

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA**



**RECUPERACIÓN Y RECICLAJE DE RESIDUOS SÓLIDOS
URBANOS EN MEXICALI, BAJA CALIFORNIA.
CASO: RESIDUOS COMERCIALES**

TESIS

Que para obtener el título de:

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta

KARLA GARDUÑO PALOMINO

DIRECTORA DE TESIS

DRA. SARA OJEDA BENÍTEZ

Mexicali, Baja California. Julio de 2013

Agradecimientos

Quiero dedicar la finalización de esta Tesis Doctoral a todas aquellas personas que me han brindado su apoyo y consejo a lo largo de todo este proceso, sin las cuales no hubiera podido lograr este objetivo.

A mi directora de tesis Dra. Sara Ojeda Benítez por sus consejos, horas de trabajo invertidas, paciencia y sobre todo por brindarme su amistad que fue una luz en momentos difíciles.

A mis padres por creer siempre en mí, darme la confianza para emprender cualquier proyecto en la vida y enseñarme a alcanzar mis metas con trabajo y perseverancia.

A mis hermanas, por ser mis confidentes y escucharme en mis momentos de estrés.

A mi cuñada por su amistad, cariño, siempre dispuesta a ayudarme sin pedir nada a cambio.

Y finalmente, a mi esposo, Jorge, por estar siempre a mi lado incondicionalmente, apoyándome, alentándome con su amor y paciencia, sin él no hubiera sido posible seguir adelante.

RESUMEN

En la última década, la cantidad de desechos sólidos producidos por los seres humanos en su diario quehacer ha alcanzado niveles sin precedentes a nivel mundial, provocando estragos en el medio ambiente y en la calidad de vida de sus habitantes, es por esto que la mayoría de las economías desarrolladas y muchos países en vías de desarrollo persiguen el objetivo de mejorar su gestión de los residuos. En México la ley general para la prevención y gestión de los residuos, dispone la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos sólidos urbanos, bajo los criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social. El objetivo de esta investigación es evaluar escenarios de recuperación y reciclaje de los residuos sólidos comerciales (RC) generados por micro-negocios en la ciudad de Mexicali. En este trabajo se estructuró la metodología en cuatro etapas: En la primera etapa se analizó la situación actual del sistema de manejo de los residuos comerciales; en la segunda etapa se realizó un estudio de caracterización de los residuos comerciales, desarrollando una metodología propia para los RC; en la tercera etapa se identificaron las tecnologías disponibles para recuperación y reciclaje de residuos sólidos; y en la cuarta etapa se evaluaron cinco escenarios de recuperación y reciclaje de RC utilizando la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida, y el modelo de Manejo Integral de Residuos IWM-2 desarrollado por McDougall et al. (2004), la metodología propuesta por ISO 14040-44 y la metodología CML de Guinée et al. (2001).

Los resultados de la investigación indican que existen 8544 micro-negocios de 16 giros distintos en el área urbana, con una generación de residuos promedio por establecimiento de 15.46 kg al día. El 56.1% corresponde a residuos reutilizables y reciclables, el 36.8% residuos orgánicos putrescibles, 5.4% residuos con alto poder calorífico y 1.7% residuos para disposición final. Se desarrollaron y evaluaron cinco escenarios de manejo, un escenario base, un escenario actual y tres escenarios propuestos que integran los procesos de recolección segregada, recuperación de materiales reciclables y tratamiento biológico aerobio (compostaje) o anaerobio (biogás) para la fracción orgánica y disposición final en relleno sanitario. El escenario con mejor eficiencia ambiental (E4) es el que incluyen la recuperación de materiales y tratamiento anaerobio de los residuos orgánicos. Las etapas del ciclo de vida del manejo de RC que tienen mayor contribución al costo y carga ambiental son los procesos de recolección y disposición final.

INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	10
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	15
1.5. OBJETIVOS.....	15
CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL.....	16
2.1. GESTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS	16
2.2. GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN PAÍSES DESARROLLADOS.....	17
2.3. GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO	18
2.4. LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO	21
2.4.2. <i>Almacenamiento temporal</i>	21
2.3.4. <i>Recolección</i>	22
2.3.5. <i>Transferencia</i>	22
2.3.6. <i>Tratamiento</i>	22
2.3.7. <i>Disposición final</i>	23
2.5. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RESIDUOS COMERCIALES EN MEXICALI.	23
2.6. LEGISLACIÓN APLICABLE A LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN MÉXICO.....	24
2.6.1. <i>Marco normativo aplicable al manejo de residuos comerciales</i>	26
2.7. MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	27
2.7.1 <i>Clasificación de los residuos por su composición</i>	27
2.7.2. <i>Clasificación de los residuos por su origen</i>	28
2.7.3. <i>Clasificación de los residuos por su tipo de manejo</i>	28
2.7.4. <i>Clasificación de los residuos por su potencial para valorización</i>	29
2.8. MÉTODOS DE RECOLECCIÓN	29
2.8.1. <i>Recolección mixta</i>	29
2.8.2. <i>Recolección fraccionada</i>	29
2.8.3. <i>Tipos de vehículos de recolección</i>	30
2.9. MÉTODOS DE VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS	31
2.9.1 <i>Tratamiento para residuos de recolección mixta</i>	32
2.9.1.1. Tratamiento mecánico - biológico aeróbico.	32
2.9.1.2. Tratamiento mecánico-biológico anaeróbico.....	33
2.9.1.3. Secado biológico	34
2.9.1.4. Tratamiento térmico. Incineración.....	35
2.9.2. <i>Reciclaje de plásticos</i>	37
2.9.2.1. Reciclaje primario: Re-extrusión	38
2.9.2.2. Reciclaje secundario: Mecánico.....	38
2.9.2.3. Reciclaje terciario: Químico.....	40
2.9.3. <i>Reciclaje de metales ferrosos y no ferrosos</i>	44
2.9.3.1. Reciclaje de metales no ferrosos (Aluminio).....	45
2.9.4. <i>Reciclaje de papel y cartón</i>	47
2.9.4.1. Tecnología de reciclado para fabricación de cartón y grados de papel no destintado	48
2.9.4.2. Tecnología de reciclado para fabricación de grados de papel destintado.	49
2.9.5. <i>Reciclaje de vidrio</i>	49
2.9.5.1. Proceso de reciclaje de vidrio	50
2.10. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV).....	51
2.10.1. <i>Orígenes</i>	51
2.10.2. <i>Definición de análisis de ciclo de vida</i>	53
2.10.3 <i>Etapas del análisis de ciclo de vida</i>	54
2.10.3.1. Definición de objetivos y alcance.....	54
2.10.3.2. Análisis de inventario de ciclo de vida	55
2.10.3.3. Análisis de impacto de ciclo de vida (AICV)	59

2.10.3.4. Interpretación de análisis de ciclo de vida	67
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	70
3.1. SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE MANEJO DE RESIDUOS COMERCIALES EN MEXICALI	72
3.1.1. <i>Generadores de residuos comerciales</i>	73
3.1.2. <i>Recolectores</i>	73
3.1.3. <i>Acopiadores</i>	73
3.1.4. <i>Recicladores</i>	74
3.1.5. <i>Sitios de disposición final</i>	74
3.2. MUESTREO PARA CUANTIFICAR LOS RESIDUOS COMERCIALES	74
3.2.1. <i>Determinación de la muestra para selección de micronegocios</i>	75
3.2.2. <i>Cuantificación de sub-productos</i>	76
3.3. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES A NIVEL COMERCIAL PARA RECUPERACIÓN Y RECICLAJE DE RESIDUOS SÓLIDOS	80
3.4. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE RECUPERACIÓN Y RECICLAJE DE RESIDUOS SÓLIDOS COMERCIALES	82
3.4.1. <i>Análisis de ciclo de vida (ACV)</i>	82
3.4.2. <i>Objetivos y alcance</i>	83
3.4.2. <i>Inventario de ciclo de vida (ICV)</i>	85
3.4.3. <i>Datos de entrada para los escenarios</i>	86
3.4.3.1. Definición de sistema	86
3.4.3.2. Recolección y transporte	87
3.4.3.3. Planta de recuperación de materiales (PRM)	88
3.4.3.4. Tratamientos para residuos orgánicos	90
3.4.3.5. Relleno Sanitario y unidad de transferencia	91
3.4.3.6. Costos	91
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	94
4.1. GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS COMERCIALES	94
4.1.1. <i>Generación de residuos comerciales a nivel micro-negocio</i>	94
4.1.2. <i>Caracterización y cuantificación de sub-productos</i>	96
4.2. INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (ICV) DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS	98
4.2.1. <i>Escenarios</i>	98
4.2.2. <i>Costos anuales, consumo de combustible y residuos finales</i>	101
4.2.2.1. Costos	101
4.2.2.2. Combustibles	101
4.2.2.3. Residuos finales	102
4.2.3. <i>Categorías de impacto ambiental</i>	103
4.3. NORMALIZACIÓN DE LOS DATOS	107
4.4. ANÁLISIS DE CONTRIBUCIÓN	108
4.4.1. <i>Costos</i>	108
4.4.2. <i>Residuos</i>	109
4.4.3. <i>Categorías de impacto</i>	110
4.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	113
4.5.1. <i>IWM-2 Vs IWMMM</i>	114
4.5.2. <i>Porcentaje de contaminación de material segregado</i>	116
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN	118
5.1. ESTUDIO DE GENERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS COMERCIALES	118
5.2. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE MANEJO DE RESIDUOS COMERCIALES	119
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	124
BIBLIOGRAFÍA:	127
ANEXOS	136
ANEXO 1. FORMATO DE ENTREVISTA PARA COMPAÑÍAS DE SERVICIO DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS	137

ANEXO 2. FORMATO DE ENTREVISTA PARA ACOPIADORES/RECICLADORES	139
ANEXO 3. LISTA DE ACOPIADORES DE MATERIALES RECICLABLES EN LA CIUDAD DE MEXICALI	143
ANEXO 4. COSTOS DE OPERACIÓN DE UNA PRM DE CAPACIDAD MÁXIMA 100 TON/DÍA.....	144
ANEXO 5. CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL RELACIONADAS A LOS INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL Y FACTORES EQUIVALENTES PARA LOS ESCENARIOS PROPUESTOS	145
ANEXO 6. LOCALIZACIÓN DE ESTABLECIMIENTOS COMERCIALES Y RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS COMERCIALES.....	151

