

María Guadalupe Gómez Méndez

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL  
DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS  
URBANOS PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA**

TESIS DOCTORAL



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona, 2009

María Guadalupe Gómez Méndez

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL  
DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS  
URBANOS PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA**

TESIS DOCTORAL

Dirigida por:

Dr. Francesc Castells Piqué  
Dra. Montserrat Meneses Benítez

Departamento de Ingeniería Química



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona 2009

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## Índice General

Índice de Tablas .....	x
Índice de Figuras .....	xii
Acrónimos .....	xiv
Resumen .....	xv
Agradecimientos .....	xvii
Publicaciones .....	xviii
Estructura del contenido .....	xix
<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	3
1.2 Ubicación de la ciudad de Chihuahua .....	4
1.3 Gestión de residuos sólidos urbanos en Chihuahua .....	5
1.4 Gestión integral de residuos sólidos urbanos .....	6
1.5 Antecedentes .....	7
1.5.1 Caracterización de residuos sólidos urbanos .....	7
1.5.2 Análisis de ciclo de Vida .....	9
1.6 Justificación del estudio .....	10
1.7 Objetivo del estudio .....	11
1.7.1 Caracterización de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Chihuahua .....	11
1.7.2 Evaluación ambiental del sistema de gestión de residuos sólidos .....	12
<b>Capítulo 2. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS .....</b>	<b>13</b>
2.1 Introducción .....	15
2.2 Principales parámetros de la caracterización de los residuos sólidos urbanos .....	15
2.3 Descripción del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos.....	16
2.4 Metodología aplicada para la caracterización de residuos sólidos urbanos .....	17
2.4.1 Clasificación de la población por niveles socioeconómicos .....	17
2.4.2 Selección de la colonia para la recolección de los residuos sólidos urbanos .....	18
2.4.3 Determinación del número de muestras .....	19
2.4.4 Recolección de muestras .....	20
2.4.5 Clasificación y cuantificación de fracciones .....	23

2.5 Análisis de resultados de la caracterización de residuos sólidos urbanos .....	24
2.5.1 Residuos sólidos urbanos generados en Chihuahua .....	24
2.5.2 Caracterización de los residuos sólidos urbanos .....	27
2.5.3 Comparación de fracciones de residuos sólidos urbanos generados en Chihuahua con otras ciudades .....	28
<b>Capítulo 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA .....</b>	<b>29</b>
3.1 Introducción .....	31
3.2 Historia de Análisis de ciclo de Vida .....	31
3.3 Fases de la metodología de análisis de ciclo de vida.....	33
3.3.1 Definición de objetivos y alcance del ACV .....	33
3.3.2 Análisis de Inventario del Ciclo de Vida .....	34
3.3.3 Análisis del Impacto del Ciclo de Vida .....	34
3.3.4 Interpretación .....	34
3.4 Sostenibilidad medioambiental .....	34
3.5 Selección de indicadores medioambientales .....	35
3.5.1 Agotamiento de recursos abióticos .....	35
3.5.2 Calentamiento global .....	36
3.5.3 Toxicidad humana .....	37
3.5.4 Fotooxidación química .....	38
3.5.5 Acidificación .....	38
3.5.6 Eutrofización .....	39
3.6 Herramienta de evaluación LCA-IWM.....	40
<b>Capítulo 4. EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LAS ETAPAS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS .....</b>	<b>43</b>
4.1 Etapas del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos .....	45
4.1.1 Almacenamiento temporal .....	47
4.1.1.1. Descripción de la etapa de almacenamiento temporal .....	47
4.1.1.2 Evaluación ambiental del almacenamiento temporal .....	48
4.1.1.3 Resultados de la evaluación ambiental del almacenamiento temporal .....	49
4.1.2 Recolección-transporte de residuos .....	52
4.1.2.1 Descripción de la etapa de recolección-transporte .....	52
4.1.2.2 Evaluación del modelo de recolección-transporte .....	52

4.1.2.3 Resultados de la evaluación ambiental de la recolección-transporte .....	54
4.1.3 Tratamiento: RELLENO SANITARIO .....	56
4.1.3.1 Descripción del proceso de relleno sanitario .....	57
4.1.3.2 Evaluación ambiental del proceso del relleno sanitario .....	58
4.1.3.3 Resultados de la evaluación ambiental del RS actual .....	60
4.1.3.4 Resultados de la evaluación ambiental del RS moderno .....	64
4.1.4 Tratamiento: INCINERACIÓN .....	68
4.1.4.1 Descripción del proceso de Incineración .....	69
4.1.4.2 Evaluación ambiental del proceso de Incineración .....	70
4.1.4.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de Incineración .....	73
4.1.5 Tratamiento: DIGESTIÓN .....	75
4.1.5.1 Descripción del Proceso de Digestión .....	76
4.1.5.2 Evaluación del proceso de Digestión .....	77
4.1.5.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de digestión .....	82
4.1.6 Tratamiento: COMPOSTAJE .....	85
4.1.6.1 Descripción del proceso de Compostaje.....	87
4.1.6.2 Evaluación del Proceso de Compostaje .....	88
4.1.6.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de compostaje .....	89
4.1.7 Tratamiento: RECICLADO .....	92
A. Papel y cartón .....	93
4.1.7.1 Descripción del proceso de reciclado de papel y cartón .....	93
4.1.7.2 Evaluación del proceso de reciclado de papel y cartón .....	94
4.1.7.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de reciclado de papel y cartón .....	95
B Vidrio .....	95
4.1.7.4 Descripción del proceso de reciclado de vidrio .....	98
4.1.7.5 Evaluación del proceso de reciclado de vidrio .....	98
4.1.7.6 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de reciclado de vidrio ....	100
C. Metales .....	102
4.1.7.7 Descripción del proceso de reciclado de metal .....	103
4.1.7.8 Evaluación del proceso de reciclado de metales .....	103
4.1.7.9 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de reciclado de metales .....	104
D. Plásticos .....	106

4.1.7.10 Descripción del proceso de reciclado de plásticos .....	107
4.1.7.11 Evaluación del proceso de reciclado de plásticos .....	108
4.1.7.12 Resultados de la evaluación ambiental del reciclado de plásticos .....	109
4.2 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos .....	111
4.3 Energía y materiales auxiliares .....	112
4.3.1 Electricidad .....	112
4.3.2 Calor .....	113
4.3.3 Acero y lubricantes .....	113
4.3.4 Diesel para transporte y maquinaria .....	113
<b>Capítulo 5. ESCENARIOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS .....</b>	<b>115</b>
5.1 Introducción .....	117
5.2 Descripción de los escenarios .....	117
5.3 Evaluación ambiental de los escenarios .....	120
5.3.1 Evaluación ambiental del Escenario RS actual .....	121
5.3.2 Evaluación ambiental del Escenario RS moderno .....	123
5.3.3 Comparación ambiental entre los escenarios RS actual y RS moderno .....	125
5.3.4 Evaluación ambiental del Escenario Digestión-RS moderno .....	126
5.3.5 Comparación ambiental entre los escenarios RS actual y Digestión-RS moderno .....	128
5.3.6 Evaluación ambiental del Escenario ReCoRSmoderno .....	129
5.3.7 Comparación ambiental entre los escenarios RS actual y ReCoRSmoderno .....	132
5.3.8 Evaluación ambiental del Escenario ReCoIncineración .....	132
5.3.9 Comparación ambiental entre los escenarios RS actual y ReCoIncineración .....	135
5.4 Comparación ambiental de los escenarios .....	135
5.4.1 Evaluación ambiental de los escenarios .....	136
5.5 Resultados de los escenarios .....	138
<b>Capítulo 6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>141</b>
6.1 Caracterización de residuos sólidos urbanos .....	143
6.2 Evaluación ambiental del sistema de gestión de residuos de residuos sólidos urbanos .....	143
6.2.1 Evaluación de las etapas del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos .....	143

6.2.2 Evaluación de los escenarios .....	144
6.3 Trabajo a futuro .....	145
Referencias.....	147
Anexo I .....	155
Anexo II .....	165
Anexo III .....	167
Anexo IV .....	179

## Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1.</b>	Clasificación por nivel de acuerdo al rango de salario mínimo para la población económicamente activa en Chihuahua .....	18
<b>Tabla 2.2.</b>	Cantidad de residuos sólidos urbanos generados por las familias de los tres niveles socioeconómicos durante las tres temporadas .....	22
<b>Tabla 2.3.</b>	Composición de las fracciones separadas.....	23
<b>Tabla 2.4.</b>	Cantidad $\text{cápita}^{-1} \text{ día}^{-1}$ de cada fracción en los tres niveles socioeconómicos y en las tres temporadas del año para la ciudad de Chihuahua .....	25
<b>Tabla 2.5.</b>	Comparación de residuos sólidos urbanos generados en Chihuahua y otras ciudades de México.....	28
<b>Tabla 3.1.</b>	Indicadores ambientales seleccionados para el ACV.....	39
<b>Tabla 4.1.</b>	Parámetros de la etapa de almacenamiento temporal de residuos sólidos urbanos .....	49
<b>Tabla 4.2a.</b>	Evaluación ambiental del almacenamiento temporal para la situación actual.....	50
<b>Tabla 4.2b.</b>	Evaluación ambiental en el almacenamiento temporal para la situación de Recogida selectiva .....	50
<b>Tabla 4.3.</b>	Parámetros de la etapa de recolección-transporte de residuos sólidos urbanos .....	54
<b>Tabla 4.4.</b>	Resultados promedio de la etapa recolección-transporte de residuos sólidos urbanos .....	55
<b>Tabla 4.5.</b>	Impacto ambiental para las tres situaciones en la etapa de recolección-transporte de residuos sólidos urbanos .....	55
<b>Tabla 4.6.</b>	Parámetros para la evaluación de los residuos sólidos urbanos en el RS actual.....	59
<b>Tabla 4.7.</b>	Evaluación ambiental para el proceso del RS actual.....	61
<b>Tabla 4.8.</b>	Parámetros para la evaluación de los residuos sólidos urbanos en el RS moderno.....	63
<b>Tabla 4.9.</b>	Categorías de impacto para el RS moderno.....	66
<b>Tabla 4.10.</b>	Categorías de impacto para el proceso de incineración.....	74
<b>Tabla 4.11.</b>	Consumo eléctrico de la etapa de pre-tratamiento mecánico.....	78
<b>Tabla 4.12.</b>	Parámetros empleados en la etapa de fermentación.....	78
<b>Tabla 4.13.</b>	Categorías de impacto para el proceso de digestión de residuos orgánicos .....	83
<b>Tabla 4.14.</b>	Factor de sustitución de nutrientes provenientes del compost.....	89
<b>Tabla 4.15.</b>	Categorías de impacto para el proceso de compostaje de residuos orgánicos .....	90
<b>Tabla 4.16.</b>	Parámetros de la etapa de clasificación y limpieza.....	94
<b>Tabla 4.17.</b>	Categorías de impacto para el proceso de Reciclado de papel y cartón .....	96
<b>Tabla 4.18.</b>	Parámetros de la etapa de clasificación y limpieza de vidrio.....	98
<b>Tabla 4.19.</b>	Categorías de impacto para el proceso de Reciclado de vidrio.....	100
<b>Tabla 4.20.</b>	Categorías de impacto para el proceso de Reciclado de metales.....	105
<b>Tabla 4.21.</b>	Balance de electricidad para plásticos.....	107
<b>Tabla 4.22.</b>	Categorías de impacto para el proceso de Reciclado de plásticos mezclados .....	108
<b>Tabla 4.23.</b>	Producción de energía eléctrica primaria de México en el año 2006.....	111
<b>Tabla 4.24.</b>	Indicadores ambientales de la electricidad mexicana, para 1kWh.....	112
<b>Tabla 5.1.</b>	Impacto ambiental para el Escenario <b>RS actual</b> .....	122
<b>Tabla 5.2.</b>	Impacto ambiental para el Escenario <b>RS moderno</b> .....	124

<b>Tabla 5.3.</b>	Comparación de la evaluación ambiental del RS actual y RS moderno.....	126
<b>Tabla 5.4.</b>	Impacto ambiental para el Escenario <b>Digestión-RS moderno</b> .....	127
<b>Tabla 5.5.</b>	Comparación ambiental de los escenarios RS actual y Digestión-RS moderno.....	129
<b>Tabla 5.6.</b>	Impacto ambiental para Escenario de <b>ReCoRS moderno</b> .....	131
<b>Tabla 5.7.</b>	Comparación ambiental de los escenarios RS actual y ReCoRS moderno.....	133
<b>Tabla 5.8.</b>	Impacto ambiental para el Escenario de <b>ReCoIncineración</b> .....	135
<b>Tabla 5.9.</b>	Comparación ambiental de los escenarios RS actual y ReCoIncineración. ....	136

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.1.</b>	Ubicación de la ciudad de Chihuahua en México. ....	5
<b>Figura 1.2.</b>	Esquema del sistema integral de residuos sólidos. ....	6
<b>Figura 2.1.</b>	Sistema de recolección-transporte de residuos en la ciudad de Chihuahua. ....	16
<b>Figura 2.2.</b>	Plano de la ciudad de Chihuahua con detalle de las colonias estudiadas con diferente nivel socioeconómico. ....	19
<b>Figura 2.3.</b>	Fracciones separadas de la clasificación de los residuos sólidos urbanos .....	24
<b>Figura 2.4.</b>	Cantidad de los residuos sólidos urbanos de los tres niveles socioeconómicos durante las tres temporadas .....	27
<b>Figura 2.5.</b>	Composición en peso de los residuos sólidos urbanos para los tres niveles socioeconómicos .....	28
<b>Figura 3.1.</b>	Diagrama de las fases del Análisis de Ciclo de Vida.....	33
<b>Figura 3.2.</b>	Diagrama del contenido que evalúa la herramienta LCA-IWM.....	41
<b>Figura 4.1.</b>	Etapas de la evaluación ambiental del sistema de gestión de residuos.....	46
<b>Figura 4.2.</b>	Composición de los residuos sólidos urbanos en Chihuahua .....	46
<b>Figura 4.3.</b>	Recipientes para almacenar temporalmente los residuos sólidos urbanos .....	47
<b>Figura 4.4.</b>	Situación del almacenamiento temporal de residuos sólidos urbanos .....	48
<b>Figura 4.5a.</b>	Impacto ambiental total del almacenamiento temporal para la situación actual .....	50
<b>Figura 4.5b.</b>	Impacto ambiental total del almacenamiento temporal para la situación recogida selectiva .....	51
<b>Figura 4.6a.</b>	Sistema de recolección-transporte de los residuos para la situación actual.....	53
<b>Figura 4.6b.</b>	Sistema de recolección-transporte de los residuos para la situación estación de transferencia .....	53
<b>Figura 4.6c.</b>	Sistema de recolección-transporte de los residuos para la situación de recogida selectiva .....	53
<b>Figura 4.7.</b>	Relleno Sanitario actual (sin control de emisiones).....	57
<b>Figura 4.8.</b>	Diagrama de flujo del relleno sanitario.....	58
<b>Figura 4.9.</b>	Diagrama del proceso evaluado del RS actual.....	60
<b>Figura 4.10.</b>	Impacto ambiental total del proceso de RS actual.....	61
<b>Figura 4.11.</b>	Relleno Sanitario moderno con control de emisiones .....	63
<b>Figura 4.12.</b>	Diagrama del proceso evaluado del Relleno Sanitario moderno.....	65
<b>Figura 4.13.</b>	Impacto ambiental total del proceso de RS moderno.....	66
<b>Figura 4.14.</b>	Planta de incineración de residuos sólidos con recuperación de energía.....	68
<b>Figura 4.15.</b>	Diagrama de flujo del proceso de incineración de residuos sólidos urbanos ...	69
<b>Figura 4.16.</b>	Proceso de incineración de residuos sólidos evaluados ambientalmente. ....	73
<b>Figura 4.17.</b>	Impacto ambiental total del proceso de incineración.....	74
<b>Figura 4.18.</b>	Planta de digestión de residuos orgánicos.....	76
<b>Figura 4.19.</b>	Diagrama de flujo del proceso de digestión.....	77
<b>Figura 4.20.</b>	Diagrama de proceso de digestión de residuos orgánicos .....	83
<b>Figura 4.21.</b>	Impacto ambiental del proceso de digestión de residuos orgánicos .....	83
<b>Figura 4.22.</b>	Planta de compostaje de residuos orgánicos .....	86

<b>Figura 4.23.</b>	Diagrama de flujo del proceso de compostaje.....	87
<b>Figura 4.24.</b>	Diagrama del proceso de compostaje de residuos orgánicos.....	89
<b>Figura 4.25.</b>	Impacto ambiental del proceso de compostaje de residuos orgánicos .....	90
<b>Figura 4.26.</b>	Proceso de reciclado de papel y cartón.....	93
<b>Figura 4.27.</b>	Diagrama del proceso de reciclado de papel y cartón.....	95
<b>Figura 4.28.</b>	Impacto ambiental del reciclado de papel y cartón.....	96
<b>Figura 4.29.</b>	Proceso de reciclado de vidrio.....	99
<b>Figura 4.30.</b>	Diagrama del proceso de reciclado de vidrio.....	99
<b>Figura 4.31.</b>	Impacto ambiental del proceso de reciclado de vidrio.....	100
<b>Figura 4.32.</b>	Proceso de reciclado de metales.....	102
<b>Figura 4.33.</b>	Diagrama del proceso de reciclado de metales.....	104
<b>Figura 4.34.</b>	Impacto ambiental del proceso de reciclado de metal.....	105
<b>Figura 4.35.</b>	Proceso de reciclado de plásticos.....	106
<b>Figura 4.36.</b>	Diagrama del proceso de reciclado de plástico mezclados.....	108
<b>Figura 4.37.</b>	Impacto ambiental del proceso de reciclado de plástico.....	109
<b>Figura 5.1.</b>	Diagrama de las etapas consideradas en los escenarios estudiados.....	118
<b>Figura 5.2.</b>	Diagrama del Escenario <b>RS actual</b> a evaluar.....	121
<b>Figura 5.3.</b>	Contribución ambiental de cada etapa en el escenario RS actual.....	122
<b>Figura 5.4.</b>	Diagrama del Escenario <b>RS moderno</b> con los datos a evaluar.....	124
<b>Figura 5.5.</b>	Contribución ambiental de cada etapa en el escenario RS moderno.....	124
<b>Figura 5.6.</b>	Diagrama del Escenario <b>Digestión-RS moderno</b> con los datos a evaluar.....	127
<b>Figura 5.7.</b>	Contribución ambiental de cada etapa en el escenario Digestión-RS moderno.....	128
<b>Figura 5.8.</b>	Diagrama del Escenario <b>ReCoRS moderno</b> con los datos a evaluar.....	131
<b>Figura 5.9.</b>	Contribución ambiental de cada etapa en el escenario ReCoRS moderno.....	131
<b>Figura 5.10.</b>	Diagrama del Escenario <b>ReCoIncineración</b> con los datos a evaluar.....	134
<b>Figura 5.11.</b>	Contribución ambiental de cada etapa en el escenario ReCoIncineración.....	135
<b>Figura 5.12.</b>	Comparación ambiental de los escenarios de tratamiento para una tonelada de residuos.....	139

## ACRONIMOS

AA	Agotamiento abiótico
AC	Acidificación
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
CG	Calentamiento global
ET	Estación de transferencia
EU	Eutrofización
FS	Fracciones separadas
FQ	Fotooxidación química
HDPE	Polietileno de alta densidad
IMR	Instalación de materiales recuperados
LCA	Life Cycle Assessment
LCA-IWM	Life Cycle Assessment - Integrated Waste Management
LPGGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
LDPE	Polietileno de baja densidad
ODM	Materia orgánica seca
PAN	Peroxacetilnitrato
PET	Polietileno tereftalato
PFOC	Potencial de formación de ozono fotoquímico
PIB	Producto Interno Bruto
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
RAEE	Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
ReCoIncineración	Reciclado Compostaje Incineración
ReCoRSmoderno	Reciclado Compostaje Relleno Sanitario moderno
RS	Relleno Sanitario
RS actual	Relleno Sanitario actual
RS moderno	Relleno Sanitario moderno
RSRP	Relleno sanitario de residuos peligrosos
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SETAC	Sociedad de Toxicología Ambiental y Química
TH	Toxicidad humana
u	unidad
VOC	Compuestos orgánicos volátiles
NMVOC	Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano

Las unidades de medida corresponden al Sistema SI

## RESUMEN

La gestión de los residuos sólido en los municipios es un aspecto importante para la protección de la salud y el medioambiente. Los países con escasos recursos económicos y tecnológicos depositan los residuos directamente en rellenos sanitarios. La mejora de este sistema de gestión requiere de una parte de disponer de la información sobre la cantidad y composición de los residuos generados y por otro contar con un instrumento para determinar la viabilidad de las posibles alternativas. Este es el caso de la ciudad de Chihuahua.

Este estudio se divide en dos secciones, la primera es la caracterización de los residuos sólidos urbanos domiciliarios, en tres colonias de la ciudad durante tres temporadas del año y la segunda parte es la evaluación ambiental de la situación actual del sistema de recolección y cuatro escenarios más de tratamiento, aplicando la metodología de ciclo de vida utilizando la herramienta LCA-IWM.

La caracterización de residuos sólidos se realizó en tres colonias con diferente estatus socioeconómico, clasificadas de acuerdo con el nivel salarial de sus habitantes en nivel I (1 a 2 salarios mínimos), nivel II (2 a 5 salarios mínimos) y nivel III (con más de 5 salarios). Los residuos se recolectaron durante una semana en abril (cambio de estación), una semana en agosto (alta temperatura) y una semana en enero (baja temperatura). En abril, el porcentaje de generación de residuos fue mayor (38%) en comparación con agosto (34%) y enero (28%). Los resultados indican  $0.522$ ,  $0.634$  y  $0.637$   $\text{kg capita}^{-1} \text{ día}^{-1}$  para los tres niveles.

Los RSU se separaron en quince fracciones, la mayor fracción generada fue la orgánica (47%), seguida por la de papel (19%) y plástico (15%) promedio de los tres niveles y durante las tres temporadas de análisis. La cantidad de metal y vidrio fue muy semejante en los tres niveles.

La metodología de Ciclo de Vida aplicada en la evaluación ambiental establece como límite del sistema de recolección y tratamiento de residuos municipales. La unidad funcional es una tonelada de residuos de origen y las categorías de impacto son el agotamiento abiótico, calentamiento global, toxicidad humana, fotooxidación química, acidificación y eutrofización.

En la etapa de almacenamiento temporal los residuos se evaluó ambientalmente las bolsas de polietileno, canastas metálicas, botes de plástico y contenedores de plástico (para recogida selectiva). Las bolsas de polietileno presentan mayor impacto ambiental en todas las categorías en comparación con los otros contenedores de almacenamiento.

En la etapa de recolección y transporte se presentan tres situaciones donde se evalúa las emisiones por consumo de combustible. En la primera situación se emplea un camión

recolector y ese mismo camión transporta los residuos para disposición final (situación actual en Chihuahua). En la segunda situación un camión recolecta los residuos y los lleva a una estación de transferencia, de ahí un camión con tráiler de mayor capacidad los transporta a la instalación de tratamiento. En la tercera situación se utilizan distintos contenedores de plástico para la colocación de fracciones a reciclar. La distancia recorrida y el consumo de residuos evaluada en esta etapa es mayor en la primera situación, consecuentemente el mayor impacto ambiental.

Los tratamientos de residuos evaluados son el RS actual (situación actual en Chihuahua, sin control de emisiones), RS moderno (con control de emisiones), Incineración, Digestión, Compostaje (sin control de emisiones) y Reciclado. El tratamiento de incineración resulta con mayor beneficio ambiental y el tratamiento con peor impacto ambiental es el RS actual.

Se evaluó el sistema actual de residuos en Chihuahua (RS actual) y se propusieron cuatro escenarios combinando los tratamientos. Los escenarios son: RS moderno, Digestión-RS moderno, ReCoRS moderno (reciclado, compostaje y RS moderno) y ReCoIncineración (reciclado, compostaje e incineración). Los escenarios RS actual y RS moderno consideraron la evaluación del 100% de los residuos mezclados. El escenario Digestión-RS moderno trata el 22% de los residuos orgánicos en el proceso de la digestión y el resto (78%) en el RS moderno. La composición de los residuos tratados en los escenarios ReCoRSmoderno y ReCoIncineración es de 22% de residuos orgánicos (a compostar), 15% de fracciones separadas (papel, vidrio, metal y plástico a reciclar) y 63% de residuos mezclados (a RS moderno o a incineración). Los escenarios con mayor beneficio ambiental en todas las categorías fueron el ReCoRSmoderno y ReCoIncineración, debido al reciclado de fracciones, producción de compost y recuperación de energía. El peor escenario fue el RS actual, presentando un impacto ambiental adverso debido a la emisión de gas y lixiviado sin control.

## AGRADECIMIENTOS

A mi Dios por su compañía durante esta experiencia y el aprendizaje logrado.

Al Dr. Francesc Castells por su invaluable apoyo, dirección, correcciones y tiempo durante el desarrollo de esta tesis. Además por la aceptación que me brindó en el grupo AGA.

A la Dra. Montserrat Meneses por su apoyo, supervisión, detalladas correcciones y enseñanza para el mejor desarrollo de este trabajo.

A la Secretaría de Educación Pública por la beca Promep (Programa de mejoramiento del profesorado) otorgada para la realización de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Chihuahua por permitirme venir a realizar este estudio y a la Facultad de Ciencias Químicas (Consejo Técnico del 2004 a 2009) por el tiempo concedido para terminar mi trabajo de tesis. También a Enrique Seañez por su apoyo para los trámites y permisos solicitados.

A la Dra. Lourdes Ballinas por brindarme su apoyo en Chihuahua para terminar esta tesis.

Al Lic. Ricardo Martínez, director de aseo urbano municipal, por las facilidades prestadas para realizar el trabajo de caracterización de residuos sólidos urbanos..

A los estudiantes Rebeca Mendoza, Joel Acosta y Ricardo Mariñelarena por el trabajo realizado en la caracterización de los residuos sólidos urbanos.

A Isabela por su apoyo durante mi estancia en Tarragona.

A mis compañeros del grupo AGA por los buenos momentos que pasamos juntos.

Con mi mayor agradecimiento a mi madre, hermana, hermanos y toda mi familia por su amor incondicional.

## **Publicaciones**

Gómez G., Meneses M., Ballinas L. Castells F. 2008. Characterization of urban solid waste in Chihuahua, México. Waste Management 28 (12) 2465-2471.

Gómez G., Meneses M., Ballinas L. Martínez R. Castells F. Seasonal characterization of municipal solid waste (MSW) in the city of Chihuahua, México. Waste Management.

Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.02.006>

## **Presentaciones**

Gómez-Méndez G., Meneses M. and Castells F.

Poster: Environmental evaluation of Urban Solid Waste treatment scenarios in the city of Chihuahua by means of LCA

SETAC Europe 19th Annual Meeting

Göteborg (Suecia), Junio 2009

Gómez-Méndez G., Meneses M. and Castells F.

Poster: Application of LCA to Integrated Solid Waste Management in Chihuahua

3<sup>rd</sup>. International Conference on Life Cycle management

Zurich (Suiza), Agosto 2007

Gómez-Méndez G., Meneses M. and Castells F.

Poster: Application of LCA to solid waste management in Chihuahua

SETAC Europe 17<sup>th</sup> Annual Meeting

Oporto (Portugal), Abril 2007

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## ESTRUCTURA DEL CONTENIDO

**Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.** En este capítulo se presentan las características del sistema de gestión de residuos en la ciudad de Chihuahua. Así como los estudios realizados anteriormente por otros investigadores sobre la caracterización de residuos sólidos y sobre el análisis de ciclo de vida del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos.

**Capítulo 2. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).** En este capítulo se presenta los resultados de la caracterización de los residuos sólidos urbanos en Chihuahua. Se estudio la influencia socioeconómica y estacional de la generación de los RSU en Chihuahua.

**Capítulo 3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA.** En este capítulo se presenta la metodología de análisis de ciclo de vida, su historia, definición de las etapas del ciclo de vida y los indicadores empleados para la evaluación de los residuos sólidos urbanos basados en el análisis de ciclo de vida.

**Capítulo 4. EVALUACIÓN DE LAS ETAPAS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS.** En este capítulo se presenta la descripción de las diferentes etapas de un sistema de gestión de residuos y su evaluación ambiental (almacenamiento temporal, recolección-transporte y la disposición final o tratamiento).

**Capítulo 5. ESCENARIOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS.** En este capítulo se presentan los escenarios de tratamiento de RSU. Un escenario incluye el almacenamiento temporal, recolección-transporte y el o los tratamientos seleccionados para el tratamiento de los residuos. Se presenta la evaluación ambiental de cada escenario

**Capítulo 6. CONCLUSIONES.** En este capítulo se presentan las conclusiones del estudio realizado sobre la evaluación ambiental de la gestión de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Chihuahua. Se presenta el trabajo a futuro para realizar como continuación de este estudio.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### Índice

1.1 Introducción .....	3
1.2 Ubicación de la ciudad de Chihuahua .....	4
1.3 Gestión de residuos sólidos urbanos en Chihuahua .....	5
1.4 Gestión integral de residuos sólidos urbanos .....	6
1.5 Antecedentes .....	7
1.5.1 Caracterización de residuos sólidos urbanos .....	7
1.5.2 Análisis de ciclo de Vida .....	9
1.6 Justificación del estudio .....	10
1.7 Objetivo del estudio .....	11
1.7.1 Caracterización de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Chihuahua .....	11
1.7.2 Evaluación ambiental del sistema de gestión de residuos sólidos .....	12

### Resumen

En este capítulo se presentan las características del sistema de gestión de residuos en la ciudad de Chihuahua. Así como los estudios realizados anteriormente por otros investigadores sobre la caracterización de residuos sólidos y sobre el análisis de ciclo de vida del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## 1.1 Introducción

La población de cualquier ciudad o país consume una gran variedad de productos, generando con ello materiales no aprovechables o residuos que se van acumulando, originando un problema para la población. Antiguamente la generación de residuos no representaba una preocupación, pues la subsistencia se basaba en el consumo y uso de recursos naturales, testimonio de ello son los restos de huesos de animales y de conchas encontrados en cuevas habitadas por hombres del período neolítico. Aunado a la poca población y a la continua emigración, los residuos generados no representaban un inconveniente. Al establecerse en un lugar e ir aumentando el número de habitantes, los residuos aumentaron también, generando con ello un problema de salud. Posteriormente se tuvieron que implementar lugares para depositar los residuos o se incineraban a cielo abierto. Actualmente, según los recursos económicos y desarrollo tecnológico, los gobiernos de los países disponen de los medios para asegurar la salud y bienestar de sus habitantes. Además la composición de los residuos varía entre países y ciudades por ubicación geográfica, costumbres, capacidad adquisitiva, desarrollo tecnológico, edad de la población, actividad económica, etc. Estas condiciones plantean sistemas de gestión de residuos diferentes para cada país o ciudad (Colomer y Gallardo, 2007).

En Chihuahua, una ciudad con un rápido crecimiento, la composición de los residuos sólidos ha cambiado a lo largo del tiempo en volumen y en composición debido al aumento de la población y de cambios en el estilo de vida. Además los cambios en los hábitos de consumo y el desarrollo de nuevos productos generan también nuevos residuos. Este tipo de residuos son generalmente materiales biodegradables y se depositan en la basura para posteriormente ser transportados a los vertederos. Ahí algunos materiales se descomponen más rápidamente que otros, generando emisiones que son dañinas para el ser humano y el ambiente en general. La situación anterior aunada a otras muchas actividades que generan nuevos residuos plantea nuevos desafíos a las instituciones de gobierno encargadas de gestionarlos para reutilizarlos o reciclarlos cuando sea posible o bien para proporcionar el servicio de recolección y transporte a un lugar seguro de disposición final.

El plantear sistemas más eficaces y eficientes de manejo de residuos sólidos es una preocupación y continúa necesidad de las instituciones encargadas del aseo urbano. El diseño de un sistema de gestión integral de residuos requiere de información y en muchas ocasiones no existen datos para iniciar con el planteamiento del sistema de gestión de residuos. Aunque en la actualidad existen sistemas de gestión de residuos muy desarrollados, las características de la ciudad, los hábitos de consumo de la población difieren de ciudad a ciudad y de país a

país. En México el sistema de recolección de los residuos es semejante en todas las ciudades del país. Los residuos se depositan en las aceras de la banqueta, en bolsas de polietileno y posteriormente pasa el camión recolector, transportándolos para disposición final. Los pepenadores realizan la separación de fracciones para su venta posterior (ejemplo: cartón, metal, etc.). Chihuahua no dispone de datos de caracterización de sus residuos sólidos urbanos generados. Sin embargo, esta información es primordial para poder diseñar un adecuado sistema de gestión integral de residuos.

La caracterización de los residuos sólidos es la información básica para buscar sistemas de tratamiento de residuos. Uno de los objetivos actuales es aprovechar y valorar al máximo todos los residuos. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología aplicada para evaluar el impacto ambiental de los procesos o servicios desde su inicio hasta su fin de vida. Se han desarrollado varias herramientas de cálculo para evaluar el tratamiento de los residuos (ejemplo: WISARD (Ecobalance, 2009), IWM2-MODEL (McDougall et al., 2002), etc.). Una de estas es la herramienta LCA-IWM (Life Cycle Assessment-Integral Waste Management), desarrollada dentro del Fifth Framework Programme Technological Development and Demonstration Activities en la Unión Europea. Esta herramienta utiliza la metodología de ciclo de vida, evaluando aspectos ambientales, económicos y sociales del sistema de gestión de residuos (Den Boer et al., 2005). La LCA-IWM es una herramienta que evalúa la sensibilidad de sistemas de tratamiento de residuos sólidos y proporciona información para la toma de decisiones pues permite formular diferentes escenarios. En este estudio se pretende primeramente caracterizar los residuos sólidos urbanos generados en la ciudad de Chihuahua, para contar con la información básica necesaria para poder realizar una evaluación ambiental del sistema, basada en datos reales. A partir de esta información se plantean varios escenarios posibles de tratamiento y se evalúan ambientalmente con la herramienta LCA-IWM. Con la herramienta se puede modificar y evaluar escenarios hasta encontrar la combinación óptima de tratamiento con mínimo impacto ambiental.

## **1.2 Ubicación de la ciudad de Chihuahua**

El Estado de Chihuahua se encuentra localizado en la parte norte de la República Mexicana, con una extensión territorial de 247,087 km<sup>2</sup>, que representa el 12.6% del territorio mexicano (INEGI, 1999). La ciudad de Chihuahua es la capital del estado y tiene una población cercana al millón de personas, de la cual el 60% es menor de 30 años, según el Gobierno Municipal de Chihuahua (GMCh, 2007). El municipio de Chihuahua concentra el 23% de la población del estado, la cual creció a una tasa media anual de 1.1% del 2000 a 2005, según datos del

Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática (INEGI, 2005a). En la Figura 1.1 se presenta un mapa con la localización de la ciudad de Chihuahua dentro de la República Mexicana.



**Figura 1.1.** Ubicación de la ciudad de Chihuahua en México.

### **1.3 Gestión de residuos sólidos urbanos en Chihuahua**

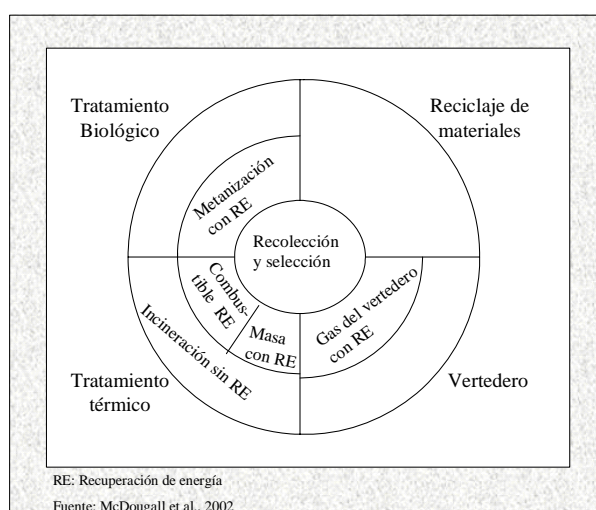
Uno de los problemas ambientales más importantes a nivel mundial es el derivado de la gestión de residuos que obviamente crece con el aumento de la población. México, con una población aproximada de 107 millones de habitantes, en el 2008, no es la excepción (Conapo, 2008). Los residuos sólidos generados se depositan del 20 al 25% en vertederos que cumplen con la NOM-083-SEMARNAT-2003 (2004), del 30 al 35% en vertederos controlados y 40% son depositados en tiraderos a cielo abierto (GTZ-México, 2005). En algunas ciudades de México, se han realizado algunos proyectos de implementación de sistema de control de emisiones en los vertederos de residuos sólidos (ciudades como Aguascalientes, Monterrey, Guadalajara, Cd. México, etc.). Todo esto con el propósito de cumplir con los compromisos adquiridos en reuniones ambientales internacionales, como la “Cumbre de la tierra en Río de Janeiro en 1992 (INEGI-INE, 2000).

La ciudad de Chihuahua como el resto de ciudades de México ha adquirido compromisos de desarrollo sostenible. Confirman este compromiso la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) la cual plantea entre sus objetivos aplicar los principios de responsabilidad compartida y manejo integral de residuos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, los cuales deben

considerarse en el diseño de instrumentos, programas y planes de política ambiental para la gestión de residuos (LGPGIR, 2003). También existe la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Chihuahua considerando en los artículos 137 a 162 la gestión de los residuos sólidos no peligrosos (LEEPAECh, 2005). Además el municipio de Chihuahua también se rige con reglamentos específicos para el sistema actual de residuos sólidos (RLMCh, 2004-2007). Para satisfacer estas leyes se requiere de información sobre la composición de los residuos sólidos generados.

#### 1.4 Gestión integral de residuos sólidos urbanos

De acuerdo con la directiva del Consejo Europeo 75/662/CEE se entiende como residuo toda sustancia u objeto (incluido en las categorías citadas en el correspondiente anexo) del que el poseedor se desprende o de la que tiene la intención o la obligación de deshacerse. Más concretamente en la Norma Oficial Mexicana (NOM-083-SEMARNAT-2003, 2004) los residuos sólidos municipales están definidos como -residuo sólido que proviene de actividades que se desarrollan en casa-habitación, sitios y servicios públicos demoliciones, construcciones, establecimientos comerciales y de servicios, así como residuos industriales que no se deriven de su proceso-. Los residuos son generados en todos los ámbitos sociales, en diferentes cantidades y composición, según McDougall et al. (2002) estas son características a considerar en la gestión integral de residuos sólidos, para combinar los flujos de residuos, métodos de recolección, métodos de tratamiento y disposición con el objetivo de lograr beneficios ambientales, optimización económica y aceptabilidad social. La Figura 1.2 presenta un esquema del sistema integral de gestión de residuos, según McDougall et al. (2002).



**Figura 1.2.** Esquema del sistema integral de residuos sólidos.

Según McDougall et al. (2002) la clave de un sistema integral de los residuos sólidos ha de ser:

- minimización de los residuos,
- reuso de productos o materiales,
- reciclado de materiales y tratamiento biológico,
- tratamiento térmico con recuperación de energía,
- tratamiento térmico sin recuperación de energía y
- vertedero o relleno sanitario.

En un sistema de gestión de residuos sólidos con bajo presupuesto, como en Chihuahua, la opción más económica de tratamiento es depositar los residuos en el vertedero. En cuanto al reciclado, se presenta la extracción de materiales por medio de los pepenadores que seleccionan algunas fracciones de los residuos totales, por ejemplo: cartón, papel periódico, metal, etc., para venderse en centros de acopio o en instalaciones de tratamiento. Una mejora ambiental viable de tratamiento es la separación de fracciones para reciclar y/o depositar en el vertedero con sistemas de recolección de gases para la producción de energía, con posibilidad de venta.

La optimización ambiental de la gestión de residuos requiere determinar los efectos ambientales de los distintos elementos que componen el sistema de recolección y tratamiento. Es por ello que se propone modelar los distintos sistemas de gestión de residuos para poder determinar los impactos ambientales de los elementos que lo componen. La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), proporciona el marco metodológico adecuado para la determinación de este perfil ambiental. La metodología de ciclo de vida considera aspectos ambientales, económicos y sociales para modelar y evaluar tratamientos en la gestión de residuos sólidos. Para una adecuada evaluación de los distintos elementos de los sistemas de gestión de residuos considerados, será necesaria una correcta caracterización de los residuos urbanos de origen.

## **1.5 Antecedentes**

### ***1.5.1 Caracterización de residuos sólidos urbanos***

La definición de residuos sólidos municipales incluye los residuos residenciales, comerciales, institucionales y algunas fuentes industriales (Tchobanoglous y Kreith, 2002). Buenrostro et al. (2001b) clasifican los residuos sólidos municipales en urbanos, industriales y rurales. La

división de urbanos comprende a las fuentes de los residuos sólidos dentro de un asentamiento, independientemente del tamaño de la población. Los residuos urbanos se separan, según la clase de fuente en la que se originan: residencial (hogares o apartamentos) y no residencial (comercial, institucional/servicios, construcción/demolición y especial). En este estudio identificaremos los residuos sólidos urbanos provenientes de los hogares como **Residuos Sólidos Urbanos (RSU)**.

Existen varios estudios sobre caracterización de RSU, como los realizados por Abu Qdais et al. (1997) y Bolaane y Ali (2004) que estimaron la cantidad y composición de los residuos sólidos. Estos autores analizaron la generación de residuos en hogares con diferentes rangos de ingresos socioeconómicos. Los resultados en Abu Qdais et al. (1997) indicaron una relación directa entre el consumo per capita y el nivel de ingreso. Sin embargo, los resultados obtenidos por Bolaane y Ali (2004) no muestran una relación proporcional directa entre la cantidad de residuos y el nivel salarial de los ciudadanos.

Bernache-Perez et al. (2001), Buenrostro et al. (2001a) y Ojeda-Benitez et al. (2003) caracterizaron los residuos sólidos en varias ciudades de México. Bernache-Perez et al. (2001), caracterizaron los residuos provenientes de hogares y del relleno sanitario municipal de la ciudad de Guadalajara. Estos investigadores separaron los residuos en varias categorías, derivados de las 27 categorías definidas en la Norma Mexicana (NMX-AA-022-1985). Los resultados presentados indican un cambio en la composición de los residuos por el paso del tiempo. Por otro lado, Buenrostro et al. (2001a) en Morelia (México), determinó los componentes de los residuos sólidos generados en hogares con diferente nivel socioeconómico. Los resultados mostraron que a mayor ingreso económico mayor generación de residuos per capita. Otro estudio realizado por Ojeda-Benitez et al. (2003) en Mexicali, determinó la cantidad y composición de los residuos reciclables y no reciclables generados en hogares de una colonia de la ciudad. Los resultados identifican los materiales con posibilidad de reciclar. En general estos estudios muestran la cuantificación de los residuos y se vislumbra a futuro la posibilidad de tratamiento para los residuos generados.

En un estudio realizado por Dahlén y Lagerkvist (2008) mencionan los diferentes métodos de caracterización de residuos, indicando que no hay un método estandarizado. Además, muestran el procedimiento general en la mayoría de los métodos para estudios en la composición de los residuos y recomiendan el análisis de los residuos generados en cada vivienda. Consideran la variación estacional de los residuos generados, obtener muestras de al menos una semana y el número de muestra de diez si el tamaño de la muestra es de 100 kg o mayor.

### ***1.5.2 Análisis de Ciclo de Vida***

La manera de evaluar ambientalmente la generación de residuos, es aplicando la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV). El ACV, de acuerdo a la Norma ISO 14044 (ISO 14044, 2006) es una metodología para evaluar el impacto ambiental de productos o servicios considerando todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final.

En la década de los sesenta se inicia con estudios sobre la cuantificación de materiales y de energía implicados en los impactos ambientales. Hunt et al. (1992) presentó un diagrama completo del análisis del ciclo de vida para un producto. Afirmando de que se requiere cuantificar la energía y las emisiones del ACV del producto o proceso, para ser usadas en la reducción de recursos y emisiones. Recomiendan el uso del ACV en la industria o el gobierno en la toma de decisiones para hacer cambios en un proceso o sistema para la reducción de recursos o emisiones. Además afirman que el ACV es un análisis comparativo entre productos y sistemas similares.

Posteriormente, Barton et al. (1996) aplican el ACV a la gestión de residuos y mencionan en su estudio el desarrollo de una metodología general, para identificar las cargas para la etapa del inventario del ciclo de vida. Sin embargo, la variedad de procesos y el hecho de que esta etapa considera los materiales, productos y residuos generados; sugieren la necesidad de bases de datos y el desarrollo de una herramienta de fácil empleo.

El estudio desarrollado por Rieradevall et al. (1997) presenta los resultados de la aplicación del ACV a los residuos sólidos generados en los hogares y llevados al vertedero. Indica que las emisiones derivadas de la biodegradación en el vertedero contribuyen a los impactos de calentamiento global y a la eutrofización, mientras que el transporte contribuye principalmente a la acidificación y a la toxicidad humana.

Una herramienta desarrollada por Camobreco et al. (1999) para la fase de inventario del ciclo de vida, evalúa un vertedero moderno (con recolección de gases y lixiviados). Estos investigadores evaluaron el ciclo de vida del vertedero desde la construcción, operación, cierre y atención post-clausura. Además, consideraron en sus resultados las emisiones asociados con el consumo de combustible y las emisiones de gas durante las diferentes etapas del vertedero.

Clift et al. (2000) insisten en la importancia de la elección concreta de los límites del sistema para la gestión integral de los residuos incluyendo la recolección, transporte, disposición en el vertedero. Además, recomienda definir los límites del sistema claramente

para asegurar que los créditos ambientales por la recuperación de energía y materiales sean correctamente evaluados.

En Chihuahua no se tienen información sobre la aplicación del ciclo de vida para la evaluación de la gestión de residuos; sin embargo hay un estudio realizado por Sojo A. (2001) donde presenta un análisis comparativo de la gestión de residuos sólidos urbanos en los municipios de Puebla (México) y Barcelona (España), bajo criterios ambientales y financieros. Este estudio presenta los resultados ambientales obtenidos del ACV en la gestión de residuos sólidos para cada ciudad. En Puebla el 100% de los residuos sólidos se depositan en el vertedero y en Barcelona el 80%, el 14% se incineran y el 6% se recicla. Se presenta la comparación de los impactos ambientales entre las dos ciudades, mostrando mayor impacto ambiental para Puebla en las categorías de calentamiento global, acidificación, ecotoxicidad y fotooxidación química y para Barcelona mayor impacto ambiental en las categorías de destrucción de la capa de ozono, toxicidad humana y eutrofización. En las dos ciudades se presenta un impacto ambiental adverso para las categorías analizadas; sin embargo, la disminución de la cantidad de residuos sólidos depositados en el vertedero, disminuye el impacto en el calentamiento global.

Morrissey y Browne (2004) presentan los modelos de herramientas usados para hacer decisiones en el área de la gestión de residuos municipales. Identifican los modelos basados en el análisis costo-beneficio, los del inventario de ciclo de vida y aquellos basados en toma de decisiones por multicriterios. Afirman que los modelos recientes se enfocan en el concepto de gestión de residuos sostenible y que tienen limitaciones. También indican que los modelos analizados no consideran juntos los aspectos ambientales, económicos y sociales.

Últimamente Den Boer et al. (2007) presentan la aplicación de la herramienta desarrollada para evaluar el ciclo de vida de la gestión integral de residuos, en ciudades con rápido crecimiento, teniendo en cuenta aspectos ambientales, económicos y sociales. Presenta varios escenarios, considerando el ACV desde el almacenamiento temporal, recolección-transporte y tratamiento.

## **1.6 Justificación del estudio**

La generación de residuos aumenta al incrementar la población. La disposición adecuada y segura de estos residuos es responsabilidad de los gobiernos. Para ello se han elaborado leyes, como la Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2003) para establecer un sistema de gestión integral de residuos. La implementación de este sistema requiere un estudio de las alternativas viables. Un sistema de gestión integral de residuos se

compone de las etapas de almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición. El estudio y cálculo de cada una de estas etapas depende en gran medida de la cantidad y composición de los residuos tratados.

La ciudad de Chihuahua no cuenta con datos de caracterización de residuos, cantidad de residuos generados en los hogares, cuantificación de fracciones o cantidad de fracciones depositadas en el vertedero, etc. Es por tanto necesario realizar esta caracterización. En este aspecto los estudios realizados y revisados anteriormente por Abu Qdais et al. (1997), Bernache-Perez et al. (2001), Buenrostro et al. (2001a), Ojeda-Benitez, et al. (2003) y Bolaane y Ali (2004) proponen la metodología para llevarlo a cabo. Una vez caracterizados los residuos, será necesario considerar las tecnologías existentes más adecuadas para las distintas etapas del sistema de gestión de residuos de manera que se puedan seleccionar las combinaciones de estos que mejor sirvan al objetivo del estudio; la consecuencia del sistema de gestión de residuos urbanos ambientalmente más correcto.

La metodología de ACV servirá para evaluar el sistema propuesto de gestión de residuos. Varios estudios sobre ACV aplicados a los residuos se han desarrollado, como el realizado por Barton et al. (1996) sobre la elección correcta del límite del sistema; el empleo de herramientas para realizar el inventario de ciclo de vida (Camobreco et al., 1999). Otro estudio realizado por Clift et al. (2000) considera el límite del sistema desde la recolección de residuos, transporte y la disposición final. También Morrissey y Browne (2004) descubren varias herramientas desarrolladas para la evaluación del sistema integral de residuos.

La herramienta LCA-IWM facilita el análisis desde los aspectos ambientales, económicos y sociales (Den Boer et al., 2005). Esta herramienta es la escogida para evaluar el sistema de la gestión integral de residuos en la ciudad de Chihuahua, considerando los cambios correspondientes para adecuarla a la ciudad.

## **1.7 Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo es la identificación del sistema óptimo de gestión de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Chihuahua, basado en el análisis de ciclo de vida.

El logro de este objetivo general se traduce en alcanzar los siguientes objetivos específicos.

### ***1.7.1 Caracterización de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Chihuahua***

Objetivos específicos:

- Caracterizar los residuos sólidos urbanos en tres sectores de la ciudad con diferente nivel socioeconómico.
- Caracterizar los residuos generados estacionalmente: durante tres temporadas del año, una semana en abril (cambio de temporada), otra semana en agosto (altas temperaturas) y otra semana en enero (bajas temperaturas).
- Identificar la tendencia estacional y por niveles socioeconómicos de la generación de residuos.

### ***1.7.2 Evaluación ambiental del sistema de gestión de residuos sólidos***

Objetivos específicos:

- Evaluar ambientalmente el escenario actual de gestión de residuos en Chihuahua, considerando el límite del sistema desde el almacenamiento temporal, recolección-transporte y tratamiento o disposición final.
- Evaluar ambientalmente las diferentes maneras de almacenamiento temporal, recolección-transporte y los tratamientos aplicados a los residuos sólidos.
- Evaluar cuatro escenarios diferentes de gestión de residuos, considerando los aspectos ambientales.

## **CAPÍTULO 2**

# **CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## Capítulo 2

### CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

#### Índice

2.1 Introducción .....	15
2.2 Principales parámetros de la caracterización de los residuos sólidos urbanos .....	15
2.3 Descripción del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos.....	16
2.4 Metodología aplicada para la caracterización de residuos sólidos urbanos .....	17
2.4.1 Clasificación de la población por niveles socioeconómicos .....	17
2.4.2 Selección de la colonia para la recolección de los residuos sólidos urbanos .....	18
2.4.3 Determinación del número de muestras .....	19
2.4.4 Recolección de muestras .....	20
2.4.5 Clasificación y cuantificación de fracciones .....	23
2.5 Análisis de resultados de la caracterización de residuos sólidos urbanos .....	24
2.5.1 Residuos sólidos urbanos generados en Chihuahua .....	24
2.5.2 Caracterización de los residuos sólidos urbanos .....	27
2.5.3 Comparación de fracciones de residuos sólidos urbanos generados en Chihuahua con otras ciudades .....	28

#### Resumen

En este capítulo se presenta los resultados de la caracterización de los residuos sólidos urbanos en Chihuahua. Se estudio la influencia socioeconómica y estacional de la generación de los RSU en Chihuahua.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## 2.1 Introducción

La caracterización de residuos sólidos es primordial para determinar las diferentes fracciones con probabilidad de tratamiento. Según los puntos de vista del 5º taller de trabajo de la AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) de ACV para la Región Asia Pacífico (LCA for Asia Pacific Region) (Inaba et al., 2007), la gestión de residuos de cada país debe ser establecida desde los siguientes puntos de vista:

- Tecnología: la infraestructura depende de los residuos a tratar (caracterización de los residuos).
- Aspectos sociales: comportamiento del consumidor, densidad poblacional y economía.
- Regulaciones: reducir, reusar y reciclar.

Conforme a lo referido anteriormente, la caracterización de los residuos sólidos urbanos (RSU) es el punto de partida para implementar un tratamiento a los residuos. Además la carencia de información sobre los mismos en el departamento de Aseo Urbano Municipal de Chihuahua da lugar para realizar este trabajo.

El objetivo principal, de este capítulo, es la caracterización de los RSU generados en hogares de la ciudad de Chihuahua en tres niveles socioeconómicos y durante tres épocas del año.

## 2.2 Principales parámetros de la caracterización de los residuos sólidos urbanos

Este estudio se inició con la solicitud de permiso y la presentación de la **propuesta de trabajo** al Departamento de Aseo Urbano Municipal de Chihuahua. Como parte del trabajo de este estudio se elaboró la propuesta que consta en el Anexo I. En ella se describe la metodología a aplicar, los formatos para registro de datos y la clasificación detallada de los residuos. Este documento se ha basado en las normas mexicanas, referenciadas en el mismo Anexo I.

Los parámetros considerados en el estudio son el **nivel socioeconómico** y la **temporada del año**. Los niveles socioeconómicos seleccionados han sido los siguientes:

- Nivel I, 1 a 2 salarios mínimos (nivel socioeconómico más bajo),
- Nivel II, de 2 a 5 salarios mínimos y
- Nivel III, de más de 5 salarios (nivel socioeconómico más alto).

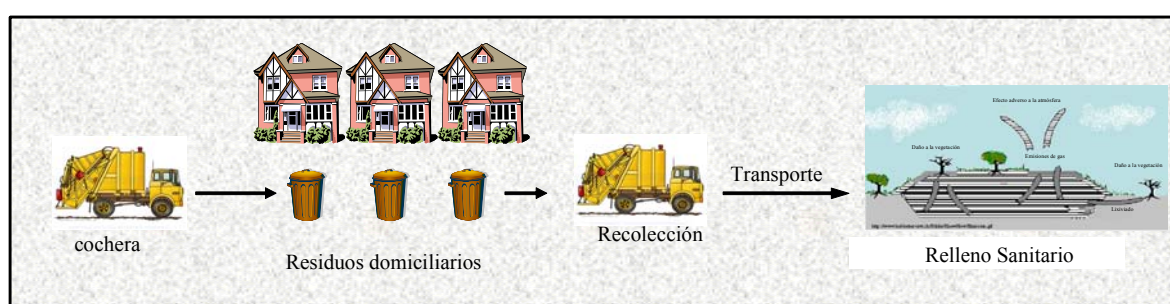
Las estaciones del año estudiadas han sido:

- Una semana en abril de 2006, cambio de temporada (primavera),

- Otra en agosto del mismo año, temperaturas altas (verano) y
- Una última en enero del 2007, temperaturas bajas (invierno), representando tres épocas estacionales bien diferenciadas.

### 2.3 Descripción del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos

La producción de residuos sólidos urbanos (RSU) generados en la ciudad de Chihuahua es aproximadamente de 1,000 toneladas diarias, durante el tiempo de este estudio. El 46% de estos residuos son generados en las viviendas de la ciudad de Chihuahua (Martínez R., 2006). El sistema de recolección de la Ciudad de Chihuahua se presenta en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Sistema de **recolección-transporte** de residuos en la ciudad de Chihuahua.

Los camiones salen de la cochera para la **recolección de los residuos**. Los operadores de servicio tienen la función de recolectar los residuos no peligrosos en los domicilios de la ruta asignada (RLMCh, 2007). La disposición final de los residuos sólidos urbanos es en el **relleno sanitario**. El término “landfill sanitary” o relleno sanitario fue usado por primera vez en 1935 en los Estados Unidos de América (Díaz L., 2006). Los autores Tchobanoglous y Kreith (2002) se refieren al relleno sanitario como término usado antiguamente donde se colocaban los residuos y al final de día se cubrían. También menciona que actualmente el relleno sanitario se refiere a una instalación de ingeniería para la disposición de los residuos sólidos urbanos diseñada y operada para disminuir daños a la salud pública e impacto ambiental. Esta definición concuerda con la empleada en la NOM-83-SEMARNAT-2003 y definida como una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicionales los impactos ambientales.

El relleno sanitario se encuentra ubicado al noreste de la ciudad en un área de 48 hectáreas, con capacidad de 6.5 millones de toneladas (SCS Engineers, 2005). Tiene 15 años de operación y estiman las autoridades municipales que tiene capacidad para recibir residuos por otros 8 a 10 años más (Martínez R., 2006).

En Chihuahua no existe actualmente un sistema de separación selectiva de residuos. Sin embargo existen los llamados pepenadores que realizan esta función, ya que separan los materiales susceptibles de venta de los residuos desde que se colocan en la acera de las banquetas, al depositarse en el camión recolector y cuando los residuos se depositan en el relleno sanitario. Esta acción disminuye la cantidad de RSU que se llevan al relleno sanitario, a su vez las fracciones separadas por los pepenadores se llevan a sitios de recepción establecidos. Dado que no existen datos relativos a esta actividad, actualmente se desconocen las cantidades de fracciones separadas que no llegan al relleno sanitario.

## **2.4 Metodología aplicada para la caracterización de los residuos sólidos urbanos**

La metodología seleccionada para realizar este estudio consistió en recoger los residuos sólidos directamente en los hogares donde se generaron. Este sistema es uno de los métodos básicos empleados en la caracterización de los residuos sólidos (Tchobanoglous y Kreith, 2002). Para la caracterización de los mencionados residuos se han seguido las etapas que a continuación se mencionan:

- Clasificación de la población por niveles socioeconómicos
- Selección de la colonia para la colección de muestras
- Determinación del número de muestras
- Recolección de muestras
- Clasificación y cuantificación de fracciones
- Análisis de resultados

### ***2.4.1 Clasificación de la población por niveles socioeconómicos***

La Municipio de Chihuahua tiene una población de 758,791 habitantes, según el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2005b) con 194,562 hogares y 525 colonias según el Sistema para la Consulta de la Información Censal (SCINCE) por Colonias 2000, editado por INEGI. La mayor actividad económica es en el sector secundario y terciario. Según SCINCE por Colonias 2000, el 37% de la población de la ciudad de Chihuahua es económicamente activa. El INEGI ordena la población en rango de salarios mínimos. Dentro de la población activa, se distinguen varios rangos de salarios mínimos. En este estudio se ha clasificado la población de acuerdo al **rango de ingresos** percibidos. El salario mínimo para la ciudad de Chihuahua en el 2007 era de 47.60 pesos mexicanos, equivalente a 4.30 dólares por día (INEGI, 2007a). La Tabla 2.1 muestra el rango de salarios mínimos y la clasificación por niveles asignados. El 3% de la población activa percibe un salario mínimo y fue catalogado como nivel 0, los que perciben de 1 a 2 salarios se

clasificaron como nivel I, los que perciben de 2 a 5 salarios son el nivel II y los residentes que perciben más de 5 salarios se clasificaron como nivel III. En este estudio se consideraron los niveles socioeconómicos I, II y III. El nivel 0 no se tomó en cuenta debido a que esta población es inestable, usualmente cambian de trabajo o emigran a los Estados Unidos de América.

**Tabla 2.1.** Clasificación por nivel de acuerdo al rango de salario mínimo para la población económicamente activa en Chihuahua.

