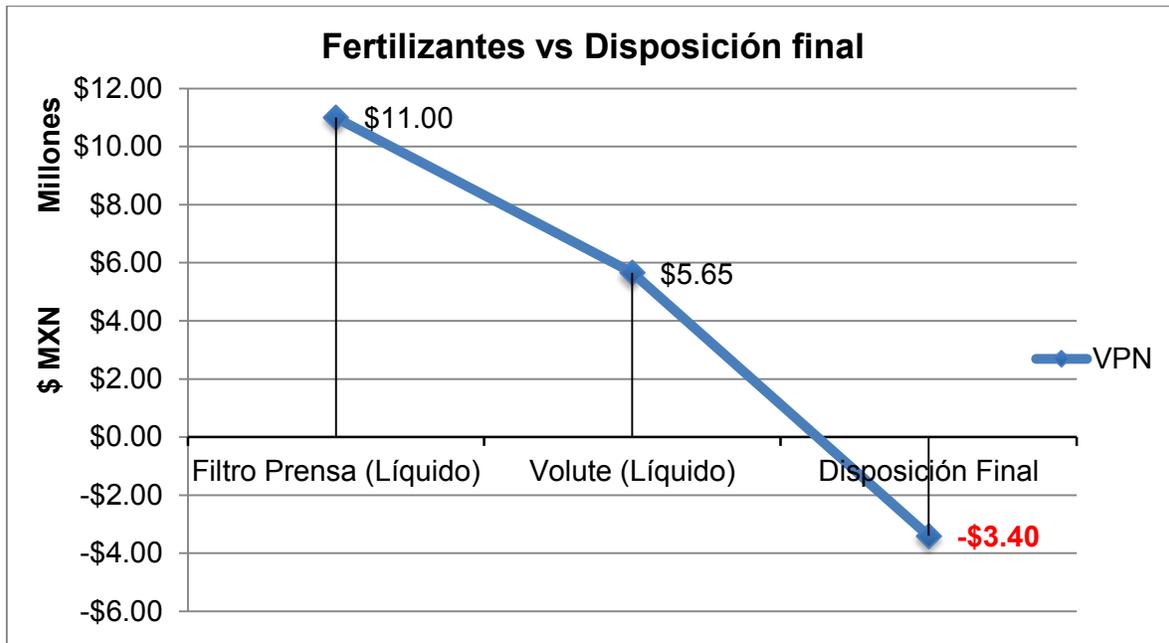


Figura 23. Comparación entre el VPN de la obtención de fertilizantes vs la disposición final del digestato.

El uso del digestato como fertilizante, tiene beneficios económicos y ambientales. Por otro lado, la disposición final del digestato previamente estabilizado, a pesar de que no representa un beneficio económico, su impacto ambiental es minimizado en comparación con la disposición final de la FORSU que no ha sido previamente tratada. No obstante, la disposición final del digestato deberá realizarse bajo condiciones controladas que aseguren el buen manejo de este subproducto de la DA.



## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Las especificaciones europeas PAS 110 (Inglaterra) y RAL GZ 245/246/251/256/258 (Alemania), para el manejo del digestato derivado de la DA, establecen parámetros de calidad con los que el digestato debe de cumplir para ser utilizado como fertilizante en estos países. Estas normas se apoyan de otras para el análisis de muestras, la estandarización del proceso de DA, el seguimiento de la calidad del producto, entre otras.

La PAS 110, aplica para el digestato entero (DE), y sus dos fracciones que lo componen; su fracción sólida (DS) y su fracción líquida (DL). El procesamiento del digestato, para su uso como fertilizante, consiste principalmente en la separación de estas dos fracciones y de ser necesario, su estabilización. Las características del digestato determinarán que equipo de procesamiento será necesario utilizar, estas características dependerán del sustrato con el que se alimente la DA, así como la tecnología de DA que se emplee.

Se analizaron tres equipos comúnmente empleados para el procesamiento del digestato (filtro prensa, evaporador y centrifuga), para los cuales se cuenta con estadística sobre su eficiencia tanto para remoción de humedad así como para recuperación de nutrientes con fines de la producción de fertilizantes, además, se analizó un equipo mas novedoso, el Volute, el cual ofrece características similares a los otros equipos con mejores rendimientos energéticos. El análisis económico de estas opciones, para el caso de estudio del procesamiento de digestato generado en una planta piloto, resultó a favor del uso del filtro prensa y como segunda opción se encontró el Volute para el cual se ha extendido su uso actualmente.

El tratamiento de 200 toneladas de residuos anuales y el procesamiento de estos, generará alrededor de 100 toneladas de fertilizante, esta cantidad de fertilizante puede utilizarse para producir hasta 30 toneladas de grano para



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE  
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

consumo humano. Cabe destacar, que esta cantidad de residuos tratados representa tan solo el 0.01% de los residuos generados en el Distrito Federal.

Finalmente, se analizó la disposición final del digestato. Se estimó el costo por la disposición final y se comparó con los beneficios que implica la producción de fertilizantes. El costo por la disposición final del digestato resultó equivalente a la inversión necesaria para el procesamiento del digestato.



## 7. CONCLUSIONES.

El digestato derivado de la digestión anaerobia, puede utilizarse principalmente como fertilizante. La producción de fertilizantes, es de utilidad para aumentar la rentabilidad de este tipo de proyectos y es el principal uso que se le da a este subproducto de la digestión anaerobia. No obstante, no hay que descartar el desarrollo de nuevos campos de aplicación para el digestato diferentes de su uso como fertilizantes. Éstos pueden ser su uso como combustible fósil o su uso como agua de proceso para la producción de etanol, además de nuevos usos que se puedan generar por la vía de la investigación.

En México la norma de referencia más cercana a los productos que se obtendrán de la DA de la FORSU es la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002- Lodos y biosólidos - Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Esta norma ha sido elaborada para digeridos derivados del tratamiento de aguas residuales. Los lodos y biosólidos, a los que hace referencia esta norma, son aprovechados de manera similar que el digestato derivado de DA sin embargo, no son idénticos en composición, por ello esta norma sirve como referencia para la elaboración de una especificación del digestato pero deberá revisarse para elaborar una especificación similar a la PAS 110. Cabe destacar, que los valores de los límites permisibles citados en esta NOM son muy distantes a los valores citados en las normas europeas referentes al digestato derivado de la FORSU lo cual deberá tomarse en cuenta en caso de querer producir insumos que puedan compararse con estándares los internacionales.

Existe una amplia gama de equipos para el procesamiento del digestato, los cuales, permiten la obtención de diferentes productos y pueden acoplarse dependiendo de las necesidades específicas de cada planta. Por ejemplo, se pueden utilizar equipos como el evaporador al vacío, para producir fertilizantes que puedan distribuirse regionalmente, o por lo contrario, se pueden producir



fertilizantes para uso local, como es el caso de granjas que cuentan con plantas de digestión anaerobia y utilizan los lodos o digestato entero generado como fertilizante.

La comparación entre estos equipos de procesamiento demostró que dependiendo de la eficiencia de recuperación de nutrientes, propia de cada equipo, se obtendrán diferentes productos que podrán utilizarse como fertilizantes. La diferencia entre estos productos fertilizantes, radica en la humedad de cada uno de ellos, así como en su contenido de nutrientes. El volumen y la masa del fertilizante influirán en los costos de operación pues será necesario un mayor espacio para el almacenamiento y manipulación de productos líquidos. De igual forma los costos de transporte aumentan si la masa y volumen de fertilizante a transportar es mayor. Además, habrá que considerarse que para la administración del productos líquidos será necesaria maquinaria especializada.

Se encontró que el sólido concentrado obtenido del procesamiento con el evaporador al vacío y el líquido obtenido por la separación con el filtro prensa, son los dos productos con mayor oportunidad en el mercado de fertilizantes. Estos productos poseen las características necesarias para su comercialización como fertilizantes orgánicos y un análisis económico preliminar demuestra que la producción de estos fertilizante resulta rentable.

Por último, la disposición final del digestato representa un gasto dentro de la operación de una planta de digestión anaerobia. Por este motivo es altamente recomendable el procesamiento del digestato ya sea para la producción de fertilizantes o su aplicación en nuevos campos.



## 8. REFERENCIAS

A

Abdul-Sattar, N., y Murphy, D., J. (2010). What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? 14 (6).

Abdullahia Y.A., A. J. (2008). Investigating the effects of anaerobic and aerobic post-treatment on quality and stability of organic fraction of municipal solid waste as soil amendment. Volume 99 (Issue 18) , 8631–8636.

ADI. (2006). Best Practice Municipal Waste Management.

Al Seadi, T. (2012). Quality management of digestate from biogas plants used as fertiliser. Inglaterra.

Al Seadi, T. (2008). Biogas Handbook. Dinamarca: Published by University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10.

AMPFYDIOBE, A. C. (2013). Asociación Mexicana de Productores, Formuladores y Distribuidores de Insumos Orgánicos, Biológicos y Ecológicos, A.

C. . Revisado el 14 de Junio de 2013 en <http://www.ampfydiobe.org.mx/>

Arzola, P. O. (2014). Bases biotecnológicas y análisis de tecnologías de la digestión anaerobia para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos municipales (rsom). México.