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. RESIDUOS GENERADOS POR SECTOR EN LOS PAÍSES MIEMBROS DE LA OECD	2
FIGURA 2.1. MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN MÉXICO	21
FIGURA 2.2. CADENA DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS	31
FIGURA 2.3. DIAGRAMA DE FLUJO QUE INDICA EL BALANCE DE MATERIAL Y ENERGÍA PARA EL TRATAMIENTO A) MECÁNICO-BIOLÓGICO AERÓBICO CON RECUPERACIÓN DE MATERIALES RECICLABLES, B) MECÁNICO-BIOLÓGICO CON RECUPERACIÓN DE MATERIALES RECICLABLES Y RDF. (ECONOMOPOULOS, 2010).....	33
FIGURA 2.4. DIAGRAMA DE FLUJO QUE INDICA EL BALANCE DE MATERIAL Y ENERGÍA PARA EL TRATAMIENTO MECÁNICO-BIOLÓGICO ANAERÓBICO CON RECUPERACIÓN DE MATERIALES RECICLABLES. (ECONOMOPOULOS, 2010).	34
FIGURA 2.5. DIAGRAMA DE FLUJO QUE INDICA EL BALANCE DE MATERIAL Y ENERGÍA PARA EL TRATAMIENTO SECADO BIOLÓGICO CON RECUPERACIÓN DE MATERIALES RECICLABLES. (ECONOMOPOULOS, 2010).	35
FIGURA 2.6. DIAGRAMA DE FLUJO QUE INDICA EL BALANCE DE MATERIAL Y ENERGÍA PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE INCINERACIÓN EN MASA. (ECONOMOPOULOS, 2010).	36
FIGURA 2.7. VÍAS DE RECICLADO DE PLÁSTICOS	38
FIGURA 2.8. ESQUEMA DE RECICLAJE MECÁNICO, DESCRITO POR AZNAR ET AL. (2006).....	40
FIGURA 2.9. ESQUEMAS DE TERMÓLISIS Y SUS PRODUCTOS (AL- SALEM ET AL. 2009).....	41
FIGURA 2.10. ETAPAS EN LA FABRICACIÓN DE METAL PRIMARIO Y METAL SECUNDARIO.....	45
FIGURA 2.11 LAS FASES DE UN ACV SEGÚN ISO 14040	54
FIGURA 2.12. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA. (ISO 14044)	56
FIGURA 2.13. CONCEPTO DE INDICADOR DE CATEGORÍA (ISO 14044).....	60
FIGURA 2.14. RELACIÓN ENTRE EL ICV, LOS INDICADORES INTERMEDIOS E INDICADORES FINALES EN EL MODELO DE AICV ReCiPe 2008.	67
FIGURA 2.15. RELACIONES ENTRE LOS ELEMENTOS DE LA FASE DE INTERPRETACIÓN Y LAS OTRAS FASES DE ACV (ISO/FDIS 14044: 2006).....	68
FIGURA 3.1. MUNICIPIOS DE BAJA CALIFORNIA Y CABECERAS MUNICIPALES.....	70
FIGURA 3.2. DELIMITACIÓN DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE MEXICALI.....	72
FIGURA 3.3. METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS COMERCIALES.....	74
FIGURA 3.4. ZONAS DE ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN.....	76
FIGURA 3.5. PATRÓN DE MUESTREO POR CUADRANTES	78
FIGURA 3.6. ALCANCE DEL ESTUDIO.....	85
FIGURA 4.1. COMPOSICIÓN DE SUB-PRODUCTOS DE RESIDUOS COMERCIALES	96
FIGURA 4.2. PRINCIPALES CATEGORÍAS DE SUB-PRODUCTOS	97
FIGURA 4.3. CATEGORIZACIÓN POR POTENCIAL DE VALORIZACIÓN	97
FIGURA 4.4. BALANCE DE MASAS DE ESCENARIOS E0 Y E1	99
FIGURA 4.5. BALANCE DE MASAS DEL ESCENARIO E2.....	99
FIGURA 4.6. BALANCE DE MASAS DEL ESCENARIO E3.....	100
FIGURA 4.7. BALANCE DE MASA DE ESCENARIO E4	100
FIGURA 4.8. COSTO ANUAL DE ESCENARIOS	101
FIGURA 4.9. CONSUMO ANUAL DE COMBUSTIBLE PARA LOS ESCENARIOS	102
FIGURA 4.10. RESIDUOS SÓLIDOS FINALES PARA LOS ESCENARIOS	103
FIGURA 4.11. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (GWP) PARA LOS ESCENARIOS PROPUESTOS	104
FIGURA 4.12. POTENCIAL DE FORMACIÓN DE FOTO-OXIDANTES (POCP) PARA LOS ESCENARIOS PROPUESTOS.....	104
FIGURA 4.13. POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DE RECURSO ABIÓTICO (ADP) PARA LOS ESCENARIOS PROPUESTOS.....	105
FIGURA 4.14. POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN (AP) PARA LOS ESCENARIOS PROPUESTOS.....	105

FIGURA 4.15. POTENCIAL DE EUTROFIZACIÓN (EP) PARA LOS ESCENARIOS PROPUESTOS	105
FIGURA 4.16. CATEGORÍAS DE IMPACTO POTENCIAL, DATOS NORMALIZADOS	108
FIGURA 4.17 CONTRIBUCIÓN DE CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS A LOS COSTOS DEL SISTEMA.	109
FIGURA 4.18 CONTRIBUCIÓN DE CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS AL TOTAL DE RESIDUOS SÓLIDOS FINALES (TONELADAS)	110
FIGURA 4.19 CONTRIBUCIÓN DE CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS AL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL.....	111
FIGURA 4.20 CONTRIBUCIÓN DE CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS AL POTENCIAL DE FORMACIÓN DE FOTO-OXIDANTES	111
FIGURA 4.21 CONTRIBUCIÓN DE CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS AL POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DE RECURSO ABIÓTICO	111
FIGURA 4.22CONTRIBUCIÓN DE CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS AL POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN.....	112
FIGURA 4.23 CONTRIBUCIÓN DE CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS AL POTENCIA DE EUTROFIZACIÓN	112
FIGURA 4.24 CONTRIBUCIÓN DE CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS AL POTENCIAL DE TOXICIDAD HUMANA.....	112
FIGURA 4.25 CONTRIBUCIÓN DE CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS AL POTENCIAL DE ECOTOXICIDAD TERRESTRE.	113
FIGURA 4.26 CONTRIBUCIÓN DE CADA ETAPA DEL CICLO DE VIDA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS AL POTENCIAL DE ECOTOXICIDAD ACUÁTICA.	113
FIGURA 4.27. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE (IWM-2 Vs. IWMM)	114
FIGURA 4.28. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE RESIDUOS FINALES TOTALES (IWM-2 vs. IWMMM).....	114
FIGURA 4.29. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (IWM-2 vs. IWMMM)	115
FIGURA 4.30. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE POTENCIAL FORMACIÓN DE FOTO-OXIDANTES (IWM-2 vs. IWMMM).....	115
FIGURA 4.31. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN (IWM-2 v. IWMM)	115
FIGURA 4.32. RESULTADOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR PORCENTAJE DE CONTAMINACIÓN DE LOS RESIDUOS RECICLABLES EN RECOLECCIÓN SEGREGADA.	116
FIGURA 4.33 RESULTADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS FINALES POR PORCENTAJE DE CONTAMINACIÓN DE LOS RESIDUOS RECICLABLES DE RECOLECCIÓN SEGREGADA	116
FIGURA 4.34 RESULTADOS DE POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL POR PORCENTAJE DE CONTAMINACIÓN DE LOS RESIDUOS RECICLABLES DE RECOLECCIÓN SEGREGADA	117
FIGURA 4.35 RESULTADOS DE POTENCIAL DE FORMACIÓN DE FOTO OXIDANTES POR PORCENTAJE DE CONTAMINACIÓN DE LOS RESIDUOS RECICLABLES DE RECOLECCIÓN SEGREGADA	117
FIGURA 4.36 RESULTADOS DE POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN POR PORCENTAJE DE CONTAMINACIÓN DE LOS RESIDUOS RECICLABLES DE RECOLECCIÓN SEGREGADA	117

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. INSTRUMENTOS LEGALES APLICABLES AL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS COMERCIALES ...	26
TABLA 2.2. CLASIFICACIÓN DE GENERADORES DE RSM PROPUESTA	28
TABLA 2.3. CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL RELACIONADAS A INDICADOR DE IMPACTO AMBIENTAL.	62
TABLA 2.4. MODELOS DE EVALUACIÓN DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA	66
TABLA 2.5 CATEGORÍAS DE SUBPRODUCTOS POR SU POTENCIAL DE VALORIZACIÓN	80
TABLA 3.1. SELECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE SUB-PRODUCTOS	78
TABLA 3.2. CAPACIDADES DE PROCESAMIENTO Y COSTOS DE TRES TIPOS DE PRM	81
TABLA 3.3. ESCENARIOS PROPUESTOS PARA EL MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS COMERCIALES	84
TABLA 3.4. RESIDUOS GENERADOS Y TIPO DE COMBUSTIBLE	86
TABLA 3.5. COMPOSICIÓN DE RESIDUOS	86
TABLA 3.6. MEZCLA DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD (CFE, 2011).....	87
TABLA 3.7. DISTANCIAS RECORRIDAS EN LA ETAPA DEL MANEJO DE RESIDUOS	88
TABLA 3.8. GRADO DE CONTAMINACIÓN DE RECICLABLES	89
TABLA 3.9. RESIDUOS RECUPERADOS EN ESCENARIO ACTUAL.....	90
TABLA 3.10. COSTOS DEL SISTEMA	92
TABLA 4.1. POBLACIÓN, MUESTRA MÍNIMA, MUESTRA REAL	94
TABLA 4.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MICRONEGOCIOS POR GIRO COMERCIAL.....	95
TABLA 4.3. DATOS DE RECOLECCIÓN DURANTE EL 2010.....	95
TABLA 4.4. FACTORES DE NORMALIZACIÓN. MUNDIAL AÑO 2000 (WEGENER SLEESWIJK ET AL., 2008)	107

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

En la última década, la cantidad de desechos sólidos producidos por los seres humanos en su quehacer diario ha alcanzado niveles sin precedentes a nivel mundial, provocando estragos en el medio ambiente y en la calidad de vida de sus habitantes. Esta situación que se agrava día a día debido a factores como el aumento acelerado de la población mundial, un estilo de vida consumista, falta de conciencia ambiental, políticas ambientales inadecuadas y recursos económicos limitados, por mencionar algunos.

La Comisión Europea (2009) menciona que numerosos impactos se derivan de las opciones de manejo de residuos sólidos que llevemos a cabo. Por ejemplo, el cambio en el clima y afectaciones a la salud humana así como de la flora y fauna que se atribuyen a la contaminación del aire por NO₂, SO₂, CO₂, CH₄, dioxinas y partículas suspendidas en el aire, contaminación de suelos, acuíferos y reducción de recursos no renovables, entre otros.

Las actividades productivas del ser humano generan residuos durante todo el ciclo de vida del producto. Por eso es importante que adoptemos medidas que nos permitan la reducción de la generación de residuos en todos los niveles de este ciclo, y una vez terminada su vida útil considerar su recuperación a través de las distintas tecnologías de reciclaje disponibles.

La mayoría de las economías desarrolladas y muchos países en vías de desarrollo persiguen el objetivo de mejorar su gestión de los residuos. Los países con una gestión de residuos menos desarrollada intentan normalmente mejorar las prácticas básicas, especialmente en lo que refiere a los vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU) y la gestión de residuos peligrosos. Los países con una gestión de residuos más madura se plantean la prevención de la generación de residuos y el aumento del reciclado y la recuperación. (Comisión Europea, 2005)

La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico [OECD] en 2005, publicó en sus estadísticas que la cantidad aproximada de residuos sólidos generados por los países miembros de ésta organización ascendió a 4400 millones de toneladas (MT), dato que incluye la generación de todos los sectores productivos. Los residuos sólidos generados por cada sector se distribuyen de la siguiente manera: 600MT de residuos mineros, 100MT de residuos de la generación de energía, 900MT de residuos agrícolas, 1000MT de residuos industriales, 800MT de residuos de la construcción, 100MT de residuos del tratamiento de purificación de agua, 600MT de residuos municipales, 300MT de lodos de aguas residuales. (Figura 1.1).

