



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

*Análisis de Ciclo de Vida de la gestión de Residuos Sólidos
Orgánicos de la Central de Abasto de la Ciudad de México (CEDA)*

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Químico

PRESENTA

Ivan Viveros Santos

Asesor de Tesis

Dr. Alfonso Durán Moreno



MÉXICO, D.F.

2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Profesor: M. en I. José Antonio Ortiz Ramírez

VOCAL: Profesor: Dr. Alfonso Durán Moreno

SECRETARIO: Profesor: Dr. José Agustín García Reynoso

1er. SUPLENTE: Profesora: M. en C. Leticia Valle Arizmendi

2º SUPLENTE: Profesora: Dra. Luz María Lazcano Arriola

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

TORRE DE INGENIERÍA, 3ER PISO, ALA SUR

ASESOR DEL TEMA: DR. ALFONSO DURÁN MORENO

(Nombre y firma)

SUSTENTANTE: IVAN VIVEROS SANTOS

(Nombre y firma)

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	5
2.1 RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES.....	5
2.2 RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.....	8
2.3 PROBLEMÁTICA ASOCIADA CON LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.....	10
2.4 MANEJO SUSTENTABLE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS	12
2.4.1 Jerarquía de manejo de residuos.....	12
2.4.2 Gestión integral de los residuos sólidos	13
2.5 TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.....	14
2.6 TRATAMIENTOS BIOQUÍMICOS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.....	15
2.7 COMPOSTAJE	16
2.7.1 Situación general de la Planta de Composta de Bordo Poniente.....	18
2.8 DIGESTIÓN ANAEROBIA (DA).....	23
2.8.1 Consumo de materiales y energía en la operación de una Planta de Digestión Anaerobia.....	28
2.8.2 Productos y emisiones en la operación de una Planta de DA.....	29
2.9 RELLENO SANITARIO.....	31
2.9.1 Consumo de materiales y energía en la operación de un relleno sanitario.....	34
2.9.2 Productos y emisiones de un relleno sanitario.....	34
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	36
3.1 CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO O SERVICIO	36
3.2 DEFINICIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	37
3.3 FASES DE UN ACV.....	38
3.3.1 Objetivo y Alcance de estudio.....	39
3.3.2 Análisis de Inventario de Ciclo de Vida	41
3.3.3 Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.....	42
3.3.4 Interpretación del Análisis de Ciclo de Vida	47
3.3.5 Programa de cómputo SimaPro.....	49
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE.....	51
4.1.1 Objetivos del ACV.....	51
4.1.2 Alcance del ACV	52
4.2 ANÁLISIS DE INVENTARIO DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA CEDA... 53	
4.2.1 Descripción del Sistema de Gestión de Residuos Sólidos Orgánicos de la Central de Abasto.... 53	
4.2.2 Escenarios de Gestión de los Residuos Sólidos Orgánicos de la Central de Abasto de la Ciudad de México	58
4.2.3 Procesos excluidos del ACV	68

4.3	EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA CEDA.....	69
4.3.1	<i>Evaluación de los impactos ambientales</i>	69
4.3.2	<i>Identificación de las categorías de impacto significativas en la gestión de residuos orgánicos de la Central de Abasto</i>	69
4.4	INTERPRETACIÓN DEL ACV DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA CEDA.....	80
4.4.1	<i>Gases de efecto invernadero generados a partir de la gestión de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto</i>	83
4.4.2	<i>Límites y recomendaciones</i>	84
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		85
5.1	CONCLUSIONES GENERALES	85
5.2	RECOMENDACIONES GENERALES.....	88
BIBLIOGRAFÍA		90
CAPÍTULO 6. ANEXO		95
6.1	UNIDADES EMPLEADAS EN EL MÉTODO IMPACT 2002+	95
6.2	CARACTERIZACIÓN DE COMPOSTA COMO FERTILIZANTE	95
6.3	PLANTAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE REFERENCIA	97
6.3.1	<i>Tecnología Bekon</i>	98
6.3.2	<i>Tecnología Dranco</i>	99
6.3.3	<i>Tecnología Kompogas</i>	99
6.3.4	<i>Tecnología Strabag</i>	100
6.3.5	<i>Tecnología Valorga</i>	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	<i>Flujo de materiales y generación de residuos en una sociedad (Tchobanoglous & Kreith, 2002).....</i>	6
Figura 2.	<i>Muestreo de residuos orgánicos. Método de cuarteo realizado en la Planta de Composta de Bordo Poniente, Distrito Federal.....</i>	8
Figura 3.	<i>Caracterización promedio de los residuos orgánicos del Distrito Federal (Durán et al., 2013).....</i>	9
Figura 4.	<i>Gases de efecto invernadero generados a partir del manejo de residuos (Baumert et al., 2005).....</i>	11
Figura 5.	<i>Emisiones nacionales de gases de efecto invernadero a partir del manejo de residuos (2000-2006). (INEGI, 2013).....</i>	11
Figura 6.	<i>Jerarquía de manejo de residuos (Department of Energy and Climate Change, 2011).....</i>	13
Figura 7.	<i>Comparación entre gestión y gestión integral de residuos sólidos (UNEP, 2012).....</i>	14
Figura 8.	<i>Esquema del proceso de compostaje (Komilis & Ham, 2004).....</i>	17
Figura 9.	<i>Esquema típico de un proceso de compostaje en sistema abierto (KOMPTECH, 2012).....</i>	17
Figura 10.	<i>Dimensiones de las pilas de composta de la Planta de composta de Bordo Poniente.....</i>	18
Figura 11.	<i>Planta de composta de Bordo Poniente.....</i>	19
Figura 12.	<i>Esquema simplificado del proceso de compostaje.....</i>	20
Figura 13.	<i>Maquinaria para operación de la planta de Composta de Bordo Poniente.....</i>	20
Figura 14.	<i>Esquema simplificado del proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás (RECYC-QUÉBEC, 2012).....</i>	24
Figura 15.	<i>Esquema de un reactor vertical de digestión anaerobia seca, tecnología Dranco (De Baere, 2013).....</i>	26

Figura 16.	<i>Ejemplo de una planta de DA configurada para producir energía y composta a partir de la FORSU (Department of Energy and Climate Change, 2011).....</i>	27
Figura 17.	<i>Corte esquemático de un relleno sanitario (Chávez Gasca, 2013).....</i>	31
Figura 18.	<i>Diagrama de bloques de un relleno sanitario con captación de lixiviados y de biogás (Arena et al., 2003).....</i>	33
Figura 19.	<i>Etapas del ciclo de vida de un producto (Del Borghi et al., 2009).....</i>	36
Figura 20.	<i>Diferentes enfoques de un ACV (adaptado de JRC-IES, 2010).....</i>	38
Figura 21.	<i>Estructura del Análisis de Ciclo de Vida (JRC-IES, 2010).....</i>	39
Figura 22.	<i>Diagrama de bloques del sistema de un producto o servicio.....</i>	41
Figura 23.	<i>Elementos de la fase de EICV (JRC-IES, 2010).....</i>	45
Figura 24.	<i>Elementos de la fase de Interpretación del ACV (Aranda & Zabalsa, 2010).....</i>	48
Figura 25.	<i>Imagen de inicio del programa SimaPro 7.3.3 ®.....</i>	49
Figura 26.	<i>Interfaz del programa SimaPro 7.3.3 ®.....</i>	50
Figura 27.	<i>Gestión de residuos de la Central de Abasto (SMADF, 2012).....</i>	53
Figura 28.	<i>Recolección de residuos sólidos en la CEDA.....</i>	55
Figura 29.	<i>Consumo de combustible en la etapa de recolección de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto.....</i>	56
Figura 30.	<i>Consumo de combustible en la etapa de transferencia de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto.....</i>	57
Figura 31.	<i>Escenario base: todos los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto son confinados en relleno sanitario.....</i>	59
Figura 32.	<i>Escenario 1. Situación actual del manejo de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto.....</i>	61

Figura 33.	<i>Escenario 2. Aprovechamiento del total de la composta generada.....</i>	62
Figura 34.	<i>Escenario 3. Implementación de una Planta de digestión anaerobia con capacidad de 50 mil toneladas por año en Bordo Poniente.....</i>	64
Figura 35.	<i>Escenario 4. Implementación de una Planta de digestión anaerobia con capacidad de 50 mil toneladas por año en la Central de Abasto.....</i>	67
Figura 36.	<i>Categorías de impacto del escenario base (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).....</i>	70
Figura 37.	<i>Puntuación total por etapa del escenario base (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).....</i>	72
Figura 38.	<i>Puntuación total por etapa del escenario 1 (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).....</i>	74
Figura 39.	<i>Comparación entre el escenario base y 1 (Puntuación total por etapa) (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).....</i>	75
Figura 40.	<i>Comparación de escenarios (Puntuación total) (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).....</i>	80
Figura 41.	<i>Comparación de escenarios evaluados en el ACV de la gestión de los residuos sólidos orgánicos de la CEDA.....</i>	82
Figura 42.	<i>Balance de materia de una planta de digestión anaerobia.....</i>	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Generación estimada de residuos sólidos municipales en México por tipo de localidad en el año 2012 (SEMARNAT, 2013).....</i>	7
Tabla 2	<i>Generación de residuos sólidos en el D.F. por fuente (SMADF, 2012).....</i>	7
Tabla 3	<i>Comparación entre los tratamientos aerobios y anaerobios de tratamiento de la FORSU (Tchobanoglous & Kreith, 2002).....</i>	16
Tabla 4	<i>Ingreso de residuos sólidos orgánicos y generación de composta en la PCBP en el año 2011 (SMADF, 2012).....</i>	19
Tabla 5	<i>Balance de materia de residuos sólidos orgánicos en la Planta de Composta de Bordo Poniente.....</i>	22
Tabla 6	<i>Factores de emisiones biogénicas a partir del tratamiento de la FORSU mediante compostaje (Komilis & Ham, 2004).....</i>	23
Tabla 7	<i>Clasificación de los procesos de digestión anaerobia de acuerdo con diferentes criterios (FNR, 2012).....</i>	25
Tabla 8	<i>Composición y generación potencial de biogás en relleno sanitario a partir de la degradación de la FORSU (McDougall et al., 2001).</i>	35
Tabla 9	<i>Categorías de impacto y de daño del método IMPACT 2002+ (Humbert et al., 2011).....</i>	43
Tabla 10	<i>Factores de normalización de las categorías de daño (Humbert et al., 2011).....</i>	46
Tabla 11	<i>Daños ponderados (puntos/escenario) (Humbert et al., 2011).....</i>	47
Tabla 12	<i>Generación de residuos sólidos en la Central de Abasto por sector (SMADF, 2012).....</i>	54
Tabla 13	<i>Inventario de Ciclo de Vida del Escenario 1.....</i>	61
Tabla 14	<i>Inventario de Ciclo de Vida del Escenario 2.....</i>	63
Tabla 15	<i>Inventario de Ciclo de Vida del Escenario 3.....</i>	66
Tabla 16	<i>Inventario de Ciclo de Vida del Escenario 4.....</i>	68
Tabla 17	<i>Categorías de impacto del escenario base (Puntuación única) (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).....</i>	71

Tabla 18	<i>Categorías de impacto del escenario 1. (Puntuación única) (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+)</i>	73
Tabla 19	<i>Categorías de impacto del escenario 2. (Puntuación única) (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+)</i>	77
Tabla 20	<i>Categorías de impacto del escenario 3. (Puntuación única) (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+)</i>	78
Tabla 21	<i>Categorías de impacto del escenario 4. (Puntuación única) (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+)</i>	79
Tabla 22	<i>Comparación de escenarios evaluados en el ACV de la gestión de residuos sólidos orgánicos de la CEDA</i>	81
Tabla 23	<i>Emisiones de gases de efecto invernadero de los escenarios de gestión de la FORSU de la CEDA (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+)</i>	83
Tabla 24	<i>Caracterización de composta en función de minerales NPK (van Haren et al., 2010)</i>	95
Tabla 25	<i>Equivalencia entre composta y fertilizantes</i>	97
Tabla 26	<i>Plantas de Digestión Anaerobia de referencia de la tecnología Bekon</i>	98
Tabla 27	<i>Plantas de digestión anaerobia de referencia de la tecnología Dranco (Organic Waste System, 2013)</i>	99
Tabla 28	<i>Plantas de Digestión Anaerobia de referencia de la tecnología Kompogas (Axpocompogas Ltd, 2013)</i>	99
Tabla 29	<i>Plantas de digestión anaerobia de referencia de la tecnología Strabag (STRABAG, 2013)</i>	100
Tabla 30	<i>Plantas de digestión anaerobia de referencia de la tecnología Valorga (Valorga International SAS, 2013)</i>	100

ÍNDICE DE ABREVIACIONES

<i>ACV</i>	<i>Análisis de Ciclo de Vida</i>
<i>CEDA</i>	<i>Central de Abasto de la Ciudad de México</i>
<i>EICV</i>	<i>Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida</i>
<i>FAO</i>	<i>Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura</i>
<i>FORSU</i>	<i>Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos</i>
<i>GEI</i>	<i>Gases de Efecto Invernadero</i>
<i>ICV</i>	<i>Inventario de Ciclo de Vida</i>
<i>INEGI</i>	<i>Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática</i>
<i>IRSDF</i>	<i>Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal</i>
<i>ISO</i>	<i>Organización Internacional de Estandarización</i>
<i>LGPGIR</i>	<i>Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos</i>
<i>LRSDF</i>	<i>Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal</i>
<i>PCBP</i>	<i>Planta de Composta de Bordo Poniente</i>
<i>RSO</i>	<i>Residuos Sólidos Orgánicos</i>
<i>SNIARN</i>	<i>Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales</i>
<i>T</i>	<i>Toneladas</i>
<i>Kt</i>	<i>Miles de toneladas</i>
<i>UNEP</i>	<i>Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente</i>

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace unas décadas, el relleno sanitario constituía a nivel mundial la manera más común de disponer de los residuos sólidos municipales, lo cual da lugar a la conversión de la materia orgánica en biogás, que contiene en promedio 50% de metano, cuyo potencial de calentamiento global es 56 veces mayor que el dióxido de carbono en un lapso de 25 años.

En México, el *sector de los residuos (manejo de residuos y tratamiento de aguas residuales)* contribuye en promedio con un 15% del total de gases de efecto invernadero (GEI) generados por actividades humanas, de ahí que en el *Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012* se haya establecido este rubro como un área estratégica de lucha contra el calentamiento global.

El interés en los problemas ambientales causados por el manejo inadecuado de los residuos sólidos municipales, así como en los originados por el calentamiento global, promueve acciones hacia un *manejo sustentable* de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU en adelante).

Para alcanzar un *manejo sustentable* de los residuos, el paso fundamental es reducir la cantidad de residuos generados, y posteriormente contar con un sistema que minimice sus impactos ambientales.

En este sentido, resulta primordial reducir al máximo la cantidad de residuos orgánicos confinados en relleno sanitario y hacer uso de tecnologías que permitan la recuperación de materiales y energía a partir de los mismos (reciclaje, compostaje, digestión anaerobia, incineración).

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de evaluación ambiental que ha sido ampliamente utilizada en la formulación de escenarios de manejo de residuos acordes con las características de la región en la cual se implementarán.

Por tal razón, en esta tesis se ha pretendido evaluar a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), el manejo¹ de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto de la Ciudad de México (CEDA).

Actualmente, la totalidad de los residuos orgánicos de la Central de Abasto son enviados a la Planta de Composta de Bordo Poniente. Los resultados obtenidos en el presente trabajo han demostrado que el reducido aprovechamiento de la composta inclina la balanza hacia los impactos potenciales negativos; sin embargo, si se hiciera uso de toda la composta generada, éste método resultaría adecuado desde un punto de vista ambiental.

Asimismo, se ha identificado que la implementación de una Planta de digestión anaerobia, independientemente de su capacidad, se traduciría en una considerable reducción de los impactos ambientales asociados con el manejo actual de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Aplicar una herramienta de evaluación ambiental, denominada *Análisis de Ciclo de Vida*, en la determinación de un escenario de gestión de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto que identifique opciones para reducir los impactos ambientales del sistema actual.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar la etapa de la gestión actual de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto que presenta los mayores impactos ambientales potenciales.
- Cuantificar el abatimiento de los impactos ambientales que representa la implementación de una Planta de digestión anaerobia.

¹ En esta tesis se utilizarán como sinónimos los términos manejo y gestión.

- Generar un escenario de gestión de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto que reduzca los impactos ambientales identificados en el sistema de gestión actual.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de evaluación ambiental que posibilita tener una visión global de un proceso, ya que permite analizar los impactos ambientales de cada una de las etapas que lo conforman. Para determinar dichos impactos, el ACV parte de balances de materia y energía, conceptos ampliamente usados en Ingeniería Química.

En esta tesis se proporcionan las bases para realizar un Análisis de Ciclo de Vida orientado a la gestión de residuos. Se eligió como caso de estudio la Central de Abasto de la Ciudad de México por la cantidad y características de los residuos que genera.

Al contribuir con el 5% del total de residuos generados en el Distrito Federal, la Central de Abasto es considerada un generador de alto volumen, cuya producción promedio oscila alrededor de 585 toneladas por día, con un porcentaje promedio de residuos orgánicos del 80% (dependiendo de la temporada del año).

Hasta la fecha, el gobierno del Distrito Federal ha aplicado el compostaje como única opción de tratamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en la Central de Abasto; sin embargo, a nivel mundial, el tratamiento de estos residuos vía digestión anaerobia cada vez cobra mayor importancia por las ventajas que presenta: generación de electricidad a partir de biogás y uso del subproducto (digestato) como composta.

El único estudio sobre el sistema de gestión de residuos sólidos urbanos del Distrito Federal que emplea un enfoque de ciclo de vida, es el realizado por Juárez *et al.* (2008), cuyos objetivos principales fueron evaluar: el aumento de la recolección selectiva, el incremento del porcentaje de recuperación de residuos en las plantas de selección y la implementación del proceso de incineración de residuos.

Por tal motivo, en este estudio se estableció como uno de los objetivos evaluar los impactos ambientales de la implementación de la tecnología de digestión anaerobia en el tratamiento de la fracción orgánica de residuos de la Central de Abasto.

Resulta conveniente señalar que la *gestión integral de residuos debe* involucrar los tres pilares del desarrollo sustentable: medio ambiente, sociedad y economía; por consecuencia, en la determinación del escenario óptimo de manejo de residuos se deben realizar de manera paralela tres estudios que incluyan cada uno, los aspectos antes citados.

En este sentido, se especifica que este estudio se enfoca únicamente en la evaluación del *desempeño ambiental* del sistema actual del manejo de residuos orgánicos de la Central de Abasto y de los escenarios hipotéticos planteados, mediante un Análisis de Ciclo de Vida.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

En este capítulo se aborda el tema de los residuos sólidos municipales, se centra la atención en la situación de la fracción orgánica de residuos en el Distrito Federal y en la Central de Abasto de la Ciudad de México (CEDA).

2.1 RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Se han establecido varias definiciones de residuo; el Diccionario de la Real Academia Española (RAE, 2013) establece las siguientes definiciones:

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.*

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), la palabra residuo designa: *“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”*.

McDougall *et al.* (2001) señalan que la palabra *residuo* se refiere generalmente a la ausencia de uso o valor de un material u objeto; y que dicha característica puede asociarse con el mezclado y el desconocimiento de su composición.

En cuanto al término *Residuos Sólidos Urbanos*, la LGPGIR incluye la siguiente definición: *“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”.

En esta tesis se empleará la definición de residuo que establece la LGPGIR, a fin de apearse a la normatividad mexicana, y que coincide con el resto de las definiciones mencionadas.

Como puede apreciarse en la Figura 1, en general, las actividades humanas tienen como *subproducto* cierta cantidad de residuos. Desde el proceso de extracción de materias primas, el proceso de manufactura, y en la etapa de consumo, se desecha cierta cantidad de materiales.

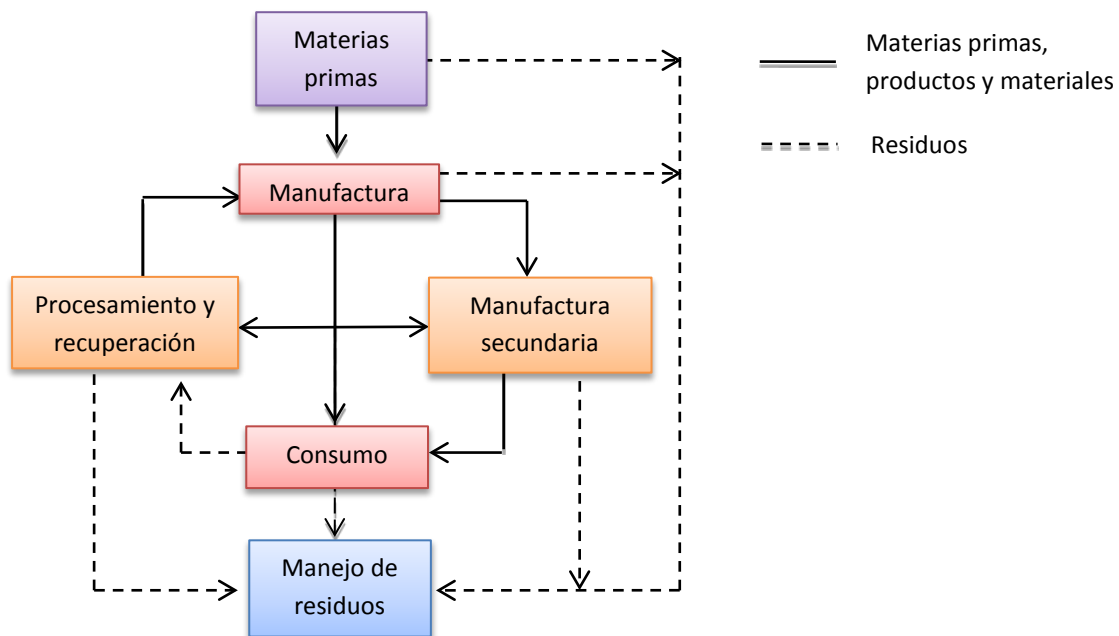


Figura 1. Flujo de materiales y generación de residuos en una sociedad (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Por otra parte, a partir de la Figura 1, puede inferirse que una de las mejores estrategias para reducir la cantidad de residuos es limitar el consumo de materias primas e incrementar la recuperación y reúso de materiales.

En la etapa de consumo (Figura 1), la generación de residuos sólidos involucra aspectos socioculturales, entre ellos: nivel de ingresos, hábitos de consumo y desarrollo tecnológico (UNEP, 2013).

Como se muestra en la Tabla 1, existe una relación directa entre grado de urbanización y cantidad de residuos generados. Como indican los datos de la tercera columna de esta tabla, las Zonas Metropolitanas representan la mayor contribución al total de residuos generados en el país, mientras que las zonas rurales o semiurbanas representan la menor contribución.

Tabla 1. Generación estimada de residuos sólidos municipales en México por tipo de localidad en el año 2012 (SEMARNAT, 2013).

Localidad	Generación (kt)	Porcentaje
Zonas Metropolitanas	18,004	43%
Ciudades medias	15,824	38%
Ciudades pequeñas	3,548	8%
Localidades rurales o semiurbanas	4,726	11%
TOTAL	42,102	100%

De acuerdo con el Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal (IRSDF-2011), en el año 2011², se generaron en promedio 12 mil 664 toneladas de residuos por día en su territorio. En la Tabla 2 se muestra el desglose de generación de residuos por fuente.

Tabla 2. Generación de residuos sólidos en el D.F. por fuente (SMADF, 2012).

Fuente	Domicilios	Comercios	Mercados	Servicios	Controlados	Diversos	CEDA
t/día	5987	1897	1323	1918	358	566	585
Porcentaje	47%	15%	10%	15%	3%	4%	5%

La Tabla 2 muestra que la Central de Abasto contribuye con un 5% en el total de residuos generados en el Distrito Federal, como consecuencia, es denominada *generador de alto volumen*. Para el mismo año, el IRSDF indica que la Central de

² Constituye el inventario de residuos más reciente.

Abasto mostró una tasa de generación de residuos de 585 toneladas por día (SMADF, 2012).

Como se muestra en el Capítulo 5, la mayor proporción de residuos sólidos generados en la Central de Abasto corresponde al tipo orgánico (mayor al 80%), y en conjunto con la enorme cantidad de residuos que genera, la convierte en un atractivo caso de estudio para determinar los impactos ambientales potenciales asociados con la gestión de sus residuos.

2.2 RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

La *Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal* (LRSDF) establece en su artículo 3º una definición muy breve de residuos sólidos orgánicos: “*todo residuo sólido biodegradable*”.

Los residuos sólidos orgánicos corresponden a restos de plantas, vegetales y animales; son biodegradables, en tanto se descomponen bajo la acción de microorganismos presentes en la naturaleza (Figura 2).



Figura 2. Muestreo de residuos orgánicos. Método de cuarteo realizado en la Planta de Composta de Bordo Poniente, Distrito Federal.

De acuerdo con el SNIARN, en el año 2011, la fracción orgánica de residuos del Distrito Federal correspondió al 52%, lo cual significa que en promedio se generaron 6 mil 585 toneladas de residuos orgánicos por día.

Como se retomará en el Capítulo 4, la Central de Abasto presentó en el año 2011 una composición del 81.5% de residuos orgánicos, lo cual se traduce en 477 toneladas de residuos orgánicos por día. De la cantidad de residuos orgánicos

generados en la Central de Abasto una amplia proporción corresponde a frutas y vegetales que, por su apariencia, no cumplen con los estándares alimenticios de calidad, y por ende son desechados.