Arrigo, N. M., Jiménez, M. d., Palma, R. M., y Tortarolo, M. B. (2005). Residuos de poda compostados y sin compostar: uso potencial como enmienda orgánica en suelo . Buenos Aires : Cienc. suelo v.23 n.1 .

ASERCA. (2014). Incentivos a la Comercialización.

Avendaño, D. (2010). Diseño y construcción de un digester anaerobio de flujo pistón que trate los residuos generados en una explotación ganadera de la localidad de Loja, Ecuador, empleando tecnologías apropiadas. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Avila ,C.A. (2006). Tesis: Estudio de factibilidad para la fabricación de abono fermentado de tipo bokashi. Pachuca, hidalgo.

Ávila, J. A. (2001). El mercado de los fertilizantes en México Situación actual y Perspectivas. Problemas del Desarrollo , 32 (127) . México: IIEc-UNAM.

Atlas, R. M., y Bartha, R. (2006). Ecología microbiana y Microbiología ambiental. Madrid: Pearson.

B

Banks, C. (25 de Marzo de 2009). Optimising anaerobic digestion. Evaluating the Potential for Anaerobic Digestion to provide Energy and Soil amendment . (U. o. Reading, Ed.) Inglaterra: University of Southampton.

Bárcenas, H. Bordo poniente, un relleno sanitario reutilizable? Ingeniería para el Control de Residuos de Residuos Municipales e Industriales, S.A. de C.V. (INCREMI, S.A. DE C.V.).



Bases de licitación "Bordo Poniente" (2012).

Batstone, D.J. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology* , 65-73.

BM. (2010). <http://datos.bancomundial.org/indicador/AG.CON.FER> T.ZS. Banco Mundial.

Borrello, F. (2011). "Tratamiento de residuos y aprovechamiento de biogás para calefacción y generación de energía" . Universidad de Buenos Aires Facultad de Ingeniería .

Bremen, H. (2005). Decision Support System for the application of renewable energy from biogas and biomass combustion. Thailand: AUNP.

Buenrostro, O. (2006). La producción de Residuos Sólidos Municipales y sus implicaciones ambientales.

Buenrostro, O. (2000). La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los

mercados municipales. 19-26.

Bustamante, M.A. (2012 ). Co-composting of the solid fraction of anaerobic digestates, to obtain added-value materials for use in agriculture . *iomass and bioenergy* vol.43 pp 26-35.

Burke, D. (2001). Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook. Olympia: Environmental Energy Company.

## C

Cantanhede, A. (2006). Procedimientos estadísticos para los estudios de caracterización de residuos sólidos. ADIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica , 1 (1), 14.

Cavinato, C. (2011). Anaerobic Digestion Fundamentals. Venecia.

Chagumaira, I., Fyfield, N., Mangan, A., Roper, Y., Vella, D., y Wong, J. (2011). Biogas plant proposal. Devikulam, India: Faculty of Engineering and Industrial Sciences.

Swinburne University of Technology.

Charles Teater, Z. Y. (2011). Assessing solid digestate from anaerobic digestion as feedstock for ethanol production. *Bioresource Technology* , 102 , 1856–1862. USA.

Cheng, T., y Noike, T. (1993). Influence of Retention Time on Reactor Performance and Bacterial Trophic Populations in Anaerobic Digestion. Cincinnati.

COFEPRIS. (2008). Revisión al Reglamento Plafest-Fertilizantes. Proyecto Reglamento Plafest Cofepris . México.

CONAGUA. (2001). NMX-AA-030-SCFI-2001 Análisis de agua - determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. México.

Condorchem, B. d. (1 de Julio de 2010). Valorización energética de residuos. Extraído el 21 de Octubre de 2010 de Valorización Energética de Residuos: <http://blog.condorchem.co>



m/valorizacion-energetica-de-residuos/

D

Delhomenie, M. C., y Heitz, M. (2005). Biofiltration of Air: A Review.

Deublein, D., y Steinhäuser, A. (2008). Biogas from Waste and Renewable Resources. Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH y Co. KGaA.

Devlin et al, D. D. (2011). The effect of acid pretreatment on the anaerobic digestion and dewatering of waste activated sludge. *Bioresource Technology* 102 (2011) 4076–4082 .

Degremont, S. (2007). *Water Treatment Handbook*. 2 . Francia.

Department of Energy and Climate Change. (2011). *Anaerobic Digestion. Strategy and Action Plan*. Londres.

Díaz. (2002). Estado del arte sobre el tratamiento biológico para los residuales de Punta Periquillo II Digestión Anaerobia. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*,

VOL. XXIII, No. 1, 2002 , Díaz, Bernardino.

Digestate-Solutions. (2013). Distribution and transportation of digestate. <http://www.digestatesolutions.co.uk/> .

Dimas J. (2001). Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra Volumen 19 Numero 4*.

DOF-07-02. (2006). LEY DE PRODUCTOS ORGÁNICOS. México: CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN.

Durán, A. (2013). Mexico city's municipal solid waste characteristics and composition analysis . México, D.F. .

Durán, A. (2013). Actividad 5. Muestreo y caracterización de los rsom generados en el área de estudio. México: Conacyt.

E

Eisenmann. (n.d.). High performance Biogas Plants. Revisado el 12 de Octubre de 2012.

Elefsiniotis, P. y Oldham, E. (2008). Substrate degradation patterns in acid-phase anaerobic digestion of municipal primary sludge. *Environmental Technology* (15:8, 741-751).

Endar, S. (2009). *Anaerobic Digestion of Organic Solid Waste for Energy Production*. Alemania: KIT Scientific Publishing.

Enrique Salazar Sosa, M. F. (2003). *AGRICULTURA ORGANICA* (Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. ed.). México .

EPA. (2012). *SUMMARY OF THE EPA MUNICIPAL SOLID WASTE PROGRAM*. EUA.

EPA. (1987). *Dewatering Municipal Wastewater Sludges . Design manual* . E.U.

EPA. (2010). *Methane and Nitrous Oxide Emissions From Natural Sources*.

Espinosa, M. del C. (2012). Determinación de sustancias húmicas en lixiviados de vertederos de residuos sólidos urbanos. *Revista Cubana de Química* .



ESCAP. (2007). Recent developments in biogas technology for poverty reduction and sustainable development. Beijing: United Nations ESCAP.

Ewing, T. (2010). High Solids Anaerobic Digestion for Energy and Nutrient Recovery. Washington Bioenergy Research Symposium. Washington State University.

F

FAO. (2013). Conservación de los recursos para una agricultura sostenible; Materia orgánica y actividad biológica. Food and Agriculture Organization .

FAO. (2013). ANALISIS DE FIBRA DIETETICA. Retrieved 2013 from <http://www.fao.org/docrep/010/ah833s/Ah833s18.htm>

Fenercom. (2010). Guía de la cogeneración. Madrid, España: Consejería de Economía y Hacienda, organización Dirección General de Industria, Energía y Minas.

Fernandez-Güelfo L.A., Á.-G. C. (2011). Dry-

thermophilic anaerobic digestion of simulated organic fraction of Municipal Solid Waste: Process modeling. Bioresource Technology (102), 606-611.

Fluid Fertilizer Foundation, F. (2000). Where does your organic phosphorus fits in your organic program? EU: Fluid Journal.

Fulvia Tambone, P. G. (2009). Assessing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW. Italia.

G

Gerardi, M. H. (2003). The microbiology of Anaerobic Digesters. Canadá: Wiley-Interscience.

GDF. (Abril de 2003). Gaceta Oficial del Distrito Federa . (33) . México.

GIZ. (2012). Guia de planificación para proyectos de biogás en chile. Chile.

Gonzalez, S. P. (2011). Propuesta tecnologica para la valorizacion de la fraccion organica de los residuos solidos urbanos generados en el Distrito federal. Mexico D.F.

GTZ. (1993). Criteria for the dissemination of biogas plants for agricultural farm and household systems. Germany: GTZ-Gate.

GTZ. (1999). Application and product development. Biogas Digest. Volume II. Biogas.

Guardado, J. (2007). Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. Cuba: Cubasolar.

H

Hagenmeyer, D. o. (2003). Digestión anaerobia seca versus digestión anaerobia húmeda. Pamplona : LINDE-KCA-DRESDEN GMBH.

Hartmann, B. A. (2006). Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: an overview. Water Science y Technology , Vol 53 (No 8 pp 7–22 Q ) . IWA Publishing .



Hartmann, H., y Ahring, B. K. (2005). Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. 4to International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste, (pp. 34-51). Copenhagen, Dinamarca.

Hernández, A. G. (2006). DERECHO AMBIENTAL Y GARANTÍAS CONSTITUCIONALES. Facultad de Derecho de la Universidad Autónoma de Zacatecas.

Hilkiah, I., Ayotamuno, M., Eze, C., Ogaji, S., y Probert, S. (2008). Designs of anaerobic digesters from producing biogas from municipal solid-waste. Elsevier. Applied Energy , 430-438.

Hofmann, F. (2009). Renewable Energy Project Development Programm East Africa. Berlin: GTZ.