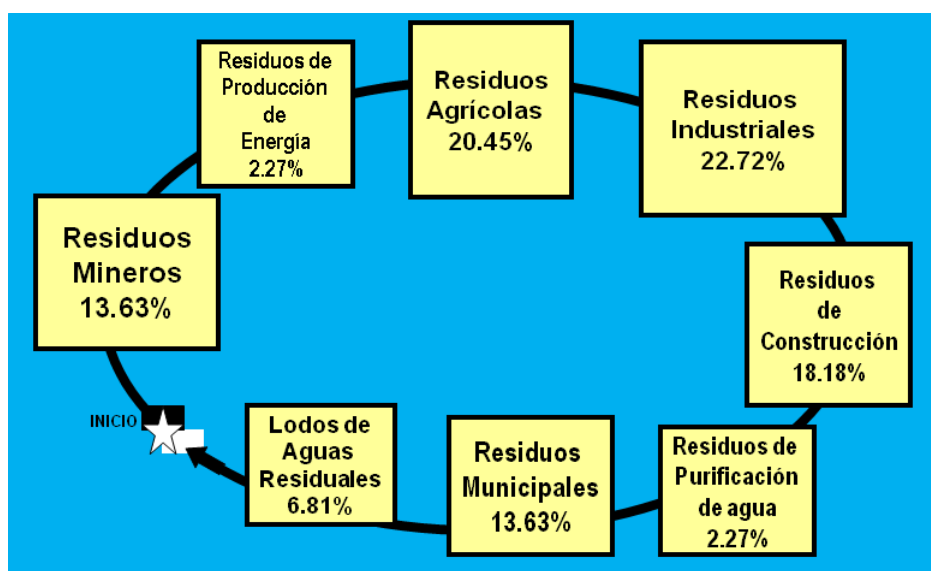


Figura 1.1. Residuos generados por sector en los países miembros de la OECD

Los RSU (que en los informes de la OECD son denominados como residuos sólidos municipales) son una parte importante de la generación total de residuos, pues equivalen al 13.6% del total de residuos generados, pero aún más relevante es que según la OECD (2009) el manejo y tratamiento de los RSU representan más de la tercera parte de las finanzas públicas destinadas al abatimiento y control de la contaminación. Por esta razón es requerido considerar el manejo de los RSU como un asunto de profunda preocupación que afecta a toda la sociedad, y buscar la mejor manera de llevar a cabo esta práctica de forma sustentable.

El diseño e implementación de mejores prácticas para la reducción, reutilización y reciclado de los RSU, requiere del análisis de las diferentes fracciones que integran los RSU como son, los residuos residenciales, los residuos institucionales y los residuos comerciales, así como los factores económicos, políticos, sociales, ambientes y tecnológicos que conllevan.

Esta investigación se enfoca en el análisis de los residuos comerciales, pero debido a la poca literatura disponible se hace una revisión del estado del arte de los sistemas de manejo de residuos urbanos.

En el pasado el manejo de los RSU sólo se limitaba al sistema de recolección, disposición en el relleno sanitario e incineración para reducir su volumen, sin tomar en cuenta las implicaciones ambientales de estas prácticas. Ahora, en la búsqueda de la sustentabilidad se han realizado numerosas investigaciones, que han llevado al diseño de distintas propuestas de planes de manejo integral, que se adecuan a la situación específica del lugar en donde se lleven a cabo.

Un estudio realizado por Ying Zhuang et al., (2008), analizan la puesta en marcha de un programa de separación de residuos domiciliarios en el origen, donde pone de manifiesto la importancia de adecuar los sistemas de manejo de residuos a las condiciones de vida de la localidad e involucrar a la comunidad desde la planeación del sistema para lograr su aceptación y asegurar su éxito.

Mattson, Berg, y Clarkson (2003), analizan siete distintos planes de manejo de residuos sólidos urbanos que se llevan a cabo en Suiza y se comparan con el sistema establecido en Inglaterra. En ambos países los planes de manejo son integrales, consisten en sistemas de recolección domiciliario por tipo de residuo, con la finalidad de desviar los residuos reciclables y lograr las metas de reciclaje establecidas por cada país.

En la Unión Europea así como en Sudáfrica se han establecido medidas para el manejo integral de los residuos como la política de “Responsabilidad Extendida del Productor (EPR)”, en la que el productor se hace responsable por sus productos una vez que han sido consumidos. Esta medida obliga al productor a desarrollar medidas para recolectar y reciclar sus residuos.

Nahman (2009) hace un análisis de la aplicación de la política de EPR en Sudáfrica e identifica los factores que llevaron al éxito o fracaso de éstas iniciativas, compara los casos en los que la reglamentación se aplicó de forma obligatoria y los casos en los que se hizo de forma voluntaria.

En España, Zamorano et al (2009), ofrecen una alternativa para el diseño de planes de recolección de RSU. Utilizando un sistema de información geográfica (GIS) para evaluar los puntos de recolección de RSU y las rutas de recolección.

Es necesario tener en cuenta que llevar a cabo estos programas de manejo integral de RSU implica que las autoridades encargadas de su ejecución cuenten con infraestructura y recursos económicos que respalden tales acciones. En caso contrario es posible que se incurra en costos por la mala asignación de los recursos.

Lo anterior obliga al desarrollo de diversos modelos matemáticos que permitan simular distintos escenarios que proporcionen apoyo en la toma de decisiones para obtener la mayor rentabilidad y eficiencia en el manejo y reciclaje de los RSU. Algunos de estos modelos son los propuestos por Dobos y Richter (2006), Magrinho y Semiao (2007), Garrik y Jhih-Shyang (2007), Pati, Vrat y Kumar, (2006), y Ojeda et al (2008). En México se han realizado numerosos estudios sobre el manejo de los RSU, entre ellos los relacionados con los residuos residenciales y su relación con el estrato socioeconómico de los generadores como en Ojeda et al (2008) y Gómez et al (2009); también donde se identifican los residuos con potencial de valorización a través del reciclaje como en Ojeda et al (2003) o el estudio de generación y caracterización de RSU en relación al potencial de obtención de gas metano para la generación de energía por Aguilar et al (2010). Sobre los análisis de un solo tipo de residuos, Buenrostro et al (2008) hacen un análisis de los patrones de consumo y la generación de los residuos peligrosos residenciales, en el cual explica que el estrato socioeconómico no influye en la generación de residuos peligrosos residenciales Muñoz et al (2009) analiza la dinámica de generación de residuos inorgánicos en las calles de la ciudad del Distrito Federal.

No hay que dejar de lado que aunado a las mejores prácticas en el manejo de los residuos sólidos el desarrollo de tecnologías de valorización como, la segregación automática de residuos, el reciclaje, los tratamientos biológicos, la generación de energía y otros son parte fundamental en el éxito de un plan integral de manejo de residuos.

Athanassiou y Zabaniotou (2008), analizan la eficiencia y costo de una planta de segregación totalmente automatizada que recibe residuos mezclados en comparación con plantas semiautomatizadas o totalmente manuales pero que exigen la separación de los residuos en la fuente.

En Emiratos Árabes, Tachwali, Al-Assaf y Al-Ali (2007), desarrollaron un sistema de clasificación de botellas de plástico automático, basado en su composición química y color.

En Nueva Zelanda, Mc Neil, Sunderland y Zaitseva (2007) proponen el reciclaje de tapetes de lana para utilizarse como fertilizante para el suelo. Y en Inglaterra se está utilizando también como fertilizante de suelo, lodos de aguas residuales previamente tratados.

Los programas de manejo de residuos sólidos enfocados a la minimización, recolección y reciclaje en el origen, pueden ofrecer nuevas e importantes opciones para minimizar la cantidad de residuos que requieren disposición final. El éxito de estos programas depende tanto de las decisiones adoptadas por las autoridades municipales como del respaldo material y humano disponible para asegurar el aprovechamiento potencial del material derivado de los residuos sólidos. (SEDESOL, 2006).

Entre los estudios disponibles sobre residuos comerciales tenemos el realizado por Buenrostro et al (1999) sobre los residuos generados por los mercados municipales de Morelia y los realizados a supermercados en Québec por Norrie, Lafortune y Beauchamp (1997), y en Mexicali por Fierro et al (2008). En los tres estudios se presentan los resultados de la caracterización, evaluación cuantitativa y manejo de los residuos generados por estos comercios. También se ha abordado el tema de los residuos de empaque generados por la industria de comida rápida, en Finlandia Aarnio y Hämäläinen (2008) analizan su flujo y

enfatan que este tipo de residuos ha sido hasta el momento de poco interés académico, pero que su estudio podría aumentar la tasa de recuperación de éste tipo de residuos.

Por lo general se consideran los residuos comerciales dentro de los RSU y la mayor parte de los estudios se enfocan en los residuos residenciales, sin embargo la generación y disposición de los residuos comerciales tienen una dinámica independiente del resto de los RSU que es necesario conocer a fondo para plantear estrategias que controlen su generación y adecuada disposición.

Las diferentes operaciones dentro de un sistema de gestión de residuos (generación, recolección, segregación, tratamientos, reciclaje, disposición final) están estrechamente interconectadas, por lo que cualquier decisión que se tome sobre algún proceso del sistema afecta a los otros de forma directa.

La optimización de un sistema de manejo de residuos requiere la predicción de las cargas ambientales y costos económicos (McDougall et al 2004). El análisis de ciclo de vida es una herramienta que permite modelar un sistema permitiéndonos comprender y comparar de qué forma se suministra un producto o servicio al recopilar y evaluar las entradas, salidas e impacto ambientales a través de su ciclo de vida.

Es por lo anterior que se ha utilizado como una herramienta de apoyo en la evaluación, comparación y selección de los sistemas de manejo de residuos más adecuados en relación con su impacto ambiental.

Ozeler et al., (2006) utilizaron el análisis de ciclo de vida para comparar cinco escenarios de manejo de residuos sólidos para el distrito de Ankara, Turquía; utilizando el modelo IWM-I; evaluó las categorías de impacto ambiental potencial de calentamiento global, acidificación, eutrofización y toxicidad humana, además de los residuos sólidos finales no peligrosos y peligrosos; concluyendo que el mejor escenario para Ankara es aquel que incluye los procesos de reducción en la fuente y disposición final en relleno sanitario, seguido del escenario que incluye digestión anaerobia de la fracción orgánica.

Bovea et al., (2010), aplicaron el ACV para evaluar el comportamiento ambiental de 24 escenarios de manejo de residuos sólidos urbanos para Castellón de la

Plana, España. Los cuales fueron generados al combinar distintas opciones de recolección basándose en distintos porcentajes de recuperación de reciclables, dos distintos tratamientos de residuos orgánicos (compostaje y digestión anaerobia) y dos opciones de relleno sanitario (con y sin recuperación de energía). Utilizaron datos locales para la generación del inventario de ciclo de vida, utilizando el software Sima pro y para el análisis de impacto de ciclo de vida siguió el modelo CML (Guineé et al., 2002). Evaluaron las categorías de impacto de acidificación, eutrofización, calentamiento global, reducción de la capa de ozono y oxidación fotoquímica. Como resultado obtuvieron que los escenarios que incluían digestión anaerobia y recuperación de energía eran los de mejor desempeño ambiental, además concluyó que de acuerdo al análisis de sensibilidad el radio de sustitución de los materiales durante el análisis no tiene ninguna influencia al momento de la elección del escenario con mejor eficiencia ambiental. También realizó un análisis de sensibilidad utilizando el modelo IWM-2 como alternativa para la generación del inventario de ciclo de vida y se concluyó que aunque hay algunas diferencias en los resultados de ambos modelos, al final la elección del mejor escenario no se ve afectada por el modelo utilizado ya que las tendencias permanecen.

Algunos autores han empleado el análisis de ciclo de vida para analizar sólo una parte del sistema de manejo de residuos como en Khoo (2009) que evaluó el impacto ambiental potencial de distintas tecnologías de tratamiento térmico de residuos, o Brambilla et al., (2009) que se enfocaron en el análisis del impacto ambiental del sistema de transporte y recolección de los residuos, otros han analizado el impacto ambiental de un solo tipo de residuos como Sharma (2000) que evalúa el impacto ambiental y socio-económico de los residuos de periódico en la India.

Khoo (2009) realizó para la ciudad de Singapur la comparación del impacto ambiental de ocho tecnologías de recuperación de la energía de los residuos (pirolisis-gasificación, pirolisis, craqueo térmico por gasificación de RSU granulados, combinación de pirolisis, gasificación y oxidación de RSU, gasificación con vapor de residuos de madera, gasificación por lecho fluidizado circulante de residuos orgánicos, gasificación de RDF, gasificación de llantas).

Utilizó el software Gabi y la metodología EDIP, evaluó los indicadores ambientales de calentamiento global, acidificación, eutrofización y formación de ozono fotoquímico. Concluyó que la tecnología con mejor desempeño ambiental es la pirólisis-gasificación de RSM seguida de la gasificación por vapor de agua de residuos de madera, y la de peor desempeño ambiental fue el craqueo térmico por gasificación de RSM granulados y la gasificación de llantas.