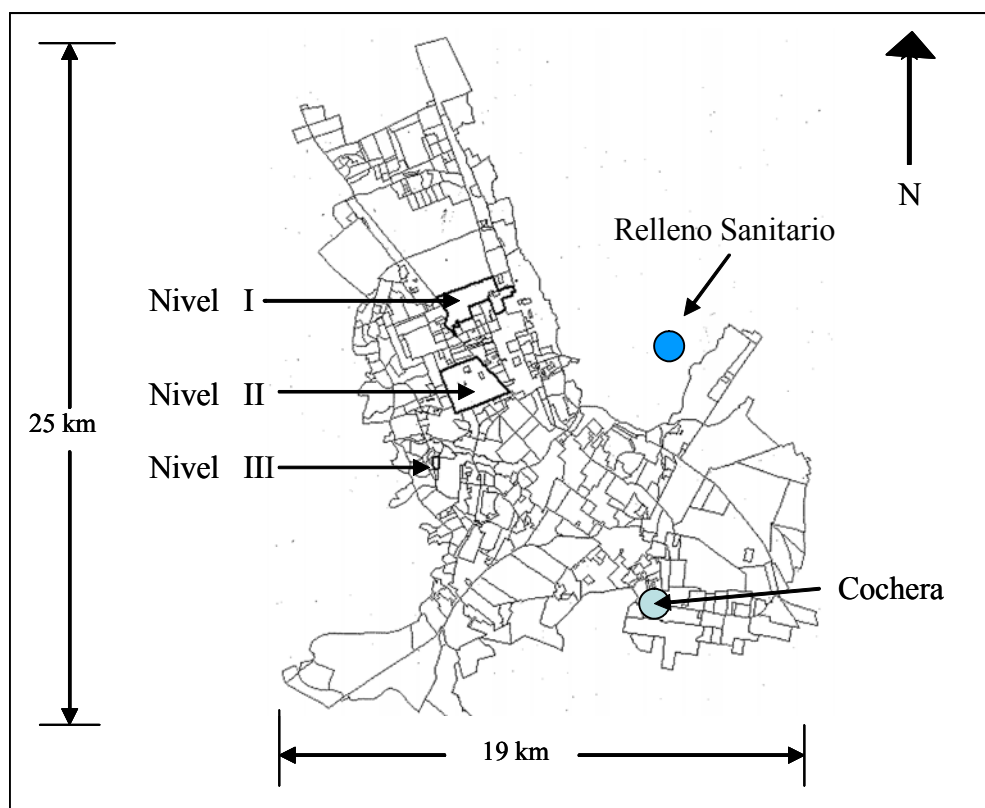
Rango de salario mínimo <sup>[1]</sup>	Población <sup>[1]</sup> (%)	Nivel (clasificación propia)
1 salario	3	0
1-2 salarios	19	I
2-5 salarios	54	II
> 5 salarios	24	III

[1] (SCINCE por Colonia 2000). Salario mínimo 47.6 pesos mexicanos equivalente a 4.30 dólares en el 2007.

#### ***2.4.2 Selección de la colonia para la recolección de residuos sólidos***

La selección de las colonias para proceder a la caracterización de los RSU se realizó aplicando los datos obtenidos de SCINCE. Este sistema permite localizar las colonias en un plano de la ciudad y contiene información estadística de cada colonia.

La selección de las colonias para realizar el estudio fue de acuerdo al mayor porcentaje de residentes que perciben el rango de salarios mínimos requerido para el estudio. Se consideraron las colonias de más **fácil acceso** y la **disposición** de los residentes para participar en reunir los residuos generados en su hogar. La Figura 2.2 muestra un plano de la ciudad de Chihuahua y la ubicación de las colonias seleccionadas para el estudio, por nivel socioeconómico. Además muestra la ubicación del relleno sanitario y la distancia aproximada de longitud de la ciudad.



**Figura 2.2** Plano de la ciudad de Chihuahua con detalle de las colonias estudiadas con diferente nivel socioeconómico.

### 2.4.3 Determinación del número de muestras

Los residuos sólidos son un material heterogéneo y, la cantidad generada y su composición, varía de lugar a lugar y de temporada a temporada (World Resources Institute, 1996, Gidaracos et al., 2006). Debido a la heterogeneidad y variabilidad de los RSU es necesario realizar un diseño estadístico que permita estimar la cantidad de muestras a analizar. Desde el punto de vista estadístico la exactitud para determinar esos parámetros aumentará al incrementar el número de muestras a analizar. Por otro lado el número de muestras debe ser adecuado a los recursos existentes.

El método aplicado es similar al reportado por Abu Qdais et al. (1997) y Gómez et al., (2008), basado en el **teorema del límite central** (Jonson y Kuby, 1999), con la hipótesis de que la composición de las muestras sigue una distribución normal. La muestra fue estimada con un 99% de intervalo de confianza y con un 10% de error del valor medio. La ecuación aplicada es:

$$n = [z \sigma / R]^2 \quad \text{donde}$$

$n$  = mínimo número de muestras

$z$  = dato estadístico para la  $t$  de Student de las tablas de distribución normal

$\sigma$  = desviación estándar de la población la cual es igual a la desviación estándar a la muestra preliminar

R = error de muestreo

El mínimo número de muestras necesarias para un 99% de intervalo de confianza con un 10% de error del valor medio fue de 155 para el nivel I, 156 para nivel II y de 115 para el nivel III.

#### **2.4.4 Recolección de muestras**

La recolección de los RSU en Chihuahua fue realizada por un grupo de nueve personas, seis alumnos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua y tres personas del departamento de Aseo Urbano Municipal de Chihuahua. Este grupo de personas cuentan con formación académica en el área ambiental y conocimiento sobre la caracterización de los residuos. Se hicieron tres equipos de trabajo, formados cada uno por dos alumnos y una persona del departamento de aseo urbano. Cada equipo se encargó de la recolección de residuos en una colonia.

El método usado para la recolección de muestras se basó principalmente en las normas mexicanas, NMX-AA-022-1985, NMX-AA-061-1985, NMX-AA-091-1987; además el procedimiento usado en Bernache-Pérez et al. (2001) y en Gómez et al. (2008). La forma de realizar este estudio consistió en:

- Presentar la invitación de participación en la caracterización de residuos en los hogares,
- Recolección de residuos en los hogares durante una semana bajo una previa indicación de normas,
- Traslado de los residuos para la separación y clasificación y
- Cuantificación de las fracciones

El procedimiento detallado se presenta a continuación:

Los hogares de las colonias seleccionadas fueron previamente invitados a participar en el proyecto de caracterización de los residuos. Esta invitación se realizó en cada temporada procurando que los hogares participantes fueran los mismos para las tres temporadas. En cada colonia, se visitaron al azar de 33 a 35 domicilios. La **invitación**, presentada en el Anexo II, se propuso a las personas responsables del hogar para hacer el compromiso de reunir los residuos generados. Esta invitación indicaba que la recolección se realizaría ocho días consecutivos y que los residuos producidos durante 24 horas se depositaría en la bolsa negra de polietileno proporcionada con anterioridad. Esta bolsa estaba marcada con un código único

de cinco dígitos para cada hogar. La bolsa se recogió cada día por la mañana y se entregó otra bolsa vacía. Además se les solicitó que los residuos del sanitario (papel sanitario, pañales y toallas sanitarias) se depositaran en una bolsa de polietileno aparte y posteriormente la depositaran dentro de la bolsa negra asignada.

Las familias que no entregaron los residuos cada día se eliminaron del programa. De los 33 hogares en promedio que aceptaron participar disminuyeron entre un 15 a 36%. A lo largo del estudio se realizó la recolección de las muestras casa por casa para evitar que los pepenadores sacaran los materiales para venta.

En la mañana del primer día de la semana, se inició la recolección de los residuos sólidos urbanos (RSU); estos se desecharon para asegurar que los residuos recolectados fueran de 24 horas. El segundo día, las bolsas con los residuos generados (durante 24 horas) se recolectaron y se transportaron en un camión a un espacio cerrado. Los residuos colectados se procesaron en las tres horas siguientes a la recolección. Las bolsas con los residuos recolectados se pesaron individualmente y se vaciaron sobre una mesa para separar los diferentes materiales. Durante el proceso de separación, si se encontraba un recipiente con líquido se drenaba y las bolsas se vaciaban para clasificar las correspondientes fracciones. Las fracciones separadas se pesaron, registrando la cantidad de cada fracción separada. La Tabla 2.2 muestra el número de familias que participaron con la cantidad correspondiente de residuos generados por época del año y nivel.

**Tabla 2.2.** Cantidad de residuos sólidos urbanos generados por las familias de los tres niveles socioeconómicos durante las tres temporadas.

Número hogares	Nivel I						Nivel II						Nivel III					
	Abril		Agosto		Enero		Abril		Agosto		Enero		Abril		Agosto		Enero	
Número residente	Muestra kg	Número residente	Muestra kg	Número residente	Muestra kg	Número residente	Muestra kg	Número residente	Muestra kg	Número residente	Muestra kg	Número residente	Muestra kg	Número residente	Muestra kg	Número residente	Muestra kg	
1	3	27.3	3	12.0	4	23.1	5	27.4	2	17.4	4	8.8	5	13.9	5	17.2	4	17.6
2	2	2.2	4	19.4	2	6.2	4	18.5	2	18.8	5	9.2	4	20.0	3	24.3	5	8.5
3	4	17.8	4	13.5	6	10.3	2	10.2	4	28.9	3	16.2	4	17.4	5	19.9	4	17.4
4	2	29.5	7	16.8	4	15.9	4	21.7	2	21.9	4	23.4	5	31.5	3	19.2	5	10.0
5	2	6.9	3	4.1	5	9.9	4	20.4	2	9.4	5	9.4	4	15.4	5	49.4	4	18.6
6	4	10.5	7	33.4	7	17.4	4	35.2	6	9.9	5	11.6	5	57.3	3	15.2	5	13.3
7	4	4.4	2	11.0	4	16.2	5	22.5	5	19.5	4	21.4	4	24.2	5	26.2	4	12.8
8	4	11.1	5	15.4	4	21.9	4	13.7	2	19.5	3	20.1	6	37.0	5	12.2	2	18.7
9	6	8	8	20.6	5	13.1	2	8.9	5	20.9	7	20.8	4	13.4	5	41.0	5	18.2
10	2	18.7	4	19.4	2	4.7	6	19.7	3	11.5	4	16.0	5	20.3	4	18.6	4	11.7
11	2	19.2	5	17.2	2	12.2	1	5.4	3	20.9	5	19.6	5	17.4	4	9.4	2	7.8
12	5	27.2	4	9.6	4	6.4	3	14.9	5	20.9	4	16.6	5	38.6	5	17.4	5	14.0
13	5	8.6	4	11.6	5	8.1	2	6.3	4	17.3	4	20.7	4	8.8	4	17.3	5	24.2
14	8	25.5	4	11.2	6	16.6	3	16.9	3	11.4	7	16.6	5	15.0	4	23.3	4	7.6
15	4	15.8	7	5.0	3	5.8	2	35.6	5	21.1	2	16.5	6	21.4	6	21.6	5	7.4
16	5	14	2	8.6	1	10.9	4	21.5	4	15.5	3	8.1	6	14.5	4	13.3	3	13.3
17	2	14.3	1	3.8	4	21.2	6	13.5	6	13.7	3	17.3	3	20.0	3	18.2	6	16.2
18	3	18.7	3	26.8	5	23.8	4	17.5	3	15.3	3	20.4	5	26.8	4	12.2	5	14.9
19	4	15	5	13.8	6	9.4	5	19.6	2	8.9	6	22.9	5	11.0	3	29.4	5	34.7
20	3	11.8	3	12.0	2	4.8	4	16.9	6	16.5	4	24.0	5	32.2	4	22.0	5	11.2
21	4	15.7	4	13.6	4	7.4	4	33.7	1	4.6	6	17.5	4	15.8	4	10.6	7	17.8
22	2	20.2	2	35.4			5	21.4	3	10.6	4	8.2	5	19.6	3	13.0	2	9.1
23	3	15.7	3	20.6			4	13.4	2	12.4	5	12.6	4	22.8	6	23.5	2	8.7
24	4	7.2	4	14.6			3	17.5	3	13.3	1	15.2	5	19.1	7	13.2	2	30.5
25			4	14.4			6	16.4	4	20.6	5	29.6	3	46.5			5	6.4
26			5	9.6			3	13.8	7	16.2	3	12.7	5	40.2			7	22.6
27			6	30.4			2	9.3	3	15.1	3	16.6					4	16.9
28			6	11.2			1	16.3	3	9.5	2	19.8					5	20.2
29							4	10.7	3	13.1	5	4.1						
30							3	13	4	20.1	3	11.2						
<b>Total</b>	<b>87</b>	<b>365</b>	<b>119</b>	<b>435</b>	<b>85</b>	<b>265</b>	<b>109</b>	<b>532</b>	<b>107</b>	<b>476</b>	<b>122</b>	<b>487</b>	<b>121</b>	<b>620</b>	<b>104</b>	<b>488</b>	<b>121</b>	<b>430</b>
Muestras recolectadas semana	168		196		147		210		210		210		182		168		196	

### **2.4.5 Clasificación y cuantificación de fracciones**

Los RSU se clasificaron en quince fracciones, considerando la composición de cada uno como se aprecia en la Tabla 2.3. La separación se realizó en base a las fracciones que se encontraron en mayor cantidad y las más comúnmente reportadas en referencias bibliográficas. Al final de la separación las fracciones se pesaron por separado, en una báscula digital calibrada.

**Tabla 2.3.** Composición de las fracciones separadas.

<b>Fracción</b>	<b>Componentes</b>
Orgánica	Alimentos, excremento de animales, residuos de jardín
Papel	Papel de oficina, notas comerciales y recibos, tetrapak para leche y extracto de frutas
Periódicos y revistas	Periódicos y revistas
Cartón	Cajas de cartón, cartón corrugado, contenedores para huevos, material de empaque
Plástico	Bolsa de polietileno, recipientes y envases de alimentos, PS
Recipientes de plástico	PET, HDPE, LDPE, PVC, PP *
Metal	Material ferroso y no ferroso, papel aluminio y bolsas metálicas
Aluminio	Latas de aluminio
Vidrio claro	Recipientes para alimentos
Vidrio de color	Recipientes de cerveza, extracto de frutas, licor, vino, alimentos
Residuos finos	Tierra de jardín, tierra y pequeños residuos
Fibra vegetal	Material usado en aparatos de aire acondicionado
Fibra sintética	Material usado en limpieza, soga, malla sintética
Batería	Batería tipo AA o AAA
Otros	Residuos sanitarios, pequeños juguetes, zapatos, algodón, textiles, cabello humano, pequeños materiales de construcción

\* PET = Tereftalato de polietileno, HDPE = Polietileno de alta densidad, LDPE = Polietileno de baja densidad, PVC = Policloruro de vinilo, PP = Polipropileno

El procedimiento fue el mismo para los residuos colectados durante los seis días siguientes (en total siete días de separación y cuantificación). Este método fue aplicado en cada nivel socioeconómico y para las tres épocas del año: una semana en abril 2006 (cambio de temporada), una semana en agosto 2006 (temperatura alta) y una semana en enero 2007 (temperatura baja). La Figura 2.3 muestra fotografías de las fracciones separadas.



**Figura 2.3.** Fracciones separadas de la clasificación de los residuos sólidos urbanos.

## 2.5 Análisis de resultados de la caracterización de residuos sólidos urbanos

Se presentan los resultados de los

- Residuos generados en Chihuahua,
- Caracterización de los RSU y la
- Comparación de residuos generados con otras ciudades.

### 2.5.1 Residuos sólidos generados en Chihuahua

En los resultados presentados en la Tabla 2.2 se muestran las cantidades de los RSU recolectados para cada nivel socioeconómico y para cada temporada en cada hogar. Respectivamente para cada nivel el número total de hogares, para las tres estaciones, es de 73, 90 y 78, el número de residentes totales es de 291, 338 y 346, la cantidad de residuos totales generados es de 1,065 kg, 1,495 kg y 1,538 kg y el número de muestras recolectadas 511, 630 y 546 totales para las tres estaciones estudiadas. Se recolectaron en todo el estudio un total de **1,687 muestras**, correspondiendo a **4,098 kg de residuos** sólidos urbanos producidos, generados por 975 residentes. La cantidad promedio per cápita de RSU generados fue de **0.523, 0.634 y 0.637 kg per cápita<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>** para los **niveles I, II y III** respectivamente, para las **tres temporadas** de estudio realizado en los **hogares de la ciudad de Chihuahua**.

El número de residentes y generación de residuos es mayor para el nivel III que para el nivel I y II. Se presenta **mayor generación de residuos** en el mes de **abril** para los tres niveles. La Tabla 2.4 presenta los resultados en  $\text{kg cápita}^{-1} \text{ día}^{-1}$  de cada una de las fracciones obtenidas de cada nivel durante las tres temporadas y los tres niveles socioeconómicos.

**Tabla 2.4.** Cantidad ( $\text{kg cápita}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) de cada fracción en los tres niveles socioeconómicos y en las tres temporadas del año para la ciudad de Chihuahua.

Fracción	Nivel I			Nivel II			Nivel III		
	Abril	Agosto	Enero	Abril	Agosto	Enero	Abril	Agosto	Enero
Orgánica	0.283	0.215	0.181	0.334	0.301	0.296	0.356	0.286	0.212
Papel	0.054	0.020	0.016	0.062	0.022	0.021	0.060	0.034	0.025
Periódicos y revistas	0.013	0.032	0.008	0.039	0.058	0.053	0.047	0.068	0.037
Cartón	0.015	0.023	0.027	0.013	0.031	0.031	0.023	0.033	0.039
Metal	0.016	0.016	0.011	0.011	0.015	0.015	0.012	0.019	0.006
Aluminio	0.002	0.006	0.004	0.006	0.005	0.005	0.002	0.008	0.005
Vidrio claro	0.038	0.021	0.021	0.024	0.025	0.025	0.031	0.028	0.014
Vidrio de color	0.003	0.002	0.009	0.007	0.002	0.005	0.010	0.013	0.009
Plástico	0.051	0.030	0.056	0.054	0.035	0.066	0.054	0.043	0.058
Recipientes plásticos	0.023	0.050	0.014	0.029	0.034	0.014	0.030	0.033	0.019
Fibra vegetal	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000
Fibra sintética	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
Baterías	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Residuos finos	0.006	0.004	0.029	0.013	0.010	0.008	0.012	0.009	0.003
Misceláneos	0.095	0.101	0.070	0.093	0.095	0.030	0.075	0.096	0.078
<b>kg cápita<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup></b>	<b>0.599</b>	<b>0.522</b>	<b>0.446</b>	<b>0.697</b>	<b>0.634</b>	<b>0.570</b>	<b>0.732</b>	<b>0.670</b>	<b>0.508</b>

La **fracción orgánica** fue la que se generó en **mayor cantidad** en los tres niveles, principalmente en el mes de abril. Durante el mes de agosto y enero esta fracción disminuyó, en los tres niveles. El nivel II presentó una mayor cantidad de residuos orgánicos en la temporada de altas temperaturas (agosto) debido a la cantidad de residuos de cáscaras de frutas y alimentos sin consumir. El nivel III (mayor ingreso económico) presentó mayor desecho de productos sin consumir en los que se ha vencido la fecha de caducidad; además, productos alimenticios preparados comercialmente y no consumidos.

En la recolección de los tres niveles, la fracción de **periódicos y revistas** presenta una mayor cantidad per cápita en agosto, debido probablemente a que en esta temporada hay un periodo de vacaciones y la población dispone de más tiempo libre, por tanto para leer.

El nivel III (mayor ingreso económico) presenta una mayor cantidad de cartón. Se observó que desecha mayor cantidad de este material utilizado en empaque de diversos productos. Este nivel tiene mayor poder adquisitivo que les permite comprar más variedad de productos empacados en cartón.

La fracción de recipientes de **plástico** se presenta en mayor cantidad en la temporada de **agosto**, para los tres niveles. Las temperaturas altas se relacionan con el consumo de de

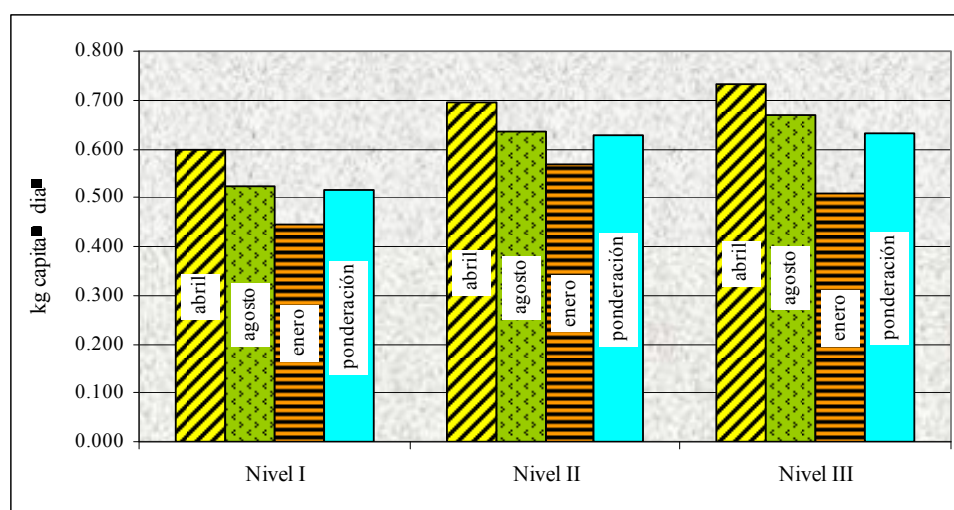
productos líquidos para beber, contenidos en recipientes de plástico (agua, extracto de frutas, productos lácteos, bebidas con sabores artificiales, etc.). Otras de las fracciones que están relacionadas con recipientes que contienen líquidos y temperaturas altas es la fracción de papel. En esta fracción se clasificaron materiales compuestos como tetrapak, usados principalmente para envasar productos lácteos y extractos de frutas. Se observa una mayor cantidad de este material en abril y agosto, cuando las temperaturas son más altas.

En la Tabla 2.4, se observa también una importante generación de **fibra vegetal**, durante el mes de **abril**. Es en este tiempo cuando empieza a hacer calor y en forma intensiva se cambian los filtros de los aparatos de aire acondicionado compuestos mayoritariamente por este material. Los niveles II y III con mayor capacidad adquisitiva para disponer de sistemas de climatización, muestran la mayor generación de fibra vegetal. Esta fracción sólo se presenta en esta temporada. La cantidad de baterías que se recolectó es de 100 a 300 g en cada temporada, por ser una cantidad pequeña no se registra un valor significativo en la cantidad per cápita. Actualmente no existe un sistema de recolección selectiva para estas, así que se desechan junto con las otras fracciones. En cuanto a la fracción de misceláneos que incluye textiles y zapatos, la cantidad colectada fue mínima. Estos productos generalmente se regalan o se venden como productos de segunda mano. Los residuos voluminosos como muebles, equipos eléctricos, electrónicos, etc., no se consideran en este estudio ya que estos son recogidos en días designados por el departamento de Aseo Urbano. Este material se transporta al relleno sanitario, ahí son desarmados por los pepenadores, para venderse por separado.

La Figura 2.4 presenta gráficamente los resultados de la Tabla 2.4, se observa claramente como el **nivel I** (el de menor ingreso) generó **menos cantidad de residuos** en comparación con los niveles II y III, para las temporadas estudiadas. Además, en **enero**, cuando la temperatura es baja, la cantidad de **residuos disminuye en los tres niveles**. Esto probablemente es debido a la disminución de materia orgánica de envases en el período de baja temperatura, tal como se muestra en la Tabla 2.4 para los valores de enero para esas fracciones. La tendencia de mayor generación de residuos al aumentar el nivel socioeconómico, es una constante en los países de rápido crecimiento económico, corroborado por los estudios realizados por Abu Qdais et al. (1997) en Abu Dhabi y Buenrostro et al. (2001a) en Morelia. Esto mismo es constatado por Zeng et al. (2005) al concluir que la composición de los residuos varía con el área geográfica y la época de año.

Los valores anuales promedio de composición de los RSU per cápita se calcularon considerando una media ponderada en la que los resultados del mes de abril, eran representativos de los tres meses de clima templado (marzo, abril y octubre con temperaturas

mínimas de 8-12°C y máximas de 23-27°C). Por otra parte, las medidas del mes de agosto se consideraron que representaban los cinco meses con temperaturas altas (mayo, junio, julio agosto y septiembre con temperaturas mínimas de 16-20°C y máximas de 29-34°C) y los resultados de enero, representativos de los cuatro meses con bajas temperaturas (enero, febrero, noviembre y diciembre con temperaturas mínimas de 3-6°C y máximos de 18-20°C) (msn.com, 2007). Además, se consideró en la ponderación los niveles económicos de forma que la cantidad de cada fracción se corresponda con la población relativa de los niveles I, II y III en la ciudad de Chihuahua.

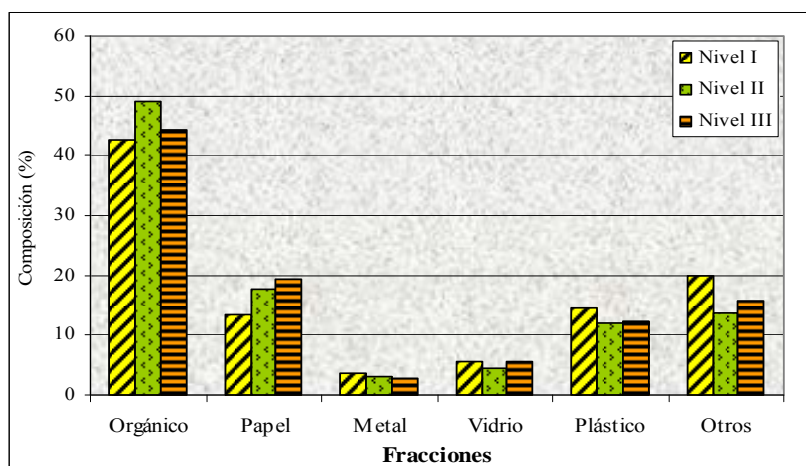


**Figura 2.4.** Cantidad de residuos sólidos urbanos de los niveles socioeconómicos durante las tres temporadas.

### 2.5.2 Caracterización de los residuos sólidos urbanos

Para poder comparar los valores de fracciones obtenidas en este trabajo con los de otras ciudades de México, las quince fracciones separadas se resumieron a seis fracciones: orgánica, papel (incluye: papel, periódico-revistas y cartón); metal (incluye: metal y latas de aluminio); vidrio (incluye: vidrio claro y vidrio de color); plástico (incluye: plástico y recipientes de plástico) y la fracción de otros (incluye: fibra vegetal, fibra sintética, baterías, residuos finos y misceláneos).

La Figura 2.5 presenta los resultados de la composición en porcentaje en peso de las seis fracciones principales, ponderadas a doce meses. La mayor cantidad de residuos generados corresponde a orgánicos 44%, 49% y 44%, en segundo lugar papel con 13%, 18% y 19% y la de plásticos con 15% 12% y 12% para los niveles I, II y III, respectivamente. La generación de metal y vidrio fue muy semejante entre los tres niveles.



**Figura 2.5.** Composición en peso de los residuos sólidos urbanos para los tres niveles socioeconómicos.

### 2.5.3 Comparación de fracciones de residuos sólidos urbanos generados en Chihuahua con otras ciudades

La comparación de las fracciones expresadas en porcentaje promedio con otras ciudades de México se presenta en la Tabla 2.5. Los resultados muestran que Chihuahua tiene una menor generación de residuos orgánicos que las otras ciudades. La generación de papel, metal, vidrio y plástico fue mayor comparada con Guadalajara, Mexicali y Morelia. Esta diferencia se puede explicar por el hecho de que los resultados de este estudio son de 2006-2007 y las referencias de las otras ciudades son respectivamente de 2001, 2003 y 2001 respectivamente. En el período 2000-2006, el promedio del PIB de México ha sido del orden del 3% con el correspondiente aumento del nivel de consumo y de la composición de otros materiales distintos de la materia orgánica en los residuos (INEGI, 2007b). La generación per cápita de Chihuahua es parecida al promedio de Guadalajara y Mexicali.

**Tabla 2.5.** Composición de residuos sólidos urbanos generados en Chihuahua y otras ciudades de México.

Fracciones	Chihuahua	Guadalajara <sup>[1]</sup>	Mexicali <sup>[2]</sup>	Morelia <sup>[3]</sup>
	Porcentaje promedio (%)	Porcentaje promedio (%)	Porcentaje promedio (%)	Porcentaje promedio (%)
Orgánica	47	55	56	58
Papel	17	7	8	10
Metal	3	1	2	2
Vidrio	5	4	3	5
Plástico	13	10	7	8
Otros	15	23	24	17
Generación (kg cápita <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )	<b>0.592</b>	<b>0.580</b>	<b>0.592</b>	<b>0.629</b>

[1] (Bernache-Pérez et al., 2001) [2] (Ojeda-Benitez et al., 2003) [3] (Buenrostro et al., 2001a)

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## Capítulo 3

### METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

#### Índice

3.1 Introducción .....	31
3.2 Historia de análisis de ciclo de vida .....	31
3.3 Fases de la metodología de análisis de ciclo de vida .....	33
3.3.1 Definición de objetivos y alcance del análisis de ciclo de vida .....	33
3.3.2 Análisis de inventario del ciclo de vida .....	34
3.3.3 Análisis del impacto del ciclo de vida .....	34
3.3.4 Interpretación .....	34
3.4 Sostenibilidad medioambiental .....	34
3.5 Selección de indicadores medioambientales .....	35
3.5.1 Agotamiento de recursos abióticos .....	35
3.5.2 Calentamiento global .....	36
3.5.3 Toxicidad humana .....	37
3.5.4 Fotooxidación química .....	38
3.5.5 Acidificación .....	38
3.5.6 Eutrofización .....	39
3.6 Herramienta de evaluación LCA-IWM.....	40

#### Resumen

En este capítulo se presenta la metodología de análisis de ciclo de vida, su historia, definición de las etapas del ciclo de vida y los indicadores empleados para la evaluación de los residuos sólidos urbanos basados en el análisis de ciclo de vida.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

### 3.1 Introducción

El análisis del ciclo de vida considera toda la historia de un producto o servicio desde la extracción del material crudo, generación y uso de la energía, producción de materiales, manufactura, uso, tratamiento al final de la vida y eventualmente disposición final. En cada una de estas etapas del proceso se calcula la entrada (materiales crudos, recursos y energía) y salida (emisiones al aire, agua y residuos sólidos). En base a la unidad funcional (o unidad de referencia), las entradas y salidas de cada etapa se contabilizan ambientalmente y se evalúan, determinando las cargas ambientales asignadas al producto o proceso. Las cargas ambientales se relacionan con los impactos ambientales o categorías asociadas con la salud humana, recursos y efectos ambientales.

El ACV es un método de análisis útil para determinar el impacto ambiental asociado a un producto o servicio y para comparar dos productos o servicios con características semejantes. El ACV es una herramienta muy útil en la evaluación de diferentes sistemas de gestión de residuos, considerando como entradas al sistema los residuos sólidos, los flujos de combustible, electricidad y otros materiales auxiliares y como salidas las emisiones de posibles contaminantes y los flujos de materiales o energía recuperada.

Según la ISO 14044:2006, el análisis de ciclo de vida es una metodología que compila y evalúa las entradas, salidas y el impacto ambiental potencial generado por un producto o servicio a través de su ciclo de vida.

### 3.2 Historia del análisis de ciclo de vida

El inicio de estudios ambientales en un proceso pudiera haber sido en los años sesenta, según Vigon et al. (1993). Este investigador menciona el estudio realizado por Smith H. que reporta sus cálculos de requerimientos energéticos para la producción de productos químicos intermedios en la Conferencia de energía mundial en 1963. Otros estudios realizados se enfocaron en los efectos del cambio mundial debido a la demanda de materiales crudos finitos y recursos energéticos (Vigon et al., 1993, Sonneman et al., 2003).

En 1969 la compañía Coca Cola realizó un estudio para determinar el tipo de envases con bajo impacto ambiental. Según menciona Sonneman et al. (2003) en estudios realizados por R. Hunt en 1974 utiliza los términos de “análisis de recursos y perfil ambiental” basado en la evaluación del uso de recursos y emisiones ambientales. El proceso de cuantificación de recursos usados y la emisión de productos al medioambiente se conoce como análisis de recursos y perfil ambiental, en Estados Unidos de América y en Europa se llamó Ecobalance (Vigon et al., 1993).

En 1979 se fundó SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry) con el objetivo de desarrollar la metodología de análisis de ciclo de vida y sus criterios. Ese mismo año, menciona Sonneman et al. (2003), que Boustead y Hancock publican un estudio describiendo la metodología de la evaluación energética con la idea de hacer tratamientos energéticos más sistemáticos y establecer criterios para comparar varias fuentes de energía.

En 1984 la EMPA (Swiss Federal laboratorios for Material Testing and Research) estudió los efectos en la salud de las emisiones de los compuestos estudiados y consideró una cantidad limitada de parámetros, simplificando la evaluación y toma de decisiones. Los productos fueron evaluados en base a su impacto ambiental potencial expresado como consumo de energía, contaminación de aire y agua y los residuos sólidos. Esto proporcionó una base de datos comprensiva con acceso al público acelerando la implementación del ACV (Sonneman et al., 2003)

En 1990 se organizaron conferencias sobre el ACV en Washington, D.C., Vermont y Bélgica, debido al interés de los investigadores en desarrollar nuevos proyectos en ACV (Sonneman et al., 2003). El primer documento sobre ACV presentado con el nombre del método y la estructura general fue en el taller de la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC), en 1990. En 1991 se presentó la metodología de Evaluación de Ciclo de Vida y en 1992 el Marco conceptual para el Análisis del Impacto de Ciclo de Vida. SETAC continuó con la publicación de los trabajos presentados sobre la Calidad de los Datos del Ciclo de Vida y un Código de Prácticas, en 1993 (Consoli et al., 1993, Klöpffer W., 2006).

Las organizaciones públicas como la Swiss Federal Office of Environment, Forests and Landscap (BUWAL) inició estudios en el sector industrial o de productos. En el sector privado tal como Franklin Associates, Ltd. Publicó sus estudios sobre materiales usados en la fabricación de contenedores de transporte de materiales. Otras organizaciones continuaron realizando estudios aplicando el ACV a diferentes materiales. El aumento en el número de estudios y de organizaciones dedicados al área de ACV, avalaron la publicación de trabajos para estandarizar los criterios a ser aplicados en estudios de ACV (Sonneman et al., 2003).

En junio de 1993, la Internacional Standards Organization (ISO) creó el comité técnico 207 (ISO/TC 207) con el objetivo de desarrollar normas internacionales para la gestión ambiental. Asignando la estandarización dentro del campo de ACV y logrando con esto aumento de credibilidad en los estudios de ACV realizados. La serie 14000 de los estándares de ISO se refiere a los procedimientos antes mencionados y a herramientas de análisis (Sonneman et al., 2003).

Las normas ISO han presentando modificaciones desde su aparición.

- ISO 14001-04: Sistemas de gestión ambiental – Pautas generales en principios, sistemas y soportes técnicos.
- ISO 14010-14012: Pautas para las auditorías ambientales.
- ISO 14020-14024: Etiquetas ambientales y declaraciones.
- ISO 14031: Evaluación de la función ambiental - Pautas.

Estas normas se actualizaron en el 2006:

- ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Principios y esquema de trabajo.
- ISO 14044:2006 Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Requerimientos y pautas de trabajo.

### 3.3 Fases de la metodología del análisis de ciclo de vida

La metodología del análisis de ciclo de vida (ACV) considera cuatro fases, según la norma ISO 14040, sobre Gestión ambiental-Análisis de ciclo de vida. Estas fases son: objetivo y alcance del estudio, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación (ISO/14044:2006). En la Figura 3.1, se presentan las cuatro fases de la metodología, así como sus posibles interacciones.

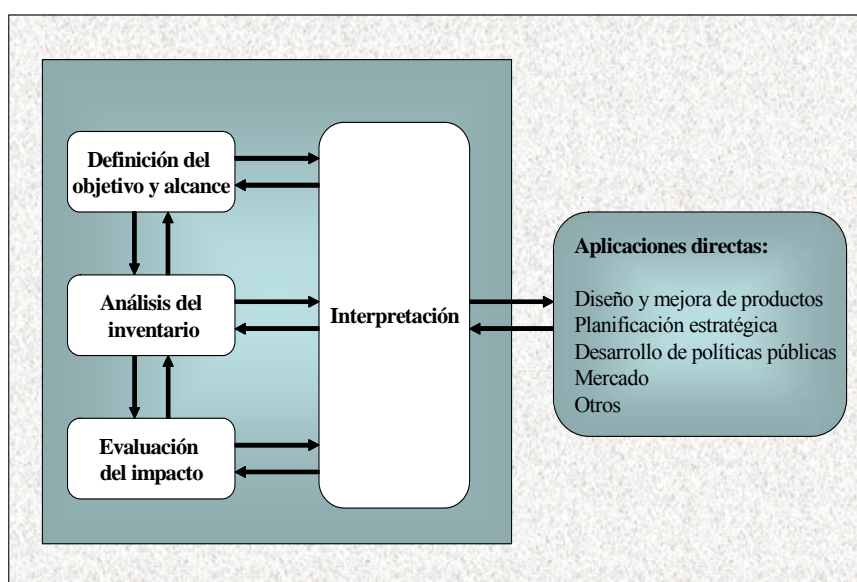


Figura 3.1. Diagrama de las fases del Análisis de Ciclo de Vida.

#### 3.3.1 Definición de objetivos y alcance del análisis del ciclo de vida

La etapa de definición de objetivos y alcance es la primera fase de un ACV, es donde se debe especificar la extensión y profundidad del estudio, estableciendo la aplicación y el límite del sistema.

a. El objetivo del ACV. Se considera la intención de la aplicación, las razones para realizar el ACV y a quien esta dirigido. Además se identifican los límites del producto o servicio (técnico, geográfico y tiempo) y el procedimiento para el manejo de datos.

b. Alcance del ACV. Deberá estar bien definido para asegurar que cumple con el objetivo. Aquí se determina el producto o servicio a ser estudiado, la unidad funcional a usar, los límites del producto o servicio, la asignación de procedimientos.

### ***3.3.2 Análisis de inventario del ciclo de vida***

El análisis del inventario de ciclo de vida (ICV) involucra la recolección de datos y cálculos para cuantificar las entradas y salidas de un producto o servicio.

### ***3.3.3 Evaluación de impacto del ciclo de vida***

La evaluación del impacto del ciclo de vida (AICV) tiene el propósito de evaluar el impacto ambiental potencial, usando los resultados del ICV. En general este proceso implica la asociación de los datos del inventario con las categorías ambientales de impacto y los indicadores de impacto. Esta fase también proporciona información para la interpretación de la fase de ciclo de vida. En la sección 3.5 se detallan los indicadores de impacto utilizados en este estudio.

### ***3.3.4 Interpretación***

En esta fase se identifican, califican, evalúan los resultados del ICV o de AICV y se presentan según los requerimientos especificados en el objetivo y alcance.

## **3.4 Sostenibilidad medioambiental como marco de este estudio**

La realización de un análisis ACV realizado en la forma anteriormente descrita tiene como marco general la consecución del desarrollo sostenible.

La comisión Brundtland de World Commission on Environment and Development, propone la definición de: “El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades” (McDougal et al., 2002).

El desarrollo sostenible se basa en los aspectos ambientales, económicos y sociales, pero dado la dificultad de encontrar una definición integral se ha decidido considerar los tres aspectos de sostenibilidad en forma individual.

Otra de las definiciones de sostenibilidad medioambiental, más reconocidas es la propuesta por Goodland y Daly (Den Boer et al., 2005):

“La sostenibilidad medioambiental pretende mejorar el bienestar humano protegiendo las fuentes de materias primas utilizadas para las necesidades humanas y asegurando que los residuos no superan un cierto límite a fin de evitar un perjuicio para los seres humanos”. Desde la perspectiva de los residuos, esto se traduce en mantener las emisiones dentro de la capacidad asimilable por el medio ambiente sin perjudicarlo.

Esta definición de sostenibilidad esta más adaptada a la gestión de residuos, parte del objetivo de este estudio (parte ambiental) y tiene como metas principales la conservación de recursos y la minimización de la contaminación.

### **3.5 Selección de indicadores medioambientales**

La descripción de los criterios seleccionados basados en el ACV sigue el método Centrum voor Milieustudies Leiden (CML) 2001 de Guinée et al. (2002). Los impactos se calculan utilizando los factores de caracterización proporcionados por el método CML (2002). La combinación de estos factores con los resultados de consumo de recursos y el inventario de emisiones, resulta en la caracterización de los impactos de un determinado producto o servicio (Den Boer et al., 2005).

Las categorías de impacto aplicadas en este estudio, son las categorías propuestas por Den Boer et al. (2005). Estos investigadores seleccionaron estas categoría en base a que el impacto de residuos fuera significativo entre escenarios, considerando un modelo de ACV completo. Las categorías de impacto seleccionadas son: agotamiento abiótico, calentamiento global, toxicidad humana, fotooxidación química, acidificación y eutrofización. Estas mismas categorías han sido evaluadas por Banar et al. (2009) en su estudio de aplicación de ACV para la gestión de residuos. A continuación se explican brevemente los indicadores considerados según los aspectos de la sostenibilidad ambiental.

#### **3.5.1. Agotamiento de los recursos abióticos**

Los recursos abióticos son recursos naturales (incluidos los recursos energéticos) tales como hierro, petróleo y otros recursos que pueden ser considerados como no vivos. El agotamiento de los recursos abióticos depende de las reservas existentes y las tasas de extracción del recurso en concreto, que combinados, ofrecen una indicación de la gravedad del agotamiento de recursos.

Mediante este indicador se podrá contabilizar los aspectos positivos de la recuperación del residuo, tanto en forma de reciclaje como de recuperación de energía. Los recursos ahorrados por el reciclaje y la recuperación sustituyen recursos abióticos que de lo contrario tendrían que ser extraídos. Para el cálculo del indicador se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Agotamiento Abiótico} = \sum_i P_iAA \times m_i$$

Donde:

$P_iAA$  es el agotamiento abiótico del recurso (kg de Sb equivalente).

$m_i$  es la cantidad de recurso  $i$  extraído (kg).

El antimonio (Sb) es la sustancia de referencia. La escasez y la tasa de explotación de todos los demás recursos se expresan con relación a este metal. En el documento 3, apéndice XVIII del proyecto LCA-IWM se encuentra los valores por defecto para  $P_iAA$  (Den Boer et al., 2005).

### **3.5.2 Calentamiento Global**

El calentamiento global se define como el impacto de las emisiones humanas sobre la fuerza de la radiación, es decir el calentamiento de la superficie de la Tierra. También conocido como “efecto invernadero”. Las emisiones procedentes de los procesos de gestión de residuos que suelen contribuir al potencial de calentamiento global incluyen dióxido de carbono, óxido de nitrógeno y metano. Los procesos de tratamiento biológico y térmico de los residuos contribuirán a aumentar estas emisiones (Den Boer et al., 2005).

Este indicador, se calcula teniendo en cuenta el potencial de calentamiento global de la sustancia en cuestión. En el documento 3, apéndice XVIII del proyecto LCA-IWM, se incluyen valores por defecto para el calentamiento global, para un período de 100 años (Den Boer et al., 2005). El indicador de calentamiento global se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Calentamiento Global} = \sum P_iCG \times m_i$$

Donde:

$P_iCG$  potencial de calentamiento global de la sustancia (kg de CO<sub>2</sub> equivalentes).

$m_i$  es la masa de la sustancia  $i$  emitida (kg).

- Fuentes de carbono fósil frente a carbono biogénico.

La categoría de calentamiento global solo considera emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de fuentes de carbono fósil. Por lo tanto las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de la

descomposición biológica (fuentes biogénicas) no se contabilizan en esta categoría. Lo mismo sucede en la incineración, pues se consideran las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas por la incineración del plástico, pero no las emisiones provenientes de la incineración del papel.

#### - Secuestro del carbono.

El secuestro del carbono se define como “la captura de CO<sub>2</sub> en su fuente de emisión y su almacenamiento temporal”. Esta forma de secuestro de carbono tiene lugar en el vertido de residuos biodegradables y la aplicación del compost. En ambos casos el carbono proviene de un ciclo de carbono corto y entra a un ciclo de carbono largo. La cantidad de carbono biodegradable que no se descompone tras cien años se considera que ha sido transferido a un ciclo de carbono largo.

En la herramienta LCA-IWM el carbono fijado por vertido de residuos biodegradables no se considera secuestro del carbono (no incluido en el protocolo de Kyoto). Sin embargo, la aplicación del compost se considera secuestro de carbono o carbono fijado (incluido en el protocolo de Kyoto).

En el cálculo del indicador del calentamiento global, la suma de CO<sub>2</sub> emitido de origen fósil se ajusta a la siguiente fórmula (Den Boer et al., 2005):

$$m_{\text{CO}_2, \text{fósil}} = \text{CO}_2 \text{ total emitido} - (\text{total de carbono secuestrado} \times 44/12)$$

### 3.5.3 Toxicidad humana

Este indicador hace referencia a los efectos negativos que tienen las sustancias tóxicas (mercurio, plomo, dioxinas) emitidas al medio ambiente sobre la salud humana. Las prácticas de gestión de residuos pueden suponer una considerable amenaza para la salud humana. Los residuos contienen sustancias tóxicas (metales pesados, ácido crómico, mercurio, plomo, níquel, cobre, dioxinas, bario y antimonio) que deben disminuirse su entrada en el medio ambiente (Den Boer et al., 2005). El indicador se calcula teniendo en cuenta el potencial de toxicidad humana, según la siguiente fórmula:

$$\text{Toxicidad humana} = \sum_i \sum_{\text{ecomp}} m_{i, \text{ecomp}} \times P_i \text{TH}_{\text{ecomp}, t}$$

Donde:

$P_i \text{TH}_{\text{ecomp}, t}$  es el potencial de toxicidad humana, el factor de caracterización para la toxicidad humana de la sustancia  $i$  emitida al compartimiento ambiental  $\text{ecomp}$ , durante el horizonte de tiempo  $t$  (kg de 1,4-diclorobenceno equivalente).

$m_i$  es la masa de la sustancia  $i$  emitida (kg).

En el documento 3, apéndice XVIII del proyecto LCA-IWM, se incluyen valores por defecto para el indicador de toxicidad humana (Den Boer et al., 2005).

### **3.5.4 Fotooxidación química**

Este indicador cuantifica la formación de compuestos químicos reactivos por la acción de la luz solar sobre determinados contaminantes del aire, que son perjudiciales para la salud humana y los ecosistemas.

Los oxidantes fotoquímicos se pueden formar en la troposfera bajo la influencia de la luz ultravioleta, a través de la fotooxidación química de los compuestos orgánicos volátiles (VOC) y el monóxido de carbono en presencia de óxidos de nitrógeno. El ozono se considera el más importante de estos agentes oxidantes junto con el peroxiacetilnitrato (PAN).

En la gestión de residuos, las emisiones de esta categoría de impacto que se consideran relevantes son los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (NMVOC), el metano procedente de los vertederos y las emisiones de NO<sub>x</sub> y CO de los procesos térmicos. Las emisiones de monóxido de carbono tienen un efecto decreciente del potencial de formación del ozono fotoquímico (PFOF), dado que puede reaccionar con el ozono, produciendo dióxido de nitrógeno y oxígeno, eliminando así el efecto ozono. Uno de los indicadores de ozono fotoquímico resulta de hallar los factores de conversión o reactividad para los VOC que a su vez son utilizados para convertir el inventario de VOC en equivalentes de etileno (Den Boer et al., 2005). El indicador se calcula según la fórmula siguiente:

$$\text{Fotooxidación química} = \sum_i P_i \text{FQ} \times m_i$$

Donde:

P<sub>i</sub>FQ es el potencial de creación de ozono fotoquímico de la sustancia *i* (kg de etileno equivalente).

m<sub>i</sub> es la masa de la sustancia *i* emitida (kg).

En el documento 3, apéndice XVIII del proyecto LCA-IWM, se incluyen valores por defecto para este indicador (Den Boer et al., 2005).

### **3.5.5 Acidificación**

Existen distintos contaminantes primarios como por ejemplo el dióxido de azufre o el óxido de nitrógeno que combinados con el agua existente en la atmósfera dan lugar a compuestos ácidos que provocan una disminución del pH al entrar en contacto con el ecosistema existente (suelo, agua subterránea, agua superficial, los organismos vivos y el entorno construido). En la gestión de residuos, los principales impactos de esta categoría se derivan de las emisiones

de óxidos de nitrógeno procedentes de los procesos biológicos y la emisión de óxido de azufre procedente de la producción de electricidad (Den Boer et al., 2005). El indicador se calcula según la siguiente fórmula:

$$\text{Acidificación} = \sum_i P_i \text{AC} \times m_i$$

Donde:

$P_i \text{AC}$  es el potencial de acidificación de la sustancia  $i$  (kg de  $\text{SO}_2$  equivalente).

$m_i$  es la masa de la sustancia  $i$  emitida (kg).

En el documento 3, apéndice XVIII del proyecto LCA-IWM, se incluyen valores por defecto para este indicador (Den Boer et al., 2005).

### 3.5.6 Eutrofización

Este indicador cuantifica el impacto potencial de niveles de nutrientes excesivamente altos que pueden provocar un exceso de producción de biomasa en los ecosistemas acuáticos y terrestres.

El potencial de eutrofización se atribuye a las emisiones atmosféricas de  $\text{NO}_x$  y amoníaco, y a las emisiones al agua de fósforo y nitrógeno procedentes de procesos biológicos de tratamiento (Den Boer et al., 2005). El indicador se calcula según la siguiente fórmula:

$$\text{Eutrofización} = \sum_i P_i \text{EU} \times m_i$$

Donde:

$P_i \text{EU}$  es el potencial de eutrofización de la sustancia  $i$  (kg de  $\text{PO}_4^{3-}$  equivalente).

$m_i$  es la masa de la sustancia  $i$  emitida (kg).

En el documento 3, apéndice XVIII del proyecto LCA-IWM, se incluyen valores por defecto para este indicador (Den Boer et al., 2005).

A continuación se presenta la Tabla 3.1 con un resumen de los indicadores considerados en este estudio.

**Tabla 3.1.** Indicadores ambientales seleccionados para el ACV

Indicadores	Símbolo	unidades
Agotamiento de recursos abióticos	AA	kg de Sb
Calentamiento global	CG	kg de $\text{CO}_2$
Toxicidad humana	TH	kg 1,4-diclorobenceno
Formación oxidantes fotoquímicos	FQ	kg de etileno
Acidificación	AC	kg $\text{SO}_2$
Eutrofización	EU	kg $(\text{PO}_4)^{3-}$

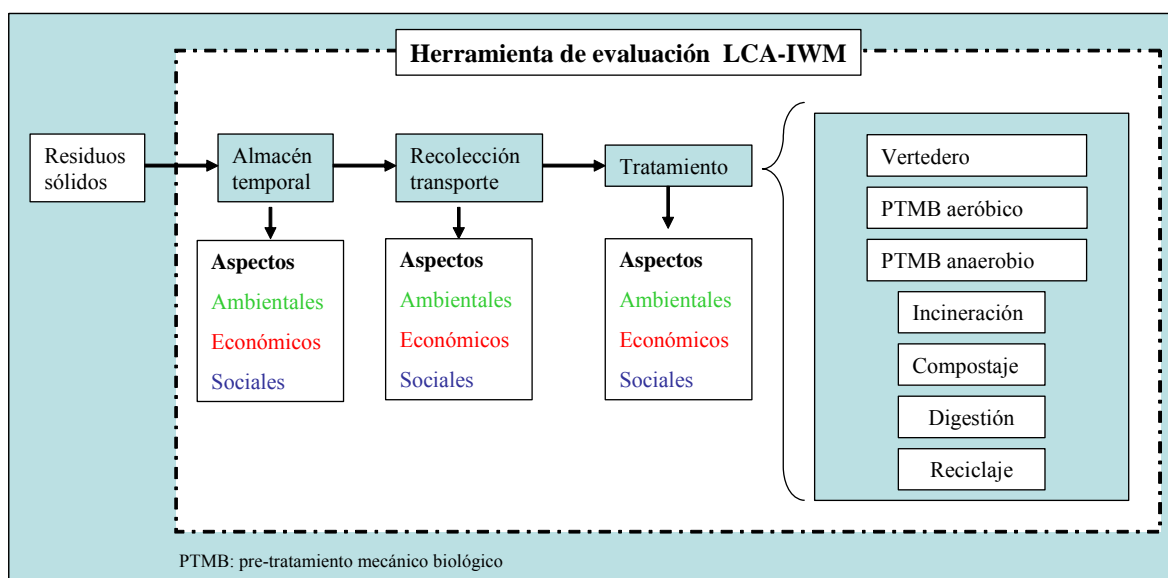
### 3.6 Herramienta de evaluación LCA-IWM

La herramienta **Life Cycle Assessment – Integral Waste Management** (LCA-IWM) es el resultado de un proyecto de investigación titulado “El Uso de Herramientas de Análisis de Ciclo de Vida para el Desarrollo de Estrategias de Gestión Integrada de Residuos para Ciudades y Regiones con un Crecimiento Rápido de la Economía”. Este formó parte del Quinto Marco del Programa 1988-2002, financiado por la Comisión Europea. Este proyecto con número de contrato EVK4-CT-2002-00087 inició en 1/9/2002 y tuvo una duración de tres años.

El modelo LCA-IWM es una **herramienta de soporte en la toma de decisiones para la gestión de los residuos sólidos**. Este sistema permite modelar varios escenarios de tratamiento a los residuos sólidos urbanos, evaluando aspectos ambientales, económicos y sociales. LCA-IWM consta de dos herramientas: una es de predicción de la generación de residuos sólidos y otra es de valoración de la sostenibilidad del sistema de gestión de residuos. Esta herramienta de valoración, presenta varios subsistemas en los que se evalúan por separado el almacenamiento temporal (en las fracciones correspondientes), recolección y transporte (de las fracciones correspondientes), tratamiento de residuos (compostaje, digestión, pre-tratamiento mecánico biológico aeróbico, pr-tratamiento mecánico biológico anaeróbico, incineración y reciclado de papel-cartón, vidrio, metal, plásticos, equipo eléctrico y electrónico) y disposición final. La herramienta LCA-IWM evalúa **aspectos ambientales, económicos y sociales del sistema de gestión de residuos**. La base para esta evaluación son los criterios de sostenibilidad mediante indicadores cuantitativos que están incluidos en el sistema. El usuario puede modelar varios escenarios en los que puede seleccionar diferentes métodos de tratamiento, según considere oportuno para el municipio (Den Boer et al. 2005).

La aplicación de la herramienta LCA-IWM para evaluar diferentes escenarios de tratamiento de residuos sólidos, para la ciudad de Chihuahua, requiere la aportación de gran cantidad de datos referentes a las distintas tecnologías consideradas. Cuando para Chihuahua no se ha encontrado esta información se han utilizado los datos por defecto, correspondientes normalmente a valores estándares europeos.

La Figura 3.2 presenta los aspectos de evaluación de la herramienta LCA-IWM. Esta herramienta evalúa aspectos ambientales, económicos y sociales en las etapas de almacenamiento temporal, recolección-transporte y los diferentes tratamientos.



**Figura 3.2.** Diagrama del contenido que evalúa la herramienta LCA-IWM.

## **CAPÍTULO 4**

# **EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LAS ETAPAS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## Capítulo 4

### EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LAS ETAPAS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS

#### Índice

4.1 Etapas del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos .....	45
4.1.1 Almacenamiento temporal .....	47
4.1.1.1 Descripción de la etapa de almacenamiento temporal .....	47
4.1.1.2 Evaluación ambiental del almacenamiento temporal .....	48
4.1.1.3 Resultados de la evaluación ambiental del almacenamiento temporal .....	49
4.1.2 Recolección-transporte de residuos sólidos urbanos .....	52
4.1.2.1 Descripción de la etapa de recolección-transporte .....	52
4.1.2.2 Evaluación del modelo de recolección-transporte .....	52
4.1.2.3 Resultados de la evaluación ambiental de la recolección-transporte .....	54
4.1.3 Tratamiento: RELLENO SANITARIO .....	56
4.1.3.1 Descripción del proceso de relleno sanitario .....	57
4.1.3.2 Evaluación ambiental del proceso del relleno sanitario .....	58
4.1.3.3 Resultados de la evaluación ambiental del RS actual .....	60
4.1.3.4 Resultados de la evaluación ambiental del RS moderno .....	64
4.1.4 Tratamiento: INCINERACIÓN .....	68
4.1.4.1 Descripción del proceso de Incineración .....	69
4.1.4.2 Evaluación ambiental del proceso de Incineración .....	70
4.1.4.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de Incineración .....	73
4.1.5 Tratamiento: DIGESTIÓN .....	75
4.1.5.1 Descripción del Proceso de Digestión .....	76
4.1.5.2 Evaluación del proceso de Digestión .....	77
4.1.5.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de digestión .....	82
4.1.6 Tratamiento: COMPOSTAJE .....	85
4.1.6.1 Descripción del proceso de compostaje.....	87
4.1.6.2 Evaluación del Proceso de compostaje .....	88

4.1.6.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de compostaje .....	89
4.1.7 Tratamiento: RECICLADO .....	92
A. Papel y cartón .....	93
4.1.7.1 Descripción del proceso de reciclado de papel y cartón .....	93
4.1.7.2 Evaluación del proceso de reciclado de papel y cartón .....	94
4.1.7.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de reciclado de papel y cartón .....	95
B. Vidrio .....	95
4.1.7.4 Descripción del proceso de reciclado de vidrio .....	98
4.1.7.5 Evaluación del proceso de reciclado de vidrio .....	98
4.1.7.6 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de reciclado de vidrio ....	100
C. Metales .....	102
4.1.7.7 Descripción del proceso de reciclado de metal .....	103
4.1.7.8 Evaluación del proceso de reciclado de metales .....	103
4.1.7.9 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de reciclado de metales .....	104
D. Plásticos .....	106
4.1.7.10 Descripción del proceso de reciclado de plásticos .....	107
4.1.7.11 Evaluación del proceso de reciclado de plásticos .....	108
4.1.7.12 Resultados de la evaluación ambiental del reciclado de plásticos .....	109
4.2 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos .....	111
4.3 Energía y materiales auxiliares .....	112
4.3.1 Electricidad .....	112
4.3.2 Calor .....	113
4.3.3 Acero y lubricantes .....	113
4.3.4 Diesel para transporte y maquinaria .....	113

## Resumen

En este capítulo se presenta la descripción de las diferentes etapas de un sistema de gestión de residuos y su evaluación ambiental (almacenamiento temporal, recolección-transporte y la disposición final o tratamiento).

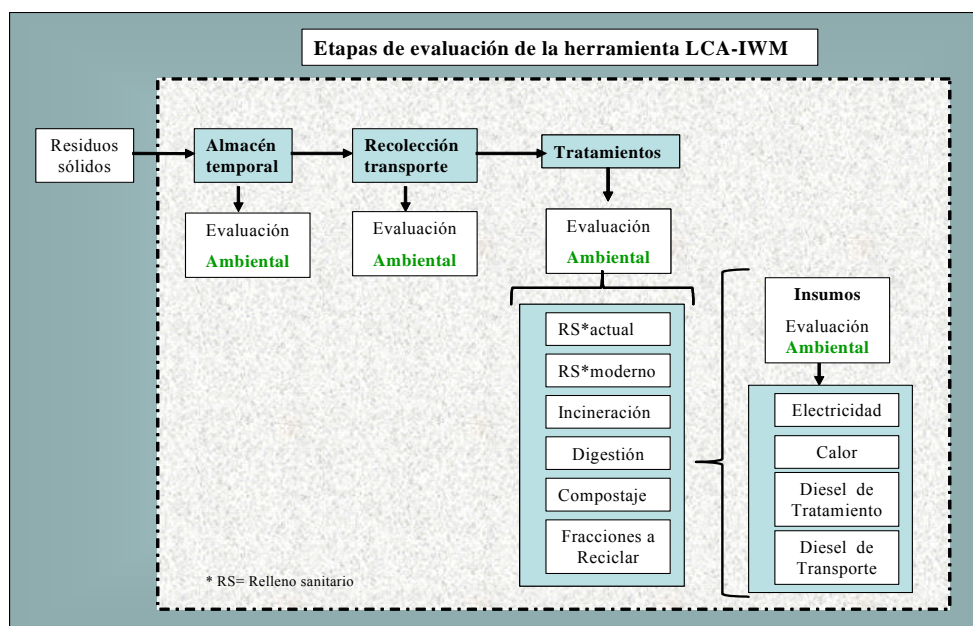
#### **4.1 Etapas del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos**

Las etapas del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) consideradas en este estudio son: almacenamiento temporal, recolección-transporte y tratamiento, considerando los resultados del Capítulo 2.