I

ICYT DF. (2011). SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL DEL DF. Retrieved 12 de NOVIEMBRE de 2012 from [http://www.evalua.df.gob.mx/files/indice/ids\\_ut\\_evaluadf.pdf](http://www.evalua.df.gob.mx/files/indice/ids_ut_evaluadf.pdf)

IDAE, (. p. (2007). Biomasa: Digestores anaerobios. España: BESEL, S.A. (Departamento de Energía).

INECC. (2007). Los sistemas de aseo urbano en México. México.

INE. (2007). INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. Retrieved 2012 йил 14- octubre from <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/499/experiencias.html>

INEGI. (2011). Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales, 2011. Módulo 6. Residuos Sólidos Urbanos. México.

INEGI. (1999). Estadísticas del medio ambiente México. México.

IWA, I. T. (2002). Anaerobic digestion model No. 1. IWA Publishing

J

Juanga, J. (2005). Optimizing dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. Tailandia: Asian Institute of Technology.

K

Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., y Dawson, L. (2011). The Anaerobic Digestion of Solid Organic Waste. Waste Management .

Kiely, G. (1998). Environmental Engineering. Boston: McGraw Hill International.

Kim, K., Oh, B., y Chun, Y. (2006). Effects of Temperature and Hydarulic Retition Time on Anaerobic Digestion of Food Waste. Journal of Bioscience and Bioengineering .

Köfalusi, G. (2006). Los productos y los Impactos de la descomposición de residuos solidos urbanos en sitios de disposición final. (79) , 39-51.

Kratzeisen, N. S. (2009). Applicability of biogas digestate as solid fuel. Alemania.

L

Laines, J., Sosa, J., Cámara, K., Sánchez, J., y Ferreyro, J. (2011). Diseño, construcción y operación de un biodigestor anaerobio tipo cúpula a escala real para la obtención de biogás. Hacia



la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima , 612-616.

LGEEPA. (2013). Ley General del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. México.

LGPGIR. (2012). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. México.

Lissens, G., Vandevivere, P., De Baere, L., Biey, E., y Verstraete, W. (2001). Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion. *Water science y Technology* , 44. 91-102.

López, C., y López, O. (2009). Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana. Tesis de licenciatura . Coatzacoalcos, Veracruz, México: Universidad Veracruzana.

López, A. J. (2005-2006). MANUAL DE EDAFOLOGÍA. Departamento de

Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla.

Lusk, P., Wheeler, P., y Rivard, C. (1996). Deploying anaerobic digesters: Current status and future possibilities. Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory.

M

Madigan, M. (1997). Brock Biology of Microorganisms (8 ed.). Prentice-Hall.

Makádi, M. (2012). Digestate: A New Nutrient Source - Review. ISBN: 978-953-51-0204-5, DOI: 10.5772/31355. Hungary: University of Debrecen, Dr. Sunil Kumar (Ed.).

Martínez, S. (2012). Desarrollo de proceso eficiente en la generación de electricidad mediante el uso de biogás en proyectos del sector agropecuario. Tesis de licenciatura. México, DF: Instituto Politécnico Nacional.

Marín, N. (27 de agosto de 2012). Prioridad, la separación de basura. El Sol de México .

Marchaim, U. (1992). Biogas processes for sustainable development. Rome, Italy: FAO.

Martí, J. (2008). Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación. La Paz, Bolivia: GTZ.

Martí, J., y Cipriano, J. (2012). Design methodology for low cost tubular digesters. *Bioresource Technology* , 108. 21-27.

Martí, O. N. (2006). Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. <http://www.bookpump.com/dps/pdf-b/1123329b.pdf>.

Mata, J. (2003). Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. Barcelona, España: IWA Publishing.

Mata, J.(2002). Digestión anaeróbica de residuos sólidos urbanos. Barcelona: Diputación Barcelona.

Mes, T., Stams, A., y Reith, J. (2003). Methane production by anaerobic digestion of wastewater



and solid wastes. In J. Reith, R. Wijffels, y H. Baerten, Bio-methane y Bio-hydrogen. Holanda: Dutch Biological Hydrogen Foundation.

Metcalf y Eddy. (2003). Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. Mc Graw-Hill.

Metcalf y Eddy, I. (1973). Wastewater Engineering. Collection Treatment Disposal. . McGraw Hill.

Mihic, S. (2004). Biogas fuel for internal combustion engines. Serbia y Montenegro: Annals of the faculty of engineering hunedoara Tome II. Fascicole 3.

Montes, C. (2008). Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás. España.

Mshandete, A., Bjornsson, L., y Kivaisi, A. (2005). Effect of Particle Size on Biogas Yield from Sisal fibre Waste. Renewable Energy .

Muche, H., y Zimmermann, H. (1985). The purification of biogas. GTZ.

Mussoline, W., Esposito, G., Lens, P., Garuti, G., y Giordano, A. (2012). Design considerations for a farm-scale biogas plant based on pilot-scale anaerobic digesters loaded with rice straw and piggery wastewater. Elsevier. Biomass and bioenergy , 1-10.

Muylaert, M. S., Pereira, A. S., Campos, d., Christiano, Montez, E. M., y de Oliveira, L. (2000). Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta. Rio de Janeiro.

## N

NMX-AA-024. (1984). Norma Mexicana NMX-AA-024-1984 Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales - Determinación de Nitrógeno. México.

NMX-AA-028-SCFI. (2001 ). Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (dbO5) y residuales

tratadas - método de prueba. México: Secretaria de economía .

NMX-AA-067. (1985). Norma Mexicana NMX-AA-067-1985 Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales- Determinación de la Relación Carbono / Nitrogeno. México.

NMX-AA-30. (2001). Análisis de agua - determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la nmx-aa-030-1981) . México.

NMX-AA-34. (2001). Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a las nmx-aa-020-1980 y nmx-aa-034-1981). México.

Novarino, D., y Chiara, M. (2012). Anaerobic digestion of extruded OFMSW. Elsevier. Bioresource Technology , 104. 44-50.



NOM-83-SEMARNAT- (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-83-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 México.

O

Odlarea, M. P. (2008). Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste Management* , Volume 28 (7 Pags 1246–1253).

Orta, M. T., Saucedo, G., y Tovar, L. R. (2009). Composición y generación de residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México durante 2008-2009. Ciudad de México.

Oscar Seguel S., V. G. (2003). Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agríc. Téc.* v.63 n.3 Chillán jul. 2003.

Ostrem, K. (2004). *Greening Waste: Anaerobic Digestion for Treating the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*. E.U.A.: Columbia University.

ONU. (1998). Protocolo de kyoto de la convencion marco de las naciones unidas sobre el cambio climatico .

P

Pabón Pereira et al, C. P. (2012). An OxiTop® protocol for screening plant material for its. *Water Science y Technology* | 66.7 | 2012.

Palmowski, L., y Müller, J. (2000). Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion. *Water Science and Technology* , 155-162.

PAS-110. (2010). Specification for whole digestate, separated liquor and separated fibre derived from the anaerobic digestion of source-segregated biodegradable materials. Publicly Available Specification .

Pérez, M., y Romero, L. I. (2007). Dry-thermophilic

anaerobic digestion of OFMSW. Focusing on the inoculum sources. *Bioresource Technology* , 3195-3203.

Perea, E. (2013). Sagarpa busca reducir importación de fertilizantes del 70 al 30%.

Peters, M. K. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. E.U. Canada: Mc Graw Hill.

Peu, P., Picard, S., Diara, A., y Girault, R. (2012). Prediction of Hydrogen Sulphide Production during Anaerobic Digestion of Organic Substrates. *Bioresource Technology* , 423.

PNPGIR, S. (2009-2012). Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. México.

Pöschl, M., Ward, S., y Owende, P. (2010). Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Elsevier. Applied Energy* , 3305-3321.

R

Rajendran, K., Aslanzadeh, S., y Taherzadeh, M.



(2012). Household biogas digesters - A Review. *Energies*, 5. 2911-2942.

Ramalho, R. (1983). Introduction to Wastewater Treatment Processes. Academic Press, Second Edition.

Rao, M.S. (2003). Bioenergy conversion studies of organic fraction of MSW: kinetic studies and gas yield-organic loading relationships for process optimisation. Biomass and Waste Management Laboratory, School of Energy and Environmental Studies, Faculty of Engineering Sciences. Devi Ahilya University, Khandwa Road Campus, Indore, MP PIN—452 017, India.

Rapport, J. Z. (Marzo de 2008). California Integrated Waste Management Board, University of California. Retrieved 26 de Septiembre de 2012 from [www.calrecycle.ca.gov/Publications/.../Organics%5C2008011.pdf](http://www.calrecycle.ca.gov/Publications/.../Organics%5C2008011.pdf)

Rapport, J., Zhang, R., Jenkins, B., y Williams, R. (2008). Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of

Municipal Organic Solid Waste. California, USA: California Integrated Waste Management Board.

RIS, I. L. (2005). Feasibility of Generating Green Power through Anaerobic Digestion of Garden Refuse from the Sacramento Area.

Robles, J. (Domingo 10 de Octubre de 2010). Conagua pide acelerar cierre del Bordo Poniente .

Robles, J. (2013). Suman un Relleno Sanitario más. Martes 09 de Abril , En Linea.