Con el objetivo de conocer la composición de la FORSU, en el marco del proyecto *FORDECYT 174710: "Generación de un Sistema Piloto de Tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM)"*, se realizó el muestreo y caracterización de los mismos en el Distrito Federal y en los estados de México y Morelos (Durán *et al.*, 2013).

Como se observa en la Figura 3, la mayor proporción de la FORSU corresponde a *cáscaras de frutas y vegetales* y en segundo lugar se encuentra la categoría *plantas y flores de hogar*.

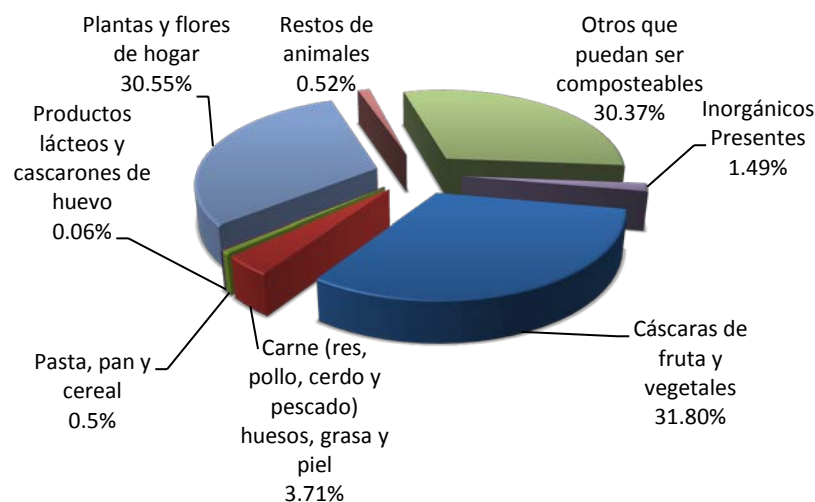


Figura 3. Caracterización promedio de los residuos orgánicos del Distrito Federal (Durán *et al.*, 2013).

A nivel mundial, en el año 2011, la FAO solicitó un estudio al *Instituto Suizo de Alimentos y Biotecnología* sobre la cantidad de residuos provenientes de recursos alimentarios (frutas, verduras y alimentos preparados) destinados al consumo humano.

Los resultados del estudio revelaron que aproximadamente un tercio de los alimentos producidos para consumo humano se desecha a nivel mundial, lo cual

equivale aproximadamente a 13 mil millones de toneladas por año, que corresponde a la cantidad de alimentos producida en el África Subsahariana (FAO, 2011).

La cantidad de alimentos que terminan como residuos se traduce en que buena parte los recursos destinados a su producción y distribución (combustibles, agua, dinero) son usados en vano.

El estudio publicado por la FAO (2011), señala además que una gran cantidad de alimentos se desechan debido a los estándares de calidad establecidos, los cuales rechazan aquéllos que no sean perfectos en forma o apariencia.

De igual manera, el estudio identificó que a nivel del consumidor, una mala planeación de la cantidad de productos alimenticios que se adquieren en el mercado puede dar como resultado una gran cantidad de alimentos que terminan en el bote de basura; situación que ocurre principalmente en países desarrollados.

Mientras que en países en vías de desarrollo, la mayor parte del desecho de alimentos se presenta en la etapa de producción, debido principalmente a deficiencias tecnológicas durante la siembra, cosecha y transporte.

2.3 PROBLEMÁTICA ASOCIADA CON LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

En el siglo XXI, la gestión de residuos es un preponderante reto ambiental que enfrenta México y en particular, el Distrito Federal, que como se ha señalado previamente, genera 12 mil 664 toneladas por día de residuos sólidos urbanos, de las cuales 6 mil 585 toneladas son de tipo orgánico (SMADF, 2012).

El trabajo que supone manejar tal cantidad de residuos se traduce en impactos ambientales, y en específico en emisiones de GEI.

El principal problema ambiental que se identifica con el manejo de la FORSU es el confinamiento de la misma en rellenos sanitarios, ya que este proceso genera grandes cantidades de GEI (CH₄ y CO₂ principalmente) y de lixiviados, que de no contar con un sistema de captación, dañan el manto freático (Nielsen & Hauschild, 1998).

Como se muestra en la Figura 4, las emisiones de GEI a partir de residuos corresponden al 4% del total de emisiones a nivel mundial (Baumert *et al.*, 2005).

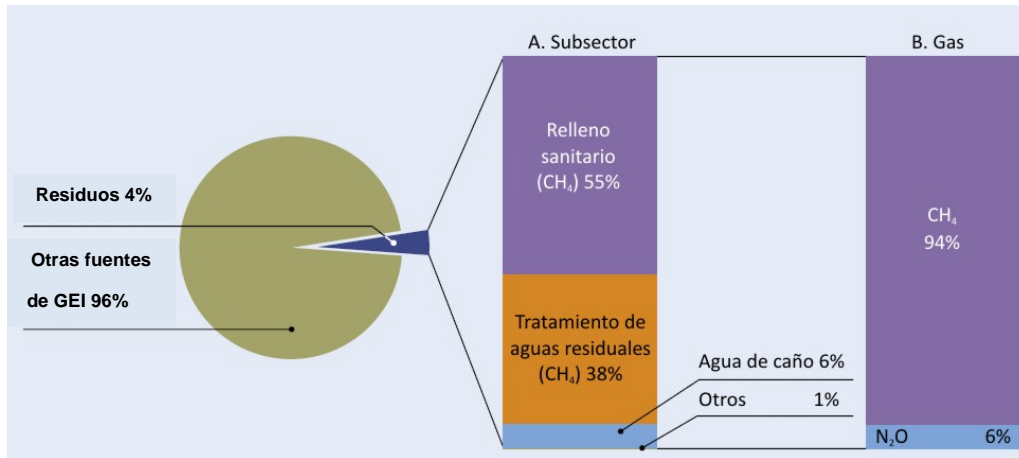


Figura 4. Gases de efecto invernadero generados a partir del manejo de residuos (Baumert *et al.*, 2005).

De acuerdo con los datos del INEGI sobre emisiones de GEI en México, el volumen de emisiones derivadas del manejo de residuos sólidos urbanos y del tratamiento de aguas residuales alcanzó, en el año 2006, la cifra de 99.6 millones de toneladas de CO₂ equivalente, que correspondió al 15% del total nacional.

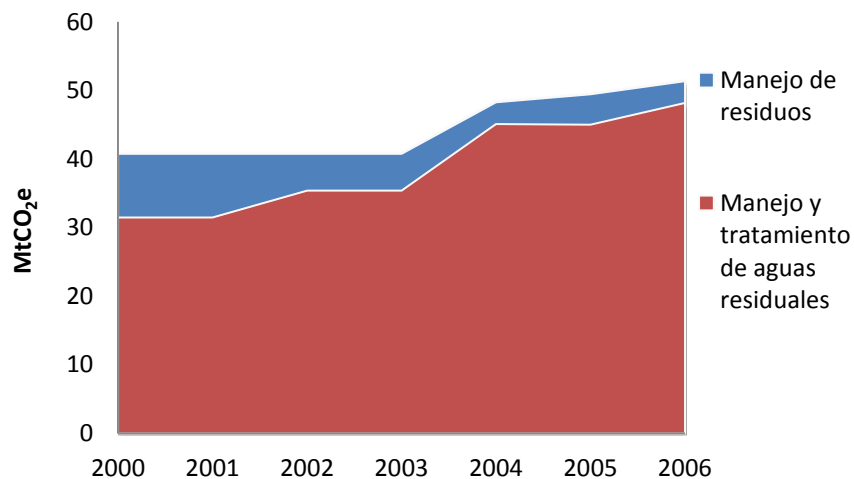


Figura 5. Emisiones nacionales de gases de efecto invernadero a partir del manejo de residuos (2000-2006). (INEGI, 2013).

En la Figura 5 se muestra la evolución de las emisiones de GEI a partir del *rubro de residuos*, como se observa, la mayor contribución corresponde al manejo de residuos sólidos y en segundo término se encuentra el manejo de aguas residuales. Asimismo, en esta figura se muestra que las emisiones de GEI han ido en aumento con respecto al paso del tiempo, lo cual se relaciona con el aumento en la cantidad de aguas residuales y de residuos generados.

2.4 MANEJO SUSTENTABLE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

Históricamente, la salud y la seguridad han sido las mayores preocupaciones en el manejo de residuos. Estas consideraciones aún son vigentes, los residuos deben ser manejados de tal forma que se minimicen los daños a la salud humana; sin embargo, se debe buscar además, un sistema de gestión acorde con los principios del *Desarrollo Sustentable*.

El principio de sustentabilidad o *Desarrollo Sustentable* ha sido definido como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias” (IPCC, 2006).

El Desarrollo Sustentable supone una armonía entre desarrollo económico, social y cuidado del medio ambiente. En este sentido, la aplicación del Desarrollo Sustentable en el manejo de residuos ha dado lugar a dos conceptos complementarios: *jerarquía de manejo de residuos* y *gestión integral de residuos* (McDougall *et al.*, 2001).

2.4.1 JERARQUÍA DE MANEJO DE RESIDUOS

La *jerarquía de manejo de residuos* establece un orden de preferencia en las etapas de gestión de residuos; inicia en la *prevención* de la generación de residuos, seguida por el *reúso*, *reciclaje*, *recuperación* y *disposición* en relleno sanitario como última opción (Figura 6).

La prioridad establecida en el manejo de residuos está en función únicamente de criterios ambientales y se considera que las acciones ubicadas en la parte baja de la pirámide invertida representan los mayores impactos ambientales (Figura 6).

La jerarquía de manejo de residuos no exige un orden riguroso, antes bien, es flexible y debe tender a ajustarse a las circunstancias de cada región. En este sentido, la legislación europea recomienda el uso del Análisis de Ciclo de Vida para el establecimiento de las etapas que den lugar a un manejo sustentable de residuos (European Parliament and The Council, 2008).

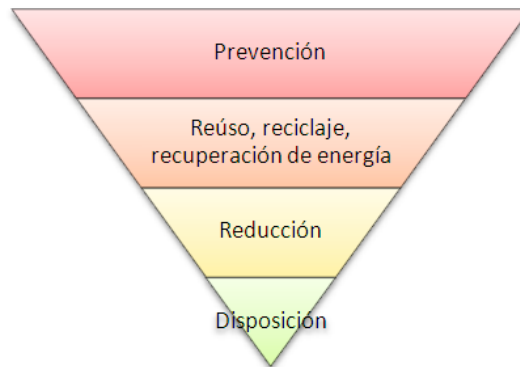


Figura 6. Jerarquía de manejo de residuos (Department of Energy and Climate Change, 2011).

2.4.2 GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

La *gestión integral de los residuos sólidos*, de acuerdo con McDougall *et al.* (2001), es la disciplina asociada con el control de la generación, almacenamiento, recolección, transferencia, procesamiento y disposición de los residuos sólidos, de tal manera que resulte acorde con los principios del Desarrollo Sustentable (Figura 7).

Como se observa en la Figura 7, la gestión integral de residuos parte de la reducción de la generación de residuos; la cual afectará el volumen y en cierta medida la naturaleza de los residuos (UNEP, 2013); acción que coincide con el primer peldaño de la *jerarquía de manejo de residuos* (Figura 6).

La prevención de la generación de residuos orgánicos puede incluir dos conceptos: el *consumo inteligente* (comprar sólo la cantidad de alimentos que se consumirá) y *jardinería inteligente* (poseer plantas de reducido follaje y

crecimiento) (Manfredi & Pant, 2013). Para impulsar esta acción, la FAO ha creado la Iniciativa *Salvemos los Alimentos*³.

El compostaje y tratamiento de los residuos sólidos orgánicos vía digestión anaerobia (DA) constituyen operaciones de recuperación de materiales y energía, en tanto se aprovechen la composta y biogás generados a partir de estos procesos.

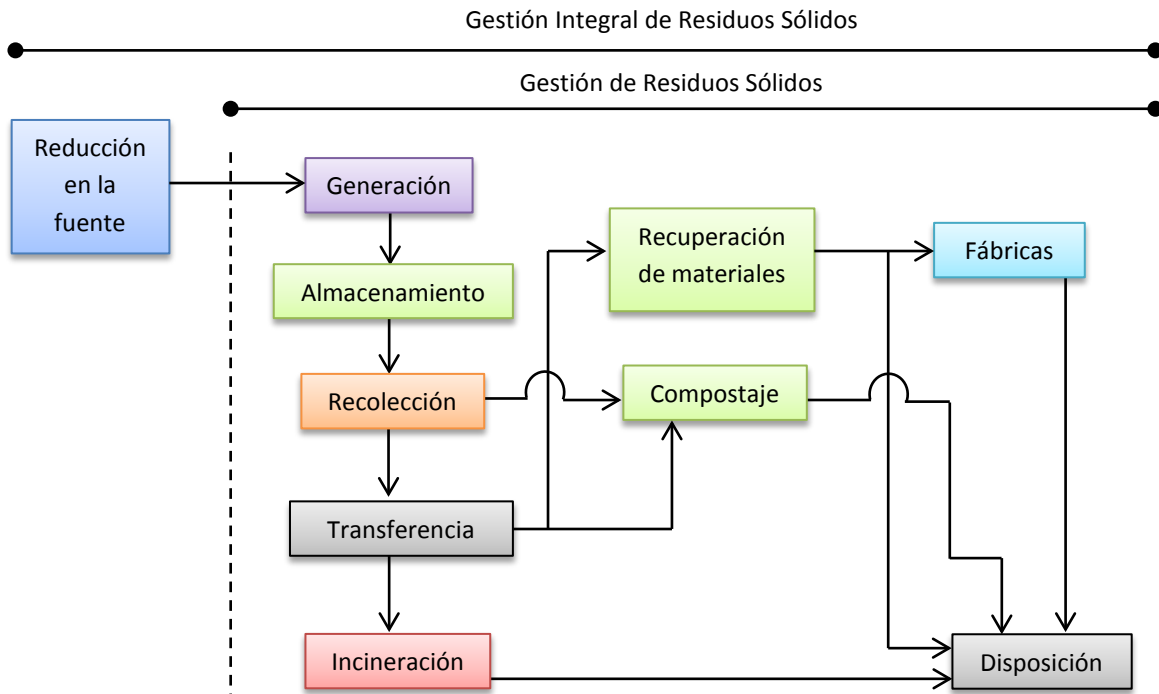


Figura 7. Comparación entre gestión y gestión integral de residuos sólidos (UNEP, 2012).

2.5 TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

En esta sección se presenta una descripción de las principales tecnologías de tratamiento de los residuos sólidos orgánicos: compostaje y digestión anaerobia. Se presenta cada tecnología desde una óptica de Análisis de Ciclo de Vida.

Adicionalmente se describe el confinamiento en relleno sanitario ya que forma parte del sistema actual de manejo de los residuos sólidos orgánicos en el Distrito Federal.

³ <http://www.save-food.org/launch.php>

La selección de una tecnología de tratamiento de residuos aplicable a una cierta región debe tomar en cuenta la manera en que estos se recolectan.

En el caso del Distrito Federal, de acuerdo con el IRSDF-2011 las fracciones orgánica e inorgánica se recolectan de manera independiente. Esto debería, en principio, permitir una alta recuperación de materiales y energía, y por consecuencia reducir el volumen de residuos enviados a relleno sanitario.

De esta manera, en la gestión de residuos que incluya una adecuada separación en la fuente, el compostaje y la digestión anaerobia son las tecnologías más adecuadas para el tratamiento de la FORSU (SOLINOV Inc, 2006). Mientras que la incineración no resulta adecuada para tratar esta fracción, debido a su alto contenido de humedad y al elevado costo de una planta de este tipo (ICF consulting, 2005).

Si se pretende implementar una tecnología de incineración, debe realizarse un estudio que incluya el uso que se daría al calor recuperado, de lo contrario, su instalación no representaría beneficio alguno (SNC-LAVALIN & SOLINOV, 2007).

Dado que las tecnologías de compostaje y digestión anaerobia satisfacen los principios de la *jerarquía de residuos* (Figura 6) en el marco del desarrollo sustentable y que además son ampliamente reconocidas por organismos como la FAO y la UNEP, estas han sido consideradas en los escenarios de gestión de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto (CAPÍTULO 4).

2.6 TRATAMIENTOS BIOQUÍMICOS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

Los tratamientos bioquímicos de la FORSU tienen un papel central en la *gestión integral de residuos sólidos*, ya que al hacer uso de las propiedades de estos materiales y de su interacción con microorganismos, se obtienen subproductos útiles para la sociedad (composta y biogás⁴), lo que se traduce en una disminución de sus impactos ambientales.

⁴ El biogás puede ser aprovechado como sustituto de gas natural o empleado en la generación de electricidad.

En la Tabla 3 se muestra una comparación entre los procesos anaerobios y aerobios de tratamiento de la FORSU. Cada proceso, ya sea aerobio o anaerobio, ofrece diferentes ventajas.

Tabla 3. Comparación entre los tratamientos aerobios y anaerobios de tratamiento de la FORSU (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Característica	Proceso Aerobio	Proceso Anaerobio
Consumo de energía	Consumidor neto de energía	Productor neto de energía
Productos	Composta, CO ₂ , H ₂ O	Digestato y biogás
Reducción de volumen	Mayor al 25%	Mayor al 10%
Tiempo de procesamiento	De 20 a 30 días	De 20 a 40 días
Principal objetivo	Reducción de volumen	Producción de energía
Objetivo secundario	Producción de composta	Reducción de volumen, estabilización de residuos y obtención de energía

En general, los procesos anaerobios son más complejos que los aerobios, sin embargo, los primeros presentan la ventaja de la recuperación de energía en forma de biogás, que puede ser utilizado en la generación de electricidad o como sustituto de gas natural (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Por su parte, los procesos aerobios son consumidores netos de energía pero ofrecen la ventaja de que su operación es más sencilla, y si ésta se realiza adecuadamente, reducen significativamente el volumen de los residuos.

2.7 COMPOSTAJE

Tal como se ilustra en la Figura 8, el compostaje es un proceso de conversión bioquímica de los residuos sólidos orgánicos, de tipo aerobio, que opera gracias al trabajo de diversos microorganismos (bacterias y hongos) bajo ciertas condiciones de humedad, oxigenación, pH y porosidad (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

El proceso de compostaje en pilas se desarrolla en tres etapas: pretratamiento, tratamiento y post tratamiento (MDDEP, 2012), las cuales se describen a continuación.



Figura 8. Esquema del proceso de compostaje (Komilis & Ham, 2004).

Pretratamiento

- Abertura y eliminación de bolsas de plástico (si es aplicable).
- Separación de cuerpos extraños mediante una o varias técnicas: trituración, cribado, separación manual y separación magnética.



Figura 9. Esquema típico de un proceso de compostaje en sistema abierto (KOMPTECH,2012).

Tratamiento (en pilas): Como se muestra en la Figura 10, los residuos orgánicos a tratar son dispuestos en pilas (cuyas dimensiones varían) distribuidas de tal manera que permitan la operación de la maquinaria.

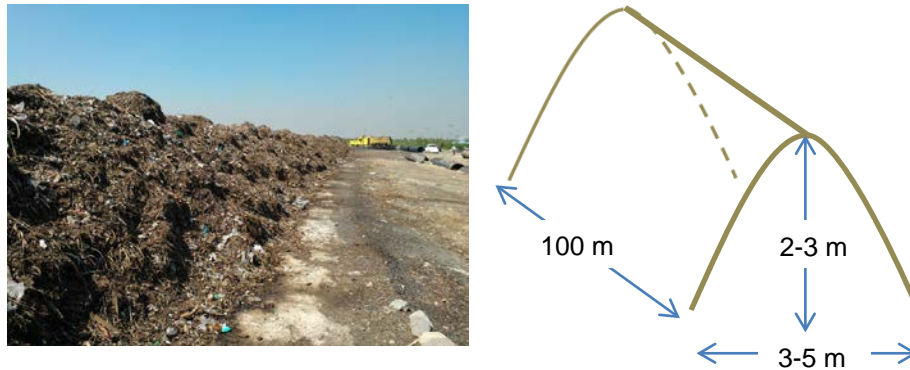


Figura 10. Dimensiones de las pilas de composta de la Planta de composta Bordo Poniente.

Se realiza agitación mecánica de las pilas de manera periódica para proveer el oxígeno requerido para la degradación de la FORSU, el cual dura de tres a ocho meses según el método de revoltura y la naturaleza de los materiales a tratar.

El proceso termina con un periodo de maduración que implica de dos a tres meses (MDDEP, 2012).

Post tratamiento: En esta etapa se realizan operaciones complementarias que preparan la composta para su comercialización o aplicación: tamizado, mezclado y envasado (Figura 9).

2.7.1 SITUACIÓN GENERAL DE LA PLANTA DE COMPOSTA DE BORDO PONIENTE

La planta de composta está ubicada en el sitio Bordo Poniente IV etapa (Figura 11), en el kilómetro 2.1 de la Autopista Peñón Texcoco, en la Zona Federal Ex Lago de Texcoco, Estado de México.

Esta planta recibe actualmente residuos orgánicos de poda y de los programas operados por la *Dirección General de Servicios Urbanos*, de la *Secretaría de Obras y Servicios*, *Comisión Federal de Electricidad* y de la CEDA.

La Planta de composta de Bordo Poniente tiene una capacidad instalada de 2,000 toneladas por día y el producto obtenido es utilizado como mejorador de suelos de camellones y áreas verdes de la red vial primaria (Estrada, 2013).



Figura 11. Planta de composta de Bordo Poniente.

En la Tabla 4 se muestra la cantidad de residuos que ingresaron a la Planta de Composta de Bordo Poniente, así como la cantidad de composta producida y entregada en el año 2011.

Tabla 4. Ingreso de residuos sólidos orgánicos y generación de composta en la PCBP en el año 2011 (SMADF, 2012).

Planta de composta	Recepción de residuos orgánicos (t/año)	Producción de composta (t/año)	Cantidad de composta entregada (t/año)
Bordo Poniente	604,440	116,057	15,290

Con base en los datos de la Tabla 4, se puede inferir que se generan en promedio 0.19 toneladas de composta por cada tonelada de residuos que ingresa a Bordo Poniente. Además, se deduce a partir de estos datos que el aprovechamiento de la composta correspondió al 13.2%⁵.

⁵ Cantidad de composta entregada sobre producción de composta.

Consumo de combustible y agua

Una vez descrita la situación de la Planta de Composta de Bordo Poniente, se elaboró el diagrama de bloques del proceso, el cual se muestra en la Figura 12.

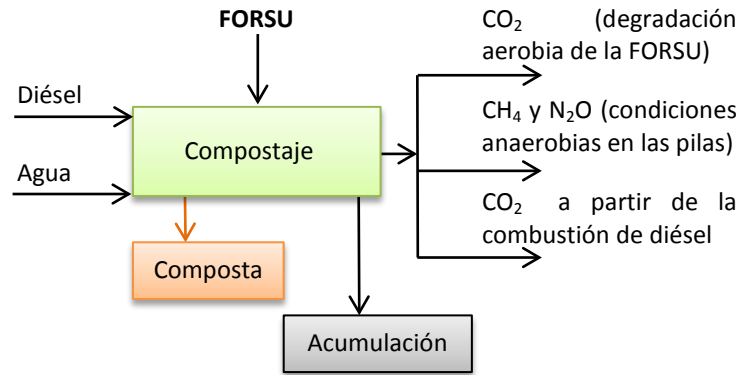


Figura 12. Esquema simplificado del proceso de compostaje.

Consumo de combustible en la operación de la PCBP

Como se muestra en la Figura 12, la Planta de Composta de Bordo Poniente requiere diésel para su operación. Este consumo corresponde a 60,000 litros de diésel por mes, distribuido entre la maquinaria mostrada en la Figura 13 (Estrada, 2013).

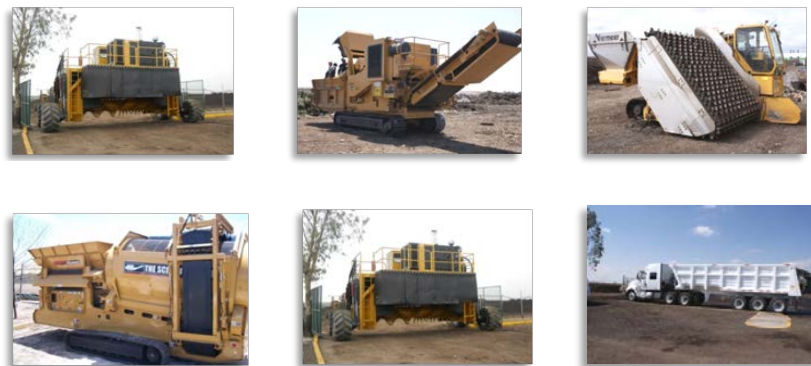


Figura 13. Maquinaria para operación de la planta de Composta de Bordo Poniente.

Si se considera que la Planta de Composta de Bordo Poniente recibió 604,440 toneladas de residuos sólidos orgánicos en el año 2011 (Tabla 4), y que el

consumo de diésel fue de 720,000, se obtiene entonces un consumo de 1.19 litros de diésel por tonelada de residuos orgánicos manejados.

Consumo de agua en la operación de la PCBP

Como se ha descrito previamente y se ilustra en la Figura 12, el compostaje requiere del suministro de agua a fin de mantener las condiciones propicias para el desarrollo del proceso aerobio de degradación de la FORSU.