El sistema de gestión de residuos inicia con la recolección de los residuos en las calles, colocados en bolsas dentro de canastas metálicas, botes de plástico o sobre la acera. Después de la recolección, los residuos son colocados en el camión y transportados hasta las instalaciones de tratamiento. En este estudio se considera la disposición de RSU en el relleno sanitario (RS) sin control de emisiones, situación actual en Chihuahua. Además las instalaciones o sistemas de tratamiento consideradas en este estudio son:

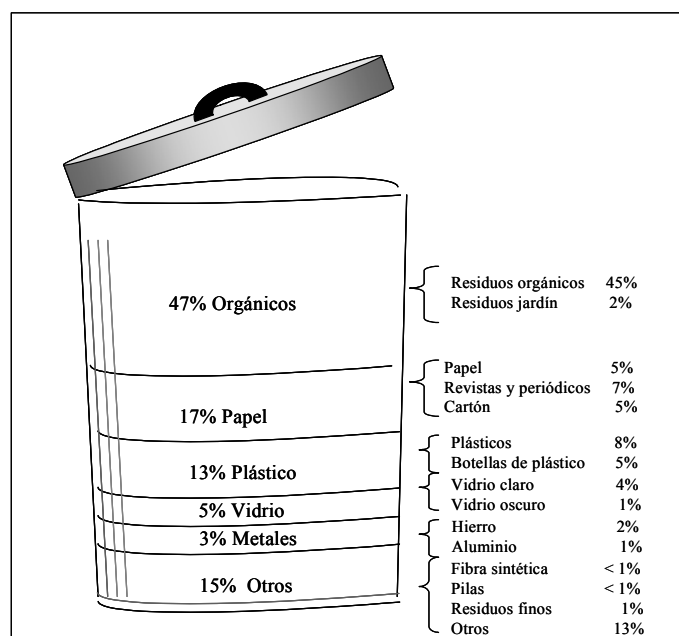
- Disposición en relleno sanitario con control de emisiones
- Incineración de residuos
- Digestión de fracción orgánica
- Compostaje de fracción orgánica
- Reciclado de recogida selectiva (papel, vidrio, metal y plástico)

Estos tratamientos son los más usados en el sistema de gestión de residuos y corresponden a tecnologías desarrolladas y aplicadas actualmente en Europa. La evaluación de los modelos de gestión de residuos sólidos urbanos seleccionados se realiza aplicando la herramienta LCA-IWM. En la Figura 4.1 se presenta un esquema de la herramienta LCA-IWM indicando la evaluación ambiental de la etapa de almacenamiento temporal, recolección-transporte, tratamientos seleccionados y los insumos empleados para el funcionamiento de la planta de tratamiento. Para cada sistema de gestión de residuos, la herramienta LCA-IWM evalúa ambientalmente la etapa de almacenamiento temporal, recolección-transporte tratamiento seleccionado para cada situación, considerando los insumos empleados para realizar el tratamiento. En el caso de la electricidad, se consideró el impacto ambiental de la electricidad generada en México.



**Figura 4.1.** Etapas de la **evaluación ambiental** del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos.

En la Figura 4.2 se presenta la composición de los residuos a evaluar, para las fracciones caracterizadas en Chihuahua. Los valores corresponden al promedio de los tres niveles y temporadas detallados en la Tabla 2.4 e integrados para adaptarlos a las fracciones consideradas en la metodología de LCA-IWM.



**Figura 4.2.** Composición de los **residuos sólidos urbanos** en Chihuahua.

A continuación se presentan la descripción de cada etapa estudiada y su evaluación ambiental. La evaluación ambiental se realiza para la cantidad de una tonelada de RSU.

### 4.1.1 Almacenamiento temporal

Se describe como almacenamiento temporal al tipo de recipientes empleados para contener temporalmente los residuos hasta la recolección.

#### 4.1.1.1. Descripción de la etapa de almacenamiento temporal

En la Figura 4.3 se presenta las formas de almacenamiento temporal de RSU.



**Figura 4.3.** Recipientes para **almacenar temporalmente** los residuos sólidos urbanos.

#### **Almacenamiento temporal en bolsas.**

En Chihuahua los residuos se colocan en **bolsas de polietileno** y posteriormente se dejan en la acera:

- sobre una **canasta metálica** para basura (contenedor hecho de varilla metálica de una altura de 1.30 m aproximadamente),
- en **botes de plástico** para residuos de diferente capacidad (desde 20 a 100 L), propiedad del dueño de la vivienda,
- en bolsas sobre la **acera** o en bolsas que se cuelgan en una parte alta.

Estas formas de almacenamiento temporal se ubican enfrente de las viviendas. Las bolsas son compradas por los dueños de las viviendas o son bolsas obtenidas en los supermercados al hacer la compra.

- El sistema de recogida selectiva, no se realiza actualmente en Chihuahua. Los pepenadores se encargan de separar las fracciones de papel, metal, vidrio y plástico para su venta y posteriormente su reciclado. Motivar a la ciudadanía para separar

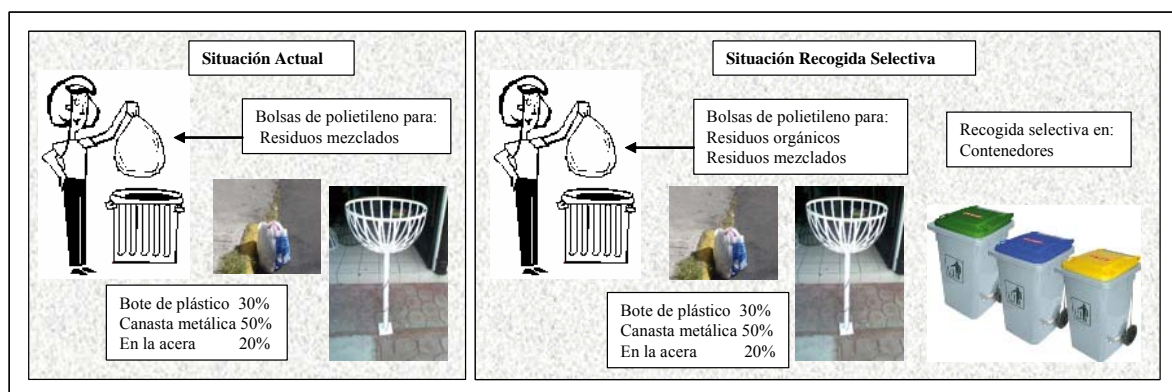
fracciones reciclables es una propuesta de mejorar del sistema de gestión de residuos actual. Por este motivo se propone la evaluación ambiental de **contenedores de plástico** de mayor capacidad (2,500 L), para la recogida selectiva de fracciones.

#### 4.1.1.2 Evaluación ambiental del almacenamiento temporal

La evaluación ambiental, considera el tipo y la cantidad de materiales empleadas en los recipientes usados para el almacenamiento temporal.

En la Figura 4.4 se presentan dos situaciones de almacenamiento temporal, en la primera es la **situación actual** y en la segunda se presenta la **situación recogida selectiva**.

- En la **situación actual**, se considera que el 100% de la población coloca los residuos mezclados en bolsas de polietileno. Las bolsas se colocan dentro de los diferentes contenedores, estimando que un 50% lo hace en la canasta metálica, 30% en botes de plástico para residuos y el 20% sobre la acera. Considerando la disposición de los RSU a ambos lados de la calle.
- En la situación de **recogida selectiva** se estima que el 15% de las fracciones separadas, que se encuentran en los RSU, se recogen selectivamente (papel, vidrio, metal y plástico), colocándose en los contenedores correspondientes. El 22% de la fracción orgánica, que se encuentra en los RSU, se colocan en bolsas y el resto son residuos mezclados (63%) dentro de bolsas de polietileno. El 50% de las bolsas se colocan en canastas metálicas, el 30% en botes de plástico y el 20% en la acera. Considerando la colocación de las bolsas a ambos lados de la calle.



**Figura 4.4.** Situación del **almacenamiento temporal** de residuos sólidos urbanos.

En la Tabla 4.1 se presentan los parámetros usados en la determinación de la cantidad de materiales empleados para el almacenamiento temporal. Se considera la cantidad, tamaño y

duración de las bolsas de polietileno, canasta metálica, botes para residuos y contenedores de plástico. Además se estima la utilización de materiales reciclados en la fabricación de la canasta metálica, botes de plástico para los residuos y contenedores de plástico (2,500 L). Las bolsas de polietileno se consideran de un solo uso.

**Tabla 4.1.** Parámetros de la etapa de **almacenamiento temporal** de residuos sólidos urbanos.

<b>Parámetros para bolsas de polietileno</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad*</b>
Cantidad promedio de residuos <b>mezclados</b> por familia	kg/semana	<b>17.7</b>
Capacidad de las bolsas de polietileno por familia, para residuos mezclados	L/recolección	<b>55</b>
Densidad de los residuos mezclados	kg/m <sup>3</sup>	110
Densidad del polietileno de las bolsas	kg/m <sup>3</sup>	0.065
Frecuencia de recolección de los residuos mezclados	veces por semana	<b>3</b>
<b>Parámetros para canasta metálica</b>		
Capacidad promedio de la canasta metálica	L	<b>80</b>
Capacidad de llenado de la canasta metálica	%	<b>70</b>
Peso promedio de la canasta metálica	kg	<b>8</b>
Tiempo de duración de la canasta metálica	años	<b>10</b>
Material reciclado utilizado en la fabricación de la canasta	%	70
<b>Parámetros para botes de plástico</b>		
Capacidad promedio del bote de plástico	L	<b>80</b>
Capacidad de llenado de los botes de plástico	%	<b>80</b>
Peso promedio del bote de plástico	kg	<b>4</b>
Tiempo de duración del bote de plástico	años	<b>2</b>
Material reciclado utilizado en la fabricación del bote	%	20
<b>Parámetros para el contenedor de plástico</b>		
Capacidad del contenedor para recogida selectiva	L	2,500
Capacidad de llenado del contenedor	%	80
Peso del contenedor	kg	130
Tiempo de duración del contenedor	años	10
Material reciclado utilizado en la fabricación del contenedor	%	50
Frecuencia de recogida selectiva	veces por semana	<b>1</b>

\* Los valores en "negritas" corresponden a valores reales de Chihuahua.

#### **4.1.1.3 Resultados de la evaluación ambiental del almacenamiento temporal**

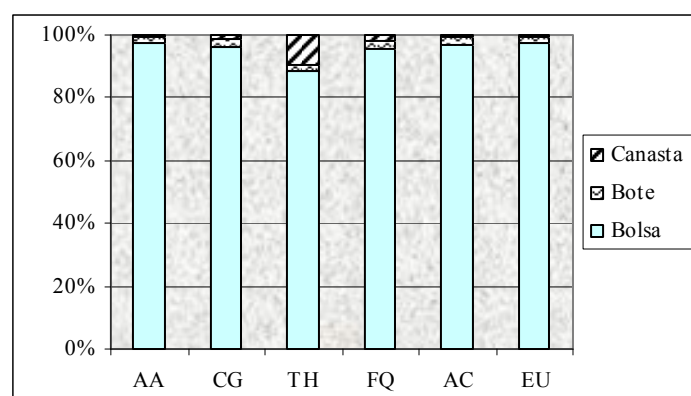
En la situación actual, el material requerido para el almacenamiento temporal de **una tonelada de residuos** es de **5.90 kg de polietileno** para las bolsas, **1.46 kg de polietileno de alta densidad (HDPE)** para los botes, **0.23 kg de metal** para las canastas metálicas. En el caso de la situación de recogida selectiva se requiere de **5 kg de polietileno** para las bolsas, **1.2 kg de HDPE** para botes, **0.20 kg de metal** para las canastas metálicas y **0.02kg de HDPE**, para los contenedores usados en la recogida selectiva. En las Tablas 4.2a y 4.2b se

presentan los resultados del impacto ambiental generado por los materiales empleados en el almacenamiento temporal, para las dos situaciones (actual y recogida selectiva) de una tonelada de residuos. Las Figuras 4.5a y 4.5b se presenta la contribución al impacto de las emisiones en la producción de los materiales empleados en el almacenamiento temporal.

**Tabla 4.2a.** Evaluación ambiental del **almacenamiento temporal** para la **situación actual**.\*

Categoría de impacto	Bolsas de polietileno (100%)	Bote de plástico (30%)	Canasta metálica (50%)	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	2.34E-01	5.19E-03	1.30E-03	2.40E-01
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	1.32E+01	2.92E-01	2.04E-01	1.37E+01
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	1.35E-01	2.98E-03	1.47E-02	1.52E-01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	2.29E-03	5.07E-05	5.12E-05	2.39E-03
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	7.37E-02	1.64E-03	5.74E-04	7.59E-02
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	7.90E-03	1.75E-04	3.94E-05	8.11E-03

\*Para una tonelada de RSU.

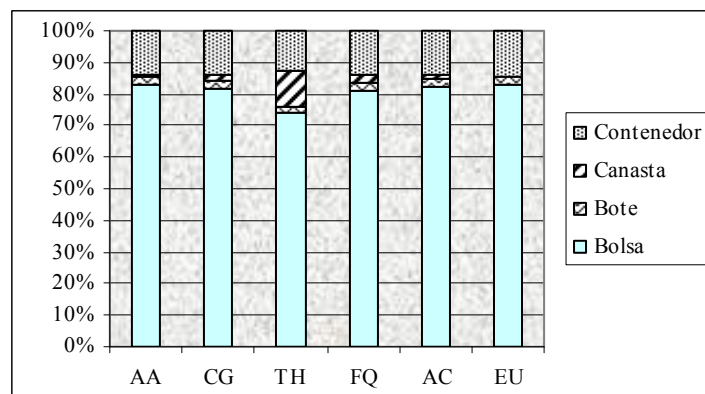


**Figura 4.5a.** Impacto ambiental total del almacenamiento temporal para la **situación actual**.

**Tabla 4.2b.** Evaluación ambiental del **almacenamiento temporal** para la **situación de recogida selectiva**.\*

Categoría de impacto	Bolsas de polietileno (85%)	Bote de plástico (30%)	Canasta metálica (50%)	Contenedor (15%)	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	1.46E-01	4.41E-03	1.10E-03	2.51E-02	1.76E-01
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	8.20E+00	2.49E-01	1.74E-01	1.41E+00	1.00E+01
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	8.36E-02	2.54E-03	1.25E-02	1.44E-02	1.13E-01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	1.42E-03	4.31E-05	4.35E-05	2.45E-04	1.75E-03
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	4.58E-02	1.39E-03	4.88E-04	7.90E-03	5.56E-02
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	4.91E-03	1.49E-04	3.35E-05	8.46E-04	5.94E-03

\*Para una tonelada de RSU.



**Figura 4.5b. Impacto ambiental del almacenamiento temporal para la situación de recogida selectiva.**

Los resultados presentados en las Tablas 4.2a y 4.2b indican la contribución a las categorías analizadas en cada situación considerando el material empleado en el almacenamiento temporal. El impacto ambiental en comparación con las dos situaciones de almacenamiento temporal es en promedio un 27% mayor en la situación actual en todas las categorías con respecto a la situación de recogida selectiva.

El consumo de **polietileno** para la fabricación de las bolsas, presenta **el mayor impacto ambiental** en las dos situaciones (Figuras 4.5a y 4.5b). A continuación se presenta el análisis detallado de los impactos generados por las bolsas de polietileno como material empleado mayoritariamente en el almacenamiento temporal, para cada una de las categorías:

- El impacto al **agotamiento de recursos abióticos (AA)**, se debe al consumo de gas natural, contribuyendo en un 56% y al petróleo en un 41% para la producción principalmente de polietileno utilizado en la fabricación de las bolsas.
- El impacto del **calentamiento global (CG)** es causado principalmente por la fabricación de las bolsas de polietileno, por las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 100%.
- La **toxicidad humana (TH)** se debe a las emisiones generadas en la obtención del polietileno empleado en la fabricación de las bolsas. El 54% del impacto total se produce por las emisiones de NO<sub>2</sub>, el 18% de benceno, 16% de HF, 4% de As, 3% de SO<sub>2</sub> y 2% de Ni.
- La aportación a la categoría de **fotooxidación química (FQ)** es causada por las emisiones de compuestos como SO<sub>2</sub> en un 76%, etileno en 16% y CO en 5%, debido principalmente a la producción de polietileno en la fabricación de las bolsas.
- La contribución a la **acidificación (AC)** es por la fabricación de las bolsas de polietileno, emitiendo SO<sub>2</sub> en un 59% y NO<sub>2</sub> en un 41%.

- La contribución a la **eutrofización (EU)** es causada por las emisiones de  $\text{NO}_2$  en un 99% al producir principalmente el polietileno para la fabricación de las bolsas.

#### ***4.1.2 Recolección-transporte de residuos***

El análisis en esta etapa consiste en la **recolección** de los RSU de las aceras. Los residuos recolectados se **transportan** a las instalaciones, para tratamiento o disposición final.

##### **4.1.2.1 Descripción de la etapa de recolección-transporte**

A continuación se presentan tres situaciones estudiadas en esta etapa:

- **Situación actual (SA).** El camión recolector (tipo estándar) sale de la cochera a la colonia, recolecta los residuos mezclados a lo largo de la calle y con el mismo tipo de camión los transporta al RS. Esta es la situación actual en Chihuahua.
- **Situación estación de transferencia (SET).** El camión recolector (tipo estándar) sale de la cochera a la colonia, recolecta los residuos mezclados y los lleva a la estación de transferencia. Un camión con tráiler transporta los residuos de la estación de transferencia a las instalaciones de tratamiento. La distancia considerada entre la recolección de los residuos sólidos en la colonia y la estación de transferencia, se calculó en base a una distancia promedio en un mapa de la ciudad de Chihuahua. Esta es una situación propuesta para la ciudad.
- **Situación recogida selectiva (SRS).** Se considera la recogida selectiva, dispuestas en los contenedores en el respectivo camión estándar y se llevan a la estación de transferencia. Se cargan las fracciones a un camión con tráiler y se transportan a la instalación de selección para el reciclado. La recolección del restos de los residuos se estima con la SET.

En las Figura 4.6 a, b y c presentan un esquema de las tres situaciones del sistema de recolección-transporte de residuos analizadas para Chihuahua, indicando la distancia promedio del recorrido, tipo y capacidad del camión, distancia entre bolsas y cantidad de bolsas recolectadas, tiempo de espera en la estación de transferencia y en la instalación de tratamiento.

##### **4.1.2.2 Evaluación del modelo de recolección-transporte**

El impacto ambiental de esta etapa es debido principalmente al consumo de combustible en la recolección-transporte a la estación de transferencia y a las instalaciones de tratamiento o RS.

No se han considerado los impactos derivados de la construcción y mantenimiento de los vehículos utilizados por considerarlos despreciables frente al impacto del combustible.

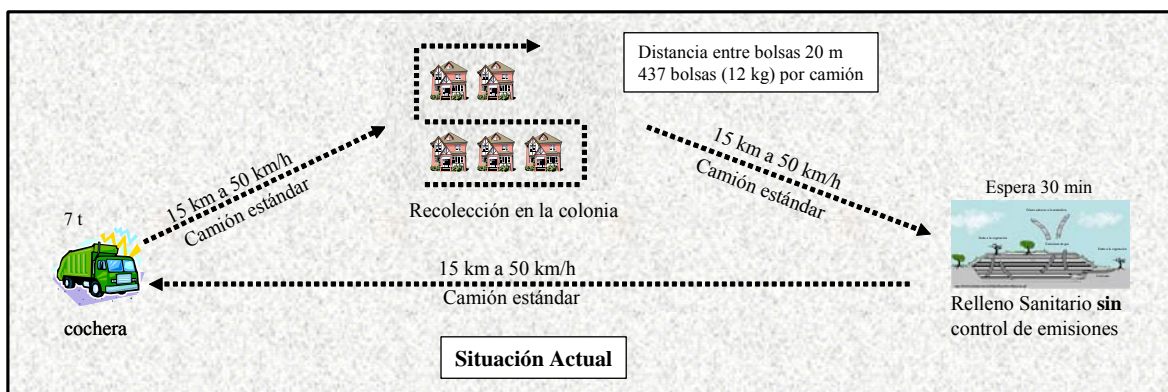


Figura 4.6a. Sistema de recolección-transporte de residuos para la **situación actual**.

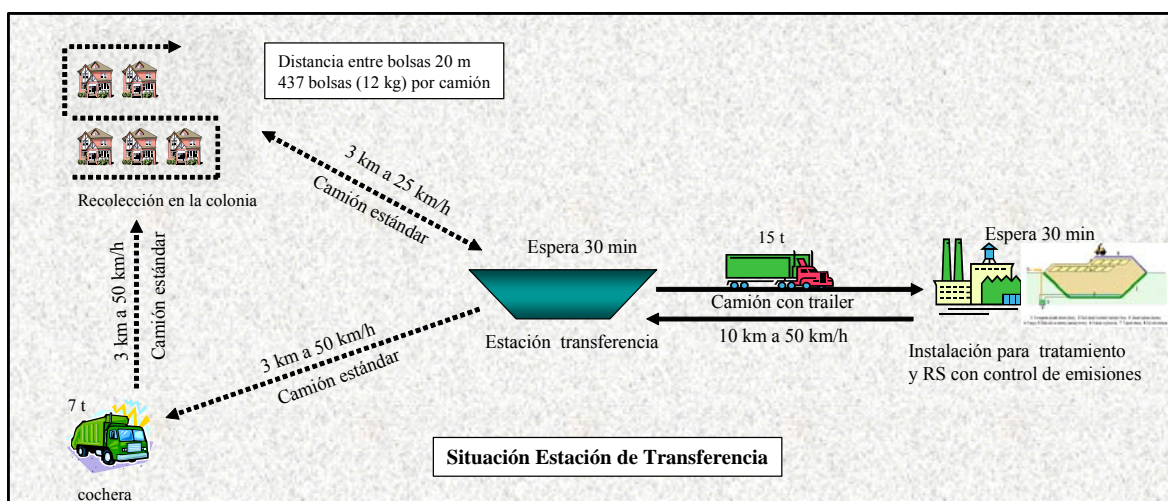


Figura 4.6b. Sistema de recolección-transporte de residuos para la **situación de estación de transferencia**.

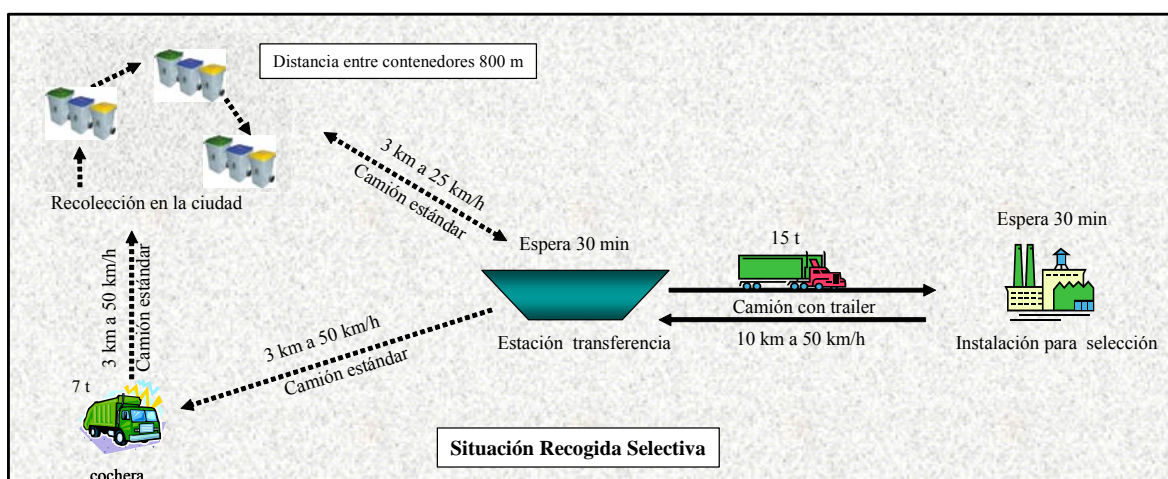


Figura 4.6c. Sistema de recolección-transporte de residuos para la **situación recogida selectiva**.

La Tabla 4.3 muestra los parámetros considerados en la recolección-transporte en las tres situaciones. Se estima, para la evaluación ambiental, la distancia promedio, la velocidad y tipo de camiones para la recolección-transporte de residuos. Además, se muestra el tiempo de recolección de las bolsas, las jornadas de trabajo, el número de trabajadores y la frecuencia de recolección.

**Tabla 4.3.** Parámetros de la etapa de **recolección-transporte** de residuos sólidos urbanos.

<b>Parámetros generales en la recolección-transporte</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor*</b>
Área de recolección	km <sup>2</sup>	<b>219</b>
Velocidad promedio de recolección en la colonia	km/h	<b>10</b>
Velocidad promedio de la colonia a la estación de transferencia	km/h	<b>25</b>
Velocidad promedio de la estación de transferencia a la instalación de tratamiento	km/h	<b>50</b>
Capacidad de los vehículos recolectores estándar	t	<b>7</b>
Capacidad de llenado de los camiones recolectores estándar	%	<b>75</b>
Capacidad del camión con trailer	t	<b>15</b>
Consumo de diesel durante la recarga (vaciado de bolsas o contenedor) al camión	L/h	1.3
Consumo de diesel entre recolección de bolsas	L/h	8.5
Consumo de diesel de camiones transportadores	L/100 km	<b>40</b>
Horas de operación del camión recolector	h	<b>8</b>
Número de empleados recolectores (excluyendo al conductor)	u	<b>2</b>
Tiempo empleado en la recolección entre bolsas	s	<b>30</b>
Tiempo de espera en la estación de transferencia o RS durante la descarga	h	<b>0.5</b>
<b>Situación actual</b>		
Distancia entre bolsas a lo largo de la calle	m	<b>20</b>
Distancia de la cochera al colonia	km	<b>15</b>
Distancia del colonia al RS	km	<b>15</b>
Frecuencia de recolección por semana	veces	<b>3</b>
<b>Situación estación de transferencia</b>		
Distancia entre bolsas a lo largo de la calle	m	<b>20</b>
Distancia de la cochera a la colonia	km	<b>3</b>
Distancia de la estación de transferencia a la colonia	km	<b>3</b>
Distancia de la estación de transferencia a la cochera	km	<b>3</b>
Distancia de la estación de transferencia a la instalación de tratamiento	km	<b>10</b>
Frecuencia de recolección por semana	veces	<b>3</b>
<b>Situación recogida selectiva</b>		
Distancia entre contenedores de plástico (2,500 L)	m	<b>800</b>
Distancia de la cochera a la colonia	km	<b>3</b>
Distancia de la estación de transferencia a la colonia	km	<b>3</b>
Distancia de la estación de transferencia a la cochera	km	<b>3</b>
Distancia de la estación de transferencia a la instalación de tratamiento	km	<b>10</b>
Tiempo empleado en la recogida selectiva (contenedor)	s	<b>90</b>
Frecuencia de recogida selectiva	semana	<b>1</b>

\* Los valores en "negritas" corresponden a valores reales de Chihuahua.

### 4.1.2.3 Resultados de la evaluación ambiental de la recolección-transporte

Los resultados obtenidos consideran los parámetros mencionados anteriormente para la recolección-transporte de RSU mezclados, o recogida selectiva. En la Tabla 4.4 se presentan los resultados de la distancia, consumo de diesel y tiempo de la recolección-transporte, para una tonelada de residuos, considerando la situación actual con el mismo tipo de camión estándar (capacidad y consumo de diesel) para la recolección-transporte.

**Tabla 4.4.** Resultados promedio de la etapa **recolección-transporte** de residuos sólidos urbanos.\*

Situaciones	Residuos	Distancia (km/t)		Diesel (L/t)		Tiempo (min/t)	
		Tipo de residuos	recolección	transporte	recolección	transporte	recolección
<b>Actual</b>	Mezclados		<b>10.2</b>		<b>5.7</b>		<b>66</b>
<b>Estación de transferencia</b>	Mezclados	<b>3.09</b>	<b>1.84</b>	<b>2.52</b>	<b>0.74</b>	<b>46.38</b>	<b>4.98</b>
	Papel	0.42	0.19	0.06	0.08	2.10	0.48
	Vidrio	0.08	0.06	0.02	0.02	0.48	0.12
	Metal	0.17	0.12	0.03	0.05	0.96	0.30
<b>Recogida selectiva</b>	Plástico	0.41	0.21	0.07	0.09	2.10	0.60
	Orgánicos	0.72	0.43	0.59	0.17	10.26	1.14
	Mezclados	1.82	1.08	1.48	0.43	25.86	2.94
	<b>Total de SRS</b>	<b>3.62</b>	<b>2.09</b>	<b>2.25</b>	<b>0.84</b>	<b>41.76</b>	<b>5.58</b>

\* para una tonelada de RSU.

La Tabla 4.5 presenta los resultados del análisis ambiental de la recolección-transporte promedio para una tonelada de residuos. Las categorías de impacto ambiental presentan los resultados del consumo de combustible durante la recolección-transporte para las tres situaciones expuestas. El **mayor impacto ambiental** lo presenta la **situación actual** superior en un 43% en comparación con la situación de estación de transferencia (SET) y superior en un 47% en comparación con la situación de **recogida selectiva** (SRS), con respecto a la situación actual.

**Tabla 4.5.** Impacto ambiental para las situaciones en la etapa de **recolección-transporte** de residuos sólidos urbanos.\*

Categoría de impacto	Situación actual (SA)	Situación estación de transferencia (SET)	Situación recogida selectiva (SRS)
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	1.14E-01	6.49E-02	6.10E-02
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	1.71E+01	9.68E+00	9.10E+00
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	2.06E+00	1.17E+00	1.10E+00
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	3.48E-03	1.98E-03	1.86E-03
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	9.84E-02	5.59E-02	5.25E-02
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	2.10E-02	1.19E-02	1.12E-02

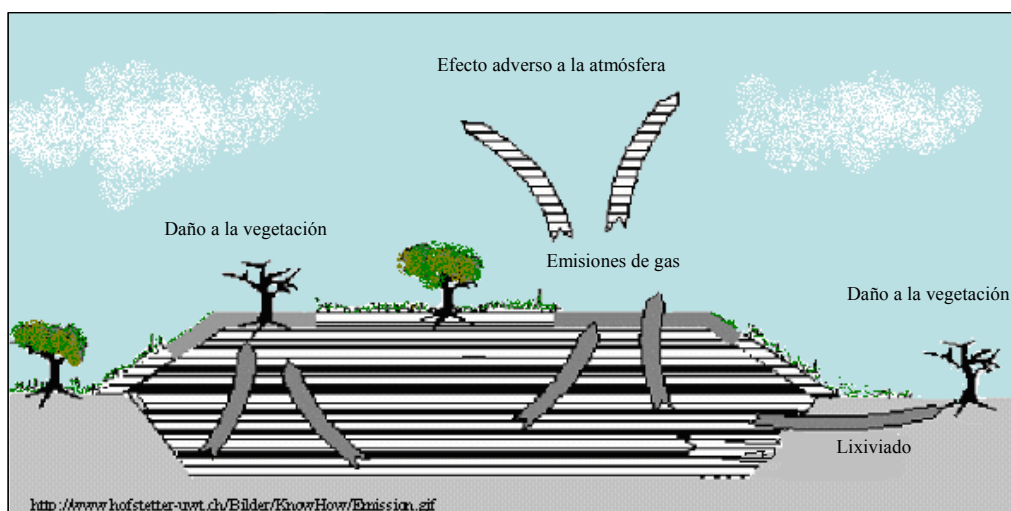
\* para una tonelada de residuos

El mayor impacto de la etapa de recolección-transporte se presenta en la SA, en comparación con la SET y SRS. A continuación se presentan el análisis detallado de cada indicador para la situación actual (SA):

- El impacto en la categoría de **agotamiento de recursos abióticos** se debe al consumo de petróleo contribuyendo en 100%, para la producción de diesel.
- La contribución al **calentamiento global** se debe a las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 99% generado por la producción y la combustión del diesel durante el transporte.
- La contribución a la **toxicidad humana** es causado por las emisiones de la producción y la combustión de diesel. Los compuestos emitidos son benceno contribuyendo en 64%, Ni en 21% y NO<sub>2</sub> en 9%.
- La contribución a la **fotooxidación química** se debe a emisiones generadas por la producción y combustión del diesel, tal como formaldehído en un 41%, CO en 33% y SO<sub>2</sub> en 20%.
- La aportación a la **acidificación** se debe a las emisiones de NO<sub>2</sub> en un 82% y SO<sub>2</sub> en 18% provocados por la producción y combustión del diesel.
- La contribución a la **eutrofización** se debe a emisiones en un 100% de NO<sub>2</sub>, generadas por la producción y combustión del diesel.

#### ***4.1.3 Tratamiento: RELLENO SANITARIO***

El relleno sanitario es el método más barato y simple de disposición de residuos. Típicamente un relleno sanitario consiste en depositar en el suelo los residuos sólidos, los cuales se esparcen y compactan reduciéndolos al menor volumen posible para que así ocupen menor área. Luego se cubren con una capa de tierra y se compactan nuevamente al terminar el día (NOM-083-SEMARNAT-2003, 2004). En la Figura 4.7 se presenta un esquema del RS actual sin control de emisiones (gas y lixiviado).



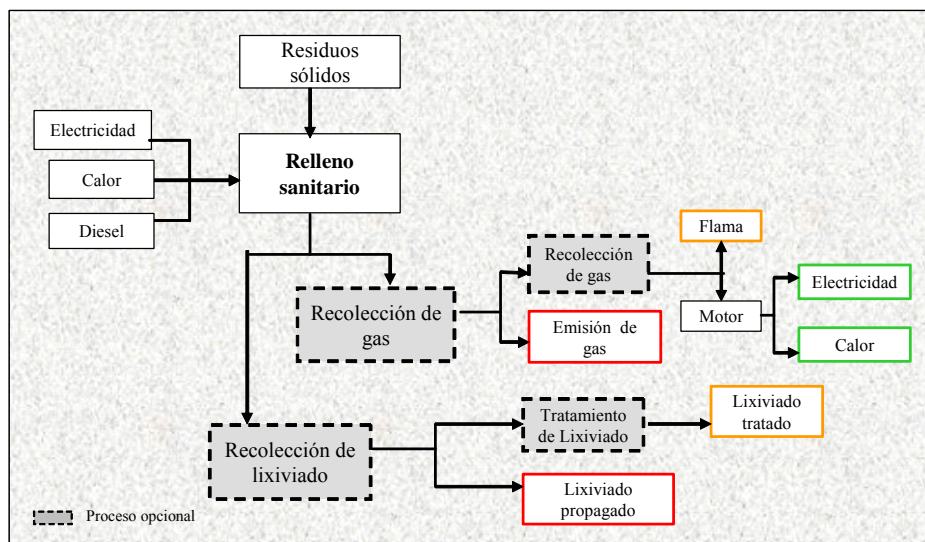
**Figura 4.7. Relleno sanitario actual (sin control de emisiones).**

En la actualidad el RS de la ciudad de Chihuahua no cumple en su totalidad con la normativa de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Algunas de las faltas en las que incurre son: –tiempo que transcurre entre la disposición de los residuos y su cubrimiento–, –distancia mínima a zonas habitacionales–, –insuficiente recolección y tratamiento de gases y lixiviado– (NOM-083-SEMARNAT-2003, 2004).

Los principales problemas de disposición final de los residuos en el RS son la emisión de gas y lixiviado. El gas generado, también llamado biogás, compuesto mayoritariamente por metano (55%) y CO<sub>2</sub> (45%), es consecuencia de la descomposición de los residuos orgánicos. El lixiviado se genera por el contenido de agua de los residuos y la precipitación pluvial (McDougall et al., 2002).

#### **4.1.3.1 Descripción del proceso de relleno sanitario**

El RS es el proceso más frecuentemente utilizado para la disposición final de los residuos sólidos. En Chihuahua la disposición de los residuos en el RS consiste en depositarlos en un área de terreno plano. El fondo del RS esta compuesto por una capa de tierra fina que evita de alguna manera la filtración total de lixiviados. Los residuos depositados son compactados y cubiertos con tierra. A continuación se presenta en la Figura 4.8 un diagrama de un RS sin control de emisiones y con control de emisiones, como proceso opcional (relleno sanitario moderno). En los RS modernos se propone la disposición segura de los residuos, desde el punto de vista de salud y ambiental. Para ello se controlan las emisiones de gases y lixiviados. La recolección de gas se aprovecha para generar energía y el lixiviado se recupera para su tratamiento (McDougall et al., 2002).



**Figura 4.8.** Diagrama de flujo del **relleno sanitario**.

Las entradas al proceso son los residuos mezclados, electricidad y calor (empleados en el funcionamiento del RS) y diesel empleado como combustible en la maquinaria de compactación de los RSU. Las salidas son las emisiones de gas y de lixiviado. En la situación actual del RS de Chihuahua, no se realiza recolección de emisiones (de gas y lixiviado), dispersándose estas al medio ambiente. En un RS moderno se recolectan el gas para producir energía y el lixiviado generado es tratado para evitar la contaminación del suelo principalmente.

#### **4.1.3.2** Evaluación ambiental del proceso del relleno sanitario

Se considera primeramente la evaluación del RS actual o sin control de emisiones y posteriormente la evaluación para el RS moderno, con control de emisiones.

##### **A. Relleno sanitario actual.**

En la evaluación ambiental de la disposición de los RSU en un RS, se considera:

- composición y cantidad de los residuos de entrada,
- tiempo de operación y
- altura del RS

La Tabla 4.6 presenta los parámetros usados para la evaluación del RS sin control ambiental.

**Tabla 4.6.** Parámetros para la evaluación de los residuos sólidos urbanos en el RS actual.

Parámetros	Unidad	Valor*
Tiempo de planeación de operación del RS	años	25
Tiempo de análisis de las emisiones	años	100
Altura del RS	m	30
Precipitación pluvial en Chihuahua	mm/año	429
Consumo de electricidad	kWh/t	2
Combustible para calentamiento	kg/t	0.038
Diesel utilizado por máquina compactadora	L/t	0.86
Densidad del diesel	kg/L	0.84
Poder calorífico del metano	MJ/Nm <sup>3</sup>	37.75

\* los valores en "negritas" corresponden a valores reales de Chihuahua.

A continuación se presentan las consideraciones propuestas para la evaluación de las emisiones de biogas y de lixiviado.

**Biogas del RS actual.** La composición química de los residuos determina la tasa de biodegradabilidad (Den Boer et al., 2005 y tabla A III-19 en el Anexo III). Para determinar la cantidad de gas generado (Nm<sup>3</sup>) en el RS se ha utilizado la fórmula:

$$G_{\text{tot}} = 1.869 * C_o * (0.014 * T + 0.28) \quad (\text{Den Boer et al., 2005})$$

Donde:

$G_{\text{tot}}$  = gas potencial del RS (Nm<sup>3</sup>/t residuos)

$C_o$  = contenido de carbón degradable orgánicamente de los residuos [kg  $C_o$ /t residuos] en una vivienda típica el valor es entre 170 a 220 kg/t

1.869 es la cantidad de gas resultante de la descomposición de kg  $C_o$  [m<sup>3</sup> gas/t residuos  $C_o$ ] [(22.4 L gas/mol)/(12 g C/mol)]

T = temperatura en el RS (30 a 35 °C)

[0.014 \* promedio de temperatura (33°C) + 0.28] = 0.74

Se determina la producción de gas para un periodo de 100 años. La cantidad de gas producida se calcula con la fórmula:

$$G_{(t)} = G_{\text{tot}} * (1 - 10^{-k*t}) \quad (\text{Den Boer et al., 2005})$$

Donde:

$G_{(t)}$  = cantidad de gas (Nm<sup>3</sup>/t residuos)

k = 0.038

t = tiempo 100 años

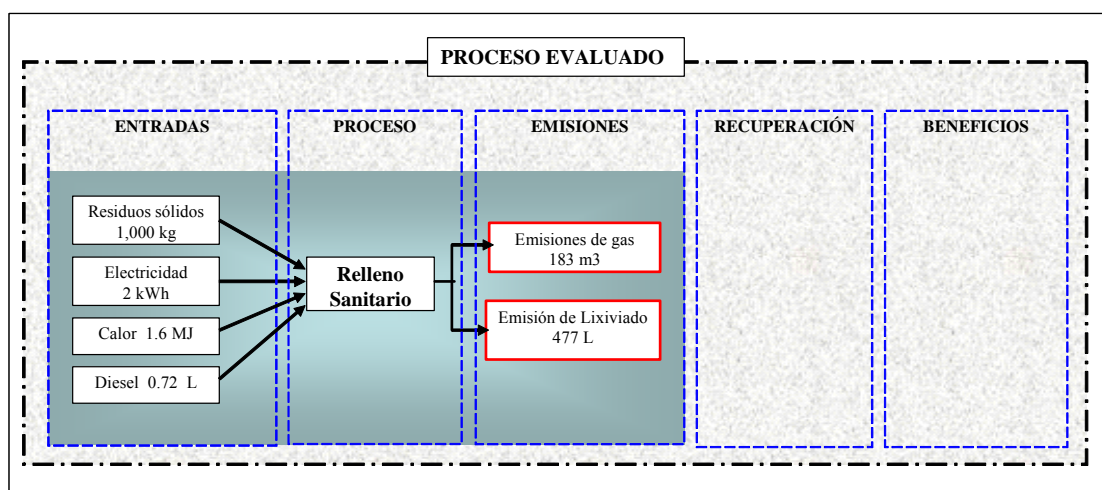
Se integra la cantidad de gas producido ( $G_{(t)}$ ) durante el periodo de tiempo de 100 años. De esta cantidad el 55% corresponde a metano y 45% dióxido de carbono. El estudio realizado en el RS de Chihuahua, por SCS Engineers (2005) concuerda con el porcentaje en volumen de **metano (55%)** y **CO<sub>2</sub> (45%)** utilizado para la evaluación ambiental de este tratamiento por la herramienta LCA-IWM. El CO<sub>2</sub> emitido en el gas del RS es una fuente

biogénica y no es contabilizada en el cálculo del potencial del calentamiento global. El contenido de contaminantes en la composición de gas del RS se presenta en la tabla A III-30 del Anexo III.

**Lixiviado del RS actual.** La generación de lixiviado depende del contenido de humedad de los residuos, de la densidad y altura de los residuos en el RS y de la precipitación pluvial. De la cantidad total de lixiviado generado durante toda la vida (100 años) del RS, el 40% se produce en la fase de operación (fase A), el 8% durante la fase de clausura del RS (fase B) y el resto (52%) permanece en los residuos. En el cálculo se han considerado la variación en la composición del lixiviado a lo largo del tiempo y durante las fases A y B, según los datos presentados en las tablas A III-32 y A III-33 del Anexo III.

#### 4.1.3.3 Resultados de la evaluación ambiental del RS actual

La Figura 4.9 presenta el diagrama del proceso del RS actual evaluado ambientalmente.



**Figura 4.9.** Diagrama del proceso evaluado del **RS actual**.

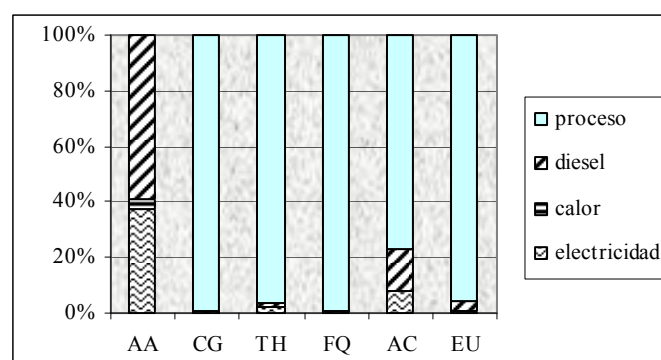
La evaluación del proceso considera las entradas de residuos mezclados (1,000 kg), electricidad, calor y diesel. Las salidas son las emisiones de gas 183 m<sup>3</sup> y de lixiviados 477 litros. En la Tabla 4.7 se presentan los resultados de la evaluación ambiental del RS actual para las categorías analizadas. En la Figura 4.10 se presenta la contribución al impacto de los insumos y emisiones del proceso al impacto total del proceso del RS actual.

En este estudio se considera **impacto ambiental adverso** a los valores positivos y **beneficio ambiental** a los valores negativos como resultado de las categorías de impacto.

**Tabla 4.7.** Evaluación ambiental para el proceso del **RS actual**.\*

Categoría de impacto	Electricidad consumida	Calor consumido	Diesel del proceso	Emisiones Proceso	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	1.03E-02	9.66E-04	1.61E-02	0.00E+00	2.73E-02
<b>Calentamiento global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	1.58E+00	1.10E-01	2.95E+00	6.14E+02	6.19E+02
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	4.10E-01	1.62E-02	2.33E-01	1.87E+01	1.93E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	3.56E-04	6.49E-06	8.42E-04	1.78E-01	1.79E-01
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	1.01E-02	8.77E-05	1.90E-02	9.80E-02	1.27E-01
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	1.05E-03	9.41E-06	4.07E-03	1.09E-01	1.14E-01

\* para una tonelada de residuos



**Figura 4.10.** Impacto ambiental total del proceso de **RS actual**.

A continuación se presentan el análisis detallado de los resultados más significativos de la evaluación ambiental del RS actual, para cada una de las categorías.

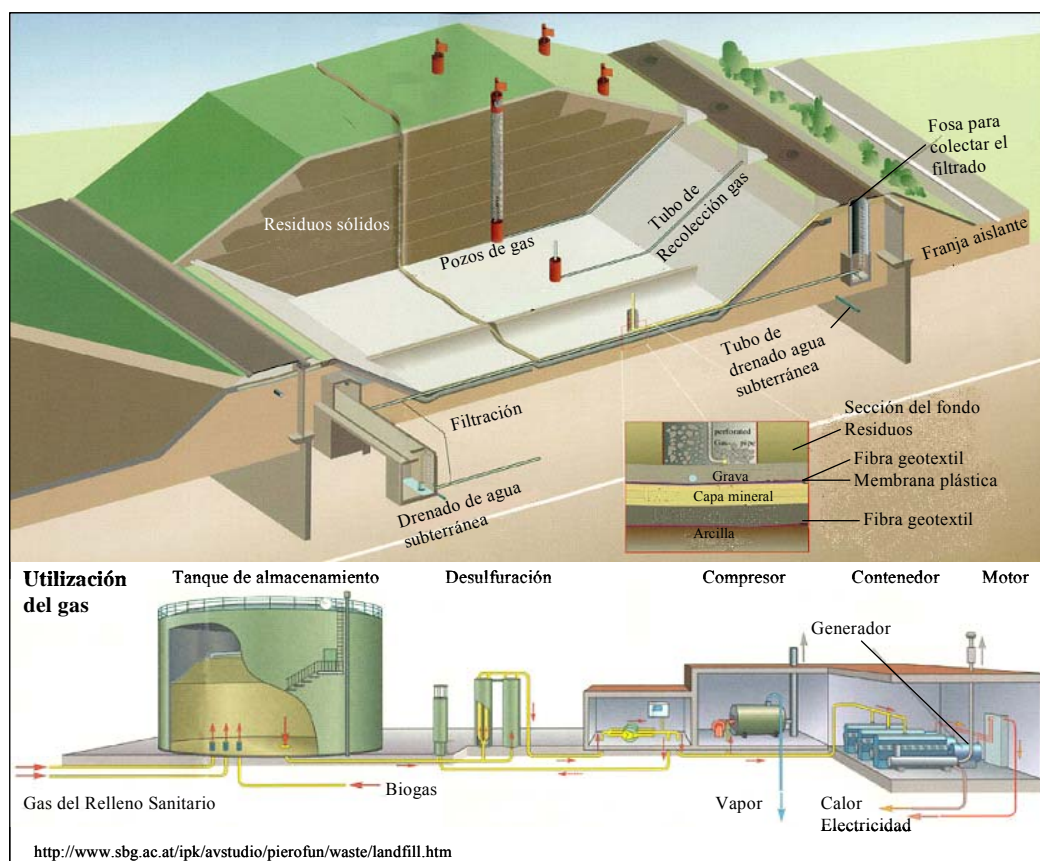
- En la Tabla 4.7 se observa que el proceso del RS sin control de emisiones, presenta en todas las categorías un impacto ambiental adverso para todas las etapas estudiadas.
- El 59% del impacto ambiental adverso en la categoría de **agotamiento abiótico (AA)** corresponde al consumo de diesel empleado en la máquina compactadora y el 37% al consumo de la electricidad. El análisis ambiental indica que el impacto debido al consumo del diesel, se debe en un 95% al consumo de petróleo, un 5% de gas natural, utilizados en la producción de diesel empleado en el funcionamiento del RS.
- La aportación a las emisiones del **calentamiento global (CG)** muestra que el 99% del impacto total adverso corresponde al proceso. El impacto en la etapa del proceso se debe a las emisiones al aire por al metano, contribuyendo en un 82%, CFC-12 en un 16% y CFC-11 en 2%, provenientes de la biodegradación de los RSU.
- El impacto ambiental adverso de la **toxicidad humana (TH)** es debido en un 96% a las emisiones del proceso. El impacto se debe principalmente a compuestos emitidos en el

lixiviado (difundidos al medio ambiente, sin control), tales como el mercurio, aportando el 75% y 2% de tricloroetileno. Al impacto del proceso, las emisiones al aire, como el benceno, contribuyen en un 11%, HF en un 3%, tricloroetileno 2% y cloruro de vinilo en un 1%. El impacto de las emisiones al suelo industrial están compuestas por mercurio en un 3% y cromo (VI) en un 3%, proveniente de la biodegradación de los RSU.

- El 99% del impacto ambiental adverso en la categoría de **fotooxidación química (FQ)** corresponde a las emisiones del proceso, por la biodegradación de los residuos. Los compuestos emitidos al aire son metano, contribuyendo en el impacto, del proceso, en un 74%, tolueno en un 14%, etilbenceno en un 5%, CO en un 2%, tricloroetileno en un 2% y SO<sub>2</sub> en un 2%.
- El 76% del impacto ambiental adverso en la categoría de **acidificación (AC)** se debe al proceso, 15% a emisiones del diesel de la máquina compactadora y 8% al impacto del consumo de la electricidad. La contribución a la acidificación se debe a la emisión al aire de compuestos como el SO<sub>2</sub> contribuyendo en un 53% y el NO<sub>2</sub> en 47%, provenientes del proceso de biodegradación de los residuos.
- La aportación a la categoría de **eutrofización (EU)** muestra que el 95% del impacto total adverso corresponde al proceso y 4% al impacto del consumo del diesel. El impacto en esta categoría se debe a emisiones principalmente del proceso, como amonio en un 66%. En el lixiviado generado por el proceso, el impacto se presenta por la demanda química de oxígeno en un 16% y 3% de fósforo. El NO<sub>2</sub> presente en los gases, contribuye en un 11% en el impacto del proceso y en el suelo industrial se presenta el amonio en un 3%. Las emisiones de lixiviado y gas provienen del proceso de la biodegradación de los residuos.

## **B. Relleno Sanitario moderno.**

La diferencia del RS moderno y el RS actual es la recolección del gas generado (produciendo energía) y lixiviado con su correspondiente tratamiento. En la Figura 4.11 se presenta un esquema en detalle del proceso de tratamiento de RSU en un relleno sanitario moderno (con recuperación de energía).



**Figura 4.11. Relleno sanitario moderno con control de emisiones.**

A continuación se presentan las consideraciones propuestas en la producción y recolección del biogás y de lixiviado.

**Biogás del RS moderno.** Para la evaluación ambiental se consideran los parámetros de entrada del RS actual, presentados en la Tabla 4.6, la producción de biogás calculada, según las ecuaciones 4.1 ( $G_{tot}$ ) y 4.2 ( $G_{(t)}$ ) y las características químicas de los residuos (tabla A III-19 del Anexo III). Además, la Tabla 4.8 presenta los parámetros considerados para el RS moderno, para la producción de gas, tratamiento de lixiviado y demanda de energía.

**Tabla 4.8.** Parámetros para la evaluación de los residuos sólidos urbanos en el RS moderno.

Parámetros	Unidad	Valor
Último año de utilización del gas, después de clausura del RS	año	10
Producción de gas	años	100
Residuos sólidos del tratamiento de lixiviados	kg/kg COD red	0.30
Tratamiento de lixiviado	kWh/m <sup>3</sup>	22
Recolección del gas	kWh/m <sup>3</sup>	0.15
Valor calórico del combustible	MJ/kg	42.8

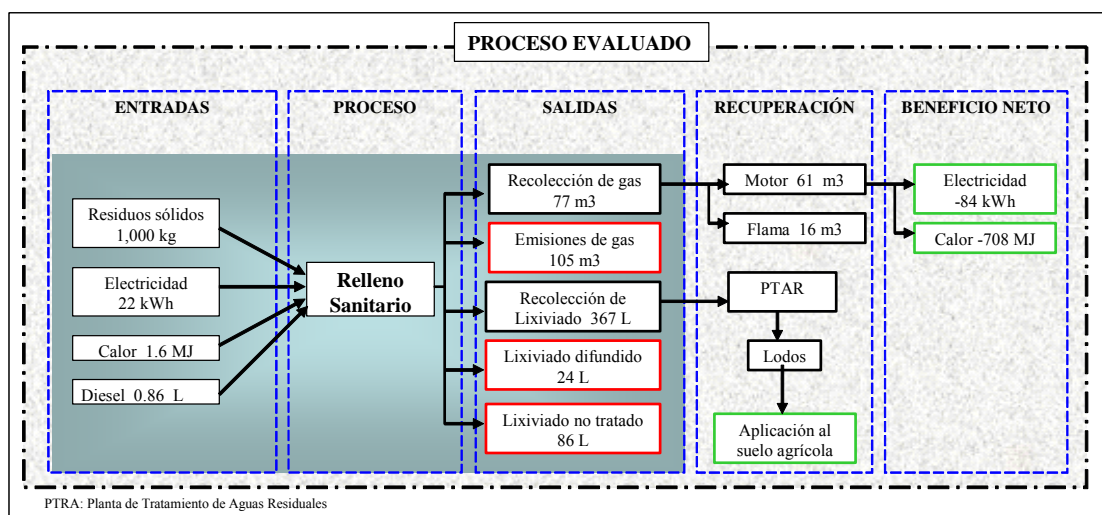
Se ha considerado un período de 100 años de producción de gas y este se empieza a recuperar para la producción de energía a partir del primer año de operaciones. El 30% de la modulación se genera durante la fase de operación (fase A) y el 70 % durante la fase de clausura (fase B) del RS. La recolección del biogás depende de la eficiencia del sistema de recolección durante la operación y después de la clausura. Sin embargo, se asume que el 30% del gas se difunde por la cubierta o por alguna fractura, después de la clausura del RS. Del gas emitido a través del RS, el 60% del metano se oxida a dióxido de carbono. También se considera la emisión de CO<sub>2</sub> como una fuente biogénica y por consiguiente no se contabiliza en el cálculo del potencial del calentamiento global.

En la unidad de cogeneración, la energía procedente de la combustión del biogás se recupera en forma de electricidad y calor. Basado en la producción de gas empleado para la producción de energía, el contenido de metano, valor calórico del metano y la eficiencia de la unidad de cogeneración, se determina la cantidad de electricidad y calor producidos. También se consideran los contaminantes en el flujo del gas del motor empleado para la producción de electricidad. Se asume los mismos niveles de emisión para el biogás quemado en la flama que para el motor del cogenerador (tablas A III-30 y A III-31 del Anexo III).

**Lixiviado del RS moderno.** Para la producción de lixiviado se considera las mismas condiciones que para el RS actual (tablas A III-32 y A III-33 del Anexo III). La combinación de tratamiento biológico con la ultra filtración y absorción con carbón activado es el tratamiento aplicado en la purificación del lixiviado, en la tabla A-III-34 del Anexo III se presentan la eficiencia de purificación considerada en la herramienta LCA-IWM del tratamiento utilizado.

#### **4.1.3.4 Resultados de la evaluación ambiental del RS moderno**

A continuación se presenta la Figura 4.12 con el diagrama del proceso evaluado, para el RS moderno. En las entradas se presentan los residuos mezclados (1,000 kg) y los insumos de electricidad, calor y diesel.



**Figura 4.12.** Diagrama del proceso evaluado del **relleno sanitario moderno**.

Según los resultados obtenidos para el modelo de RS moderno, se recolecta el 42% (77 m<sup>3</sup>) de la emisión de gas y el resto se difunde a la atmósfera. Del gas recolectado, el 79% (61 m<sup>3</sup>) se emplea para la producción de electricidad y calor, el resto (16 m<sup>3</sup>) se quema en una flama. En cuanto al lixiviado, el 77% (367 L) se recolecta para tratamiento, se difunden al suelo 24 L y 86 L no son tratados.

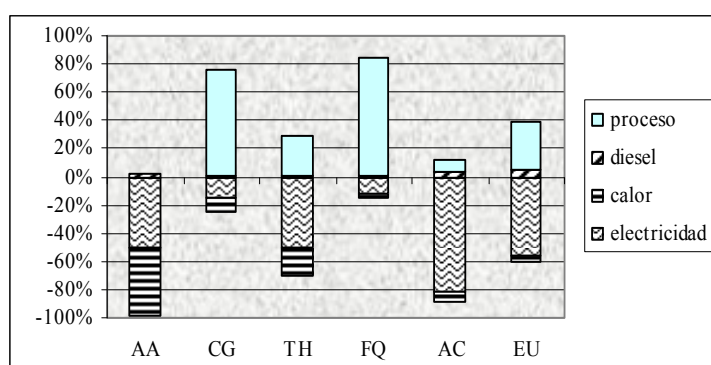
En la sección de recuperación se presenta el proceso aplicado a la recolección de emisiones de gas y de lixiviado. En la parte de los beneficios se observan la producción de electricidad (-84 kWh) y calor (-708 MJ). Esta energía es energía neta, después de la requerida para el funcionamiento del RS. El signo negativo indica la recuperación de energía. Los residuos (lodos) del tratamiento del lixiviado son utilizados en suelos agrícolas, después del tratamiento, pero no se ha considerado su evaluación ambiental en este estudio

En la Tabla 4.9 se presentan los resultados de la evaluación del RS moderno. Los resultados de las categorías presentadas corresponden a emisiones del proceso, así como a las emisiones de los insumos empleados para el funcionamiento del mismo y la recuperación de energía. En la Figura 4.13 se presenta la contribución al impacto total de cada insumo y las emisiones del proceso al impacto ambiental del proceso del RS moderno.

**Tabla 4.9. Categorías de impacto para el RS moderno.\***

Categoría de impacto	Electricidad neta	Calor neto	Diesel del proceso	Emisión Proceso	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	-4.38E-01	-4.28E-01	1.61E-02	0.00E+00	-8.50E-01
<b>Calentamiento global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	-6.74E+01	-4.89E+01	2.95E+00	3.54E+02	2.41E+02
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	-1.75E+01	-7.18E+00	2.33E-01	1.00E+01	-1.45E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	-1.52E-02	-2.87E-03	8.42E-04	1.02E-01	8.43E-02
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	-4.33E-01	-3.89E-02	1.90E-02	4.15E-02	-4.11E-01
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	-4.49E-02	-4.17E-03	4.07E-03	2.78E-02	-1.72E-02

\* para una tonelada de residuos



**Figura 4.13. Impacto ambiental total del proceso de RS moderno.**

A continuación se analizan las categorías de impacto del RS moderno. El beneficio ambiental (electricidad y calor) indican cargas ambientales evitadas, debido a la recuperación de energía. Las emisiones del diesel y del proceso presentan impacto ambiental debido al consumo de diesel y a las emisiones de la biodegradación de los residuos, respectivamente.

- El escenario de RS con control de emisiones resulta con beneficio ambiental en todas las categorías por la recuperación de energía en la electricidad y el calor. El impacto ambiental adverso se presenta en el proceso y el diesel para todas las categorías.
- La electricidad y el calor presentan un beneficio ambiental, en la categoría de **agotamiento abiótico (AA)** contribuyendo en un 49% y 48% respectivamente en el impacto total del tratamiento, por la recuperación de energía.
- La electricidad y el calor contribuye en un 14% y 10% respectivamente a la categoría de **calentamiento global (CG)** presentando un beneficio ambiental. El 75% del impacto corresponde al impacto ambiental adverso causado por el proceso debido a las emisiones al aire. Los compuestos con mayor impacto en esta categoría provienen del

proceso debido a la biodegradación de los residuos, como por ejemplo el metano, contribuyendo en un 82%, CFC-12 en un 16% y CFC en un 2%.