Ros, M. (2012). Salidas valorizables de los residuos subproductos organicos de la industria de los transformados de frutas y hortalizas proyecto Life+Agrowaste.

Rowse, L. (2011). Design of Small Scale Anaerobic Digesters for Application in Rural Developing Countries. E.U.A.: University of South Florida.

S

SAGARPA. (2012). Uso de Fertilizantes. México.

SAGARPA. (2012). Aprovechamiento de los

subproductos de los Biodigestores. México, D.F.

SAGARPA. (2012). Experiencias en el uso de biodigestores dentro del sector agropecuario. México, DF.

SAGARPA. (Marzo de 2014). Proveedores de fertilizantes .

Saveyn, H. (2012). EC 'End-of-Waste' criteria for biodegradable waste subject to biological treatment (compost and digestate).

Schäfer, W., Lehto, M., y Teye, F. (2006). Dry anaerobic digestion of organic residues on-farm - a feasibility study. Finland: MTT Agrifood Research Finland.

Schieder, D., y Schneider, R. (2000). Thermal Hydrolysis (TDH) as a pretreatment method for the digestion of organic waste. *Water and Science Technology*, 181-187.

Schnürer, A., y Jarvis, A. (2011). *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Estocolmo: SGC.

SDSDF. (2010). Índice de desarrollo social por



## MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

colonia o barrio. D.F., Secretaría de Desarrollo Social del Distrito Federal.

Secretaría del Medio Ambiente (GEM). (2011). Secretaría del Medio Ambiente Gobierno del Estado de México. Revisado el 14 de Noviembre del 2012.

Secretaría de Desarrollo Social. (junio de 2010). Catalogo de localidades,. Revisado el 12 de noviembre de 2012. Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010.

SEDESOL. (2004). Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales. México: Secretaría de Desarrollo Social.

SEDESOL, Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. (2008). México.

SEGEM-GTZ. (2000). Estudios de generación y caracterización de residuos sólidos municipales. Naucalpan, Estado de México: Grupo de

consultores en Ingeniería Ambiental.

SEMARNAT. (2012). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. (I. SEMARNAT, Ed.) México.

SEMARNAT. (2010). Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México. México, DF: SEMARNAT, SAGARPA, FIRCO.

SEMARNAT. (2013). Guía de Diseño para la Identificación Gráfica del Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos. México.

SEMARNAT. (2005). Propuestas de proyectos ambientales en la República Mexicana. Minihidroeléctricas.

SEMARNAT.

SEMARNAT. (2005). Residuos.

SEMARNAT. (2012). Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2012-2020. México.

SEMARNAP. (1999). Minimización y manejo

ambiental de los residuos sólidos (pp. 9-31). México.

SMA-DF. (2011). Inventario de residuos solidos del distrito federal.

Sosnowski P., W. A. (2003). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. *Advances in Environmental Research* 7:609-616.

Suwannopadol, S., Ho, G., y Cord-Ruwisch, R. (2011). Rapid start-up of the thermophilic anaerobic digestion with the turf fraction of MSW as inoculum. *Bioresource Technology*, 7762-7767.

Sztern, M. A. (2001). Manual para la elaboracion de compost bases conceptuales y procedimientos. uruguay: organizacion panamericana de la salud.

T

Taherzadeh y Karimi. (2008). Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9), 1621-1651



Tchobanoglous, e. a. (1998). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. España: McGraw-Hill.

Teglia, C. (2011). *Characterization of Solid Digestates: Part 1, Review of Existing Indicators to Assess Solid Digestates Agricultural Use*. *Waste Biomass Valor* 2:43–58.

## U

Uicab, L.A. y Sandoval C. A. (2003). *USO DEL CONTENIDO RUMINAL Y ALGUNOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA CÁRNICA EN LA ELABORACIÓN DE COMPOSTA*. (2) , 45 - 63. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia – Universidad Autónoma de Yucatán, Apdo. 4-116 Mérida, Yucatán, 9710.

## V

Vandevivere, P., Verstraete, W., y De Baere. (2003). *Types of anaerobic digesters for solid wastes*. In J. Mata-Alvarez, *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes* (pp. 111-137). Barcelona: IWA.

Varnero, M. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago : FAO.

Verma, S. (2002). *Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solids Wastes*. E.U.A.: Columbia University.

Vila, R. A. (2009). *Jornada para la innovación. Aprovechamiento como fertilizante de los digestatos derivados de la producción de biogás a partir de residuos agroalimentarios*. Moncada: Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias.

Viveros, I. (2013). *Tesis: Ciclo de vida de los RSOM generados en la central de abastos*. UNAM.

## W

Walsh, J., Ross, C., Smith, M., Harper, S., y Wilkins, A. (1988). *Handbook on biogas utilization*. Atlanta, Georgia: U.S. Department of Energy Southeastern Regional Biomass Energy Program.

Wellinger. (2005). *Biogas Production and Utilisation*. International Energy Agency (IEA).

Williams, J. (2011). *Digestates: Characteristics, Processing and Utilisation*. Inglaterra: Inaugural Bio-Methane Regions Event.

WRAP. (2011). *New Markets for Digestate from Anaerobic Digestion*. Inglaterra .

## Z

Zapata, N. (2005). *Evaluación de Corteza de Pino y Residuos Urbanos como Componentes de Sustratos de Cultivo*. Chile: Agricultura Técnica.

Zhang Ji shi, S. K. (2006). *Influence of temperature on performance of anaerobic digestion of municipal solid waste*. 18 (4) . China: *Journal of Environmental Sciences*.

Zizek, S. (Director). (2008). *Examined Life* [Motion Picture]. Canadá.



## 9. ANEXOS

Generación de Residuos por entidad. (INEGI 2010-2011)

<b>Generación de residuos por entidad</b>		
<b>Entidad federativa</b>	<b>Residuos<sup>1</sup> (kg/día)</b>	<b>Población<sup>2</sup> (Hab)</b>
<b>Estados Unidos Mexicanos</b>	<b>86,342,420</b>	<b>112336538</b>
Aguascalientes	823,860	1184996
Baja California	2,725,000	3155070
Baja California Sur	572,000	637026
Campeche	613,000	822441
Coahuila de Zaragoza	2,449,470	2748391
Colima	728,200	650555
Chiapas	1,914,537	4796580
Chihuahua	2,920,609	3406465
Distrito Federal	17,043,000	8851080
Duintervalo	1,022,161	1632934
Guanajuato	3,719,370	5486372
Guerrero	968,056	3388768
Hidalgo	1,870,271	2665018
Jalisco	6,524,010	7350682
México	8,284,985	15175862
Michoacán de Ocampo	2,286,779	4351037
Morelos	1,401,360	1777227
Nayarit	1,304,610	1084979
Nuevo León	3,077,700	4653458
Oaxaca	2,110,480	3801962
Puebla	1,776,373	5779829
Querétaro	1,200,430	1827937
Quintana Roo	1,644,000	1325578
San Luis Potosí	2,008,230	2585518
Sinaloa	2,581,000	2767761
Sonora	2,268,533	2662480
Tabasco	1,720,500	2238603
Tamaulipas	3,174,870	3268554
Tlaxcala	743,400	1169936
Veracruz de Ignacio de la Llave	4,451,433	7643194
Yucatán	1,361,653	1955577
Zacatecas	1,052,540	1490668

<sup>1</sup>Datos INEGI 2011

<sup>2</sup>Datos INEGI 2010



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

<b>Propiedades fisicoquímicas del Digestato*</b>	
Propiedad	Valor Promedio
pH	8.4
Sólidos Totales (%)	4.5
Densidad (g/ml)	0.95
Sólidos Volátiles (%)	69
DBO (mg/L)	8769
DQO (mg/L)	43887

\*Digestato proveniente de DA de FORSU

Propuesta de Norma de productos Orgánicos COFEPRIS

(DOF-07-02, 2006)

Fertilizante orgánico.

Insumo de nutrición vegetal cuya función principal es aportar nutrientes para las plantas los cuales contienen carbono de origen animal y/o vegetal.