Dado que no se cuenta con información sobre consumo de agua en la planta de composta de Bordo Poniente, se recurrió a un valor reportado en la literatura de una planta con capacidad y características similares a la de Bordo Poniente. El valor encontrado corresponde a 180 litros de agua por tonelada de residuos orgánicos (SNC-LAVALIN & SOLINOV, 2007).

2.7.1.1 Generación de composta y emisiones biogénicas en la PCBP

Como ilustra la Figura 12, el proceso de compostaje genera como productos composta y emisiones biogénicas, e implica además, emisiones de GEI debido a la quema de combustibles durante la operación de la maquinaria.

Generación de composta en la PCBP

Como se describió en la sección 2.7.1, en la Planta de Composta de Bordo Poniente se generan 0.19 toneladas de composta por cada tonelada de FORSU que ingresa a la planta.

En una planta de composta de Quebec, con capacidad similar, se reporta un rendimiento de 0.26 toneladas de composta por tonelada de FORSU (SNC-LAVALIN & SOLINOV, 2007).

Van Haaren *et al.* (2010) han reportado que durante el proceso de compostaje, la FORSU experimenta una reducción del 25% en masa. Si se considera el valor anterior y la información de la Tabla 4, se obtienen los datos mostrados en la Tabla 5, que corresponden a un balance de materia de residuos sólidos orgánicos en base a 100 toneladas por año.

Tabla 5. Balance de materia de residuos sólidos orgánicos en la Planta de Composta de Bordo Poniente.

Corriente	Cantidad de residuos (t/año)
Ingreso de residuos	100
Consumo de materia orgánica	25
Generación de composta	19
Acumulación	56

La corriente denominada *acumulación* corresponde a la cantidad de materia que queda después de haberse efectuado el proceso de compostaje.

La acumulación requiere ser dispuesta en algún lado, en el caso de la Planta de Composta de Bordo Poniente se observa que esta materia permanece en el sitio de compostaje, formando bordos. En California, Estados Unidos, la *acumulación* es empleada como material de recubrimiento en rellenos sanitarios (van Haaren *et al.*, 2010).

La composta derivada del tratamiento de la FORSU puede ser empleada como remediadora de suelo o como fertilizante⁶. Lo anterior tiene un efecto benéfico, dado que la composta disminuye el consumo de fertilizantes minerales. La equivalencia entre composta y fertilizantes se presenta en la sección 6.2 del Anexo.

Emisiones biogénicas en la PCBP

El compostaje puede resultar en (IPCC, 2006):

- Emisiones de CH₄ a partir de la descomposición anaerobia de una fracción de la pila de composta (si no se realiza un adecuado mezclado).
- Emisiones de CO₂ y de NO_x (N₂O y NO), generados a partir de la descomposición aerobia de la FORSU.

⁶ Los fertilizantes son valorados porque brindan principalmente nutrientes a las plantas; mientras que los remediadores de suelos aportan sustancias que moderan algunas condiciones del suelo, como pH y porosidad (FAO, 2002).

- Emisiones no biogénicas de GEI, a partir de la colecta, selección y transporte de los residuos al sitio de compostaje.

En la Tabla 6 se muestran los factores de emisión de CH₄, CO₂ y NO_x. Debido a que la generación de CH₄ depende principalmente del mezclado de las pilas, este valor presenta la mayor variación con respecto a los otros gases.

El compostaje involucra la formación de CO₂ a partir de la degradación de la FORSU, se estima que esta generación corresponde a 156 kilogramos de CO₂ biogénico⁷ por cada tonelada de residuos orgánicos, en un lapso de un año (ICF consulting, 2005).

Las emisiones de GEI derivadas de la operación de la maquinaria de la Planta de Bordo Poniente se calcularán mediante el software *SimaPro*[®], a partir del consumo de diésel por tonelada de FORSU tratada.

Tabla 6. Factores de emisiones biogénicas a partir del tratamiento de la FORSU mediante compostaje (Komilis & Ham, 2004).

Gas	(kg gas/t residuos orgánicos)
NO _x	0.29
CH ₄	0.00023
CO ₂	156

Como puede observarse en la Figura 12, la generación de lixiviados no ha sido considerada debido a la carencia de información de estos datos; lo cual constituye una limitación de este estudio, debido a que se dejarán fuera los efectos que tendrían en el suelo y manto freático.

2.8 DIGESTIÓN ANAEROBIA (DA)

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias

⁷ Producto de la descomposición de la materia orgánica bajo la acción de microorganismos específicos.

específicas, se convierte en un producto gaseoso denominado biogás y en uno sólido denominado digestato, el cual es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca) y compuestos de difícil degradación (IDAE, 2007).

Como puede apreciarse en la Figura 14, la reacción de digestión anaerobia se lleva a cabo en cuatro fases (FNR, 2012).

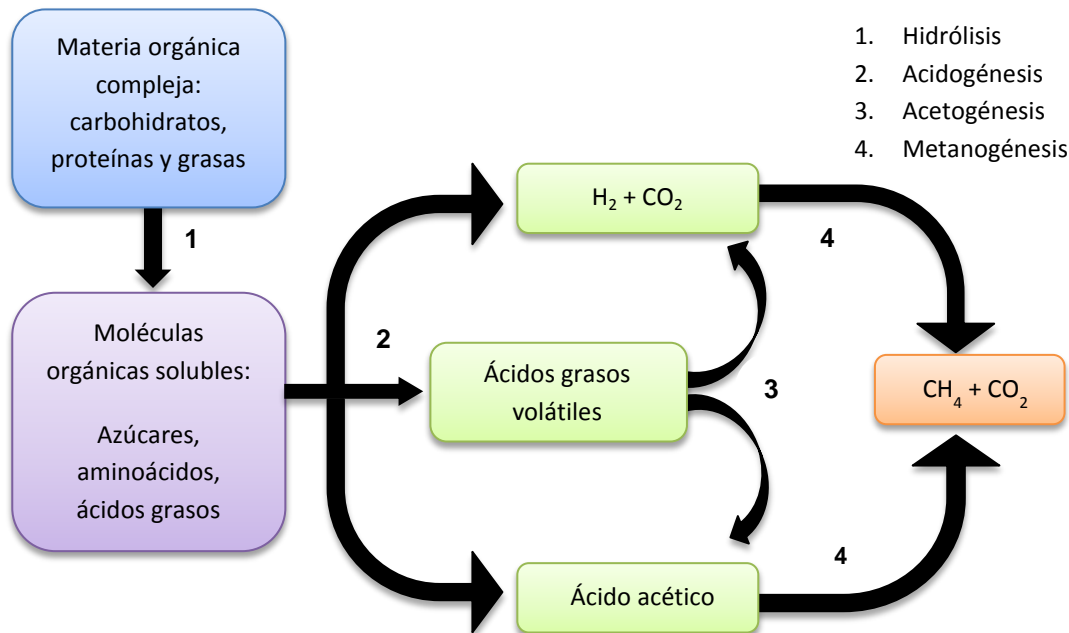


Figura 14. Esquema simplificado del proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás (RECYC-QUÉBEC, 2012).

Fase 1. Hidrólisis: Consiste en la degradación de moléculas orgánicas complejas (polisacáridos, lípidos y proteínas) mediante la adición de agua en moléculas más simples (monosacáridos, ácidos grasos de cadena corta y aminoácidos).

Fase 2. Acidogénesis: La fermentación de las moléculas simples, formadas en la primera fase, genera alcoholes y ácidos orgánicos (acético, propiónico y butírico), así como hidrógeno y dióxido de carbono.

Fase 3. Acetogénesis: Formación de ácido acético que posteriormente es convertido, mediante la acción de bacterias acetogénicas, en precursores de biogás (ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono).

Fase 4. Metanogénesis: Conduce a la formación de CH₄ mediante dos mecanismos distintos: a partir del hidrógeno y dióxido de carbono, o a partir del acetato. Las bacterias que actúan en esta fase experimentan un crecimiento más lento que las bacterias acidogénicas y son sensibles a la temperatura y pH de operación.

Según el tipo de sustrato y las condiciones en que se lleva a cabo el proceso, existen variantes tecnológicas de la digestión anaerobia, las cuales se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Clasificación de los procesos de digestión anaerobia de acuerdo con diferentes criterios (FNR, 2012).

Criterio	Tipo
Contenido de sólidos totales en el sustrato	<ul style="list-style-type: none"> • Digestión húmeda • Digestión seca
Tipo de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> • Intermitente • Semicontinua • Continua
Número de fases del proceso	<ul style="list-style-type: none"> • Una fase • Dos fases
Temperatura del proceso	<ul style="list-style-type: none"> • Psicrófila (7-25 °C)⁸ • Mesófila (27-37 °C) • Termófila (55-60 °C)
Configuración de los digestores	<ul style="list-style-type: none"> • Verticales • Horizontales

⁸ A cada temperatura de operación, Psicrófila, Mesófila y Termófila corresponde un tiempo de retención: 70-80 días, 30-40 días y 15-20 días, respectivamente; es decir, existe una relación inversa entre temperatura y tiempo de retención (RECYC-QUÉBEC, 2012).

Con base en la Tabla 7 se pueden obtener varias configuraciones de una planta de digestión anaerobia, por ejemplo: una planta de digestión anaerobia húmeda de flujo continuo, que opera a temperatura mesofílica, con reactor vertical (Figura 15).

Como se ilustra en la Figura 15, en escala industrial, el proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo en un reactor cerrado, llamado biodigestor que debe contar con un sistema de almacenamiento de biogás (gas holder) y un conjunto de bombas que permitan la alimentación del reactor.



Figura 15. Esquema de un reactor vertical de digestión anaerobia seca, tecnología Dranco (De Baere, 2013).

En la Figura 16 se ilustra que la digestión anaerobia a escala industrial implica varias etapas: la recepción y preparación del sustrato (*Pretratamiento*), el *tratamiento* en el digestor y la gestión de los productos formados (biogás, digestato y lixiviados).

El biogás formado puede servir como fuente de energía para el mantenimiento del digestor (calor) y en la generación de electricidad. El digestato puede ser aprovechado como composta, después de haberse sometido a un proceso de compostaje (CRAAQ, 2012).

Es necesario puntualizar que la Figura 16 esquematiza de manera general una Planta de digestión anaerobia. De esta manera, dependiendo de la configuración de la Planta de digestión anaerobia, se tendrá una particular calidad de composta y de lixiviados.

Los lixiviados, generalmente, si provienen de sustratos libres de metales, pueden utilizarse como fertilizantes líquidos, de lo contrario deben ser tratados como aguas residuales.

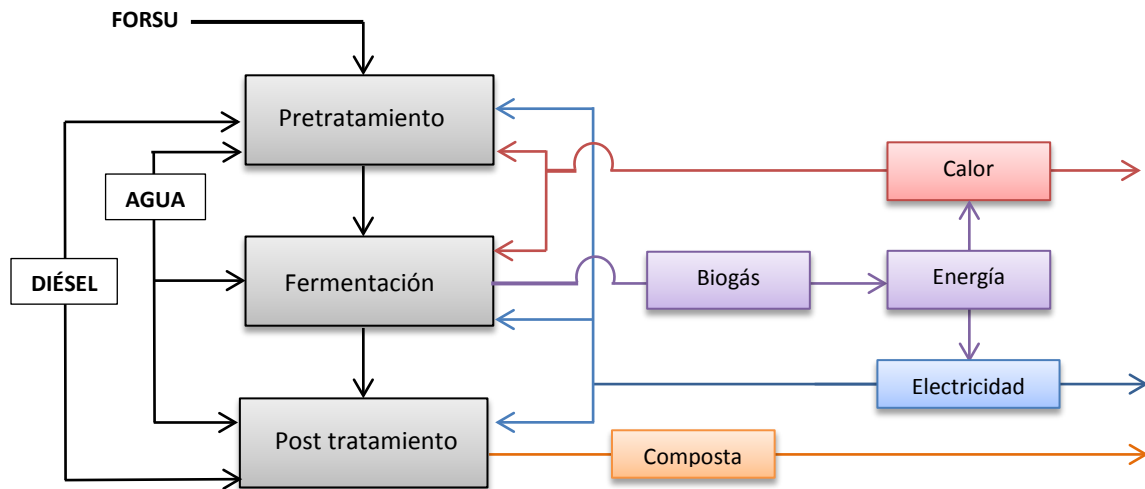


Figura 16. Ejemplo de una planta de DA configurada para producir energía y composta a partir de la FORSU (Department of Energy and Climate Change, 2011).

Descripción del proceso de digestión anaerobia a escala industrial

Pretratamiento

- Abertura y remoción de bolsas de plástico que contiene la FORSU, si es aplicable.
- Para los procesos secos: separación de materiales por medio de diversas técnicas (fragmentación, tamizado y separación magnética), y acondicionamiento de los materiales hasta alcanzar un contenido del 15 al 40% de sólidos (Varnero, 2011).
- Para los procesos húmedos: preparación de los materiales en una suspensión líquida, separación de materiales indeseables por flotación, sedimentación y centrifugación, acondicionamiento de los materiales para lograr de 10 a 15% de sólidos totales.

Tratamiento: Se lleva a cabo en el interior de un reactor denominado biodigestor, el cual contiene los microorganismos necesarios para el desarrollo de las reacciones bioquímica (RECYC-QUÉBEC, 2012).

Post tratamiento

- Si se pretende generar electricidad a partir del CH₄, el biogás producido debe ser tratado a fin de retirar las trazas de vapor de agua, de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y de NH₃, que de lo contrario, dañarían el generador eléctrico. Por otra parte, si se pretende utilizar el biogás como gas natural, se debe eliminar el CO₂ presente a fin de evitar hacer modificaciones a los generadores eléctricos existentes en el mercado (FNR, 2012) .
- El digestato se deshidrata mecánicamente y posteriormente se lleva a compostaje a fin de destruir los patógenos y de esta manera, completar la estabilización biológica de la materia orgánica. Una vez madura, la composta se puede preparar (tamizado y envasado) para su comercialización.

2.8.1 CONSUMO DE MATERIALES Y ENERGÍA EN LA OPERACIÓN DE UNA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

En la Figura 16 se muestran las corrientes de entrada y de salida del tratamiento de digestión anaerobia de la FORSU, las cuales se describen a continuación.

Es conveniente precisar que la existencia de múltiples configuraciones de plantas de digestión anaerobia, no permite indicar valores precisos en cuanto a consumo de materiales o generación de biogás, en todo caso se pueden mencionar intervalos.

Consumo de agua en la operación de una Planta de digestión anaerobia

De acuerdo con un estudio realizado en la región de Montreal (SNC-LAVALIN & SOLINOV, 2007), las tecnologías de digestión anaerobia demandan en promedio 150 litros de agua por tonelada de residuos orgánicos.

Consumo de diésel en la operación de una Planta de digestión anaerobia

El consumo de combustibles en una Planta de digestión anaerobia está relacionado básicamente con las siguientes operaciones:

- Transporte de los residuos de la recepción hacia el área de acondicionamiento.
- Acondicionamiento de los residuos (trituration y separación mecánica).
- Transporte del digestato hacia el área de compostaje.

A partir de la descripción de las operaciones que implican el consumo de diésel, puede inferirse que este valor es muy variable; sin embargo en un estudio realizado en la región de Quebec se ha determinado que en promedio éste corresponde a 1.8 litros de diésel por tonelada de FORSU (SNC-LAVALIN & SOLINOV, 2007).

Consumo de electricidad y calor en una Planta de Digestión Anaerobia

Las tecnologías de digestión anaerobia, por ejemplo: *Valorga*, *Kompogas*, *Dranco*, *Strabag* y *Bekon*, tienen como objetivo producir energía, lo cual las hace atractivas para ser implementadas en un sistema de gestión de residuos.

Después de revisar plantas que cuentan con las tecnologías que se han mencionado previamente, se dedujo que el consumo de energía (electricidad y calor) de una planta de digestión anaerobia corresponde del 10 al 15% del total de energía generada.

2.8.2 PRODUCTOS Y EMISIONES EN LA OPERACIÓN DE UNA PLANTA DE DA

Como se muestra en la Figura 16, los tres principales productos de un proceso de digestión anaerobia corresponden a electricidad, composta y calor.

En países como Suiza y Alemania, el biogás generado se emplea como sustituto de gas natural, después de haber sido sometido a un tratamiento de remoción de CO₂ (Wilken, 2013).

Para fines de este estudio se considera que los únicos productos que aporta la digestión anaerobia de la FORSU son electricidad y composta (resultado del tratamiento aerobio del digestato).

Generación de biogás en una Planta de Digestión Anaerobia

La cantidad de biogás producido depende principalmente del sustrato alimentado y de las condiciones de operación; sin embargo, como se muestra en la sección 6.3 del Anexo, la generación de biogás⁹ oscila entre 100 y 130 Nm³ por tonelada de FORSU alimentada al proceso.

Un requisito adicional a la remoción de CO₂, para sustituir gas natural por biogás, es contar con un sistema de distribución de gas natural en el sitio donde se ubicará la planta (Wilken, 2013). Dado que la distribución de biogás como gas natural luce poco atractiva en el país (por el bajo costo del gas natural), se centrará la atención en la valorización del mismo como electricidad.

Generación de electricidad a partir del biogás de una Planta de DA

El promedio de generación de electricidad a partir de biogás en plantas de digestión anaerobia corresponde a 250 kWh por tonelada de FORSU alimentada. Valor que corresponde a la generación promedio de electricidad de las tecnologías Bekon, Dranco, Kompogas, Strabag y Valorga, cuyas producciones respectivas promedio son 257, 271, 242, 217 y 256 kWh por tonelada de FORSU.

Los datos de generación de electricidad en plantas de digestión anaerobia se encuentran descritos en la sección 6.3 del Anexo.

Generación de composta en una Planta de Digestión Anaerobia

El digestato después de ser sometido a un post tratamiento, como se muestra en la Figura 16, puede ser empleado como composta.

De acuerdo con un estudio de factibilidad de tecnologías de tratamiento de residuos sólidos orgánicos, en promedio se generan 0.3 toneladas de composta por cada tonelada de FORSU que es alimentada a un digestor anaerobio

⁹ Medido a condiciones normales de temperatura y presión: 273.15 K y 1 atm de presión.

(SOLINOV Inc, 2006), mientras que De Baere (2013) reporta una relación de 0.44, este último valor fue empleado en esta tesis.

2.9 RELLENO SANITARIO

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 establece la siguiente definición de relleno sanitario: *obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicional, los impactos ambientales.*

El relleno sanitario es el único método de disposición de residuos que puede tratar todos los materiales presentes en la mezcla de residuos. Otras opciones, como las biológicas o de incineración producen residuos (digestato y cenizas, respectivamente) que posteriormente deben enviarse a disposición final (McDougall *et al.*, 2001).

En consecuencia, siempre existirá la necesidad de incluir el relleno sanitario en cualquier sistema de manejo de residuos.

Un relleno sanitario que satisfaga los estándares de seguridad ambiental y de operación debe contar con sistemas de desfogue y quema de biogás (para evitar explosiones), así como de un sistema de tratamiento de lixiviados (EPA, 2012) (Figuras 17 y 18).



Figura 17. Corte esquemático de un relleno sanitario (Chávez Gasca, 2013).

Generalmente, el relleno sanitario parece tener la mejor relación costo beneficio con respecto a otros métodos de tratamiento de residuos, porque en las evaluaciones que se realizan no se incluyen los impactos ambientales y sobre la salud que éste genera (SNC-LAVALIN & SOLINOV, 2007).

El principal inconveniente de la disposición de residuos en relleno sanitario es la formación de biogás a partir de la degradación de la FORSU.

Un relleno sanitario atraviesa distintas fases y en cada una de ellas, las condiciones para la formación de biogás son distintas (ASEGRE, 2010):

1. **Celda operativa:** Condiciones aerobias, sin recuperación de gas, CO₂ principalmente (Figura 17).
2. **Celda completa pero sin cubrir:** Condiciones aerobias y anaerobias, importante difusión a la atmósfera, y sin recuperación óptima de biogás.
3. **Celda sellada:** Condiciones aerobias y anaerobias, máxima recuperación de biogás y reducción de difusión del gas a la atmósfera.

Por otra parte, la cantidad y composición de biogás producido en un relleno sanitario dependen de la interacción de varios factores:

- Cantidad de residuos vertidos.
- Composición de los residuos vertidos.
- Condiciones físico-químicas ambientales (humedad, temperatura, pH).
- Tipo de cubierta.

En la literatura, la cantidad de biogás generada en rellenos sanitarios por tonelada de residuos ha sido calculada por tres métodos principales (Themelis & Ulloa, 2007):

1. Cálculos teóricos, empleando la cantidad de carbón orgánico presente en la mezcla de residuos.
2. Estudios de laboratorio.

3. A partir de la determinación de la rapidez de formación de biogás en rellenos sanitarios existentes.

En la Figura 18 se ilustra que una alternativa para mitigar los efectos adversos de la disposición de residuos orgánicos en relleno sanitario es la implementación de sistemas de captura y valorización de biogás.

En el contexto antes planteado, de acuerdo con McDougall *et al.* (2001) el relleno sanitario puede considerarse como una tecnología de “energía a partir de residuos”.

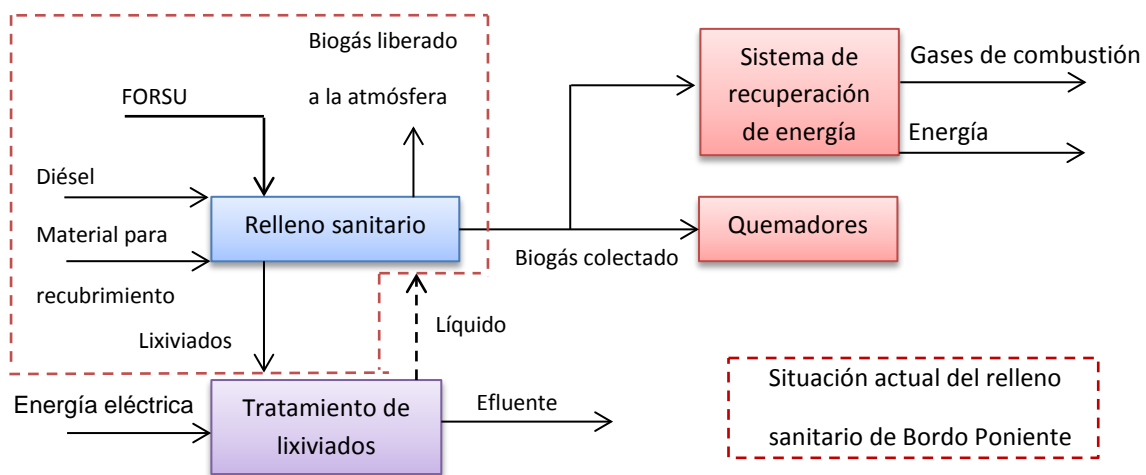


Figura 18. Diagrama de bloques de un relleno sanitario con captación de lixiviados y de biogás (Arena et al., 2003)

Por otra parte, la captura y uso del biogás como fuente de energía produce beneficios ambientales y económicos. A continuación se mencionan algunos beneficios del uso del biogás generado en rellenos sanitarios (EPA, 2012):

- Reducción de GEI, el CH_4 al quemarse es transformado en CO_2 , que tiene un menor potencial de calentamiento global.
- Generación de ingresos adicionales, gracias a la producción de electricidad.
- Creación de empleos durante el desarrollo de proyectos de captura de biogás en rellenos sanitarios.

2.9.1 CONSUMO DE MATERIALES Y ENERGÍA EN LA OPERACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO

Como puede observarse en la Figura 18, el diésel, el material para recubrimiento de celdas y la electricidad son los principales insumos de un relleno sanitario.

Consumo de diésel en la operación de un relleno sanitario

Dado que no se cuenta con información sobre el consumo de combustible en el Relleno sanitario de Bordo Poniente, se recurrió a la literatura. Arena *et al.* (2003) han indicado que el consumo promedio de diésel por kilogramo de residuos confinados corresponde a 0.0334 MJ.

La energía térmica del diésel es de 36.14 MJ/L y su eficiencia de producción y suministro es del 75.9% (McDougall *et al.*, 2001), tomando en cuenta los datos anteriores, se deduce que el consumo de diésel corresponde a *1.22 litros por tonelada de residuos sólidos orgánicos*.

Material de recubrimiento de celdas

En el caso del relleno sanitario de Bordo Poniente, el material de recubrimiento de celdas corresponde a tierra que proviene de la excavación previa que se hizo en el lugar a fin de liberar espacio para el confinamiento de los residuos.

Los impactos ambientales potenciales derivados del uso de tierra como material de recubrimiento se contabilizaron en el consumo de diésel durante la operación de la maquinaria.

Energía eléctrica generada a partir del biogás generado en relleno sanitario

Como indican las líneas punteadas de la Figura 18, el consumo de energía eléctrica queda fuera del sistema de estudio, dado que el relleno sanitario de Bordo Poniente no cuenta con sistema de tratamiento de lixiviados.

2.9.2 PRODUCTOS Y EMISIONES DE UN RELLENO SANITARIO

En un relleno sanitario se identifican dos tipos de emisiones:

- Las debidas al consumo de combustibles durante la operación de la maquinaria.

- Las emisiones generadas a partir de la degradación de la FORSU (Figura 18).

De acuerdo con McDougall *et al.* (2001) la generación potencial de biogás en rellenos sanitarios corresponde a 250 Nm³ por tonelada de FORSU en un lapso de 30 años.