Rigamonti et al., (2009) evaluaron a través de un ACV el nivel óptimo de separación de residuos en la fuente para una eficiente recuperación de materiales y energía, en un sistema de manejo de residuos integrados por procesos de reciclaje de los materiales inorgánicos, compostaje de la fracción orgánica y procesos de recuperación de energía de los residuos residuales. Evaluaron para tres escenarios de recuperación en la fuente (30%, 50% y 60%) la cantidad de materiales y energía recuperados así como las cargas ambientales representadas con los indicadores de calentamiento global, toxicidad humana, acidificación y formación de ozono fotoquímico. Rigamonti et al., (2009) concluyeron que el sistema de manejo de residuos óptimo para este caso de estudio está dado por un nivel de segregación en la fuente de un 60% a 50% (bajo condiciones específicas) aunado a la recuperación de los materiales reciclables y la recuperación de energía de los residuos residuales a gran escala. Además puntualizaron que para tomar una decisión en cuanto al nivel óptimo de separación en la fuente, la eficiencia en la recuperación de energía de los residuos residuales juega un papel principal en la definición del balance entre recuperación de materiales y energía.

Zhao et al., (2009) evaluaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que son generados por el actual sistema de manejo de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Tianjin, China, también evaluaron el potencial de mitigación y compensación de GEI bajo seis distintas estrategias de manejo de residuos. Emplearon la metodología CML para análisis de impacto de ciclo de vida. La estrategia que demostró mayor potencial de mitigación de GEI fue un sistema integral de manejo que incluye los procesos de reciclaje, digestión anaerobia, generación de energía de los residuos y relleno sanitario con captación de gases, reduciendo hasta en un 45% las emisiones en comparación

con el escenario actual, esto concuerda con el análisis de contribución que indica que los procesos que aportan una mayor mitigación de GEI son los de tratamiento de residuos. Además el análisis de sensibilidad indicó que el modelo de análisis empleado influye en los resultados obtenidos, sin embargo las tendencias de comparación de los distintos escenarios siguen siendo las mismas aún con distintos modelos lo que lleva pensar que la decisión sobre la mejor estrategia sería la misma a pesar del modelo seleccionado. También concluyeron que existe una relación casi lineal inversa entre el porcentaje de reciclaje y las emisiones de GEI que genera el sistema.

Hong et al., (2006) evaluaron la propuesta de integrar al sistema actual de manejo de residuos en Pudong, China el proceso de pre-tratamiento biológico mecánico de los residuos (TBM). Empleando el análisis de ciclo de vida para evaluar el impacto potencial ambiental total de cinco distintos escenarios de manejo. El estudio mostró que realizar el TBM de los residuos previo a la incineración, disposición en el relleno sanitario o compostaje de los residuos reduce el impacto potencial ambiental de calentamiento global, acidificación y eutrofización del sistema de manejo en relación con la opción de no llevarlo a cabo.

Cleary (2010), propone incluir en la metodología de ACV la prevención de la generación de residuos y evaluar los escenarios que incorporen actividades de prevención como procesos análogos a los tratamientos de residuos. Para lo cual describe como necesario la definición de una unidad funcional primaria (que contabilizaría los residuos manejados) y una unidad funcional secundaria que representaría el servicio de producto proveído por el sistema responsable de la prevención de residuos.

Otros autores que han realizado análisis similares evaluando distintas estrategias de manejo de RSU por medio del ACV son Becalli et al., (2001) en Palermo, Italia, Muñoz et al., (2004) en Gipuzcoa, España, Pires et al., (2011) en Sétubal, Portugal y Koci et al., (2011) en la República Checa.

De alguna forma todos éstos autores concuerdan en que los sistemas integrales de manejo de residuos que incluyen segregación en la fuente, reciclaje y

recuperación de energía son los de mejor desempeño ambiental; también mencionan la necesidad de utilizar la herramienta de ACV en conjunto con otras herramientas de toma de decisiones para incluir aspectos económicos y sociales al proceso de selección de la mejor estrategia de manejo de residuos.

1.2. Justificación

En el pasado en México el manejo de los RSU se había considerado como una responsabilidad únicamente gubernamental, quedando rezagada de los avances técnicos y administrativos que se fueron desarrollando en el mundo. Este rezago repercutió en la eficiencia del manejo integral de los residuos ya que todos los esfuerzos realizados fueron encaminados principalmente a la recolección dejando de lado los sistemas de reciclaje y disposición final que muestran un gran atraso y por ende representan un riesgo al ambiente (Instituto Nacional de Ecología ,2009). La infraestructura y los sistemas de manejo son sumamente precarios, dada la desproporción que guarda la cantidad creciente de los residuos sólidos municipales generados con las capacidades existentes de manejo, vigilancia y control, así mismo con frecuencia se observa una disposición clandestina en tiraderos, barrancas, derechos de vías en carreteras o cuerpos de agua (INE,2009). La presencia de residuos sólidos urbanos en los cuerpos de agua provoca diversos impactos; en aguas superficiales alteran la estructura física del hábitat y afectan negativamente la calidad del agua Fatta et al., 2000; Fetter, 2001 (citado en SEMARNAT, 2005). En tiraderos a cielo abierto, la contaminación atmosférica se manifiesta por la presencia de malos olores, la generación de humos, gases y partículas en suspensión debido a la quema provocada o espontánea de la basura y por el arrastre de los vientos. La contaminación atmosférica derivada de la quema en estos tiraderos y del uso de incineradores sin sistemas de control de la contaminación, representa un serio riesgo a la salud por la presencia de plásticos, compuestos organoclorados y otros productos químicos de significativa peligrosidad BID y OPS, 1997 (citado en SEMARNAT,2005).

La ley general para la prevención y gestión de los residuos de 2007, dispone como una obligación compartida la prevención de la generación, la valorización y

la gestión integral de los residuos sólidos, bajo los criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social. Para ello se requiere un diagnóstico de la situación actual de la generación, composición y flujo de los residuos de las distintas fracciones que integran a los RSU, además de un análisis de las nuevas tecnologías disponibles para el manejo y reciclaje de los residuos y la evaluación de distintos escenarios de manejo integral de residuos que tomen en cuenta los factores ambientales, económicos y sociales de la localidad. Pero la carencia de datos confiables y sistemáticos sobre la generación de residuos sólidos de las diferentes fuentes generadoras que intervienen a nivel municipal es uno de los principales obstáculos para lograr un manejo y disposición adecuados de los residuos (Buenrostro, et al. 1999).

Los comercios son una fuente generadora de residuos, que aportan una parte importante del total de residuos urbanos, considerando que en el municipio de Mexicali existen más de 20330 unidades económicas comerciales y de servicios (DENU, 2011), que absorbe al 52% de la población ocupada (Gobierno del Estado de Baja California, 2008).

Los residuos comerciales son una fracción de los RSU, sin embargo tienen una dinámica distinta del resto de los residuos municipales, y es necesario analizarlos en forma específica para conocer y aprovechar el potencial de valorización de estos residuos, que actualmente son dispuestos directamente en el relleno sanitario. Por ahora el volumen y composición de los residuos que genera la actividad comercial en Mexicali es incierto, así como el impacto ambiental que provocan y la factibilidad para ser desviados hacia procesos de valorización adecuados, que permitieran el aprovechamiento como recursos potenciales y disminuir la cantidad de los residuos que se vierten al relleno sanitario de la ciudad con toda la problemática que esto conlleva.

Los estudios que se han desarrollado sobre los residuos comerciales se han limitado a la caracterización y contabilización de los residuos generados por alguna fuente generadora en específico, como los realizados a los residuos provenientes de los mercados municipales en Morelia, de los supermercados en Quebec y Mexicali o los materiales de empaque generados por los restaurantes

de comida rápida en Finlandia. Pero no se han realizado estudios sobre los residuos comerciales generados por todo el sector comercial en una localidad, y los factores ambientales, tecnológicos, económicos y sociales que influyen para el desarrollo de sistemas de manejo integral de estos residuos.

Realizar un estudio que nos permita tener un panorama general de los residuos comerciales y a su vez identificar las mejores prácticas y tecnologías para una manejo integral adecuado a las condiciones de la ciudad de Mexicali, es fundamental para la formulación de propuestas de valorización de los residuos. Los resultados de este estudio pueden contribuir junto con los estudios realizados a los residuos residenciales e institucionales al diseño de un sistema de manejo integral de residuos sólidos urbanos en el que participen activamente el gobierno, la iniciativa privada y la comunidad.

1.3. Planteamiento del problema

Según las últimas cifras disponibles del sistema nacional de indicadores ambientales en México el total de residuos sólidos urbanos generados en el país durante el 2006 fue de 37.60 millones de toneladas, de las cuales 55% fue dispuesto en rellenos sanitarios, 10% en rellenos de tierra controlados y 32% al aire libre. El total de residuos sólidos reciclables recuperados fue de 1 176 000 toneladas que corresponde al 3.1%, pero esta cifra solo corresponde a los materiales recuperados en los sitios de disposición final. El total que se recicla en el país puede ser una cifra mayor, ya que incluye lo que se separa en diversas fuentes de generación y es llevada por los usuarios a centros de acopio, más lo que se recupera en contenedores y vehículos de recolección. (SEMARNAT, 2009).

En Baja California el total de residuos sólidos urbanos generados en el 2006 fue de 1 219 000 toneladas contando para su disposición con dos rellenos sanitarios y un relleno de tierra controlado para todo el estado (SEMARNAT, 2009). Y algo importante a considerar es que la cifra que indica la SEMARNAT para el mismo año en un solo rubro indicado como “disposición de residuos sólidos urbanos en sitios no controlados y reciclaje” es de 51 mil toneladas, esto es menos del 4.18% del total de residuos sólidos municipales generados en la entidad.

Mexicali, capital del estado de Baja California, es una ciudad fronteriza industrial en constante y acelerado crecimiento con aproximadamente un millón de habitantes, donde no existe un plan de manejo de residuos sólidos integral, debido a diversos factores como, falta de planeación, de infraestructura, de políticas ambientales adecuadas que incentiven la participación del sector privado, la cultura ambiental de la población, entre otros. En este municipio se generan aproximadamente 1,300 toneladas diarias de residuos sólidos, con un índice de generación por habitante de aproximadamente 1.070kg (COCEF, 2007). Actualmente el sitio que se utiliza como basurero municipal no cumple con los criterios ecológicos establecidos para un relleno sanitario, pues sólo se efectúa la cobertura con tierra de los residuos depositados de manera eventual. También existen tres sitios no oficiales de disposición de residuos sólidos no peligrosos a cielo abierto, los cuales por su magnitud se consideran problemáticos; en diversos puntos de la ciudad se han identificado otros 55 de menor magnitud. Aunado a lo anterior, en el sitio donde estuvo asentado el antiguo basurero municipal todavía no se han implementado las medidas para su restauración. En la zona del Valle, la disposición de este tipo de residuos se realiza a cielo abierto (Secretaría de Protección Ambiental del Gobierno del estado de Baja California, 2008)

Hasta ahora el manejo de los RSU en la ciudad ha sido deficiente, pues son muy pocos los residuos que se recuperan en el origen. Por lo general estos residuos son recolectados por las “recicladoras” quienes compran los residuos reciclables de individuos que separan los reciclables con valor comercial en sus casas así como de aquellos individuos que realizan recolección, muchas veces estos reciclables se encuentran en muy malas condiciones como para ser utilizados en los procesos de reciclaje por lo cual es imposible venderlos. Es por esto que muchos recolectores deciden comprar los materiales reciclables directamente del origen, esto es, residuos post-industriales (Ojeda, Armijo de Vega y Ramírez, 2002). Esto indica que una buena parte de los residuos sólidos reciclables terminan en el relleno sanitario contribuyendo a acortar el tiempo de vida del mismo y contaminar el medio ambiente.