- La electricidad y el calor presentan un beneficio ambiental en la categoría de **toxicidad humana (TH)** contribuyendo en un 50% y en un 20% respectivamente en el impacto total. El impacto ambiental adverso en esta misma categoría corresponde al proceso contribuyendo en un 29% en el impacto total. La causa del impacto del proceso son las emisiones al agua (lixiviado de la fase A, B, después de la clausura del RS y durante el tratamiento del mismo) principalmente por parte del mercurio, contribuyendo en un 70%. Las principales emisiones al aire son de benceno en un 12%, tricloroetileno, 2% cloruro de vinilo 2% y HF en un 2%. Otros compuestos emitidos por el proceso que impactan al suelo industrial son el mercurio que contribuyen en un 6% y el Cromo (VI) en 5%.
- En la categoría de **fotooxidación química (FQ)** se presenta un beneficio ambiental por la recuperación de electricidad y calor en un 13% y 2% respectivamente. El impacto ambiental adverso en esta misma categoría corresponde al proceso en un 84% del total. El impacto del proceso se debe a las emisiones al aire de metano, contribuyendo en un 75%, tolueno en un 14%, etilbenceno en un 5%, tricloroetileno en un 2% y CO en un 2%, proveniente de la biodegradación de los residuos. Este indicador presenta un impacto total adverso.
- La electricidad y el calor presentan un beneficio ambiental en la categoría de **acidificación (AC)** contribuyendo en un 81% y 7% respectivamente en el impacto total, por la recuperación de energía. El impacto ambiental adverso en la categoría corresponde al proceso en un 8% y al diesel en un 4%. La causa del impacto ambiental es debido a las emisiones principalmente del proceso al aire de SO<sub>2</sub>, contribuyendo en un 53% y NO<sub>2</sub> en un 48%, proveniente de la biodegradación de residuos.
- Se presenta un beneficio ambiental en la categoría de **eutrofización (EU)**, contribuyendo la electricidad en un 55% y el calor en un 5%. El 35% del impacto ambiental adverso se debe al proceso y el 5% al diesel. El impacto ambiental proveniente del proceso es causado por las emisiones al agua con amonio, contribuyendo en un 49%, demanda química de oxígeno 9%, fosfato 8% y nitrato 1%. Las emisiones del proceso al aire de NO<sub>2</sub> en un 18%. Se presentan también emisiones al suelo industrial en una contribución al impacto del proceso del 14% de amonio, proveniente de la descomposición de los residuos.

#### 4.1.4 Tratamiento: INCINERACIÓN

La incineración es un proceso térmico aplicado a los residuos sólidos urbanos. Este tratamiento es un proceso complejo que requiere controlar la temperatura y la cantidad de aire para asegurar la combustión completa. Desde las pasadas décadas ha sido un tratamiento ampliamente usado, estableciendo tecnologías confiables, instalaciones modernas y operando en una base comercial (McDougall et al. 2002).

El valor calórico generado depende de la composición de los residuos mezclados, en Alemania es de 7.5 a 11 MJ/kg; sin embargo, en México es de 4.2 a 21 MJ/kg (constituida aproximadamente de 50% de residuos orgánicos) (Sener, 2007).

En países desarrollados tecnológicamente, la incineración de residuos es un método ampliamente usado en el tratamiento de residuos sólidos. En México, la incineración de residuos municipales no se aplica como método de tratamiento a nivel industrial y municipal. Sin embargo, existen actualmente un total de 43 incineradoras de residuos peligrosos, de los cuales el 85% se utilizan para residuos biológicos infecciosos y el 15% restante incinera residuos industriales (INE, 2007).

En un sistema integral de residuos un sistema de incineración se combina con otros métodos de tratamiento como el compostaje o digestión de residuos orgánicos y reciclado de materiales. En tales casos la mayoría de los residuos sólidos no adecuados para recuperar materiales son incinerados. En la Figura 4.14 se presenta un esquema de una planta de incineración de residuos sólidos con recuperación de energía (electricidad y calor).

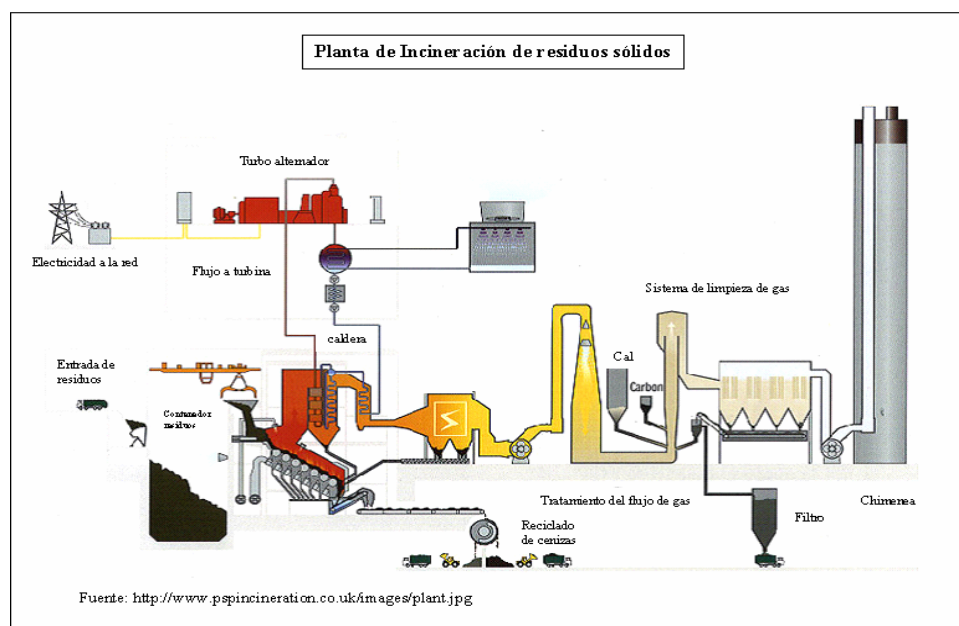


Figura 4.14. Planta de incineración de residuos sólidos con recuperación de energía.

La incineración de los RSU tiene varias ventajas:

- reducción del volumen y peso de los residuos,
- recuperación de energía para la producción de electricidad y calor, con posibilidad de venta recuperando el costo de inversión,
- disminución y control efectivo de las emisiones al aire,
- cenizas residuales inertes,
- el proceso evita la emisión de metano (al no depositarse en el RS) y
- requiere una pequeña área de instalación.

Por otro lado, las desventajas son:

- emisiones de gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ , metales pesados y compuestos orgánicos como dioxinas,
- alto costo de inversión,
- se requiere de operadores cualificados y
- no se pueden incinerar todos los materiales (ej. residuos de construcción y demolición).

#### 4.1.4.1 Descripción del proceso de incineración

En la Figura 4.15 se presenta un diagrama del proceso de incineración de RSU. Las entradas son de los residuos y materiales auxiliares para el lavado de gases, como:  $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ , coke y  $\text{NH}_4\text{OH}$ . Los productos útiles del proceso son electricidad y calor. Como co-productos resultan:

- gases de combustión,
- escoria y cenizas de la caldera,
- cenizas del filtro y
- residuos de la purificación de los gases de combustión.

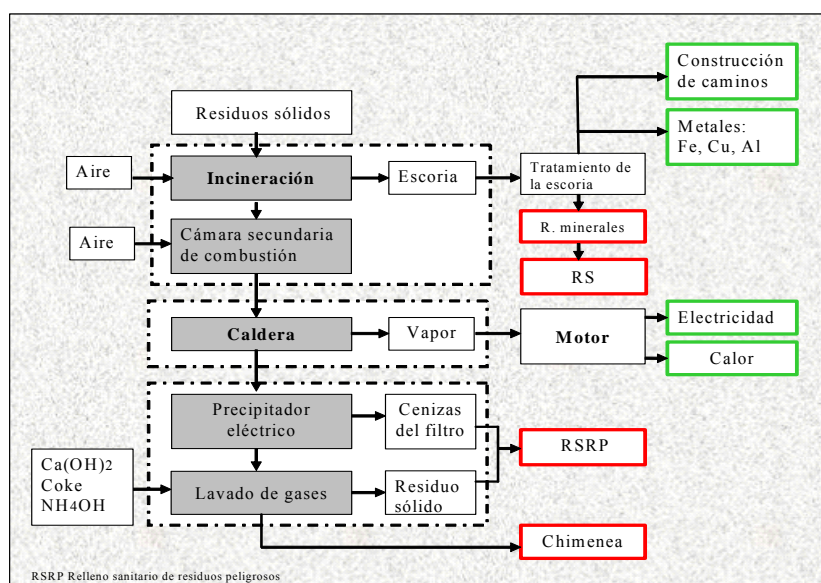


Figura 4.15. Diagrama de flujo del proceso de **incineración** de residuos sólidos urbanos.

El proceso de la incineración comienza con la entrada de residuos a una parrilla de combustión. La temperatura de combustión de los gases en la cámara de combustión, es de al menos 850°C y se mantiene por dos segundos. El oxígeno para la combustión es suministrado vía aire ambiental. El volumen de aire suministrado al incinerador varía entre 3,000 y 4,500 m<sup>3</sup> por tonelada de residuos. El flujo de gases de combustión es de 3,500 a 5,500 m<sup>3</sup> por tonelada de residuos incinerados. El valor calórico depende de la composición de los residuos. La salida de materiales consiste en:

- escoria, a la cual se le realiza un tratamiento mecánico para la recuperación de metales (Fe, Cu y Al),
- vapor generado que se valoriza para la producción de electricidad y de calor y
- gases de combustión, los cuales son tratados para evitar daño ambiental.

El tratamiento de los gases de combustión consiste en la limpieza del gas de acuerdo a los siguientes pasos:

- a) un precipitador electrostático donde el polvo y las cenizas son separadas,
- b) depuración de gases ácidos de combustión para remover el ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF) y metales pesados,
- c) depuración de SO<sub>2</sub> neutro con hidróxido de calcio en suspensión,
- d) filtros con absorbente de coque para reducción de dioxinas/furanos y
- e) reducción catalítica selectiva para la desnitrificación.

#### **4.1.4.2 Evaluación ambiental del proceso de incineración.**

El balance de masa del proceso de incineración se calcula en base a la composición de los RSU de entrada. El poder calórico de los residuos varía con su composición química y se calcula con la siguiente formula (Den Boer et al., 2005):

$$H_u = 34 \times C + 101.6 \times H + 6.3 \times N + 19.1 \times S - 98 \times O - 2.5 \times CA$$

H <sub>u</sub>	valor calórico de los residuos [MJ/kg]
C	% en masa de carbono en los RSU
H	% en masa de hidrógeno en los residuos
N	% en masa de nitrógeno en los residuos
O	% en masa de oxígeno en los residuos
CA	% en masa del contenido de agua en los residuos

El valor utilizado en la herramienta LCA-IWM de las propiedades químicas individuales de la fracción de residuos se presenta en las tablas A III-19 y A III-20 del Anexo III. El volumen de gases de combustión se calcula en base a la composición química de los

residuos de entrada, en base seca de cada fracción. Además, se tiene que sumar el volumen de  $O_2$ ,  $N_2$  y  $H_2O$  del aire de combustión. La cantidad mínima de aire necesaria para la combustión se determina en función de la concentración de C, H, O y S. Se considera un exceso de aire de 1.5.

Los gases de combustión contienen:

- $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$  y  $O_2$ , que son calculados en base a la composición de entrada
- $SO_2$ , HCl y HF, que se calculan basados en la composición química de los residuos y la eficiencia del sistema de purificación de los gases. La eficiencia de purificación para el HCl se considera de 99.95%, para  $SO_2$  99.87% y para HF 95.74%. (tabla A III-22 del Anexo III).

La emisión de metales pesados difiere en función de la composición de los residuos de entrada. La distribución de metales pesados en el flujo de gas, escoria, cenizas y residuos se define por coeficiente de transferencia empírica para los metales respectivos de la fracción de residuos incinerados. Los metales pesados contenidos en la fracción inerte son transferidos a la escoria. En este trabajo se han utilizado los coeficientes de transferencia considerados en la herramienta LCA-IWM de la tabla A III-23 del Anexo III.

Para calcular las emisiones del polvo: PM10,  $NO_x$ , TOC, PCDD/F son usados los valores límites de la directiva de incineración de la Unión Europea, las cuales son multiplicadas por la entrada específica del volumen del flujo de gas (Den Boer et al., 2005). La determinación de las emisiones de:  $N_2O$ , CO,  $NH_3$ , PCB, clorofenoles, clorobenzoles, benzopireno, están basados en la concentración promedio en el flujo de gas de las plantas incineradoras existentes (tabla A III-24 del Anexo III) la cual es análogamente multiplicada por la entrada específica del volumen del flujo de gas.

**Limpieza de los gases.** En el tratamiento de los gases de combustión se emplea el precipitador electrostático, el lavador de dos pasos, el filtro de coke y el catalizador SCR-catálisis por denitrificación. Este tratamiento de purificación requiere de materiales auxiliares: hidróxido de calcio, coke y hidróxido de amonio. La demanda de hidróxido de calcio para eliminar  $SO_2$  y HCl se calcula estequiométricamente basado en el contenido de S y Cl de los residuos. Por lo que respecta al coke y al hidróxido de amonio, el consumo promedio por volumen del flujo de gas se presentan datos utilizado en la herramienta LCA-IWM de una planta de incineración moderna en la tabla A III-25 del Anexo III.

Los residuos sólidos del gas de combustión se calculan basados en la demanda para los materiales auxiliares. Las sales de calcio resultantes tienen aproximadamente 1.2 masa más grande que el hidróxido de calcio. Además para los cálculos se usa un factor de 1.5 para

obtener una estimación de la cantidad de residuos sólidos. En las plantas modernas de incineración el líquido del lavador húmedo es inyectado dentro de un aspersor seco, evitando el agua residual. Las sales del tratamiento del gas pueden ser recicladas o llevadas al RS.

**Residuos sólidos resultados de la incineración.** Los residuos sólidos de las plantas de incineración son ricos en metales pesados. El 94% de la entrada de residuos inertes, componentes de los RSU salen de la incineración en forma de escoria (incluyendo las cenizas de la caldera) y el 6% restante en forma de cenizas del filtro. Los metales pesados en la escoria son inmóviles. Las cenizas libres debido a su estado físico (fracciones finas) son fácilmente solubles. El cálculo de los metales pesados en los residuos sólidos de la incineración se basa en la composición de los residuos y en los coeficientes de transferencia propuestos en la tabla A III-23 del Anexo III. Para una referencia de rangos potenciales de metales individuales contenidos en los residuos sólidos de la incineración se presentan en la tabla A III-26 del Anexo III.

Las cenizas del filtro son normalmente estabilizadas con cemento, antes de llevarse al RS. Se utilizan aproximadamente 500 kg de cemento y 500 L de agua por tonelada de ceniza de filtro. El material estabilizado se deposita en un RS de residuos especiales o peligrosos. En la tabla A III-27 del Anexo III se presenta los resultados de un lixiviado probado y modelado de cantidades de lixiviado de cenizas de filtro estabilizadas en un RS especial para 500 años.

La escoria de las plantas de incineración puede ser tratada para:

- recuperar metales valiosos y
- recuperar residuos para material de construcción de caminos.

El tratamiento mecánico recupera aproximadamente el 40% de los metales ferrosos. La ventaja es el bajo consumo de energía eléctrica, aproximadamente 0.017 MJ/kg de residuos. El tratamiento mecánico simple es modelado para la recuperación de metales; aunque existen otros tratamientos más sofisticados. Se contabiliza un beneficio por la recuperación de metales. La sustitución de metales primarios por metales recuperados es contabilizado en una relación 1:1.

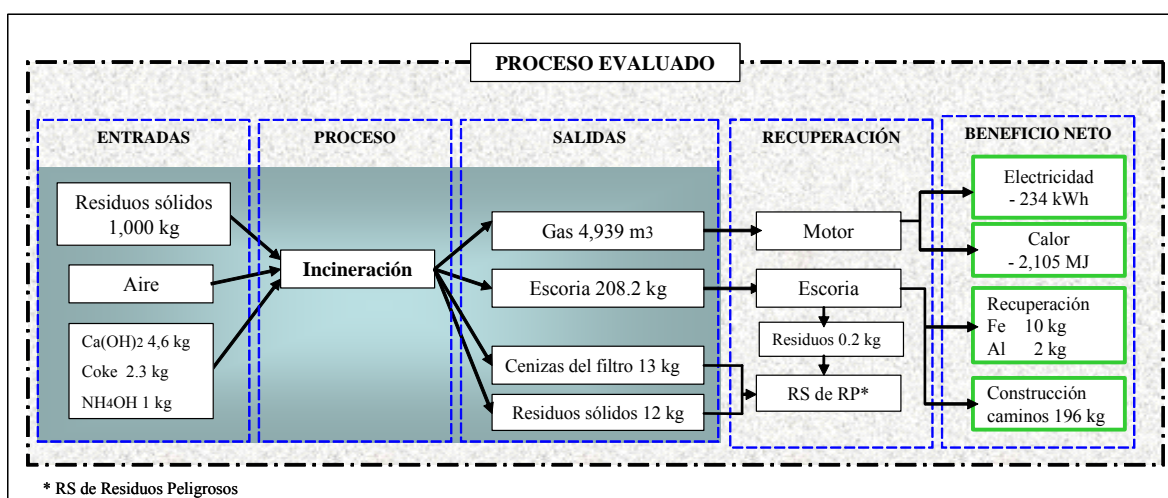
La parte remanente de escoria puede ser llevada al RS o recuperada para la construcción de caminos. La cantidad de emisiones es difícil de estimar, las tablas A II-28 y A II-29 proporcionan datos utilizados en la herramienta LCA-IWM de los contaminantes del lixiviado de la escoria usada en la construcción de caminos y en el RS, respectivamente. Los resultados se basan en simulaciones de lixiviado en el cual se considera la cantidad de 1,205 L/t de escoria. En el caso de la escoria usada en la construcción de caminos, las emisiones se

consideran como emisiones al suelo industrial. El tratamiento del lixiviado de la escoria depositado en el RS no se evalúa.

**Balance de energía.** Las plantas de incineración modernas están equipadas con módulos de recuperación de energía. La eficiencia promedio es de aproximadamente 10% para la producción de electricidad y de 20-30% del contenido de energía (neto) para la producción de calor. De la producción de energía se resta la empleada para la operación del proceso de incineración. Se contabiliza como un beneficio la energía eléctrica producida en una planta de incineración pues sustituye la energía generada de forma convencional.

#### 4.1.4.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de incineración

En la Figura 4.16 se presenta el diagrama del proceso de incineración evaluado. Se indican las entradas de 1,000 kg de residuos, aire para la combustión y materiales auxiliares para la limpieza de los gases. Las salidas pasan a la sección de tratamiento para la recuperación de energía a partir del gas generado (4,939 m<sup>3</sup>/ton): esta cantidad corresponde al volumen de gas del CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O para cada fracción de residuos y la cantidad de aire adicional (929 m<sup>3</sup>/t) requerida para la combustión. El valor calórico de los residuos determinado es de 8,422 MJ/ton. Los beneficios obtenidos son la recuperación de electricidad (-234 kWh ) y calor (-2,105 MJ). En cuanto a la escoria (208 kg) se recupera el 6% de metales como el Fe (10 kg) y el Al (2 kg), el resto de los residuos se utilizan en la construcción de caminos. El balance de masa se basa en las características de los residuos definidos por parámetros utilizados en la herramienta LCA-IWM en las tablas A III-19, A III-20 y A III-21 del Anexo III.



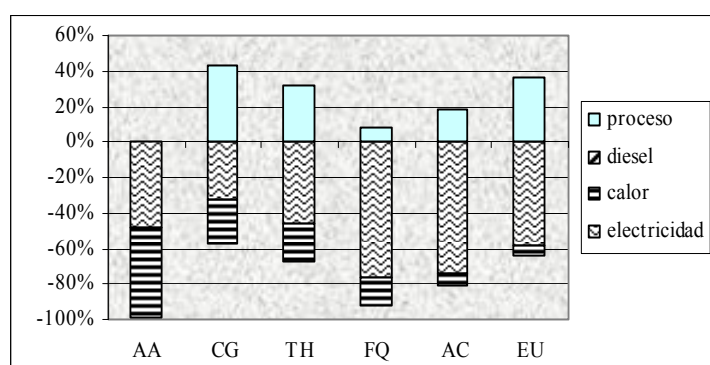
**Figura 4.16.** Proceso de **Incineración** de residuos sólidos evaluados ambientalmente.

En la Tabla 4.10 se presentan los resultados de la evaluación del proceso de incineración. Los resultados de las categorías presentadas corresponden a electricidad, calor, diesel y el proceso. En la Figura 4.17 se presenta el impacto ambiental total de los insumos y emisiones del proceso de incineración.

**Tabla 4.10.** Categorías de impacto para el proceso de **incineración**.\*

Categoría de impacto	Electricidad neta	Calor neto	Diesel del proceso	Emisión Proceso	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	-1.19E+00	-1.24E+00	6.39E-03	9.00E-03	-2.41E+00
<b>Calentamiento global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	-1.83E+02	-1.42E+02	9.54E-01	2.46E+02	-7.68E+01
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	-4.56E+01	-2.08E+01	1.15E-01	3.17E+01	-3.46E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	-4.13E-02	-8.32E-03	1.95E-04	3.89E-03	-4.55E-02
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	-1.17E+00	-1.12E-01	5.50E-03	2.91E-01	-9.89E-01
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	-1.22E-01	-1.21E-02	1.17E-03	7.45E-02	-5.82E-02

\* para una tonelada de residuos



**Figura 4.17.** Impacto ambiental del proceso de **incineración**.

Se analizan las categorías de impacto del proceso de incineración. En la Tabla 4.10 se observan valores negativos de la electricidad y el calor indicando beneficios ambientales por la recuperación de energía. Para todos los indicadores el diesel de transporte y las emisiones del proceso presentan cargas ambientales adversas ambientalmente. A continuación se analizan los indicadores ambientales de las emisiones del proceso.

- La incineración presenta un beneficio ambiental en todas las categorías de impacto.
- En la Figura 4.17 se presentan un beneficio ambiental en la categoría de **agotamiento abiótico (AA)** correspondiendo a un 51% al calor y el 49% a la electricidad debido a la recuperación de energía de la incineración.

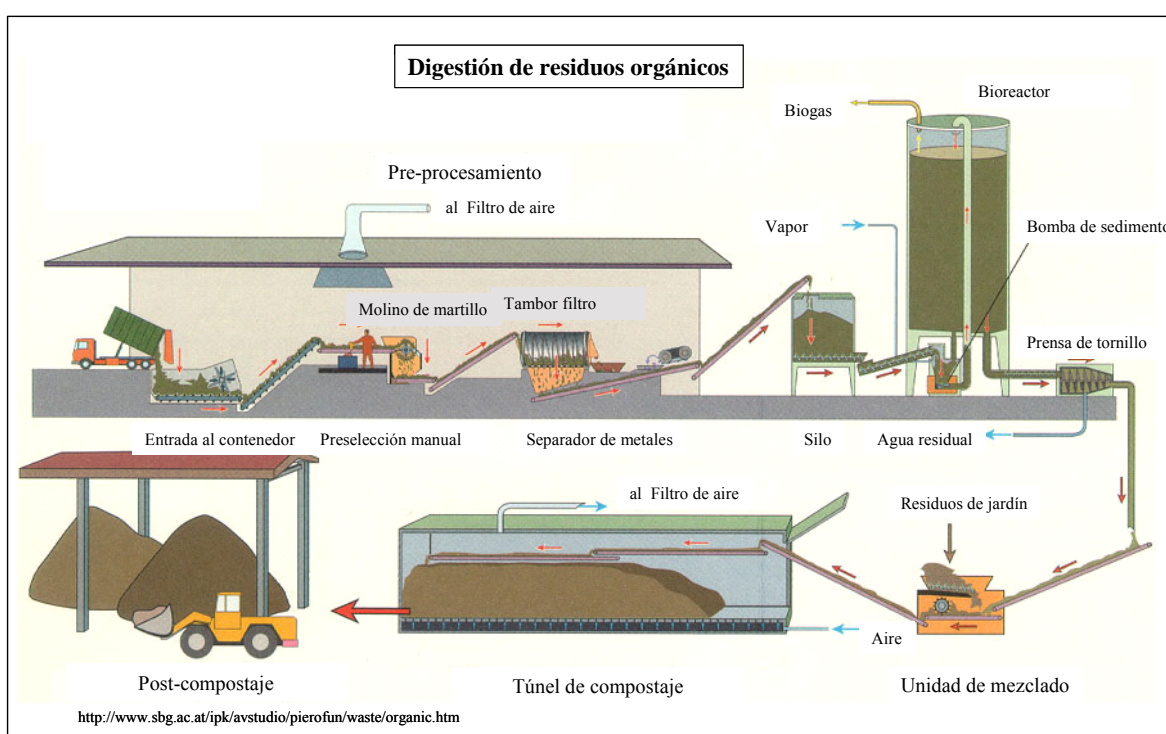
- En la categoría de **calentamiento global (CG)** se presenta un beneficio ambiental, por la recuperación de energía, de 31% y 24% correspondiendo a la etapa de electricidad y al calor respectivamente. El 44% de la categoría corresponde al impacto ambiental adverso derivado del proceso, causado por las emisiones de CO<sub>2</sub> contribuyendo este en un 99%, debido a los gases de combustión de los residuos.
- La electricidad contribuye en un 46% en el impacto de **toxicidad humana (TH)** y el calor en un 21%, presentando ambos insumos un beneficio ambiental. El impacto ambiental adverso en esta categoría corresponde al proceso contribuyendo en un 32% al impacto total. La contribución del proceso es causada por emisiones provenientes del proceso de incineración, tales como las emisiones al aire de HF en un 31%, As 3% y NO<sub>2</sub> en un 2%. Las emisiones al suelo industrial de Pb contribuye en un 48% y Hg, en un 15% al impacto del proceso.
- Se observa un beneficio ambiental en la categoría de **fotooxidación química (FQ)** correspondiente a la electricidad contribuyendo en un 77% y en un 16% al calor. El 7% del impacto ambiental adverso corresponde al proceso, debido a las emisiones de CO al aire, contribuyendo en un 96%, SO<sub>2</sub> en un 3% y metano 1%.
- El 18% del impacto ambiental adverso en la categoría de la **acidificación (AC)** corresponde al proceso, debido a emisiones al aire de NO<sub>2</sub> contribuyendo en un 94% y 5% de amoníaco. El 74% y el 7% de esta categoría corresponde a la electricidad y al calor, empleados en el proceso, considerados como beneficios ambientales, por la recuperación de energía.
- La electricidad y calor presentan un beneficio ambiental en la categoría de **eutrofización (EU)**, contribuyendo en un 58% y en un 6% respectivamente. El 35% del impacto ambiental adverso en esta categoría corresponde al proceso de incineración. El impacto es causado por las emisiones de NO<sub>2</sub> contribuyendo en un 96% y 4% de amoníaco.

#### ***4.1.5 Tratamiento: DIGESTIÓN***

La digestión es un proceso de descomposición de la materia orgánica por la acción de los microorganismos. Además de aplicarse a los residuos urbanos, también se usa con otros sustratos como estiércol, residuos de mataderos y fangos procedentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Los microorganismos actúan en condiciones sin oxígeno (anaeróbica), durante el proceso se produce biogás, compuesto principalmente de metano y

dióxido de carbono (McDougall et al. 2002). Los procesos de digestión se pueden dividir en procesos húmedos o secos, termofílicos o mesofílicos y de una o dos fases. La tecnología aquí aplicada es un proceso termofílico en condiciones anaeróbicas con control de emisiones.

En México el proceso de digestión es una técnica poco utilizada en residuos municipales. Sin embargo, dado que la cantidad de residuos orgánicos generados en Chihuahua es considerable, se ha tratado también en este estudio como opción posible. En la Figura 4.18 se presenta un diagrama del proceso de digestión de residuos orgánicos.

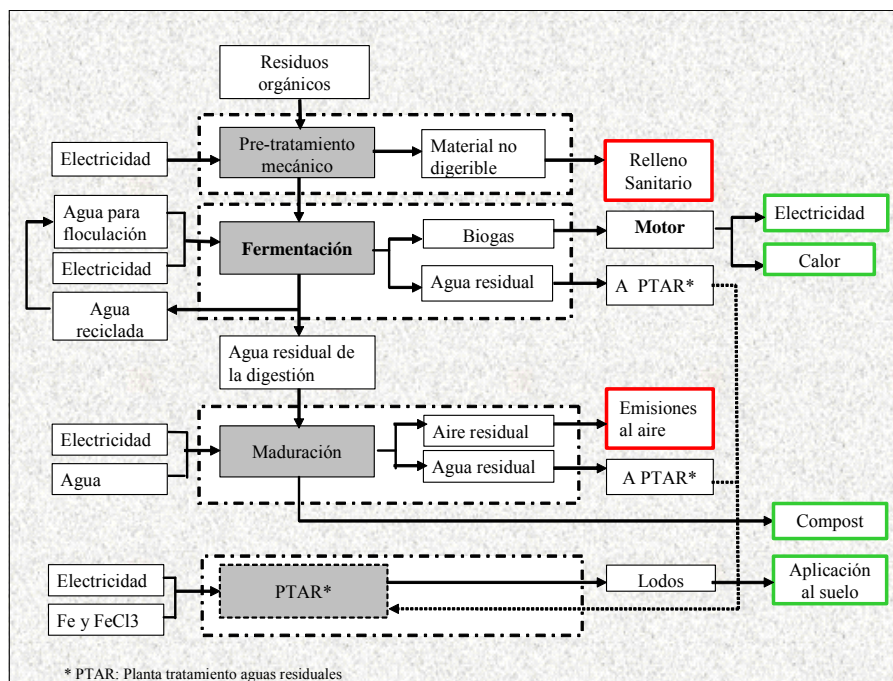


**Figura 4.18.** Planta de **digestión** de residuos orgánicos.

#### **4.1.5.1 Descripción del proceso de digestión**

En la Figura 4.19 se presenta un diagrama de flujo del proceso de digestión. Se presentan como material de entrada los residuos orgánicos y de jardín e insumos requeridos para el proceso. Estos residuos son previamente sometidos a un pre-tratamiento mecánico para la separación de material no biodegradable. En la fase de fermentación o digestión se produce biogás, agua residual y el residuo de la digestión. El biogás producido alimenta un cogenerador para producir electricidad y calor. El compost fresco pasa a la etapa de maduración donde se presentan emisiones al aire y de líquidos recuperados. De esta etapa se produce el compost maduro. Los líquidos provenientes de la etapa de fermentación y de maduración se tratan en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El compost

producido al igual que los fangos de la PTAR son aplicados en la agricultura. Los nutrientes contenidos en el compost sustituyen a los fertilizantes artificiales. La aplicación y producción de estos son contabilizadas como beneficios ambientales en la evaluación.



**Figura 4.19.** Diagrama de flujo del proceso de **digestión**.

#### 4.1.5.2 Evaluación del proceso de digestión

La evaluación del proceso de la digestión considera los residuos orgánicos y de jardín. La salida de compuestos del proceso de digestión son:

- biogas,
- agua residual y
- compost

A continuación se presentan cada una de las etapas del proceso de digestión modelado con los datos empleados para el cálculo de las emisiones y beneficios obtenidos, considerando las características químicas propuestas para residuos orgánicos y de jardín ( tabla A III-1 del Anexo III).

**Pre-tratamiento mecánico.** En esta parte del proceso, se separa el material no apto para digestión, representa un 5% del material de entrada y se transportan al RS moderno. La Tabla 4.11 presenta el consumo de electricidad durante el pre-tratamiento mecánico, para las diferentes fases.

**Tabla 4.11.** Consumo eléctrico de la etapa de pre-tratamiento mecánico.\*

Parámetros	Unidad	Valor
Tratamiento del flujo de gas	kWh	8.1
Tamizado o Cribado	kWh	3.0
Separador magnético	kWh	0.5
Molienda	kWh	2.6

\* para una tonelada de residuos orgánicos de entrada al digestor

**Fermentación.** Durante esta etapa, se produce biogás y agua residual. Los parámetros utilizados en la etapa de fermentación se presentan en la Tabla 4.12. Los residuos son calentados en condiciones termofílicas (50 a 60°C). En base a la cantidad de residuos de entrada, composición de materia orgánica y el valor propuesto de biogás por tonelada de residuos se calcula el volumen de gas producido (tabla A III-1 del Anexo III).

La emisión de agua durante esta etapa de fermentación se presenta con metales pesados y nutrientes. Una parte de estos se filtran al agua y otro parte permanece en los residuos de la digestión o en el compost (tabla A III-2 del Anexo III).

**Tabla 4.12.** Parámetros empleados en la etapa de fermentación.

Parámetros	Unidad	Valor
Valor calórico del metano	MJ/Nm <sup>3</sup>	37.8
Densidad del diesel	kg/L	0.84
Densidad de los residuos orgánicos	t/m <sup>3</sup>	1.5
Parte del Carbono biodegradable	%	45
Degradación anaeróbica de la fracción orgánica	%	60
Producción del biogas (materia orgánica seca)	m <sup>3</sup> /kg ODM*	0.38
Conversión de metano a biogas	Volumen %	58
Eficiencia eléctrica del cogenerador	%	30
Eficiencia de calor del cogenerador	%	56
Consumo de electricidad	kWh/t bioresiduo	80
Consumo de calor	MJ/t bioresiduo	324

\* ODM=materia orgánica seca

**Producción de energía.** El biogás generado es usado para producir energía. En un cogenerador, el biogas es quemado para producir electricidad y calor. En base al exceso de oxígeno del aire de entrada, se calcula la cantidad del gas emitido por tonelada de residuos que entran al proceso. La producción de electricidad y calor se determina en base a la cantidad de biogas producido, la cantidad de metano en el biogas, el valor calórico del metano y la eficiencia eléctrica y térmica del cogenerador. Combinando este valor con la carga específica,

conduce a las emisiones propuestas por el biogás en la planta de digestión (tabla A III-3 del Anexo III).

**Maduración.** En el proceso de maduración, el residuo de la digestión es tratado aeróbicamente para producir compost comercial. Las emisiones al agua difícilmente ocurren en esta etapa (tabla A III-4 del Anexo III). Las emisiones al aire, consisten en emisiones de C y N, provenientes de la descomposición de la materia orgánica durante el proceso. Debido al carácter difuso de estas emisiones son liberadas directamente al aire (tabla A III-5 del Anexo III).

**Tratamiento de aguas residuales.** En el tratamiento de las aguas residuales la eliminación de fósforo es opcional. Se supone una demanda de 2.7 kg de Fe precipitante para eliminar un kg de fósforo, aumentando con esto la contaminación por metales pesados. En la tabla A III-6 del Anexo III, se considera el contenido de metales pesados para la remoción de fósforo en la PTAR. Además se considera los coeficientes de eliminación de contaminantes en la PTAR, en las etapas de sedimentación, proceso de lodos activados y eliminación de fósforo (tabla A III-7 del Anexo III).

Durante el tratamiento de las aguas residuales se genera agua residual y lodos. En la sedimentación preliminar el 20% del nitrógeno eliminado es liberado al aire como amonio, mientras que el resto permanece en los lodos de agua residual. Posteriormente en el proceso de lodos activados el 50% del nitrógeno es eliminado y se asume que el 2% se libera al aire como amonio, mientras que el resto permanece en los lodos de aguas residuales. Adicionalmente del total de carbono orgánico (TOC) eliminado en la sedimentación preliminar, el 0.2% es liberado al aire como metano y el 0.1% como compuestos orgánicos volátiles no metano (NMVOC). En la sedimentación preliminar y el proceso de lodos activados, el 30% de la eliminación del TOC es emitida al aire y el resto es retenido en los lodos. Todos los metales pesados no eliminados y nutrientes no nitrogenados son asumidos como contenidos en los lodos. En el cálculo de la calidad del efluente, se considera los metales pesados y la carga de nutrientes de la limpieza del agua y los lodos por la adición de precipitantes.

El consumo de energía eléctrica en la PTAR se ha estimado en 0.23 kWh por m<sup>3</sup> de agua residual tratada. El consumo de electricidad calculada en la PTAR para una tonelada de residuos fue de menos de 1% del consumo de electricidad del proceso de digestión.

**Estabilización de lodos.** Las aguas residuales de la etapa de fermentación y maduración pasan a la PTAR. Los lodos obtenidos en la PTAR se estabilizan por digestión anaerobia. Las emisiones al aire son de biogás, el cual se usa para la producción de energía. Las emisiones de

los lodos contaminados al agua se suponen insignificantes para la etapa de fermentación. Los lodos estabilizados son semejantes al compost, disponible para esparcir en la tierra.

Antes de esparcir el lodo en la tierra, éste se debe secar. La eliminación del agua se hace por centrifugado en combinación con la adición de poli electrolitos y prensa con filtros con la adición de cloruro férrico e hidróxido de calcio. La contaminación por hierro se supone es igual a la contaminación del Fe-precipitante usado en la eliminación del fósforo (tabla A III-6 del Anexo III). La producción y el uso de los agentes de remoción de agua no se contabilizan en este modelo de digestión. El consumo de energía es bajo y sin embargo, es parcialmente compensado por la producción de energía en el proceso de estabilización de lodos (tabla A III-8 del Anexo III).

Las emisiones al aire causadas por la estabilización de lodos se determinan con la ayuda de las tablas A III-3 y A III-8 del Anexo III. A través de la cantidad de cloruro férrico se calcula la contaminación adicional de los lodos para la etapa de estabilización. Se asume que son aplicables para el cloruro férrico los valores específicos de contaminación por el uso del hierro precipitante. La cantidad de carbono permanente en los lodos se determina con los parámetros de la tabla A III-6 del Anexo III.

**Aplicación del compost.** Existen estándares de calidad ambiental para el compost. Estos estándares, consideran el contenido de metales pesados como uno de los criterios más importantes, para la aplicación del compost. El compost tiene que cumplir los requisitos de calidad para ser aplicado como fertilizante. Se consideran los límites de metales pesados, la cantidad y los requerimientos previstos en la Unión Europea para el compost como lo propuso la Directiva de la Unión Europea en el tratamiento biológico de residuos incluidos en la tabla A III-9 y A III-10 del Anexo III.

La calidad del compost depende de la contaminación de los residuos orgánicos de entrada y el tratamiento en cada etapa. El contenido de metales pesados del compost producido proviene del coeficiente de filtrado durante la digestión (tabla A III-2). La calidad de los lodos producidos en la PTAR se deriva de las tablas A III-6, A III-7 y A III-8 del Anexo III.

En cuanto a las emisiones por la aplicación del compost y los lodos de la PTAR en las tierras de cultivo con el propósito de fertilizar, se consideran los metales pesados contenidos en el compost y los lodos. En cuanto a las emisiones basadas en el nitrógeno se esparcen en la tierra, los parámetros considerados se presentan en la tabla A III-11 del Anexo III. En este modelo no se considera ninguna otra emisión.

El nitrógeno y el fósforo causan un impacto en la categoría de eutrofización como emisiones en la tierra agrícola. En este proceso el compost y los lodos de la PTAR son aplicados al suelo agrícola para proporcionar nutrientes. Este efecto no es contabilizado como emisiones de impacto ambiental, pues se supone que remplazan los nutrientes de otros productos empleados como fertilizantes artificiales.

**Sustitución de fertilizantes.** La aplicación del compost como fertilizante agrícola sustituye abonos sintéticos, por lo tanto ahorra recursos y previene emisiones. La aplicación de compost proporciona efectos positivos en los suelos agrícolas, como la introducción de nutrientes y materia orgánica; además del secuestro de carbono en el suelo.

**Incorporación de metales al suelo.** Los metales contenidos en el compost y en los lodos producidos son los nutrientes que se adicionan al suelo. Uno de los nutrientes es el nitrógeno, principalmente orgánico, contenido en el compost, presentando una baja liberación de N al suelo. Aunque el uso del compost como un fertilizante efectivo es difícil, éste aumenta la fertilidad del suelo en un largo periodo de tiempo y previene el lixiviado de nutrientes. De aquí que en este análisis se considere que todos los nutrientes en el compost sustituyen minerales fertilizantes 1:1, aunque los fertilizantes minerales no pueden ser remplazados por los nutrientes del compost en su totalidad.

Se ha considerado el cálculo de la sustitución de nutrientes, principalmente monofertilizantes. El uso de recursos y las emisiones debido a la producción de los fertilizantes se ha calculado también. Se muestran los valores propuestos para la sustitución de minerales fertilizantes en la tabla A III-12 del Anexo III.

Basados en los valores propuestos para el contenido de nutrientes y metales pesados de fertilizantes minerales se calculó las emisiones evitadas al suelo agrícola. Aparte de las emisiones de metales pesados, la aplicación de fertilizante al suelo agrícola causa también algunas emisiones al aire. Se muestran los factores de emisión por la aplicación de fertilizantes en la tabla A III-13 del Anexo III. Basados en los factores de emisiones mencionadas anteriormente y la cantidad anual de nitrógeno sustituido, se calcularon las emisiones al aire.

**Introducción de materia orgánica al suelo.** Las ventajas de la materia orgánica, contenida en el compost aparte de los nutrientes, es la de prevenir el lixiviado de nutrientes, proporciona energía a los organismos del suelo, mejora la estructura de la estabilidad del suelo, previene la erosión, mejora la permeabilidad del suelo, drena y almacena agua. Aparte de la aplicación al suelo agrícola, el compost puede ser usado para jardinería. Como una reposición de la materia orgánica al suelo se sustituye el uso de turba. El cálculo de prevención de la emisión de CO<sub>2</sub>

(la turba se supone una fuente fósil, así que la liberación de CO<sub>2</sub> durante la aplicación tiene un efecto de calentamiento global) tiene dos sustituciones: reemplazo por volumen: 1 m<sup>3</sup> de turba por 1 m<sup>3</sup> de compost o por contenido de materia orgánica: 1 kg de turba (base seca) por 1 kg de materia orgánica del compost. Usando valores promedio propuestos, ambos métodos conducen aproximadamente a los mismos resultados. Para impedir la emisión de CO<sub>2</sub> fósil, la sustitución de turba por compost se contabiliza un valor de 2 kg CO<sub>2</sub>/kg de materia orgánica seca.

**Secuestro de carbono.** El carbono que entra al suelo a través de la aplicación de compost es parcialmente convertido en sustancias húmicas, la cual tiene un rango de vida de 500 a 2000 años. El carbono emigra de un periodo corto regenerativo a un periodo largo del ciclo del carbono. El potencial de secuestro se basa en la cantidad de carbono que será liberado al suelo después de un periodo de 100 años después de la aplicación. Este periodo se basa en la selección del tiempo de referencia del calentamiento global. El potencial de secuestro de carbono por la aplicación del compost es estimado en 8.2% del carbono introducido. Suponiendo 2.5 kg de materia orgánica por kg de C conduce a una fijación del carbono de 0.75 kg de CO<sub>2</sub>/kg de materia orgánica seca de compost.

#### **4.1.5.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de digestión**

A continuación se presenta la Figura 4.20 con el diagrama del proceso evaluado, de digestión de residuos orgánicos. Se indican las entradas de residuos orgánicos (1,000 kg) y los insumos requeridos para el proceso (electricidad, calor, diesel y agua). Las salidas son principalmente el biogás y el residuo de la digestión. Estas salidas pasan a la sección de recuperación para la producción de energía a partir del biogás y la producción de compost a partir de los residuos de la digestión. El beneficio neto del sistema obtenido por la producción de electricidad es de -177 kWh y por el calor es de -1,401 MJ a partir del biogás producido. El otro beneficio es la aplicación del compost producido en sustitución de fertilizantes artificiales y los lodos resultantes de la PTAR. La producción de compost (423 kg) representa el 42% de los residuos orgánicos de entrada. El balance de masa se basa en las características de los residuos presentados en la tabla A III-1 del Anexo III.

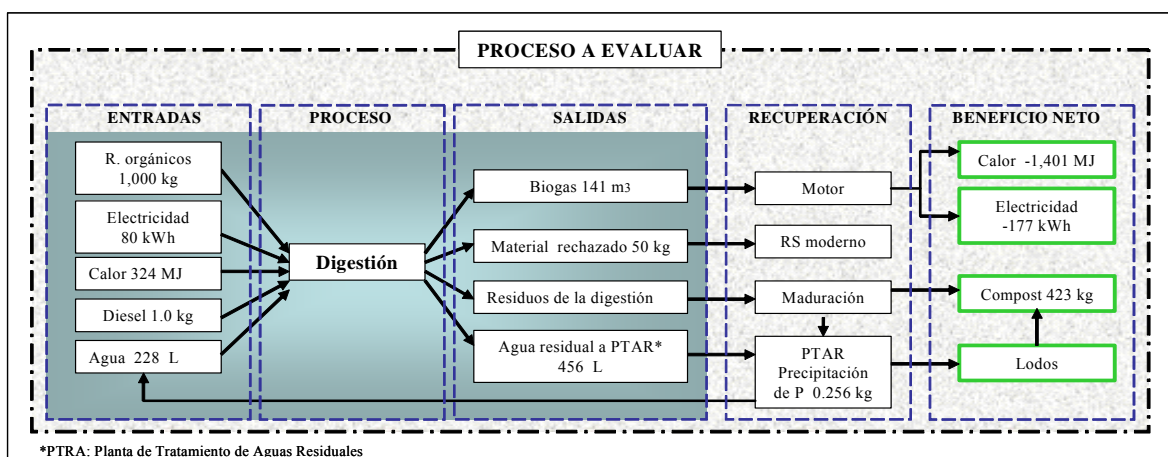


Figura 4.20. Diagrama de proceso de **digestión** de residuos orgánicos.

En la Tabla 4.13 se presentan los resultados de la evaluación ambiental del proceso de digestión. Los resultados de las categorías analizadas corresponden a electricidad, calor, diesel y el proceso. Se observa para todas las categorías de impacto de la etapa estudiada con un mayor impacto ambiental es el proceso de digestión. En la Figura 4.21 se presenta la contribución de insumo y del proceso al impacto ambiental total.

Tabla 4.13. Categorías de impacto para el proceso de **digestión** de residuos orgánicos.\*

Categorías de impacto	Electricidad neta	Calor neto	Diesel del proceso	Emisión Proceso	Beneficio compost	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	-9.55E-01	-8.77E-01	2.43E-02	0.00E+00	-6.36E-02	-1.87E+00
<b>Calentamiento global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	-1.47E+02	-1.00E+02	4.45E+00	5.69E+01	-4.84E+02	-6.69E+02
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	-3.66E+01	-1.47E+01	3.52E-01	2.03E+01	-1.13E+02	-1.43E+02
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	-3.32E-02	-5.89E-03	1.27E-03	3.45E-02	-2.70E-03	-5.96E-03
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	-9.43E-01	-7.97E-02	2.87E-02	2.96E+00	-4.40E-01	1.53E+00
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	-9.79E-02	-8.54E-03	6.15E-03	8.40E-01	-9.10E-02	6.49E-01

\* para una tonelada de residuos orgánicos

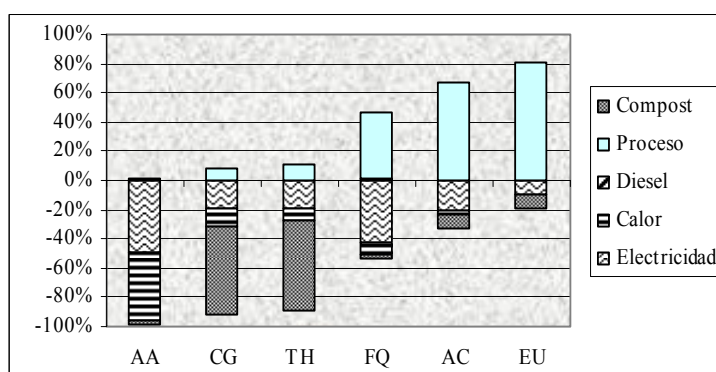


Figura 4.21. Impacto ambiental del proceso de **digestión** de residuos orgánicos.

Los valores positivos de las categorías de impacto corresponden a impactos ambientales adversos. Los valores negativos de la electricidad y el calor, indican un beneficio ambiental por la recuperación de energía. La producción del compost, al evitar el uso de fertilizantes artificiales. A continuación se presentan el análisis del proceso de digestión:

- Excepto en los indicadores de acidificación y eutrofización, los valores totales de los demás indicadores presentan un beneficio ambiental debido a la influencia de la recuperación de energía en forma de electricidad y calor y al beneficio obtenido por el compost producido. En los dos indicadores positivos los impactos de las emisiones del proceso y los derivados del consumo de diesel no son compensados por la recuperación de energía y por los beneficios del compost.
- En la categoría de **agotamiento abiótico (AA)** la electricidad y el calor presentan un beneficio ambiental, por la recuperación de energía, contribuyendo en un 49% y un 46% respectivamente. El compost producido, considerado como un beneficio ambiental corresponde al 3% de esta categoría.
- El compost, electricidad y el calor presentan un beneficio ambiental en la categoría de **calentamiento global (CG)** contribuyendo en un 61%, 18% y 13% respectivamente. El proceso presenta un impacto ambiental adverso en esta categoría, contribuyendo en un 7%. Los compuestos que contribuyen al impacto ambiental en el proceso son el  $N_2O$  en un 57% y metano en un 43%.
- En la categoría de **toxicidad humana (TH)** el 11% del impacto ambiental adverso corresponde al proceso. Este impacto es causado por compuestos emitidos al aire como el HF, que contribuye en un 18%, el As en un 10% y  $NO_2$  en un 4%. El impacto al suelo agrícola, el cromo contribuyendo en un 23%, Pb en un 21%, Ni en un 9%, Cd 5%, Zn 5% y cobre 2%. El compost, electricidad y el calor presentan un beneficio ambiental contribuyendo a esta misma categoría en un 61%, 19% y en un 8% respectivamente.
- En la categoría de **fotooxidación química (FQ)**, la electricidad, el calor y el compost presentan un beneficio ambiental contribuyendo en un 43%, 8% y 3% respectivamente. El impacto ambiental adverso en esta categoría corresponde al 44% del proceso y 2% al diesel usado en el proceso. Las emisiones del proceso se deben al CO, contribuyendo en un 70%, el metano en un 19% y  $SO_2$  en un 11%.
- El 66% del impacto ambiental adverso en la categoría de **acidificación (AC)** se debe a emisiones provenientes del proceso, contribuyendo con el amoníaco en un 86%,  $NO_2$  en un 11% y  $SO_2$  en un 3%. El beneficio ambiental de la categoría corresponde a la

electricidad y al calor, contribuyendo en un 21% y 2% respectivamente debido a la recuperación de energía. El compost producido se considera un beneficio ambiental y contribuye en un 10% en la categoría.

- En la categoría de **eutrofización (EU)** el 80% del impacto ambiental adverso corresponde al proceso. El impacto se debe a emisiones al aire, tales como el amoníaco contribuyendo en un 66% y 10% de NO<sub>2</sub> al impacto del proceso. Las emisiones al agua son de nitrógeno en un 15%, demanda química de oxígeno 6% y fósforo 3%. El beneficio ambiental en esta misma categoría corresponde a la electricidad, contribuyendo en un 9%, debido a la recuperación de energía. Otro beneficio ambiental es el compost, contribuyendo a la categoría en un 8%.

#### ***4.1.6 Tratamiento: COMPOSTAJE***

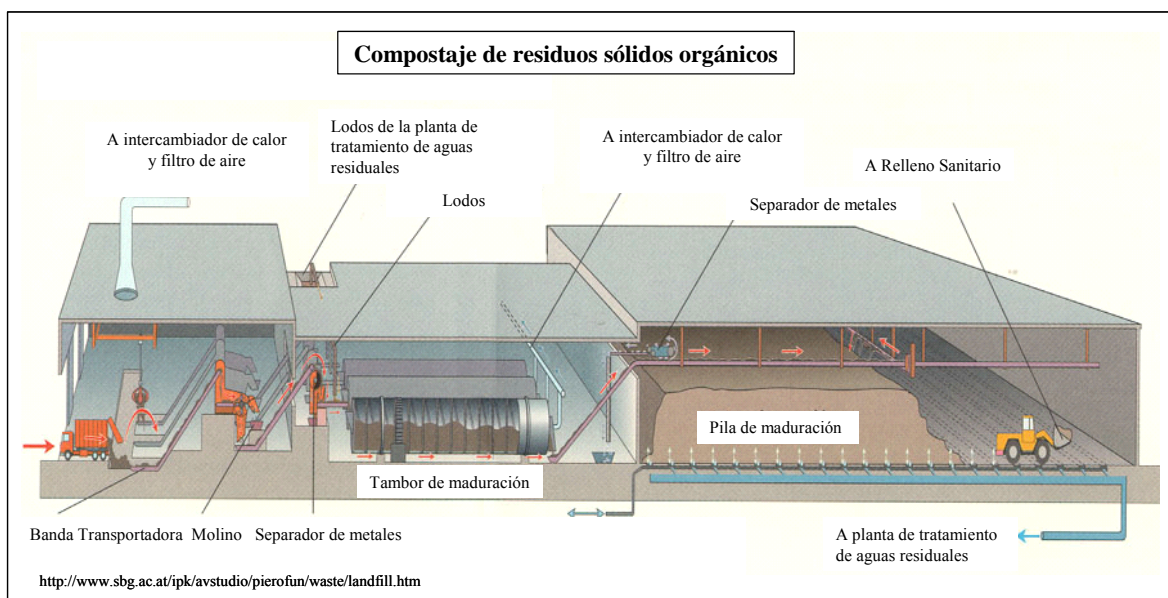
El compost es el producto obtenido por la descomposición biológica de la materia orgánica. Consiste en la acción de descomposición de los microorganismos sobre la fracción orgánica de los residuos sólidos. Los residuos biodegradables son compostables con el propósito de regresar al suelo agrícola materiales fertilizantes para mejorar el suelo. El proceso de compostaje es un proceso en condiciones aeróbicas. Los residuos orgánicos de alimentos y del jardín son aprovechables para compostar.

La cantidad de residuos orgánicos promedio obtenidos de los hogares esta entre 25% y 60% en peso de los residuos que se recolectan. Esta cantidad depende de la ubicación geográfica y la capacidad económica de los países (McDougall et al., 2002). En general en México es de alrededor de 50% en peso de los RSU, en la ciudad de Chihuahua se ha determinado en este estudio que la fracción compostable es del 46% en peso.

En México en el año 2005, el Instituto Nacional de Ecología (INE) identificó 61 plantas de compostaje que estaban operando o que estuvieron operando en algún momento. Estos datos deberían actualizarse porque posiblemente existan realmente más plantas en operación que no se contabilizaron en este estudio. En el compostaje también se emplean materiales, como estiércol y orín de animales (Rodríguez y Córdova, 2006).

Una de las ventajas del compostaje es reducir el volumen de residuos depositados en el RS, esto es debido a la pérdida de agua por evaporación. El compostaje de residuos orgánicos disminuye el volumen más del 50% y consume casi 50% de la masa orgánica en base seca por la liberación de CO<sub>2</sub> y agua principalmente (Tchobanoglous y Kreith, 2002). Según McDougall et al. (2002), el contenido de humedad de la fracción orgánica de residuos generada en los hogares es de 60-70%, mientras que el compost producido con esta materia

prima es de 30-40%. El compostaje es un método económico para el tratamiento de residuos orgánicos. Sin embargo, tiene desventajas del olor y la necesidad de gran cantidad de terreno. En la Figura 4.22 se presenta el diagrama del proceso de compostaje de residuos sólidos orgánicos.

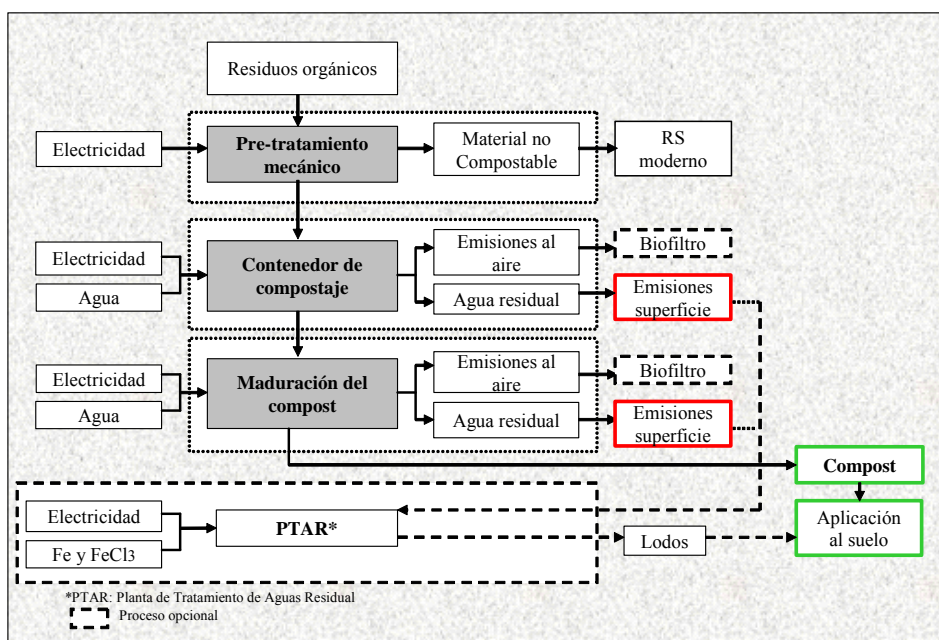


**Figura 4.22.** Planta de **compostaje** de residuos orgánicos.

En la evaluación del proceso se considera la utilización de los residuos orgánicos para compostar. La herramienta LCA-IWM tiene la opción de aplicar control de emisiones o no hacerlo, en este caso no se aplica control de emisiones al proceso de compostaje, para equipararlo al proceso de compostaje realizado en México.

#### **4.1.6.1** Descripción del proceso de compostaje

La Figura 4.23 presenta un diagrama típico de compostaje. Consiste de las siguientes etapas: primeramente la materia orgánica es sometida a un tratamiento mecánico para homogenizar, mezclar y extraer contaminantes o material no biodegradables. Posteriormente el proceso consiste de dos etapas: compostaje intensivo en contenedores de compostaje y la etapa de maduración en pilas. En la primera etapa se produce compost fresco y en la segunda etapa el compost fresco se madura. La total automatización de la primera etapa (compostaje intensivo) reduce el tiempo de producción de compost fresco entre 10-14 días. La desventaja es la mineralización y no humificación del compost.



**Figura 4.23.** Diagrama de flujo del proceso de compostaje.

En la segunda etapa, la de maduración del compost, requiere de ocho semanas aproximadamente. Después del proceso de compostaje, el producto puede ser utilizado como compost de alta calidad.

En ambas fases del proceso de compostaje se generan emisiones de gases y agua. En nuestro estudio se ha considerado una planta de compostaje sin purificación de gas con filtro y sin tratamiento de lixiviado. Aunque ambientalmente la recolección de emisiones es recomendable, en México no se aplica la tecnología de control de emisiones en el compostaje de residuos orgánicos domiciliarios. El compost se aplica en la agricultura por dispersión. Esto se contabiliza como un beneficio por el contenido en nutrientes pues se supone que sustituye el uso de fertilizantes artificiales.

#### **4.1.6.2 Evaluación ambiental del proceso de compostaje**

La evaluación del proceso de compostaje de este estudio, considera como material de entrada los residuos orgánicos, pero sin aplicar control de emisiones. De acuerdo a la Figura 4.24 se presentan las etapas del proceso y las emisiones resultantes. Las etapas consideradas para el tratamiento son:

- pre-tratamiento mecánico de los residuos orgánicos,
- contenedor de compostaje,
- maduración del compost,

y las emisiones resultantes del proceso son:

- agua,

- material rechazado (no apto para compost),
- compost

**Pre-tratamiento mecánico.** En el pre-tratamiento mecánico los residuos se trituran y tamizan. Los contaminantes o compuestos no biodegradables son separados y enviados al RS moderno. Estos contaminantes se suponen tienen una composición igual a los residuos sólidos y comprende el 5% de la entrada de los residuos totales. Se considera la composición de los residuos orgánicos y de jardín y el consumo de electricidad para el pre-tratamiento (tabla A III-1 y A III-14 del Anexo III).

**Contenedor de compostaje.** El proceso de descomposición de los residuos se realiza en el contenedor de compostaje. Este proceso se realiza aproximadamente en once días en el cual ocurren emisiones al aire y al agua (tabla A III-15 del Anexo III). Las emisiones al aire son causadas por la descomposición de la materia orgánica. Se considera que el 1.3% aproximadamente del contenido de carbono orgánico en los residuos de entrada son liberados al agua. La liberación de nitrógeno al agua depende de parámetros como valores de pH y cantidad de lixiviado. Se propone un valor de 6.1% para la emisión de nitrógeno al agua (% de N-entrada). Se consideran los coeficientes de emisiones al aire y al agua (tabla A III-16 del Anexo III).

El lixiviado de metales pesados ocurre durante el proceso de compostaje, pero solo en una pequeña cantidad. Se asume que los metales pesados contenidos en los residuos permanecen en el compost. Las emisiones de dióxido de carbono provenientes de una fuente biogénica no tiene contribución al calentamiento global por lo cual son excluidas del inventario. Lo mismo ocurre para las emisiones del proceso de maduración. El producto del contenedor de compostaje es llamado compost fresco. Este tiene el pH bajo por lo que emite un olor desagradable y requiere de un tiempo de maduración para su estabilización.