En la Tabla 8, a partir de la composición y generación potencial de biogás, se indican las emisiones correspondientes de CH₄, CO₂ y H₂S derivadas de la degradación de la FORSU en relleno sanitario. Los datos de composición corresponden a los reportados por Themelis y Ulloa (2007).

Por otra parte, la descomposición de la FORSU genera lixiviados, cuya cantidad y composición depende principalmente de la precipitación en el área donde se ubica el relleno, el aislamiento del mismo (tipo de cubierta) y del contenido de humedad inicial de los residuos.

Tabla 8. Composición y generación potencial de biogás en relleno sanitario a partir de la degradación de la FORSU (McDougall *et al.*, 2001).

Compuesto	Porcentaje volumétrico	kg gas/ t FORSU
CH ₄	55%	98
CO ₂	44%	216
H ₂ S	1%	4

McDougall *et al.* (2001) estimaron que en promedio, una tonelada de residuos genera 150 litros de lixiviados, cuya composición varía según el tipo de residuos confinados.

Para hacer una comparación equitativa, la generación de lixiviados en relleno sanitario tampoco se evaluará, al igual que en el caso del compostaje.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

El presente capítulo muestra una visión general de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida, la cual ha sido empleada para conducir el presente estudio.

3.1 CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO O SERVICIO

Al igual que los organismos, los productos tienen un ciclo de vida. Mientras que los seres vivos nacen, se reproducen y mueren; los productos son generados a partir de materias primas, utilizados por consumidores, y eventualmente manejados como residuos (UNEP, 2005).

El ciclo de vida de un producto generalmente se divide en etapas, cuyo número puede variar, sin embargo se distinguen generalmente seis (Del Borghi *et al.*, 2009), las cuales se enlistan después de la Figura 19.



Figura 19. Etapas del ciclo de vida de un producto (Del Borghi *et al.*, 2009).

1. Diseño del producto.
2. Extracción o adquisición de la materia prima.
3. Elaboración o manufactura del producto.
4. Envasado y distribución del producto al consumidor.

5. Uso del producto.
6. Manejo del producto como residuo.

Como puede observarse en la Figura 19, en cada etapa de su ciclo de vida, un producto interactúa con otros sistemas; es decir, el ciclo de vida de un producto es un sistema abierto.

Para generar un producto se requiere de sustancias, energía, mano de obra, tecnología y dinero. De esta manera, los productos interactúan con el medio ambiente (extracción de materias primas, uso de suelo), con un medio económico (el costo de producción, la implementación de tecnología, el perfil de ventas) y con un medio social (contratación de trabajadores, derechos de los trabajadores) (UNEP, 2005).

A continuación se mencionan tres beneficios de la aplicación de un enfoque de ciclo de vida (UNEP, 2005):

- Evitar el común “*cambio de problema (problem shifting)*”, es decir, cuando se trata de resolver un problema, este no se resuelve completamente, sino parcialmente. En otras palabras, el problema sólo cambia de etapa en el ciclo de vida, de una localidad a otra, de un medio a otro (agua, aire o suelo), del presente al futuro.
- Optimizar un producto o sistema.
- El eco-etiquetado¹⁰ de productos, en el marco del desarrollo sustentable (Aranda & Zabalsa, 2010).

3.2 DEFINICIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

El ACV es un enfoque sistemático que emplea conceptos fundamentales de Ingeniería Química, ya que mediante balances de materia y energía del sistema de un producto o servicio, determina los impactos ambientales potenciales de dicho sistema (Burgess & Brennan, 2001).

¹⁰ Las ecoetiquetas proporcionan al consumidor información sobre impactos ambientales de los productos y constituyen un método estandarizado para su comparación. (Aranda & Zabalsa, 2010)

La metodología examina cada etapa del ciclo de vida de un producto o servicio, desde la adquisición de materias primas, pasando por la producción, distribución, uso, reúso, reciclaje y disposición final. De ahí que también sea identificado como estudio de la “*cuna a la tumba*” (McDougall *et al*, 2001).

En la Figura 20 se ilustra que un estudio de ACV de la “*cuna a la tumba*” incluye todas las etapas asociadas con la *vida* de un producto, que como se ha señalado previamente, va desde la extracción de materias primas hasta el manejo como residuo.

Sin embargo, conforme ha evolucionado la metodología del ACV, se han generado otros enfoques: “*de la cuna a la puerta*” y de “*puerta a puerta*”. El primer enfoque considera los impactos asociados con un producto desde la extracción de las materias primas necesarias hasta que este sale de la industria que lo produjo.

En tanto que el enfoque “*de puerta a puerta*” tiene como objetivo evaluar únicamente los impactos ambientales potenciales causados por la producción de un cierto objeto, y es usado en consecuencia por las empresas para medir su desempeño ambiental.

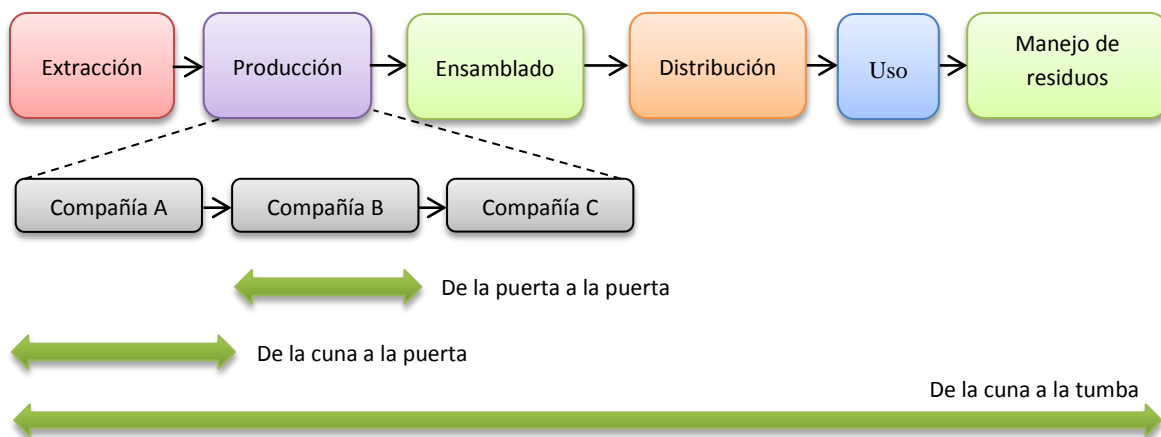


Figura 20. Diferentes enfoques de un ACV (adaptado de JRC-IES, 2010).

3.3 FASES DE UN ACV

El marco metodológico que conduce el ACV ha sido estandarizado por la Organización Internacional de Estandarización (ISO, International Organization for

Standardization, por sus siglas en inglés). La serie ISO 14040 describe las cuatro fases para realizar un ACV:

- Definición de Objetivo y Alcance (ISO 14041).
- Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (ISO 14041).
- Análisis de Impacto de Ciclo de Vida (ISO 14042).
- Interpretación de Ciclo de Vida (ISO 14043).

En 2006, los estándares de la serie ISO 14040 fueron revisados y concatenados en único estándar, la ISO 14044.

Como se muestra en la Figura 21, a pesar de que hay un orden cronológico básico para desarrollar un ACV, el proceso es iterativo y debe ser revisado continuamente.

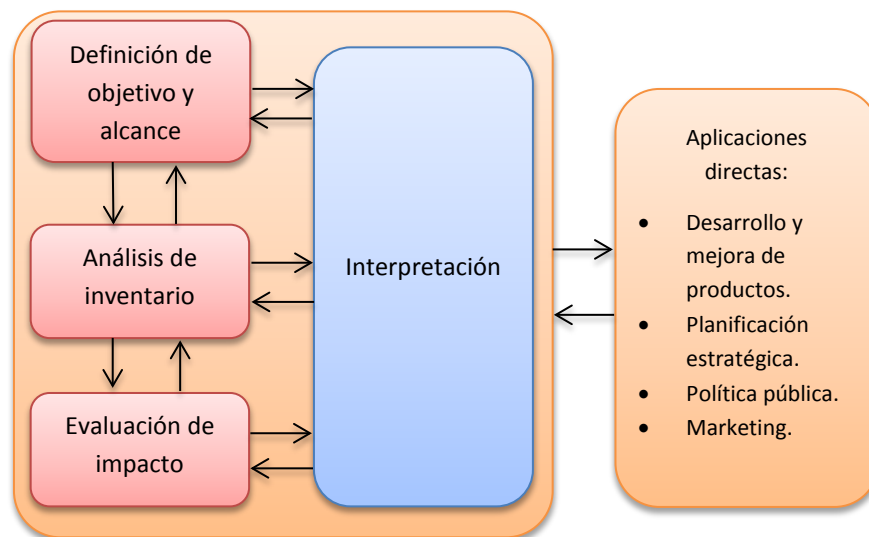


Figura 21. Estructura del Análisis de Ciclo de Vida (JRC-IES, 2010).

3.3.1 OBJETIVO Y ALCANCE DE ESTUDIO

El objetivo de un ACV debe establecer de forma clara la aplicación esperada del estudio, las razones por las que se lleva a cabo, así como la audiencia a quien se comunicarán los resultados (Aranda & Zabalsa, 2010).

Los objetivos de un ACV pueden ser múltiples, a modo de ejemplo se citan los siguientes enunciados (Thanh & Matsui, 2010):

- Comparar dos o más productos diferentes que satisfacen la misma necesidad, con el propósito de emplear la información en el área de marketing o en regulaciones sobre el uso de productos.
- Identificar las áreas de oportunidad en el desarrollo o mejora de productos.

Sin embargo, dado que el ACV es un proceso iterativo, el objetivo puede ser redefinido a medida que el estudio se lleva a cabo (Figura 21).

3.3.1.1 Alcance del estudio

En la definición del alcance de un ACV se deben establecer claramente: el sistema del producto o servicio (fronteras), la unidad funcional, los indicadores a ser determinados y la metodología de evaluación de impacto del ACV que será empleada.

Asimismo, en el alcance se indican los datos requeridos, premisas, limitaciones, los requisitos de calidad de los datos; el tipo de revisión crítica (si la hay) y el tipo y formato del reporte del estudio (McDougall *et al*, 2001).

3.3.1.2 Unidad funcional

La unidad funcional es una medida que representa la función del producto o las necesidades que cubre un servicio, y es especialmente importante en un estudio comparativo de ACV ya que asegura que cada alternativa sea equitativamente evaluada (ADEME, 2005).

La unidad funcional puede ser de tipo *físico* o *funcional*, y su magnitud dependerá del tipo de estudio que se pretenda realizar. Por ejemplo, el uso de 100 botellas retornables constituye una unidad de tipo físico; mientras que distribuir agua potable a una población de 1000 habitantes, corresponde a una unidad de tipo funcional.

En cuanto al manejo de residuos, se ha identificado que la unidad funcional corresponde a la cantidad de residuos que se manejan en una determinada región.

3.3.1.3 Sistema y límites del sistema

Como se muestra en la Figura 22, el sistema de un producto o servicio debe representarse mediante un diagrama de bloques para facilitar la identificación de las corrientes de materia y energía que se analizarán.

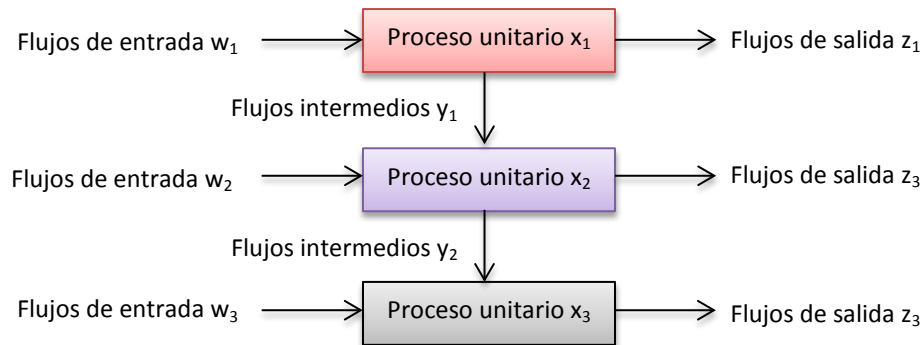


Figura 22. Diagrama de bloques del sistema de un producto o servicio.

Los límites del sistema establecen los procesos unitarios que serán incluidos en el sistema estudiado; y en consecuencia, en esta fase deben tomarse decisiones respecto a qué procesos unitarios serán modelados y el nivel de detalle con que serán examinados.

Asimismo, deben determinarse las emisiones al medio ambiente que serán evaluadas, y el nivel de detalle de esta evaluación.

3.3.2 ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

Esta etapa consiste en la contabilidad de todas las entradas y salidas de materia y energía que incluye el sistema del producto o servicio analizado.

El primer paso dentro de esta fase es la elaboración del diagrama de bloques del sistema del producto o servicio (Figura 22), así como su descripción con el mayor nivel de detalle posible (o según se haya definido en el alcance del estudio) (JRC-IES, 2010).

Una vez que se cuenta con la representación gráfica del sistema, la información relevante puede ser recabada mediante diversas técnicas: cuestionarios, visitas a las plantas de producción y consulta bibliográfica.

La ISO 14044 establece que la recolección de datos debe ser tanto cuantitativa como cualitativa y debe hacerse para todas las entradas y salidas del sistema. En este sentido, es conveniente señalar que en un ACV se pueden emplear datos de tipo promedio (aquellos encontrados en bases de datos) y datos específicos del sistema de estudio.

Finalmente, todas las fuentes, premisas y decisiones tomadas deben ser claramente registradas, con la finalidad de preservar la transparencia del estudio, y en dado caso, permitir a terceros la verificación o reproducción de los resultados (UNEP, 2005).

3.3.3 EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA

La ISO 14044 define al Análisis de Impacto como la fase del ACV encargada de la determinación de la magnitud de los impactos potenciales del sistema de estudio.

En esta etapa, se selecciona un conjunto de variables medioambientales, denominadas *categorías de impacto* que representan los impactos causados por el consumo de materiales, o bien, por la generación de ciertas emisiones.

Las categorías de impacto posteriormente son agrupadas en *categorías de daño* a fin de facilitar la comprensión de los impactos causados por un sistema.

3.3.3.1 Categorías de impacto y de daño

Una *categoría de impacto* es un parámetro que cuantifica los efectos que tiene la emisión de cierta sustancia o el consumo de materiales. Estas categorías de impacto se agrupan en *categorías de daño*. Las categorías de impacto de la metodología *IMPACT 2002+* se listan en la Tabla 9.

Tabla 9. Categorías de impacto y de daño del método IMPACT 2002+ (Humbert et al., 2011).

Categoría de impacto	Sustancia de referencia	Categoría de daño	Unidad de categoría de daño	Unidad normalizada de la categoría de daño
Toxicidad humana (carcinógenos y no carcinógenos)	kg de Cloroetileno eq. en el aire	Salud humana	DALY	Puntos
Enfermedades respiratorias (inorgánicos)	Kg PM _{2.5} ¹¹ eq. en el aire			
Radiación ionizante	Bq eq. en el aire			
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq. en el aire			
Enfermedades respiratorias (orgánicos)	kg etileno eq. en el aire			
Ecotoxicidad acuática	kg trietilenglicol eq. en agua	Calidad del ecosistema	No existe	No existe
Ecotoxicidad terrestre	kg trietilenglicol eq. en suelo		PDF ·m ² yr	
Acidificación/nitrificación terrestre	kg SO ₂ eq. en el aire			
Acidificación acuática	kg SO ₂ eq. en el aire		No existe	No existe
Eutrofización acuática	Kg PO ₄ ³⁻ eq. en agua		No existe	No existe
Uso de suelo	m ² eq. de tierra cultivable por año		PDF·m ² ·yr	Puntos
Calentamiento global	kg eq. de CO ₂ en aire	Cambio climático	kg eq. de CO ₂ en aire	Puntos
Energía no renovable	MJ primarios totales no renovables o kg equivalentes de petróleo crudo (860 kg/m ³)	Recursos	MJ	Puntos
Extracción de minerales	MJ			

¹¹ PM_{2.5} corresponde a partículas suspendidas en la atmósfera con diámetro menor a 2.5 micrómetros.

Como puede apreciarse en la Tabla 9, la metodología *IMPACT 2002+*¹² emplea 14 categorías de impacto, las cuales se agrupan en cuatro categorías de daño: *Salud humana*, *Calidad del ecosistema*, *Cambio climático* y *Recursos*.

En la Tabla 9 se observa que cada categoría de impacto emplea una sustancia de referencia para cuantificar su impacto en el medio ambiente, por ejemplo, la categoría de calentamiento global, se expresa en kilogramos equivalentes de CO₂.

En la sección 6.1 del Anexo, se presenta una descripción de las unidades empleadas en la metodología *IMPACT 2002+*.

3.3.3.2 Ejecución del Análisis de Impacto de Ciclo de Vida

De acuerdo con la ISO 14044, el Análisis de Impacto involucra cuatro pasos, que se esquematizan en la Figura 23 y se describen a continuación.

1. Selección y clasificación de las categorías de impacto (paso obligatorio).

En este paso se definen los impactos ambientales relevantes del estudio. En el caso del manejo de residuos, las *categorías de impacto* seleccionadas corresponden generalmente a “calentamiento global”, “energía no renovable”, “toxicidad humana” y “enfermedades respiratorias”.

2. Caracterización (paso obligatorio).

Como se muestra en la Tabla 9, cada categoría de impacto se expresa en términos de una sustancia de referencia. En el caso de la categoría de “calentamiento global”, ésta se expresa en kilogramos equivalentes de CO₂.

Las sustancias que contribuyen en la categoría de calentamiento global incluyen además del dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno, que para poder ser expresados en términos de kilogramos equivalentes de CO₂, tienen que ser divididos entre su factor de caracterización.

¹² Existen varias metodologías para evaluar los impactos potenciales en un estudio de Análisis de Ciclo de Vida. Se ha elegido el método *IMPACT 2002+* ya que ha sido ampliamente utilizado en evaluaciones del manejo de residuos.

Con respecto al calentamiento global, el factor de caracterización corresponde al potencial de calentamiento global de cada gas de efecto invernadero. En el caso del metano, éste tiene un potencial de calentamiento global de 21 veces con respecto al dióxido de carbono, en un intervalo de 100 años.

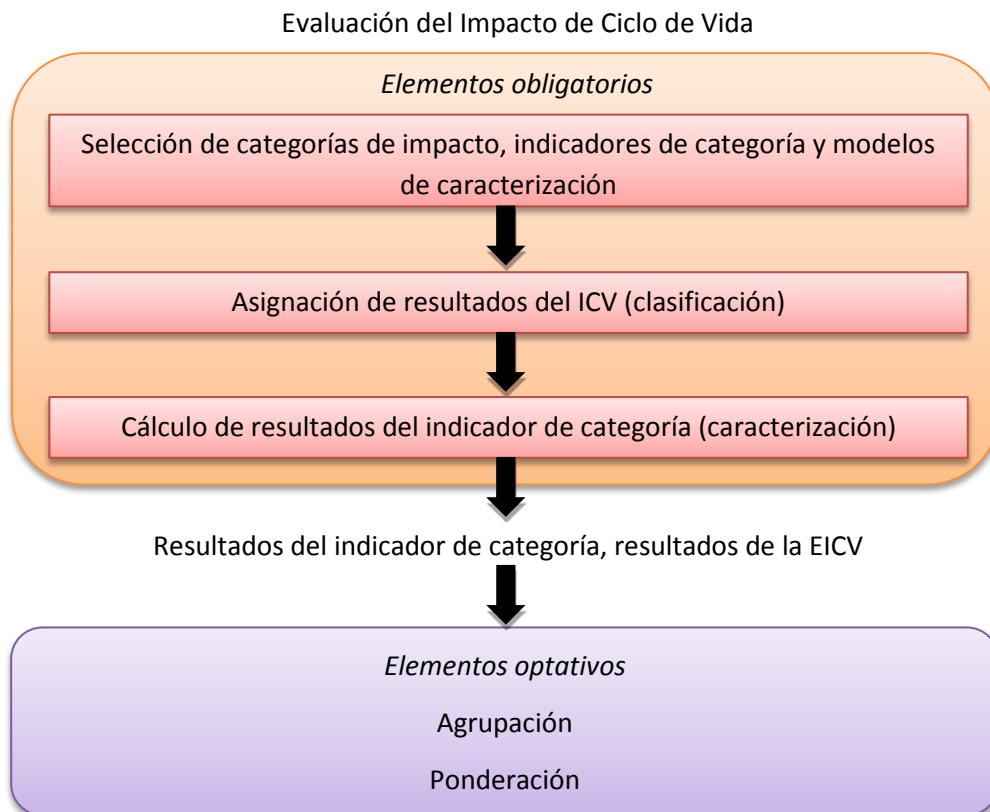


Figura 23. Elementos de la fase de EICV (JRC-IES, 2010)

3. Normalización (paso opcional)

El objetivo de normalizar los resultados es analizar la respectiva contribución de cada categoría de impacto en una categoría de daño. Esto facilita la interpretación de los resultados mediante la comparación de las diferentes categorías de impacto en la misma gráfica, al tener las mismas unidades.

La normalización se lleva a cabo mediante la división de los impactos (categorías de daño) entre su respectivo *factor de normalización*, que se presentan en la Tabla 10.

Un *factor de normalización* representa el impacto total de una categoría de daño dividida entre el total de la población europea¹³. El impacto total de una categoría específica es la suma de los productos de todas las emisiones europeas y sus correspondientes factores de daño en un lapso de un año.

Tabla 10. Factores de normalización de las categorías de daño (Humbert *et al.*, 2011).

Categoría de daño	Factor de normalización	Unidad ¹⁴
Salud humana	0.0071	DALY/punto
Calidad del ecosistema	13,700	PDF·m ² ·yr/punto
Cambio climático	9,950	kg de CO _{2eq} /punto
Recursos	152,000	MJ/punto

4. Ponderación (paso opcional)

La ponderación tiene como objetivo establecer una jerarquía de las categorías de daño que incluye un ACV, ya que los resultados de un estudio de esta naturaleza no son directamente comparables. Por ejemplo, no se puede hacer una comparación inmediata entre gases de efecto invernadero y agotamiento de recursos.

En la Tabla 11 se muestran algunos valores sugeridos para realizar la ponderación de las categorías de daño. A partir de esta tabla se puede apreciar que se asigna una mayor importancia a la categoría de “Recursos” y a la de “Cambio climático”.

¹³ Se considera la población europea dado que la metodología IMPACT 2002+ fue desarrollada en Suiza.

¹⁴ La descripción de las unidades se encuentra en la sección 6.1 del Anexo.

Tabla 11. Daños ponderados (puntos/escenario) (Humbert *et al.*, 2011).

Categoría de daño	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Salud humana	1.35	0.809	0.988
Calidad del ecosistema	0.178	0.141	0.140
Cambio climático	3.98	4.22	4.12
Recursos	4.08	4.32	4.22

De acuerdo con los datos de la Tabla 11, en promedio, la categoría de “Recursos” tiene el triple de importancia que la categoría de “Salud humana”, mientras que “Cambio climático” es, en promedio, 4.5 veces más importante que la categoría “Salud humana”.

3.3.4 INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La fase de Interpretación de un ACV tiene dos propósitos fundamentales, los cuales difieren entre sí (JRC-IES, 2010):

- Durante el proceso iterativo del ACV, la fase de Interpretación sirve para encaminar el trabajo hacia la mejora continua del ICV con la finalidad de satisfacer los requisitos establecidos en la definición del objetivo.
- Si el proceso iterativo del ACV ha llegado a tal punto que cubre los requisitos establecidos en el objetivo, se generan las conclusiones y recomendaciones.

El proceso iterativo que implica un ACV, como se ilustra en la Figura 21, debe llevarse a cabo hasta que se satisfagan los requisitos establecidos en el objetivo y alcance del estudio (Del Borghi *et al.*, 2009).

La fase de Interpretación comprende los siguientes elementos:

- Identificación de los problemas ambientales significativos:

Como se ilustra en la Figura 24, la identificación de los problemas significativos involucra las cuatro etapas del ACV. Mediante la metodología *IMPACT 2002+* se puede hacer una evaluación de contribución, que arroja como resultado una

gráfica de bandas en la cual se pueden identificar las *categorías de impacto* que contribuyen con más impactos.

- Evaluación:

Se emplean métodos estadísticos para realizar un análisis de sensibilidad de los datos empleados en la modelación del ACV. En el caso del programa *SimaPro*®, éste cuenta con el método Montecarlo.

- Conclusiones y recomendaciones.