El manejo de residuos sólidos en Mexicali se ha enfocado a la recolección y segregación para la compra-venta de algunos reciclables comercializables al momento, y algunos intentos aislados del sector industrial en reciclaje de plásticos, cartón, papel, metales y vidrio.

En la ciudad de Mexicali no existe un plan para el manejo de residuos sólidos porque hasta ahora todas las posibles soluciones conocidas no han sido aplicadas como: la reducción en el origen, el reciclaje y el reuso. (Ojeda, Armijo y Ramírez, 2002). Para lograr llevar a cabo que el manejo de los residuos comerciales de la ciudad de Mexicali sea integral y sustentable se requiere tener conocimiento total de los residuos que lo componen, de la infraestructura con la que cuenta el municipio para la recuperación, reciclaje y disposición final de los residuos, de las tecnologías de reciclaje disponibles, de la dinámica del mercado de reciclables y de la situación socio-económica del municipio. Hasta el momento los estudios sobre residuos sólidos se han enfocado en los residuos sólidos municipales residenciales y los residuos industriales, pero muy poco se sabe sobre los residuos comerciales.

En Mexicali, los residuos que generan una parte del sector comercial (negocios de tamaño chico, mediano y grande) son recolectados por los seis principales prestadores de servicio de recolección de residuos (y varios pequeños recolectores independientes autorizados) quienes envían directamente estos residuos al sitio de disposición final de la ciudad o al relleno industrial, la otra parte de los residuos comerciales generados en micro-negocios son recolectados por el municipio. Se desconoce la cantidad de residuos comerciales que se generan, su composición y sus flujos, por lo tanto se desconoce el potencial para su recuperación y reciclaje. Por ello es importante realizar un estudio de la situación de los residuos comerciales de la ciudad de Mexicali, así como realizar una evaluación de distintos escenarios de recolección y reciclaje de éstos, con el fin de encontrar alternativas para el desarrollo futuro de un plan integral de residuos sólidos urbanos adecuado a las necesidades y posibilidades de la ciudad de Mexicali.

1.4. Preguntas de Investigación

Las preguntas centrales que guían esta investigación son:

¿Cómo influye el volumen y composición de los residuos comerciales generados en micro-negocios en la ciudad de Mexicali para su recuperación?

¿Cuáles son las implicaciones ambientales, económicas, políticas, sociales, legales y tecnológicas de la recuperación y reciclaje de los residuos comerciales en la ciudad de Mexicali?

1.5. Objetivos

Objetivo General

Evaluar escenarios de recuperación y reciclaje de residuos sólidos comerciales generados en micro-negocios en Mexicali

Objetivos específicos:

1. Analizar el sistema de manejo actual de residuos sólidos comerciales para identificar los flujos de residuos, su valoración y disposición actual.
2. Identificar las tecnologías para la valorización de residuos.
3. Evaluar escenarios de recuperación y reciclaje de residuos sólidos comerciales.

Capítulo 2. Marco referencial

En este capítulo se presenta el análisis de los temas de gestión de los residuos sólidos urbanos en países desarrollados, en vías de desarrollo y en México, se describe la situación actual del manejo de residuos comerciales en Mexicali, se analiza el marco normativo aplicable a los residuos sólidos comerciales en México y se establece la definición de residuos comerciales objeto de esta investigación.

Se analizan distintas metodologías de clasificación de residuos incluyendo la que establece la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. Se describen los distintos procesos que integran un sistema de manejo de residuos, dando énfasis en la descripción de las distintas tecnologías de valorización de residuos actualmente disponibles como son los tratamientos mecánico-biológico y los tratamientos térmicos para residuos de recolección mixta; además de los procesos de reciclaje de materiales como plástico, vidrio, metales, papel y cartón.

Este capítulo también aborda la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, analizando sus etapas y haciendo hincapié en su utilización para la evaluación ambiental de escenarios de gestión de residuos.

2.1. Gestión de los residuos sólidos

La gestión de residuos sólidos es el conjunto de acciones interrelacionadas en caminadas a dar a los residuos generados en una determinada zona, el tratamiento integral más adecuado desde el punto de vista ambiental, de salud, económico y social. Las estrategias de gestión de residuos sólidos deben enfocarse en evitar la generación de residuos, utilizar tecnología más limpia, promover la recuperación, reuso y reciclaje, y deben dar el tratamiento y disposición final adecuada a los residuos generados. Elegir la alternativa más eficaz para el manejo de residuos sólidos es vital pues de esto depende su aceptación, permanencia y resultados. Este tipo de estrategias han sido

utilizadas por muchos países desarrollados, en particular por miembros de la Unión Europea con éxito. Por otra parte los países en vías de desarrollo se enfrentan a grandes retos, debido a la falta de infraestructura, programas gubernamentales, leyes ambientales adecuadas, las condiciones económicas, barreras culturales, entre otros factores.

En la siguiente sección se presentan diversos estudios que muestran como países desarrollados y países en vías de desarrollo llevan a cabo alternativas para la gestión de sus residuos sólidos.

2.2. Gestión de residuos sólidos en países desarrollados

En Alemania las empresas privadas asumen la responsabilidad de recolectar y reciclar los residuos de empaque, como 1ra parte de un sistema dual. La 2da parte consiste en la responsabilidad del gobierno local en disponer de los residuos no reciclables en el relleno sanitario (Ueta y Koizumi., 2001).

Mattson et al., (2003), publican un estudio donde analizan 7 distintos planes de manejo de residuos sólidos municipales que se llevan a cabo en Suiza y se compara con el sistema establecido en Inglaterra, en ambos países los planes de manejo son integrales, consisten en sistemas de recolección domiciliario por tipo de residuo, con la finalidad de desviar los residuos reciclables y lograr las metas de reciclaje establecidas por cada país. Para el caso de Suiza, éste introdujo en 1994 “The Swedish Ordinance on PR” que a grandes rasgos consiste en pasar la responsabilidad física y económica del reciclaje de los materiales de empaque, papel y periódico al productor y hace responsable al consumidor de separar los reciclables del resto del flujo de los demás residuos. Por su parte Inglaterra implementa “The Waste Strategy 2000” que establece una serie de objetivos y metas para la reducción, reutilización y reciclaje de sus residuos; en un esfuerzo por alcanzar la meta de reciclaje establecida, se implementaron Centros de Reciclaje de Residuos Residenciales, donde los usuarios depositan los residuos que se exceden de las cuotas permitidas para la recolección domiciliaria. El 16 por ciento de los residuos sólidos provenientes de casa-habitación, son manejados por estos centros los cuales cuentan con acceso directo al público donde los usuarios pueden depositar sus residuos en

los diversos contenedores clasificados por el tipo de residuo a depositar como papel, latas, vidrio, electrodomésticos, libros, textiles, metales, aceite de motor, entre otros, y residuos peligrosos como químicos, asbestos y baterías, además de tener contenedores para residuos orgánicos, residuos de jardín y basura no segregada. (Woodard, *et al.*, 2004).

En Japón, el gobierno municipal está obligado a recolectar residuos plásticos y papel de empaque separadamente de otros residuos sólidos residenciales. Cuentan con una ley que obliga a los productores e intermediarios a reciclar los residuos de empaque que producen; esta actividad es realizada por empresas de reciclaje privadas a quienes los productores e intermediarios pagan por ello. (Ueta y Koizumi., 2001).

Durante el 2006 en la ciudad de Hangzhou, en el este de China se puso en marcha un programa de separación de residuos sólidos en el origen, donde trabajando juntos residentes, comités de residentes, inmobiliarios, recicladores y el departamento de sanidad y medio ambiente pusieron en marcha durante seis meses un programa adecuado a sus condiciones de vida, que fue bien aceptado por la comunidad y donde los resultados del estudio indican además un beneficio económico en comparación con el método de recolección de basura convencional (Ying Zhuang, *et al.*, 2007).

2.3. Gestión de residuos sólidos en países en vías de desarrollo

En Sudáfrica así como en la Unión Europea se han establecido medidas para el manejo integral de los residuos como la política de “Responsabilidad Extendida del Productor (EPR)”, la cual va dirigida a responsabilizar al productor por los residuos generados por sus productos una vez que han sido consumidos. Esta medida obliga al productor a desarrollar medidas para recolectar y reciclar sus residuos.

Nahman (2009) hace un análisis de la puesta en marcha de la política de EPR en Sudáfrica, donde por una parte se aplicaron reglamentaciones gubernamentales obligatorias con el objetivo de estimular la industria del reciclaje de bolsas de plástico, promoviendo el retorno y recolección de bolsas usadas, creando empleos a través de una empresa sin fines de lucro en una

unión entre el gobierno, los trabajadores y el sector privado, fundada con el dinero recabado del impuesto aplicado a la bolsa de plástico; pero no tuvo éxito, al ser obligatoria no estimuló la participación de la sociedad y perjudicó a la industria de la bolsa de plástico.

Por otra parte, se aplicaron iniciativas voluntarias altamente exitosas en reciclaje de latas de aluminio, vidrio y PET.

Nigeria (Kofoworola, 2007) no cuenta con políticas de protección ambiental desarrolladas e implementadas eficientemente, por lo que el manejo de los residuos sólidos se ha convertido en uno de los mayores problemas. En Nigeria el gobierno es el responsable del manejo de los residuos que básicamente se reduce a la recolección, transporte y disposición final en basureros al aire libre que son incendiados de forma regular para reducir el volumen de los residuos. La recuperación de reciclables se lleva a cabo de manera informal por pepenadores en el sitio de disposición final y/o en la fuente.

En América Latina (Calvo R. F., Szantó N. M. y Muñoz J. J., 1998. Obtenido de Barradas Rebolledo, A. 2009) entre los análisis sectoriales realizados por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) se revela que el sector correspondiente a los residuos sólidos se caracteriza por la falta de políticas y de planes nacionales. No existe ninguna instancia gubernamental de rango nacional responsable de la gestión de los residuos sólidos, sino que la responsabilidad normalmente se encuentra dispersa en múltiples instituciones afines al sector. La situación de pobreza es alta en toda la región, lo cual representa un enorme problema en la gestión de residuos urbanos. La tendencia presente de muchos de estos países consiste en la privatización de los servicios de aseo público. El rango de cobertura y calidad del servicio es diferente según en la fase de gestión del residuo en que se encuentre.

Son pocas las ciudades con un almacenaje adecuado en los domicilios, comercios y hospitales. Se logra la estandarización de contenedores sólo en ciudades como La Habana, Río de Janeiro y Buenos Aires. En las demás ciudades sólo los estratos de población medio y de mayores ingresos tienen

recipientes adecuados, siendo colocada la basura en la vía pública y en lotes baldíos o bolsas para la recolección por los camiones recogedores.

La cobertura de recolección en la región en América Latina y el Caribe (ALC) alcanza el 93,4% de la población, habiendo logrado un incremento de más de 10 puntos porcentuales respecto al 2002, cuando el servicio cubría al 81% de los habitantes de ALC. Aun cuando la mayoría de los países presentan coberturas superiores al 80%, especialmente en localidades grandes y mega existen áreas o barrios marginales donde el servicio no se brinda, o es de muy baja calidad. (Martínez Arce et al 2010).

La recuperación de materiales para el reciclaje se lleva a cabo de dos maneras:

1. Separación y acopio en las industrias, comercios y grandes generadores y productores de materiales reciclables homogéneos (papel, cartón, vidrio, botellas, plásticos y metales ferrosos y no ferrosos), para venderlos a recogedores privados especializados. Hay programas de este tipo de recuperación, sobre todo para vidrio, en México, Colombia y Venezuela.
2. Recuperación informal practicada en la basura y generalmente consta de tres posibles tipos de intervención: por pepenadores callejeros en las bolsas o contenedores; por los operarios en el camión recogedor; y en el relleno por los pepenadores, forma no recomendable debido al riesgo sanitario que lleva consigo.

El método más apropiado de recuperación de materiales es de separación en la fuente pero solo se aplica en algunas partes de Argentina, Colombia, Brasil y México, debido al alto requerimiento de infraestructura y equipamiento que en ocasiones son de alto costo.