**Maduración.** En esta etapa, el compost fresco es madurado para producir un compost con valor comercial. El proceso de maduración se describe en el módulo de digestión (apartado 4.1.5.2 Evaluación del proceso de Digestión), utilizando las mismas tablas A III-4 y A III-5 del Anexo III, para la determinación de las emisiones del proceso. La principal diferencia entre la etapa de maduración de la digestión y el módulo de compostaje es el tipo de descomposición biológica de la materia orgánica y la construcción del modelo. En la planta de compostaje se modela una etapa de maduración cerrada con un tiempo de descomposición de un promedio de ocho semanas en pilas de descomposición. Después de este periodo se alcanza el compost maduro, en la tabla A III-17 del Anexo III se presenta los valores considerados para el compost maduro.

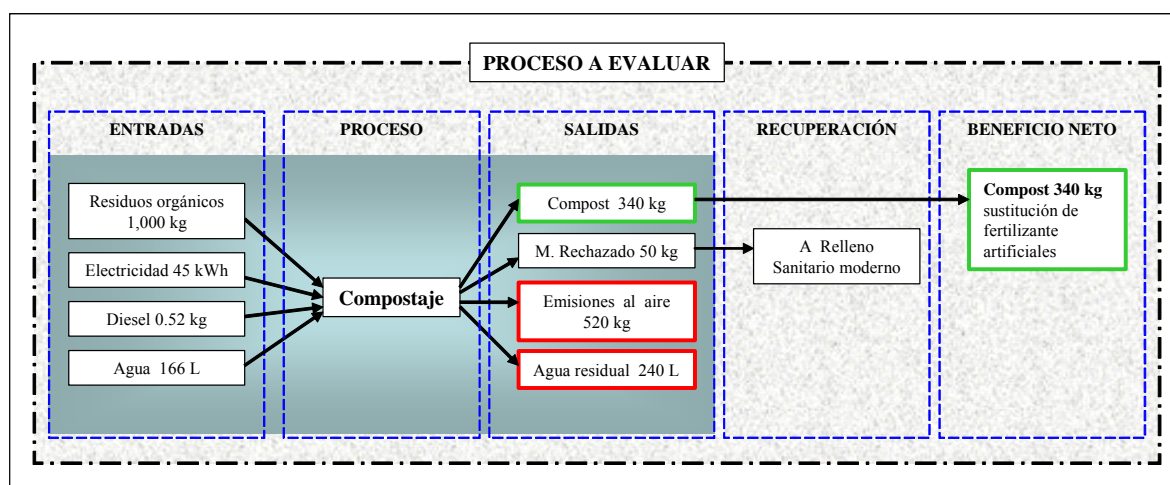
**Aplicación del compost y sustitución de fertilizantes.** El compost puede ser aplicado en las tierras de cultivo agrícola con el propósito de fertilizar. La aplicación de compost proporciona efectos positivos en forma de nutrientes y suplementos de carbono orgánico también como carbono secuestrado. El efecto positivo será contabilizado por la sustitución de la producción de fertilizantes y extracción de turba. La Tabla 4.14 presenta los factores de sustitución de los nutrientes aportados por el compost.

**Tabla 4.14.** Factor de sustitución de nutrientes provenientes del compost.

Parámetros	Unidad	Valor
Amonio en compost	% de N total	3
Disponibilidad de N como un nutriente	% de N total	50
Factor de sustitución de N de fertilizante artificial	kg N/kg N <sub>compost</sub>	1
Factor de sustitución de P de fertilizante artificial	kg P/kg P <sub>compost</sub>	1
Factor de sustitución de K de fertilizante artificial	kg K/kg K <sub>compost</sub>	1
Factor de sustitución de Ca de fertilizante artificial	kg Ca/kg Ca <sub>compost</sub>	1
Factor de sustitución de Mg de fertilizante artificial	kg Mg/kg Mg <sub>compost</sub>	1

#### 4.1.6.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de compostaje

La Figura 4.24 presenta las entradas de residuos e insumos, para el modelo de compostaje. La unidad funcional para la evaluación del proceso es de 1,000 kg de residuos orgánicos.



**Figura 4.24.** Diagrama del proceso de **compostaje** de residuos orgánicos.

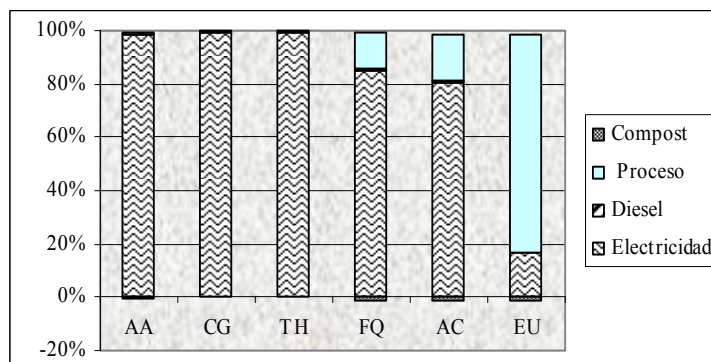
Las entradas son los residuos orgánicos, electricidad, diesel y agua requeridos por el proceso. Las salidas son el compost (340 kg), material no apto para el proceso (50 kg), emisiones al aire (520 kg) y agua residual (240 L) producidas por el proceso. Las emisiones al aire y al agua van directamente al ambiente. El compost es el beneficio obtenido por el proceso al aplicar el compost como sustitución de fertilizantes artificiales.

En la Tabla 4.15 se presentan los resultados de la evaluación ambiental del proceso de compostaje. Se presentan los parámetros de electricidad, transporte dentro de la planta de compostaje, las emisiones del proceso y los beneficios obtenidos por el compost producido. En la Figura 4.25 se presenta la contribución de los insumos y del proceso al impacto ambiental total.

**Tabla 4.15.** Categorías de impacto para el proceso de **compostaje** de residuos orgánicos.\*

Categoría de impacto	Electricidad consumida	Diesel de transporte	Emisión Proceso	Beneficio compost	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	2.44E-01	2.33E-03	0.00E+00	-1.47E-03	2.45E-01
<b>Calentamiento global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	3.75E+01	3.47E-01	1.21E-02	-3.01E-02	3.78E+01
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	9.36E+00	4.19E-02	6.48E-04	-4.16E-03	9.40E+00
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	8.47E-03	7.08E-05	1.33E-03	-1.12E-04	9.77E-03
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	2.41E-01	2.00E-03	5.05E-02	-4.56E-03	2.89E-01
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	2.50E-02	4.27E-04	1.25E-01	-2.05E-03	1.49E-01

\* para una tonelada de residuos orgánicos



**Figura 4.25.** Impacto ambiental del proceso de **compostaje** de residuos orgánicos.

Los resultados globales del proceso de compostaje sin control de emisiones indican un impacto ambiental adverso en todas las categorías consideradas ya que los beneficios del compost no compensan los impactos negativos del consumo de electricidad y diesel y las emisiones del proceso. A continuación se presenta el análisis más detallado del proceso de compostaje:

- El proceso de compostaje sin control de emisiones al aire y de lixiviados, presenta un impacto ambiental adverso en todas las categorías.
- El 98% del impacto ambiental adverso de la categoría de **agotamiento abiótico (AA)** corresponde a la electricidad empleada en el proceso. El impacto del consumo de

electricidad se debe el 77% del consumo de petróleo, 17% de gas natural y 4% de carbón empleados en la producción de electricidad.

- El 99% del impacto ambiental adverso en la categoría de **calentamiento global (CG)** corresponde al consumo de la electricidad. La contribución al impacto se debe principalmente a emisiones al aire principalmente de CO<sub>2</sub> contribuyendo en un 97% en el impacto del consumo de electricidad.
- El 99% del impacto ambiental adverso de la categoría de **toxicidad humana (TH)** corresponde a la electricidad. El impacto es causado principalmente por las emisiones al aire en la producción de electricidad, un 24% es debido al Ni, 15% de vanadio, 12% de hidrocarburos policíclicos, 7% de As, 6% de Cr, 2% de Cd, 2% de benceno, 2% de NO<sub>2</sub>, 2% de HF y 2% de Co. Las emisiones al agua como compuestos de Ba contribuyen en un 14% al impacto, hidrocarburos policíclicos 6%, amonia, contribuyendo en un 2%.
- El 85% del impacto ambiental adverso de la **fotooxidación química (FQ)** corresponde al consumo de electricidad y el 17% al proceso de compostaje. El impacto del consumo de electricidad se debe al SO<sub>2</sub> en un 77%. En el impacto ambiental adverso por el proceso de compostaje, contribuye en un 4% de CO, 4% de pentano, 3% de butano, 2% de formaldehído, 2% de hexano, 2% de metano, 1% de propano.
- En la categoría de **acidificación (AC)** el 81% y el 17% del impacto ambiental adverso corresponde a la electricidad y al proceso, respectivamente. El impacto del consumo de la electricidad se debe en un 68% a la emisión al aire de SO<sub>2</sub>, un 32% al NO<sub>2</sub> proveniente de las emisiones en la producción de electricidad. El 2% de la categoría corresponde a un beneficio ambiental por la producción de compost.
- El 82% del impacto ambiental adverso de la **eutrofización (EU)** corresponde al proceso de compostaje y el 16% al consumo de la electricidad. El proceso emite compuestos de fosfatos al agua, los cuales contribuyen en un 76% al impacto del proceso y la demanda química de oxígeno contribuyen en un 4% y al aire la emisión de 19% de amonio.

#### **4.1.7 Tratamiento: RECICLADO**

El reciclaje es un tratamiento de reproceso aplicable a los residuos recuperados de la separación de las diferentes fracciones. El reproceso de fracciones conlleva a un ahorro en el consumo de materiales puros, de energía y de recursos naturales. En el marco del Análisis de Ciclo de Vida, la sustitución de un material virgen por otro reciclado supone un ahorro de las

emisiones que se generarían por la fabricación de material de origen. También se consideran los impactos derivados del proceso de reciclado. En todos los procesos de reciclado de materiales, se debe procurar que tanto en el aspecto económico como en el ambiental los beneficios del reciclado superen los costos y los impactos.

Las fracciones separadas de los residuos domésticos con posibilidad de reciclaje, son: papel y cartón, vidrio, metales, plásticos, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

En Chihuahua la separación de materiales para reciclar no se realiza; sin embargo, las personas del sistema de aseo municipal encargadas de la recolección de los residuos en las viviendas, abren las bolsas o vacían los recipientes donde están depositados los residuos y extraen los materiales con posibilidad de venta. También se presenta esta situación cuando los residuos se depositan en el RS y los “pepenadores” extraen el resto de los materiales susceptibles de venta. Estos materiales son principalmente: papel periódico, cartón, plásticos, latas de aluminio, hierro, cobre y frascos de vidrio, principalmente de perfume. Las fracciones separadas se llevan a empresas receptoras para reciclar.

La evaluación ambiental del reciclado de fracciones se realizó utilizando los inventarios de ciclo de vida correspondientes para cada fracción indicados en Den Boer et al., 2005. A continuación se describe brevemente el proceso de los materiales a reciclar, basados en la descripción de Den Boer et al. (2005).

### **A. Papel y cartón**

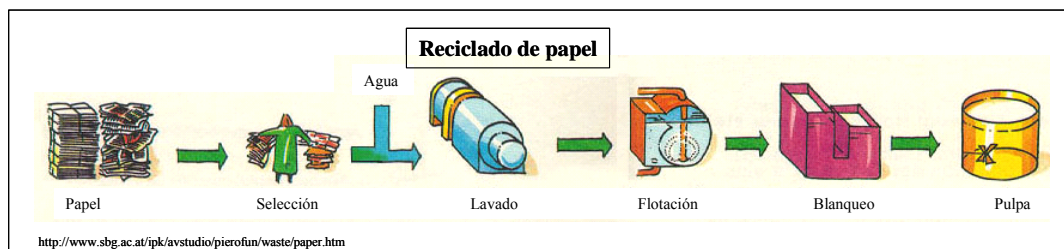
La fabricación de papel se basa en la unión mediante enlaces de hidrógeno de las fibras de celulosa húmedas cuando se secan bajo presión. La conversión de madera a pulpa consiste principalmente en dos procesos, uno mecánico y otro químico. El primero consiste en la separación mecánica de las fibras de madera. Esas pulpas son usadas para mejorar la calidad del papel. La pulpa es blanqueada y sometida a vapor antes de la extracción de las fibras, con el propósito de alargarlas y dañarlas lo menos posible (McDougall et al., 2002).

La segunda parte del proceso es una digestión química. La pulpa tratada químicamente es principalmente usada para fortalecer y presentar una variedad de productos de papel. El proceso Kraft es el principal proceso químico de la pulpa: mezclas de sulfito de sodio e hidróxido de sodio son los productos químicos usados para la pulpa química. Esas pulpas son usadas en bolsas y otros productos donde la solidez es importante o blanqueados con dióxido de cloro y usado en productos donde la permanencia y blancura son necesarios. Las pulpas semi-químicas son producidas por una digestión química suave de astillas de madera antes de

la separación mecánica. El principal uso de este tipo de pulpas es un corrugado medio. Aquí se emplean maderas duras como materiales crudos (McDougall et al. 2002).

#### 4.1.7.1 Descripción del proceso de reciclado de papel y cartón.

El papel y cartón se clasifica, se limpia y se transporta a la planta de reciclaje. El material no apto para procesar se transporta al RS. Los pasos básicos para el reciclado de papel y cartón son los siguientes: después de un remojo inicial, el papel residual es separado en fibras, tamizado para eliminar impurezas, lavado, desentintado y se obtiene la pulpa. En este proceso es siempre necesario añadir fibras puras y se estima que el papel puede reciclarse un promedio de cuatro ocasiones. En la Figura 4.26 se presenta un diagrama del proceso de papel a reciclar.



**Figura 4.26.** Proceso de reciclado de **papel y cartón.**

#### 4.1.7.2 Evaluación del proceso de reciclado de papel y cartón.

Se considera que el papel y el cartón recolectados separadamente están compuestos por dos sub-fracciones:

- papel de calidad de entintado y
- cartón,
- material no apto para reciclar (impurezas)

La composición del material a reciclar es de papel 60%, cartón 30% e impurezas 10%. El papel de calidad de entintado y cartón son clasificados y pre-limpiados en un material de fácil recuperación y transportado para la planta de reciclaje. El rechazo de los materiales de clasificado y proceso de pre-limpieza son llevados al RS moderno. El consumo de insumos para estas primeras etapas se considera en la evaluación ambiental (Tabla 4.16).

**Tabla 4.16.** Parámetros de la etapa de clasificación y limpieza.

Parámetros	Unidad	Valor (por tonelada)
Electricidad	kWh	5.35
Diesel	L	0.64
Lubricantes	L	0.01
Partes de acero (mantenimiento)	kg	1.20

Para realizar la evaluación ambiental, se consideran además los siguientes aspectos: El material de rechazo o impurezas se transporta al RS moderno.

La producción de papel periódico a partir de papel reciclado se valora por la acción de evitar el proceso de producción a partir de madera que incluye el manejo de bosques, transporte, molienda de madera y el proceso termomecánico completo de la pasta. Se asume que 1 kg de pulpa de papel reciclado reemplaza 1 kg de pulpa de pasta primaria (Den Boer et al., 2005).

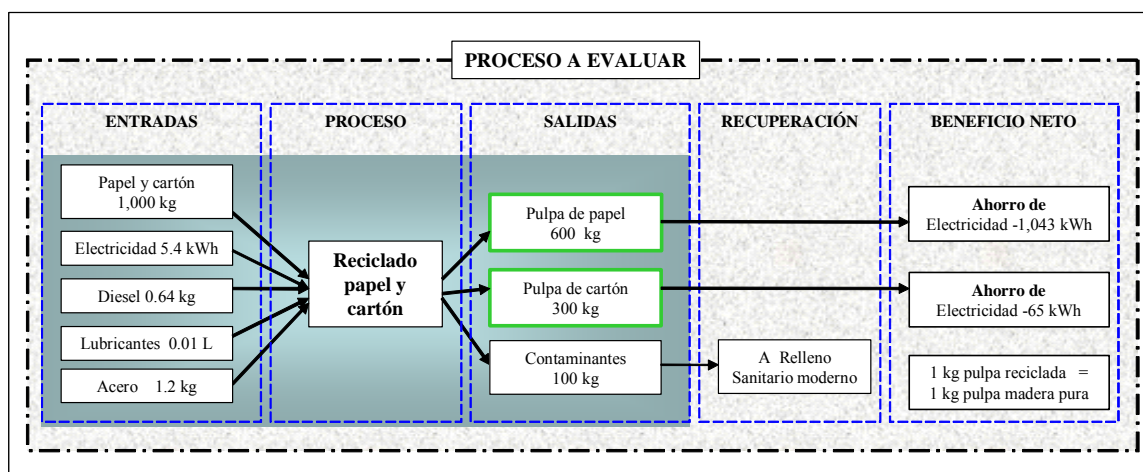
El cartón es reciclado en cartón. Este proceso consiste de formar la pulpa o pasta del cartón que se recibe de los procesos de *testliner* y *wellensoff*. El proceso evitado es la producción de cartón de una matriz de madera. El proceso a partir de matriz de madera incluye una combinación de los procesos de *kraftliner*, *testliner*, *wellensoff* y pulpa o pasta semi-química y convertido en papel y cartón. Los datos para la producción de 100% de cartón puro no son usualmente disponibles de aquí que toda la producción de cartón incorpora algo de papel y cartón recuperados. Esto ha sido posible al estimar el 100% de cartón puro por la extrapolación lineal de los datos de diferentes tasas de reciclado. Se supone que 1 kg de pulpa reciclada reemplaza 1 kg de pulpa primaria (Den Boer et al., 2005).

En todos los casos a efecto de evaluación ambiental se considera que el papel reciclado sustituye al papel obtenido a partir de pulpa origen añadiendo impactos ambientales adversos procedentes del proceso de reciclado y restando como beneficios los impactos evitados en todo el proceso de fabricación de papel nuevo.

En la metodología usada en el proyecto LCA-IWM, el beneficio de la carga ambiental de la sustitución de la pulpa de papel y cartón puro por pulpa de papel y cartón reciclado, se mide por el ahorro energético medido por el balance de ambos procesos contabilizado en forma de electricidad de la red nacional. El ahorro de energía entre el proceso de obtener una tonelada de pulpa de papel con material puro y reciclado es de -1,739 kWh para el papel de calidad de entintado y -216 kWh para una tonelada de cartón (Den Boer et al., 2005).

#### 4.1.7.3 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de reciclado de papel y cartón.

La unidad funcional para la evaluación del proceso de reciclado de papel y cartón es de 1,000 kg de material de entrada, resultando en 600 kg de pulpa para papel, 300 kg de pulpa de cartón y 100 kg de material no apto para reciclar. Además se estima el balance de electricidad entre el proceso de reciclado de pulpa de papel y el proceso de pulpa de papel puro. La Figura 4.27 muestra un diagrama del proceso general de reciclado de papel y cartón.



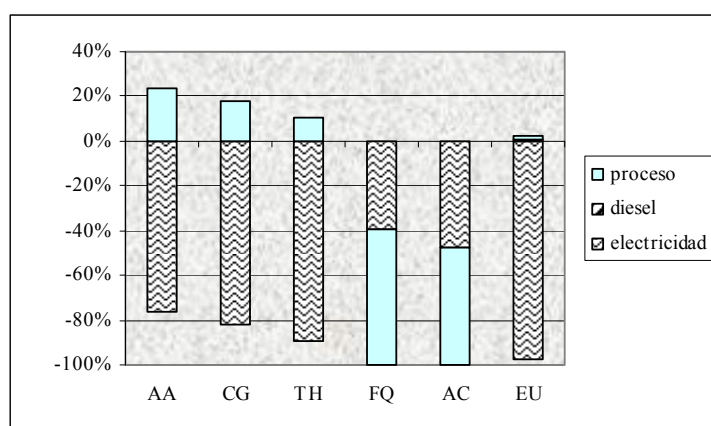
**Figura 4.27.** Diagrama del proceso de reciclado de **papel y cartón**.

Se evaluó el impacto ambiental del proceso de reciclado de papel y cartón, considerando el proceso de producción sustituyendo el uso de madera pura. El análisis incluye el almacenamiento temporal en depósitos de 770 L de plástico dispuesto para ello y posteriormente transportados a la planta de reciclado. En la Tabla 4.17 se presentan los resultados del proceso de reciclado de papel y cartón. Se considera el ahorro de electricidad, el diesel usado y el transporte de la instalación de recolección en la planta recicladora. La electricidad presenta valores negativos o beneficio ambiental por el ahorro de energía en el balance ente la fabricación de papel y cartón con material reciclado, en comparación con materia virgen. En la Figura 4.28 se presenta la contribución de los insumos y del proceso al impacto ambiental total.

**Tabla 4.17.** Categorías de impacto para el proceso de Reciclado de **papel y cartón**.\*

Categoría de impacto	Ahorro de Electricidad	Diesel del proceso	Emisiones Proceso	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	-6.28E+00	1.79E-02	1.95E+00	-4.31E+00
<b>Calentamiento global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	-9.65E+02	3.28E+00	2.12E+02	-7.50E+02
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	-2.41E+02	2.59E-01	2.83E+01	-2.12E+02
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	-2.18E-01	9.38E-04	-3.39E-01	-5.56E-01
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	-6.20E+00	2.12E-02	-6.82E+00	-1.30E+01
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	-6.44E-01	4.54E-03	1.28E-02	-6.27E-01

\*para una tonelada de residuos de papel y cartón



**Figura 4.28.** Impacto ambiental del reciclado de **papel y cartón**.

A continuación se presentan los resultados de las categorías de impacto.

- El valor total de las categorías de impacto estudiadas presentan un beneficio ambiental en todas las categorías, debido a la electricidad por el balance de electricidad entre la pulpa de papel pura y la pulpa de papel reciclado.
- El impacto ambiental adverso de 24% en la categoría del **agotamiento abiótico (AA)** corresponde al proceso. Este impacto corresponde en un 71% al consumo de gas natural y en un 29% al consumo de carbón para el proceso. El 76% del impacto total corresponde a la electricidad, considerada como un beneficio.
- El 18% del impacto ambiental adverso de la categoría de **calentamiento global (CG)** corresponde al proceso. El impacto se debe principalmente a emisiones al aire; el CO<sub>2</sub> contribuye en un 100% debido al proceso. El 82% de la categoría corresponde a la electricidad, considerada como un beneficio ambiental.
- El 11% del impacto ambiental adverso de la **toxicidad humana (TH)** es causado por los compuestos emitidos por el proceso de reciclado. Los compuestos emitidos al aire

contribuyen, en un 33% al Cu, en un 25% al Cd, 16% al As, 16% al HF, 9% al benceno y 2% al Ni. El 89% de la categoría corresponde a la electricidad considerada como beneficio ambiental.

- El proceso presenta un beneficio ambiental contribuyendo a la categoría de **fotooxidación química (FQ)** en un 61% al proceso y 39% a la electricidad, debido a la utilización de material reciclado.
- El 52% y 48% de la categoría de la **acidificación (AC)** corresponde al proceso y a la electricidad, respectivamente. Esto considerado como un beneficio ambiental, debido a la recuperación del material.
- El 97% de la categoría a la **eutrofización (EU)** corresponde a la electricidad, 2% al proceso y 1% al diesel usado en el proceso, considerado como un beneficio ambiental.

## **B. Vidrio**

El vidrio esta formado por elementos comunes en la corteza terrestre. Habitualmente sus principales compuestos son: arena, carbonato sódico y piedra caliza. El vidrio se obtiene por la homogenización de estos componentes a altas temperaturas. Los materiales crudos se seleccionan de acuerdo a la pureza, potencial de contaminación, fácil fundido y costo. La arena es el ingrediente más común y el tamaño del grano y pureza son importantes El costo de transporte es tres o cuatro veces el costo de la arena. Los colorantes para el vidrio son oxido de hierro, cromo, cobre, cobalto y níquel. (McDougall et al., 2002).

### **4.1.7.4 Descripción del proceso de reciclado de vidrio.**

La separación del vidrio reciclado de color es necesaria para evitar mezclas de colores que disminuyan la calidad del producto. La primera etapa en el reprocesamiento del vidrio usualmente consiste en una clasificación manual para eliminar impurezas gruesas seguido por una clasificación automática para eliminar elementos metálicos y materiales de baja densidad (alrededor de 5-6% del vidrio de entrada recuperado es removido en esta vía). La separación del vidrio semiautomático ha sido el método más frecuentemente usado en los últimos 20 años. Materiales ferrosos y no ferrosos contaminan el proceso de fundido. Las partículas de impurezas frecuentemente no pueden disolverse durante el fundido del vidrio llevando a inclusiones, el cual hace al vidrio más frágil. El vidrio triturado esta entonces listo para mezclar con materiales puros, previo al fundido en el horno y soplado o moldeado en el producto final (McDougall et al., 2002).

#### **4.1.7.5 Evaluación del proceso de reciclado de vidrio.**

El vidrio se limpia, se tritura y se transporta a la planta de reciclaje. Los desechos de los procesos de limpieza y trituración se llevan al RS moderno. El vidrio triturado se recicla de nuevo en vidrio, al someterse a un proceso de refundido. Este proceso de fundido de materias primas, además del transporte es el proceso evitado.

Se supone que el vidrio recolectado separadamente esta compuesto por cuatro sub-fracciones: vidrio claro, vidrio color verde, vidrio color marrón y vidrio mezclado. En este estudio se evalúa vidrio mezclado (97%) y un cierto nivel de impurezas (3%).

El vidrio triturado se usa como un lote de material para mejora la fundición del vidrio. La entrada de vidrio triturado permite fundir más rápidamente el vidrio y mantener la temperatura del horno, con un considerable ahorro de energía. La distribución del tamaño de partícula de un trozo de vidrio tiene un importante impacto en la transferencia de calor en el proceso de fundición. El vidrio triturado puede ser repetidamente fundido sin pérdida de calidad. Típicamente entre 10-50% de un lote de vidrio se compone de vidrio triturado, pero las operaciones en 70-80% vidrio triturado no son comunes (McDougall et al., 2002). En la Tabla 4.18 se presentan los insumos usados en la clasificación y limpieza del vidrio considerados en la evaluación ambiental para el reciclado.

**Tabla 4.18.** Parámetros de la etapa de clasificación y limpieza de vidrio\*.

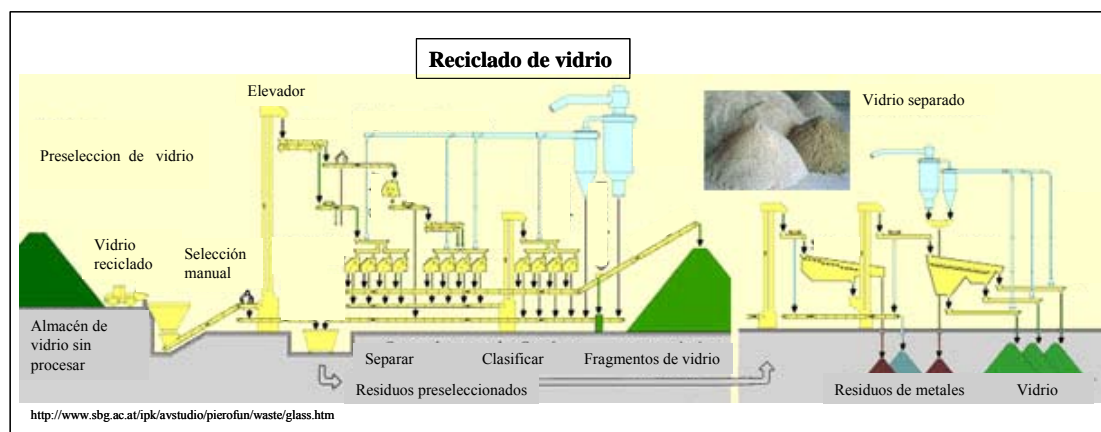
Parámetros	Unidad	Valor (por tonelada)
Electricidad	kWh	10.0
Diesel	L	2.4
Lubricantes	L	0.2
Partes de acero (mantenimiento)	kg	1.2

\*utilizados en el reciclado de metal y plástico

El vidrio triturado de todos los colores es reciclado en vidrio. Este proceso consiste de refundir el vidrio triturado en un horno. El proceso evitado es el proceso de fundido de materia mineral y el transporte. Los datos para la producción de vidrio puro 100% no están usualmente disponibles, ya que toda la producción de proceso del vidrio incorpora algunos vidrios recuperados. Ha sido posible estimar el 100% del escenario del vidrio reciclado por extrapolación lineal de los datos de diferentes rangos de reciclado. Se supone que 1 kg de vidrio triturado reemplaza 1.15 kg de materias primas (Den Boer et al., 2005)

En la metodología utilizada el beneficio ambiental de la sustitución del vidrio crudo por vidrio reciclado, se mide por el ahorro energético, calculado por balance entre ambos procesos, contabilizado en forma de electricidad de la red nacional. Se considera en la

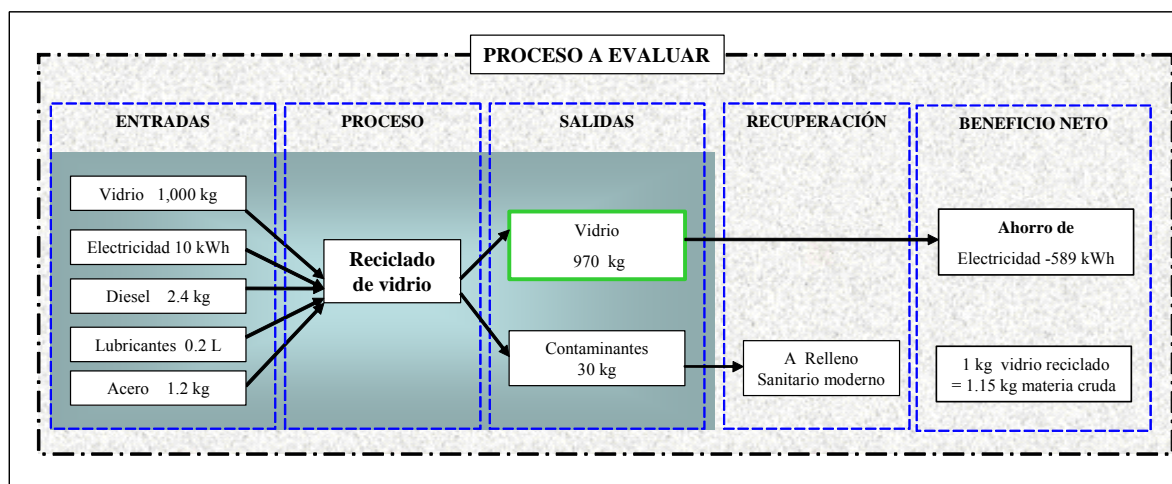
evaluación ambiental el balance de electricidad del proceso entre el vidrio reciclado y el vidrio crudo. El ahorro de electricidad en el proceso entre el uso de vidrio reciclado y materia prima pura es de -589 kWh por tonelada de producto (Den Boer et al., 2005). En la Figura 4.29 se presenta un diagrama de una planta de reciclado de vidrio.



**Figura 4.29.** Proceso de reciclado de **vidrio**.

#### 4.1.7.6 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de reciclado de vidrio.

En la Figura 4.30 se presenta el diagrama del proceso de reciclado de vidrio a evaluar. La unidad funcional para la evaluación se considera 1,000 kg de vidrio mezclado. El rechazo por material no apto para proceso es de 30 kg. Además se estima el balance de electricidad entre el proceso de reciclado de vidrio triturado y el proceso de material puro para el proceso del vidrio.



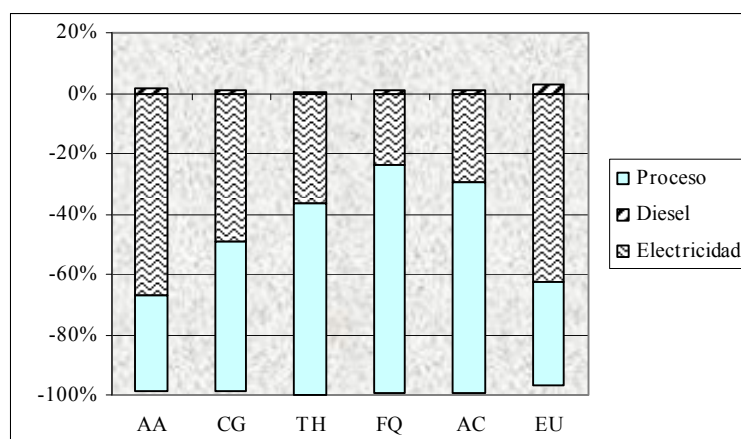
**Figura 4.30.** Diagrama del proceso de reciclado de **vidrio**.

En la Tabla 4.19 se presentan las categorías de impacto para el proceso de reciclado de vidrio. Se presentan los valores de impacto ambiental para los insumos de electricidad, diesel usado en el proceso y en el del transporte, además las emisiones de impacto del proceso. Los valores negativos de la electricidad significa un beneficio ambiental al considerarse el ahorro de energía en el balance de electricidad entre el proceso de fabricación de vidrio reciclado y vidrio puro. En la Figura 4.31 se presenta la contribución de los insumos y del proceso al impacto total.

**Tabla 4.19.** Categorías de impacto para el proceso de Reciclado de vidrio.\*

Categoría de impacto	Ahorro de Electricidad	Diesel del proceso	Emisiones Proceso	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	-2.97E+00	5.72E-02	-1.42E+00	-4.33E+00
<b>Calentamiento global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	-4.56E+02	1.05E+01	-4.66E+02	-9.11E+02
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	-1.14E+02	8.28E-01	-1.96E+02	-3.08E+02
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	-1.03E-01	2.99E-03	-3.30E-01	-4.30E-01
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	-2.93E+00	6.76E-02	-7.01E+00	-9.87E+00
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	-3.04E-01	1.45E-02	-1.68E-01	-4.58E-01

\*para una tonelada de residuos de vidrio



**Figura 4.31.** Impacto ambiental del proceso de reciclado de vidrio.

El impacto ambiental adverso se presenta en el diesel empleado en el proceso de reciclado de vidrio. Los valores negativos de la electricidad son debidos al beneficio ambiental obtenido por el ahorro de electricidad en el proceso entre el uso de vidrio reciclado y materia prima pura. A continuación se presenta un análisis de estos resultados.

- En el valor total resultan con beneficio ambiental, el proceso y la electricidad, en todas las categorías de impacto en el reciclado de vidrio.

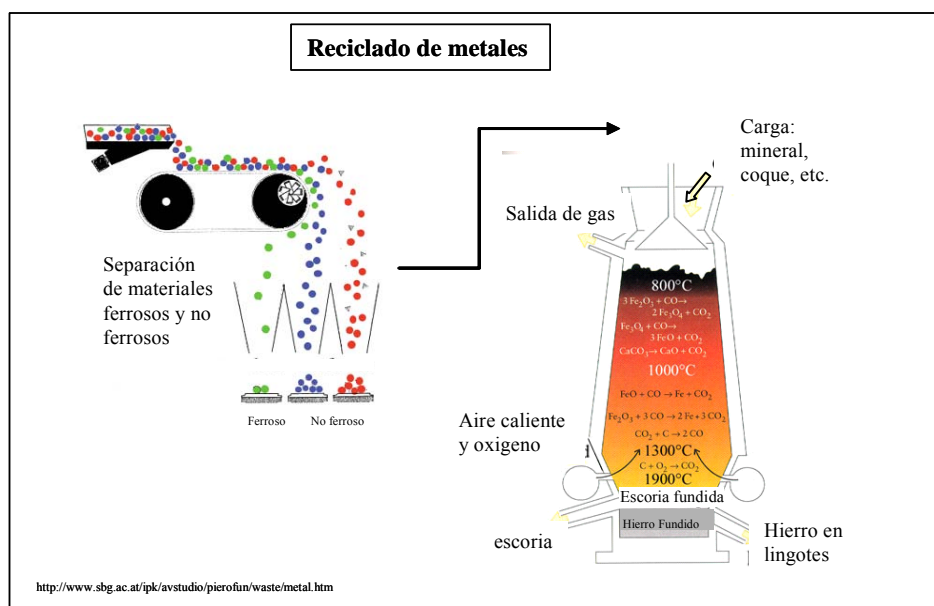
- El 67% y el 32% de la categoría de **agotamiento abiótico (AA)** corresponde a la electricidad y al proceso respectivamente, considerados estos como un beneficio ambiental.
- La categoría de **calentamiento global (CG)** presenta una contribución de 50% atribuida al proceso y el 49% a la electricidad, considerados como beneficio ambiental.
- El 63% y 37% de la categoría de **toxicidad humana (TH)** corresponde al proceso y electricidad respectivamente, considerados como beneficio ambiental.
- El 70% del impacto de la categoría de la **fotooxidación química (FQ)** corresponde al proceso y los 29% a la electricidad considerados como beneficios ambientales.
- En la categoría de **acidificación (AC)** se presenta una contribución de 29% ael proceso y 70% de electricidad, considerados como beneficios ambientales.
- El 62% de la categoría de **eutrofización (EU)** corresponde a la electricidad, 35% al proceso, considerados como beneficio ambiental. El 3% de esta categoría corresponde al diesel del proceso, considerado como un impacto ambiental adverso.

### C. Metales

Los materiales ferrosos de las viviendas se encuentran en forma de hierro y trozos de acero, pero la mayoría en la forma de lámina de hojalata para las latas de alimentos y bebidas. Para el reproceso del acero a partir de trozos de acero se requiere un paso de selección para remover los contaminantes antes que la chatarra sea fundida. (McDougall et al., 2002).

La mayoría de los metales no ferrosos recuperados de los residuos de las viviendas es el aluminio, principalmente en la forma de latas de bebidas. El reprocesamiento de aluminio es simple y requiere de menos energía que la producción a partir de materiales vírgenes. El reprocesamiento involucra la clasificación de los metales recuperados y fundidos en hornos. De aquí que la mayoría del aluminio es una aleación con otros metales y es necesario seleccionar una apropiada mezcla de material recuperado para obtener un lingote con la composición correcta. El aluminio es muy reactivo y tiene una fuerte tendencia para formar un óxido conteniendo otros metales (McDougall et al., 2002).

Los metales se seleccionan en una planta de recepción de materiales y se transportan a las instalaciones de reciclaje final. Los desechos de los procesos de selección se envían al RS. En la Figura 4.32 se presenta un diagrama de reciclado de metales.



**Figura 4.32.** Proceso de reciclado de metales.

#### 4.1.7.7 Descripción del proceso de reciclado de metal.

Se supone que la hojalata se recicla en acero secundario mediante un proceso de refusión eléctrica y procesos metalúrgicos adicionales. La producción primaria de acero a partir de materias primas, incluido el transporte necesario, es el proceso evitado que incluye el proceso de fusión en hornos de inyección y procesos metalúrgicos adicionales.

El aluminio se recicla en aluminio secundario. Este proceso consiste en la trituración, decapada y refusión de aluminio recolectado. Se supone que la producción primaria, incluido el transporte necesario, mediante un proceso de electrolisis, es el proceso evitado.

El acero es esencialmente una aleación de hierro con menos de 2% de carbono. El acero está hecho por hierro fundido en un horno para producir hierro simulado, el cual es adicionado a chatarra de acero fundida antes de ser purificado. Hay dos tipos principales de hornos usados en la producción de acero: i) el horno básico de oxígeno que produce hojas de acero (se usa un mínimo de 25% de chatarra de acero) y ii) el horno eléctrico (es usado casi 100% de chatarra de acero). Las propiedades mecánicas del acero varían sobre un amplio rango de cambios en la composición y tratamientos de calor. El acero usado se fabrica en laminas de hojalata; resiste la oxidación y el ataque de ácidos (McDougall et al., 2002).

El aluminio es un metal blanco plateado obtenido de bauxita. La producción de aluminio es un proceso de dos etapas. En la primera etapa la bauxita es mezclada con sosa cáustica. La solución de sosa cáustica filtrada se enfría a cristales de óxido de aluminio disueltos en arena blanca como polvo. La segunda etapa es el proceso de fusión donde el óxido de aluminio se disuelve a 900°C. Una corriente eléctrica pasa a través del líquido que separa

el óxido de aluminio en aluminio y oxígeno. Finalmente con el aluminio fundido se forman lingotes.

#### **4.1.7.8 Evaluación del proceso de reciclado de metales.**

Se considera que los metales recolectados separadamente están compuestos por dos subfracciones:

- acero en laminas,
- aluminio y una cierta cantidad de contaminantes o impurezas.

Los metales son clasificados en una instalación de materiales recuperados (IMR). Los parámetros considerados para la etapa de clasificación y limpieza se muestran en la Tabla 4.18, para el metal. El acero estañado es reciclado en acero secundario por un proceso de refundido eléctrico y se adiciona al proceso metalúrgico. La producción de acero primario de materiales crudos, incluyendo transporte es el proceso evitado el cual incluye hornos blast de ráfaga, procesos de fundido y adicional procesos metalúrgicos. Se asume que 1 kg de acero secundario reemplaza 1 kg de acero primario (Den Boer et al., 2005).

El aluminio es reciclado en aluminio secundario. Este proceso consiste en molienda, decapado y refundido del aluminio de entrada. La producción de aluminio primario de materiales crudos, incluyendo el transporte, por un proceso de electrolisis es el proceso evitado. Se asume que 1 kg de aluminio secundario reemplaza 1 kg de aluminio primario (Den Boer et al., 2005).

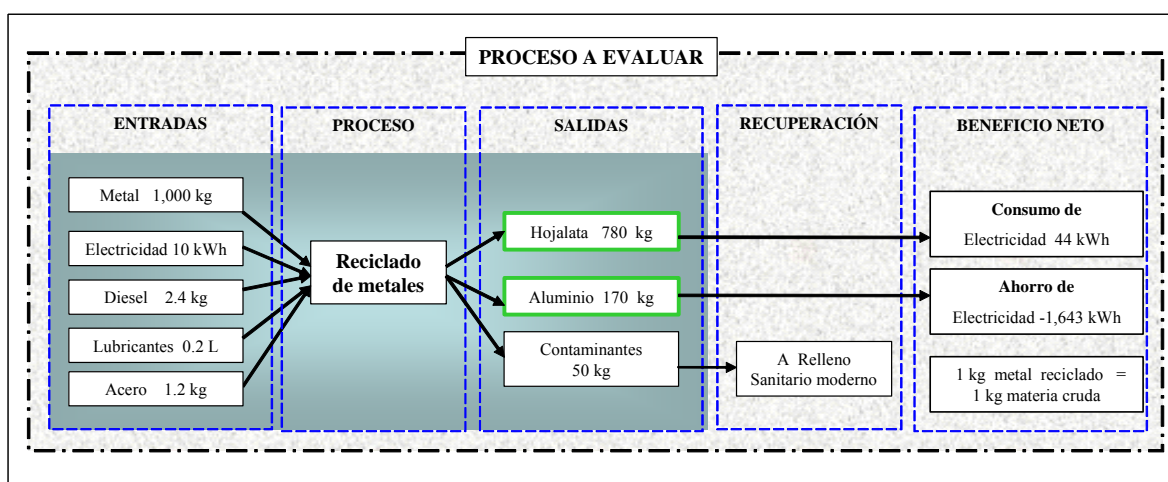
En este trabajo, el beneficio ambiental de la sustitución de acero estañado y aluminio por los productos reciclados, se miden por el ahorro energético calculado por el balance entre ambos procesos, calculado en forma de la electricidad de la red nacional. El ahorro de electricidad en el proceso entre el uso de metal reciclado y metal virgen es 57 kWh para hojalata y -9,665 kWh para el aluminio, por tonelada de cada metal (Den Boer et al., 2005).

Se calcula el inventario medioambiental de los metales reciclado teniendo en cuenta el proceso de producción sustituido a partir de materias primas vírgenes. La clasificación de los metales es: i) hojalata (78%), ii) aluminio (17%) y una cantidad de contaminación o impurezas (5%). Los metales se seleccionan y se transportan a las instalaciones de reciclaje final, los desechos de los procesos de selección se envían al relleno sanitario.

#### **4.1.7.9 Resultados de la evaluación ambiental del proceso de reciclado de metales.**

La Figura 4.33 presenta un diagrama del proceso de reciclado de metales. La unidad funcional para la evaluación es de 1,000 kg de metales (780 kg de hojalata, 170 kg de aluminio y 50 kg

de material no apto para proceso). El beneficio es la utilización de metales recuperados en lugar de metales puros.



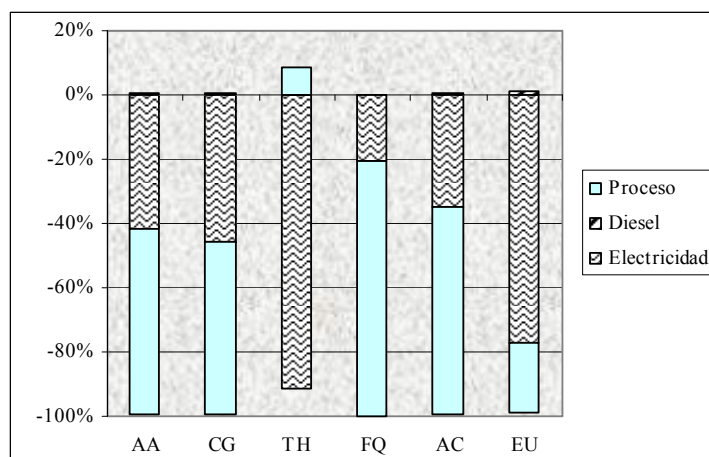
**Figura 4.33.** Diagrama del proceso de reciclado de metales.

Se evaluó el impacto ambiental del proceso de reciclado de metales recuperados. Los resultados se presentan en la Tabla 4.20. Los valores negativos de la electricidad significa un beneficio ambiental al considerarse el ahorro de energía en el balance de electricidad entre el proceso de fabricación de metal reciclado y metal puro. En la Figura 4.34 se presenta la contribución de los insumos y del proceso al impacto total.

**Tabla 4.20.** Categorías de impacto para el proceso de Reciclado de metales.\*

Categoría de impacto	Ahorro de Electricidad	Diesel del proceso	Emisiones Proceso	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	-8.57E+00	5.98E-02	-1.20E+01	-2.05E+01
<b>Calentamiento global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	-1.32E+03	1.09E+01	-1.56E+03	-2.87E+03
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	-3.29E+02	8.65E-01	3.08E+01	-2.97E+02
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	-2.98E-01	3.13E-03	-1.14E+00	-1.44E+00
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	-8.46E+00	7.06E-02	-1.55E+01	-2.39E+01
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	-8.78E-01	1.51E-02	-2.47E-01	-1.11E+00

\*para una tonelada de residuos de metales



**Figura 4.34.** Impacto ambiental del proceso de reciclado de metal.

Se presenta un beneficio ambiental, en el proceso de reciclado y por el ahorro de electricidad empleada en el proceso de reciclado en lugar de la electricidad consumida en el proceso normal. A continuación se presenta un análisis de los resultados para cada categoría.

- En la categoría de **agotamiento abiótico (AA)**, el 58% corresponde al proceso y el 42% a la electricidad, considerados como beneficio ambiental.
- El 54% de la categoría de **calentamiento global (CG)** corresponde al proceso y el 46% a la electricidad, considerados como beneficio ambiental.
- En la categoría de **toxicidad humana (TH)** la contribución del 91% corresponde a la electricidad, considerado como un beneficio ambiental. El impacto ambiental adverso en esta misma categoría corresponde al proceso en un 9%. Las emisiones del proceso contribuyen en un 38% de As, en un 32% de HF, en un 8% de vanadio, en un 7% de benceno, en un 4% de Se y en 3% de Cd.
- El 79% de la categoría de la **fotooxidación química (FQ)** corresponde al proceso y el 21% a la electricidad, considerados como un beneficio ambiental.
- La categoría de **acidificación (AC)**, el proceso presenta un beneficio ambiental en un 65% del total del impacto y el 35% de la electricidad.
- En la categoría de **eutrofización (EU)** el 77% y 22% del impacto total corresponde a la electricidad y al proceso, respectivamente, considerados como un beneficio ambiental.

## D. Plásticos

Los plásticos están hechos de petróleo, gas natural, carbón y sal. Siendo el petróleo el mayor compuesto. La industria petroquímica suministra monómeros para la producción de plásticos y fabricación de un amplio rango de aditivos plásticos. Los plásticos son producidos por

polimerización. En su forma básica los plásticos son producidos como polvos, gránulos, líquidos y soluciones. La aplicación de calor a esos materiales crudos produce el producto plástico (McDougall et al., 2002).

Los plásticos son clasificados como termoplásticos o termoformadores. Las resinas termoplásticas, cuando se calientan se ablandan y fluyen como líquidos viscosos; cuando se enfrían solidifican. El ciclo de calentamiento y enfriado pueden repetirse varias veces sin pérdida de las propiedades específicas. Las resinas termoformadas se licuan cuando se calientan y solidifican con continuo calentamiento. Los polímeros sufren un enlace cruzado y retiene su forma durante subsecuentes ciclos de calentamiento y enfriamiento, consecuentemente no puede ser recalentado y moldeado (McDougall et al. 2002).

#### 4.1.7.10 Descripción del proceso de reciclado de plásticos.

Los plásticos pueden ser mecánica y químicamente reciclados. En el reciclado mecánico los plásticos son cortado o triturado y los contaminares son removidos usando ciclones de separación. El plástico triturado es lavado, secado y extruido en pelotitas para venta al mercado de plásticos. El reciclado químico involucra procesos más complejos. En el caso de los polímeros los plásticos se rompen en la forma de monómero y se repolimeriza. Este tipo de reciclado ha sido desarrollado para ciertas resinas, como el PET, donde se emplea el proceso de metanólisis. Adicionalmente, la alimentación del reciclado puede tratar grandes volúmenes de plásticos mezclados, con los productos reciclados pueden estar junto a los flujos de petróleo crudo para someterlos a los tratamientos adicionales (McDougall et al. 2002). En la Figura 4.35 se presenta un proceso de reciclado de plástico.

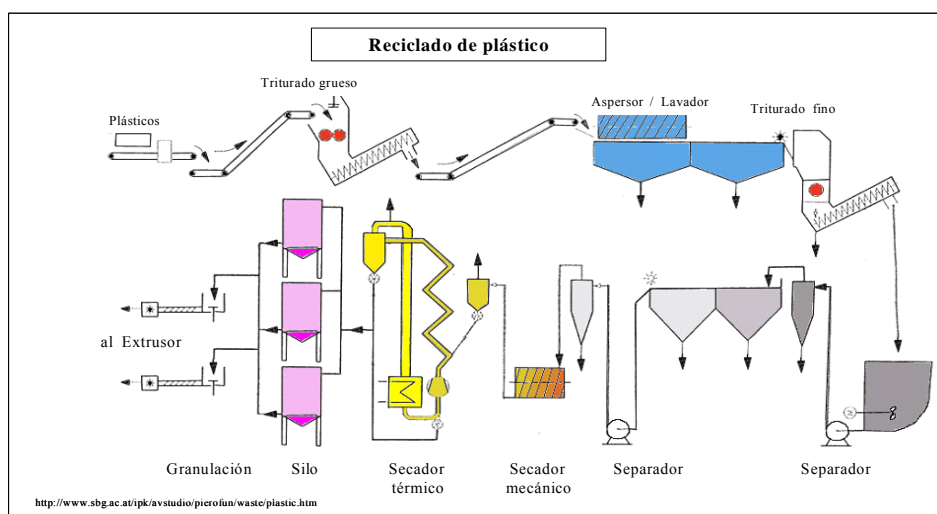


Figura 4.35. Proceso de reciclado de plásticos.

#### **4.1.7.11 Evaluación del proceso de reciclado de plásticos.**

Se calcula el inventario ambiental de los plásticos y materiales compuestos a reciclar teniendo en cuenta los procesos de producción que sustituyen las materias primas vírgenes. Las fracciones evaluadas en este estudio están compuestas por: i) plásticos mezclados (90%) y la contaminación o impurezas (10%).

Los plásticos y materiales compuestos son separados en una IMR y transportados a la planta de reciclado. Los parámetros considerados para la etapa de clasificación y limpieza se muestran en la Tabla 4.18 para el plástico. Los plásticos mezclados son reciclados en estacas de plástico. Este proceso consiste en calentamiento y adición de carbonato de calcio a los plásticos mixtos recuperados y posteriormente extruyéndolos. La producción de estacas de plástico es el proceso evitado, el cual incluye transporte, producción y tratamiento con Cu, Cr y As. El proceso presenta un ahorro de 183 kWh de electricidad entre la fabricación de estacas de plástico reciclado y estaca de madera. Se considera que 1 estaca de plástico sustituye 1 estaca de madera (Den Boer et al., 2005).

Análogamente a los otros materiales reciclados, en este estudio se ha considerado que el beneficio ambiental es la sustitución de plásticos vírgenes por plásticos reciclados y se miden por el ahorro energético calculado por el balance entre ambos procesos, evaluado en forma de electricidad de la red nacional. Finalmente el balance de electricidad de todos los procesos es transformado en cargas ambientales de la mezcla de electricidad suministrada por el país correspondiente. La Tabla 4.21 presenta el balance de electricidad para los plásticos.

En el caso de la separación de plásticos, se considera que 1 kg de material reciclado PET reemplaza 1 kg de materia prima PET; 1 kg de material reciclado de HDPE (todos los colores), reemplaza 1 kg de materia prima HDPE y 1 kg de material reciclado de LDPE, reemplaza 1 kg de materia prima LDPE. Para la evaluación de plástico mezclado se considera en la herramienta LCA-IWM que este material sustituye a la madera en la producción de vallas de separación.

**Tabla 4.21.** Balance de electricidad para **plásticos**.

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor (por tonelada)</b>
HDPE	kWh	-757
PET	kWh	-537
LDPE	kWh	534
<b>Plásticos mezclados</b>	<b>kWh</b>	<b>183</b>

#### 4.1.7.12 Resultados de la evaluación ambiental del reciclado de plásticos.

La Figura 4.36 presenta el diagrama del proceso de reciclado de plásticos. La unidad funcional para la evaluación es de 1,000 kg de plásticos. Se obtienen 900 kg de plástico reciclado y 100 kg de material rechazado no apto para proceso. Los beneficios obtenidos por el proceso es la utilización de plásticos recuperados en lugar de materiales puros.

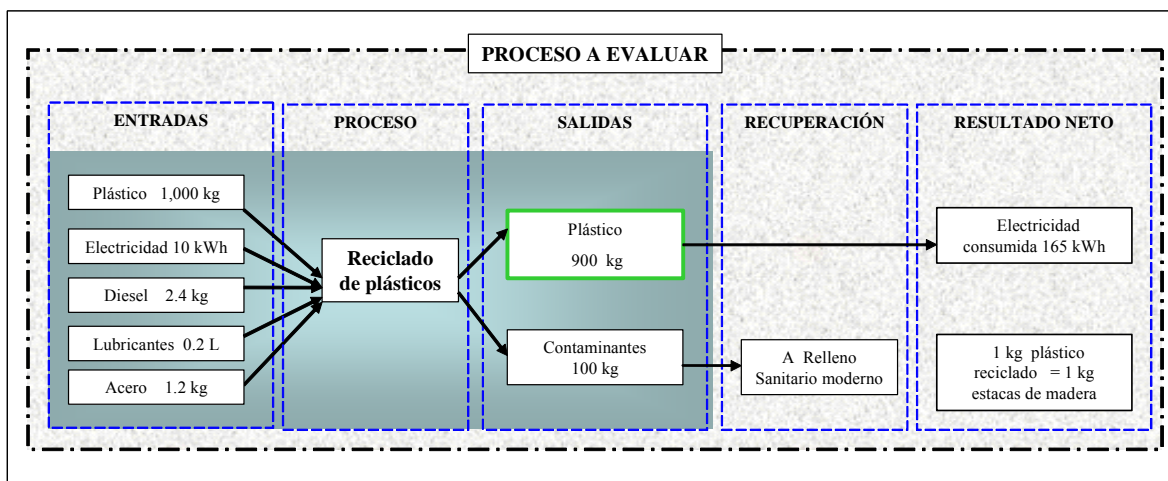


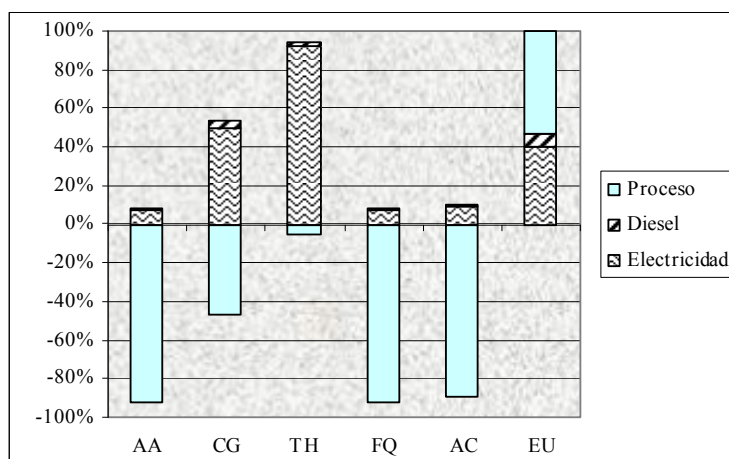
Figura 4.36. Diagrama del proceso de reciclado de plástico mezclados.

En la Tabla 4.22 se presentan los resultados de las categorías de impacto evaluadas. Se evaluó la electricidad consumida, diesel usado en el proceso, transporte y el proceso de reciclado de plástico. Los resultados de las emisiones del proceso presentan beneficio ambiental, indicando cargas evitadas debido al uso de plásticos recuperados en lugar de materiales puros para la fabricación de productos. En la Figura 4.37 se presenta la contribución de los insumos y del proceso al impacto total.

Tabla 4.22. Categorías de impacto para el proceso de Reciclado de plásticos mezclados.\*

Categoría de impacto	Electricidad consumida	Diesel del proceso	Emisiones Proceso	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg Sb eq)	1.01E+00	6.73E-02	-1.26E+01	-1.15E+01
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg CO <sub>2</sub> eq)	1.55E+02	1.23E+01	-1.47E+02	2.01E+01
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq)	3.86E+01	9.73E-01	-2.25E+00	3.73E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg etileno eq)	3.50E-02	3.52E-03	-4.51E-01	-4.12E-01
<b>Acidificación (AC)</b> (kg SO <sub>2</sub> eq)	9.94E-01	7.94E-02	-9.22E+00	-8.14E+00
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg PO <sub>4</sub> eq)	1.03E-01	1.70E-02	1.37E-01	2.57E-01

\*para una tonelada de plásticos mezclados



**Figura 4.37.** Impacto ambiental del proceso de reciclado de **plástico mezclado**.

La electricidad y el diesel del proceso presentan un impacto ambiental adverso. A continuación se presenta un análisis de los resultados para cada categoría en el reciclado del plástico.

- Se presentan beneficios ambientales del proceso en las categorías de agotamiento abiótico, calentamiento global, toxicidad humana, fotooxidación química y acidificación.
- El 92% de la contribución al impacto del **agotamiento abiótico (AA)** corresponde al proceso considerado como beneficio ambiental. El 7% del impacto ambiental adverso de la misma categoría corresponde a la electricidad, debido al consumo de petróleo en un 77%, 18% de gas natural y 4% de carbón, consumidos en la producción de electricidad.
- El 47% de la categoría de **calentamiento global (CG)** corresponde al proceso considerado como beneficio ambiental. El 49% del impacto ambiental adverso en esta categoría corresponde a la electricidad, 4% al diesel empleado en el proceso. Las emisiones al aire causado por la producción de la electricidad es debido al CO<sub>2</sub> contribuyendo en un 99%.
- El 92% del impacto en la categoría en la **toxicidad humana (TH)** corresponde a la electricidad y 2% al diesel usado en el proceso. El impacto ambiental adverso de la electricidad principalmente se debe a emisiones al aire de compuestos como el Ni contribuyendo en un 24%, vanadio en un 15%, hidrocarburos policíclicos aromáticos 13%, As en un 7%, Cr 5%, benceno 2%, Cd 2%, Co 2%, HF 2% y NO 2%. Las emisiones al agua contribuye en un 16% de Ba y hidrocarburos policíclicos aromáticos

en un 6%. El 6% del impacto total corresponde al proceso, considerado como un beneficio ambiental.