A partir de la identificación de los problemas ambientales significativos y del análisis de sensibilidad, en conjunto con las aplicaciones buscadas, como se muestra en la Figura 24, se generan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

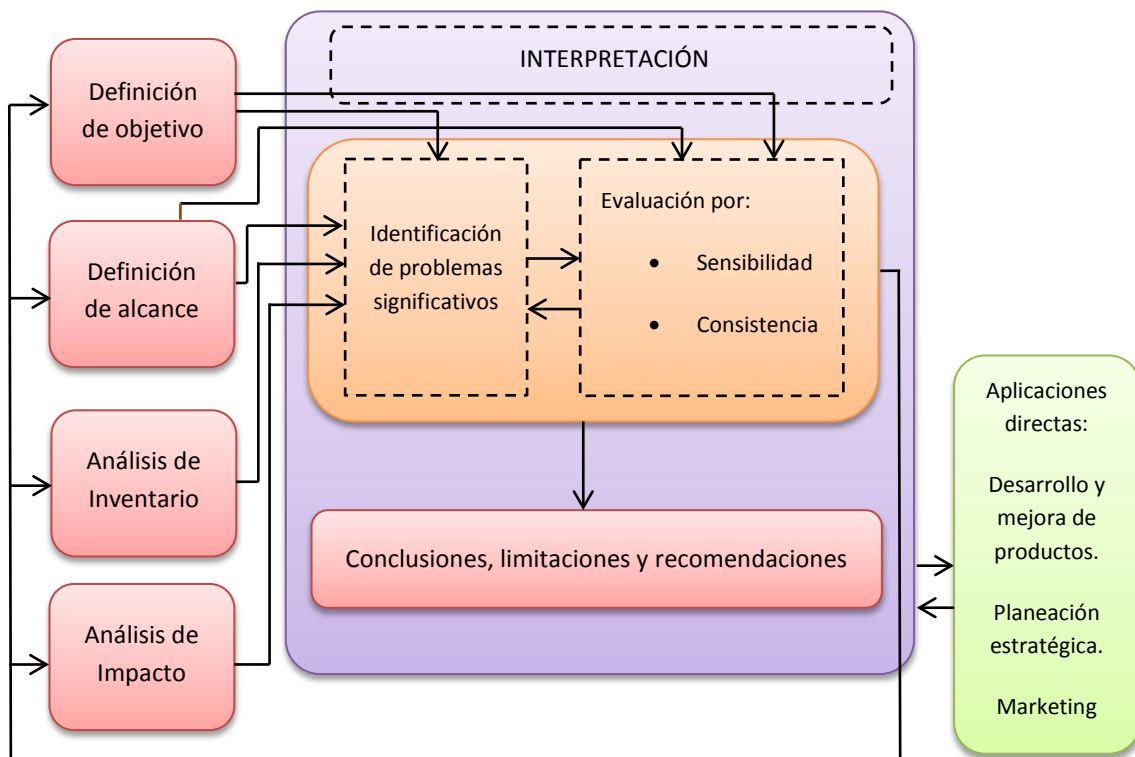


Figura 24. Elementos de la fase de Interpretación del ACV (Aranda & Zabalsa, 2010).

En el caso del manejo de residuos, las recomendaciones se pueden orientar en la redefinición del sistema de recolección, así como a la implementación de tecnologías para el tratamiento de los residuos.

3.3.5 PROGRAMA DE CÓMPUTO SIMAPRO

Para llevar a cabo el presente estudio se empleó el programa de cómputo *SimaPro*® (Figura 25), desarrollado por *PRé Consultants*¹⁵.

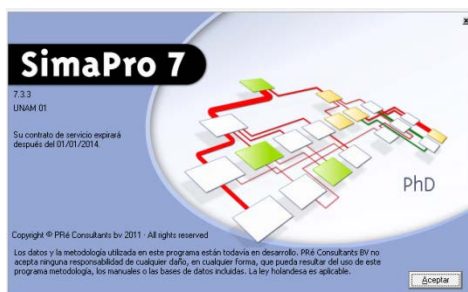


Figura 25. Imagen de inicio del programa *SimaPro* 7.3.3®.

SimaPro® es un programa que permite modelar productos y sistemas desde una perspectiva de ciclo de vida. Como se muestra en la Figura 26, *SimaPro*® cuenta con la estructura cronológica que conforma un ACV, tal como se ha descrito en la sección 3.3.

En *SimaPro*®, los usuarios pueden construir modelos complejos de una forma sistemática y transparente, realizar análisis de sensibilidad y determinar la incertidumbre del estudio mediante Análisis de Monte Carlo.

El programa *SimaPro*® cuenta con bases de datos de *Ecoinvent*¹⁶, las cuales pueden ser utilizadas para realizar diversos estudios de gestión ambiental ya que cuentan con datos de más de 2,500 procesos.

Las bases de datos, métodos de análisis de impactos y de evaluación de incertidumbre, así como el prestigio con el que cuenta a nivel mundial, fueron elementos claves en la elección del programa *SimaPro*®.

¹⁵ Para tener mayor información sobre la empresa, se proporciona su sitio de internet: <http://www.pre-sustainability.com/>

¹⁶ <http://www.ecoinvent.org/database/>

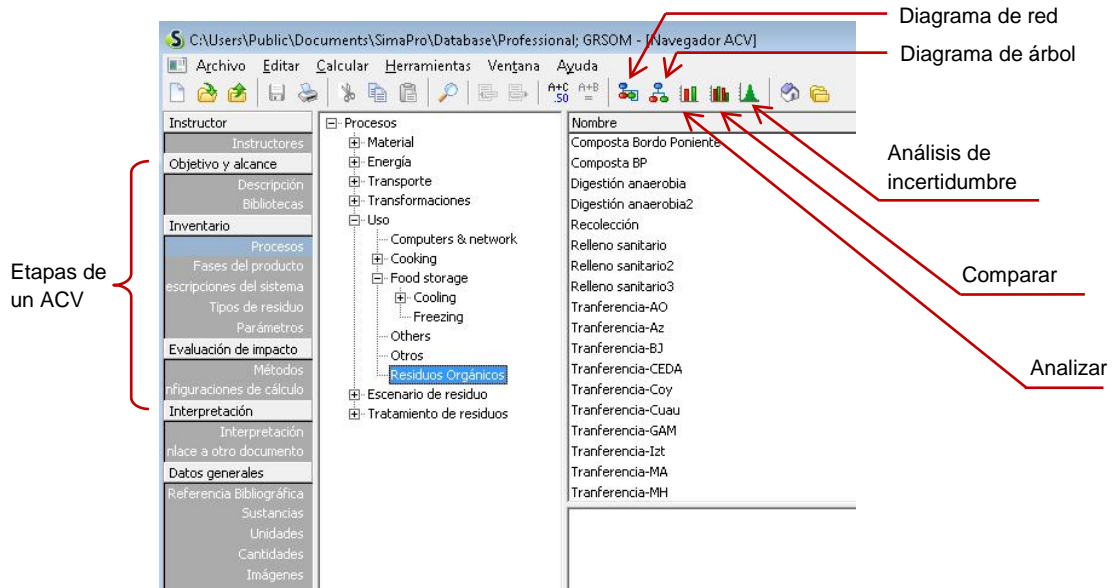


Figura 26. Interfaz del programa SimaPro 7.3.3 ®

La única limitación que presenta el programa es que sus bases de datos representan el promedio de las condiciones europeas, sin embargo, es preferible tener un indicio cuantitativo a carecer totalmente de ellos.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha aplicado un enfoque simplificado de Análisis de Ciclo de Vida en la evaluación del sistema actual de manejo de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto, así como de los escenarios hipotéticos que serán descritos a continuación.

Este capítulo se presenta como un informe que sigue los lineamientos de la norma ISO 14044, con fines de claridad y de rigor.

4.1 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

El establecimiento de los objetivos y alcance de estudio corresponde a la primera fase del ACV, los cuales se describen a continuación.

4.1.1 OBJETIVOS DEL ACV

Evaluar los impactos ambientales potenciales de la gestión actual de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto y compararlo con otros escenarios de gestión de residuos que impliquen un mayor aprovechamiento de composta e implementación de una Planta de digestión anaerobia.

4.1.1.1 OBJETIVOS PARTICULARES DEL ACV

- Identificar la etapa de la gestión actual de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto que represente los mayores impactos ambientales.
- Cuantificar el abatimiento de los impactos ambientales que representa la implementación de una Planta de digestión anaerobia con capacidad de tratamiento de los residuos sólidos orgánicos con alto potencial de metanización¹⁷.
- Presentar las propuestas pertinentes después de haber identificado las áreas de oportunidad.

¹⁷ El potencial de metanización es la cantidad máxima esperada de biogás por tonelada de residuos sólidos orgánicos (FNR, 2012).

4.1.2 ALCANCE DEL ACV

En este estudio se consideraron tres límites: espacial, temporal y por tipo de residuos, los cuales se describen a continuación.

4.1.2.1 Límite espacial

El estudio comprende únicamente la gestión de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto, cuya extensión territorial es de 328 hectáreas, presenta una generación de residuos de 585 toneladas por día (SMADF, 2012) y un contenido del 80.17% de residuos orgánicos.

4.1.2.2 Límite temporal

Se considera como escenario base la gestión actual de residuos sólidos orgánicos reportada en el Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal 2011 (SMADF, 2012), el cual constituye el conjunto de datos publicados más recientes del rubro en el Distrito Federal, asimismo se coteja con el estudio realizado por Idowu, (2011).

4.1.2.3 Límite por tipo de residuos

El estudio comprende únicamente la gestión de los residuos sólidos orgánicos. Hecha la precisión anterior, la fracción inorgánica está fuera de los límites del sistema de estudio.

4.1.2.4 Funciones

La función específica de todos los escenarios de este estudio es “*manejar* 171,200 toneladas de residuos sólidos orgánicos en un año¹⁸”.

Entre los procesos evaluados, se encuentran el compostaje y digestión anaerobia que generan composta y biogás. En el caso de la digestión anaerobia, ésta puede aportar ya sea biogás como sustituto de gas natural o bien, electricidad.

¹⁸ Cantidad de residuos sólidos orgánicos generada en la Central de Abasto en el año 2011.

4.1.2.5 Unidad funcional

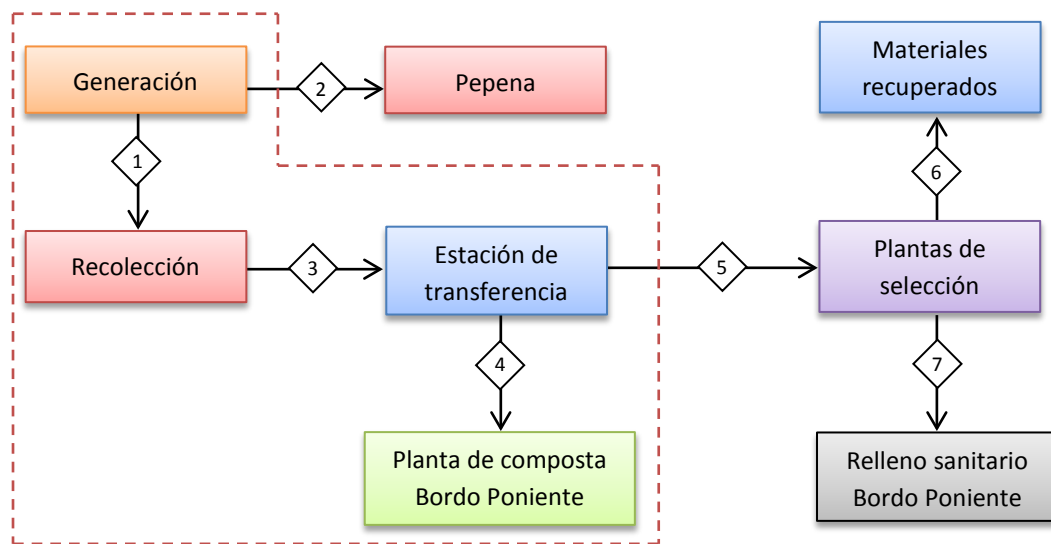
Corresponde a la gestión de 171,200 toneladas de residuos sólidos orgánicos, cifra recolectada en el año 2011 en la Central de Abasto.

4.2 ANÁLISIS DE INVENTARIO DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA CEDA

En esta sección se describe la gestión de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto y se identifica el consumo de materiales y energía de cada etapa que lo conforma.

4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA CENTRAL DE ABASTO

La Figura 27, las fronteras del sistema de gestión de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto incluyen tres grandes etapas: recolección, transferencia a la planta de composta de Bordo Poniente y compostaje.



Corriente	1	2 ¹⁹	3	4	5	6	7
t/día	585	-	585	468	117	4.7	112.3
kt/año	214	-	214	171.2	42.8	1.7	41.1

Figura 27. Gestión de residuos de la Central de Abasto (SMADF, 2012).

¹⁹ La cantidad de residuos sólidos que es seleccionada por *pepenadores* es incierta, pero no impacta ya que no es recolectada, en consecuencia no implica un consumo de combustible.

A continuación se describen las etapas que conforman el sistema actual de manejo de los residuos sólidos orgánicos de la CEDA.

Generación

Los locatarios y dueños de comercios depositan sus residuos en los contenedores, ubicados en las distintas áreas de la Central de Abasto (Tabla 12). Una fracción de estos residuos es seleccionada por *pepenadores*, que de forma voluntaria, extraen diversos materiales: residuos orgánicos para su propio consumo o para alimentar a animales, vidrio, madera, metal, cartón y plástico. El problema que genera esta selección, como se ilustra en la Figura 28, es que se dispersan los residuos en las vías externas.

Tabla 12. Generación de residuos sólidos en la Central de Abasto por sector (SMADF, 2012).

Sector	t/día	Porcentaje de residuos orgánicos	Toneladas de FORSU
Flores y hortalizas	374.4	90%	331.6
Frutas y legumbres	152.4	80%	119.9
Abarrotes y víveres	30.8	0%	0.0
Subasta y productores	11.4	88%	9.8
Mercado de Jamaica	8.0	68%	5.3
Vialidades internas	4.0	0%	0.0
Vialidades externas	2.7	89%	2.4
Estacionamiento	1.3	0%	0.0
Total	585.0		469.04

En la Tabla 12 se muestra la generación promedio de residuos sólidos por día en la Central de Abasto, así como la fracción de residuos orgánicos de cada área que

la conforman. Estos datos han sido calculados tomando en cuenta el número de viajes, la capacidad de los camiones de recolección y el peso volumétrico de los residuos.

Con base en los datos de la Tabla 12 se dedujo que la fracción de residuos orgánicos de la Central de Abasto corresponde al 80.17%.

Recolección

La *Gerencia de Limpia, Transporte y Equipo* de la Central de Abasto, es la responsable de mantener limpias las diferentes zonas que conforman este centro comercial, para ello cuenta con equipo vehicular conformado por 46 unidades, entre camiones de volteo, camiones grúa de 17 m³, cargadores frontales tipo *Bob Cat*, retroexcavadoras y barredoras (FICEDA, 2013).



Figura 28. Recolección de residuos sólidos en la CEDA.

De acuerdo con un estudio de caracterización de residuos de la Central de Abasto, realizado por Idowu, (2011), los camiones recolectores de residuos que operan en este centro comercial, transportan en promedio 4.19 toneladas por viaje; de esta manera, el transporte de 171,200 toneladas²⁰ de residuos orgánicos implicó 40,859 viajes al año.

La *Gerencia de Limpia, Transporte y Equipo de la CEDA* informó que la operación de recolección de residuos demanda, en promedio, representa un consumo de 30,000 litros por mes. Si se toma en cuenta que el 80.17% de residuos es de tipo orgánico, entonces, se requieren 24,051 litros por mes para su transporte a la

²⁰ Corresponde a la unidad funcional de este estudio (Ver sección 4.1.2.5)

estación de transferencia de la Central de Abasto, lo cual se traduce en un consumo anual de 288,612 litros de diésel.

En la Figura 29 se indica el consumo anual de diésel en la etapa de recolección, lo cual significa que se requiere de 1.68 litros de combustible por tonelada recolectada.

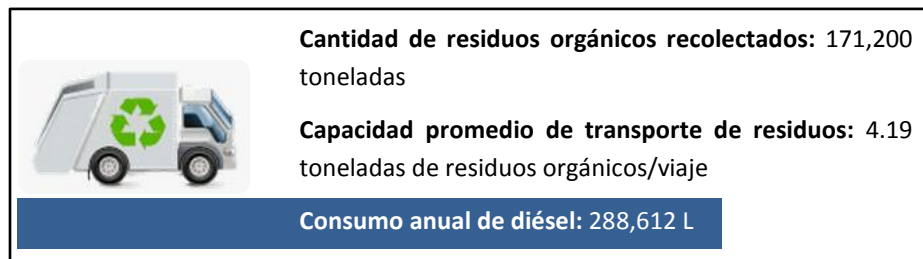


Figura 29. Consumo de combustible en la etapa de recolección de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto.

Transferencia

Una vez que los residuos llegan a la estación de transferencia, la *Secretaría de Obras y Servicios del Distrito Federal* se encarga de transportar la fracción orgánica a la Planta de Composta de Bordo Poniente.

Cabe señalar que los residuos inorgánicos, como plásticos (PEAD, PEBD, PVC²¹), lámina y latas son comercializados en su mayoría por recolectores (comúnmente denominados *pepenadores*). La fracción inorgánica remanente se envía a la Planta de selección y aprovechamiento de residuos de Santa Catarina.

De acuerdo con la *Gerencia de Limpia, Transporte y Equipo de la Central de Abasto*, cada camión de transferencia transporta en promedio 30 toneladas de residuos por viaje; mientras que Idowu, 2011, reportó un valor de 28.7 toneladas.

Se asumió que en cada viaje se transportan 30 toneladas de FORSU, por lo que anualmente se requieren 5,707 viajes para transferir la FORSU a la Planta de composta de Bordo Poniente.

²¹ Polietileno de alta densidad, polietileno de baja densidad y cloruro de polivinilo, respectivamente.

De acuerdo con los datos proporcionados por la *Secretaría de Obras y Servicios* del Distrito Federal, el rendimiento de los camiones de transferencia corresponde a 2.1 litros de diésel por kilómetro recorrido (Estrada, 2013).

Mediante *Google Maps*® se determinó que la distancia promedio que recorre un camión de transferencia, entre la CEDA y la Planta de Composta de Bordo Poniente, es 38.6 km (viaje redondo).

Con los datos anteriores, el consumo anual de diésel se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$C_D = (N_V)(D_V)(C_V)$$

Donde:

C_D : Consumo de diésel (L/año).

N_V : Número de viajes (Viajes/año).

D_V : Distancia recorrida por viaje (km/viaje)²².

C_V : Consumo de diésel por kilómetro recorrido (L/km).

En la Figura 30 se indica que el consumo de diésel en la operación de transferencia es de 462,610 litros, lo cual se traduce en un consumo de 2.7 litros de diésel por tonelada de residuos orgánicos transferidos.

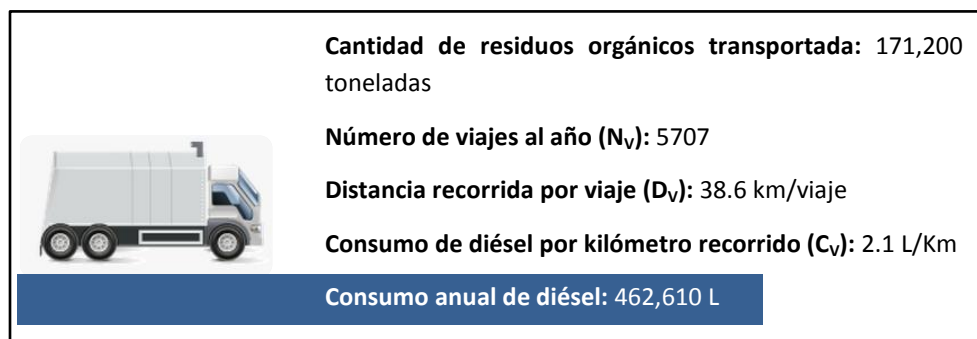


Figura 30. Consumo de combustible en la etapa de transferencia de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto.

²² Corresponde a un viaje Redondo, ida y vuelta. Se asumió que el consumo de diésel por kilómetro recorrido es constante, independientemente de si el tráiler va cargado o no.

4.2.2 ESCENARIOS DE GESTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA CENTRAL DE ABASTO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

A continuación se describen los siete escenarios de manejo de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto que han sido analizados.

4.2.2.1 Escenario base

Como se ilustra en la Figura 31, el Escenario base consiste en el confinamiento de los residuos sólidos orgánicos en relleno sanitario.

El IPCC²³ (*Panel Intergubernamental de Cambio Climático*, por sus siglas en inglés) y la EPA²⁴ (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés) recomiendan comparar los sistemas de gestión de residuos orgánicos con un escenario en el cual éstos sean confinados en relleno sanitario sin captación de biogás, ya que este último representa *a priori* el escenario más adverso de manejo de los residuos sólidos orgánicos.

Premisas planteadas por etapa.

Generación.

- Se consideró que la generación diaria promedio de residuos sólidos orgánicos en la Central de Abasto es constante e igual a 469,041 kg.
- La Central de Abasto opera los 365 días del año.
- Se consideró que esta etapa no contribuye con impactos ambientales.

Recolección.

- Se consume 1.69 litros de diésel por tonelada de residuos sólidos orgánicos recolectada.
- Se asumió que no hay generación de emisiones biogénicas a partir de la degradación de la materia orgánica en esta etapa, dado que se realiza la recolección de los residuos sólidos orgánicos en dos turnos por día.

²³ Intergovernmental Panel on Climate Change.

²⁴ US Environmental Protection Agency.

Transferencia.

- Se requiere 2.7 litros de diésel por tonelada de residuos sólidos orgánicos trasportada de la Central de Abasto a la PCBP.
- La cantidad de residuos sólidos orgánicos que llega a la estación de transferencia es enviada a la PCBP en cuanto se llena la caja de un camión de transferencia, en consecuencia, tampoco se consideraron emisiones biogénicas a partir de la degradación de la materia orgánica en esta etapa.

Relleno sanitario.

- Se requiere 1.22 litros de diésel por tonelada de residuos sólidos orgánicos que es confinada durante la operación del relleno sanitario (recepción, excavación, confinamiento, compactación y recubrimiento).
- Las emisiones biogénicas (producto de la descomposición de los residuos sólidos orgánicos en relleno sanitario) fueron calculadas a partir de la Tabla 8.

Con base en las premisas antes enlistadas, se elaboró el Escenario base, mostrado en la Figura 31, donde se presenta además su respectivo inventario de corrientes de entrada y de salida. No se incluyen los valores de las emisiones de gases de combustión ya que fueron calculados mediante el programa SimaPro ® y posteriormente traducidos en impactos ambientales.

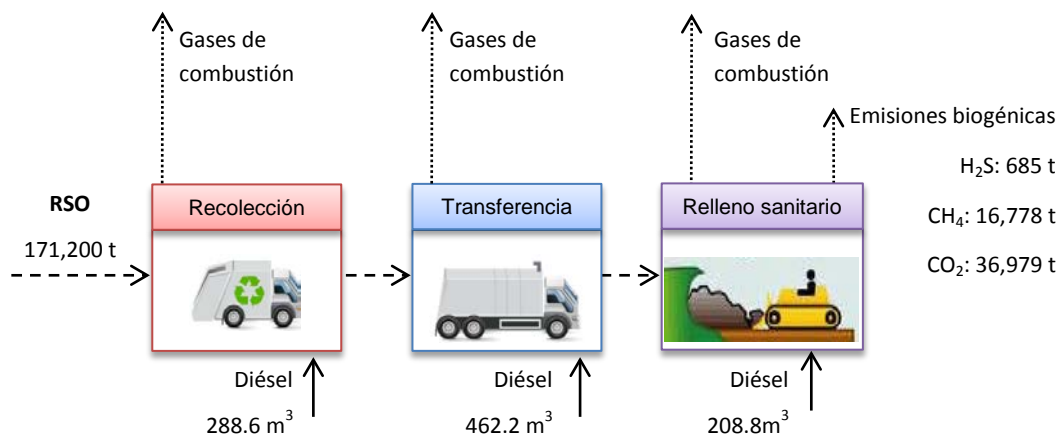


Figura 31. Escenario base: todos los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto son confinados en relleno sanitario.

4.2.2.2 Escenario 1: Situación actual del manejo de residuos sólidos orgánicos de la CEDA

El Escenario 1 corresponde a la situación actual de la gestión de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto, el cual ha sido previamente descrito en la sección 4.2.1.

Premisas planteadas por etapa.

Generación, Recolección y Transferencia

- Se aplicaron las mismas premisas que en el escenario base (sección 4.2.2.1).

Compostaje

- Se requiere 1.19 litros de diésel por tonelada de residuos sólidos orgánicos manejada durante la etapa de compostaje.
- Por cada tonelada de residuos sólidos orgánicos que ingresa a la PCBP se generan 190 kg de composta de los cuales sólo el 13.2% es aprovechado, en la Figura 32 se indica como *composta entregada* (sección 2.7.1.1)²⁵.
- La cantidad de residuos sólidos orgánicos experimenta una reducción del 25% en masa al tratarse mediante compostaje (van Haaren *et al.*, 2010), en la Figura 32 se representa como *materia degradada*.
- Las emisiones biogénicas, resultado de la degradación de los residuos sólidos orgánicos en condiciones aerobias se calcularon en función de los datos de la Tabla 6.

En la Figura 32 se muestra la esquematización del Escenario 1, denotado como E1.

Se consideró que el uso de composta sustituye el empleo de fertilizantes minerales, la conversión se realizó en función de los datos de la Tabla 25, estos resultados se muestran en la Tabla 13.

²⁵ En el *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal* se indica la cantidad de composta generada y entregada, a partir de estos datos se determinó el porcentaje de aprovechamiento (SMADF, 2012).