La disposición final de los residuos sólidos se realiza en su mayoría de forma incontrolada o semicontrolada siendo solamente el 30 % de la basura la que se deposita en rellenos sanitarios, aunque algunos de éstos en ocasiones no cumplen con las especificaciones técnicas para ser denominados como tales. Una de las tendencias actuales es el intento de tratar los lixiviados que se producen en los rellenos con el fin de evitar su vertido a las corrientes superficiales o la filtración al subsuelo. Actualmente se puede decir que el

tratamiento de los lixiviados es prácticamente nulo en América Latina (Martinez et al 2010).

2.4. Los residuos sólidos urbanos en México

En general en México el manejo de los residuos sólidos urbanos básicamente se limita a las etapas de Generación, Barrido, Almacenaje temporal, Recolección, Transferencia y Disposición final. (Figura 2.1). De manera limitada se realiza tratamiento de los residuos en algunas ciudades del país.

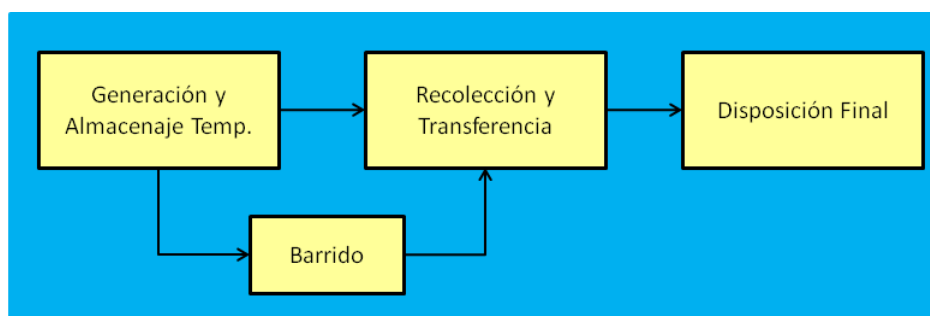


Figura 2.1. Manejo de los residuos sólidos municipales en México

2.4.1 Generación

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), son los generados en las casas, como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas; son también los que provienen de establecimientos o la vía pública, o los que resultan de la limpieza de las vías o lugares públicos y que tienen características como los domiciliarios. Su manejo y control es competencia de las autoridades municipales y delegacionales. (SEMARNAT, 2012). De acuerdo a los datos de SEMARNAT (2005) en 2004 la generación de RSU en todo el país fue de 94,800 toneladas diarias, equivalentes a 34.6 millones de toneladas anuales.

2.4.2. Almacenamiento temporal

El almacenamiento temporal comercial comprende el que se lleva a cabo en los mercados, tiendas de abarrotes, restaurantes y hoteles. Es muy común el uso de tambo de 200 litros adaptados para el almacenamiento, aunque también se utilizan contenedores con capacidades que varían de 1 a 6 m³ tipo roll on/rolloff. (SEDESOL, 1996)

2.3.4. Recolección

Los equipos más utilizados son los camiones compactadores con capacidad de 10m³ a 15m³, los cuales recolectan de 4 ton/viaje a 8 ton/viaje. Se estima que se recolecta el 87% de las 94,800 ton/día generadas. Se calcula que en las grandes zonas metropolitanas la cobertura alcanza el 95%; en ciudades medias varía entre el 75% y el 85%; así como en pequeñas áreas urbanas alcanza entre el 60% y el 80%. Los costos de recolección en las ciudades medias varían de 30 a 640 pesos/ton, en función de la densidad poblacional, la cantidad recolectada y eficiencia en el llenado del vehículo, el estado físico de éstos y el diseño de las rutas. En los años recientes, una variante al método convencional consiste en los sistemas de recolección selectiva; se debe a los cambios en los ordenamientos legales y a la voluntad política o la presión de la sociedad, por alcanzar esquemas sustentables. Puede variar tanto en función de los días de la semana, como por entregarlos separados en orgánicos e inorgánicos. (SEDESOL, 2005)

2.3.5. Transferencia

La unidad de transferencia es una instalación intermedia entre las diversas fuentes generadoras de residuos sólidos y las plantas de selección o el sitio de disposición final; su objetivo principal es incrementar la eficiencia del servicio de recolección, en la medida que los vehículos recolectores reducen los tiempos para la descarga de sus residuos, ya que en vez de trasladarse hasta las plantas de selección o los sitios de disposición final, recurren a la estación de transferencia ubicada en su demarcación o bien, a la más cercana a su ruta de trabajo.

2.3.6. Tratamiento

El tratamiento de los RSU se ha desalentado en México, pues los procesos por incineración, aprovechamiento de subproductos y producción de composta no han tenido el resultado esperado. Para la composta en la mayoría de los casos, esto se debe a un insuficiente desarrollo del mercado, del producto terminado y/o su mala calidad debido a una tecnología inadecuada, altos costos de

operación y dificultades en la comercialización por parte de los municipios. En cuanto al aprovechamiento de subproductos se estima que en el país los materiales recuperados para su venta representan del 8% al 12% del total generado. No obstante, gran parte de éstos se obtienen mediante el empleo informal, es decir la prepepena (en la recolección) y pepena (en el sitio de disposición final). En términos generales los subproductos tradicionales que tienen más mercado son el cartón, papel, aluminio, metales, vidrio y PET. (INE, 2007)

2.3.7. Disposición final

A la fecha, se estima que existen en el país 196 rellenos sanitarios que cumplen con la NOM-083-SEMARNAT-2003 (INEGI, 2012) de los cuales solo el relleno sanitario de Monterrey tiene aprovechamiento de biogás para la producción de electricidad. (PNPGIRS 2009-2012)

Por otra parte, existe un cierto número de sitios que, si bien no cuentan con una ubicación adecuada desde el punto de vista de protección al ambiente, tampoco cuentan con sistema de impermeabilización: su operación se lleva a cabo mediante la técnica de relleno sanitario. A este tipo de sitios se les ha denominado "relleno controlado" ya que, si bien no reúnen los requisitos de un relleno sanitario, tampoco pueden ser considerados como tiraderos a cielo abierto. (OPS y OMS, 1996).

2.5. Situación actual de los residuos comerciales en Mexicali.

Los residuos comerciales se gestionan dentro de la corriente de los RSU de acuerdo a lo que marca la ley, así tenemos que en Mexicali el sistema de manejo de RSU consiste básicamente en el barrido de calles, recolección, transferencia y disposición final. En menor grado se realiza la recuperación de reciclados tanto por el sector formal como por el sector informal. La recolección de los residuos se lleva a cabo básicamente por tres entidades, 1) el servicio de limpia del ayuntamiento de Mexicali quien se encarga de la recolección de los residuos generados en casas habitación y micro-negocios comerciales y de servicio como pequeñas tiendas de abarrotes, peluquerías, negocios en casa,

etc., 2) empresas privadas de recolección de residuos comerciales, quienes se encargan de los residuos generados en todo tipo de establecimiento comercial y de servicio público y/o privado de tamaño pequeño, mediano y grande y 3) empresas privadas de recolección de residuos industriales.

Las principales empresas que ofrecen el servicio de recolección de residuos comerciales son Prorec, Sun Waste, Eco-Management y Red-Recolector. Estas compañías ofrecen sus servicios a cerca de 2000 negocios comerciales de tamaño chico mediano y grande; el resto de los comercios (micro-negocios) son atendidos por el servicio de limpia del ayuntamiento.

2.6. Legislación aplicable a los residuos sólidos en México

De acuerdo a la legislación mexicana de prevención y gestión integral de residuos sólidos un residuo es todo material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) clasifica los residuos por sus características en:

Sólidos urbanos.- Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.

De manejo especial.- Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

Peligrosos.- Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases,

recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio.

La LGPGIR define cuatro tipos de generadores de residuos:

Domicilios.- Casas habitación, los cuales también pueden ser considerados como micro generadores.

Micro generadores.- Establecimiento industrial, comercial o de servicios que genere una cantidad de hasta cuatrocientos kilogramos de residuos peligrosos al año o su equivalente en otra unidad de medida.

Pequeños generadores.- Persona física o moral que genere una cantidad igual o mayor a cuatrocientos kilogramos y menor a diez toneladas en peso bruto total de residuos al año.

Grandes generadores.- Persona física o moral que genere una cantidad igual o superior a 10 toneladas en peso bruto total de residuos al año.

Tomando en cuenta lo anterior y el artículo 19 de la LGPGIR, podemos ubicar a los residuos comerciales por sus características como residuos sólidos urbanos y por su volumen de generación pueden ser de manejo especial para el caso de los residuos generados por grandes generadores en tiendas departamentales o centros comerciales.

De acuerdo al Reglamento de la LGPGIR, los planes de manejo pueden establecerse en una o más de las siguientes modalidades:

Privados.- Los instrumentados por los particulares que conforme a la Ley se encuentran obligados a la elaboración, formulación e implementación de un plan de manejo de residuos.

Mixtos.- Los que instrumenten los particulares con la participación de las autoridades en el ámbito de sus competencias.

Individuales.- Aquéllos en los cuales sólo un sujeto obligado establece en un único plan, el manejo integral que dará a uno, varios o todos los residuos que genere.

Colectivos.- Aquéllos que determinan el manejo integral que se dará a uno o más residuos específicos y el cual puede elaborarse o aplicarse por varios sujetos obligados.

Nacionales.- Cuando se apliquen en todo el territorio nacional;

Regionales.- Cuando se apliquen en el territorio de dos o más estados o el Distrito Federal, o de dos o más municipios de un mismo estado o de distintos estados.

Locales.- Cuando su aplicación sea en un solo estado, municipio o el Distrito Federal

2.6.1. Marco normativo aplicable al manejo de residuos comerciales

La normatividad aplicable al manejo de los comerciales, se encuentran contenidos en la constitución mexicana, leyes, planes, reglamentos y normas oficiales, dado que los residuos comerciales se encuentran inmersos en la definición de RSU el marco normativo aplicable de los residuos comerciales es el mismo que el de los RSU. En la Tabla 2.1 se resumen los lineamientos aplicables.

Tabla 2.1. Instrumentos legales aplicables al manejo de residuos sólidos comerciales

Instrumento Legal	Descripción
Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos de 1917.	Establece la función de los municipios de ejecutar las actividades de limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de los RSU
Ley general de equilibrio ecológico y protección al medio ambiente.	Establece como responsabilidad de los estados la regulación y responsabilidad de los municipios la aplicación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los RSU.
Ley General para la prevención y gestión integral de los residuos	Establece que los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de los RSU, la formulación de los programas municipales de prevención y gestión integral, emitir la reglamentación y demás disposiciones jurídico administrativas, prestar por sí o a través de gestores el servicio público de manejo integral de RSU y mantener actualizado el registro de los grandes generadores de RSU. Especifica que los RSU pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos para facilitar su separación primaria y secundaria, y una clasificación de los residuos de manejo especial es la de los residuos de tiendas departamentales o centros comerciales generados en grandes volúmenes. Sobre los planes de manejo establece que su objetivo debe ser la prevención de la generación, valorización y manejo integral a través de medidas de

	reducción de costos, efectividad ambiental, económica y social. También establece que entre los criterios que determinan los residuos sujetos a planes de manejo están los materiales con componentes de alto valor económico, RSU de alto volumen de generación producidos por un número reducido de generadores.
NOM-083-SEMARNAT-2003	Indica las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
Programa nacional para la prevención y gestión de los residuos 2009-2012	Establece los principios básicos que fundamentan la gestión integral de los residuos en el país, promueve el uso cíclico y disposición correcta de los residuos sólidos urbanos, a través de la prevención y minimización de la generación, reuso, reciclaje, tratamiento y aprovechamiento, y disposición restringida y apropiada. Además fija los objetivos de la gestión de residuos, las estrategias a seguir y las líneas de acción para los RSU.
Ley de prevención y gestión integral de residuos para el estado de Baja California	Define las competencias del estado y del municipio en el ámbito de la prevención y gestión de RSU y manejo especial. Entre las competencias está la minimización, separación, recolección, establecimiento de plantas de valorización de residuos (compostaje, reciclaje, reutilización y recuperación de valor calorífico), cierre de tiraderos controlados y no controlados y remediación; Fomento del desarrollo de mercados para el reciclaje de RSU. Dispone como obligación del generados de RSU la responsabilidad de residuos durante todo su ciclo de vida.
Reglamento para la Prevención del Aseo Público	El servicio público de limpia del municipio, debe avocarse a la recolección, transporte y disposición final de los RSU provenientes de casa habitación, establecimientos industriales, comerciales o de servicios públicos o privados. Indica las obligaciones de quienes realizan actividades comerciales, industriales o de servicios públicos o privados y a las actividades de aseo de la vía pública

2.7. Métodos de clasificación de residuos sólidos

Los residuos sólidos pueden clasificarse de diversas formas dependiendo del objetivo de la clasificación, es así pues que podemos clasificarlos por su composición, por su origen, por el potencial para su valorización, por su tipo de manejo, entre otros.