- El 92% de la categoría en la **fotooxidación química (FQ)** corresponde al proceso, considerado como beneficio ambiental. El impacto ambiental adverso en esta categoría corresponde al 7% de la electricidad. El impacto es causado por emisiones de SO<sub>2</sub> en un 77%, CO en un 4%, pentano 4%, butano en un 3%, formaldehído 2%, hexano 2%, metano 2%, propano 1%,
- El 89% de la categoría de **acidificación (AC)** corresponde al proceso, considerado como beneficio ambiental. El 10% de la misma categoría corresponde a un impacto ambiental adverso debido a emisiones al aire de SO<sub>2</sub> contribuyendo en un 68%, NO<sub>2</sub> en un 32%, por la producción de electricidad.
- El 53% del impacto ambiental adverso de la categoría de **eutrofización (EU)** corresponde al proceso, 40% a la electricidad y 10% al diesel. La causa del impacto ambiental adverso del proceso principalmente es causada por la emisión de NO<sub>2</sub> y NO contribuyendo en un 84% y 9%, respectivamente.

El resultado del beneficio ambiental se puede mejorar al realizar una separación de los plásticos, pues se presentaría un ahorro de electricidad, sobretodo en HDPE y PET, como se muestra en la Tabla 4.21.

#### **4.2 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos**

En este estudio no se consideran los RAEE, pues la cantidad encontrada en la caracterización de residuos fue mínima (una plancha). En Chihuahua, el Departamento de Aseo Urbano Municipal realiza la recolección de equipos voluminosos una vez al año, ahí se consideran: refrigeradores, estufas, calentadores de agua, televisores, aparatos de sonido, lavadoras, aparatos de aire, microondas, aspiradoras y muebles en general.

Los aparatos de menor volumen se depositan directamente en las bolsas de residuos, estos equipos son: i) planchas, ii) secador de pelo, iii) procesador de alimentos, iv) motor de licuadoras, v) cafeteras, vi) máquinas de afeitar, vii) hornos eléctrico, viii) teléfonos fijos o celulares, ix) ventiladores y demás equipo de menor tamaño. La diversa composición de estos materiales supone una serie de sustancias de potencial peligroso. La forma en la que los RAEE son reprocessados en Chihuahua, es la recolección de los RAEE por los pepenadores dentro del RS, ellos se encargan de separar las partes potenciales de venta.

## 4.3 Energía y materiales auxiliares

### 4.3.1 Electricidad

La electricidad es un insumo empleado en los procesos para RSU. El inventario de electricidad usado en los procesos considerados (tratamiento de residuos, disposición, reciclaje y producción primaria de materiales) se transforman en cargas medioambientales de acuerdo al suministro eléctrico seleccionado. En el caso de la producción de electricidad en el sistema de tratamientos, se ha supuesto como electricidad secundaria que sustituye la electricidad procedente de fuentes primarias. Las cargas ambientales así evitadas se contabilizan como beneficios.

El Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de la electricidad se especifica para México en la herramienta LCA-IWM. Este inventario no incluyen el transporte ni las pérdidas por distribución. La producción de electricidad doméstica neta y las partes importadas están basadas en medias anuales (sener, 2006). En la Tabla 4.23 se presenta la producción de energía empleados en la producción de electricidad en México para el año 2006.

**Tabla 4.23.** Producción de **energía eléctrica** primaria de **México** en el año 2006.

		Total (%)
<b>Carbón.</b>		<b>2.2</b>
<b>Hidrocarburos</b>		<b>90.0</b>
Petróleo crudo	68.8	
Condensados	1.3	
Gas natural	19.9	
<b>Electricidad primaria</b>		<b>4.6</b>
Nucleoenergía	1.1	
Hidroenergía	2.9	
Geoenergía	0.6	
Energía eólica	n.s.	
<b>Biomasa</b>		<b>3.2</b>
Bagazo de caña	0.9	
Leña	2.3	
<b>Total</b>		<b>100</b>

n.s. no significativo

La Tabla 4.24 presenta los indicadores ambientales de la producción de 1kWh para la electricidad mexicana.

**Tabla 4.24.** Indicadores ambientales de la electricidad mexicana, para 1kWh.

<b>Indicadores</b>	<b>unidades</b>	<b>valor</b>
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b>	kg Sb eq	5.13E-03
<b>Calentamiento Global (CG)</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	7.88E-01
<b>Toxicidad Humana (TH)</b>	kg 1-4 DCB eq	2.05E-01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b>	kg etileno eq	1.78E-04
<b>Acidificación (AC)</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	5.06E-03
<b>Eutrofización (EU)</b>	kg PO <sub>4</sub> eq	5.26E-04

### ***4.3.2 Calor***

En este estudio se considera que el calor como flujo de entrada de energía procede de la combinación de gas natural. De la misma manera, cuando se obtiene energía en forma de calor como un beneficio del sistema se considera el proceso evitado de la combustión de la cantidad equivalente de gas natural. Las cargas medioambientales generadas por el suministro de calor procedente de fuentes primarias presentan beneficios producidas por el proceso. Para este estudio se considera la producción de calor, a partir de gas natural contribuyendo en un 100%.

### ***4.3.3 Acero y lubricantes***

En los procesos de reciclado (papel, vidrio, metal y plástico) se consumen lubricantes o piezas de acero derivado del mantenimiento de las instalaciones. El impacto medioambiental total de los materiales auxiliares se ha calculado sobre la base de las cantidades totales de lubricantes y piezas de acero consumidas para el proceso considerado y la contribución específica por kg o litro.

### ***4.3.4 Diesel para transporte y maquinaria***

En los procesos se presenta el consumo de combustible, para el transporte y uso de maquinaria. Se suponen iguales las cargas medioambientales por litro de combustible, para el consumo de transporte y maquinaria.

## **CAPÍTULO 5**

# **ESCENARIOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## Capítulo 5

### ESCENARIOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS

#### Índice

5.1 Introducción .....	117
5.2 Descripción de los escenarios .....	117
5.3 Evaluación ambiental de los escenarios .....	120
5.3.1 Evaluación ambiental del Escenario RS actual .....	121
5.3.2 Evaluación ambiental del Escenario RS moderno .....	123
5.3.3 Comparación ambiental entre los escenarios RS actual y RS moderno.....	125
5.3.4 Evaluación ambiental del Escenario de Digestión-RS moderno.....	126
5.3.5 Comparación entre los escenarios RS actual y Digestión-RS moderno.....	129
5.3.6 Evaluación ambiental del Escenario de ReCoRSmoderno .....	129
5.3.7 Comparación ambiental entre los escenarios RS actual y ReCoRS moderno.....	133
5.3.8 Evaluación ambiental del Escenario de ReCoIncineración.....	133
5.3.9 Comparación ambiental entre los escenarios RS actual y ReCoIncineración.....	136
5.4 Comparación ambiental de los escenarios .....	137
5.4.1 Evaluación ambiental de los escenarios .....	137
5.5 Resultados de los escenarios .....	139

#### Resumen

En este capítulo se presentan los escenarios de tratamiento de residuos urbanos estudiados para la gestión de los RSU en Chihuahua. Un escenario incluye el almacenamiento temporal, recolección-transporte y el o los tratamientos seleccionados para el tratamiento de los residuos. Se presenta la evaluación ambiental de cada escenario y la comparación ambiental con la situación actual de tratamiento de residuos sólidos urbanos.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## **5.1 Introducción**

En este capítulo se presentan los escenarios de tratamiento de residuos estudiados para la gestión de residuos de la ciudad de Chihuahua, incluyendo el escenario actual. Un escenario de tratamiento de residuos es la combinación de las variantes posibles en cada uno de las etapas de tratamiento descritos en el capítulo anterior.

La evaluación ambiental de cada escenario considera el almacenamiento temporal, recolección-transporte, tratamiento o disposición final de los residuos. Posterior a la evaluación de los diferentes escenarios se realiza una comparación ambiental entre la situación actual y los escenarios propuestos. La comparación ambiental entre los escenarios, nos permitirá identificar el tratamiento más adecuado ambientalmente para la gestión de RSU de Chihuahua.

En la Figura 5.1 se presenta el esquema de los escenarios estudiados (el escenario actual y cuatro escenarios propuestos).

## **5.2 Descripción de los escenarios**

### **Escenario 1. Relleno Sanitario actual**

Presenta la situación actual de gestión de residuos sólidos urbanos en Chihuahua. Los residuos mezclados son almacenados temporalmente en bolsas de polietileno y contenidos en botes de plástico y canasta metálica. Estos son recolectados por un camión estándar y transportado por el mismo camión directamente al relleno sanitario (RS). Los residuos depositados en el RS son cubiertos con tierra y compactados, al ocurrir la biodegradación de los residuos se presentan emisiones de gas y lixiviados los cuales se emiten al medio ambiente.

### **Escenario 2. RS moderno**

El escenario RS moderno presenta el almacenamiento temporal de los residuos mezclados en bolsas de polietileno y contenidos en botes de plástico o canasta metálica, posteriormente se recolectan en un camión estándar y se trasladan a la estación de transferencia. De ahí son transportados en un camión con tráiler al RS moderno. Este sistema presenta dos controles ambientales en el RS: recolección de las emisiones de gas para producir energía y tratamiento del lixiviado, para evitar los posibles episodios de contaminación.

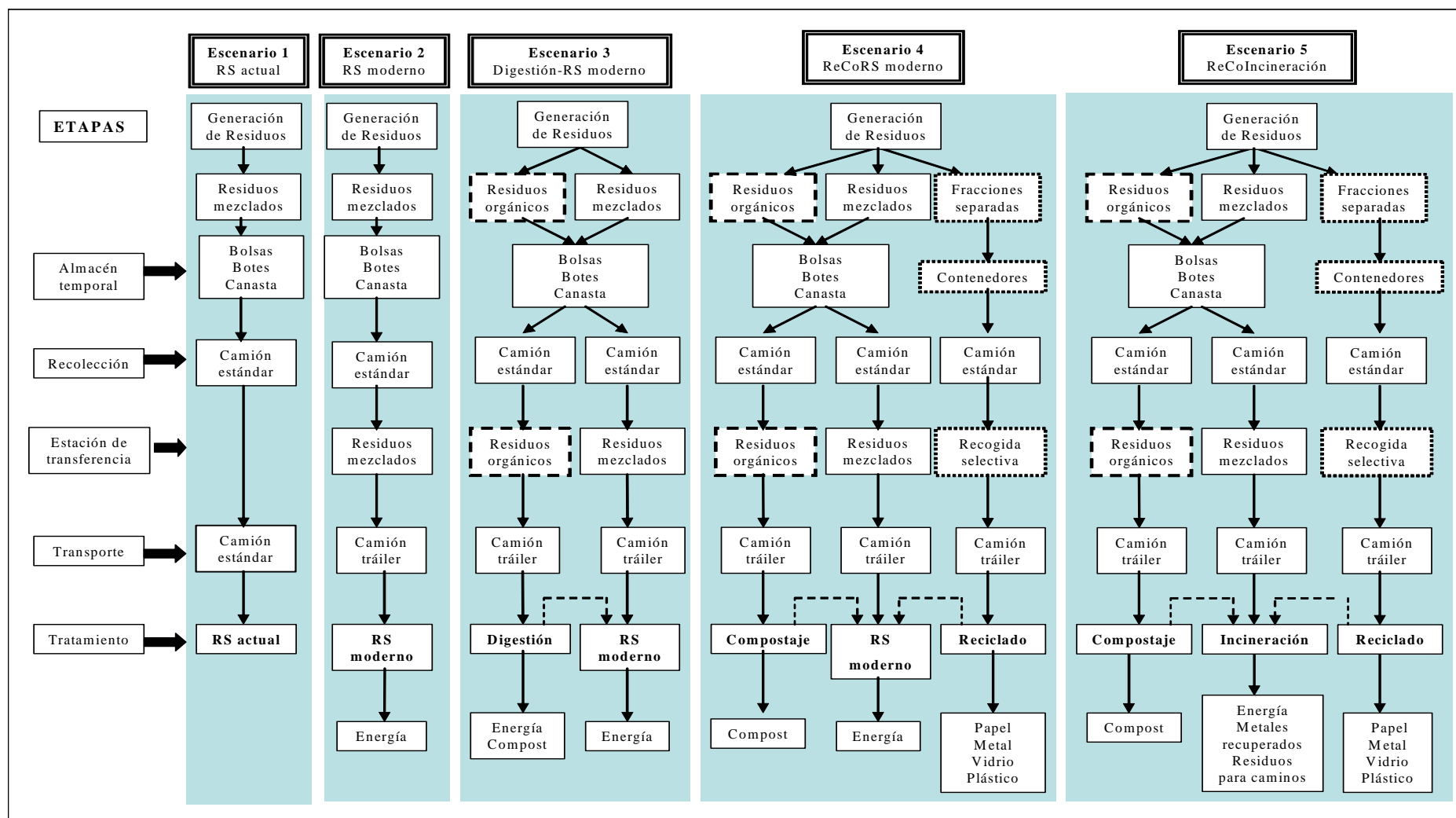


Figura 5.1. Diagrama de las etapas consideradas en los escenarios estudiados.

### **Escenario 3. Digestión-RS moderno**

El escenario 3 presenta una propuesta de tratamiento para los residuos orgánicos. En este escenario se presenta la separación de la fracción orgánica en las viviendas del resto de residuos mezclados. Los residuos se colocan por separado (orgánico y mezclado) en bolsas de polietileno y se colocan en botes de plástico o canasta metálica. Los residuos (orgánicos y mezclados) se recolectan con un camión estándar y se transportan a la estación de transferencia. Posteriormente se trasladan los residuos orgánicos a la planta de digestión y los residuos mezclados al RS moderno. El transporte de la estación de transferencia a la planta de digestión se realiza en un camión con tráiler de mayor capacidad. En el proceso de digestión el 5% del total de los residuos orgánicos recibidos se considera como rechazo los residuos que no reúnen las condiciones necesarias para procesar y se llevan al RS moderno. El proceso de la digestión y RS moderno producen gases los cuales se recolectan para producir energía. Del proceso de digestión se obtiene compost (considerado como beneficio ambiental).

### **Escenario 4. ReCoRS moderno**

Este escenario presenta el tratamiento para las fracciones recogidas selectivamente (papel, vidrio, metal y plástico), residuos orgánicos y residuos mezclados. Las fracciones recogidas selectivamente se depositan en contenedores de plástico (2,500 L), distribuidos en la ciudad. Los residuos orgánicos se separan en la vivienda y se colocan en bolsas de polietileno, los residuos mezclados también se colocan en bolsas de polietileno. Las bolsas se colocan en botes de plástico o canasta metálica en las aceras. Los residuos (orgánicos y mezclados) y las fracciones recogidas selectivamente se recolectan con camiones estándar y se transportan a la estación de transferencia donde se cargan a un camión con tráiler (de mayor capacidad que el camión estándar) para transportar las fracciones separadas; a las instalaciones de reciclado correspondientes, los residuos orgánicos a la planta de compostaje y los residuos mezclados al RS moderno. Los residuos rechazados del proceso de compostaje (5%) y de los procesos de reciclaje (papel 10%, vidrio 3%, metal 5% y plástico 10%) se llevan al RS moderno. Los beneficios obtenidos del reciclado de fracciones son la recuperación de papel, vidrio, metal y plástico. Del compostaje se obtiene compost y del RS moderno se obtiene energía proveniente de la recuperación de gases emitidos y del tratamiento de lixiviado.

### **Escenario 5. ReCoIncineración**

Este escenario consiste en la combinación de tres tratamientos: el reciclado, el compostaje y la incineración, para el tratamiento de los residuos. Las fracciones recogidas selectivamente

(papel, vidrio, metal y plástico) se colocan en contenedores de plástico (2,500 L), distribuidos en la ciudad. Los residuos orgánicos (separados en las viviendas) y los residuos mezclados se depositan en bolsas de polietileno por separado y se colocan en botes de plástico o canasta metálica. Las fracciones separadas y bolsas con residuos (orgánicos y mezclados) se recolectan con camiones estándar y se trasladan a la estación de transferencia. De ahí se cargan a un camión con tráiler (de mayor capacidad que el camión estándar) para transportar las fracciones separadas a las instalaciones correspondientes, los residuos orgánicos a la planta de compostaje y los residuos mezclados a la incineración. Los residuos rechazados del proceso de compostaje (5%) y de los procesos de reciclaje (papel 10%, vidrio 3%, metal 5% y plástico 10%) se llevan a incinerar. Los beneficios ambientales de este escenario son: papel, vidrio, metal y plástico recuperados por el proceso de reciclado, compost del proceso de compostaje y principalmente producción de energía (electricidad y calor) del proceso de incineración.

### 5.3 Evaluación ambiental de los escenarios

A continuación se presentan las consideraciones adoptadas para la evaluación ambiental de cada escenario, en cada etapa:

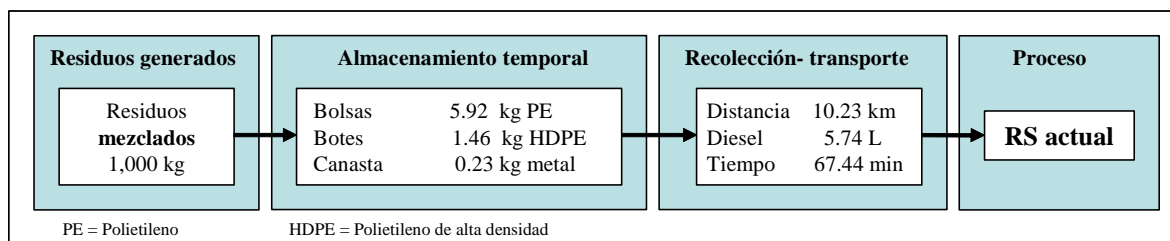
- **Almacenamiento temporal:** se consideró el impacto ambiental de la fabricación de bolsas de polietileno, canasta metálica, botes de plástico y contenedores de plástico empleado para las fracciones separadas. Considerando el final de vida para los botes de plástico de 2 años elaborados con 30% de material reciclado, los contenedores de plástico con duración de 10 años elaborado con 50% de material reciclado, la canasta metálica con duración de 10 años elaborada con 70% de material reciclado y las bolsas de polietileno de un solo uso (Figura 4.4).
- **Recolección-transporte:** se considera el impacto ambiental por el consumo de combustible debido al recorrido durante la recolección y transporte. Considerando el consumo de combustible por la velocidad de recorrido para el tipo de camión empleado en la recolección de residuos (camión estándar en la ciudad) y el transporte con tráiler desde la estación de transferencia hasta la instalación de tratamiento o disposición final. También se considera en la evaluación ambiental el consumo de combustible cuando esta cargando los residuos (bolsas o contenedores). Se toma en cuenta el tiempo de espera en la estación de transferencia para la carga en el tráiler y la descarga en el RS o instalación de tratamiento (Figura 4.6 a, b y c).

- **Tratamiento:** el impacto ambiental del proceso empleado del RS actual (Figura 4.9), RS moderno (Figura 4.12), Incineración (Figura 4.16), Digestión (Figura 4.20), Compostaje (Figura 4.24) y Reciclado (Figura 4.27, 4.30, 4.33 y 4.36). Además, incluyendo los insumos para realizar dichos procesos (electricidad, combustible empleado en el proceso y sustancias químicas).
- **Beneficios:** se considera el beneficio ambiental obtenido por los procesos como: producción de energía (electricidad y calor), compost y la recuperación de materiales reciclados (papel, vidrio, metal y plástico).

### 5.3.1 Evaluación ambiental del Escenario RS actual

En la Figura 5.2 se presenta el diagrama del Escenario RS actual indicando la cantidad de parámetros para la evaluación de **una tonelada de residuos**, considerando las etapas de:

- **Almacenamiento temporal.** Se considera la **situación actual** (Figura 4.4) de residuos sólidos mezclados en bolsas de polietileno (100%), distribuidas a ambos lados de la calle y considerando la capacidad de 110 L (2 bolsas de 55 L), distribuidos en canasta metálica el 50%, en botes de plástico el 30% y el resto sobre la acera.
- **Recolección-transporte.** Se considera la **situación actual** (Figura 4.6a y Tabla 4.4) consumiendo 5.74 L de diesel en la recolección de una tonelada de residuos. Los residuos recolectados se transportan directamente al RS actual, con un **camión estándar**, recorriendo 10.23 km en 67.44 minutos.
- **Tratamiento.** Se evalúa el **RS actual** (sin control de emisiones), incluyendo los insumos de electricidad, calor y diesel, usado en los procesos.



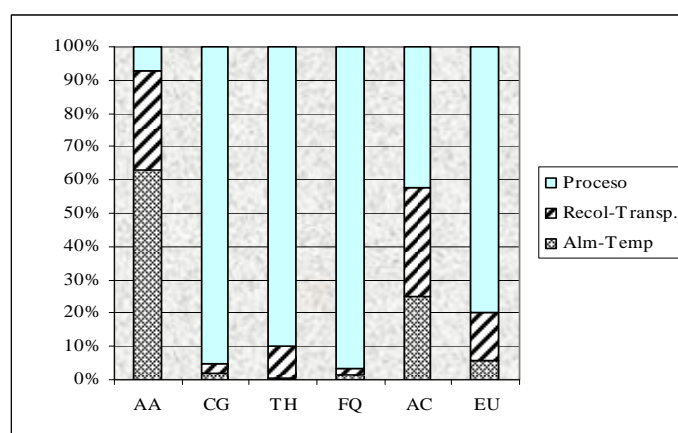
**Figura 5.2.** Diagrama del Escenario **RS actual** a evaluar.

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados ambientales del Escenario RS actual. En la Figura 5.3 se presenta la contribución de cada etapa del sistema de gestión de residuos estudiado para cada categoría de impacto.

**Tabla 5.1. Impacto ambiental para el Escenario RS actual.\***

Categoría de impacto	Almacenamiento temporal	Recolección-transporte	Emisiones RS actual	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg de Sb eq.)	2.40E-01	1.14E-01	2.73E-02	3.82E-01
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg de CO <sub>2</sub> eq.)	1.37E+01	1.71E+01	6.19E+02	6.50E+02
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq.)	1.52E-01	2.06E+00	1.93E+01	2.15E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg de etileno eq.)	2.39E-03	3.48E-03	1.79E-01	1.85E-01
<b>Acidificación (AC)</b> (kg de SO <sub>2</sub> eq.)	7.59E-02	9.84E-02	1.27E-01	3.02E-01
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg de PO <sub>4</sub> eq.)	8.11E-03	2.10E-02	1.14E-01	1.44E-01

\*para una tonelada de residuos



**Figura 5.3. Contribución ambiental de cada etapa en el escenario RS actual.**

El análisis ambiental para cada etapa y categoría indican que:

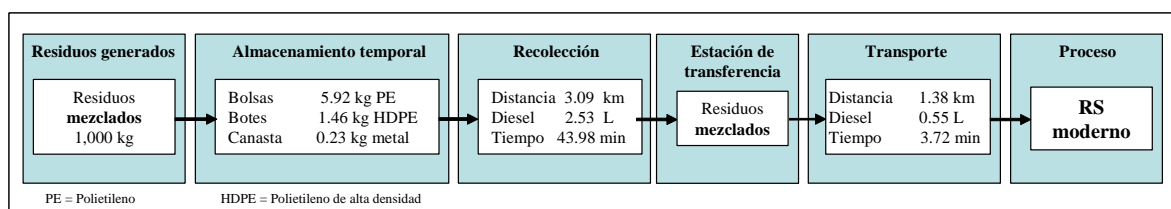
- La etapa de **almacenamiento temporal** presenta un impacto ambiental adverso, principalmente en la categoría de **agotamiento abiótico (AA)**, contribuyendo en un 63% del impacto total del escenario, la **acidificación (AC)** aporta el 25% del total. Esto es debido a las emisiones por la producción de las bolsas de polietileno, analizados con detalle en el apartado 4.1.1.3 y presentando la evaluación ambiental en la Tabla 4.2a.
- La etapa de **recolección-transporte** contribuye principalmente al impacto ambiental adverso del total del escenario en la categoría de **acidificación (AC)** en un 33%, **agotamiento abiótico (AA)** en un 30% del total, **eutrofización (EU)** en un 15% y **toxicidad humana (TH)** en un 10%. Este impacto se debe a las emisiones por el consumo del diesel durante la recolección-transporte, analizado con detalle en el apartado 4.1.2.3 y presentando la evaluación ambiental en la Tabla 4.5.

- La etapa del **proceso** contribuye al impacto ambiental adverso del escenario en las categorías de **calentamiento global (CG)** en un 95% del impacto total del escenario, en la categoría de **toxicidad humana (TH)** contribuye en un 90% del total, en la **fotooxidación química (FQ)** en un 97%, en la **acidificación (AC)** en un 42% y en la **eutrofización (EU)** contribuye en un 80% del total del escenario. El impacto ambiental a las categorías mencionadas se debe a las emisiones de gas (183 m<sup>3</sup>) y de lixiviado (477 L) liberados al medio ambiente (Figura 4.9), sin ningún control de emisiones al aire, ni tratamiento de lixiviados. En el apartado 4.1.3.3 se presenta en detalle el análisis ambiental y en la Tabla 4.7 la evaluación ambiental del proceso.
- Las emisiones totales resultantes indican impacto ambiental en todas las categorías, como consecuencia de las emisiones enviadas al medio ambiente. Disminuir las emisiones al medioambiente se presentara como una propuesta que mejorará la situación actual del RS en Chihuahua.

### ***5.3.2 Evaluación ambiental del Escenario RS moderno***

En la Figura 5.4 se presenta el diagrama del Escenario RS moderno indicando los valores considerados en cada etapa para la evaluación ambiental de tratamiento para una **tonelada de residuos**. Las consideraciones para cada etapa son:

- **Almacenamiento temporal.** Se considera la **situación actual** (Figura 4.4) de residuos mezclados en bolsas de polietileno (100%) a ambos lados de la calle, considerando la capacidad de 110 L(2 bolsas de 55L), depositados en canasta metálica (50%), en botes de plástico (30%) y el resto sobre la banqueta.
- **Recolección.** Se considera la utilización de la **estación de transferencia** (situación estación de transferencia, Tabla 4.6b) consume 2.53 L de diesel en la recolección en la ciudad con camión estándar, recorriendo 3.09 km en 43.98 minutos. El **transporte en camión con tráiler**, consume 0.55 L de diesel de la estación de transferencia a la instalación de tratamiento, recorriendo 1.38 km en 3.72 minutos.
- **Tratamiento en el RS moderno** (con control de emisiones), incluyendo los insumos de electricidad, calor y diesel usados en el proceso. Se obtienen beneficios por la recuperación de energía. En la Figura 4.12 se presenta el proceso RS moderno aplicado.



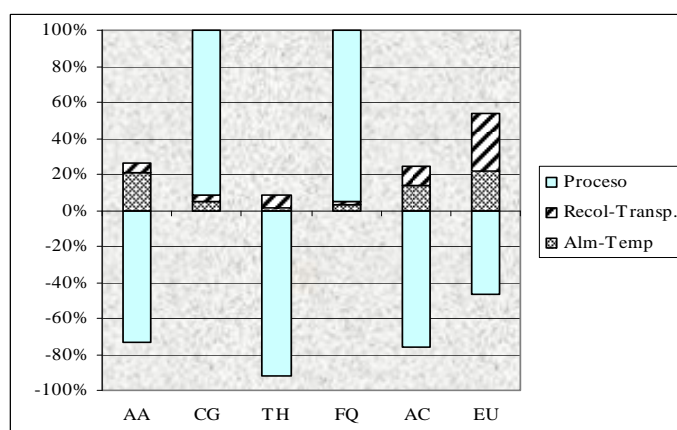
**Figura 5.4.** Diagrama del Escenario **RS moderno** con los datos a evaluar.

En la Tabla 5.2 se presentan los resultados de la evaluación ambientales del Escenario RS moderno, para una tonelada de residuos. En la Figura 5.5 se presenta la contribución ambiental de cada etapa del sistema de gestión de residuos estudiados para cada categoría de impacto.

**Tabla 5.2.** Impacto ambiental para el Escenario **RS moderno**.\*

Categoría de impacto	Almacenamiento temporal	Recolección-transporte	Emisiones RS moderno	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg de Sb eq.)	2.40E-01	6.49E-02	-8.50E-01	-5.45E-01
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg de CO <sub>2</sub> eq.)	1.37E+01	9.68E+00	2.41E+02	2.64E+02
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq.)	1.52E-01	1.17E+00	-1.45E+01	-1.32E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg de etileno eq.)	2.39E-03	1.98E-03	8.43E-02	8.87E-02
<b>Acidificación (AC)</b> (kg de SO <sub>2</sub> eq.)	7.59E-02	5.59E-02	-4.11E-01	-2.79E-01
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg de PO <sub>4</sub> eq.)	8.11E-03	1.19E-02	-1.72E-02	2.81E-03

\* para una tonelada de residuos



**Figura 5.5.** Contribución ambiental de cada etapa en el escenario **RS moderno**.

El análisis ambiental para cada categoría indica que:

- En la etapa de **almacenamiento temporal**, las categorías con mayor impacto ambiental adverso son la **eutrofización (EU)** contribuyendo en un 22%, en el

impacto total del escenario, el **agotamiento abiótico (AA)** contribuyendo en un 21% y la **acidificación (AC)** en un 14% debido a las emisiones por la producción de las bolsas. En el apartado 4.1.1.3 se analizó en detalle el impacto de las bolsas y presentando los resultados en la Tabla 4.2a.

- La etapa de **recolección-transporte** presenta un impacto ambiental adverso, principalmente en la categoría de **eutrofización (EU)**, contribuyendo en un 31% del impacto total del escenario, la **acidificación (AC)** en un 10% y la **toxicidad humana (TH)** aportando el 7% del total, debido al consumo de diesel. Analizados en detalle en el apartado 4.1.2.3 y presentando la evaluación ambiental en la Tabla 4.5.
- La etapa del **proceso** presenta mayor impacto ambiental adverso en la categoría de **fotooxidación química (FQ)** contribuyendo en un 92% del impacto total del escenario y el **calentamiento global (CG)** contribuyendo en un 95%. El beneficio ambiental se presenta en la categoría de **toxicidad humana (TH)** en un 92%, **acidificación (AC)** en un 76%, **agotamiento abiótico (AA)** en un 74% y **eutrofización (EU)** en un 47%, debido a las emisiones no recolectadas (según se muestra en la Figura 4.6, debido al 58% de gas y 18% de lixiviado del total de las emisiones en el RS moderno) causado por el proceso de descomposición de los residuos. En esta misma etapa, la categoría de **agotamiento abiótico** presenta un beneficio ambiental por la recuperación de energía. En la Tabla 4.9 se presenta la evaluación ambiental del proceso y en el apartado 4.1.3.4 se analiza en detalle.
- En el total, se muestra un beneficio ambiental en las categorías de agotamiento abiótico (AA), toxicidad humana (TH) y acidificación (AC), debido principalmente a la recuperación de energía del proceso.
- El beneficio ambiental obtenido en este proceso al evitar el consumo de recursos abióticos es una propuesta de mejora para el tratamiento de los residuos sólidos en la ciudad de Chihuahua.

### ***5.3.3 Comparación ambiental entre los escenarios RS actual y RS moderno***

En la Tabla 5.3. se presenta la comparación de los resultados ambientales totales de los escenarios, RS actual y RS moderno, correspondientes a las Tablas 5.1 y 5.2.

- En estos escenarios se observa en la categoría de agotamiento abiótico, toxicidad humana y acidificación un beneficio ambiental en el RS moderno, debido a la recuperación de energía y la reducción del impacto por la utilización de la estación de

transferencia. El impacto de las otras categorías comparando el RS actual y el RS moderno es en todos los casos claramente inferior. Por lo tanto el escenario que presenta mayor beneficio ambiental es el RS moderno.

**Tabla 5.3.** Comparación de la evaluación ambiental del **RS actual** y **RS moderno**.

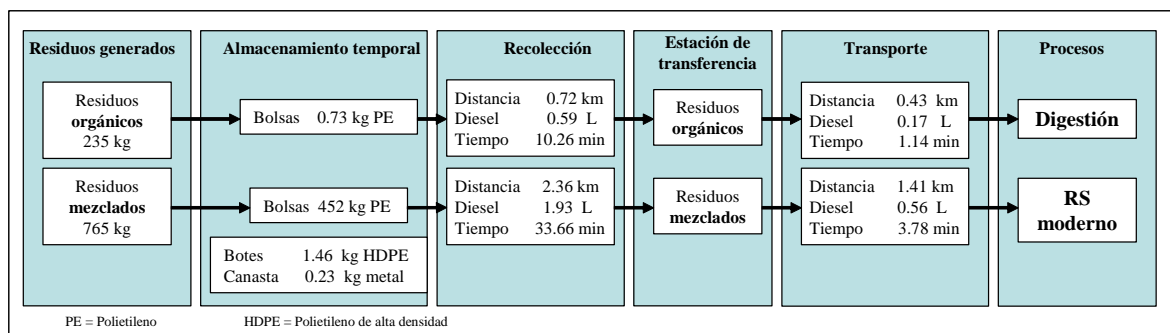
Categoría de impacto	RS actual	RS moderno
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg de Sb eq.)	3.82E-01	-5.45E-01
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg de CO <sub>2</sub> eq.)	6.50E+02	2.64E+02
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq.)	2.15E+01	-1.32E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg de etileno eq.)	1.85E-01	8.87E-02
<b>Acidificación (AC)</b> (kg de SO <sub>2</sub> eq.)	3.02E-01	-2.79E-01
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg de PO <sub>4</sub> eq.)	1.44E-01	2.81E-03

### 5.3.4 Evaluación ambiental del Escenario de Digestión-RS moderno

En la Figura 5.6 se presenta el diagrama del Escenario Digestión-RS moderno indicando los valores considerados en cada etapa para una tonelada de RSU.

- Almacenamiento temporal.** En la determinación de la cantidad de residuos orgánicos separados y enviados al proceso de digestión, se consideró la propuesta de la directiva de vertederos de residuos de la Unión Europea (European Council 99/31/EC) para reducir la cantidad de residuos depositados en los rellenos sanitarios. En este estudio se propone la separación del 50% de residuos orgánicos presentes en los RSU. Se considera la separación de los residuos orgánicos desde las viviendas, colocándolos en bolsas de polietileno con capacidad de 28 L. La cantidad de residuos orgánicos separados corresponden a 235 kg. Para el proceso de RS moderno, corresponde a 765 kg de residuos mezclados colocados en bolsas con capacidad de 60 L. En esta etapa se evalúa la cantidad de 5.25 kg de **polietileno de las bolsas**, 1.46 kg de **HDPE** usado en botes y 0.23 kg de **metal** usado en canastas, para una tonelada de residuos tratados. La separación de residuos en orgánicos y mezclados disminuye el volumen de las bolsas y la cantidad de polietileno empleado. En el escenario RS actual y RS moderno, se utilizó una bolsa para los residuos mezclados de un volumen de 110 L y para el escenario actual se ha considerado bolsas de 88 L. La causa de la disminución de volumen es la diferencia de densidad de los residuos separados (residuos orgánicos con densidad de 200 kg/m<sup>3</sup> y residuos mezclados 110 kg/m<sup>3</sup>).

- **Recolección.** Se consume 2.52 L de diesel durante la recolección en 3.09 km en la ciudad en **camión estándar**, durante 43.92 minutos y hasta la estación de transferencia. En el **transporte** consume 0.74 L de diesel de la estación de transferencia a la instalación de tratamiento, recorriendo 1.84 km en camión tráiler durante 4.92 minutos.
- **Tratamiento de digestión** (a residuos orgánicos) y **RS moderno** (a residuos mezclados), incluye los insumos de electricidad, calor y diesel usados en los procesos. Considerando la producción de compost como beneficio ambiental y la recuperación de energía. En la Figura 4.20 y 4.12 se presentan los diagramas de los procesos de digestión y RS moderno respectivamente.



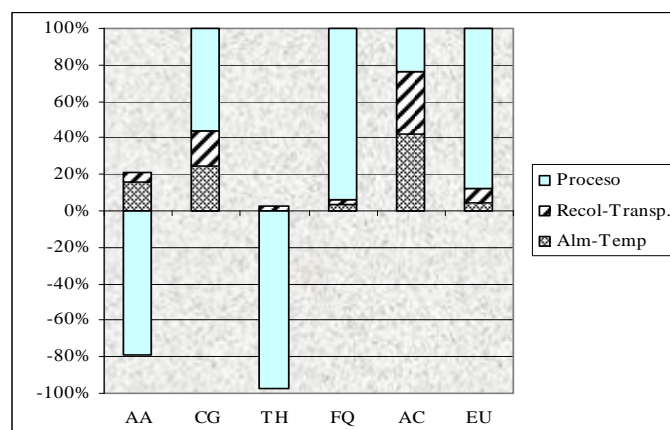
**Figura 5.6.** Diagrama del Escenario **Digestión-RS moderno** con los datos a evaluar.

En la Tabla 5.4 se presentan los resultados de la evaluación ambiental para el Escenario de Digestión-RS moderno, considerando como unidad funcional una tonelada de residuos. La Figura 5.7 presenta la contribución ambiental de cada etapa del sistema de gestión de residuos estudiado para cada categoría de impacto.

**Tabla 5.4.** Impacto ambiental para el Escenario **Digestión-RS moderno**.\*

Categoría de impacto	Almacenamiento temporal	Recolección-transporte	Emisiones Digestión-RS moderno	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg de Sb eq.)	2.14E-01	6.43E-02	-1.04E+00	-7.66E-01
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg de CO <sub>2</sub> eq.)	1.22E+01	9.60E+00	2.79E+01	4.97E+01
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq.)	1.37E-01	1.16E+00	-4.22E+01	-4.09E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg de etileno eq.)	2.13E-03	1.96E-03	6.08E-02	6.49E-02
<b>Acidificación (AC)</b> (kg de SO <sub>2</sub> eq.)	6.76E-02	5.54E-02	3.85E-02	1.62E-01
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg de PO <sub>4</sub> eq.)	7.22E-03	1.18E-02	1.31E-01	1.50E-01

\*para una tonelada de residuos



**Figura 5.7.** Contribución ambiental de cada etapa en el escenario **Digestión-RS moderno**.

El análisis ambiental para cada categoría indica que:

- La etapa de **almacenamiento temporal** presenta un impacto ambiental adverso, principalmente en las categorías de **acidificación (AC)** contribuyendo en un 42% en el impacto total de la categoría y el **calentamiento global (CG)** en un 25% y el **agotamiento abiótico (AA)** en un 16%. Este impacto adverso se debe principalmente a las bolsas de polietileno empleadas.
- En la etapa de **recolección-transporte** presenta un impacto ambiental adverso principalmente en las categorías de **acidificación (AC)** contribuyendo en un 34% en el impacto total de la categoría y **calentamiento global (CG)** en un 19%.
- La etapa del **proceso** presenta un impacto ambiental adverso en las categorías de **fotooxidación química (FQ)** en un 94%, **eutrofización (EU)** en un 87%, **calentamiento global (CG)** contribuyendo en un 56% y **acidificación (AC)** en un 23%. El impacto ambiental adverso se debe principalmente a las **emisiones del proceso**, en el RS moderno, no recolectadas (gas 58% y lixiviado 23%, Figura 4.12). El proceso presenta un beneficio ambiental en las categorías de **toxicidad humana (TH)** en un 94% y **agotamiento abiótico (AA)** contribuyendo en un 87%. El beneficio ambiental se debe a la recuperación de energía por parte del proceso de digestión y RS moderno; además por el compost producido en el proceso de digestión. En los apartados 4.1.3.4 y 4.1.5.3 se presentan en detalle la evaluación ambiental del proceso del RS moderno y del proceso de digestión.
- En el impacto total del escenario se observan beneficios ambientales en las categorías de **agotamiento abiótico (AA)** y **toxicidad humana (TH)**. El principal responsable

de este beneficio ambiental es la recuperación de energía de los procesos de digestión, RS moderno y el compost producido.

### 5.3.5 Comparación entre los escenarios RS actual y Digestión-RS moderno.

En la Tabla 5.5 se presenta la comparación de los resultados ambientales totales de los escenarios RS actual y Digestión-RS moderno, presentados en las Tablas 5.1 y 5.4.

**Tabla 5.5.** Comparación ambiental de los escenarios **RS actual** y **Digestión-RS moderno**.

Categoría de impacto	RS actual	Digestión-RS moderno
<b>Agotamiento Abiótico</b> (AA) (kg de Sb eq.)	3.82E-01	-7.66E-01
<b>Calentamiento Global</b> (CG) (kg de CO <sub>2</sub> eq.)	6.50E+02	4.97E+01
<b>Toxicidad Humana</b> (TH) (kg 1-4 DCB eq.)	2.15E+01	-4.09E+01
<b>Fotooxidación Química</b> (FQ) (kg de etileno eq.)	1.85E-01	6.49E-02
<b>Acidificación</b> (AC) (kg de SO <sub>2</sub> eq.)	3.02E-01	1.62E-01
<b>Eutrofización</b> (EU) (kg de PO <sub>4</sub> eq.)	1.44E-01	1.50E-01

- El escenario Digestión-RS moderno presenta beneficios ambientales en las categorías de agotamiento abiótico y toxicidad humana, debido a la recuperación de energía en los dos tratamientos. El menor impacto entre el escenario RS actual y el escenario Digestión-RS moderno se presenta una disminución en el impacto de las categorías de calentamiento global, fotooxidación química y acidificación para el escenario Digestión-RS moderno en un 92%, 65% y 46%, respectivamente. En la categoría de eutrofización el RS actual presenta un impacto ambiental inferior en un 4% en comparación con el escenario Digestión-RS moderno. La causa son las emisiones de amoníaco, que impactan en esta categoría, durante la etapa de maduración del proceso de digestión.

### 5.3.6 Evaluación ambiental del Escenario de ReCoRS moderno

En la Figura 5.8 se presentan el diagrama del escenario ReCoRS moderno, para evaluar una tonelada de residuos. Este escenario presenta la combinación de tres tratamientos, el reciclado, el compostaje y el RS moderno. Las consideraciones para cada etapa son:

- **Almacenamiento temporal.** Se considera la separación de las fracciones correspondientes para cada tratamiento, desde las viviendas. En la determinación de la cantidad de fracciones separadas se consideró la propuesta de la Directiva

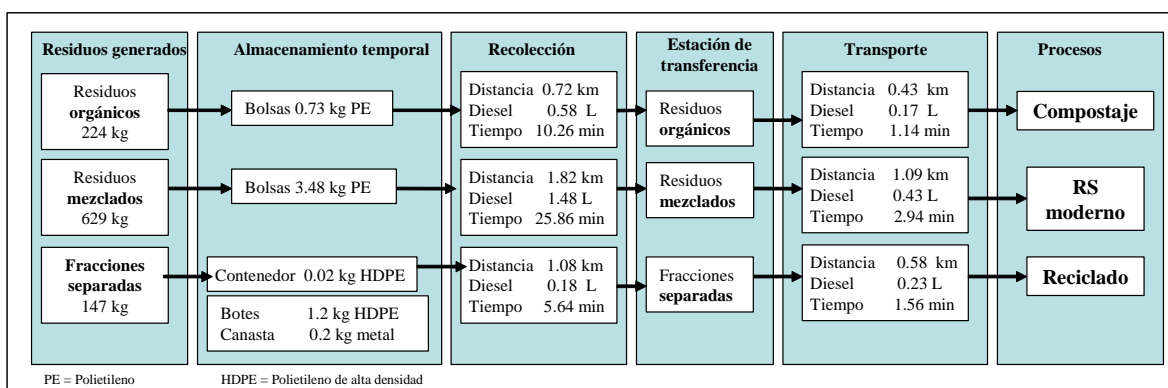
94/62/EC (European Parliament and Council) sobre reciclado de la Unión Europea. Esta considera la separación de 60% de vidrio, 60% de papel, 50% de metales y 22.5% de plásticos, presentes en los RSU. En este estudio se consideró la cantidad propuesta por la Unión Europea, separando las fracciones de papel, vidrio, metal y plástico colocándolos en los contenedores correspondientes con capacidad de 2,500 L, para llevar a reciclar. La cantidad total de las fracciones separadas a reciclar, en base a la unidad funcional corresponde a 147 kg, en una tonelada de RSU.

Para los residuos orgánicos se consideró la propuesta de la directiva de vertederos de residuos de la Unión Europea (European Council 99/31/EC) para reducir la cantidad de residuos depositados en los rellenos sanitarios. Aquí se propone la separación del 50% de residuos orgánicos, presentes en los RSU. Los residuos orgánicos se colocaron en bolsas de polietileno con capacidad de 28 L correspondiendo a 224 kg, en una tonelada de residuos.

Para el proceso de RS moderno, el resto de los residuos, correspondiendo a 629 kg de residuos mezclados se colocan en bolsas con capacidad de 60 L.

Para una tonelada de residuos sólidos se utiliza en el almacenamiento temporal 4.21 kg de **polietileno** de las bolsas, 1.24 kg de **HDPE** usado en los botes y 0.20 kg de **metal** usado en las canastas y 0.02 kg de **HDPE** correspondiente a los contenedores.

- **Recolección.** Se realiza en camión estándar, consumiendo 2.24 L de diesel, en la recolección de una tonelada de residuos, por el recorrido de 3.62 km durante 41.76 minutos en la ciudad. El **transporte** consume 0.83 L de diesel de la estación de transferencia a la instalación de tratamiento, recorriendo 2.10 km, durante 5.64 minutos en camión con tráiler. Esto para una tonelada de residuos.
- **Tratamiento de: reciclado** (fracciones separadas), **compostaje** (residuos orgánicos) y **RS moderno** (residuos mezclados), incluyendo el beneficio del compost producido, recuperación de energía, fracciones recicladas y los insumos de electricidad, calor y diesel usados en los procesos. En la Figura 4.12, 4.24, 4.27, 4.30, 4.33 y 4.36 se presentan los diagramas de los procesos de RS moderno, compostaje y reciclado para cada fracción, respectivamente.



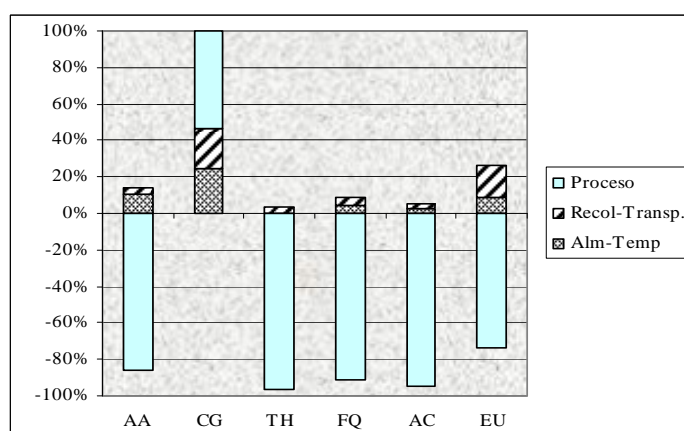
**Figura 5.8.** Diagrama del Escenario **ReCoRS moderno** con los datos a evaluar.

En la Tabla 5.6 se muestran los resultados de la evaluación ambiental del escenario ReCoRSmoderno para una tonelada de residuos. La Figura 5.9 presenta la contribución ambiental de cada etapa del sistema de gestión de residuos para cada categoría de impacto.

**Tabla 5.6.** Impacto ambiental para Escenario de **ReCoRSmoderno**.\*

Categoría de impacto	Almacenamiento temporal	Recolección-transporte	Emisiones ReCoRSmodero	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg de Sb eq.)	1.76E-01	6.10E-02	-1.46E+00	-1.22E+00
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg de CO <sub>2</sub> eq.)	1.00E+01	9.10E+00	2.24E+01	4.15E+01
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq.)	1.13E-01	1.10E+00	-3.47E+01	-3.35E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg de etileno eq.)	1.75E-03	1.86E-03	-3.61E-02	-3.25E-02
<b>Acidificación (AC)</b> (kg de SO <sub>2</sub> eq.)	5.56E-02	5.25E-02	-2.03E+00	-1.92E+00
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg de PO <sub>4</sub> eq.)	5.94E-03	1.12E-02	-4.80E-02	-3.08E-02

\* para una tonelada de residuos



**Figura 5.9.** Contribución ambiental de cada etapa en el escenario ReCoRS moderno.

El análisis ambiental para cada categoría indica que:

- En la etapa de **almacenamiento temporal** se presentan impactos ambientales adversos significativos en las categorías de **calentamiento global (CG)** en un 24%, **agotamiento abiótico (AA)** contribuyendo en un 10%, y la **eutrofización (EU)** en un 9%, debido a la producción de las bolsas de polietileno. En la Tabla 4.2b se presenta la evaluación ambiental de esta etapa y en el apartado 4.1.1.3 se analiza en detalle el impacto ambiental de las bolsas.
- En la etapa de **recolección-transporte** se presenta un impacto ambiental adverso significativo en las categorías de **calentamiento global (CG)** contribuyendo en un 22% del impacto total del escenario y la **eutrofización (EU)** en un 17%. Estas emisiones debidas a la combustión del diesel. En la Tabla 4.5 se presenta la evaluación ambiental de esta etapa y en el apartado 4.1.2.3 se analiza en detalle el impacto ambiental por el consumo de diesel.
- La etapa del **proceso** presenta beneficios ambientales en las categorías de **toxicidad humana (TH)** en un 97%, **acidificación (AC)** en un 95%, **fotooxidación química (FQ)** en un 91%, **agotamiento abiótico** contribuyendo en un 86% y **eutrofización (EU)** en un 74%, debido principalmente al beneficio ambiental del compost producido, recuperación de energía y las fracciones recicladas. En la categoría de **calentamiento global (CG)** se presenta un impacto ambiental adverso, aportando el 54%. El impacto se debe principalmente a las emisiones del proceso de compostaje de metano y fosfato, respectivamente, quien no tiene control de emisiones. En las Tablas 4.9, 4.15, 4.17, 4.19, 4.20, 4.22 presentan la evaluación ambiental de los procesos de RS moderno, Compostaje y el reciclado de fracciones. En los apartados 4.1.3.4, 4.1.6.3, 4.1.7.3, 4.1.7.6, 4.1.7.9 y 4.1.7.12 se analizan en detalle el impacto ambiental de los procesos del escenario ReCoRSmoderno.
- En total, la combinación de **procesos** de reciclado, compostaje y RS moderno presentan beneficios ambientales en las categorías de **agotamiento abiótico (AA)**, **toxicidad humana (TH)**, **fotooxidación química (FQ)**, **acidificación (AC)** y **eutrofización (EU)**. El reciclado y el RS moderno presentan beneficios ambientales por la recuperación de fracciones para el reciclado, compost producido y la recuperación de energía en el RS moderno. El impacto ambiental en las categorías de calentamiento global y eutrofización se debe principalmente a las emisiones del proceso de RS moderno.

### 5.3.7 Comparación ambiental entre los escenarios RS actual y ReCoRS moderno

En la Tabla 5.7 se presenta la comparación de los resultados de la evaluación ambiental de los escenarios RS actual y ReCoRS moderno. Los resultados de los escenarios RS actual y ReCoRS moderno se presentan en las Tablas 5.1 y 5.6.

**Tabla 5.7.** Comparación ambiental de los escenarios RS actual y ReCoRS moderno\*.

Categoría de impacto	RS actual	ReCoRS moderno
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg de Sb eq.)	3.82E-01	-1.22E+00
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg de CO <sub>2</sub> eq.)	6.50E+02	4.15E+01
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq.)	2.15E+01	-3.35E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg de etileno eq.)	1.85E-01	-3.25E-02
<b>Acidificación (AC)</b> (kg de SO <sub>2</sub> eq.)	3.02E-01	-1.92E+00
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg de PO <sub>4</sub> eq.)	1.44E-01	-3.08E-02

\* para una tonelada de residuos

- El escenario ReCoRS moderno presenta un beneficio ambiental en las categorías agotamiento abiótico, toxicidad humana, fotooxidación química, acidificación y eutrofización, en comparación con el escenario RS actual. En la categoría de calentamiento global se presenta un impacto ambiental inferior en un 93%, en el escenario ReCoRS moderno con respecto al escenario RS actual.

### 5.3.8 Evaluación ambiental del Escenario de ReCoIncineración

En la Figura 5.10 se presentan el diagrama del Escenario ReCoIncineración. Se considera para cada etapa, como unidad funcional **una tonelada de residuos**:

- **Almacenamiento temporal** Se considera como unidad funcional una tonelada de residuos sólidos. Este escenario presenta la combinación de tres tratamientos, el reciclado, el compostaje y la Incineración. Se considera la separación de fracciones correspondientes para cada tratamiento, desde las viviendas. En la determinación de la cantidad de fracciones separadas se consideró la propuesta de la Directiva 94/62/EC (European Parliament and Council) sobre reciclado de la Unión Europea. Esta considera la separación de 60% de vidrio, 60% de papel, 50% de metales y 22.5% de plásticos. En este estudio se consideró la cantidad propuesta por la Unión Europea, separando las fracciones de papel, vidrio, metal y plástico colocándolos en los contenedores correspondientes con capacidad de 2,500 L, para llevar a reciclar. La

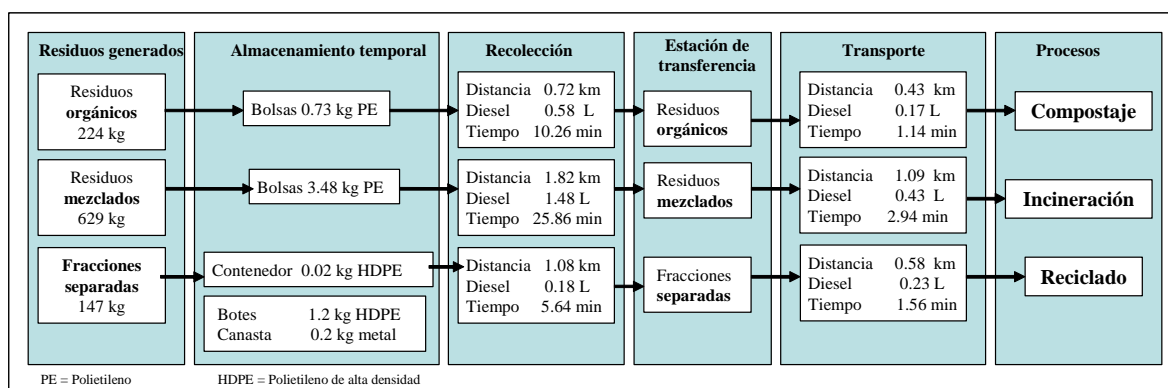
cantidad total de las fracciones separadas a reciclar, en base a la unidad funcional corresponde a 147 kg.

En los residuos orgánicos se consideró la propuesta de la directiva de vertederos de residuos de la Unión Europea (European Council 99/31/EC) para reducir la cantidad de residuos depositados en los rellenos sanitarios. Aquí se propone la separación del 50% de residuos orgánicos. Los residuos orgánicos se colocaron en bolsas de polietileno con capacidad de 28 L, correspondiendo a 224 kg de la unidad funcional.

Para el proceso de incineración, el resto de los residuos, correspondiendo a 629 kg de residuos mezclados se colocan en bolsas con capacidad de 60 L.

Para una tonelada de residuos sólidos se utiliza en el almacenamiento temporal 4.21 kg de **polietileno** de las bolsas, 1.24 kg de **HDPE** usado en los botes y 0.20 kg de **metal** usado en las canastas y 0.02 kg de **HDPE** correspondiente a los contenedores.

- **Recolección.** Se realiza en camión estándar, consumiendo 2.24 L de diesel, en la recolección de una tonelada de residuos, en el recorrido de 3.62 km durante 41.76 minutos en la ciudad. El **transporte** consume 0.83 L de diesel de la estación de transferencia a la instalación de tratamiento, recorriendo 2.10 km, durante 5.64 minutos en camión con tráiler.
- **Tratamiento de reciclado** (fracciones separadas), **compostaje** (residuos orgánicos) y **RS moderno** (residuos mezclados), incluyendo el beneficio del compost producido, recuperación de energía, fracciones recicladas y los insumos de electricidad, calor y diesel usados en los procesos. En la Figura 4.17, 4.25, 4.28, 4.31 4.34 y 4.37 se presentan los diagramas de los procesos de incineración, compostaje y reciclado para cada fracción, respectivamente.



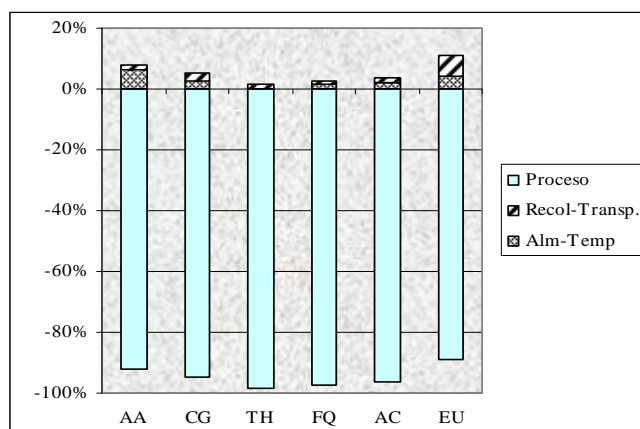
**Figura 5.10.** Diagrama del Escenario ReCoIncineración con los datos a evaluar.

En la Tabla 5.8 se muestran los resultados de la evaluación ambiental del Escenario ReCoIncineración para una tonelada de residuos. La Figura 5.11 presenta la contribución ambiental de cada etapa del sistema de gestión de residuos para cada categoría de impacto.

**Tabla 5.8.** Impacto ambiental para el Escenario de **ReCoIncineración\***

Categoría de impacto	Almacenamiento temporal	Recolección-transporte	Emisiones ReCoIncineración	Total
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg de Sb eq.)	1.76E-01	6.10E-02	-2.59E+00	-2.35E+00
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg de CO <sub>2</sub> eq.)	1.00E+01	9.10E+00	-3.35E+02	-3.15E+02
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq.)	1.13E-01	1.10E+00	-7.16E+01	-7.04E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg de etileno eq.)	1.75E-03	1.86E-03	-1.18E-01	-1.15E-01
<b>Acidificación (AC)</b> (kg de SO <sub>2</sub> eq.)	5.56E-02	5.25E-02	-2.65E+00	-2.54E+00
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg de PO <sub>4</sub> eq.)	5.94E-03	1.12E-02	-1.27E-01	-1.10E-01

\* para una tonelada de residuos



**Figura 5.11.** Contribución ambiental de cada etapa en el escenario ReCoIncineración.

El análisis ambiental para cada categoría indica que:

- En la etapa de **almacenamiento temporal** el mayor impacto ambiental adverso se presenta en la categoría de **agotamiento abiótico (AA)** contribuyendo en un 6% del total del escenario, debido al consumo de petróleo empleado en la fabricación de las bolsas de polietileno. En la Tabla 4.2b se presenta la evaluación ambiental de esta etapa y en el apartado 4.1.1.3 se analiza en detalle el impacto ambiental de las bolsas.
- En la etapa de **recolección-transporte** el mayor impacto ambiental adverso se presenta en la categoría de **eutrofización (EU)** contribuye en un 7% del total. En la

Tabla 4.5 se presenta la evaluación ambiental de esta etapa y en el apartado 4.1.2.3 se analiza en detalle el impacto ambiental por el consumo de diesel.

- La etapa del **proceso** presenta un beneficio ambiental en todas las categorías. En la categoría de **toxicidad humana (TH)** contribuyendo en un 99% del impacto total del escenario, **fotooxidación química (FQ)** en un 97%, **acidificación (AC)** en un 96%, **calentamiento global (CG)** en un 95%, **agotamiento abiótico (AA)** contribuyendo en un 92% del total del escenario y **eutrofización** contribuye en un 87%, debido al compost producido, los materiales reciclados y la recuperación de energía. En las Tablas 4.10, 4.15, 4.17, 4.19, 4.20, 4.22 presentan la evaluación ambiental de los procesos de Incineración, Compostaje y el reciclado de fracciones. En los apartados 4.1.4.3, 4.1.6.3, 4.1.7.3, 4.1.7.6, 4.1.7.9 y 4.1.7.12 se analizan en detalle el impacto ambiental de los procesos del escenario ReCoIncineración.
- En el escenario se presentan beneficios ambientales en todas las categorías, debido a la producción de compost, recuperación de energía y el reciclado de fracciones.

### 5.3.9 Comparación ambiental entre los escenarios RS actual y ReCoIncineración

En la Tabla 5.9 se presenta la comparación de los escenarios RS actual y ReCoIncineración. Los resultados de la evaluación ambiental de los escenarios se presentan en las Tablas 5.1 y 5.8. El escenario ReCoIncineración presenta beneficios ambientales en todas las categorías.