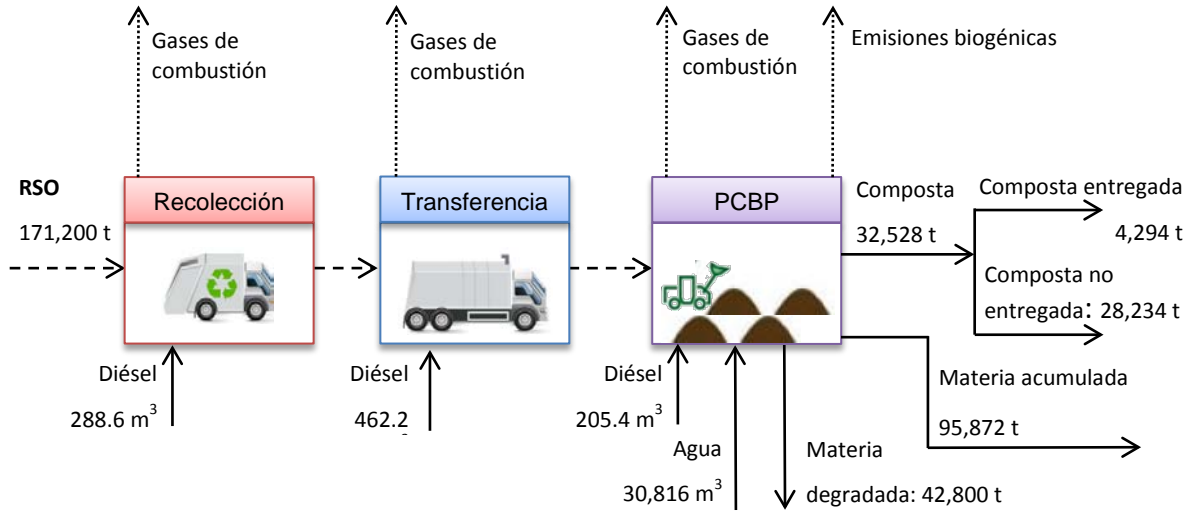


Figura 32. Escenario 1. Situación actual del manejo de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto.

Los datos mostrados en la Tabla 13 corresponden al inventario del Escenario 1, estos datos fueron procesados en el programa Simapro.

Tabla 13. Inventario de Ciclo de Vida del Escenario 1.

Entradas		Salidas	
Recolección		Compostaje	
Consumo de diésel	288.6 m ³	CO ₂	26,707.2 t
Transferencia		CH ₄	0.039 t
Consumo de diésel	462.2 m ³	NO _x	49.6 t
Compostaje		Composta	4,294 t
Consumo de diésel	205.4 m ³	Fertilizante (N)	23.2 t
Consumo de agua	30,816 m ³	Fertilizante (P)	3.9 t
		Fertilizante (K)	10.3 t

4.2.2.3 Escenario 2: Aprovechamiento del 100% de la composta generada

Denotado como E2, pretende determinar el impacto ambiental que tendría el aprovechamiento del total de la composta producida actualmente a partir de los residuos sólidos de la Central de Abasto.

Premisas planteadas por etapa.

Se aplicaron las mismas premisas que en el Escenario 1, salvo que en este caso se consideró que toda la composta generada es entregada.

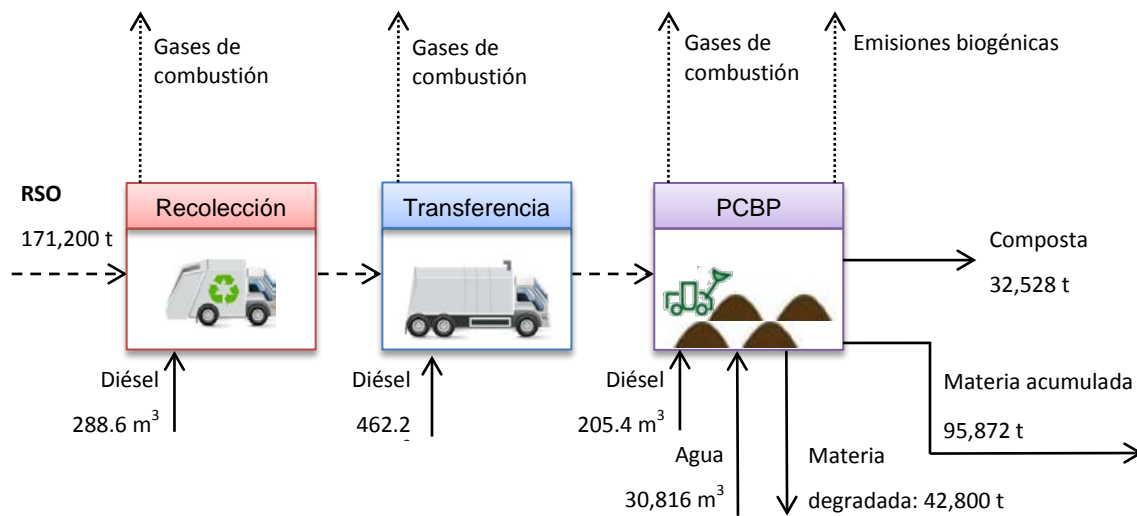


Figura 33. Escenario 2. Aprovechamiento del total de la composta generada.

Con base en la Tabla 4, se determinó que a partir de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto se generan 32,528 toneladas de composta, cifra que se muestra en la Figura 33.

La cantidad de fertilizantes que es sustituida por el uso de composta se calculó con los datos de la Tabla 25.

En la Tabla 14 se muestra el inventario del Escenario 2, el cual incluye la cantidad de fertilizante que es sustituida debido al uso de composta como sustituto de fertilizantes. Para más información sobre la equivalencia entre composta y fertilizante, se recomienda consultar la sección 6.2.

Tabla 14. Inventario de Ciclo de Vida del Escenario 2.

Entradas		Salidas	
Recolección		Compostaje	
Consumo de diésel	288.6 m ³	CO ₂	26,707.2 t
Transferencia		CH ₄	0.039 t
Consumo de diésel	462.2 m ³	NO _x	49.6 t
Compostaje		Composta	32,528 t
Consumo de diésel	205.4 m ³	Fertilizante (N)	175.7 t
Consumo de agua	30,816 m ³	Fertilizante (P)	29.3 t
		Fertilizante (K)	78.1 t

4.2.2.4 Escenario 3: Implementación de una planta de digestión anaerobia de 50 mil toneladas por año en un área próxima a la Planta de Composta de Bordo Poniente

El escenario 3, denotado como E3, corresponde a una modificación del Escenario 2, la cual consiste en la implementación de una planta de digestión anaerobia (Figura 34).

Determinación de la capacidad de la Planta de digestión anaerobia

Como puede apreciarse en la Tabla 12, los residuos con alto potencial de generación de biogás proceden de los sectores: *Frutas y legumbres, Subasta y productores, Mercado de Jamaica y Vialidades externas*. Tomando en cuenta lo anterior, se tiene una generación de 137.4 toneladas por día de residuos sólidos orgánicos, que de manera anual se traduce en 50,151 toneladas.

Los residuos procedentes del sector de *Flores y hortalizas*, serán tratados mediante compostaje, ya que estos tienen un bajo potencial de biogás y en gran proporción son inhibidores del proceso de digestión anaerobia (Varnero, 2011).

A partir de la descripción anterior, se determinó evaluar la implementación de una Planta de digestión anaerobia con capacidad de 50,000 toneladas al año, es decir, con capacidad de tratamiento del 100% de los residuos sólidos orgánicos con alto potencial de generación de biogás.

Se estima que una planta de digestión anaerobia con capacidad de 50,000 toneladas al año requiere un área de 2,000 m², el espacio requerido depende de la configuración de la tecnología seleccionada.

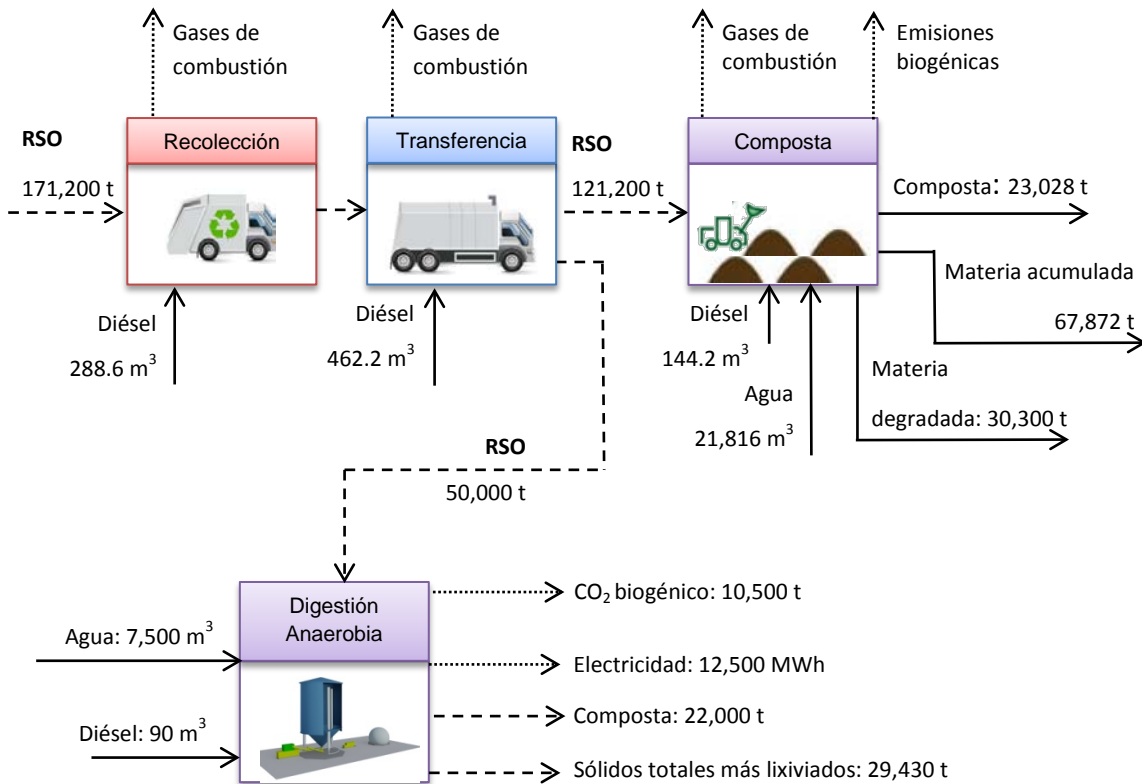


Figura 34. Escenario 3. Implementación de una Planta de digestión anaerobia con capacidad de 50 mil toneladas por año en Bordo Poniente.

Premisas planteadas por etapa.

Generación, Recolección, Transferencia y Compostaje

- Se aplicaron las mismas premisas que en el Escenario 2 (sección 4.2.2.3). Las etapas de recolección y transferencia no se modifican, debido a que la FORSU será enviada a Bordo Poniente.
- A fin de facilitar el proceso de digestión anaerobia es necesario que los residuos de los sectores: *Frutas y legumbres*, *Subasta y productores*, *Mercado de Jamaica* y *Vialidades externas* no sean mezclados con los demás residuos.

Digestión anaerobia

- Se consumen 150 litros de agua por tonelada de residuos sólidos orgánicos para la operación de la planta de digestión anaerobia.
- Se consumen 1.8 litros de diésel por tonelada de residuos sólidos orgánicos para la operación de la planta de digestión anaerobia.
- Se generan 115 Nm³ de biogás por tonelada de residuos sólidos orgánicos tratados vía digestión anaerobia.
- Se generan 250 kWh por tonelada de residuos sólidos orgánicos tratados vía digestión anaerobia.
- Se consideró que las emisiones de gases de efecto invernadero del proceso de digestión anaerobia corresponden únicamente a CO₂, puesto que la generación de electricidad a partir de biogás implica la combustión del CH₄.
- Se generan 0.21 toneladas de CO₂ por tonelada de residuos sólidos orgánicos tratados mediante digestión anaerobia (Ver sección 6.3).
- La materia orgánica experimenta una reducción en peso del 10%.
- Se generan 0.44 toneladas de composta por tonelada de residuos sólidos orgánicos tratados mediante digestión anaerobia (Ver sección 6.3).
- Se consideró que los lixiviados tienen un impacto ambiental neutro, ya que por una parte pueden servir como agua de riego o bien, bajo otras circunstancias deben ser tratados como agua residual; lo anterior depende de la tecnología empleada.
- Se considera para la evaluación una planta de digestión anaerobia *genérica*, no se eligió una determinada tecnología.

En la Tabla 15 se muestra el inventario de Ciclo de Vida del Escenario 3, estos datos fueron modelados en *SimaPro*, a partir del consumo de materiales (agua y diésel) se determinaron los impactos ambientales de las etapas de este escenario, así como los beneficios ambientales que representa el uso de composta y la generación de electricidad a partir de biogás.

Tabla 15. Inventario de Ciclo de Vida del Escenario 3.

Entradas		Salidas		
Recolección		Compostaje		Digestión anaerobia
Consumo de diésel	288.6 m ³	CO ₂	18,907.2 t	10,500 t
Transferencia		CH ₄	0.028 t	-
Consumo de diésel	462.2 m ³	NO _x	35.1 t	-
Compostaje		Composta	23,028 t	22,000 t
Consumo de diésel	144.2 m ³	Fertilizante (N)	124.4 t	118.8 t
Consumo de agua	21,816 m ³	Fertilizante (P)	20.7 t	19.8 t
Digestión anaerobia		Fertilizante (K)	55.3 t	52.8 t
Consumo de diésel	90 m ³	Electricidad	-	12,500 MWh
Consumo de agua	7,500 m ³			

4.2.2.5 Escenario 4: Implementación de una planta de DA de 50 mil toneladas por año en las inmediaciones de la CEDA

Representado como E4, es una modificación del escenario 3, en el cual se propuso ubicar la planta de digestión anaerobia en las inmediaciones de la estación de transferencia de la Central de Abasto (Figura 35).

La construcción de una Planta de digestión anaerobia en un área próxima a la Central de Abasto implica una disminución de 50 mil toneladas al año de residuos sólidos orgánicos que deben ser transferidas y que por ende, se traduce en un ahorro de combustible (Tabla 16).

La ubicación de la Planta de digestión anaerobia en el área de la Central de Abasto significa un ahorro de 135 litros, que representa tanto beneficios económicos como ambientales.

No es el objetivo de esta tesis realizar un estudio de la viabilidad de construcción de una planta de digestión anaerobia en un área próxima a la Central de Abasto, sin embargo, en trabajos previos se ha demostrado que esto es factible (Celís, 2006) ya que el riesgo asociado con su operación es bajo, y se evita la propagación de olores desagradables generados a partir de la descomposición de la materia orgánica, además de que se cuenta con el espacio necesario.

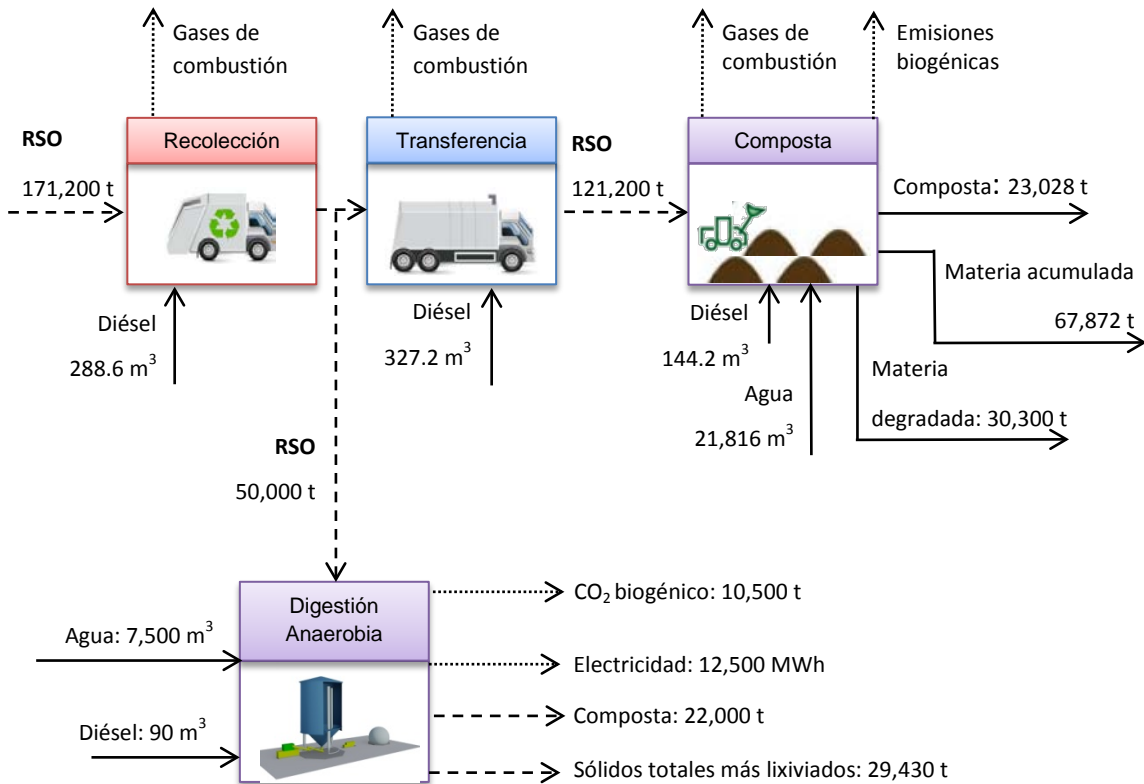


Figura 35. Escenario 4. Implementación de una Planta de digestión anaerobia con capacidad de 50 mil toneladas por año en la Central de Abasto.

En la Tabla 16 se compilan los resultados del Inventario de Ciclo de Vida del Escenario 4 que fueron empleados en su modelación mediante el programa SimaPro®.

Al comparar las Tablas 15 y 16. Se puede apreciar que la única diferencia entre estas se encuentra en el consumo de diésel en la etapa de transferencia. Sin embargo, podría esperarse que durante la operación de la Planta de digestión

anaerobia, la etapa de recolección reduzca su consumo de combustible, al entregar directamente los residuos en esta planta. Como es desconocido el ahorro de combustible en la etapa de recolección, se decidió dejarlo como en el Escenario 3.

Tabla 16. Inventario de Ciclo de Vida del Escenario 4.

Entradas		Salidas		
Recolección		Compostaje		Digestión anaerobia
Consumo de diésel	288.6 m ³	CO ₂	18,907.2 t	10,500 t
Transferencia		CH ₄	0.028 t	-
Consumo de diésel	327.2 m ³	NO _x	35.1 t	-
Compostaje		Composta	23,028 t	22,000 t
Consumo de diésel	144.2 m ³	Fertilizante (N)	124.4 t	118.8 t
Consumo de agua	21,816 m ³	Fertilizante (P)	20.7 t	19.8 t
Digestión anaerobia		Fertilizante (K)	55.3 t	52.8 t
Consumo de diésel	90 m ³	Electricidad		12,500 MWh
Consumo de agua	7,500 m ³			

4.2.3 PROCESOS EXCLUIDOS DEL ACV

En el marco de este estudio, que emplea un enfoque de ACV, varios procesos no fueron incluidos:

- *Actividades humanas relacionadas con la gestión de los residuos sólidos orgánicos.* Se consideró que los trabajadores tendrían los mismos impactos ambientales (transporte, alimentación) sin importar la actividad a la que se dedicaran, y por tanto, no se consideraron dentro de los límites de este estudio.
- La construcción de las instalaciones requeridas por los escenarios hipotéticos de gestión de residuos.
- Fin de vida de las tecnologías de tratamiento de residuos. Se juzgó muy incierto seleccionar un tiempo de vida específico para cada infraestructura

comparada (demolición, reutilización, modificación de las instalaciones). En consecuencia, ningún impacto ha sido atribuido al fin de vida de las tecnologías evaluadas.

- El manejo de residuos inorgánicos, peligrosos y de manejo especial, no forman parte de este estudio.
- El transporte requerido para distribuir la composta en los mercados no fue considerado dentro de las fronteras de este estudio.

4.3 EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA CEDA

Esta etapa corresponde a la tercera fase del desarrollo del ACV, tiene como objetivo la traducción de las corrientes de materia y energía del sistema de gestión de residuos en impactos ambientales potenciales.

4.3.1 EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES

Una vez que se completó el Inventario de Ciclo de Vida del caso de estudio, los impactos ambientales asociados a los diversos flujos elementales del sistema fueron evaluados mediante el método *IMPACT 2002+*, cuya metodología está incluida en el software *SimaPro*®.

El método *IMPACT 2002+* asigna un puntaje positivo a un impacto adverso al medio ambiente, mientras que un impacto benéfico es representado por un valor negativo.

En la sección 3.3.3 se ha descrito la metodología *IMPACT 2002+*, así como las categorías de impacto que evalúa y los factores de normalización que emplea.

4.3.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO SIGNIFICATIVAS EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA CENTRAL DE ABASTO

4.3.2.1 Evaluación del Escenario base

La primera actividad en la Evaluación de Ciclo de Vida de la gestión de residuos orgánicos de la Central de Abasto consistió en identificar las categorías de

impacto significativas del escenario base²⁶, que como se ha descrito previamente, consiste en un escenario hipotético en el cual todos los residuos sólidos orgánicos serían confinados en relleno sanitario sin captación de biogás (Figura 31).

Mediante el programa *SimaPro*[®] se realizó la normalización²⁷ de las categorías de impacto de cada una de las etapas que incluye el Escenario base, cuyos resultados se muestran en la Figura 36.

En la Figura 36 se ha excluido la categoría de impacto *Calentamiento global*, ya que esta categoría representa un impacto 38 veces mayor al correspondiente a la categoría *Enfermedades respiratorias (inorgánicos)* de la etapa de transferencia (que es la categoría que contribuye con más impactos después de la categoría *Calentamiento global*).

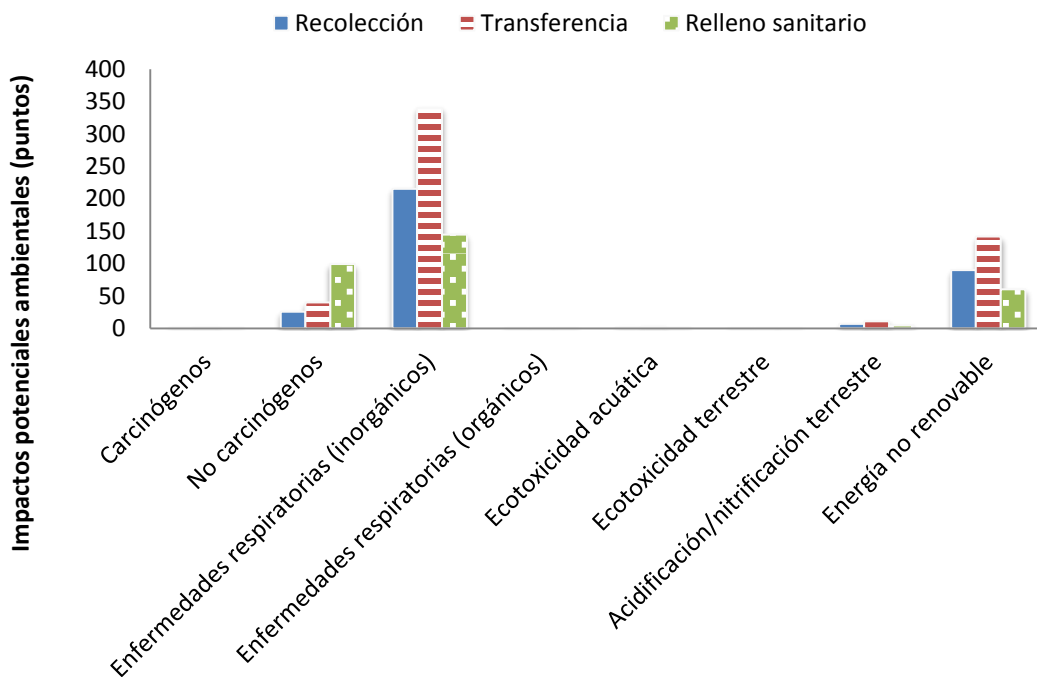


Figura 36. Categorías de impacto del escenario base (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).

²⁶ En la Tabla 9 se muestran las 14 categorías de impacto que incluye el método *IMPACT 2002+*.

²⁷ La normalización implica que los impactos se indican en una puntuación que asigna el programa *SimaPro*[®] en función de factores de normalización, los cuales se muestran en la Tabla 10; con la finalidad de poder comparar directamente las categorías de impacto.

Con base en la Tabla 17, se identificó que las categorías de impacto significativas del Escenario base corresponden a:

- Calentamiento global (dominada por la etapa de relleno sanitario).
- Enfermedades respiratorias (dominadas por la etapa de transferencia).
- Energía no renovable (dominada por la etapa de transferencia).
- No carcinógenos (dominada por la etapa de transferencia).
- Acidificación/nitrificación terrestre (dominada por la etapa de transferencia).

Los resultados de la normalización de las categorías de impacto del Escenario base se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Categorías de impacto del escenario base (Puntuación única) (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).

Categoría de impacto\Etapa	Recolección	Transferencia	Relleno sanitario
Carcinógenos	1.27	2.00	0.85
No carcinógenos	25.51	40.19	99.50
Enfermedades respiratorias (inorgánicos)	215.56	339.60	144.64
Enfermedades respiratorias (orgánicos)	0.15	0.24	0.10
Ecotoxicidad acuática	1.57	2.48	1.06
Ecotoxicidad terrestre	0.03	0.04	0.02
Acidificación/nitrificación terrestre	6.91	10.89	4.64
Energía no renovable	89.91	141.65	60.33
Calentamiento global	92.55	145.81	12,940.59
SUBTOTAL	433.46	682.91	13,251.74
Porcentaje	3%	5%	92%
TOTAL	14,368.11		

Como se ha enlistado previamente, la etapa de transferencia presenta los mayores impactos en cuatro categorías de impacto, lo cual se debe a que esta etapa requiere el mayor consumo de combustibles.