Artículo 12 Fracción

X.2 Fertilizantes orgánicos / X.5 Mejoradores de suelos Orgánicos

a) Identidad y composición

a.1) Nombre comercial del producto;

a.2) Indicar la función del producto de conformidad con el artículo 7, fracción II;

a.3) Tipo de formulación;

a.4) Composición garantizada. Esta deberá contener lo siguiente:

a.4.1) El listado de las materias primas que se empleen en el producto como fuente de elaboración.



a.4.2) El porcentaje garantizado nominal de cada elemento nutriente en cualquiera de sus formas reconocidas y determinables.

a.5) Ingredientes Inertes.

b) Información técnica:

b.1) Análisis de la composición garantizada del producto. Dichos análisis deberán haber sido realizados como máximos de dos años antes de la fecha de la presentación de la solicitud de registro. Las unidades en las que se exprese dicho análisis deberán corresponder con las que se declaran en la etiqueta. Cuando las unidades del producto se reporten en peso/volumen, se indicará la densidad

La composición garantizada se apegará a los intervalos de tolerancia para los diferentes productos que para tal efecto dé a conocer la COFEPRIS a través de Lineamientos.

b.2) análisis de pH;

b.3) Indicar el valor o el intervalo de pH.

b.4) Indicar si el producto es corrosivo;

b.5) Descripción del tratamiento de las materias primas (físico, químico o biológico), solo cuando se lleve a cabo.

b.6) Diagrama de flujo y descripción del proceso de elaboración del producto.

b.7) los productos que contengan materias primas de origen orgánico, animal o vegetal o de sus residuos, no podrán superar los valores máximos de microorganismos siguientes:

b.7.1) Para Salmonella: ausentes en veinticinco gramos o mililitros de producto elaborado

b.7.2) Para coliformes fecales: menor a 1000NMP/g ó NMP/ml del producto elaborado

b.7.3) Para Escherichia coli menor a 1000NMP/g ó NMP/ml del producto elaborado

b.8) los productos que contengan materias primas de origen orgánico, animal o vegetal o de sus residuos, deberán cumplir con lo siguiente:

b.8.1) Los productos orgánicos no podrán superar los valores máximos de metales pesados siguientes:



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

Metal	Límite Máximo *
Cadmio	2
Cobre	300
Níquel	90
Plomo	150
Zinc	500
Mercurio	1.5
Cromo (Total)	250
Cromo hexavalente	0.5

\* Sólidos: mg/Kg de materia seca  
Líquidos: mg/kg

b.8.2) Para el caso de productos a base de biosólidos, además de lo establecido en los incisos b.7 y b.8.1) de esta fracción, se deberá cumplir con lo siguiente:

b.8.1.1) Los productos orgánicos no podrán superar los valores máximos de metales pesados siguientes:

Metal	Límite Máximo *
Cadmio	3
Cobre	400
Níquel	100
Plomo	200
Zinc	1000
Mercurio	3.5
Cromo (Total)	300
Cromo hexavalente	0.5
Arsénico	20

\* Sólidos: mg/Kg de materia seca  
Líquidos: mg/kg

b.8.2.2) No deberán superar los niveles máximos de parásitos (huevos de helmintos), de 35 huevos por gramo en base seca para sólidos o 35 huevos por gramo para líquidos.

c) Proyecto de etiqueta que cumpla con lo dispuesto en las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables y, en su caso, con las disposiciones generales que al efecto se emitan.



d) Numero del dictamen técnico de efectividad biológica emitido por SAGARPA o, en su caso, numero del dictamen técnico de efectividad biológica emitido por la unidad de verificación u organismo de certificado acreditado.

### Parámetros para la Caracterización del Digestato

#### I. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Se entiende por DQO, la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte (CONAGUA, 2001). La DQO varía en función de las características de las materias presentes, de sus proporciones respectivas, de sus posibilidades de oxidación y de otras variables (Durán M. , 2013).

#### II. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La DBO, es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días. El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos (NMX-AA-028-SCFI, 2001 ).

La determinación de la demanda bioquímica de oxígeno permite cuantificar la cantidad de oxígeno disuelto que será utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica (Durán M. , 2013).

#### III. Carbono Orgánico Disuelto (COD)

Es la cantidad de carbono unido a un compuesto orgánico y se usa frecuentemente como un indicador no específico de calidad del agua o del grado de limpieza de los equipos de fabricación de medicamentos. Se mide por la cantidad de dióxido de carbono que se genera al oxidar la materia orgánica en



condiciones especiales (NMX-AA-30, 2001). El carbono orgánico disuelto (COD) es un indicador de la cantidad de materia orgánica disuelta disponible para los microorganismos.

El carbono total (CT) de una muestra, se mide por la cantidad de dióxido de carbono que se genera al oxidar la materia orgánica en condiciones especiales. En el proceso se hace necesario diferenciar el carbono inorgánico (cenizas) presente, ya sea calculándolo para luego restarlo matemáticamente de la fórmula o purgándolo directamente mediante acidificación.

**Ecuación 1** Determinación de Carbono Orgánico Total

$$COT = CT - CIT$$

Donde:

COT : Carbono Orgánico Total

CT : Carbono Total

CIT : Carbono Inorgánico Total

#### IV. Sólidos totales (ST)

Los Sólidos totales son la suma de los sólidos suspendidos totales, sales disueltas y materia orgánica. Estos pueden calcularse con métodos estandarizados en el laboratorio y se definen a continuación (NMX-AA-34, 2001):

- Sales disueltos totales (SDT). Substancias orgánicas e inorgánicas solubles en agua y que no son retenidas en el material filtrante.
- Sólidos suspendidos totales (SST). Sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, que son retenidas en el elemento filtrante.



- Sólidos totales volátiles (SVT). Cantidad de materia orgánica (incluidos aquellos inorgánicos) capaz de volatilizarse por el efecto de la calcinación a  $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$  en un tiempo de 15 min a 20 min.

La determinación de este parámetro, es de suma importancia debido a que en los sólidos totales se encuentran contenidos los elementos necesarios para el desarrollo del metabolismo de las bacterias productoras de metano (Durán M. , 2013).

#### V. Nitrógeno total

Es la suma de los nitrógenos amoniacal y orgánico ( $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ ) presentes en la muestra, conocido como nitrógeno Kjeldahl. Para la realización de este análisis se toma una muestra y es digerida en presencia de ácido sulfúrico concentrado, sulfato de potasio y sulfato cúprico hasta desprendimiento de humos blancos y que la solución sea transparente e incolora o de un tono amarillo paja. El residuo es enfriado, diluido y llevado a condiciones alcalinas para la determinación del amonio. El amonio destilado se cuantifica volumétricamente (NMX-AA-024, 1984).

La determinación de este parámetro es necesaria debido a que el nitrógeno es uno de los macronutrientes esenciales para la activación del metabolismo de las bacterias desintegradoras de la materia orgánica, productoras de metano.

#### VI. Fosforo Total

Al igual que el nitrógeno, el fósforo representa un macronutriente importante para el desarrollo de las bacterias metanogénicas. El fosforo es necesario para la generación microbiana de ATP, así como para la síntesis de los fosfolípidos de membrana y de ácidos nucleicos. Sin embargo, las concentraciones elevadas de fosfato son pueden inhibir el crecimiento microbiano. La presencia de fosforo y nitrógeno es un factor determinante en la descomposición de la materia orgánica.



La supresión de la limitación de fosfato y nitrógeno no siempre es adecuada, ya que puede causar la proliferación de algas o cianobacterias. Por otro parte, al añadir y fosforo de manera controlada en un sistema, se intensifica la descomposición de compuestos orgánicos contaminantes. Por ejemplo, se ha visto que la biodegradación del petróleo en el mar está limitada por el nitrógeno y el fosforo (Fluid Fertilizer Foundation, 2000).

## VII. Relación C/N

Esta relación indica la fracción de carbono orgánico frente a la de nitrógeno. Prácticamente la totalidad del nitrógeno orgánico presente en un residuo orgánico es biodegradable y, por tanto disponible. Con el carbono orgánico ocurre lo contrario ya que una gran parte se engloba en compuestos no biodegradables que impiden su disponibilidad en la agricultura (NMX-AA-067, 1985).

Valores comunes de la cantidad de  $N_2$  y la Relación C/N en varias materias.

<b>Nitrógeno y Relación C/N en varias Materias</b>			
	<b>Material</b>	<b>% <math>N_2</math></b>	<b>C/N</b>
Residuos de Comida	Fruta	1.52	34.8
	Mataderos	7 - 10	2
	Vacas	1.7	18
Estiércoles	Cerdos	3.75	20
	Aves	6.30	15
	Ovejas	3.75	22
Lodos Activados	Digeridos	1.88	15.7
	Crudos	5.6	6.3
Madera y Paja	Serrín	0.10	200 - 500
	Paja trigo	0.30	128
	Madera pino	0.07	723
	Mezclado	0.25	173
Papel	Periódico	0.05	983
	Revistas	0.07	470
Residuos de Jardín	Césped	2.15	20.1
	Hojas caídas	0.5 - 1	40 - 80
Biomasa	General	1.96	20.9

(ambientum, 2013)



El carbono y el nitrógeno son dos elementos indispensables para el desarrollo de la vida ya que afectan directa o indirectamente a todos los procesos biológicos. La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) está en función del porcentaje de materia orgánica (%M.O.), la constante de Jackson y del porcentaje de Nitrógeno total (%N). La ecuación para determinar la relación (C/N) es (NMX-AA-067, 1985):

**Ecuación 2** Cálculo de la Relación C/N

$$C/N = \frac{(\% M.O.) * .58}{\%N}$$

Donde:

C/N : Relación Carbono-Nitrógeno

%M.O. : Porcentaje de materia orgánica

%N : Porcentaje de Nitrógeno Total

### VIII. Humedad

Se expresa como el porcentaje en peso que aporta el agua presente en los materiales que conforman la FORSU, oscila alrededor del 40% en peso, con un margen que puede situarse entre el 25 y el 60%. La máxima aportación la proporcionan las fracciones orgánicas, y la mínima, los productos sintéticos. Esta característica debe tenerse en cuenta por su importancia en los procesos de compresión de residuos, producción de lixiviados, transporte, procesos de transformación, tratamientos de incineración y recuperación energética y procesos de separación de residuos en planta de reciclaje (ambientum, 2013).