**Tabla 5.9.** Comparación ambiental de los escenarios RS actual y ReCoIncineración.

Categoría de impacto	RS actual	ReCoIncineración
<b>Agotamiento Abiótico (AA)</b> (kg de Sb eq.)	3.82E-01	-2.35E+00
<b>Calentamiento Global (CG)</b> (kg de CO <sub>2</sub> eq.)	6.50E+02	-3.15E+02
<b>Toxicidad Humana (TH)</b> (kg 1-4 DCB eq.)	2.15E+01	-7.04E+01
<b>Fotooxidación Química (FQ)</b> (kg de etileno eq.)	1.85E-01	-1.15E-01
<b>Acidificación (AC)</b> (kg de SO <sub>2</sub> eq.)	3.02E-01	-2.54E+00
<b>Eutrofización (EU)</b> (kg de PO <sub>4</sub> eq.)	1.44E-01	-1.10E-01

El escenario ReCoIncineración presenta un beneficio ambiental en todas las categorías en comparación con el RS actual. El calentamiento global presenta el mayor beneficio ambiental por la recuperación de energía.

## 5.4 Comparación ambiental de los escenarios

En este apartado se comparan la evaluación ambiental de cada escenario para las seis categorías de impacto. La comparación es entre el RS actual (situación base) y los escenarios RS moderno, Digestión-RS moderno, ReCoRS moderno y ReCoIncineración, con el propósito de comparar sus impactos y beneficios ambientales.

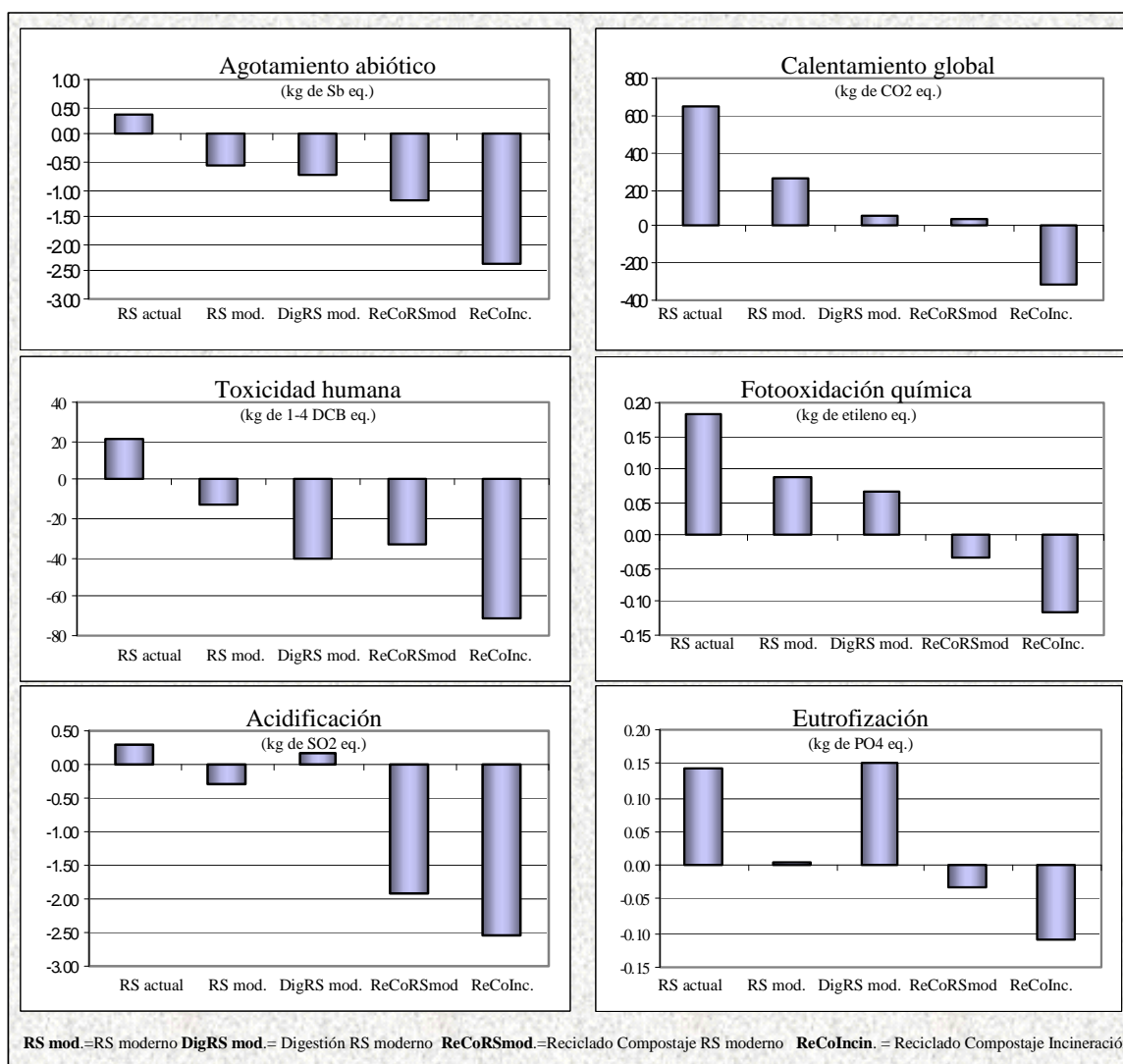
### 5.4.1 Evaluación ambiental de los escenarios

Los resultados ambientales de los escenarios evaluados incluyen el almacenamiento temporal, recolección-transporte y los procesos, para una tonelada de residuos. En la Figura 5.12 se presentan los resultados ambientales de los escenarios para cada categoría.

- El mayor impacto ambiental adverso al **agotamiento abiótico (AA)** lo presenta el escenario RS actual, principalmente por el consumo de petróleo para la fabricación de las bolsas de polietileno. En los otros escenarios se presenta un beneficio ambiental por la recuperación de energía (RS moderno, Digestión-RS moderno, ReCoRS moderno y ReCoIncineración), producción de compost (escenarios Digestión-RS moderno, ReCoRS moderno y ReCoIncineración) y recuperación de fracciones en el proceso de reciclado (ReCoRS moderno y ReCoIncineración). Además el petróleo usado para producir el diesel del transporte, disminuye al utilizar la estación de transferencia para los escenarios RS moderno, Digestión-RS moderno, ReCoRS moderno y ReCoIncineración. Este último escenario presenta mayor beneficio ambiental en esta categoría.
- El **calentamiento global (CG)** presenta el mayor impacto ambiental adverso en el escenario RS actual debido a las emisiones del proceso producción sin control al medioambiente. El RS moderno, debido a la recuperación de energía presenta un mayor beneficio ambiental, debido al control de emisiones, comparado con el RS actual (analizado en el apartado 5.3.3). En el escenario Digestión-RS moderno y el escenario de ReCoRS moderno presentan menor impacto ambiental adverso a los escenarios anteriores por el beneficio del compost producido, la recuperación de energía en los procesos (digestión, RS moderno) y por la recuperación de fracciones (papel, vidrio, metal y plástico) en el proceso de reciclado. El escenario ReCoIncineración presenta un beneficio ambiental por la recuperación de energía en el proceso de incineración, compost producido por el proceso de compostaje y la

recuperación de fracciones en el reciclado. El escenario con mayor beneficio ambiental para el indicador de calentamiento global es el ReCoIncineración.

- La **toxicidad humana (TH)** presenta un impacto ambiental adverso para el escenario RS actual en comparación con los otros escenarios. Los escenarios RS moderno, Digestión-RS moderno, ReCoRS moderno y ReCoIncineración presentan beneficios ambientales por la recuperación de energía, compost y reciclado de fracciones. El escenario con mayor beneficio ambiental para esta categoría es el ReCoIncineración.
- La **fotooxidación química (FQ)** presenta un impacto ambiental adverso en los escenarios RS actual, RS moderno y Digestión-RS moderno debido principalmente a las emisiones de metano de los procesos del RS actual y RS moderno. Los otros escenarios ReCoRS moderno y ReCoIncineración presentan beneficios ambientales por la recuperación de energía, compost y reciclado de fracciones. El escenario con mayor beneficio ambiental para el indicador de fotooxidación química es el ReCoIncineración.
- El impacto ambiental adverso en la categoría de **acidificación (AC)** se presenta en los escenarios de RS actual y en el escenario de Digestión-RS moderno. El beneficio ambiental se presenta en los escenarios RS moderno, ReCoRS moderno y ReCoIncineración debido a la recuperación de energía, compost y reciclado de fracciones. El escenario con mayor beneficio ambiental para esta categoría es el ReCoIncineración.
- La **eutrofización (EU)** presenta un impacto ambiental adverso en los escenarios RS actual, RS moderno y el escenario Digestión-RS moderno, debido a las emisiones de gas y lixiviado del proceso. Los escenarios ReCoRS moderno y ReCoIncineración presentan un beneficio ambiental en esta categoría, por la recuperación de energía, compost producido y fracciones recicladas. El escenario ReCoIncineración presenta el mayor beneficio ambiental en esta categoría.



**Figura 5.12** Comparación ambiental de los escenarios de tratamiento para una tonelada de residuos sólidos urbanos.

### 5.5 Resultados de los escenarios

La evaluación ambiental del sistema de gestión de RSU para Chihuahua, presentados indican que:

- En la etapa de almacenamiento temporal, el sistema de colocar los residuos en bolsas de polietileno presenta el mayor impacto ambiental adverso, la mejor alternativa ambiental sería el utilizar contenedores de mayor capacidad donde se depositaran los residuos separados o la utilización de materiales biodegradables en las bolsas. Otra solución viable es el promover el uso de bolsas ecológicas con propósito multiuso y disminuir o eliminar el uso de bolsas de polietileno.
- En la etapa de recolección-transporte la mejor alternativa ambiental para disminuir el impacto ambiental adverso es utilizar la estación de transferencia y ahí captar mayor

cantidad de residuos para transportarlos en un camión tráiler de mayor capacidad a la planta de tratamiento o disposición final. También es factible la utilización de contenedores de mayor capacidad para depositar los residuos separados y que la recolección se realizará directamente en los contenedores y evitar la recolección en las viviendas. Esto disminuye el consumo de combustible utilizado en la recolección y el transporte, por lo tanto el impacto ambiental adverso disminuiría.

- En cuanto a los tratamientos evaluados el escenario con mayor beneficio ambiental es la combinación de los tratamientos de reciclado, compostaje e incineración (ReCoIncineración), seguido por el escenario ReCoRSmoderno (combinación de reciclado, compostaje y RS moderno). En la evaluación se consideró el 15% de materiales a reciclar, 22% de residuos orgánicos y el resto a incineración o RS moderno, según corresponda. Se ha considerado la combinación de estos tratamientos considerando la actividad de los pepenadores al separar comúnmente las fracciones para la venta. El compostaje es una actividad que se realiza muy poco en México, pero con la nueva ley sobre la separación de residuos orgánicos, el tratamiento de compostaje pudiera ser una práctica más frecuente en corto tiempo. En cuanto al tratamiento de depositar los residuos en un RS moderno es una posibilidad viable de tratamiento para la ciudad de Chihuahua. La incineración es un tratamiento con beneficios ambientales mejores que el llevar los residuos al RS moderno. Además las ventajas que presenta al disminuir la cantidad de residuos depositados en el RS.

Si la separación de fracciones aumenta, la cantidad de residuos llevados a la planta de incineración será menor o al RS moderno. Otra opción por la cantidad de residuos orgánicos generados (46%) es el proceso de digestión, por los beneficios ambientales del compost, en comparación con el RS actual y el proceso de compostaje, por la recuperación de energía.

## **CAPÍTULO 6**

## **CONCLUSIONES**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## Capítulo 6

### CONCLUSIONES

#### Índice

6.1 Caracterización de residuos sólidos urbanos .....	143
6.2 Evaluación ambiental del sistema de gestión de residuos de residuos sólidos urbanos .....	143
6.2.1 Evaluación de las etapas del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos .....	143
6.2.2 Evaluación de los escenarios .....	144
6.3 Futuras investigaciones .....	145

#### Resumen.

En este capítulo se presentan las conclusiones del estudio realizado sobre la evaluación ambiental de la gestión de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Chihuahua. Se presentan también propuestas para la realización de futuras investigaciones como continuación de este estudio.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

Este estudio se ha dividido en dos secciones

Caracterización de residuos sólidos urbanos

Evaluación ambiental de los escenarios

## **6.1 Caracterización de residuos sólidos urbanos**

La caracterización de los RSU generados en tres colonias de la ciudad de Chihuahua con diferente rango de ingresos se ha realizado durante tres épocas del año (abril de 2006, agosto 2006 y enero 2007). En total se analizaron 4,098 kg de RSU, provenientes de 1,687 muestras generadas en 80 hogares durante tres temporadas del año.

La cantidad per capita promedio de residuo generada fue de  $0.592 \text{ kg capita}^{-1} \text{ día}^{-1}$ , para Chihuahua, para los tres niveles socioeconómicos estudiados. Los resultados presentan una tendencia de a mayor ingreso económico mayor generación de residuos sólidos,  $0.522$ ,  $0.634$  y  $0.637 \text{ kg capita}^{-1} \text{ día}^{-1}$ , para los niveles I, II y III respectivamente para el tiempo de estudio. En cuanto a la generación promedio de residuos sólidos en las diferentes temporadas se observó una mayor producción en abril ( $0.676 \text{ kg capita}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ), en agosto ( $0.609 \text{ kg capita}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) y una disminución de la cantidad de residuos en la temporada de enero ( $0.508 \text{ kg capita}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ), para los tres niveles.

Los RSU se separaron en quince fracciones, la mayor fracción generada fue la orgánica (47%), seguida por la de papel (17%) y plástico (13%) en los tres niveles socioeconómicos y durante las tres temporadas de análisis. Se observa el mismo perfil en los tres niveles y durante las tres temporadas.

Las actividades económicas y sociales definen la composición de los residuos generados en diferentes temporadas y áreas geográficas. La composición de los residuos sólidos es una información básica para poder proponer los métodos de tratamiento de residuos sólidos más adecuados.

## **6.2 Evaluación ambiental del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos**

### ***6.2.1 Evaluación de las etapas del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos***

El sistema de estudio considerado, está constituido por el almacenamiento temporal de los residuos depositados en la acera en los domicilios, seguidos por la recolección y el transporte de estos hasta una planta de tratamiento y finalmente por la etapa de tratamiento. La unidad funcional de evaluación es una tonelada de residuos. Las categorías de impacto evaluadas son el agotamiento abiótico, calentamiento global, toxicidad humana, fotooxidación química, acidificación y eutrofización.

La evaluación de las tres etapas del sistema de gestión de residuos se resume a continuación:

**Etapas de almacenamiento temporal.** El mayor impacto ambiental adverso se debe a la utilización de bolsas de polietileno. En la situación Actual el impacto promedio es superior en aproximadamente un 2% debido a la utilización de bolsas con respecto a la situación de recolección selectiva, usando contenedores.

**Etapas de recolección-transporte.** El mayor impacto ambiental lo presenta la situación actual, sin estación de transferencia y el transporte de residuos directamente al relleno sanitario (RS) en camión estándar, en comparación con la situación de estación de transferencia, con transporte de residuos sólidos en el camión con tráiler de mayor capacidad, con un valor superior en un 43%. El impacto de la situación actual también es superior en un 49% respecto a la situación de recolección selectiva.

**Etapas de tratamiento.** Los procesos evaluados son: RS actual, RS moderno, Incineración, Digestión, Compostaje (Co) y Reciclado (Re). El tratamiento de incineración presenta el mayor beneficio ambiental en todas las categorías de impacto en comparación con los otros tratamientos, debido al beneficio ambiental por la recuperación de energía. El tratamiento de RS actual, sin control de emisiones, es el que presenta el peor impacto ambiental en todas las categorías.

### ***6.2.2 Evaluación de los escenarios***

La evaluación ambiental de los escenarios incluyó el almacenamiento temporal, la recolección-transporte y la combinación de los tratamientos. Los escenarios evaluados fueron: RS actual, RS moderno, Digestión-RS moderno, ReCoRSmoderno y ReCoIncineración. Se evaluaron una tonelada de RSU mezclados, para los escenarios RS actual y RS moderno. Para el escenario Digestión-RS moderno se evaluó una tonelada de RSU de los cuales el 22% corresponde a residuos orgánicos y 78% a residuos mezclados para cada tratamiento que componen este escenario. En los escenarios ReCoRSmoderno y ReCoIncineración se evaluó una tonelada de RSU, correspondiendo 15% a recolección selectiva (papel, vidrio, metal y plástico), 22% a residuos orgánicos y 63% a residuos mezclados, para cada tratamiento que componen estos escenarios.

El escenario RS actual presenta el mayor impacto ambiental en todas las categorías analizadas, debido principalmente al mayor consumo de diesel (5.7 L) durante la recolección-transporte, en comparación con el RS moderno (3.1 L), por la utilización de la estación de

transferencia. Además, en del proceso el RS actual se envían las emisiones al medioambiente sin ningún control y en el RS moderno las emisiones son captadas para generar energía.

Los escenarios ReCoRSmoderno y ReCoIncineración presentan mayor beneficio ambiental en las categorías analizadas debido al menor consumo de diesel por la utilización de la estación de transferencia, recuperación de energía, producción de compost y el reciclaje de fracciones separadas.

El escenario con mayor beneficio es el ReCoIncineración, seguido por el ReCoRS moderno. Este último escenario es el que presenta mayor aplicación en Chihuahua a corto plazo al instalarse en un futuro cercano el RS con control de emisiones y recuperación de energía.

Excelentes posibilidades ambientales son la combinación de tratamientos como el reciclado de fracciones separadas, digestión para residuos orgánicos e incineración para el resto de residuos. El problema pudiera ser los costos de instalación de las plantas de digestión e incineración, pero los beneficios ambientales serian mayores.

### **6.3 Futuras investigaciones**

#### **Aspectos económicos y sociales del sistema de gestión de residuos urbanos**

Según el principio de sostenibilidad los aspectos económicos y sociales de un producto o servicio deben de considerarse al mismo nivel que las ambientales. La normativa mexicana, considera que los municipios tienen la responsabilidad de prestar el servicio de gestión de residuos sólidos urbanos, por lo cual la meta municipal es proporcionar el servicio de limpia para obtener mejoras ambientales al menor costo. En México, la falta de indicadores económicos para la evaluación del SGRSU dificulta el análisis de la eficiencia del sistema (SEMARNAT y GTZ, 2006). Es por lo tanto muy conveniente la continuación de este trabajo incluyendo la valoración económica y social de las distintas alternativas propuestas.

Existe una gran oportunidad para desarrollar futuras investigaciones basándose en los resultados obtenidos en un municipio que inicia mejoras en su sistema de gestión de residuos en Chihuahua. Para continuar este estudio se propone las siguientes actuaciones:

- Presentar los resultados del **presente estudio a las autoridades municipales** para mostrar las ventajas ambientales de nuevos tratamientos de los residuos sólidos urbanos. Como primera instancia presentar los beneficios ambientales de la instalación y funcionamiento de la estación de transferencia.

- **Recabar información del funcionamiento de las instalaciones** de recuperación de gas y producción de energía en los RS de otras ciudades de México. Los datos recabados servirían como una base para la evaluación ambiental del RS moderno para Chihuahua con datos más reales a las condiciones de México.
- Estimar la **sensibilidad de la evaluación ambiental** realizada en los escenarios mediante un análisis del sistema Monte Carlo.
- Determinar los **indicadores económicos y sociales** para realizar la evaluación económica y social adecuada para el sistema de gestión de residuos para Chihuahua.
- Realizar la **valoración económica de los escenarios** RS actual y RS moderno. Este último escenario con posibilidades de aplicar a corto plazo. Considerando el aspecto económico de ahorro de combustible y cantidad de camiones recolectores y de transporte en la instalación de la estación de transferencia.
- La construcción de rellenos sanitarios con control de emisiones en varias ciudades del país (Nuevo León, Mérida, Puebla, Aguascalientes, Distrito Federal) permite continuar estudiando y conseguir datos reales de costos de operación de otros RS y adaptarlos a Chihuahua.
- Considerar la evaluación ambiental de otros tratamientos más innovadores como el **pre-tratamiento mecánico biológico aeróbico o anaeróbico**.
- Promover la utilización de **bolsas multiusos y/o biodegradable**, para el transporte de las compras, evitando el uso de bolsas de polietileno.

## **REFERENCIAS**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## REFERENCIAS

- ABF-BOKU. 2001. Thermische Abfallbehandlung Grundlagen des Verbrennungsprozesses Und Rückstände, Script Teil 3, WS 2001/2002
- Abu Qdais H., Hamonda M.F. y Newham J. 1997. Analysis of residential solid.Waste at generation sites. Waste Management & Research 15, 395-406
- Banar M., Cokaygil Z. y Ozkan A. 2009. Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey. Waste management 29, 54-62
- Barton J., Dalley D. y Patel V. 1996. Life Cycle assessment for waste management. Waste Management 16, 35-50
- Bolaane B. y Ali M. 2004. Sampling household waste at source: lessons learnt in Gaborone. Waste Management & Research 22, 142-148
- Bernache-Perez G., Sánchez-Colón S., Garmendia A.M., Dávila-Villarreal A., y Sánchez-Salazar M. E. 2001. Solid waste characterization study in the Guadalajara Metropolitan Zone, Mexico. Waste Management & Research 19, 413-424
- Buenrostro O., Bocco G. y Bernache G. 2001a. Urban solid waste generation and disposal in México a case study. Waste Management & Research. 19, 169-176
- Buenrostro O., Bocco G. y Vence J. 2001b. Forecasting generation of urban solid waste in developing countries – a case study in México. J. Air & waste Management Assoc. 51, 86-93
- Camobreco V., Hamm R., Barlaz M., Repa E., Felker M., Rousseau C. y Rathle J. 1999. Life-cycle inventory of a modern municipal solid waste landfill. Waste management Research 17, 394-408
- Chandler A.J., Eighmy T.T., Hartlen J. Hjelm O., Kosson D.S. Sewell S.E. van der Sloot H.A. y VEHLLOW J. 1997. Studies in Enviromental Science 67: Municipal solid waste incineration residues. The international ash working group (IAWG), Elsevier
- Clift R., Doig A. y Finnveden G. 2000. The application of life cycle assessment to integrated solid waste management: Part-1 Methodology. Trans IChemE, vol 78, Part B, July 2000
- Colomer F. y Gallardo A. 2007. Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos. Universidad Politècnica de Valencia. Editorial UPV Ref.: 2007.4283
- Conapo. Consejo Nacional de Población. 2008. Comunicado de prensa 19/07 México, D.F. 10 de julio del 2008. Página: consultada en enero del 2009. [http://www.conapo.gob.mx/prensa/2008/bol2008\\_19.pdf](http://www.conapo.gob.mx/prensa/2008/bol2008_19.pdf)

- Consoli F., Allen D., Boustead I., Oude N., Fava J., Franklin W., Qualy B., Parrish R., Perriman R., Postlethwaite D., Seguin J. y Vigon B. 1993. Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice.. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). Edition I. Sesiembra Portugal
- Cossu R., Muntoni A., Di Gregorio, Favaretti M. y Mulas P. 1998. Co-disposal of WSW incineration fly ash and sewage sludge in sanitary landfills-preliminary results, waste Reports No.08 “Emission Behaviour of Incineration Residues”, nov. 1998, Hrsrg. P. Lechner, Wien
- Den Boer J., Den Boer E. y Jager J. 2007. LCA-IWM: A decision support tool for sustainability assessment of waste management systems. Waste Management 27, 1032-1045
- Den Boer E. Den Boer J. y Jager J. 2005. Waste Management Planning and Optimisation –Handbook for Municipal Solid Waste Prognosis and Sustainability Assessment of Waste Management Systems. Ibidem Verlag, Stuttgart, Germany
- Dalhén L. y Lagerkvist A. 2008. Methods for household waste composition studies. Waste Management 28, 1100-1112
- Dehoust G., Gebhardt P. y Gäetner S. 2002. der Beitrag der thermischen Abfallbehandlung zu Klimaschutz, Luftreinhaltung und Ressoucenschonung; in Öko-Institut e. V, Darmstadt
- Dehoust G., Stahl H., Bunke D., Jenseits W., Gärtner S., Espinagosa R., Jager J., Schwing E., Dach J. y Karschuck J. 1998. Systemvergleich unterschiedlicher Verfahren der Restabfallbehandlung im Kreis Neuwied in Öko-Institut e.V., Darmstadt
- Diaz L. 2006. Landfilling of municipal solid waste and the end of the aftercare period. Waste Management 26, 1325-1326
- Ecobilan. Pagina consultada en enero del 2009. [http://www.ecobalance.com/uk\\_wisard.php](http://www.ecobalance.com/uk_wisard.php)
- Ecobilan.2003. –WM3.4rl: Wisard Reference guide, Ecobilan-WM3.4rl
- Eunomia. 2002. Economic Analysis of Option for Managing Biodegradable Municipal Waste, Final Report to the European Commission, disponible en: [http://www.europa.eu.int/comm/environment/waste/compost/ecoanalysis\\_finalreport.pdf](http://www.europa.eu.int/comm/environment/waste/compost/ecoanalysis_finalreport.pdf)
- European Comission. 2001. Working Document Biological Treatment of Biowaste. 2<sup>nd</sup> Draft, Brussels
- European Parliament. 2000. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste. Official Journal L 332, 28/12/2000 P. 0091 – 0111. Pagina consultada en enero del 2009 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:332:0091:0111:ES:PDF>

- Franke B., Franke A. y Knappe F. 1992. Vergleich der Auswirkungen verschiedener Verfahren der Restmüllbehandlung auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit, in ifeu-institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg
- Fricke K., Franke H., Dichtl N., Schmelz K.-G., Weiland P. y Bidlingmaier W. 2002. Biologische Verfahren zur Bio- und Grünabfall-verwertung. In: Loll U. (Eds.), ATV Handbuch – Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, GmbH, Berlin, Germany
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. 2009. Décima séptima época. 7 de octubre de 2008 No. 436. Pagina consultada en enero 2009. [http://www.cmic.org/cmic/df/OCTUBRE\\_7\\_08\\_1.pdf](http://www.cmic.org/cmic/df/OCTUBRE_7_08_1.pdf)
- Gidarakos E., Havas G. y Ntzamilis P. 2006. Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete. Waste Management 26, 668-679
- Gómez G., Meneses M., Ballinas L. y Castells F. 2008. Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico. Waste Management 28, 2465-2471
- GMCh. Gobierno Municipal de Chihuahua. 2007. Pagina consultada en marzo del 2007. <http://www.municipiochihuahua.gob.mx/economia/perfil.aspx>
- GTZ-México. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH (Agencia Alemana de Cooperación Técnica). 2005. Pagina consultada en enero 2009. <http://www.acepesa.org/docu/Encuentro%20abril%202005/presentaciones/Anexo%2013%20GTZ-M%20E9xico.pdf>
- Guinée J., Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., Koning A., van Oers L., Wegener A., Suh S., Udo de Haes H., Brujin H., van Duin R. y Huijbregts M. 2002. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Kluwer academic publishers
- Gillet A.G., Gregory R.G. y Blowes J.H. 2002. Measurement and assessment of landfill gas generating set emissions; in Conference Proceedings: Integrated Waste Management and Pollution Control: Research, Policy and Practice; Waste 2002; Stratford-upon-Avon
- Haigh G., Cope D. y Deed C. 2002. Development of monitoring Protocols for stack emissions from landfill gas utilisation system; in Conference Proceedings: Integrated Waste Management and Pollution Control: Research, Policy and Practice; Waste 2002; Stratford-upon-Avon
- Hellweg S., Hofstetter T.B. y Hungerbühler K. 2001. Modelling waste incineration life cycle-inventory analysis in Switzerland, in Environmental Modelling and Assessment 6: Kluwer Academic Publishers (Eds.), Netherlands
- Heyer K.U. y Stegmann R. 2001. Leachate management: leachate generation, collection, treatment and costs; <http://home.t-online.de/home/Karsten.Hupe/pdf/leachate.pdf>

- Hultman B., Levin E., Plaza E. y Trela J. 1998. Ideas for future sludge management at the Nowy Targ WWTP. In: Hultman B. y Kurbiel J. (Eds.) Advanced Wastewater Treatment: Proceedings of a Polish-Ewedish seminar, Nowy Targ, October 1-2, 1998. TRITA-AMI REPORT 3048, ISBN 91-7170-324-1
- Hunt R., Sellers J. Franklin W. 1992. Resource and environmental profile analysis: a life cycle environmental assessment for productos and procedures. Environmental Impact Assessment Review 12, 245-269
- Ifu y ifeu. 2001. Umberto, Software für das betriebliche Stoffstrommanagement. Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH and Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Germany
- Inaba A., Sagisaka M., Ozawa T., y Kobayashi T. 2007. LCA of Global supply chains - from production through to end of life management. 5to. taller de trabajo de la AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) de ACV para la Región Asia Pacífico (LCA for Asia Pacific Region). Internacional Journal of Life Cycle Assessment 12 (3) 205-206
- INE. Instituto Nacional de Ecología. 2007. Evaluación de la incineración de residuos peligrosos. [http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/381/anabell.html?id\\_pub=381](http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/381/anabell.html?id_pub=381)
- INEGI-INE. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática e Instituto Nacional de Ecología. 2000. Indicadores de Desarrollo sustentable en México. Pagina consultada en enero del 2009. [http://mx.geocities.com/elcafeinomano/Materias/Desarrollo\\_Sostenible/indicadores\\_en\\_mexico\\_semarnat.pdf](http://mx.geocities.com/elcafeinomano/Materias/Desarrollo_Sostenible/indicadores_en_mexico_semarnat.pdf)
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 2005a. II Censo de Población y Vivienda. México. Pagina consultada en enero 2009. <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mpob09&s=est&c=3186>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 2005b. Población total por municipio según grandes grupos de edad. Pagina consultada en enero 2009. <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mpob93&s=est&c=3839&e=08>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1999. Pagina consultada en enero en 2009. [http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/chih/ubic\\_geo.cfm?c=1203&e=08&CFID=357974&CFTOKEN=85756638](http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/chih/ubic_geo.cfm?c=1203&e=08&CFID=357974&CFTOKEN=85756638)
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 2007a. Página. <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=eemp20&c=4199&e=08&s=est> consultada en mayo 2007.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 2007b. Producto Interno Bruto. México. Pagina consultada en enero 2009. <http://www.inegi.gob.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/comunicados/pibbol.asp>
- ISO 14044. Norma ISO 14044:2006 (E). 2006. Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines. International standard. Publicada en Suiza. [www.iso.org](http://www.iso.org)

- Jonson, R. y Kuby P. 1999. Estadística elemental. International Thomson Editores. México
- Klöpffer W. 2006. The role of SETAC in the development of LCA. DOI: Pagina consultada en diciembre 2008. <http://www.springerlink.com/content/7jp5472343472772/>
- Krümpelbeck I. 1999. Untersuchungen zur langfristigen Verhalten von Siedlungsabfalldeponien, Dissertation am fachbereich Bauingenieurwesen der Bergischen Universität-Gesamthochschule Wuppertal
- Krümpelbeck I. y Ehrig H.J. 2001. BMBF-Forschungsvorhaben: Abschätzung der Restemissionen von Deponien in der Betriebs-und Nachsorgephase auf der Basis realer Überwachungsdaten, No:4587; MuA Lfg. 3/01 in Müll Handbuch, Band 4; Erich Schmidt Verlag; Berlín
- Lahl U. 2001. Entscheidungshilfen durch stoffstromanalytische Betrachtungen bei der Bewertung von abfallwirtschaftlichen Maßnahmen, Habilitationsschrift (unpublished), Technische Universität Darmstadt, Institut WAR, Darmstadt.
- LEEPAECh Ley de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Chihuahua. 2005. Pagina consultada en enero 2009. <http://www.mpioguerrero.gob.mx/atach2/mpiooguerrero/uploads/File/Comite/LEECH.pdf>
- LGPGIR. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación. 8 Oct. 2003. <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/03/federal/01clave.pdf>
- Martínez R. 2006. Director del departamento de Aseo Urbano Municipal de Chihuahua. Comunicación personal [ricardo.martinez@mpiochih.gob.mx](mailto:ricardo.martinez@mpiochih.gob.mx).
- McDougall F., White P., Franke M. y Hindle P. 2002. Integrated Solid Waste Management: a life cycle inventory. Blackwell Publishing. UK
- Morf L.S. y Brunner P.H. 1999. Methoden zur indirekten Bestimmung der Zusammensetzung von Siedlungsabfällen; No 1755; MuA Lfg. 7/99 in Müll Handbuch, Band 3, Erich Schmidt Verlag; Berlin
- Morrissey A. y Browne J. 2004. Waste management models and their application to sustainable waste management. Waste Management 24, 297-308
- msn.com. 2009 pagina del clima para Chihuahua. <http://clima.msn.com/local.aspx?wealocations=wc:MXCA0022>
- NOM-083-SEMARNAT-2003. 2004. Norma Oficial Mexicana: Especificaciones ambientales para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y manejo especial. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial, miércoles 20 de octubre del 2004

- NMX-AA-022-1985. 1985. Norma Oficial Mexicana Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Selección y Cuantificación de Subproductos. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. México. Pagina consultada en enero 2009.  
<http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Mexicanas%20vigentes/NMX-AA-022-1985.pdf>
- NMX-AA-061-1985, Norma Mexicana-AA-61-1985. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de la Generación. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. México. Pagina consultada en enero 2009.  
<http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Mexicanas%20vigentes/NMX-AA-061-1985.pdf>
- NMX-AA-091-1987, Norma Mexicana-AA-091-1987. Calidad del suelo-terminología. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. México. Pagina consultada 2009.  
<http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Mexicanas%20vigentes/NMX-AA-091-1987.pdf>
- Ojeda-Benitez S., Armijo de Vega C and Ramírez- Barreto M.E. 2003. Characterisation and quantification of household solid waste in a Mexican city. Resources Conservation and Recycling 39, 211-222
- RLMCh. Reglamento de Limpia, Recolección Traslado y Disposición final de Residuos Sólidos no Peligrosos para el Municipio de Chihuahua. 2004-2007.  
<http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/CHIHUAHUA/Municipios/Chihuahua/ChihuahuaMan05.pdf>
- Rieradevall J., Domenech X.Y., Fullana P. 1997. Application of Life Cycle Assessment to Landfilling. Int. J. LCA 2 (3) 141-144
- Robinson H.D., Knox K., van Santen y Tempany P.R. 2002. Compliance of UK Landfills with EU Pollution Emissions Legislation: Development of a Reporting Protocol, disponible en: <http://www.leachate.co.uk/Leachate-Downloads/Trace-Organics.doc>
- Rodríguez S. M.A. y Córdova V.A. 2006. Manual de compostaje municipal: Tratamiento de residuos sólidos urbanos Editada por: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Instituto Nacional de Ecología (INE) y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GMBH. Primera edición: septiembre 2006
- Rodrigo J. y Castells F. 2000 Environmental evaluation of different strategies for the management of municipal waste in the region of Cataluña (project founded by Junta de Residuos, the regional Waste Agency of Cataluña)
- Rotter S. 2004. Schwermetall in Haushaltsabfällen; No 2829; MuA Lfg. 1/04 in Müll Handbuch, Band 4; Erich Schmidt Verlag; Berlin
- SCINCE. 2000. Sistema para la Consulta de Información Censal. SCINCE por colonias. Chihuahua. Editado por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México
- SCS Engineers 2005. Pre-feasibility study for landfill gas recovery and utilization at the Chihuahua Landfill. Estudio realizado para The World Bank. Pagina [http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/English/Chihuahua\\_PreFeasibility\\_Study\\_English.pdf](http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/English/Chihuahua_PreFeasibility_Study_English.pdf) consultada en agosto del 2006

SEMARNAT Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2006. Pagina consultada en junio 2007. [http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/snria/Documents/04\\_r\\_s\\_municipales.html](http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/snria/Documents/04_r_s_municipales.html)

SEMARNAT y GTZ. Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. 2006. Guía para la elaboración de programas municipales para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos. Primera edición: México 2006. Pagina: [www.giresol.org](http://www.giresol.org)

Schwing E. 1999. "Bewertung der Emissionen der Kombination mechanisch-biologischer und thermischer Abfallbehandlungsverfahren in Südhessen", Dissertation, Institut WAR, TUD Darmstadt, WAR-Schriftenreihe Bd. 111, Darmstadt

Sener. Secretaría de energía 2007. Gobierno de México. Pagina consultada en octubre 2008. [http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE\\_y\\_DT/pub/Balance\\_2007.pdf](http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/pub/Balance_2007.pdf)

Sojo A. 2001. La gestión de los residuos sólidos urbanos en Puebla: Comparación ambiental y financiera con Barcelona. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. España

Sonneman G., Castells F., Schumacher M. 2003. Integrated life – cycle and risk assessment for industrial processes. Advanced methods in resources and waste management, 1 st ed., vol. 1. United States of América: Lewis Publishers

Soyez K. 2002. Gesamtdarstellung der Wissenschaftlichen Ergebnisse des Verbundvorhabens, Verbundvorhaben „Mechanische–Biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, Potsdam

Tabasaran O. y Rettenberger R. 1987. Grundlagen zur Planung von Entgasungsanlagen in MuA Lfg. 1/87 in Müll Handbuch, Band 4; Erich Schmidt Verlag; Berlin

Tchobanoglous G. y Kreith F. 2002. Handbook of solid waste management. McGraw-Hill. Segunda edición

Van der Sloot y Vehlow J. 1997. Municipal solid waste incineration residues, Studies in Environmental Science 67, Elsevier

Vigon B.W., Tolle D.A. Cornaby B.W. y Latham H.C. Battelle Columbus, Ohio 43201-2693 y Harrison C. L., Boguski R. G. y Sellers J. D. Franklin Associates, Ltd. Prairie Village, Kansas 66208. 1993. Life-Cycle assessment: Inventory guidelines and Principles. Risk reduction engineering laboratory office of research and development. U. S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio 45268. EPA/600/R-92/245

Vogt R., Knappe F., Griegrich J., y Detzel A. 2002. . Ökobilanz Bioabfallverwertung, Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit von System zur Verwertung von biologisch-organischen Abfällen. Erich Schmidt Verlag, Berlin, Germany

World Resources Institute. 1996. United Nations environmental program, United Nations development program. The World Bank, World Resources 1996-1997. The Urban environment. Oxford: Oxford University Press. Pagina : [http://pdf.wri.org/worldresources1996-97\\_bw.pdf](http://pdf.wri.org/worldresources1996-97_bw.pdf)

Zeng Y., Trauth K.M., Peyton R.L. y Banerji S. 2005. Characterization of solid waste disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri. *Waste Management & Research* 23, 62-71

## **ANEXO I**

# **PROPUESTA DE TRABAJO PRESENTADA AL MUNICIPIO DE CHIHUAHUA**



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## **Anexo I**

Propuesta de trabajo Presentada al Departamento de Aseo Urbano Municipal de la Ciudad de Chihuahua (México)

# **PROPUESTA DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

## **CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE CHIHUAHUA.**

Marzo 2006

A. GUADALUPE GOMEZ MENDEZ

## PROPUESTA DE TRABAJO.

Chihuahua es una ciudad en rápido crecimiento y con la consecuente generación de residuos municipales. La disposición adecuada de estos, requiere de planeación, tanto para la generación a corto como a largo plazo. El establecer un programa integral de manejo de los residuos municipales es parte de los reglamentos y disposiciones gubernamentales.

Determinar el tipo y composición de los residuos sólidos municipales es fundamental para establecer dicho programa. La siguiente propuesta es con éste propósito, determinar la generación de residuos y la composición de los mismos.

### Objetivo General.

- Determinar cuantitativa y cualitativamente los residuos sólidos generados en domicilios del municipio de Chihuahua.

### Objetivos particulares.

- Seleccionar las colonias con rangos de ingreso de: menos 1, de 1 a 2 y mas de 5 salarios mínimos.
- Determinar las colonias en las que se van a recoger muestras.
- Aplicar las encuestas socioeconómicas en los domicilios de las colonias seleccionadas.
- Recopilar los residuos sólidos municipales de los domicilios.
- Clasificar y determinar cantidad de residuos domiciliarios.
- Realizar los cálculos correspondientes para las determinaciones de generación per cápita, peso volumétrico y composición de las fracciones.
- Comparar los resultados de los residuos generados en los diferentes niveles.
- Comparar los resultados generados en las diferentes épocas del año.

## METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES.

### 1. Pre-investigación.

- Recopilar las leyes que definen a los residuos sólidos municipales.
- Recopilar información sobre el manejo de residuos municipales (búsqueda bibliográfica).
- Seleccionar las colonias en las que se hará la recolección.
- Con la ayuda del disco compacto denominado SCINCE POR COLONIAS (con datos de INEGI 2000) determinar:
  - El numero de habitantes de las colonias e identificar por rango de ingreso el número de salarios mínimo en las colonias de la ciudad.

### 2. Análisis del diseño.

- Nivel de muestreo –Se realizará en colonias con rangos de ingreso de 1 a 2 salarios mínimos (nivel 1); de 2 a 5 salarios mínimo (nivel 2) y de 5 o mas salarios mínimo (nivel 3) [1].
- Se invitara a participar a las familias de las colonias seleccionadas y se les entregaran bolsas para que coloquen los residuos. Aplicar el Formato 1.
- Tamaño de muestra – Se recogerán los residuos generados en 30 a 35 domicilios de cada nivel.
- Duración – una semana en cada nivel (se descarta la primera muestra) y se realizará en dos épocas del año, en verano e invierno [2].

- Muestreo – Se recoger los residuos de cada domicilio, se pesan y se anota en el Formato 2 [3].
  - Pasar los residuos de cada domicilio, por la criba M 2.00, recoger lo que pase y anotar la operación realizada. Juntar los residuos finos (lo que pasó la criba) de todos los domicilios y pesar [4].
  - Separar los residuos según el Formato 3. Colocar los residuos en bolsas separadas, pesarlos y anotar en el Formato 3 [5, 6] .
  - Colocar las fracciones de los residuos sobre una superficie plana y con la ayuda de una pala, mezclarlos hasta homogenizarlos [7].
  - Colocar los residuos en un recipiente de 200 L (pesarlo vacío) y dejar caer el recipiente tres veces desde una altura de 10 cm [5].
  - Pesar los residuos y medir el volumen que ocupan. Repetir la operación por tres días consecutivos y calcular el promedio de la relación peso/volumen para obtener la densidad [5].
  - Obtener el peso total.
3. Ejecución de análisis. Equipo necesario para el análisis de muestra.
- Recipientes con capacidad de 200 L.
  - Overol y mascarilla.
  - Guantes de carnaza, pala, escoba y recogedor.
  - Criba M 2.00, según la NMX-B-231-1990
  - Báscula con capacidad de 100 kg y precisión de 10 g o similar.
  - Báscula con capacidad de 10 kg y precisión de 1 g o similar.
  - Bolsas de polietileno de calibre mínimo del No. 200.
  - Ligas de hule de 1.5 mm de ancho.
  - Papelería y varios (Formatos, lápices, plumas, marcador y otros)
4. Evaluación de resultados.
- Cálculo de la generación per-cápita.
  - Determinación del peso volumétrico.
  - Identificar la composición de las fracciones.
  - Análisis de los resultados por nivel social.
  - Análisis de los resultados por época del año.
  - Conclusiones y recomendaciones.
  - Trabajo de investigación escrito.

Generación per-cápita (gpc).

$$\text{gpc} = \frac{\text{cantidad total de residuos que se recolectan por domicilio}}{\text{Número de habitantes por domicilio}}$$

Composición de las fracciones (cf)

$$\text{cf} = \frac{\text{Peso de la fracción (kg)}}{\text{peso total de los residuos (kg)}} \times 100$$

**Formato 1.**

Núm. de muestra \_\_\_\_\_ No. Aleatorio \_\_\_\_\_ Población \_\_\_\_\_  
 Municipio \_\_\_\_\_ Entidad federal \_\_\_\_\_ Calle \_\_\_\_\_  
 Num: \_\_\_\_\_ C.P. \_\_\_\_\_ Colonia \_\_\_\_\_  
 Nivel \_\_\_\_\_ Habitantes por domicilio \_\_\_\_\_  
 Frecuencia de recogida \_\_\_\_\_ Tipo de recipiente \_\_\_\_\_  
 ¿qué hace con los residuos si no pasa el camión? \_\_\_\_\_  
 Su opinión sobre el servicio de recolección: buena \_\_\_\_\_ regular \_\_\_\_\_ mala \_\_\_\_\_  
 Fecha \_\_\_\_\_

**Formato 2.**

Fecha y hora de análisis \_\_\_\_\_ Colonia \_\_\_\_\_  
 Nivel \_\_\_\_\_ Características de la báscula \_\_\_\_\_

**Formato 2.**

No.	Mes	Día	Peso de residuos	Peso de residuos finos (si/no)	Habitantes en domicilio	Generación (kg cápita <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

**Formato 3.**

Fecha y hora de análisis \_\_\_\_\_ Colonia \_\_\_\_\_  
 Nivel \_\_\_\_\_ Características de la báscula \_\_\_\_\_  
 Características de bolsa \_\_\_\_\_ Tamaño de la bolsa \_\_\_\_\_  
 Capacidad del recipiente \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>. Tara del recipiente \_\_\_\_\_ kg  
 Capacidad del recipiente, tomada para la determinación \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>  
 Peso bruto (peso del recipiente con residuos sólidos) \_\_\_\_\_ kg  
 Peso neto de los residuos sólidos (peso bruto tara) \_\_\_\_\_ kg  
 Peso volumétrico “in situ”, de los residuos sólidos \_\_\_\_\_ kg/m<sup>3</sup>

No.	Fracciones	Peso (kg)	% en peso	Observaciones
1	Orgánico			
2	Papel			
3	Periódicos y revistas			
4	Cartón			
5	Material ferroso			
6	Material no ferroso (aluminio)			
7	Plástico			
8	Recipientes de plástico			
9	Vidrio claro			
10	Vidrio transparente			
11	Fibra vegetal			
12	Fibra sintética			
13	Baterías			
14	Residuos finos			
15	Otros			

### CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

Categorías	Segundas categorías	Notas	Ejemplos típicos
<b>Orgánico</b>	Biodegradables de cocina	Todos los residuos biodegradables generados en las cocinas domésticas o comercial / cocina industrial	Pan; granos de café; alimentos cocinados o sin cocinar; sobrantes de alimentos; frutas y vegetales; carne y pescado; alimentos de mascotas y bolsas de té. Restos de animales; huesos; heces.
	Biodegradables de jardín	Todos los residuos biodegradables originados en un jardín doméstico o parque municipal jardín o terreno con estas características.	Flores; Frutas y vegetales de residuos de jardín; ramas cortadas; hojas; ramas de árboles caídos; maleza.
<b>Papel y cartón</b>	<b>Papel lustroso</b>	Papel no biodegradable	Panfletos lustrosos (Folletos de viajes, catálogos de tiendas) revistas lustrosas (Cosmopolita, Elle) Papel altamente lustroso (de fotografía) residuos de papel tapiz. Tarjetas de cumpleaños, Libros, impresiones de computadora, diarios, sobres, archivos y carpetas; Noticias, rollos de cocina, cartas, hojas sueltas, folletos no lustrosos y catálogos; papel de oficina, fotocopias, posters, directorios telefónicos, boletos, papel de seda, papel del baño, papel de escritura, hojas amarillas.
	<b>Cartón</b>	Todo el papel de cartón de empaçado no lustroso.	Paquetes de cereal, cartones de productos de limpieza, cartón de empaçado corrugado, bolsas de papel de alimentos rápidos, cajas de huevos y pastas; Otros alimentos /alimentos de mascotas, empaques que no contienen alimentos, bolsas e papel, cajas de pañuelos desechables, cajas de juguetes, cajas de polvo de lavar, cartones de líquidos encerados, papel de regalo.
	<b>Periódicos</b>	Periódicos sin grapa	Periódicos locales y nacionales, Publicaciones de anuncios, otras publicaciones en papel de reciclaje.
<b>Metales</b>	<b>Metales ferrosos</b>	Latas de alimentos, bebidas y no alimentos	Contenedores de pan, latas de de mascota; latas de brillo de zapatos, latas de: bebidas, pescado, sopas, dulces, galletas, aerosoles (desodorante, perfume, para el cabello). Partes de bicicleta, material de construcción/ material DYN, partes de automóviles, cuchillos, llaves, navajas, clips, tubos, recipientes, charolas, radiadores, anillos, resortes, pinzas de seguridad, desarmadores, herramientas, tornillos, clavos. Llaves, cuchillos, resortes, herramientas, partes de automóviles, radiadores, tubos, navajas, recipientes de metal, desarmadores, material de construcción / material DYN, partes de bicicleta.
	<b>Metales no ferrosos</b>	Latas y contenedores no ferrosos y láminas de aluminio	Hojas de aluminio, contenedores de pan, pastel y pay, bebidas carbonatadas, pescado, mascota, latas e brillo de zapatos, sopas, dulces, alimentos enlatados, Otros contenedores de alimentos / no alimentos / de mascotas. Aerosoles (desodorante, perfume, para el cabello)

<b>Plástico</b>	<b>Películas plásticas de empacado.</b>	Todas las bolsas de empacado y sacos rechazados	Charolas de plástico para transportar el pan, paquetes de cereales (dentro de la caja); películas adherentes, bolsas de compost (tierra para jardín); paquetes de papas fritas; bolsas de alimentos congelados; películas plásticas de empaque; bolsas de plástico de alimentos, alimentos de mascotas, de no alimentos; bolsas de sándwich. Cellotape; hojas y flores artificiales; películas de no empaque; bolsas plásticas; bolsas de comparas; plásticos de cubierta. Plástico de cuadernos o libros forrados. Bolsas para guardar ropa
	<b>Botes de plástico denso / jarras</b>	Botes y jarras con color y sin color	Todos los botes o jarras de plástico ej: Alcohol, blanqueadores, detergentes, productos de jardín o de mascotas, líquidos de lavandería, leche, aceite, bebidas de refrescos, vinagre, agua. Empaques de aceites para maquinaria, tubos de limpieza, tubos de cosméticos, cajas de huevos, cartones de alimentos, recipientes para cargar alimentos, tubos de alimentos, cartones de helados, tubos de margarina, tapones plásticos, recipientes para carne, desodorantes de roll on, cartones de yogurt, recipientes, tapones de botes. Tarjetas de crédito, botones, Cd's, cassettes de música, aplicadores de cosméticos, dispensadores de hojas de rasurar, piso de linoleum, zoclo, mangueras de jardín, equipo de jardinería, plástico duro, accesorios de jardín, lámparas, LP's, bolígrafos, macetas, cortinas de plástico, marcos de plástico, juguetes, anteojos para sol, reglas, recipientes de semillas, zapatos de plástico, accesorios del baño, tubos de pastas de dientes, bombas para tubos, cassettes de video, recipientes de lavado, tinas de plástico.
<b>Vidrio</b>	Contenedores de <b>vidrio claro</b>	Botellas de vidrio claro	Botellas de alcohol y no alcohol ej: cerveza, sidra, leche, agua. Botellas de medicinas. Contenedores de alimentos (alimentos de bebé, café, mermelada, salsas). Vidrio de cocinar (pyrex, vasos de beber) vidrio plano (cubiertas de muebles, ventanas, espejos, soportes, pantallas de ventanas) focos (normal, fluorescente, los que ahorran energía) vidrio mezclado, pantallas de televisores y computadoras, separados. Contenedores de alimentos (de bebé, café, mermelada, salsas) Botellas de medicamentos.
	Contenedores de <b>vidrio color</b>	Botellas de vidrio café.	Botellas de alcohol y no alcohol ej: cerveza, sidra, leche, agua, vino. Botellas de medicamentos, botellas de alimentos
Residuos peligrosos de casas	<b>Baterías</b> / acumuladores	Todos los tipos de baterías de automóviles y casas incluyendo recargables y no recargables	Plomo ácido, cadmio aluminio, otras baterías de automóviles y casas incluyendo recargables y no recargables
<b>Fibra sintética</b>	Producto hechos con materiales sintéticos.	Hilos de materiales sintéticos.	Soga, costales, fibras para lavar, cepillos
<b>Fibra vegetal</b>	Productos hechos con materiales vegetales	Materiales obtenidos de productos vegetales.	Residuos de aparatos de aire, escobas, cepillos, sogas
<b>Residuos finos</b>	Tierra y piedras		Ladrillos, tierra, arena, piedras, grava
<b>Otros</b>	Mezcal de equipos eléctricos y electrónicos	Pequeños aparatos de casa, equipo de telecomunicaciones, lámparas, juguetes, instrumentos de monitoreo y control	Aire acondicionado, maquinas contestadoras, juegos de automóviles de carreras, barredoras, relojes, secadoras de ropa, cafeteras, lámparas fluorescentes compactas, computadoras, hornos, copiadoras, lavavajillas, cuchillos eléctricos, hornos y calentadores eléctricos, cepillos eléctricos, trenes eléctricos, herramientas eléctricas y electrónicas, fax, congeladores, freidoras, secadoras de cabello, consolas de juego de video, aparatos de calentamiento, termostatos y reguladores de calentamiento, lámparas de descarga de alta densidad, planchas, computadoras, aparatos de enfriamiento, lámparas e sodio de baja presión, hornos de microondas, PC's, impresoras, refrigeradores, sierras eléctricas, básculas, máquinas de coser, rasuradoras, detectores de humo, lámparas fluorescentes straight, teléfonos, televisores, tostadores, aspiradoras, juegos de video, lavadoras.
	Madera sin tratar	Toda la madera /corcho sin pintar, barnizar, conservador, aislante, etc.	Tapones de corcho, empaques de corcho, trozos sin tratar, madera sólida y fragmentos de madera sin tratar.
	Madera tratada	Toda la madera /corcho con pintura, barnizada, conservada, aislante, etc.	Partículas de paneles (ej. MDF, aglomerado) madera sólida y fragmentos de madera, paneles de madera tratada, madera de DIY tratada, muebles de madera tratada.
	Ropa	Natural y la hecha por el hombre, excluyendo zapatos	Pantalones, faldas, calcetines, medias, mallas, camisas, blusas, vestidos, sacos, abrigos, sombreros, guantes. Lanas, estambres, sábanas, alfombras, cordones, cortinas, tapicería de muebles, fundas, cojines, trapos, toallas
	Pañales		Pañales de niños
	Cuidados de la salud, residuos biológicos	Residuos de curaciones en casa	Algodón, jeringas, gasa

	Misceláneos inertes	Algún inerte, excepto tierra y piedras. Cualquier otro material difícil de clasificar	Cerámica, macetas de barro o recipientes de barro, piso de cerámica y azulejo, recipientes
--	---------------------	--	--

## Referencias.

1. INEGI. *Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática*. 2000.
2. AbuQdais, H.A., M.F. Hamoda, and J. Newham, *Analysis of residential solid waste at generation sites*. Waste Management & Research, 1997. **15**(4): p. 395-406.
3. NMX-AA-061-1985, *Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de la Generación.*, in *Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NORMA MEXICANA*. 1985: México.
4. NMX-B-231-1990, *Cribas para la clasificación de materiales granulares.*, in *Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NORMA MEXICANA*. 1990: MEXICO.
5. NMX-AA-019-1985, *Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Peso Volumétrico "in situ"*. in *Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NORMA MEXICANA*. 1985: México.
6. NMX-AA-022-1985, *Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Selección y Cuantificación de Subproductos.*, in *Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NORMA MEXICANA*. 1985: México.
7. NMX-AA-015-1985, *Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-muestreo-Método de Cuarteo.*, in *Secretaría de Comercio y Fomento industrial. NORMA MEXICANA*. 1985: México.



## **ANEXO II**

# **INVITACIÓN A LA PARTICIPACIÓN EN LA CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS  
PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA  
Maria Guadalupe Gómez Méndez  
ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## Anexo II

Invitación presentada al jefe de familia de la vivienda con el propósito de obtener la aceptación de participación en la “Caracterización de residuos sólidos de la ciudad de Chihuahua”.

**Departamento de Aseo Urbano Municipal  
Chihuahua, Chih.  
33000**



Estimado ciudadano,

El Departamento de Aseo Urbano Municipal de la ciudad de Chihuahua y la Universidad Autónoma de Chihuahua le invita a participar en el estudio de “Caracterización de residuos sólidos urbanos”.

Colonia \_\_\_\_\_

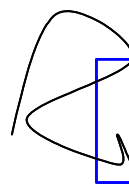
Habitantes \_\_\_\_\_

Fecha \_\_\_\_\_

Código \_\_\_\_\_

Le solicitamos colocar en la bolsa negra de polietileno proporcionada, los residuos generados en su casa durante el día. La recolección de los residuos se realizara durante ocho días.

Gracias por su colaboración,

  
Departamento de Aseo  
Urbano Municipal  
Chihuahua, Chih.

## **ANEXO III**

# **DATOS UTILIZADOS EN LA EVALUACIÓN AMBIENTAL**

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS

PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA

Maria Guadalupe Gómez Méndez

ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

**Anexo III**

Las tablas presentadas en éste Anexo corresponden a los valores por defecto aplicado en la herramienta LCA-IWM para la evaluación ambiental de los tratamientos de residuos sólidos

**Tabla A III-1.** Composición de los residuos orgánicos y residuos de jardín separados (Vogt et al., 2002; Fricke et al., 2002).

<b>Características de los residuos a digestión</b>	<b>Unidad</b>	<b>Residuos orgánicos</b>	<b>Residuos de jardín</b>
Materia seca (DM)	%	45	43
Materia orgánica seca (ODM)	% DM	87	84
ODM degradada biológicamente (biol. ODM)	% ODM	100	100
Contenido de C	% ODM	52	50
Nitrógeno total	% DM	2	1.2
Fósforo total	% DM	0.39	0.5
Potasio total	% DM	0.87	1.5
Calcio total	% DM	2.15	4.4
Magnesio total	% DM	0.75	0.5
Cadmio	mg/kg DM	0.1	0.3
Cromo	mg/kg DM	1.8	4.6
Cobre	mg/kg DM	9.2	10.0
Mercurio	mg/kg DM	0.0	0.2
Níquel	mg/kg DM	1.3	3.7
Plomo	mg/kg DM	2.6	4.8
Zinc	mg/kg DM	30.6	60.0

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-2.** Coeficientes de lixiviado durante la etapa de fermentación (Vogt et al., 2002).

<b>Compuestos emitidos en las aguas residuales</b>	<b>Unidad</b>	<b>Coefficiente de filtrado</b>
Carbono al agua / carbono al biogás	kg Cw/kg Cb	0.10
COD/TOC en las aguas residuales	kg COD/kg TOC	4.78
BOD/COD en las aguas residuales	kg BOD/kg COD	0.29
Coefficiente de filtrado NH4-Nitrógeno <sup>1</sup>	% de N total	13%
Coefficiente de filtrado orgánico Nitrógeno <sup>1</sup>	% de N total	0.03%
Otro coeficiente de filtrado Nitrógeno <sup>1</sup>	% de N total	2%
Coefficiente de filtrado Fósforo	%	5%
Coefficiente de filtrado Potasio	%	50%
Coefficiente de filtrado Calcio	%	10%
Coefficiente de filtrado Magnesio	%	10%
Coefficiente de filtrado Cadmio	%	5%
Coefficiente de filtrado Cromo	%	5%
Coefficiente de filtrado Cobre	%	5%
Coefficiente de filtrado Mercurio	%	5%
Coefficiente de filtrado Níquel	%	5%
Coefficiente de filtrado Plomo	%	5%
Coefficiente de filtrado Zn	%	5%

Fuente: Den Boer et al., 2005. <sup>1</sup> % de la cantidad total de N que entra a la fase de fermentación.

**Tabla A III-3.** Valores para la producción de energía del biogás (Vogt et al., 2002; Soyez et al., 2000).

<b>Proceso de Digestión</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Degradación anaeróbica (de la fracción orgánica)	60%	%
Biogás producido (por material orgánico seco)	0.38	m <sup>3</sup> /kg ODM
Metano en biogás	58%	Vol. %
Eficiencia eléctrica de la unidad de poder (CHP)	30%	%
Eficiencia de térmica de la unidad de poder (CHP)	56%	%
Lambda de la unidad de poder (CHP)	1.6	-
Consumo de electricidad	80	kWh/t bioresiduos
Consumo de calor	324	MJ/t bioresiduos
<b>Emisiones</b>		
NO <sub>x</sub> NO <sub>2</sub>	4.3E+02	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Oxido de dinitrógeno	1.0E+01	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Metano	1.5E+01	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
<b>Parámetros</b>		
	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Dióxido de azufre	5.6E+01	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Monóxido de carbono	6.1E+02	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
PM 10 (polvo)	5.0E+00	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Ácido clorhídrico	1.5E+00	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Ácido Fluorhídrico	9.0E-01	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Benceno	6.0E-05	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Tolueno	6.1E-03	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Etilbenceno	1.8E-03	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
m,p-Xilol	6.8E-03	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
o-Xilol	1.8E-03	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Benzo[a]pireno	5.0E-06	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Tetracloroetileno	8.1E-05	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Diclorometano	6.5E-05	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Policlorobifenil	2.1E-05	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Hexaclorobenceno	4.0E-06	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Dioxinas (sin especificar)	3.2E-11	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Furanos (sin especificar)	1.8E-11	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Arsénico	4.0E-03	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Berilio	5.0E-05	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Cadmio	9.0E-04	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Cromo (ión no especificado)	6.0E-04	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Mercurio	4.2E-03	mg/m <sup>3</sup> gas emitido
Níquel	2.0E-04	mg/m <sup>3</sup> gas emitido

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-4.** Valores para el proceso de maduración (Vogt et al., 2002).