Sin embargo, la etapa de relleno sanitario domina representa los mayores impactos ambientales potenciales (92%), debido a la categoría de *Calentamiento global*, lo cual se debe a la generación biogás en condiciones anaerobias (Tabla 16), lo anterior se muestra gráficamente en la Figura 37.

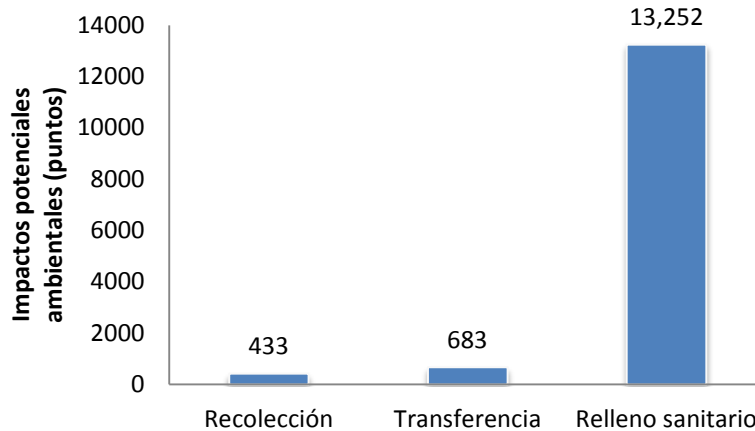


Figura 37. Puntuación total por etapa del escenario base (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).

De acuerdo con los factores de caracterización que emplea la metodología *IMPACT 2002+*, se identificó que el relleno sanitario sin captación de biogás es la etapa que representa los mayores impactos potenciales al ambiente con respecto a las otras etapas de gestión de residuos orgánicos.

Los impactos potenciales de la disposición de residuos orgánicos en relleno sanitario se deben principalmente a la generación de biogás a partir de la degradación anaerobia de estos materiales, y a que el CH_4 tiene un potencial de calentamiento global 21 veces superior al del CO_2 , en un horizonte de 100 años.

Los resultados anteriores justifican los esfuerzos que realizan algunos organismos internacionales (UNEP, FAO) por reducir al máximo la cantidad de residuos orgánicos confinados en relleno sanitario.

4.3.2.2 Evaluación del Escenario 1: Situación actual del manejo de residuos sólidos orgánicos de la CEDA

En la Tabla 18 se muestra la normalización de las categorías de impacto del escenario actual de la gestión de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto, a partir de esta tabla, se identificó que las categorías de impacto más significativas son:

- Enfermedades respiratorias (dominada por el compostaje).
- Calentamiento global (dominada por la etapa de transferencia).
- Energía no renovable (dominada por la etapa de transferencia).
- No carcinógenos (dominada por la etapa de transferencia).
- Acidificación/nitrificación terrestre (dominada por el compostaje).

**Tabla 18. Categorías de impacto del escenario 1. (Puntuación única)
(Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).**

Categoría de impacto\Etapa	Recolección	Transferencia	Composta Bordo Poniente
Carcinógenos	1.27	2.00	0.91
No carcinógenos	25.51	40.19	17.81
Enfermedades respiratorias (inorgánicos)	215.56	339.60	768.08
Enfermedades respiratorias (orgánicos)	0.15	0.24	0.10
Ecotoxicidad acuática	1.57	2.48	1.63
Ecotoxicidad terrestre	0.03	0.04	0.08
Acidificación/nitrificación terrestre	6.91	10.89	25.28
Energía no renovable	89.91	141.65	54.44
Calentamiento global	92.55	145.81	48.87
SUBTOTAL	433.46	682.91	917.20
Porcentaje	21%	34%	45%
TOTAL	2,033.57		

La Figura 38 se elaboró a partir de los datos de la Tabla 18, en esta figura puede observarse que globalmente la etapa de compostaje representa los mayores impactos potenciales en el sistema actual de manejo de residuos sólidos orgánicos.

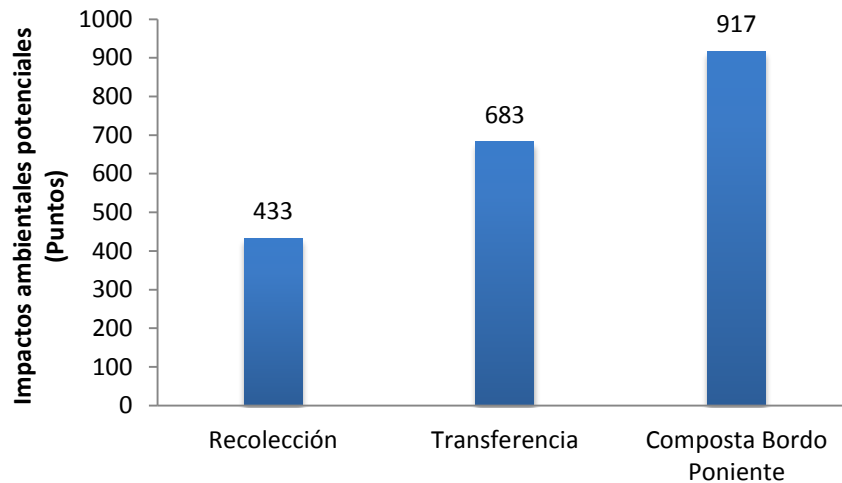


Figura 38. Puntuación total por etapa del escenario 1 (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).

El perfil de la Figura 38 resulta comprensible si se considera que la etapa de compostaje además de generar emisiones de GEI a partir del consumo de diésel, libera emisiones biogénicas (CO_2 , CH_4 y NO_x) a partir de la degradación de la materia orgánica por acción microbiana.

Las emisiones de CO_2 y CH_4 tienen efecto en la categoría de *Calentamiento global*, mientras que los NO_x (óxidos de nitrógeno) contribuyen en la categoría de *Enfermedades respiratorias*, y es esta categoría la que determina que el compostaje sea la etapa que represente los mayores impactos potenciales, como se aprecia en la Figura 38.

4.3.2.3 Comparación del Escenario base con el Escenario 1

A partir de la evaluación del Escenario base y del Escenario 1 se dedujo que respectivamente, la disposición en relleno sanitario y el compostaje, representan los mayores impactos ambientales en cada escenario.

Tal como lo indica su nombre, el escenario base, es un sistema que representa a *priori*, el manejo de residuos orgánicos más adverso para el medio ambiente, de acuerdo con las directrices del IPCC²⁸.

En este sentido, se consideró pertinente comparar el desempeño ambiental del manejo actual de la FORSU (Escenario 1) de la Central de Abasto con el Escenario base.

Como se muestra en la Figura 39, el puntaje correspondiente a las etapas de recolección y transferencia es el mismo en ambos escenarios, ya que no se realizó modificación alguna en la recolección y transferencia, se asumió que el relleno sanitario y la Planta de composta se encuentran en la misma zona.

En la Figura 39 se exhibe una marcada diferencia entre los impactos causados por disposición de residuos orgánicos en relleno sanitario y por el tratamiento mediante compostaje.

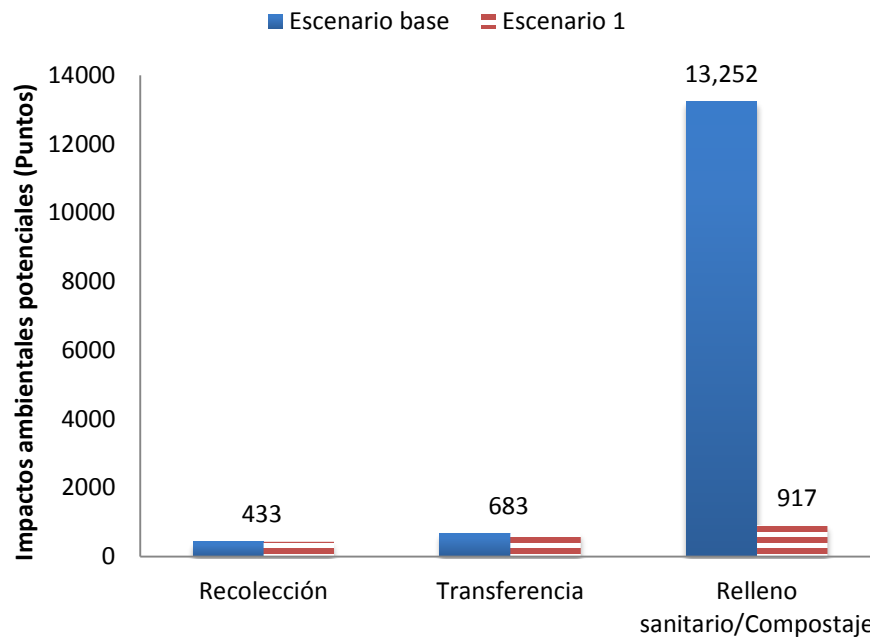


Figura 39. Comparación entre el escenario base y 1 (Puntuación total por etapa) (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).

²⁸ "National Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" (IPCC, 2006)

Una simple relación, permite deducir que la disposición en relleno sanitario representa casi 15 veces más impactos ambientales que el tratamiento de la FORSU mediante compostaje.

Con base en la Figura 39 puede deducirse que el compostaje, con respecto al relleno sanitario, es una manera adecuada para tratar los residuos sólidos orgánicos; sin embargo, conviene señalar que el *desempeño ambiental* de la Planta de Composta podría mejorar si se aprovechara la composta generada.

4.3.2.4 Evaluación del Escenario 2: Aprovechamiento total de la composta generada

Como se ha mencionado previamente, el ACV tiene naturaleza iterativa, lo cual indujo a plantear el escenario 2.

En este escenario se evaluó el impacto que representaría el uso del total de la composta que actualmente se genera en Bordo Poniente a partir de los residuos sólidos orgánicos proveniente de la Central de Abasto, ya que a la fecha, el aprovechamiento de la composta es del 13.2%.

A partir de los resultados de normalización del escenario 2, mostrados en la Tabla 19 se dedujo que el aprovechamiento del 100% de la composta generada representaría un abatimiento de los impactos potenciales de esta etapa en 250 puntos, es decir, una reducción del 12% con respecto al sistema actual de manejo de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto.

En el contexto del escenario 2 (Figura 33), los mayores impactos ambientales potenciales los representaría la etapa de transferencia (38%), posteriormente el compostaje (37%) y finalmente la etapa de recolección (24%) (Tabla 19).

El desempeño ambiental de la planta de composta se debe a que contribuye con dos tipos de emisiones: las que resultan de la quema de combustible durante su operación y las emisiones biogénicas resultado de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias.

Es conveniente aclarar que no se incluyeron los impactos asociados con el transporte de la composta, ya que no se tiene información sobre las rutas de distribución de este producto.

Tabla 19. Categorías de impacto del escenario 2. (Puntuación única) (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).

Categoría de impacto\Etapa	Recolección	Transferencia	Composta Bordo Poniente
Carcinógenos	1.27	2.00	0.74
No carcinógenos	25.51	40.19	16.94
Enfermedades respiratorias (inorgánicos)	215.56	339.60	692.80
Enfermedades respiratorias (orgánicos)	0.15	0.24	0.08
Ecotoxicidad acuática	1.57	2.48	1.63
Ecotoxicidad terrestre	0.03	0.04	0.07
Acidificación/nitrificación terrestre	6.91	10.89	22.65
Energía no renovable	89.91	141.65	-8.36
Calentamiento global	92.55	145.81	-59.53
SUBTOTAL	433.46	682.91	667.02
Porcentaje	24%	38%	37%
TOTAL	1,783.40		

4.3.2.5 Evaluación de los escenarios 3 y 4: implementación de una planta de DA de 50 mil toneladas por año de residuos sólidos orgánicos

Como se ha identificado previamente, la etapa de compostaje representa un área de oportunidad del sistema actual de gestión de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto, ya que ésta representa impactos potenciales de una magnitud cercana a los causados en la etapa de transferencia.

Ante la situación anterior, se propuso que los escenarios 3 y 4 incluyeran una planta de digestión anaerobia con capacidad de 50 mil toneladas por año, la selección de la capacidad de la planta ha sido descrita en la sección 4.2.2.4.

En la Tabla 20, se muestra el resultado de la evaluación ambiental del escenario 3.

**Tabla 20. Categorías de impacto del escenario 3. (Puntuación única)
(Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).2002+).**

Categoría de impacto\Etapa	Recolección	Transferencia	Composta Bordo Poniente	Digestión anaerobia
Carcinógenos	1.27	2.00	0.52	-0.62
No carcinógenos	25.51	40.19	11.99	-34.16
Enfermedades respiratorias (inorgánicos)	215.56	339.60	490.46	-465.12
Enfermedades respiratorias (orgánicos)	0.15	0.24	0.06	-0.39
Ecotoxicidad acuática	1.57	2.48	1.15	-1.92
Ecotoxicidad terrestre	0.03	0.04	0.05	-0.32
Acidificación/nitrificación terrestre	6.91	10.89	16.03	-7.46
Energía no renovable	89.91	141.65	-5.92	-682.61
Calentamiento global	92.55	145.81	-42.14	-637.87
SUBTOTAL	433.46	682.91	472.22	-1,830.48
TOTAL	-241.89			

Como puede apreciarse en la Tabla 20, el Escenario 3 representa globalmente impactos positivos para el medio ambiente (-242 puntos)²⁹ debido al aprovechamiento de electricidad y composta generadas a partir de la planta de digestión anaerobia.

Por su parte, el Escenario 4 representa un mayor impacto benéfico para el medio ambiente (-441 puntos), debido a la implementación de la planta de digestión anaerobia en un área próxima a la estación de transferencia de la Central de Abasto (Tabla 21), lo cual significa un menor consumo de diésel en la etapa de transferencia.

²⁹ La convención del programa SimaPro[®] establece con valor positivo los impactos adversos al medio ambiente, mientras que los impactos negativos son indicados con un valor negativo.

Tabla 21. Categorías de impacto del escenario 4. (Puntuación única) (Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).

Categoría de impacto\Etapa	Recolección	Transferencia	Composta Bordo Poniente	Digestión anaerobia
Carcinógenos	1.27	1.42	0.52	-0.62
No carcinógenos	25.51	28.45	11.99	-34.16
Enfermedades respiratorias (inorgánicos)	215.56	240.42	490.46	-465.12
Enfermedades respiratorias (orgánicos)	0.15	0.17	0.06	-0.39
Ecotoxicidad acuática	1.57	1.76	1.15	-1.92
Ecotoxicidad terrestre	0.03	0.03	0.05	-0.32
Acidificación/nitrificación terrestre	6.91	7.71	16.03	-7.46
Energía no renovable	89.91	100.28	-5.92	-682.61
Calentamiento global	92.55	103.23	-42.14	-637.87
SUBTOTAL	433.46	483.46	472.22	-1,830.48
TOTAL	-441.34			

A partir de la Tabla 20 y de la Tabla 21 se dedujo que el ahorro de combustible en la etapa de transferencia del Escenario 4 con respecto al Escenario 3, representaría evitar 200 puntos de impacto al medio ambiente durante un año de operación.

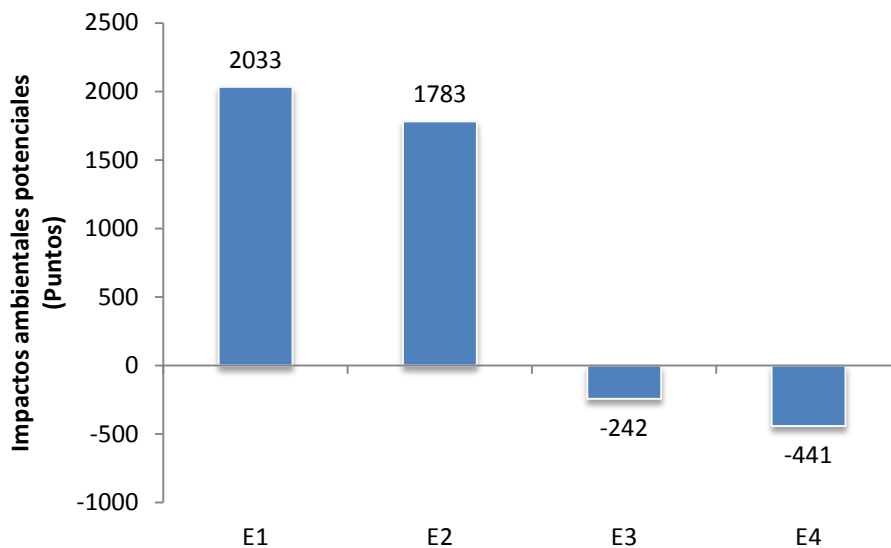
Globalmente, los escenarios 3 y 4, representan una disminución de impactos ambientales en las categorías de impacto *Calentamiento global* y *Energía no renovable*, lo anterior se debe a que estos escenarios permitirían la sustitución de electricidad proveniente de termoeléctricas, y por ende evitarían el consumo de combustibles fósiles y la generación de emisiones de GEI.

4.4 INTERPRETACIÓN DEL ACV DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA CEDA

En esta sección se presenta una comparación de los escenarios de gestión de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto.

La evaluación que asigna *SimaPro*® es determinada a partir de factores de caracterización (Tabla 10) y se expresa en *puntos de impacto ambiental*, lo cual permite comparar el *desempeño ambiental* de los distintos escenarios.

A partir de los resultados de la evaluación de los escenarios, se elaboró la Figura 40. En esta figura puede apreciarse que el uso del total de la composta generada representa un abatimiento de los impactos ambientales potenciales con respecto al Escenario 1 (sistema actual de manejo de residuos).



**Figura 40. Comparación de escenarios (Puntuación total)
(Método IMPACT 2002+ V2.10 / IMPACT 2002+).**

Mientras que el Escenario 1 tiene un puntaje de 2,033 unidades, el Escenario 2 tiene una evaluación de 1,783 puntos; es decir, el uso del total de la composta evitaría 250 puntos de impactos al medio ambiente, una reducción del 12%.

La puntuación del Escenario 2 es de especial interés ya que a pesar de que en éste se consideró el aprovechamiento del 100% de la composta generada, este sistema representa globalmente impactos potenciales negativos al medio

ambiente, debido a que el proceso de composta es un consumidor neto de energía.

Por otra parte, en la Figura 40 se observa que la implementación de una planta de digestión anaerobia con capacidad de 50 mil toneladas por año, representaría impactos potenciales benéficos para el medio ambiente (-242 puntos).

Asimismo, en la Figura se observa que la implementación de la planta de digestión anaerobia en un área próxima a la estación de transferencia de la Central de Abasto significaría un mayor impacto benéfico para el medio ambiente (-441 puntos).

La implementación de una Planta de digestión anaerobia representa un doble beneficio, por una parte implica la generación de energía (electricidad) y de materiales (composta) a partir de residuos y por otro, reduce la cantidad de residuos que son tratados mediante compostaje, y por ende, reduce el consumo de combustible en esta etapa.

En la Tabla 22 se muestra una comparación de los escenarios evaluados con respecto a la cantidad de materiales que consumen o generan.

Tabla 22. Comparación de escenarios evaluados en el ACV de la gestión de residuos sólidos orgánicos de la CEDA.

Entrada/Salida	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Consumo de diésel	956.2	956.2	985	850
Consumo de agua	30,816	30,816	29,316	29,316
Generación de composta	4,294	32,528	45,028	45,028
Generación de electricidad	0	0	12,500	12,500
Generación de GEI (ton CO ₂)	42,084.02	42,084.02	40,288.78	40,288.78

En la Figura se muestra la representación gráfica de los datos mostrados en la Tabla 22. Para la elaboración de esta figura, se consideró un puntaje de 1 a 4. En el caso de *Diésel*, *Agua* y *GEI* se consideró que a valores mayores de estas corrientes, corresponde una puntuación baja, ya que se entiende que un mayor gasto de materiales es adverso para el medio ambiente, así como la generación de emisiones de GEI.

Mientras que en el caso de *Composta* y *Electricidad*, a una cantidad mayor de estas corrientes corresponde un valor mayor en la escala de 1 a 4 que se estableció.

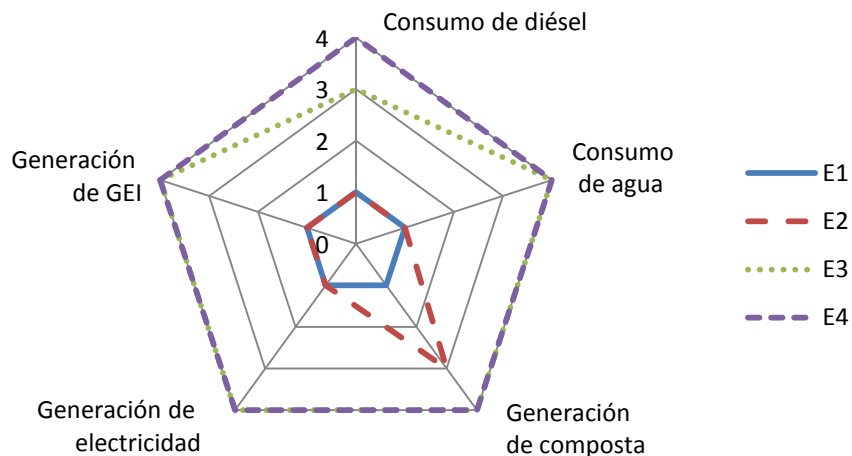


Figura 41. Comparación de escenarios evaluados en el ACV de la gestión de residuos sólidos orgánicos de la CEDA.

De acuerdo con lo mostrado en la Figura 41, el Escenario 1 (situación actual del manejo de los residuos sólidos orgánicos de la CEDA) presenta los mayores impactos ambientales potenciales, ya que a este lo corresponde la menor área en el gráfico.

Con respecto al Escenario 2, este tiene un área mayor que el Escenario 1 debido al aprovechamiento del total de la composta que se genera actualmente.

Los Escenarios 3 y 4 sólo difieren en cuanto al consumo de diésel debido a la ubicación de la Planta de digestión anaerobia, ya que en el Escenario 4 se evita la transferencia de 50,000 toneladas al año.

4.4.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO GENERADOS A PARTIR DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA CENTRAL DE ABASTO

Como se describió en secciones anteriores, el principal problema ambiental asociado con la gestión de los residuos sólidos orgánicos es el *Calentamiento global*. Por tal motivo, a partir del programa *SimaPro*[®] se determinaron las emisiones de gases de efecto invernadero en toneladas equivalentes de CO₂, resultados que se muestran en la Tabla 23.

Los valores mostrados en la Tabla 23 corresponden a la suma algebraica de emisiones de gases de efecto invernadero generadas en las etapas de cada escenario. Esto es, el programa *SimaPro*[®] asigna un puntaje positivo a las emisiones generadas, mientras que un puntaje negativo a las emisiones evitadas.

Por lo expuesto en el párrafo anterior, las emisiones de los camiones y maquinaria aportan valores positivos, mientras que el uso de composta y generación de electricidad aportan valores negativos, en tanto evitan el consumo de combustibles fósiles.

Tabla 23. Emisiones de gases de efecto invernadero de los escenarios de gestión de la FORSU de la CEDA

Escenario	Descripción	t CO _{2eq} /año
Escenario 1	Gestión actual de la FORSU	2,840
Escenario 2	Aprovechamiento del 100% de la composta	1,767
Escenario 3	Aprovechamiento de composta más planta de DA de 50 toneladas por año en Bordo Poniente	-4,381
Escenario 4	Aprovechamiento de composta más planta de DA de 50 toneladas por año en la Central de Abasto	-4,801

En la Tabla 23 puede observarse que la gestión actual de los residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto (Escenario 1) implica 2,840 toneladas equivalentes de CO₂ al año, es decir, 7.8 toneladas equivalentes de CO₂ por día.

El aprovechamiento del total de la composta generada en Bordo Poniente (Escenario 2) se traduciría en una disminución de 1,073 toneladas equivalentes de CO₂ al año, es decir, el 37.8% de reducción de emisiones de GEI.

Las emisiones evitadas de GEI en el Escenario 2 se deben a que la composta sustituye una cantidad de fertilizantes (Tabla 14), y por ende, se evita el consumo de materia prima y de energía para su generación.

El Escenario 3 representa no sólo una reducción de las emisiones de GEI, sino que además, representaría evitar 4,381 toneladas equivalentes de CO₂ al año, debido al reemplazo de electricidad generada en termoeléctricas y fertilizantes (Tabla 15), y por ende, evitar el consumo de materia prima y energía en la generación de estos productos.

4.4.2 LÍMITES Y RECOMENDACIONES

El análisis efectuado en este estudio está basado en un enfoque de ACV, y conforme a buenas prácticas de ingeniería, es conveniente señalar algunos límites y recomendaciones del mismo.

En primer lugar, el uso de suelo (*land occupation*) no fue tomado en cuenta en el análisis ambiental, debido a la ausencia de modelos de caracterización válidos en ACV. Sin embargo, este aspecto resulta esencial en la comparación de escenarios de gestión de residuos, dado que la planta de composta genera lixiviados, y no así una planta de digestión anaerobia, que generalmente cuenta con sistemas de tratamiento de los mismos.

En segundo término, la incertidumbre del desempeño ambiental de la Planta de digestión anaerobia radica en que los datos que permitieron modelarla, son datos de tipo promedio de plantas de referencia.

A fin de hacer una evaluación ambiental más robusta, los impactos potenciales relacionados con la construcción de la Planta de digestión anaerobia deberían ser considerados; sin embargo, se decidió excluir este aspecto por falta de información y por la diversidad de materiales que pueden ser empleados en la edificación de una planta de este tipo.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo corresponde a la etapa final del ACV desarrollado.