### Clasificación de los organismos del suelo (FAO, 2013)

Microorganismos < 5 µm - 100 µm	Microflora	Bacterias Hongos
	Microfauna	Protozoarios Nematodos
Mesoorganismos 100 µm – 2 mm		Gusanos de primavera Ácaros
		Lombrices Milpiés
Macroorganismos 2 – 20 mm		Barrenador de madera Caracoles y babosas

### Sustancias tóxicas para la DA

- Alcoholes (isopropanol)
- Cationes Alcalinos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$  y  $\text{Na}^{+}$ )
- Receptores de electrones , nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y Sulfatos( $\text{SO}_4^{2-}$ )
- Amoniac
- Compuestos con anillos de benceno
- Lauril Sulfato
- Conservadores
- Hidrocarburos Clorados
- Ácidos volátiles y Ácidos grasos de cadena larga
- Cianuro
- Detergentes
- Formaldehido
- Metales Pesados
- Ácido Sulhídrico
- Compuestos orgánicos nitrogenados
- Oxígeno
- Fármacos
- Solventes



### Sustancias químicas usadas para mantener la alcalinidad del digestor

Sustancia	Formula Química	Catión
Bicarbonato de Sodio	$\text{NaHCO}_3$	$\text{Na}^+$
Bicarbonato de Potasio	$\text{KHCO}_3$	$\text{K}^+$
Carbonato de Sodio	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{Na}^+$
Carbonato de Potasio	$\text{K}_2\text{CO}_3$	$\text{K}^+$
Carbonato de Calcio	$\text{CaCO}_3$	$\text{Ca}^{2+}$
Hidróxido de Calcio	$\text{Ca(OH)}_2$	$\text{Ca}^{2+}$
Amoniaco (gas)	$\text{NH}_3$	$\text{NH}_4^+$
Nitrato de Sodio	$\text{NaNO}_3$	$\text{Na}^+$

### Funciones Fisiológicas conocidas de los principales elementos

<b>Funciones Fisiológicas</b>	
Carbono	Constituyente de materiales celulares orgánicos
Nitrógeno	Constituyente de proteínas, ácidos nucleicos, coenzimas
Azufre	Constituyente de proteínas (como los aminoácidos cisteína y metionina); de algunas coenzimas (p. ej. , CoA, co-carboxilasa)
Fosforo	Constituyente de ácidos nucleicos, fosfolípidos, coenzimas

ALTERNATIVAS DE MANEJO DE LOS SUBPRODUCTOS DERIVADOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA  
DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU)



Memoria de Calculo

Equipos	Inversión		Costos Anuales				Beneficio	
	Equipo principal	Costo estimado	Energía	Mantenimiento	Mano de Obra	Distribución	Ganancias Anuales	Toneladas de Fertilizante
Filtro Prensa Sólido	\$200,000.00	\$1,000,000.00	\$2,434.36	\$6,000.00	\$326,400.00	\$9,177.50	\$550,650.00	36.71
Filtro Prensa Líquido	\$200,000.00	\$1,000,000.00	\$2,434.36	\$6,000.00	\$326,400.00	\$26,126.25	\$1,045,050.00	104.51
Centrífuga	\$500,000.00	\$2,500,000.00	\$5,680.17	\$15,000.00	\$163,200.00	\$29,372.50	\$352,470.00	117.49
Evaporador	\$250,000.00	\$1,250,000.00	\$6,491.62	\$7,500.00	\$163,200.00	\$1,067.50	\$427,000.00	4.27
Volute Sólido	\$400,000.00	\$2,000,000.00	\$6,050.00	\$12,000.00	\$163,200.00	\$21,515.00	\$860,600.00	86.06
Volute Líquido	\$400,000.00	\$2,000,000.00	\$6,050.00	\$12,000.00	\$163,200.00	\$19,978.75	\$1,997,875.00	79.92

FPS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CC	\$1,000,000.00										
COM	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86
VPC	\$307,153.44	\$274,244.15	\$244,860.85	\$218,625.75	\$195,201.57	\$174,287.11	\$155,613.49	\$138,940.62	\$124,054.12	\$110,762.61	\$110,762.61
Beneficio	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00
VPB	\$491,651.79	\$438,974.81	\$391,941.79	\$349,948.03	\$312,453.60	\$278,976.43	\$249,086.10	\$222,398.30	\$198,569.91	\$177,294.56	\$177,294.56
VPB-VPC	-\$1,000,000.00	\$184,498.34	\$164,730.66	\$147,080.95	\$131,322.27	\$117,252.03	\$104,689.31	\$93,472.60	\$83,457.68	\$74,515.79	\$66,531.95
VPN	-\$1,000,000.00	-\$815,501.66	-\$650,771.00	-\$503,690.05	-\$372,367.77	-\$255,115.74	-\$150,426.43	-\$56,953.83	\$26,503.85	\$101,019.64	\$167,551.59

FPS	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CC										
COM	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86	\$344,011.86
VPC	\$98,895.19	\$88,299.28	\$78,838.64	\$70,391.64	\$62,849.68	\$56,115.79	\$50,103.38	\$44,735.16	\$39,942.11	\$35,662.60
Beneficio	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00
VPB	\$158,298.72	\$141,338.14	\$126,194.77	\$112,673.90	\$100,601.70	\$89,822.94	\$80,199.06	\$71,606.30	\$63,934.20	\$57,084.10
VPB-VPC	\$59,403.53	\$53,038.86	\$47,356.13	\$42,282.26	\$37,752.02	\$33,707.16	\$30,095.68	\$26,871.14	\$23,992.09	\$21,421.51



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE  
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

VPN	\$226,955.12	\$279,993.98	\$327,350.11	\$369,632.37	\$407,384.38	\$441,091.54	\$471,187.22	\$498,058.36	\$522,050.45	\$543,471.95
-----	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

FPL	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CC	\$1,000,000.00										
COM		\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61
VPC		\$322,286.26	\$287,755.59	\$256,924.63	\$229,396.99	\$204,818.74	\$182,873.88	\$163,280.25	\$145,785.94	\$130,166.01	\$116,219.66
Beneficio		\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00
VPB		\$2,332,700.89	\$2,082,768.65	\$1,859,614.87	\$1,660,370.42	\$1,482,473.59	\$1,323,637.13	\$1,181,818.87	\$1,055,195.42	\$942,138.77	\$841,195.33
VPB-VPC	-\$1,000,000.00	\$2,010,414.64	\$1,795,013.07	\$1,602,690.24	\$1,430,973.43	\$1,277,654.85	\$1,140,763.26	\$1,018,538.62	\$909,409.48	\$811,972.75	\$724,975.67
VPN	-\$1,000,000.00	\$1,010,414.64	\$2,805,427.70	\$4,408,117.94	\$5,839,091.37	\$7,116,746.22	\$8,257,509.47	\$9,276,048.09	\$10,185,457.58	\$10,997,430.33	\$11,722,406.00

FPL	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CC										
COM	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61	\$360,960.61
VPC	\$103,767.55	\$92,649.60	\$82,722.85	\$73,859.69	\$65,946.15	\$58,880.49	\$52,571.87	\$46,939.17	\$41,909.97	\$37,419.62
Beneficio	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00	\$2,612,625.00
VPB	\$751,067.26	\$670,595.76	\$598,746.22	\$534,594.84	\$477,316.82	\$426,175.73	\$380,514.05	\$339,744.68	\$303,343.47	\$270,842.38
VPB-VPC	\$647,299.71	\$577,946.17	\$516,023.36	\$460,735.15	\$411,370.67	\$367,295.24	\$327,942.18	\$292,805.51	\$261,433.50	\$233,422.76
VPN	\$12,369,705.71	\$12,947,651.87	\$13,463,675.24	\$13,924,410.38	\$14,335,781.05	\$14,703,076.29	\$15,031,018.46	\$15,323,823.98	\$15,585,257.47	\$15,818,680.24

Centrifuga	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CC	\$2,500,000.00										
COM		\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67
VPC		\$190,404.17	\$170,003.72	\$151,789.04	\$135,525.93	\$121,005.29	\$108,040.44	\$96,464.68	\$86,129.18	\$76,901.05	\$68,661.65
Beneficio		\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00
VPB		\$314,705.36	\$280,986.93	\$250,881.18	\$224,001.06	\$200,000.94	\$178,572.27	\$159,439.53	\$142,356.72	\$127,104.22	\$113,485.91
VPB-VPC	-\$2,500,000.00	\$124,301.19	\$110,983.20	\$99,092.15	\$88,475.13	\$78,995.65	\$70,531.83	\$62,974.85	\$56,227.55	\$50,203.17	\$44,824.25
VPN	-\$2,500,000.00	-\$2,375,698.81	-\$2,264,715.61	-\$2,165,623.46	-\$2,077,148.33	-\$1,998,152.68	-\$1,927,620.84	-\$1,864,645.99	-\$1,808,418.45	-\$1,758,215.28	-\$1,713,391.03