2.7.1 Clasificación de los residuos por su composición.

Orgánicos putrescibles.- Son los residuos que provienen de la producción o utilización de materiales naturales sin transformación estructural significativa. Por ello y por su grado de humedad mantienen un índice alto de biodegradabilidad: residuos forestales y de jardín, residuos animales, residuos de comida, heces animales, residuos agropecuarios y agroindustriales, entre otros.

Materiales no putrescibles.- Residuos cuyas características biológicas han sido modificadas al grado que en determinadas condiciones pierden su biodegradabilidad. Comúnmente son combustibles.

Naturales.- La condición determinante de la pérdida de biodegradabilidad es la falta de humedad: papel, cartón, textiles de fibras naturales, madera, entre otros.

Sintéticos.- Residuos no biodegradables altamente combustibles, provenientes de procesos de síntesis petroquímica: plásticos, fibras sintéticas, entre otros.

2.7.2. Clasificación de los residuos por su origen

Se refiere al lugar donde fueron generados los residuos, pueden ser industriales, comerciales, institucionales, domiciliarios, especiales, hospitalarios, de la construcción, agropecuarios, mineros, urbanos y rurales.

Buenrostro propone en un artículo publicado en 2001 una clasificación de generadores de residuos basándose en su actividad económica (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Clasificación de generadores de RSM propuesta

División generador	Subdivisión Generador	Clase generador (fuente/origen)	Tipo de residuo
Industrial		Industrial	Industriales
Urbana	No residencial	Comercio Especiales Institucionales/Servicios Construcción/Demolición	Comerciales Contaminantes Hospitalarios Institucionales De construcción
Rural		Agropecuarios	Agropecuarios
Urbana	Residencial	Vivienda	Domésticos

2.7.3. Clasificación de los residuos por su tipo de manejo

Peligrosos.- Son aquellos que tras una serie de análisis tipificados presentan en sus componentes, características de peligrosidad como el de ser tóxicos, corrosivos, irritantes, cancerígenos, explosivos, inflamables, etc. (Colomer y Gallardo, 2007)

No peligrosos.- Son los residuos inertes que por su naturaleza o composición no experimentan transformaciones, físicas, químicas o biológicas significativas. Su lixivialidad, contenido total de contaminantes del residuo y la eco toxicidad del lixiviado deben ser insignificantes. (Colomer y Gallardo, 2007)

2.7.4. Clasificación de los residuos por su potencial para valorización

Se clasifican los residuos por su potencial para ser aprovechados a través de diversos procesos como compostaje, tratamiento térmico, tratamiento biomecánica, reutilización, reciclaje o envío directo al relleno sanitario al no poder ser aprovechado de alguna forma.

- I. Residuos recuperables: reutilizables y reciclables
- II. Residuos con alto poder calorífico
- III. Residuos orgánicos biodegradables
- IV. Residuos para disposición en rellenos sanitarios u otros espacios

Esta clasificación es parte de la propuesta de Espinoza, et al. 2008 de actualización de la norma NMX-AA-22-1985. Selección y cuantificación de subproductos en residuos sólidos urbanos.

2.8. Métodos de recolección

Los métodos de recolección han ido evolucionando con el paso del tiempo, pasando desde la recogida manual, primero a granel, luego en bolsas y finalmente en contenedores, hasta llegar a los sistemas de recolección mecanizada con compactación (Colomer y Gallardo, 2007). Los métodos de recolección básicamente son dos recolección mixta y recolección fraccionada.

2.8.1. Recolección mixta

En la recolección mixta no se separan los residuos en sus diferentes fracciones, son transportados directamente a una unidad de transferencia y después al relleno sanitario o en vez de esto pueden ser llevados a un centro de segregación y tratamiento.

2.8.2. Recolección fraccionada

Para poder realizar una recolección fraccionada se requiere la participación activa del generador separando los residuos en la fuente, para posteriormente recolectarlos por fracciones. La recolección fraccionada puede darse de diversas formas según la infraestructura, cultura y necesidades de la población. Fraccionar adecuadamente los residuos es un componente crucial en el éxito de los sistemas de manejo de residuos sólidos (McDougall et al., 2004). Incrementa la calidad en la producción de composta, energía y reciclables. Permite una mejor financiamiento de las actividades de manejo de los residuos y minimiza el uso de la energía y mano de obra requerida en el procesamiento de estos residuos (Murray., 1999). Además de disminuir el porcentaje de rechazo de material previamente recolectado y segregado por no encontrarse en condiciones aceptables para su revalorización.

La recolección fraccionada se puede llevar a cabo de dos formas:

1. **Recolección en eco-parques**, son centros de acopio de residuos domésticos ubicados cerca de áreas urbanas donde los ciudadanos depositan sus residuos de forma fraccionada en distintos contenedores. (Colomer y Gallardo, 2007).
2. **Recogida en la acera**, los camiones recolectores pasan por enfrente del domicilio o cerca de él y recolectan los residuos ya sea con un camión con separación de carga o establecen días determinados para recolectar cada una de las fracciones de residuos establecidas.

2.8.3. Tipos de vehículos de recolección

Para cualquiera de los métodos de recolección se requieren vehículos recolectores que pueden ser:

Camiones compactadores con elevador de contenedores de carga frontal o posterior.- En los cuales el operador debe colocar el contenedor en las pinzas de sujeción, para ser levantado automáticamente y vaciado.

Camiones compactadores con elevador de contenedores de carga lateral.- En este caso no es necesario que el operador coloque el contenedor en posición

para levantarlo y vaciarlo, el único inconveniente es que requiere espacio para maniobrar y que el contenedor este colocado en posición adecuada.

Camiones compactadores de carga trasera.- Estos son para contenedores de menor tamaño pues deben ser llevados hasta el camión por el operario y vaciarlo el mismo. Se utilizan generalmente para recolección en calles estrechas y recolección domiciliar.

Camiones de caja abierta.- Se utilizan para el caso de recogida selectiva con contenedores tipo iglú o prismáticos con capacidades de 2.5m³, que recogen papel, cartón envases y vidrios, fundamentalmente. (Colomer y Gallardo, 2007) En México D.F se tienen contenedores de caja abierta con dos compartimientos para recolección selectiva de orgánicos e inorgánicos.

2.9. Métodos de valorización de los residuos

Los métodos de valorización de residuos son todos aquellos procesos por medio de los cuales se restaura el valor de un producto que anteriormente había sido considerado como material de desecho, estos pueden ser tratamientos biológicos, térmicos, químicos, procesos de reciclaje y/o tratamientos de disposición final; en todos los casos el resultado de estos procesos son materiales con algún valor en el mercado ya sea como energía, materia prima o productos de consumo. (Figura 2.2).

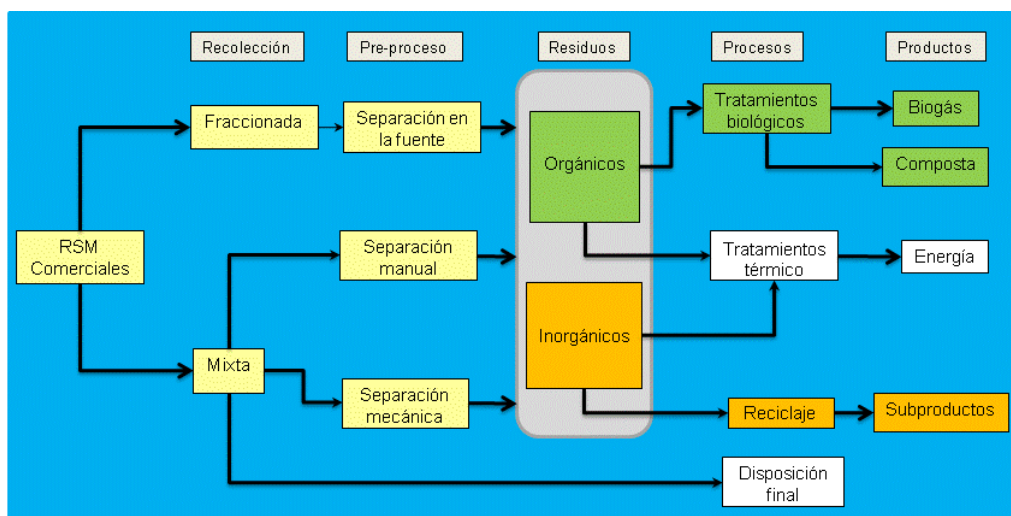


Figura 2.2. Cadena de valorización de residuos

En todos los procesos de valorización de residuos debe ser considerada la factibilidad técnica, económica, así como la disponibilidad comercial de métodos avanzados de tratamiento. Tener conocimiento de los distintos procesos de valorización y las tecnologías relacionadas a los mismos, juega un papel fundamental en este ámbito.

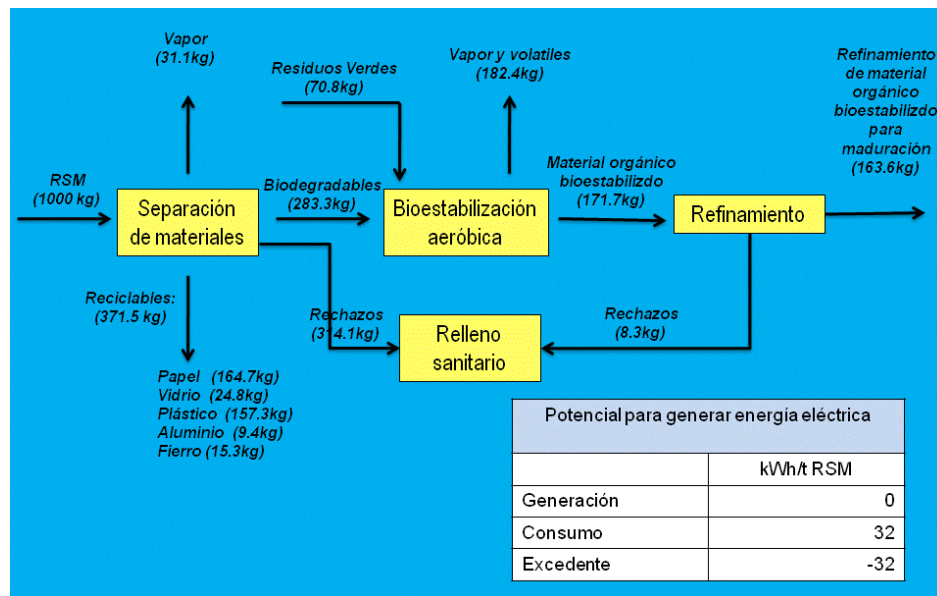
2.9.1 Tratamiento para residuos de recolección mixta

Existe una gama de tratamientos disponibles para el tratamiento de residuos mixtos de características domiciliarias como son el caso de los residuos comerciales, Economopoulos (2010) presenta una selección de tratamientos adecuados para este tipo de residuos, los clasifica en dos categorías principales tratamientos Mecánico-biológicos y tratamientos térmicos.