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

La digestión anaerobia es una tecnología que aporta energía renovable, ya que genera energía (calor y electricidad) a partir de diversos sustratos. En general, los sustratos más utilizados para la producción de biogás corresponden a residuos orgánicos de diversa naturaleza, dado que, sea por necesidad de tratamiento o disposición, o para un eventual mejor aprovechamiento de las materias primas; corresponden a biomasa de costo cero o cuyo tratamiento y utilización puede significar un ahorro de costos.

Sin embargo, pese a que nuestro país posee una gran cantidad de biomasa, y en particular de residuos sólidos orgánicos, la tecnología de digestión anaerobia no se ha aplicado, debido a los altos costos que significan su instalación, la escasa información que existe para la industria y la ciudadanía y la falta de capacidades técnicas locales para enfrentar estos proyectos.

A fin de hacer atractiva la implementación de una Planta de digestión anaerobia, el modelo de negocios debe incluir los siguientes aspectos:

Valorización de productos asociados a las plantas de biogás. Ya sea para autoconsumo o bien para venta a terceros, en cuyo caso se requieren esquemas de comercialización adecuados que reduzcan los riesgos económicos del proyecto.

Cogeneración. Es la alternativa más usada en Europa. Se logra la mayor eficiencia energética, con valorización de hasta un 86% de la energía que contiene el biogás (La diferencia de costo entre un equipo electrógeno y uno de cogeneración no supera el 10%).

Las fuentes de ingreso de (venta o ahorros por autoconsumo) asociados a un proyecto de generación de biogás, pueden ser los siguientes:

- Venta de energía eléctrica.
- Venta de energía térmica.
- Venta de digestato.
- Venta de bonos de carbono (se requiere incentivación por parte del Gobierno).
- Ingresos por concepto de tratamiento y disposición de residuos.

Por otra parte, en cuanto a la metodología empleada en este trabajo, el Análisis de Ciclo de Vida cada vez cobra mayor importancia. Se puede mencionar que existe la *Iniciativa de Ciclo de Vida*, la cual promueve el uso de esta herramienta para generar soluciones sustentables en cualquier área de procesos.

Asimismo, en la legislación europea el ACV ha ganado tal prestigio que es obligatorio presentar resultados de mejoramiento de procesos, cítese manejo de residuos, en términos de esta metodología.

Este estudio tuvo como objetivo particular identificar mediante un ACV, la etapa del sistema actual de manejo de residuos sólidos orgánicos de la Central de Abasto que representa los mayores impactos ambientales. En este sentido, se identificó que la etapa de compostaje representa los mayores impactos ambientales (45%), posteriormente la etapa de transferencia (34%) y finalmente la etapa de recolección (21%).

Se identificó que una estrategia para minimizar los impactos ambientales del sistema actual de manejo de los residuos sólidos orgánicos de la CEDA es lograr la entrega del total de la composta generada, con lo cual se reducirían en 12% los impactos ambientales actuales y se evitaría la emisión de 1,073 toneladas equivalentes de CO₂.

Por su parte, la implementación de una Planta de digestión anaerobia representaría evitar impactos ambientales debido a la sustitución de energía eléctrica proveniente de termoeléctricas y al reemplazo de fertilizantes minerales por uso de composta.

La cantidad de emisiones de GEI que se podrían evitar con la instalación de una planta de digestión anaerobia con capacidad de 50,000 toneladas por año ascienden a 4,380 toneladas equivalentes de CO₂.

Este estudio tuvo como principal objetivo el establecimiento de un escenario de gestión de residuos orgánicos de la Central de Abasto que minimizara los impactos ambientales del sistema actual. En este sentido, los resultados del ACV realizado indicaron lo siguiente:

- Etapa de recolección de residuos (sin modificación).
- Etapa de transferencia (disminuir la cantidad de residuos transferidos).
- Instalación de una planta de digestión anaerobia con capacidad de 50 mil toneladas por año.

Es importante puntualizar que el escenario antes planteado es *perfectible*, tomando en cuenta que se podrían proponer las siguientes mejoras en la etapa de recolección y transferencia:

- Implementar formas alternativas de recolección (variando la frecuencia de recolección).
- Optimizar el rendimiento energético de recolección y transferencia (disminuir la relación “litros de diésel por tonelada de residuos”) mediante una mayor compactación de los residuos.

Sin embargo, las opciones de mejora en las etapas de recolección y transferencia no se evaluaron, ya que la etapa de compostaje, según el ACV desarrollado, representa potencialmente los mayores impactos ambientales con respecto a las otras etapas, y por tanto, se encontró en la digestión anaerobia una alternativa para mitigar la problemática actual.

La capacidad *rentable* de la planta de digestión anaerobia tendrá que ser determinada con una evaluación técnico-económica.

Finalmente, se mencionan las siguientes conclusiones derivadas del ACV y que no formaban parte de los objetivos iniciales de esta tesis:

- El confinamiento de residuos sólidos orgánicos en relleno sanitario genera 15 veces más impactos que el tratamiento mediante compostaje.
- El compostaje es una *solución ambiental* en el manejo de residuos orgánicos, siempre y cuando se aproveche la composta generada ().
- La digestión anaerobia es una mejor alternativa, desde el punto de vista ambiental, con respecto al compostaje, ya que genera electricidad y composta a partir de residuos.

5.2 RECOMENDACIONES GENERALES

Habiendo efectuado el análisis ambiental de los escenarios antes descritos, se plantearon las siguientes recomendaciones:

- A fin de tener una mayor certidumbre en la evaluación de la etapa de recolección, es conveniente que el área responsable de esta etapa en la Central de Abasto, desarrolle inventarios más rigurosos sobre el consumo de combustible.
- La etapa de transferencia también presenta incertidumbre en cuanto a la cantidad de diésel consumido, por lo cual también aplica la recomendación previa.
- Entre los elementos excluidos de este estudio, se encuentra la evaluación de los impactos ambientales asociados con el transporte de la composta generada. Resultaría conveniente realizar un estudio de mercado de la composta (demanda, consumidores, distancias a recorrer en la distribución) y determinar sus impactos ambientales.
- La evaluación ambiental realizada corresponde sólo a uno de los pilares del desarrollo sustentable, por ende, a fin de definir un escenario acorde con los principios de sustentabilidad, es imperativo que se desarrollen estudios de tipo económico y social.
- En los estudios de evaluación económica que pudieran complementar esta evaluación ambiental, sería conveniente incluir los ingresos por *bonos de carbono*, es decir, considerar el monto de dinero correspondiente a la

cantidad de dióxido de carbono equivalente que se dejó de emitir a la atmósfera como resultado del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), 2005. *Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)*. Recurso electrónico. Última actualización: 2012. Disponible en : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=13201>
- [2] Aranda Usón , A. & Zabalsa Bribián, I., 2010. *Ecodiseño y Análisis de Ciclo de Vida*. Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- [3] Arena, U., Mastellone, M. L. & Perugini, F., 2003. The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study. *Chemical Engineering Journal*, Issue 96, pp. 207-222.
- [4] ASEGRE (Asociación de Empresas Gestoras de Residuos y Recursos Especiales), 2010. *Protocolo para la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero en actividades de gestión de residuos*, Madrid, España: ASEGRE.
- [5] Axpo Kompogas Ltd, 2013. *Axpo Kompogas*. Recurso electrónico. Última actualización: 2013. Disponible en: <http://www.axpo-kompogas.ch/index.php?path=home&lang=en>
- [6] Baumert, K., Herzog, T. & Pershing, J., 2005. *Navigating the Numbers: Greenhouse Gas Data and International Climate Policy*. USA: World Resources Institute.
- [7] BEKON, 2013. *BEKON*. Recurso electrónico. Última actualización: 2013. Disponible en: <http://www.bekon.eu/home-en.html>
- [8] Burgess, A. & Brennan, D., 2001. Application of life cycle assessment to chemical processes. *Chemical Engineering Science*, pp. 2589-2604.
- [9] Celís García, A. A., 2006. *Planta Generadora de Biogás en la Central de Abasto de la Ciudad de México*. México, D.F: Tesis para obtener el título de arquitecto, Facultad de Arquitectura, UNAM.
- [10] Chávez Gasca, M., 2013. *Ponencia: Producción de Biogás en Rellenos Sanitarios*, Ciudad Universitaria, Distrito Federal: Simposio Internacional en tecnología de digestión anaerobia para el tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM), UNAM, marzo 2013.
- [11] CRAAQ (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec), 2012. *La biométhanisation à la ferme*, Québec: CRAAQ.
- [12] De Baere, L., 2013. *Ponencia: OWS y la biometanización*, Ciudad Universitaria, Distrito Federal: Simposio Internacional en tecnología de digestión anaerobia para el tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM), UNAM, marzo 2013.
- [13] Del Borghi, A., Gallo, M. & Del Borghi, M., 2009. A survey of life cycle approaches in waste management. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Issue 14, pp. 597-610.

- [14] Department of Energy and Climate Change, 2011. *Anaerobic Digestion Strategy and Action Plan*, London: Department for Environment, Food and Rural Affairs.
- [15] Durán Moreno, A.; Garcés Rodríguez, M.; Velasco, A.; Marín Enríquez, J.; Gutiérrez Lara, R.; Moreno Gutiérrez, A. & Delgadillo Hernández, N. *Características y Análisis de Composición de los Residuos Sólidos de la Ciudad de México*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Vol. 29, No. 1, 2013.
- [16] EPA (United States Environmental Protection Agency), 2012. *Landfill Gas Energy: A guide to Developing and Implementing Greenhouse Gas Reduction Programs*. Primera ed. Washington, DC: U. S.
- [17] Estrada Nuñez, R., 2013. *Ponencia: Estado Actual del Manejo, Disposición y Tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal*, Ciudad Universitaria, Distrito Federal: Simposio Internacional en tecnología de digestión anaerobia para el tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM), UNAM, marzo 2013.
- [18] European Parliament and The Council, 2008. *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of The Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*, Brussels: The European Parliament and The Council.
- [19] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2002. *Los fertilizantes y su uso*. Cuarta ed. Roma: FAO.
- [20] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2011. *Global food losses and food waste*. Rome: FAO.
- [21] FICEDA (Fideicomiso para la Construcción y Operación de la Central de Abasto de la Ciudad de México.), 2013. *Con tu ayuda, ¡Qué nos dura la basura!* Recurso electrónico. Última actualización: 2013. Disponible en: <http://ficeda.com.mx/>
- [22] FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.), 2012. *Guide to Biogas: From production to use*, Gülzow-Prüzen, Germany:FNR.
- [23] Humbert, S., Margni, M. & Olivier, J., 2011. *IMPACT 2002+*. Recurso electrónico. Última actualización : 2013. Disponible en: <http://www.impactmodeling.org>.
- [24] ICF consulting, 2005. *Analyse des effets des activités de gestion des matières résiduelles sur les émissions de gaz à effet de serre*, Toronto, Ontario: ICF consulting.
- [25] IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), 2007. *Biomasa: Digestores anaerobios*, Madrid: IDAE.
- [26] Idowu, O. A., 2011. *Estudio diagnóstico del manejo de los residuos sólidos de la Central de Abasto, México D.F: cuantificación de subproductos*, Distrito Federal: Tesis para la obtención del grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Medio Ambiente y Desarrollo Integrado, IPN.

- [27] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2013. Recurso electrónico. Última actualización: 2013. Disponible en :<http://www.inegi.org.mx/sistemas /sisept/ Default.aspx?t=mdemo148&s=est&c=29192>.
- [28] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2013. *Resumen del inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero, 2000 a 2006*. Recurso electrónico. Última actualización: 2012. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/sisept/ default.aspx?t=ma mb111&c=21460&s=est>.
- [29] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006. *National Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volumen 5, Waste ed. Hamaya, Japan: IPCC.
- [30] JRC-IES (Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability), 2010. *ILCD handbook:General guide for Life Cycle Assessment*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [31] Juárez, C., Güereca, L. & Gassó, S., 2008. *Análisis de Ciclo de Vida del Sistema de Gestión de Residuos Municipales de la Ciudad de México*. España, Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Castellón.
- [32] Komilis, D. P. & Ham, R. K., 2004. Life-Cycle Inventory of Municipal Solid Waste and Yard Waste Windrow Composting in the United States. *Journal of Environmental Engineering*, Issue 130, pp. 1390-1400.
- [33] KOMPTECH, 2012. *Composting: Method for composting organic waste*. Recurso electrónico. Última actualización: 2013. Disponible en: www.komptech.com.
- [34] Korz, D. J., 2012. *Industrial Experiences With Anaerobic Digestion Plants in Europe*. Recurso electrónico. Última actualización: 2012. Disponible en: <http://www.epa.gov/region9/organics/symposium/2009/Korz Presentation.pdf>
- [35] Manfredi, S. & Pant, R., 2013. Improving the environmental performance of biowaste management with life cycle thinking (LCT) and life cycle assessment (LCA). *International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 18:285-291.
- [36] McDougall, F. R., White, P. R., Franke, M. & Hindle, P., 2001. *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory*. Great Britain: Blackwell Publishing.
- [37] MDDEP (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs), 2012. *Lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage*, Québec: MDDEP.
- [38] Nielsen, P. H. & Hauschild, M., 1998. Product Specific Emissions from Municipal Solid Waste Landfills. *International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 158-168.
- [39] Organic Waste System, 2013. Recurso electrónico. Última actualización: 2013. Disponible en: http://www.ows.be/household_waste/dranco/

- [40] RAE (Real Academia Española), 2013. *Diccionario de la Lengua Española*. Recurso electrónico. Última actualización: 2013. Disponible en: <http://lema.rae.es/drae/?val=residuo>.
- [41] RECYC-QUÉBEC, 2012. *La digestion anaérobic*. Recurso electrónico. Última actualización: 2012. Disponible en: <http://organique.reyc-quebec.gouv.qc.ca/>.
- [42] SMADF (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal), 2012. *Inventario de Residuos del Distrito Federal 2011*, Distrito Federal: Gobierno del Distrito Federal.
- [43] SNC-LAVALIN & SOLINOV, 2007. *Comparaison des technologies et des scénarios de gestion des matières résiduelles*, Montréal: Communauté métropolitaine de Montréal.
- [44] SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2013. *Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN)*. Recurso electrónico. Última actualización : 2013. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Pages/sniarn.aspx>
- [45] SOLINOV Inc, 2006. *Étude de faisabilité des technologies de traitement des matières organiques applicables aux territoires de l'agglomération de Montréal*, Montréal: SOLINOV inc.
- [46] STRABAG, 2013. *STRABAG Umwealtanlagen*. Recurso electrónico. Disponible en: http://www.strabag-umwealtanlagen.com/databases/internet/_public/content.nsf/web/EN-STRABAGSUA.DE-willkommen.html
- [47] Tchobanoglous, G. & Kreith, F., 2002. *Handbook of Solid Waste Management*. 2 ed. New York.:McGraw-Hill.
- [48] Thanh, N. P. & Matsui, Y., 2010. An evaluation of alternative household solid waste treatment practices using life cycle inventory assessment mode. *Environmental Monitoring Assessment*, Issue 184, pp. 3515-3527.
- [49] Themelis, N. J. & Ulloa, P. A., 2007. *Methane generation in landfills*. *Renewable Energy*, Issue 32, pp. 1243-1257.
- [50] UNEP (United Nations Environment Programme), 2005 . *Life Cycle Approaches: The road from analysis to practice*, Paris: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative United Nations Environment Programme.
- [51] UNEP (United Nations Environment Programmme), 2013. *Solid Waste Management*. Recurso electrónico. Última actualización: 2012. Disponible en: <http://www.unep.org/ietc/Portals/136/SWM-Vol1-Part1-Chapters1to3.pdf>.
- [52] Valorga International SAS, 2013. *Valorga International*. Recurso electrónico. Última actualización: 2013. Disponible en:<http://www.valorgainternational.fr/fr/>

[53] van Haaren, R., Themelis, N. J. & Barlaz, M., 2010. *LCA comparison of windrow composting of yard wastes with use as alternative daily cover (ADC)*. *Waste Management*, Issue 30, pp. 2649-2656.

[54] Varnero Moreno, M. T., 2011. *Manual de biogás*. Santiago de Chile: FAO.

[55] Wilken, D., 2013. *Ponencia: El uso de biogás en Alemania, condiciones político-legales, económicas y técnicas*, Ciudad Universitaria, Distrito Federal: Simposio Internacional en tecnología de digestión anaerobia para el tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM), UNAM, marzo 2013.

CAPÍTULO 6. ANEXO

Se agrega este apartado con la finalidad de exponer algunos conceptos que se emplearon en el desarrollo de esta tesis.

6.1 UNIDADES EMPLEADAS EN EL MÉTODO IMPACT 2002+

DALY (Años de vida ajustados por discapacidad) caracteriza la severidad de las enfermedades, tomando en cuenta tanto la mortalidad (años de vida perdidos debido a muerte prematura) como la morbilidad (debido a la disminución de la calidad de vida).

PDF·m²·yr (Fracción de especies potencialmente desaparecida por metro cuadrado por año) es la unidad que mide el impacto en el ecosistema. Por ejemplo, un producto que tiene una puntuación de 0.2 PDF·m²·yr en *calidad del ecosistema*, implica la pérdida del 20% de especies en una superficie de tierra de 1 m² durante un año.

MJ (Mega-Joules), mide la cantidad de energía extraída o requerida para extraer un recurso.

6.2 CARACTERIZACIÓN DE COMPOSTA COMO FERTILIZANTE

En *SimaPro*®, el beneficio que significa utilizar composta como sustituto de fertilizante puede ser modelado si se tiene una equivalencia entre composta y algún tipo de fertilizante con el que cuente la base de datos del programa.

Los fertilizantes generalmente son caracterizados de acuerdo con su número NPK, el cual denota su contenido en nitrógeno (como N), fósforo (como P₂O₅) y potasio (como K₂O) (FAO, 2002).

A modo de ejemplo, en un fertilizante con número NPK 17-17-17, el primer número corresponde al porcentaje de N, el segundo número al porcentaje de P₂O₅ y el tercero al porcentaje de K₂O.

En ausencia de datos de caracterización de la composta de Bordo Poniente, se recurrió a la literatura, en la Tabla 24 se muestran los valores encontrados.

Para tomar en cuenta la menor disponibilidad de nutrientes en la composta con respecto a los fertilizantes minerales, se aplica un factor de 0.3 (van Haaren *et al.*, 2010).

Tabla 24. Caracterización de composta en función de minerales NPK (van Haren *et al.*, 2010).

Componente	Porcentaje másico
N	1.8
P (P ₂ O ₅)	0.3
K (K ₂ O)	0.8

Con base en los números anteriores, se determinó la cantidad de Fertilizante (N), Fertilizante (P) y Fertilizante (K)³⁰ que puede ser sustituida por composta, mediante la siguiente ecuación:

$$F_i = (N_i)(f_d)$$

Donde

F_i: Tipo de fertilizante (N, P o K) en kg/ton de composta.

N_i: Nutriente (N, P o K) en Kg/ton de composta.

f_d: Factor de disponibilidad, corresponde a 0.3.

La cantidad equivalente de cada tipo de fertilizante (N, P o K) que aporta una tonelada de composta se encuentra en la Tabla 25.

³⁰ Estos fertilizantes están incluidos en la base de datos de SimaPro®, lo cual permite que éste realice una sustracción, dado que se evita el consumo de materiales en la generación de estos fertilizantes, es lo que en ACV se llama *emisiones evitadas*.

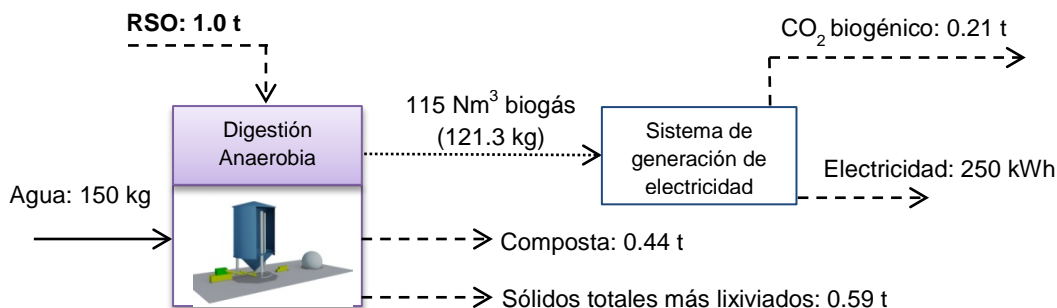
Tabla 25. Equivalencia entre composta y fertilizantes

Tipo de fertilizante	Equivalencia (kg fertilizante/tonelada de composta)
N	5.4
P (P ₂ O ₅)	0.9
K (K ₂ O)	2.4

6.3 PLANTAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE REFERENCIA

La planta de digestión anaerobia que se consideró en el presente trabajo es de tipo *genérico*, ya que se ha empleado el promedio de alguna plantas de referencia, que a continuación se enlistan. No se eligió una tecnología en específico porque esto implicaría realizar un estudio multicriterio, además el objetivo clave de este trabajo es determinar los impactos ambientales de una planta de este tipo.

Balance de materia de la planta de digestión anaerobia

**Figura 42. Balance de materia de una planta de digestión anaerobia**

Cálculo del CO₂ generado a partir del proceso de digestión anaerobia.

Como se ha descrito en la sección 2.8.2 la generación de biogás por tonelada de residuos sólidos orgánicos se ha considerado de 115 Nm³, con una composición promedio de 65% CH₄ y 35% de CO₂.

A partir de la ecuación de gas ideal se tiene:

$$n_T = \frac{PV}{RT}$$

Donde:

P= 1 atm

V= 115,000 L

R= 0.082 atm*L/mol*K

T= 298.15 K

Al efectuar la sustitución correspondiente y considerando la composición del biogás, se tiene una generación de 3,058 moles de CH₄ y 1,646 moles de CO₂. La estequiometría de la reacción de combustión de metano indica que se genera un mol de CO₂ por cada mol de metano.

De acuerdo con lo anterior, se generan 0.21 toneladas de CO₂ por tonelada de residuos sólidos orgánicos que entran al proceso de digestión anaerobia.

6.3.1 TECNOLOGÍA BEKON

La tecnología Bekon emplea un proceso de digestión anaerobia seca y opera a temperatura mesofílica (37 a 43° C). En la Tabla 26 se muestran tres plantas de digestión anaerobia de tecnología Bekon.

Tabla 26. Plantas de Digestión Anaerobia de referencia de la tecnología Bekon (BEKON, 2013).

BEKON			
Parámetro/Planta	München, Alemania	Rendsburg, Alemania	Cesena, Italia
Capacidad (t/año)	25,000	30,000	35,000
Producción de biogás (Nm ³ /t)	110	125	120
Producción electricidad (kWh/t)	239	271	260
Producción promedio de electricidad (kWh/t)	257		

6.3.2 TECNOLOGÍA DRANCO

El proceso Dranco consiste en una fermentación termofílica de una sola etapa, seguida de otra etapa corta de maduración aeróbica (compostaje). En la Tabla 27 se muestran las características de algunas plantas de digestión anaerobia de FORSU que emplean esta tecnología.

Tabla 27. Plantas de digestión anaerobia de referencia de la tecnología Dranco (Organic Waste System, 2013).

DRANCO			
Parámetro/Planta	Bassum, Alemania	Alicante, España	Pohische Heide, Alemania
Capacidad (t/año)	105,000	180,000	100,000
Producción de biogás (Nm ³ /t)	100	175	100
Producción electricidad (kWh/t)	217	380	217
Producción promedio electricidad (kWh/t)	271		

6.3.3 TECNOLOGÍA KOMPOGAS

El proceso Kompogas es un sistema de una sola etapa, termofílico, seco y horizontal de flujo pistón, en la Tabla 28 se muestran algunas plantas de referencia de esta tecnología.

Tabla 28. Plantas de Digestión Anaerobia de referencia de la tecnología Kompogas (Axpo Kompogas Ltd, 2013)

KOMPOGAS			
Parámetro/Planta	Otelfingen, Suiza	Lenzburg, Suiza	Villeneuve, Suiza
Capacidad (t/año)	13800	5000	20000
Producción de biogás (Nm ³ /t)	120	105	110
Producción electricidad (kWh/t)	260	228	239
Producción promedio electricidad (kWh/t)	242		

6.3.4 TECNOLOGÍA STRABAG

Esta tecnología es de origen alemán, puede aplicar ya sea el tratamiento húmedo o seco, según el tipo de sustrato que emplee. En la Tabla 29 se muestran algunas plantas que operan bajo esta tecnología.

Tabla 29. Plantas de digestión anaerobia de referencia de la tecnología Strabag (STRABAG, 2013).

STRABAG			
Parámetro/Planta	Lille, Francia	Brest, Bielorrusia	Midenmeer, Holanda
Capacidad (t/año)	108,600	100,000	80,000
Producción de biogás (Nm ³ /t)	85	110	105
Producción de electricidad (kWh/t)	184.45	238.7	227.85
Producción promedio de electricidad (kWh/t)	217		

6.3.5 TECNOLOGÍA VALORGA

La tecnología Valorga emplea biodigestores cilíndricos y puede operar a condiciones mesofílicas y termofílicas. En la Tabla 30 se muestran algunas plantas de referencia que aplican esta tecnología.

Tabla 30. Plantas de digestión anaerobia de referencia de la tecnología Valorga (Valorga International SAS, 2013).

VALORGA			
Parámetro/Planta	Barcelona, España	Hannover, Alemania	Amiens, Francia
Capacidad (t/año)	218,000	100,000	85,000
Producción de biogás (Nm ³ /t)	114	90	150
Producción de electricidad (kWh/t)	247	195	326
Producción promedio de electricidad (kWh/t)	256		