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

Centrifuga	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CC										
COM	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67	\$213,252.67
VPC	\$61,305.05	\$54,736.65	\$48,872.01	\$43,635.72	\$38,960.47	\$34,786.13	\$31,059.04	\$27,731.29	\$24,760.08	\$22,107.21
Beneficio	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00	\$352,470.00
VPB	\$101,326.70	\$90,470.27	\$80,777.03	\$72,122.35	\$64,394.95	\$57,495.49	\$51,335.26	\$45,835.05	\$40,924.16	\$36,539.42
VPB-VPC	\$40,021.66	\$35,733.62	\$31,905.02	\$28,486.62	\$25,434.49	\$22,709.36	\$20,276.22	\$18,103.76	\$16,164.08	\$14,432.21
VPN	-\$1,673,369.37	-\$1,637,635.75	-\$1,605,730.73	-\$1,577,244.11	-\$1,551,809.62	-\$1,529,100.26	-\$1,508,824.04	-\$1,490,720.28	-\$1,474,556.20	-\$1,460,123.99

Evaporador	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CC	\$1,250,000.00										
COM		\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12
VPC		\$159,159.93	\$142,107.08	\$126,881.32	\$113,286.89	\$101,149.01	\$90,311.62	\$80,635.37	\$71,995.87	\$64,282.03	\$57,394.67
Beneficio		\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00
VPB		\$381,250.00	\$340,401.79	\$303,930.17	\$271,366.22	\$242,291.27	\$216,331.49	\$193,153.11	\$172,458.14	\$153,980.48	\$137,482.57
VPB-VPC	-\$1,250,000.00	\$222,090.07	\$198,294.71	\$177,048.84	\$158,079.33	\$141,142.25	\$126,019.87	\$112,517.74	\$100,462.27	\$89,698.45	\$80,087.91
VPN	-\$1,250,000.00	-\$1,027,909.93	-\$829,615.22	-\$652,566.38	-\$494,487.05	-\$353,344.80	-\$227,324.93	-\$114,807.19	-\$14,344.92	\$75,353.54	\$155,441.44

Evaporador	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CC										
COM	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12	\$178,259.12
VPC	\$51,245.24	\$45,754.68	\$40,852.39	\$36,475.35	\$32,567.27	\$29,077.92	\$25,962.43	\$23,180.74	\$20,697.09	\$18,479.55
Beneficio	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00	\$427,000.00
VPB	\$122,752.30	\$109,600.26	\$97,857.38	\$87,372.66	\$78,011.30	\$69,652.95	\$62,190.13	\$55,526.90	\$49,577.59	\$44,265.71
VPB-VPC	\$71,507.06	\$63,845.59	\$57,004.99	\$50,897.31	\$45,444.03	\$40,575.03	\$36,227.70	\$32,346.16	\$28,880.50	\$25,786.16
VPN	\$226,948.50	\$290,794.09	\$347,799.08	\$398,696.39	\$444,140.42	\$484,715.45	\$520,943.15	\$553,289.31	\$582,169.81	\$607,955.97



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

VS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CC	\$2,000,000.00										
COM		\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00
VPC		\$181,040.18	\$161,643.02	\$144,324.12	\$128,860.82	\$115,054.31	\$102,727.06	\$91,720.59	\$81,893.38	\$73,119.09	\$65,284.90
Beneficio		\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00
VPB		\$768,392.86	\$686,065.05	\$612,558.08	\$546,926.86	\$488,327.55	\$436,006.74	\$389,291.73	\$347,581.91	\$310,340.99	\$277,090.17
VPB-VPC	-\$2,000,000.00	\$587,352.68	\$524,422.03	\$468,233.96	\$418,066.04	\$373,273.25	\$333,279.68	\$297,571.15	\$265,688.52	\$237,221.90	\$211,805.26
VPN	-\$2,000,000.00	-\$1,412,647.32	-\$888,225.29	-\$419,991.33	-\$1,925.29	\$371,347.95	\$704,627.64	\$1,002,198.78	\$1,267,887.31	\$1,505,109.20	\$1,716,914.47

VS	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CC										
COM	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00	\$202,765.00
VPC	\$58,290.09	\$52,044.73	\$46,468.50	\$41,489.74	\$37,044.41	\$33,075.36	\$29,531.57	\$26,367.48	\$23,542.39	\$21,019.99
Beneficio	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00	\$860,600.00
VPB	\$247,401.94	\$220,894.58	\$197,227.31	\$176,095.81	\$157,228.40	\$140,382.50	\$125,341.52	\$111,912.07	\$99,921.49	\$89,215.62
VPB-VPC	\$189,111.84	\$168,849.86	\$150,758.80	\$134,606.07	\$120,184.00	\$107,307.14	\$95,809.95	\$85,544.59	\$76,379.10	\$68,195.63
VPN	\$1,906,026.31	\$2,074,876.17	\$2,225,634.97	\$2,360,241.05	\$2,480,425.04	\$2,587,732.18	\$2,683,542.12	\$2,769,086.72	\$2,845,465.82	\$2,913,661.45

VL	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CC	\$2,000,000.00										
COM		\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75
VPC		\$179,668.53	\$160,418.33	\$143,230.65	\$127,884.51	\$114,182.60	\$101,948.75	\$91,025.67	\$81,272.92	\$72,565.10	\$64,790.27
Beneficio		\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00
VPB		\$1,783,816.96	\$1,592,693.72	\$1,422,047.96	\$1,269,685.68	\$1,133,647.93	\$1,012,185.65	\$903,737.19	\$806,908.20	\$720,453.75	\$643,262.28
VPB-VPC	-\$2,000,000.00	\$1,604,148.44	\$1,432,275.39	\$1,278,817.31	\$1,141,801.17	\$1,019,465.33	\$910,236.90	\$812,711.52	\$725,635.29	\$647,888.65	\$578,472.01
VPN	-\$2,000,000.00	-\$395,851.56	\$1,036,423.83	\$2,315,241.14	\$3,457,042.31	\$4,476,507.65	\$5,386,744.55	\$6,199,456.07	\$6,925,091.36	\$7,572,980.01	\$8,151,452.02



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE  
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
VL										
CC										
COM	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75	\$201,228.75
VPC	\$57,848.46	\$51,650.41	\$46,116.44	\$41,175.39	\$36,763.74	\$32,824.77	\$29,307.83	\$26,167.70	\$23,364.02	\$20,860.73
Beneficio	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00	\$1,997,875.00
VPB	\$574,341.32	\$512,804.75	\$457,861.39	\$408,804.81	\$365,004.29	\$325,896.69	\$290,979.19	\$259,802.85	\$231,966.83	\$207,113.24
VPB-VPC	\$516,492.86	\$461,154.34	\$411,744.95	\$367,629.42	\$328,240.55	\$293,071.92	\$261,671.36	\$233,635.14	\$208,602.81	\$186,252.50
VPN	\$8,667,944.88	\$9,129,099.22	\$9,540,844.17	\$9,908,473.59	\$10,236,714.14	\$10,529,786.07	\$10,791,457.43	\$11,025,092.57	\$11,233,695.37	\$11,419,947.88



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

	Inversión			Costos Anuales				Beneficio	
	Equipo principal	Equipo Auxiliar	Inversión	Energía	Mantenimiento	Mano de Obra	Distribución	Ganancias Anuales	Toneladas de Fertilizante
Evaporador al vacío	\$250,000.00	\$200,000.00	\$2,250,000.00	\$7,000.00	\$13,500.00	\$163,200.00	\$1,067.50	\$640,500.00	4.27
Filtro Prensa (Líquido)	\$200,000.00	\$700,000.00	\$4,500,000.00	\$3,000.00	\$27,000.00	\$385,817.53	\$96,358.22	\$2,587,294.71	104.51
Filtro Prensa (Sólido)	\$200,000.00	\$200,000.00	\$2,000,000.00	\$3,000.00	\$12,000.00	\$163,200.00	\$9,177.50	\$550,650.00	36.71
Volute (Líquido)	\$400,000.00	\$700,000.00	\$5,500,000.00	\$6,500.00	\$33,000.00	\$371,834.43	\$73,681.63	\$1,978,410.26	79.92
Volute (Sólido)	\$400,000.00	\$200,000.00	\$3,000,000.00	\$6,500.00	\$18,000.00	\$163,200.00	\$21,515.00	\$430,300.00	86.06

EV	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CC	\$2,250,000.00										
COM	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50
VPC	\$164,970.98	\$147,295.52	\$131,513.86	\$117,423.09	\$104,842.04	\$93,608.97	\$83,579.43	\$74,624.49	\$66,629.01	\$59,490.19	
Beneficio	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00
VPB	\$571,875.00	\$510,602.68	\$455,895.25	\$407,049.33	\$363,436.90	\$324,497.23	\$289,729.67	\$258,687.21	\$230,970.72	\$206,223.86	
VPB-VPC	-\$2,250,000.00	\$406,904.02	\$363,307.16	\$324,381.39	\$289,626.24	\$258,594.86	\$230,888.27	\$206,150.24	\$184,062.71	\$164,341.71	\$146,733.67
VPN	-\$2,250,000.00	-\$1,843,095.98	-\$1,479,788.82	-\$1,155,407.43	-\$865,781.19	-\$607,186.33	-\$376,298.06	-\$170,147.82	\$13,914.89	\$178,256.60	\$324,990.27