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Contenido de agua en el compost maduro	40%
Agua demandada	22.5 L/t maduración
Agua residual	0
Consumo de diesel	2.2 L/t maduración
Descomposición promedio del C	30% (% de carbono en etapa de maduración)
Descomposición promedio de N	17% (de N <sub>tot</sub> en maduración)

Fuente : Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-5.** Factores de emisión para la etapa de maduración.

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Emisiones de N (aire)	100%	% de N total descompuesto en la maduración
Emisiones al C (aire)	100%	% de C total descompuesto en la maduración
Amonio	96%	% de N al aire
N <sub>2</sub> O	2%	% de N al aire
Metano	3%	% de C al aire
NMVOC <sup>1</sup>	2%	% de C al aire

Fuente: Den Boer et al., 2005. 1) Compuestos Orgánico Volátiles No Metano

**Tabla A III-6.** Contenido de metales pesados en el Fe-Precipitante para remover fósforo en la PTAR\* (Vogt et al., 2002).

Parámetros	Contaminación de Fe-precipitante mg/kg Fe
Cadmio	5
Cromo	144
Cobre	609
Mercurio	4
Níquel	75
Plomo	209
Zinc	2,403

Fuente: Den Boer et al., 2005. \* PTAR planta de tratamiento de aguas residuales

**Tabla A III-7.** Coeficientes de eliminación de contaminantes en una PTAR\* (Vogt et al., 2002).

Contaminante	Coeficientes de eliminación		
	Sedimentación preliminar (PS)	Proceso de lodos activados (AS)	Eliminación de fósforo (PE)
TOC <sup>1</sup>	33 %	90%	
COD <sup>1</sup>	30%	82%	54%
BOD <sup>1</sup>	30%	90%	75%
N orgánico <sup>1</sup>	30%		
N total <sup>1</sup>	10%	72%	
Fósforo <sup>1</sup>	10%		90%
Potasio <sup>1,2</sup>	10%		
Calcio <sup>1,2</sup>	10%		
Magnesio <sup>1,2</sup>	10%		
Cadmio <sup>3</sup>		12%	38%
Cromo <sup>3</sup>		12%	38%
Cobre <sup>3</sup>		19%	1%
Mercurio <sup>3</sup>		7%	63%
Níquel <sup>3</sup>		14%	26%
Plomo <sup>3</sup>		2%	88%
Zinc <sup>3</sup>		14%	26%

Fuente: Den Boer et al., 2005.

- 1) el % se refiere a la cantidad de materia de entrada
- 2) Para la PS se supone es igual a la eliminación del coeficiente de N y P
- 3) El % se refiere a la cantidad de material de entrada en la PTAR

\* PTAR planta de tratamiento de aguas residuales

**Tabla A III-8.** Valores para la PTAR\* de lodos generados y estabilización del proceso.

Parámetros	Valor	Fuente
Producción de lodos (proceso de lodos activados)	1.3 kg DM/kg descomposición BOD	Vogt et al., 2002
Contenido de C de los lodos activados (proceso de lodos /biomasa)	0.5 kg de C/kg de DM lodo <sup>1</sup>	Hultman et al., 1998
Producción de lodos (P- eliminación)	2.5 kg DM/ kg de Fe aplicado	Vogt et al., 2002
Contenido de C de P eliminación de lodos	0 kg de C/kg de DM de lodo	suposición
Generación de biogás (fermentación)	0.45m <sup>3</sup> /kg entrada de ODM <sup>2</sup>	Vogt et al., 2002
Contenido de metano	62% vol.	Vogt et al., 2002
Cloruro férrico promedio (aplicación para remoción de agua)	0.016 kg de FeCl <sub>3</sub> /kg DM lodo	Calculado, suponiendo 20% de PTAR* usando FeCl <sub>3</sub>

Fuente: Den Boer et al., 2005.

\* PTAR planta de tratamiento de aguas residuales

**Tabla A III-9.** Limite de metales pesados y desviaciones permitidas en la Unión Europea (adaptados de Eunomia, 2002).

País	Estándares de calidad	Cd	Cr <sub>tot</sub>	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
EC/"eco-etiqueta"	488/98 EEC	1	100	100	1	50	100	300
EC/"eco-agricola"	2092/91 EEC	0.7	70	70	0.4	25	45	200
EC/"eco-lodo"	Limite inferior	20	-	1,000	16	300	750	2,500
	Limite superior	40	-	1,750	25	400	2,500	4,000
AT	ON S 2200clase I <sup>1</sup>	0.7	70	70	0.7	42	70	210
	ON S 2200clase I <sup>1</sup>	1	70	100	1	60	150	400
	ON S 2200clase III <sup>1</sup>	4	150	400	4	100	500	1,000
BE (Fland.)	Ministerio de agricultura	1.5	70	90	1	20	120	300
DK	Ministerio de agricultura	0.4	-	-	0.8	30	120	-
D	Residuos orgánicos (I) <sup>1</sup>	1	70	70	0.7	35	100	300
	Residuos orgánicos (II) <sup>2</sup>	1.5	100	100	1	50	150	400
NL	Compost <sup>3</sup>	1	50	60	0.3	20	100	200
	Compost (muy limpio)	0.7	50	25	0.2	10	65	75
UK	TCA calidad comercial	1.5	100	200	1	50	150	400

Fuente : Den Boer et al., 2005.

1) referido a 30% ODM

2) referido a la máxima aplicación promedio de 20 y 30 t DM/ha (tres años respectivamente)

3) &gt; 20% ODM

**Tabla A III-10.** Clases de calidad ambiental para el compost y estabilización de residuos orgánicos (European Commission, 2001).

Estándares de calidad	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Compost/clase 1	0.7	100	100	0.5	50	100	200
Compost/clase 2	1.5	150	150	1	75	150	400
Residuos orgánicos estabilizados	5	600	600	5	150	500	1,500

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-11.** Factores de emisión al aire del compost diseminado y lodo de la PTAR\* esperados.

Parámetro	Valor	Unidad
Amonio	37%	de NH <sub>4</sub> -N en compost y lodos
Amonio	4%	de no NH <sub>4</sub> -N en compost y lodos
N <sub>2</sub> O	1%	de N total en compost y lodos

Fuente : Den Boer et al., 2005.

\* PTAR planta de tratamiento de aguas residuales

**Tabla A III-12.** Valores para la sustitución de minerales de fertilizantes.

Contenido	Nitrógeno fertilizante <sup>1</sup>	Fósforo fertilizante <sup>2</sup>	Potasio fertilizante <sup>3</sup>	Calcio fertilizante <sup>4</sup>	Magnesio fertilizante <sup>5</sup>
N <sub>tot</sub> (kg/kg)	0.27				
P <sub>tot</sub> (kg/kg)		0.08			
Potasio <sub>tot</sub> (kg/kg)			0.33		
Calcio <sub>tot</sub> (kg/kg)	0.12			0.715	
Magnesio <sub>tot</sub> (kg/kg)	0.024				0.603
Zinc (mg/kg)	38.3	236.0	3.7	46.0	9.5
Cobre (mg/kg)	4.0	17.2	2.9	8.5	3.0
Cadmio (mg/kg)	0.3	10.8	0.1	0.3	0.1
Cromo (mg/kg)	8.7	114	3.5	11.4	6.9
Plomo (mg/kg)	21.4	18.5	0.5	6.1	1.0
Níquel (mg/kg)	3.8	28.8	1.5	4.8	1.0
Mercurio (mg/kg)	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01

Fuente: Den Boer et al., 2005.

1) CAN = Calcio Amonio Nitrato.

2) Super-P = Super fosfato

3) KCl = Cloruro potasico

4) Lime = Oxido calcico

5) No especificado. Se supuso MgO

**Tabla A III-13.** Factores de emisión al aire por la aplicación de N-fertilizantes.

Parámetros	Valor	Unidad
Amonio	0.04	kg/kg de N aplicado
Óxido de dinitrógeno	0.02	kg/kg de N aplicado

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-14.** Electricidad demandada para el pre-tratamiento mecánico (Vogt et al., 2002).

Proceso	Energía eléctrica demandada kWh/t
Aire	8.1
Cernido	3.0
Imán de Fe	0.5
Molido	2.6
Total	14.2

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-15.** Parámetros en el proceso en el contenedor de compostaje (Vogt et al., 2002).

Parámetros	Valor
Demanda de electricidad	10 kWh/t
Contenido de agua en el compost fresco	50%
Demanda de agua	2% de entrada de masa
Agua residual	125 L/t de entrada
Descomposición promedio (ODM/carbón)	16% de ODM/carbón de entrada en el contenedor de compostaje
Descomposición promedio Nitrogeno	11% de N <sub>tot</sub> de entrada en el contenedor de compostaje

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-16.** Factores de emisión para el proceso del contenedor de compostaje (Vogt et al., 2002).

Emisiones	Unidad	Valor
<b>AL AIRE</b>		
Emisiones totales de C al aire EA-C1	% DeRaC1	98.7
Factor de emisión CO <sub>2</sub> -C1	% AE-C1	95
Factor de emisión CH <sub>4</sub> -C1	% AE-C1	3
Factor de emisión TOC-C1	% AE-C1	2
Emisión total de N al aire AE-N1	% DeRaN1	93.9
Factor de emisión NH <sub>3</sub> -N1	% AE-N1	96
Factor de emisión N <sub>2</sub> O-N1	% AE-N1	2
El aire residual pasa a través de un biofiltro	1 = si; 2 = no	1
<b>AL AGUA</b>		
Emisión total de C al agua WE-C1 (como TOC)	% DeRaC1	1.3
Emisión total de N al agua WE-N1	% DeRaN1	6.1
Factor de emisión NH <sub>4</sub> -N1	% WE-N1	47
Factor de emisión N org.-N1	% WE-N1	52.5

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-17.** Parámetros para el proceso de maduración (Vogt et al., 2002).

Etapas de maduración	Unidad	Valor
Descomposición promedio de la fracción org. DeRaC2	% ODM	44
Descomposición promedio de la fracción org. DeRaC2	% N total	29
Contenido de agua en el compost maduro WCmc	%	40
Demanda de electricidad en el tratamiento del flujo de gas	kWh/t	19
Demanda de electricidad en el rotor	kWh/t	10
Demanda de agua	%	20
Agua residual generada	l/t	165

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-18.** Eficiencia de limpieza de los biofiltros (Schwing, 1999).

Parámetros	Eficiencia de limpieza de los filtros (%)
Metano	33
Carbono Orgánico Total (TOC)	82
Amonio	80
Óxido de dinitrógeno	0

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-19.** Composición de los residuos sólidos urbanos, basados en Rotter, 2004; Fricke et al., 2002 y Dehoust et al., 2002.

Características químicas	DM	ODM	biol ODM	C	biog. C	H	O	N	Cl	S
	%	% DM	% ODM	%ODM	%C	%ODM	%ODM	%ODM	%ODM	%ODM
Papel	62.5%	87.0%	98.0%	48.6%	99.0%	6.4%	44.3%	0.2%	0.3%	0.2%
Vidrio	95.0%	0.0%	0.0%	47.0%	98.0%	10.0%	40.0%	3.0%	0.0%	0.0%
Hierro	90.0%	0.0%	0.0%	48.2%	98.0%	6.3%	44.2%	0.5%	0.7%	0.1%
Aluminio	90.0%	0.0%	0.0%	48.2%	98.0%	6.3%	44.2%	0.5%	0.7%	0.1%
Cobre	90.0%	0.0%	0.0%	48.2%	98.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Plásticos	85.0%	95.0%	5.0%	82.7%	5.0%	13.3%	3.8%	0.1%	0.1%	0.0%
Empacado compuestos	75.0%	90.5%	78.0%	59.3%	60.0%	6.7%	38.7%	2.7%	0.7%	0.5%
Compuestos	85.0%	80.0%	58.0%	57.6%	20.0%	6.7%	38.7%	2.7%	0.7%	0.5%
Residuos orgánicos	45.0%	87.0%	100.0%	50.7%	100.0%	6.2%	43.7%	0.5%	0.1%	0.1%
Residuos de jardín	43.0%	84.0%	100.0%	49.8%	100.0%	7.9%	32.1%	0.0%	0.7%	0.0%
Madera	80.0%	90.0%	50.0%	49.4%	100.0%	7.6%	32.7%	0.5%	1.5%	0.1%
Panales	50.0%	50.0%	25.0%	56.6%	90.0%	7.7%	31.1%	3.6%	0.8%	0.3%
Inertes	90.0%	0.0%	0.0%	48.2%	98.0%	6.3%	44.2%	0.5%	0.7%	0.1%
Textiles	70.0%	85.0%	60.0%	51.1%	65.0%	6.9%	37.1%	4.3%	0.4%	0.4%
Piel	70.0%	85.0%	50.0%	47.0%	90.0%	6.4%	40.2%	2.0%	0.7%	0.3%
Residuos de grano medio	56.0%	49.0%	88.0%	47.0%	65.0%	6.5%	40.0%	2.5%	0.5%	0.6%
Residuos de grano fino	66.0%	39.0%	88.0%	49.0%	100.0%	7.0%	33.0%	13.0%	0.0%	0.0%
Residuos peligrosos	75.0%	50.0%	25.0%	69.7%	0.0%	9.9%	19.2%	0.4%	0.7%	0.1%

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-20.** Contenido de metales pesados en las fracciones de los residuos sólidos domiciliarios (Morf and Brunner, 1999).

Propiedades químicas	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	mg/kgDM							
Papel	5.0	0.7	9.8	44.8	0.2	6.8	23.2	295
Vidrio	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	329	82
Hierro	20.0	21.0	156.0	265.0	0.0	68.3	582	507
Aluminio	20.0	21.0	156.0	265.0	0.0	68.3	582	507
Cobre	20.0	21.0	156.0	265.0	0.0	68.3	582	507
Plásticos	5.0	66.0	28.6	60.4	0.2	4.3	50	627
Empacado compuestos	5.0	1.0	36.0	68.0	0.2	7.4	30	388
Compuestos	5.0	1.0	7.3	37.5	0.2	9.0	13.5	90
Residuos orgánicos	30.0	1.0	55.0	153.0	0.5	28.0	90	500
Residuos de jardín	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
Madera	5.0	0.4	5.5	17.9	0.1	3.8	20.8	158
Panales	5.0	0.5	27.0	23.2	0.2	11.3	10	313
Inertes	10.0	0.5	80.0	35.0	0.1	45.0	50	70
Textiles	5.0	1.0	16.8	55.0	0.1	7.3	34.5	170
Piel	5.0	3.0	900.0	43.0	0.1	5.1	112	4,438
Residuos de grano medio	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
Residuos de grano fino	35.0	2.0	75.0	715.0	1.1	43.8	190	780
Residuos peligrosos	12.0	53.0	17.5	1,690.0	127.0	347.0	10,800	106,000

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-21.** Composición promedio de RSU (basados en el 56% de los residuos de las viviendas, 7% de residuos de bulto, 37% de residuos comerciales (Dehoust, 2002).

<b>Materiales</b>	<b>Composición de los RSU (%)</b>
Papel	10.8
Vidrio	2.3
Hierro	3.2
Aluminio	0.2
Cobre	0.0
Plásticos	12.1
Envases de empaqueo compuestos	0.4
Compuestos	3.2
Residuos orgánicos	22.8
Residuos de jardín	0.0
Madera	9.5
Pañales	4.5
Inertes	5.8
Textiles	2.4
Piel	0.3
Residuos de grano medio	11.8
Residuos de grano fino	10.2
Residuos peligrosos	0.3

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-22.** Eficiencia de limpieza del flujo de gas del sistema de purificación en la incineración (ifu y ifeu, 2001).

<b>Sustancias</b>	<b>Eficiencia considerada en la limpieza del gas</b>
Ácido clorhídrico	99.95%
Dióxido de azufre	99.87%
Ácido fluorhídrico	95.74%

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-23.** Coeficientes de transferencia de metales pesados en los residuos incinerados (Lahl, 2001 y Hellweg, 2001).

<b>Metal</b>	<b>Flujo de gas</b>	<b>Escoria</b>	<b>Ceniza de la caldera</b>	<b>Ceniza del filtro y residuos de la purificación del gas</b>
	%	%	%	%
Arsénico	0.03	55.0	3.00	42.00
Cadmio	0.00	0.30	0.00	99.60
Cromo	0.01	45.50	3.20	51.10
Cobre	0.00	81.00	0.00	20.00
Mercurio	4.37	0.60	0.20	99.10
Níquel	0.06	90.01	3.60	6.30
Plomo	0.01	6.60	0.00	93.30
Zinc	0.01	0.30	0.00	99.70

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-24.** Concentración promedio y valores límites de concentración para los contaminantes en el flujo de gas de la planta de incineración.

Emisión	Emisiones promedio basados en datos existentes en planta de Alemania	Emisiones basados en datos (ifu y ifeu, 2001)	Directivas de Incineración en EU (2000/76/EC)	Valores de la herramienta LCA-IWM seleccionados
	(Dehoust, 2002) mg/m <sup>3</sup> flujo de gas	(ifu y ifeu, 2001) mg/m <sup>3</sup> flujo de gas	(2000/76/EC) mg/m <sup>3</sup> flujo de gas	
N <sub>2</sub> O	2.00.E+00	2.30.E-07		Promedio: columna I y II
PM <sub>10</sub>	1.11.E+00	1.00.E-06	1.15.E+00	Directiva de la EU
HCl	1.97.E+00		2.17.E+00	Entrada dependiente
HF	1.10.E-01		1.60.E-01	Entrada dependiente
SO <sub>2</sub>	6.19.E+00		6.72.E+00	Entrada dependiente
NO <sub>x</sub> (como NO <sub>2</sub> )	9.41.E+00	6.00.E-05	1.11.E+02	Directiva de la EU
NH <sub>3</sub>	5.00.E-01	3.00.E-06		Promedio: columna I y II
CO		1.00.E-05		Columna II
TOC		1.00.E-06	1.37.E+00	Directiva de la EU
PCDD, PCDF		5.00.E-15	1.00.E-08	Directiva de la EU
PCB		5.00.E-11		Columna II
Clorofenol		1.00.E-10		Columna II
Clorobenzol		5.00.E-11		Columna II
Benzopireno		7.00.E-13		Columna II
Mercurio			6.00.E-03	Entrada dependiente
Cd, Tl			4.00.E-03	Entrada dependiente
Metales pesados			4.00.E-02	Entrada dependiente

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-25.** Demanda de materiales auxiliares para la purificación del gas en una planta de incineración.

Material	Valor	Cantidad
Ca(OH) <sub>2</sub> demandado para remover SO <sub>2</sub>	1.2	kg CaOH / kg SO <sub>2</sub>
Ca(OH) <sub>2</sub> demandado para remover HCl	1.4	kg CaOH / kg HCl
Coke demandado	0.0005	kg de coke / kg de gas
NH <sub>4</sub> OH demandado	0.0002	kg NH <sub>4</sub> OH / t de gas residual

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-26.** Concentración de metales del flujo de RSU en la planta de incineración (Chandler et al., 1997; v.d. Sloot et al., 1997; Cossu et al., 1998; ABF-BOKU, 2001).

Elemento	Escoria (mg/kg)	Cenizas de la caldera (mg/kg)	Cenizas del filtro (mg/kg)
<b>Inmovilizados</b>			
Cromo	100-1,000	200-800	100-1,000
Cobre	250-5,000	300-1,500	50-50,000
Hierro	30,000-150,000	20,000-50,000	20,000-60,000
Manganeso	400-1,700	700-1,200	800-1,700
Níquel	50-800	100-300	100-500
Titanio	3,500-8,000	6,500	7,000-12,000
<b>Móvil</b>			
Arsénico	20-80	20-80	40-300
Cadmio	<0.5-40	50-150	200-1,000
Plomo	500-5,000	2,000-10,000	2,500-19,000
Antimonio	10-80	20-60	40-120
Selenio	0.4-10	5-30	10-30
Estaño	100-1,000	500	1,000-2,000
Talio	<0.5	<0.5	1-5
Zinc	800-600	5,000-20,000	5,000-20,000
Muy móvil			
Mercurio	<0.01-3	<5	1-30

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-27.** Cantidad soluble de contaminantes de una tonelada de ceniza solidificada, basado en pruebas de simulación de lixiviados (Ecobilan, 2003).

<b>Emisiones</b>	<b>Cantidad soluble</b> (g / tonelada de cenizas estabilizadas)
Arsénico	0
Cadmio	82
Cl, Cloruros	135,240
COD	0
Cromo VI	8.58
Cobre	78.26
Cianuros	0
Dioxinas	0.00165
Mercurio	3,584
Magnesio	1,908
Plomo	232
Fenoles	0.003
Zinc	3,685.7

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-28.** Contaminantes de lixiviados de la escoria de la planta de incineración usados como material de construcción de caminos (Ecobilan, 2003).

<b>Emisiones</b>	<b>Cantidad soluble</b> (g/tonelada de escoria)
Arsénico	0
Cadmio	12
Cl, Cloruros	5,170
COD	0
Cromo VI	5.2
Cobre	105.7
Mercurio	0
Magnesio	1,632
Plomo	272
Sulfatos	0
Zinc	682.5

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-29.** Contaminantes de lixiviados de la escoria de incineración, en el relleno sanitario (Ecobilan, 2003).

<b>Emisiones</b>	<b>Cantidad soluble</b> (g / tonelada de escoria)
Arsénico	0
Cadmio	8
Cl, Cloruros	4,010
COD	0
Cromo	6
Cobre	79.8
Mercurio	0
Magnesio	1,717
Manganeso	81.1
Plomo	370.5
Policíclicos aromáticos Hidrocarbonos (PAHs)	0.0362
Policlorobifenilos (PCB)	0.0075
Zinc	790.4

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-30.** Contenido de contaminantes en el gas del relleno sanitario.

Contaminante	Schwing, 1999 mg/m <sup>3</sup>	Tabasaran, 1987 mg/m <sup>3</sup>	Valores de la herramienta LCA-IWM mg/m <sup>3</sup>
1,1,1-tricloroetano	1.0E+01	2.3E+00	6.1E+00
1,1-dicloroetano	2.5E+00		2.5E+01
1,2-dicloroetano	5.0E-01		5.0E-01
Benceno	8.0E+00	3.5E+00	5.8E+00
Butano		1.2E+01	1.2E+01
Cadmio	5.6E-03		5.6E-03
Tetraclorometano		3.0E-01	3.0E-01
Cloro (Cl <sub>tot</sub> )	6.5E+01		6.5E+01
Clorbenceno		1.0E-01	1.0E-01
Etil cloride		1.3E+02	1.3E+02
Triclorometano	1.0E+01	1.0E+00	5.5E+00
Cromo	6.6E-04		6.6E-04
Diclorometano	8.0E+01	3.0E+00	4.2E+01
Diclorodifluorometano (CFC-12)	4.0E+01	6.2E+01	5.1E+01
Etano		2.4E+01	2.4E+01
Etilbenceno	2.0E+01	1.2E+02	6.9E+01
Fluorotriclorometano (CFC-11)	1.0E+01		1.0E+01
F-tot	1.3E+01		1.3E+01
Hexano	3.6E+00	1.1E+01	7.1E+00
Ácido sulfhídrico	2.0E+02		2.0E+02
Mercurio	4.1E-05		4.1E-05
Plomo	5.1E-03		5.1E-03
Policlorobifenilo (PCB)	1.6E-03		1.6E-03
Pentano		6.0E+00	6.0E+00
Propano		5.0E+00	5.0E+00
Tetracloroetileno	1.0E+01	7.1E+01	4.1E+01
Tolueno	1.0E+02	3.1E+02	2.0E+02
Xileno isómeros (sum)	7.7E+01	4.0E+00	4.0E+01
Tricloroetileno	2.0E+01	9.1E+01	5.6E+01
Cloruro de vinilo	2.0E+01		2.0E+00

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-31.** Contenido de contaminantes en el flujo del gas del motor en el relleno sanitario moderno.

Contaminantes	Franke et al., 1992 (mg/m <sup>3</sup> )	Dehoust et al., 1998 (mg/m <sup>3</sup> )	Haigh et al., 2002 (mg/m <sup>3</sup> )	Gillet et al., 2002 (mg/m <sup>3</sup> )	Valores de la herramienta LCA-IWM (mg/m <sup>3</sup> )
1,1,1-tricloroetano	8.8E-04				8.80E-04
1,2-dicloroetano	8.3E-04				8.30E-04
Benceno	5.2E-03				5.20E-03
Monóxido de carbono		6.5E+02	1.3E+03	1.0E+03	9.83E+02
Cloro (Cl-tot)	1.1E-01			0.0E+00	1.10E-01
Cloroformo	8.3E-04				8.30E-04
Cromo	1.1E-06				1.10E-06
Diclorometano	8.3E-04				8.30E-04
Etilbenceno	1.8E-02				1.80E-02
Fluor (F-tot)	2.1E-02				2.10E-02
Ácido clorhídrico		3.0E+01	5.5E-03	4.9E+00	1.16E+01
Ácido fluorhídrico		1.0E+00	3.5E-03	2.1E+00	1.03E+00
Ácido sulfhídrico	3.3E-01		8.3E-02		2.07E-01
Mercurio	6.9E-08				6.9E-08
NMVOC			2.3E+01	5.0E+01	3.65E+01
Oxido de nitrógeno	1.0E+02	5.0E+02	1.2E+03	8.1E+02	6.53E+02
PAHs			3.0E-01	1.4E-02	1.57E-01
Plomo	8.5E-06				8.5E-06
PCB	2.7E-06				2.7E-06
Dioxinas	1.0E-07	1.0E-08	1.2E-06	7.1E-09	3.29E-07
PM10			6.8E+00	1.8E+01	1.24E+01
Dióxido de sulfuro	2.5E+01	2.3E+02	2.1E+02	2.8E+02	1.86E+02
Tetracloroetano	3.3E-04				3.3E-04
Tricloroetano	5.0E-03				5.0E-03
Cloruro de vinilo	2.0E-03				2.0E-03

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-32.** Composición promedio del lixiviado dependiendo de la edad del relleno sanitario (basado en el relleno sanitario para residuos mezclados) (Krümpelbeck, 1999).

Contaminantes	Edad del relleno sanitario			
	1-5 años	6-10 años	11-20 años	20-30 años
	mg/L de lixiviado			
pH	7.30	7.50	7.60	7.70
BOD5	2,258	800	275	185
COD5	3,810	2,485	1,585	1,160
Amonio	405	600	555	445
Nitrato (NO <sub>3</sub> )	3.60	7.60	12	9
Nitrito (NO <sub>2</sub> )	0.06	0.63	0.50	0.80
Hidrocarburos halogenados (AOX)	2.77	1.93	1.51	1.13
Cloruros	1,300	2135	1,760	1,025
Sulfatos ((SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup> )	98	146	93	83
Sulfhídrico (HS <sup>-</sup> )	5.60	6.10	2	1.10
Sodio	815	1,125	905	645
Potasio	1,220	910	695	595
Magnesio	290	205	145	115
Calcio	375	465	325	155
Boro	5.90	6	5.60	9
Manganeso	3.90	105	1.10	0.90
Hierro	50	15	9.90	8.70
Arsénico	0.02	0.02	0.04	0.01
Cadmio	0.01	0	0	0
Cromo	0.16	0.22	0.16	0.18
Cobre	0.71	0.07	0.06	0.04
Níquel	0.20	0.15	0.14	0.12
Plomo	0.16	0.06	0.07	0.03
Zinc	1.10	1.50	0.53	0.54

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-33.** Valores por defecto de la composición del lixiviado en el relleno sanitario. Fase de operación (fase A) después del cierre del RS (fase B) y 20 años después del cierre del relleno sanitario.

	Valores de la herramienta LCA-IWM seleccionados para la fase A	Valores de la herramienta LCA-IWM seleccionados para la fase B	Reducción de los contaminantes en el lixiviado 20 años después del cierre del RS
	mg/L	mg/L	%
pH	7.40	7.60	
BOD5	1,529	275	75
COD5	3,147	1,585	75
Amonio	502	555	25
Nitrato (NO <sub>3</sub> )	5.6	12	50
Nitrito (NO <sub>2</sub> )	0.34	0.50	50
Hidrocarburos halogenados (AOX)	2.3	1.51	75
Cloruros	1,717	1,760	50
Sulfatos ((SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup> )	122	93	50
Sulfhídrico (HS <sup>-</sup> )	5.8	2	50
Sodio	970	905	75
Potasio	1,065	695	75
Magnesio	247	145	75
Calcio	420	325	75
Boro	6	5.60	75
Manganeso	54.4	1.10	75
Hierro	32.5	9.90	75
Arsénico	0.02	0.04	75
Cadmio	0.01	0	75
Cromo	0.19	0.16	75
Cobre	0.39	0.06	75
Niquel	0.18	0.14	75
Plomo	0.11	0.07	75
Zinc	1.3	0.53	75

Fuente: Den Boer et al., 2005.

**Tabla A III-34.** Eficiencia de limpieza del lixiviado con la combinación de tratamiento biológico con ultra filtración y absorción en carbón activo (basado en: Heyer y Stegmann, 2001; Krümpelbeck y Ehrig, 2001; Robinson et al., 2002).

Contaminante	Eficiencia de tratamiento de purificación del lixiviado
BOD	94%
COD	90%
Amonio	97%
Hidrocarburos halogenados (AOX)	75%
Arsénico	70%
Cobre	50%
Cromo	30%
Níquel	20%
Zinc	70%

Fuente: Den Boer et al., 2005.

## **ANEXO IV**

# **ARTÍCULOS PUBLICADOS Y RESÚMENES DE PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS**



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE CICLO DE VIDA AL DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS

PARA LA CIUDAD DE CHIHUAHUA

Maria Guadalupe Gómez Méndez

ISBN:978-84-692-3234-7/DL:T-999-2009

## **Anexo IV**

SETAC Europe 17<sup>th</sup> Annual Meeting

Oporto (Portugal), Abril 2007

### **APPLICATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT TO URBAN SOLID WASTE IN CHIHUAHUA.**

Gómez-Méndez G.<sup>1,2</sup>, Meneses M.<sup>1</sup> and Castells F.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Chemical Engineering Dept., University Rovira i Virgili, Tarragona Spain.

<sup>2</sup> Fac. Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.

Solid waste management system need to ensure health and safety. The objective of this study was to select the best environmental sustainable strategy for urban solid waste (USW) management in Chihuahua (México). Three different scenarios of USW treatment were designed and the Life Cycle assessment was applied to them in order to identify the most benefit from an environmental point of view. The categories of environmental impact choose were abiotic depletion, global warming, human toxicity, photochemical-oxidation, acidification and eutrophication. The scenario I is the actual landfill in Chihuahua, the scenario II is a landfill with emissions control and scenario III is an incineration. In landfill with emission control has greater environmental benefit in abiotic depletion because in this treatment exist energy recovery. The landfill with emissions control shows lower environmental impact than actual landfill and is cheaper than the incineration. The incineration present environmental benefits in all categories. The best treatment form an environmental point of view in this study is incineration, because it presents less negative environmental impact.

3<sup>rd</sup>. International Conference on Life Cycle management

Zurich (Suiza), Agosto 2007

### **Application of Life Cycle Assessment to integrated solid waste management in Chihuahua.**

Gómez-Méndez G.<sup>1,2</sup>, Meneses M.<sup>1</sup> and Castells F.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Chemical Engineering Dept., University Rovira i Virgili, Tarragona Spain.

<sup>2</sup> Fac. Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.

The final disposal of solid waste in countries with developing economies are often characterized by inadequate collection service, little or not treatment and uncontrolled dumping. In Chihuahua, México the urban solid waste collected are deposited into landfill. Here the scavengers collect some of the recycling materials.

The waste composition is necessary to integrated solid waste management system. The first objective of our study is to analyze the urban solid waste composition in Chihuahua by different population socioeconomic levels. The second objective is to apply life cycle assessment methodology to evaluate and compare different waste treatment methods. Household solid waste were collected, analyzed to hand and separated in fifteen fraction. Our results show that the organic material is the predominant fraction in urban solid waste in Chihuahua and that the inhabitants with high-economic level generate more waste.

In this study we proposed three possible alternatives for the management of solid wastes in Chihuahua: nowadays landfill, landfill with environmental controls and incineration. These scenarios were analyzed with the methodology of life cycle assessment. that provides a quantified assessment of some environmental aspects. The impact categories considerate in this study are abiotic depletion, climate change, human toxicity, photo-oxidant formation, acidification and eutrophication. From the three analyzed scenarios the incineration is found as the least environmental impacting because of heat recovering. Nevertheless, for a more complete analysis, economic and social factors are to be considered besides the environmental impacts. To develop more adequate management strategies, it is also essential to monitor landfills and to weigh the incoming waste in order to have a more efficient record of USW deposited.

SETAC Europe 19th Annual Meeting

Göteborg (Suecia), Junio 2009

## **Environmental evaluation of Urban Solid Waste treatment scenarios in the city of Chihuahua by means of LCA**

Gómez-Méndez G.<sup>1,2</sup>, Meneses M.<sup>1</sup> and Castells F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chemical Engineering Dept., University Rovira i Virgili, Tarragona Spain.

<sup>2</sup> Fac. Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.

In countries with limited technological and economic resources the urban solid wastes (USW) are disposed directly to the landfill, without any previous treatment. It is also the case of city Chihuahua in Mexico. The objective of this study is the environmental evaluation of the actual management of the USW in Chihuahua through LCA. Furthermore, four possible USW treatment scenarios are proposed and evaluated in this study. For the calculation of these scenarios the LCA-IWM tool was used.

The environmental evaluation of USW management includes the temporary storage of wastes, their collection, transport, treatment and final disposal. The four analysed scenarios of USW management are: (1) the actual situation in Chihuahua (landfill, without emissions control), (2) modern landfill (with emissions control), (3) combined modern landfill – digestion, (4) combined recycling – composting – modern landfill, and (5) combined recycling – composting – incineration. These scenarios were analysed for the following environmental impact categories: abiotic depletion, global warming, human toxicity, photochemical oxidation, acidification, and eutrophication. The obtained results show that scenarios 4 and 5 have the best environmental profile, due to recycling, compost production and energy recovery. The worst scenario is the actual one (1) which shows the highest environmental impact in all the analysed categories



# Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico

Guadalupe Gomez<sup>a,b</sup>, Montserrat Meneses<sup>a</sup>, Lourdes Ballinas<sup>b</sup>, Francesc Castells<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> *Departament d'Enginyeria Química, Universitat Rovira i Virgili, 43007 Tarragona, Spain*

<sup>b</sup> *Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, 31310 Chihuahua, Mexico*

Accepted 31 October 2007

Available online 8 January 2008

## Abstract

The characterization of urban solid waste generation is fundamental for adequate decision making in the management strategy of urban solid waste in a city. The objective of this study is to characterize the waste generated in the households of Chihuahua city, and to compare the results obtained in areas of the city with three different socioeconomic levels. In order to identify the different socioeconomic trends in waste generation and characterization, 560 samples of solid waste were collected during 1 week from 80 households in Chihuahua and were hand sorted and classified into 15 weighted fractions. The average waste generation in Chihuahua calculated in this study was 0.676 kg per capita per day in April 2006. The main fractions were: organic (48%), paper (16%) and plastic (12%). Results show an increased waste generation associated with the socioeconomic level. The characterization in amount and composition of urban waste is the first step needed for the successful implementation of an integral waste management system.

© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Inappropriate solid waste operation, storage, collection and disposal practices entail environmental and public health risks (World Resources Institute, 1996). Knowledge of solid waste composition is necessary for an adequate management of urban solid waste (McDougal et al., 2002; Zeng et al., 2005). The variability in solid waste composition in Mexico is highly affected by population movements, resulting from the seasonal migration to the United States. This fact has had an impact greater than economic growth in the modification of regional consumption patterns (Buenrostro and Bocco, 2003).

Several studies have been carried out in Mexico about the composition of solid waste. Among them, Bernache-Perez et al. (2001) conducted one with samples from households in Guadalajara city. Another study by Buenrostro et al. (2001a) carried out in 1998, in Morelia city, showed the waste generation rates of residential sources in three

different socioeconomic levels. Nevertheless, there is no information about the waste composition for each level. There was also a study in one Mexicali neighbourhood carried out in 1999 and 2000 (Ojeda-Benítez et al., 2003). All of these studies were carried out 6–8 years ago; since then consumer habits have changed in Mexico, as have the characteristics of the waste.

Waste characterization studies have been carried out in other countries too. Abu Qdais et al. (1997) in Abu Dhabi, United Arab Emirates, obtained results showing a direct relation between waste generation and income level. The same authors presented a procedure to determine the minimum number of samples required for accurate assessment of urban solid waste composition in a given city. Bolaane and Ali (2004) calculated the number of sample units as a function of total housing units for different income categories in Gaborone, Botswana. Nevertheless in their results there is no significant proportionality between waste production and salary levels of citizens.

Provided that in Chihuahua these types of research about urban waste characterization have not yet been undertaken, the purpose of the current study was the accurate determination of quantities and composition of solid

\* Corresponding author. Tel.: +34 977559644; fax: +34 977559621.  
E-mail address: [francesc.castells@urv.cat](mailto:francesc.castells@urv.cat) (F. Castells).

waste generation in Chihuahua City by households with different socioeconomic levels. This is an essential preliminary step to determine the most appropriate urban solid waste (USW) management in the city.

Chihuahua is the capital of the State of Chihuahua and is located in the northern region of México. In 2005 Chihuahua City had 758,791 inhabitants (INEGI, 2005), grouped into 194,561 households and 525 neighborhoods (SCINCE, 2000). The main job activities in the city are developed in the secondary and tertiary sectors. According to SCINCE (2000) in Chihuahua 37% of the population is economically active. Chihuahua is a city with a fast growing population. In the city, 60% of the total USW is collected by the municipal service and the remaining 40% is collected by private

waste collection services. The average waste generation is between 960 and 1000 tonnes per day, 60% of which corresponds to waste generation in households (Garay, 2006). This proportion is similar to the value of 56% reported for the city of Guadalajara, in México (Bernache, 2003).

## 2. Methodology

The characterization of solid waste in the city of Chihuahua consists of the following steps:

### 2.1. Organization of samples

The tool “SCINCE por colonias 2000” (SCINCE by Neighborhoods 2000) allows the localization of neighborhoods in the city and offers statistical and geographical information about them. SCINCE (2000) classifies inhabitants by ranges of income. Table 1 shows the classification levels according to the minimum salary range established by SCINCE (2000). The current study considers only three socioeconomic levels: Level I, Level II and Level III (see Table 1). Level 0 is not considered in this study because this population is extremely unstable; they usually change jobs often and also migrate to the US. Fig. 1 shows a map of Chihuahua City, with the location of the areas corresponding to the three mentioned levels.

Table 1  
 Classification in levels according to income range for the economically active population in Chihuahua

Income range in minimum salary <sup>a</sup> (population)	Active population <sup>a</sup> (%)	Level (proposed classification)
<1 Salary	3	0
1–2 Salaries	19	I
2–5 Salaries	54	II
>5 Salaries	24	III

Note: In 2007 the minimum salary in Chihuahua was US\$4.3 per day.

<sup>a</sup> Source: SCINCE, 2000.

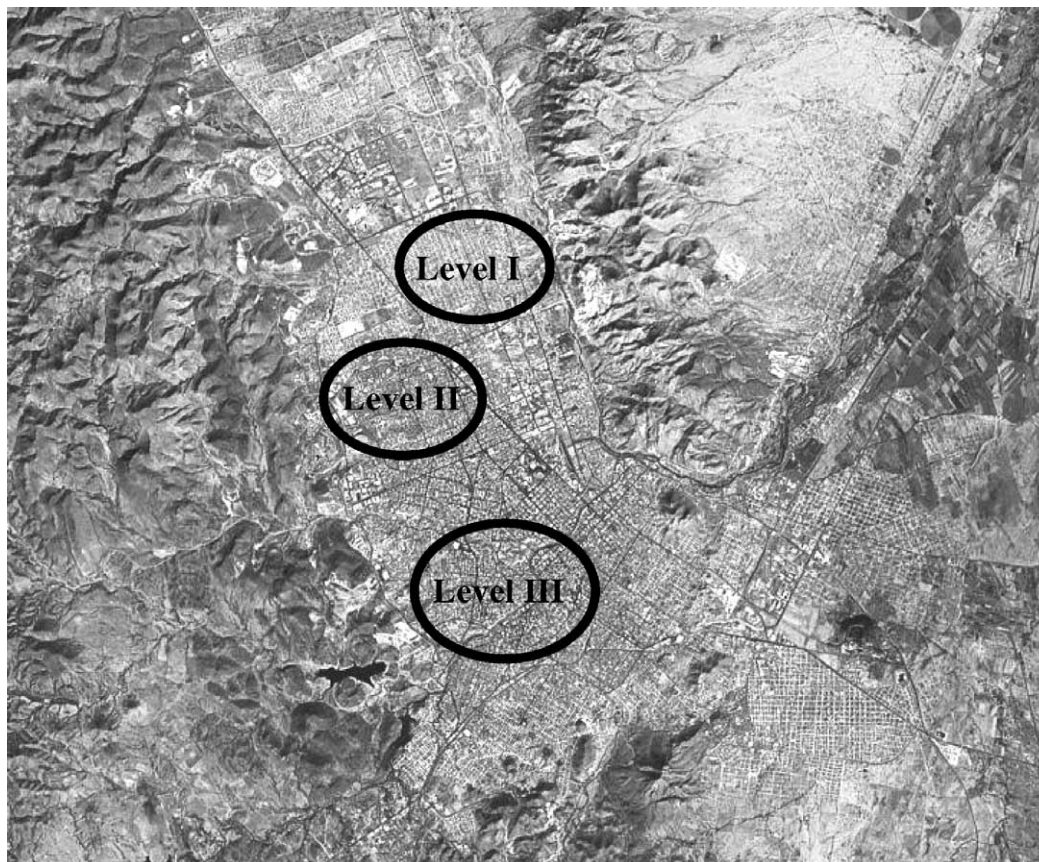


Fig. 1. Map of Chihuahua City with detail of the sectors with different socioeconomic level.

## 2.2. Calculation of number of samples

Urban solid waste (USW) is a heterogeneous material, and its generation rates and composition vary from place to place and from season to season (World Resources Institute, 1996; Gidarakos et al., 2006). In order to estimate accurately the average quantities and composition of waste, it is necessary to carry out a statistically designed sampling survey. From a statistical point of view, the accuracy in determining these parameters will be enhanced by increasing the number of samples to be analyzed; however, the number of samples should be adapted to the available resources.

The procedure designed to determine the minimum number of samples needed to gather reasonably accurate data was based on the central limit theorem, also applied by Abu Qdais et al. (1997). The number of samples was determined with a 99% confidence interval and a 10% standard error. The samples were collected in the selected neighborhoods according to socioeconomic levels I, II and III, using the following equation:

$$n = [z(\text{SD})/R]^2$$

where  $n$  is minimum number of samples,  $z$  is score determined from t Student statistical tables for standard normal distribution, SD is standard deviation of population, equal to the standard deviation of the preliminary sample and  $R$  is sampling error.

The minimum number of samples needed to obtain a 10% error in the amount of waste was 162 for Level I, 162 for Level II, and 119 for Level III. Our study has been conducted on 168 samples in Level I, 210 samples in Level II and 182 samples in Level III (see Table 2). The number of samples is slightly above the minimum number needed to guarantee a 10% error.

## 2.3. Collection procedure

The method used for the collection of samples was mainly the Mexican standards (NMX-AA-022-1985; NMX-AA-061-1985; NMX-AA-091-1987) according to

Table 2

Results of the samplings survey for the three socioeconomic levels studied, Chihuahua City, April 2006

Number of residences	Level I (number of samples 168 per week)		Level II (number of samples 210 per week)		Level III (number of samples 182 per week)	
	Total waste for household (kg/week)	Resident households	Total waste for household (kg/week)	Resident households	Total waste for household (kg/week)	Resident households
1	27.3	3	27.4	5	13.9	5
2	2.2	2	18.5	4	20.0	4
3	17.8	4	10.2	2	17.4	4
4	29.5	2	21.7	4	31.5	5
5	6.9	2	20.4	4	15.4	4
6	10.5	4	35.2	4	57.3	5
7	4.4	4	22.5	5	24.2	4
8	11.1	4	13.7	4	37.0	6
9	8.0	6	8.9	2	13.4	4
10	18.7	2	19.7	6	20.3	5
11	19.2	2	5.4	1	17.4	5
12	27.2	5	14.9	3	38.6	5
13	8.6	5	6.3	2	8.8	4
14	25.5	8	16.9	3	15.0	5
15	15.8	4	35.6	2	21.4	6
16	14.0	5	21.5	4	14.5	6
17	14.3	2	13.5	6	20.0	3
18	18.7	3	17.5	4	26.8	5
19	15.0	4	19.6	5	11.0	5
20	11.8	3	16.9	4	32.2	5
21	15.7	4	33.7	4	15.8	4
22	20.2	2	21.4	5	19.6	5
23	15.7	3	13.4	4	22.8	4
24	7.2	4	17.5	3	19.1	5
25	–	–	16.4	6	46.5	3
26	–	–	13.8	3	40.2	5
27	–	–	9.3	2	–	–
28	–	–	16.3	1	–	–
29	–	–	10.7	4	–	–
30	–	–	13.0	3	–	–
Total	364.9	87	531.5	109	620.1	121
Standard deviation	0.495		0.494		0.425	
Waste generation rate (kg per capita day <sup>-1</sup> )	0.599		0.697		0.732	

the procedure developed by Bernache-Perez et al. (2001). Samples were collected by three different teams, each of them composed of three persons. The neighborhoods chosen were previously visited by the corresponding team to get acquainted with the work area. Households of each neighborhood were randomly visited and invited to participate in the waste characterization program. A small questionnaire about the number of people per household, address, collection frequency, their opinion about the current waste system and their willingness to recycle waste was responded to by the households participating in the project. These households were provided with black plastic bags for waste disposal, which were marked with a four digit code for each household. The questionnaire included an explanation with certain rules for waste collection, for instance, that personal hygiene waste (child disposable diapers, adult disposable diapers, feminine pads, etc.) should be placed in a separate plastic bag and that all solid waste generated should be later deposited in the black plastic bag.

Sample collection was carried out in each chosen household, each day during one week in April 2006. The first day, the black bags were collected and discarded to ensure that the waste to analyze had been generated in the last 24 h. Every day, when the waste was collected, a new black plastic bag, marked with the same digit code, was given to each household for waste collection within the next 24 h. The second day, the family returned the black plastic bag with the waste and received a new black plastic bag. The

Table 3  
 Waste composition fractions

Waste fractions	Waste components
Organic	Food, animal excrements, wood, garden trimmings
Paper	Office paper, bills, milk box and juice box (paper that does not fit into other category)
Newspaper–magazine	Newspaper, magazines
Cardboard	Corrugated board, boxboard, egg containers
Plastics	Film PE, small plastic
Plastic containers	PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS
Metals	Ferrous, non ferrous
Aluminum cans	Aluminum cans, other aluminum
Clear glass	Containers of solid foods or liquids
Color glass	Container of beer, wine, foods
Fine residue	Ground garden, fine residues that pass the sieve
Vegetal fiber	Material used in apparatus for air conditioning
Synthetic fiber	Material used for cleaning
Batteries	AA or AAA batteries
Miscellaneous	Nappies/sanitary products, small toys, shoes, cotton, textiles, hair, other waste (small construction waste material)

bag with the waste generated in each household was transported in a truck to a place where it was sorted.

#### 2.4. Classification of fractions

Each bag was weighed and registered on a sampling sheet. The waste was manually separated into 15 different



Fig. 2. Photographs of the six main waste fractions considered took during the waste characterization.

categories, listed in Table 3, which were selected according to the possibility of recovering the corresponding materials. Then each one of the fractions was weighed and the results were recorded on a sampling sheet. Waste collection continued for six more days following the same procedure. This work was supported by personnel from the “Departamento de Aseo Urbano Municipal” (Department of Municipal Urban Cleanliness) and students from the Universidad Autónoma de Chihuahua (Autonomous University of Chihuahua). Photographs of the six main waste fractions realized during the waste fraction classification are shown in Fig. 2.

### 3. Results

#### 3.1. Waste generation rate

A total of 560 collected samples came from 80 households (24 from Level I, 30 from Level II and 26 from Level III), selected randomly during 1 week in April 2006. The quantity of USW collected during the study period was 365, 532 and 620 kg, respectively, for each socioeconomic level studied. The total quantity of solid waste analyzed was 1517 kg, which was generated during the 1-week period by 105 residents of the neighborhoods studied. Table 2 shows the results for the three socioeconomic levels above-mentioned, the total solid waste collected per household and the number of residents per household. The average solid waste generation rate per neighborhood was 0.599, 0.697 and 0.732 kg per capita per day, respectively, for levels I, II and III. The average solid waste generation rate for Chihuahua in April 2006 was 0.676 kg per capita per day with an average 3.9 residents per household.

The average generation rate was highest in the highest socioeconomic level or Level III: 0.732 kg per capita per day. The lowest rate 0.599 kg per capita per day corre-

sponds to the lowest socioeconomic level or Level I. The waste generation rate shows a positive correlation with the socioeconomic class, which is similar to what was observed in a study undertaken in Morelia in 1998 (Buenrostro et al., 2001a). Although per capita generation rates in Chihuahua in April 2006 show a positive trend from the lowest to the highest socioeconomic strata, the difference is not statistically significant.

#### 3.2. Urban waste composition in Chihuahua

Table 4 shows the quantity per capita per day of USW generation for each fraction. The quantity of the organic fraction was higher for Level III than for Level II and Level I. The highest socioeconomic class generates larger amounts of organic fraction.

Level III generated more newspaper–magazines and cardboard than the other levels. A possible explanation for this is that the capacity to afford these products is higher in households from Level III with the highest socioeconomic level.

Level II has the highest quantity of aluminum cans among all levels, while in level III the domestic service collected the aluminum cans for sale in the recycling industry. Meanwhile households in Level II and Level I do not have domestic service so they may discard them in the waste. Also it should be taken into account that in Level I the households buy small quantities of products in aluminum cans because of their high price.

The fraction of colored glass, found in more expensive products, was higher in Level III (0.010 kg/(capita.day) than in the other levels. Level III also shows the highest quantity of vegetal fiber used in Chihuahua in cooling systems, in spring and summer seasons. Households in Level III (the highest socioeconomic level) have more cooling systems and consequently they produce more waste of vegetal fiber than the rest of the population.

Table 4

Amount per capita and weight percentage of USW fractions by socioeconomic level, Chihuahua City, April 2006

Fractions	Level I		Level II		Level III	
	kg/(capita.day)	%	kg/(capita.day)	%	kg/(capita.day)	%
Organic	0.283	47.2	0.334	48.0	0.356	48.6
Paper	0.054	9.0	0.062	8.8	0.060	8.1
Newspaper–magazines	0.013	2.2	0.039	5.6	0.047	6.5
Cardboard	0.015	2.5	0.013	1.9	0.023	3.1
Plastics	0.051	8.6	0.054	7.8	0.054	7.4
Plastic containers	0.023	3.9	0.029	4.2	0.030	4.0
Metals	0.016	0.3	0.011	0.8	0.012	0.3
Aluminum cans	0.002	2.7	0.006	1.6	0.002	1.6
Clear glass	0.038	6.3	0.024	3.4	0.031	4.2
Color glass	0.003	0.5	0.007	1.1	0.010	1.4
Fine residue	0.006	1.0	0.013	1.9	0.012	1.6
Vegetal fiber	0	0	0.01	1.5	0.02	2.8
Synthetic fiber	0	0	0	0	0	0
Batteries	0	0	0	0	0	0
Miscellaneous	0.095	15.8	0.093	13.3	0.075	10.3
Total	0.599	100	0.697	100	0.732	100

Table 5  
Fractions generated in Chihuahua and other Mexican cities

Fractions	Chihuahua		Guadalajara <sup>*a</sup>		Mexicali <sup>*b</sup>		Morelia <sup>*c</sup>	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
Organic	246,101	48.0	939,089	54.0	5787	55.6	175,450	57.1
Paper	82,455	16.1	123,473	7.1	916	8.8	33,881	11.0
Plastic	60,956	11.9	156,515	9.0	629	6.1	24,125	7.9
Metals	12,394	2.4	26,086	1.5	198	1.9	5621	1.8
Glass	28,581	5.6	69,562	4.1	364	3.5	14,422	4.7
Others	81,949	16.0	424,329	24.4	2506	24.1	53,601	17.5
Generation rate kg/(capita.day)	0.676		0.580		0.592		0.629	

\* The classification of waste composition for these studies was reduced to six fractions for this comparative analysis.

<sup>a</sup> Source: Bernache-Perez et al., 2001.

<sup>b</sup> Source: Ojeda-Benítez et al., 2003.

<sup>c</sup> Source: Buenrostro et al., 2001a.

The 15 fractions presented in Table 4 were aggregated in Table 5 into six main groups in order to compare the results of this study with other existing studies:

1. Organic.
2. *Paper*: composed of paper, newspaper–magazines and cardboard.
3. *Plastic*: composed of plastic and plastic containers.
4. *Metals*: composed of aluminum cans and metals.
5. *Glass*: composed of clear glass and color glass.
6. *Others*: composed of fine residue, vegetal fiber, synthetic fiber, batteries and miscellaneous.

Fig. 3 shows the differences between the six fractions for the three socioeconomic levels. The highest socioeconomic level (Level III) has a higher percentage of organic waste and paper than Level I or II. For plastic, metal, glass and other fractions, the differences between the three levels are not significant enough to allow conclusions about the influence of the socioeconomic level on these fractions.

### 3.3. Comparison of solid waste composition

A comparison of solid waste composition in Chihuahua with that of other Mexican cities is presented in Table 5. It shows that Chihuahua city has an average organic fraction

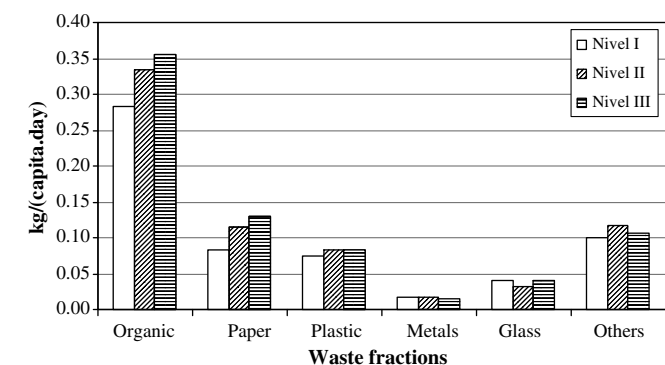


Fig. 3. Quantity per capita of six fractions for three socioeconomic levels.

lower than that of other Mexican cities. The remaining fractions (paper, plastic, metals, glass, and others) are present in a higher percentage. A possible explanation for this behavior is that the proportion of organic fraction in waste decreases with the increase of the gross domestic product (GDP). There is a significant difference of GDP between Chihuahua and the other cities. Data for 2006 shows that the increase in the GDP was 6.3% in Guadalajara, 4.3% in Chihuahua, 3.6% in Mexicali, and 2.2% in Morelia (INEGI, 2005).

Another possible explanation for the differences in the proportion of the six fractions between Chihuahua and other Mexican cities could be because the present study was carried out in April 2006, while in Guadalajara it was conducted in June–August 1997; in Mexicali, in May–June 1999 and in March–April 2000; and in Morelia, in February–March 1998. Furthermore, compared to the 560 samples from 80 households during one week analyzed in this study, Bernache-Perez et al. (2001) analyzed samples from 300 households in Guadalajara, Ojeda-Benítez et al. (2003) analyzed 1380 samples in one neighborhood during eight weeks in Mexicali, and Buenrostro et al. (2001a) assessed 262 samples from three different socioeconomic levels in Morelia.

## 4. Conclusions

The characterization of USW was performed in Chihuahua households during one week in April 2006 in order to quantify the waste generation and the waste composition and to identify possible socioeconomic trends in the waste generation. Three different areas from the city with clearly different socioeconomic levels were studied: Level I with an average income of 1–2 income minimum salaries, Level II with 2–5 minimum salaries and Level III (highest economic level) with more than five minimum salaries. A total of 560 samples were taken from 80 households during one week, weighting a total of 1517 kg. The average USW generation for Chihuahua in April 2006 was 0.676 kg/(capita.day). The highest waste generation corresponds to households in Level III, with the highest economic income, while the

lowest waste generation corresponds to households in Level I, with the lowest economic income. The waste generation calculated show a slight positive trend from the lowest to the highest economic stratum, but it should be taken into account that the differences founded are not statistically significant. More studies are needed in order to document this trend.

USW was sorted in 15 fractions and its respective composition was determined. The fractions studied were organic, newspaper–magazines, cardboard, other paper, plastic container, other plastic, aluminum cans, other metals, clear glass, colored glass, fine residue, vegetal fiber, synthetic fiber, batteries and miscellaneous. The USW composition differed slightly among the socioeconomic levels studied.

For Chihuahua city, 48% of total urban waste corresponds to the organic fraction, and it represents the main urban solid waste for all three of the socioeconomic levels studied.

Because all that, the current work can be considered as a first needed step in a sustainable waste management planning, since it provides accurate information of the waste urban generation and composition in Chihuahua (Mexico).

### Acknowledgements

We would like to thank Promep México for financially supporting this research. The authors also thank Departamento de Aseo Urbano de Chihuahua, Rebeca Mendoza, Joel Acosta and Ricardo Mariñelarena for their help in this study.

### References

- Abu Qdais, H., Hamonda, M.F., Newham, J., 1997. Analysis of residential solid waste at generation sites. *Waste Management & Research* 15, 395–406.
- Bernache, G., 2003. The environmental impact of municipal waste management: the case of Guadalajara metro area. *Resources, Conservation and Recycling* 39, 23–237.
- Bernache-Perez, G., Sánchez-Colón, S., Garmendia, A.M., Sánchez-Salazar, M.E., 2001. Solid waste characterization study in the Guadalajara metropolitan zone, Mexico. *Waste Management & Research* 19, 413–424.
- Bolaane, B., Ali, M., 2004. Sampling household waste at source: lessons learnt in Gaborone. *Waste Management & Research* 22, 142–148.
- Buenrostro, O., Bocco, G., 2003. Solid waste management in municipalities in Mexico: goals and perspectives. *Resources Conservation and Recycling* 39, 251–263.
- Buenrostro, O., Bocco, G., Bernache, G., 2001a. Urban solid waste generation and disposal in México: a case study. *Waste Management & Research* 19, 169–176.
- Garay, V., 2006. Unpublished data. Departamento de Aseo Urbano Municipal de Chihuahua (Department Municipal Urban Cleanliness Chihuahua), México. victor.garay@mpiochih.gob.mx.
- Gidakos, E., Havas, G., Ntzamilis, P., 2006. Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete. *Waste Management* 26, 668–679.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2005. II Censo de Población y Vivienda, 2005. (II Counting Population and Housing 2005). México. <<http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mpob93&c=3839&e=08>>.
- McDougal, F., White, P., Franke, M., Hindle, P., 2002. *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory*, second ed. Blackwell Science, Oxford, UK.
- NMX-AA-022-1985. Mexicana Oficial Standard NMX-AA-022-1985 Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Selección y Cuantificación de Subproductos, México.
- NMX-AA-061-1985. Mexican Official Standard NMX-AA-061-1985. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de la Generación, México.
- NMX-AA-091-1987. Mexican Official Standard NMX-AA-091-1985. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Calidad del suelo-terminología. México.
- Ojeda-Benítez, S., Armijo de Vega, C., Ramírez-Barreto, M.E., 2003. Characterization and quantification of household solid wastes in a Mexican city. *Resources Conservation and Recycling* 39, 211–222.
- SCINCE, 2000. Sistema para la Consulta de Información Censal. SCINCE por colonias (SCINCE by neighborhoods 2000). Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- World Resources Institute, 1996. United Nations Environmental Program, United Nations Development Program. The World Bank, World Resources 1996–1997. The Urban Environment. Oxford: Oxford University Press. <[http://pdf.wri.org/worldresources1996-97\\_bw.pdf](http://pdf.wri.org/worldresources1996-97_bw.pdf)>.
- Zeng, Y., Trauth, K.M., Peyton, R.L., Banerji, S., 2005. Characterization of solid waste disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri. *Waste Management & Research* 23, 62–71.