EV	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CC										
COM	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50	\$184,767.50
VPC	\$53,116.24	\$47,425.22	\$42,343.94	\$37,807.09	\$33,756.33	\$30,139.58	\$26,910.34	\$24,027.09	\$21,452.76	\$19,154.25
Beneficio	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00	\$640,500.00
VPB	\$184,128.44	\$164,400.40	\$146,786.07	\$131,058.99	\$117,016.96	\$104,479.42	\$93,285.20	\$83,290.36	\$74,366.39	\$66,398.56
VPB-VPC	\$131,012.20	\$116,975.18	\$104,442.13	\$93,251.90	\$83,260.62	\$74,339.84	\$66,374.86	\$59,263.27	\$52,913.63	\$47,244.31
VPN	\$456,002.47	\$572,977.65	\$677,419.78	\$770,671.68	\$853,932.30	\$928,272.14	\$994,647.00	\$1,053,910.27	\$1,106,823.90	\$1,154,068.22



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE  
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

FPL	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CC	\$4,500,000.00										
COM		\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75
VPC		\$457,299.78	\$408,303.37	\$364,556.58	\$325,496.95	\$290,622.28	\$259,484.17	\$231,682.30	\$206,859.20	\$184,695.71	\$164,906.88
Beneficio		\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71
VPB		\$2,310,084.56	\$2,062,575.50	\$1,841,585.27	\$1,644,272.56	\$1,468,100.50	\$1,310,804.02	\$1,170,360.73	\$1,044,964.94	\$933,004.41	\$833,039.65
VPB-VPC	-\$4,500,000.00	\$1,852,784.78	\$1,654,272.13	\$1,477,028.69	\$1,318,775.61	\$1,177,478.23	\$1,051,319.84	\$938,678.43	\$838,105.74	\$748,308.70	\$668,132.77
VPN	-\$4,500,000.00	-\$2,647,215.22	-\$992,943.09	\$484,085.60	\$1,802,861.21	\$2,980,339.44	\$4,031,659.28	\$4,970,337.71	\$5,808,443.46	\$6,556,752.16	\$7,224,884.92

FPL	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CC										
COM	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75	\$512,175.75
VPC	\$147,238.29	\$131,462.76	\$117,377.46	\$104,801.31	\$93,572.59	\$83,546.96	\$74,595.50	\$66,603.12	\$59,467.08	\$53,095.60
Beneficio	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71	\$2,587,294.71
VPB	\$743,785.40	\$664,094.11	\$592,941.17	\$529,411.76	\$472,689.07	\$422,043.81	\$376,824.83	\$336,450.74	\$300,402.45	\$268,216.47
VPB-VPC	\$596,547.11	\$532,631.35	\$475,563.71	\$424,610.45	\$379,116.48	\$338,496.85	\$302,229.33	\$269,847.62	\$240,935.37	\$215,120.87
VPN	\$7,821,432.04	\$8,354,063.39	\$8,829,627.10	\$9,254,237.55	\$9,633,354.02	\$9,971,850.88	\$10,274,080.21	\$10,543,927.83	\$10,784,863.20	\$10,999,984.07

FPS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CC	\$2,000,000.00										
COM		\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50
VPC		\$167,301.34	\$149,376.20	\$133,371.60	\$119,081.79	\$106,323.03	\$94,931.27	\$84,760.07	\$75,678.63	\$67,570.20	\$60,330.54
Beneficio		\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00
VPB		\$491,651.79	\$438,974.81	\$391,941.79	\$349,948.03	\$312,453.60	\$278,976.43	\$249,086.10	\$222,398.30	\$198,569.91	\$177,294.56
VPB-VPC	-\$2,000,000.00	\$324,350.45	\$289,598.61	\$258,570.19	\$230,866.24	\$206,130.57	\$184,045.15	\$164,326.03	\$146,719.67	\$130,999.71	\$116,964.02
VPN	-\$2,000,000.00	-\$1,675,649.55	-\$1,386,050.94	-\$1,127,480.75	-\$896,614.51	-\$690,483.94	-\$506,438.78	-\$342,112.75	-\$195,393.08	-\$64,393.38	\$52,570.65



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

FPS	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CC										
COM	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50	\$187,377.50
VPC	\$53,866.55	\$48,095.14	\$42,942.09	\$38,341.15	\$34,233.17	\$30,565.33	\$27,290.47	\$24,366.49	\$21,755.80	\$19,424.82
Beneficio	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00	\$550,650.00
VPB	\$158,298.72	\$141,338.14	\$126,194.77	\$112,673.90	\$100,601.70	\$89,822.94	\$80,199.06	\$71,606.30	\$63,934.20	\$57,084.10
VPB-VPC	\$104,432.16	\$93,243.00	\$83,252.68	\$74,332.75	\$66,368.53	\$59,257.61	\$52,908.58	\$47,239.81	\$42,178.40	\$37,659.28
VPN	\$157,002.81	\$250,245.81	\$333,498.49	\$407,831.24	\$474,199.77	\$533,457.38	\$586,365.97	\$633,605.77	\$675,784.17	\$713,443.46

VL	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CC	\$5,500,000.00										
COM		\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06
VPC		\$433,050.05	\$386,651.83	\$345,224.85	\$308,236.47	\$275,211.14	\$245,724.23	\$219,396.63	\$195,889.85	\$174,901.65	\$156,162.19
Beneficio		\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26
VPB		\$1,766,437.74	\$1,577,176.55	\$1,408,193.35	\$1,257,315.49	\$1,122,603.12	\$1,002,324.21	\$894,932.33	\$799,046.72	\$713,434.57	\$636,995.16
VPB-VPC	-\$5,500,000.00	\$1,333,387.68	\$1,190,524.72	\$1,062,968.50	\$949,079.02	\$847,391.98	\$756,599.98	\$675,535.70	\$603,156.87	\$538,532.92	\$480,832.97
VPN	-\$5,500,000.00	-\$4,166,612.32	-\$2,976,087.60	-\$1,913,119.10	-\$964,040.08	-\$116,648.10	\$639,951.88	\$1,315,487.58	\$1,918,644.45	\$2,457,177.37	\$2,938,010.34

VL	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CC										
COM	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06	\$485,016.06
VPC	\$139,430.53	\$124,491.54	\$111,153.16	\$99,243.89	\$88,610.62	\$79,116.63	\$70,639.84	\$63,071.29	\$56,313.65	\$50,280.05
Beneficio	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26	\$1,978,410.26
VPB	\$568,745.67	\$507,808.64	\$453,400.57	\$404,821.94	\$361,448.16	\$322,721.57	\$288,144.26	\$257,271.66	\$229,706.84	\$205,095.39
VPB-VPC	\$429,315.15	\$383,317.10	\$342,247.41	\$305,578.04	\$272,837.54	\$243,604.94	\$217,504.41	\$194,200.37	\$173,393.19	\$154,815.35
VPN	\$3,367,325.49	\$3,750,642.58	\$4,092,889.99	\$4,398,468.03	\$4,671,305.57	\$4,914,910.52	\$5,132,414.93	\$5,326,615.30	\$5,500,008.49	\$5,654,823.84



MANEJO DEL DIGESTATO DERIVADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE  
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) PARA SU USO COMO FERTILIZANTE

VS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CC	\$3,000,000.00										
COM		\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00
VPC		\$186,799.11	\$166,784.92	\$148,915.10	\$132,959.91	\$118,714.21	\$105,994.83	\$94,638.24	\$84,498.43	\$75,445.03	\$67,361.63
Beneficio		\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00
VPB		\$384,196.43	\$343,032.53	\$306,279.04	\$273,463.43	\$244,163.78	\$218,003.37	\$194,645.87	\$173,790.95	\$155,170.49	\$138,545.08
VPB-VPC	\$3,000,000.00	\$197,397.32	\$176,247.61	\$157,363.94	\$140,503.51	\$125,449.57	\$112,008.54	\$100,007.63	\$89,292.52	\$79,725.47	\$71,183.45
VPN	\$3,000,000.00	\$2,802,602.68	\$2,626,355.07	\$2,468,991.13	\$2,328,487.62	\$2,203,038.05	\$2,091,029.51	\$1,991,021.89	\$1,901,729.36	\$1,822,003.89	\$1,750,820.44

VS	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CC										
COM	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00	\$209,215.00
VPC	\$60,144.31	\$53,700.28	\$47,946.68	\$42,809.53	\$38,222.80	\$34,127.50	\$30,470.98	\$27,206.23	\$24,291.28	\$21,688.64
Beneficio	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00	\$430,300.00
VPB	\$123,700.97	\$110,447.29	\$98,613.65	\$88,047.91	\$78,614.20	\$70,191.25	\$62,670.76	\$55,956.04	\$49,960.75	\$44,607.81
VPB-VPC	\$63,556.65	\$56,747.01	\$50,666.98	\$45,238.37	\$40,391.40	\$36,063.75	\$32,199.78	\$28,749.80	\$25,669.47	\$22,919.17
VPN	-\$1,687,263.79	-\$1,630,516.77	-\$1,579,849.80	-\$1,534,611.43	-\$1,494,220.02	-\$1,458,156.27	-\$1,425,956.49	-\$1,397,206.69	-\$1,371,537.22	-\$1,348,618.06