2.9.1.1. Tratamiento mecánico - biológico aeróbico.

Este proceso incluye la unidad de separación de materiales, estabilización aeróbica de la fracción biodegradable y de forma opcional refinamiento de la fracción orgánica bioestabilizada. En la unidad de separación de materiales se pueden recuperar reciclables como papel, plástico, vidrio, metales, etc. y/o RDF (combustible secundario a partir de papel y plástico principalmente, pero también de otros materiales combustibles como madera, textiles y hule). Los materiales biodegradables son separados y mezclados en proporciones adecuadas con residuos verdes (madera y residuos de jardines) y de forma opcional con lodos de aguas residuales, con lo cual se alimenta la unidad bioestabilizadora, el producto de este proceso puede ser utilizado directamente como abono o como material para cubrir rellenos sanitarios. (Figura 2.3). (Economopoulos, 2010)

a) Tratamiento Mecánico-Biológico con recuperación de materiales reciclables



b) Tratamiento Mecánico-Biológico con recuperación de materiales reciclables y RDF

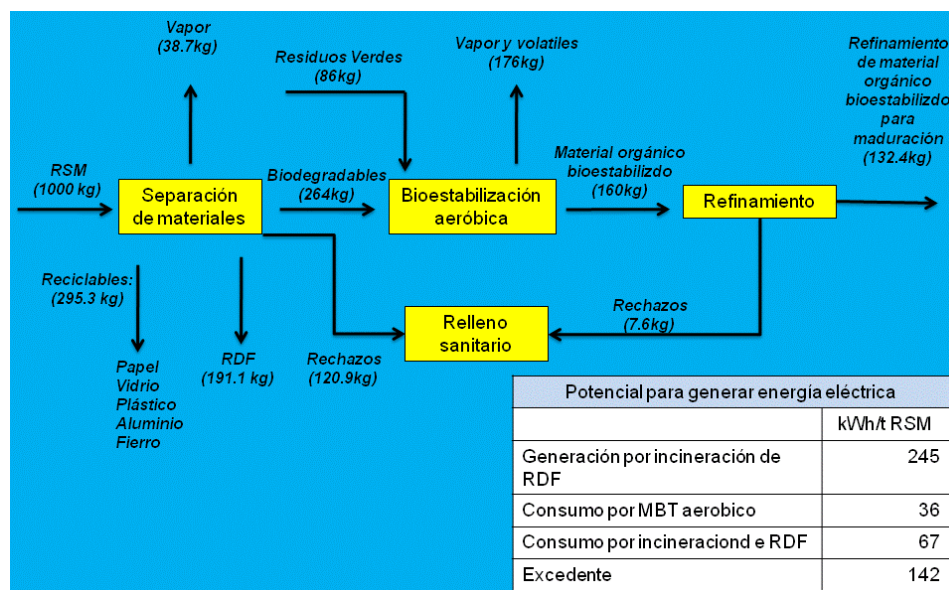


Figura 2.3. Diagrama de flujo que indica el balance de material y energía para el tratamiento a) Mecánico-Biológico aeróbico con recuperación de materiales reciclables, b) Mecánico-Biológico con recuperación de materiales reciclables y RDF. (Economopoulos, 2010)

2.9.1.2. Tratamiento mecánico-biológico anaeróbico

Este proceso incluye la unidad de separación de materiales y estabilización anaeróbica de la fracción biodegradable. El proceso anaeróbico se puede clasificar en:

- a) De baja, mediana o gran cantidad de sólidos, dependiendo del grado de disolución del material de alimentación en agua caliente y el total de sólidos contenidos de la masa resultante (<10%, 15-20% y >22%), respectivamente. (Tchobanoglous et al., 1993, citado por Economopoulos, 2010)

Mesofílico (20-30°C) o termofílico (50-65°C), dependiendo de la temperatura de operación utilizada.

- b) Una etapa o multi-etapas, dependiendo del número de reactores utilizados.

La mayoría de los sistemas anaeróbicos utilizados actualmente son de gran cantidad de sólidos (con el material de alimentación diluido con un contenido del 25% de sólidos), termofílicos y de una sola etapa, con tiempos de retención de 14 a 20 días. (Figura 2.4). (Economopoulos, 2010).

- c) Tratamiento Mecánico-Biológico con recuperación de materiales reciclables

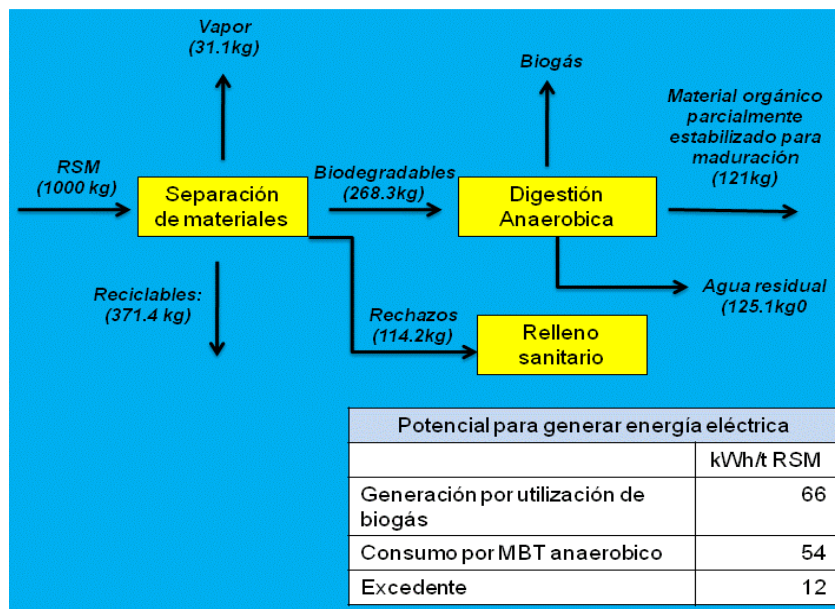


Figura 2.4. Diagrama de flujo que indica el balance de material y energía para el tratamiento Mecánico-Biológico anaeróbico con recuperación de materiales reciclables. (Economopoulos, 2010).

2.9.1.3. Secado biológico

El secado biológico es un pre-tratamiento que convierte los RSM en combustible sólido recuperado de los residuos (SRF por sus siglas en inglés). En este

proceso los residuos son triturados y su contenido de humedad es reducido a menos del 15% a través del secado aeróbico, los materiales ferrosos y no ferrosos como el aluminio son recuperados. (Figura 2.5). (Economopoulos,2010).

d) Secado Biológico

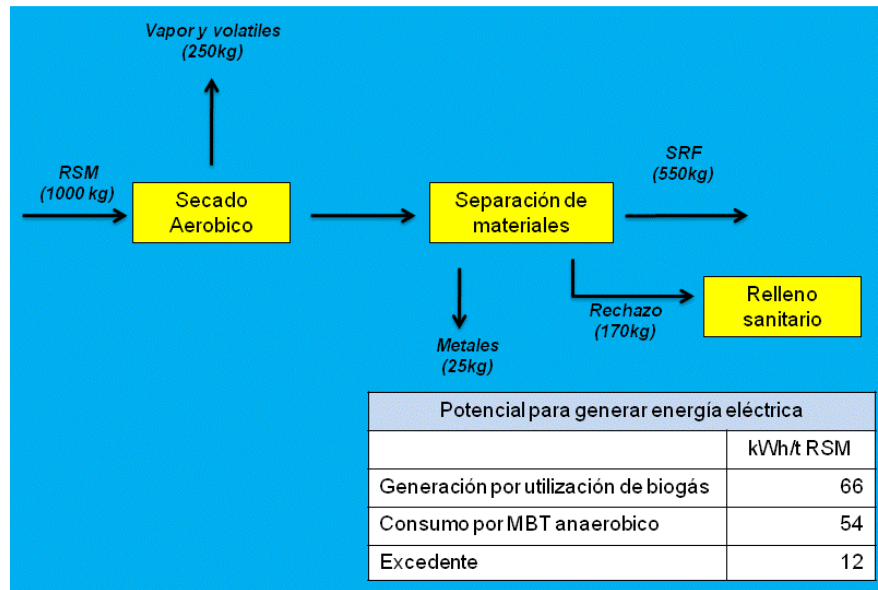


Figura 2.5. Diagrama de flujo que indica el balance de material y energía para el tratamiento Secado Biológico con recuperación de materiales reciclables. (Economopoulos, 2010).

2.9.1.4. Tratamiento térmico. Incineración

Este tipo de procesos incluye la unidad de incineración, boiler y sistema de tratamiento de gases de combustión. Los tipos de incineradores más comunes son los hornos de parrilla móvil, hornos de lecho fluidizado y hornos rotatorios. En cualquiera de los incineradores, los gases calientes provenientes de la unidad de incineración pasa a través de un boiler (intercambiador de calor) donde transfiere el calor al agua para generar vapor y subsecuentemente generar electricidad. (Figura 2.6). (Economopoulos, 2010).

e) Incineración en masa

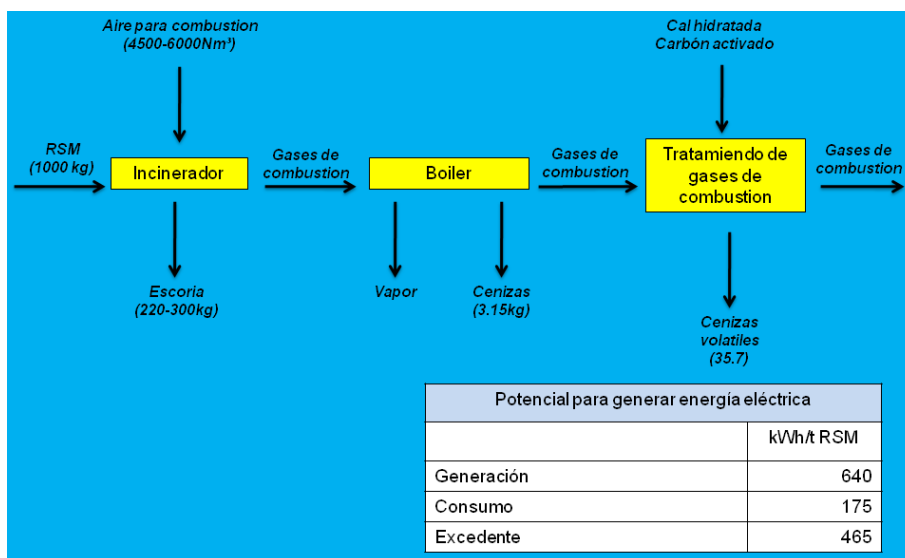


Figura 2.6. Diagrama de flujo que indica el balance de material y energía para el tratamiento térmico de incineración en masa. (Economopoulos, 2010).

Existen numerosas preocupaciones ambientales asociadas a la incineración de residuos sobre todo cuando se encuentran presentes los residuos plásticos, como a la emisión de contaminantes como el CO₂, NO_x y SO_x, compuestos volátiles orgánicos, material particulado, metales pesados, Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) dibenzofuranos policlorados (PCDFs) y dioxinas. (Al-Salem et al. 2009). Es por esto que se deben implementar las mejores técnicas disponibles para el control de emisión de gases y manejo de residuos.

Hornos de parrilla móvil.- Constan de una cámara de combustión en cuyo interior se desplaza el sólido sobre una cinta transportadora de acero u otro sistema mecánico similar. Bajo la base del mismo se alimenta el aire, que atraviesa la capa de sólidos. En la zona superior existe una cámara secundaria en la cual se inyecta aire adicional para completar la combustión en la fase gas. El aire en exceso total varía entre 100 y el 200% respecto al estequiométrico. El tiempo de residencia de los sólidos se ajusta mediante la velocidad del mecanismo de transporte sobre el que descansan y pueden variar entre márgenes tan amplios como 10 minutos y 3 horas, aunque lo más frecuente es de 20 a 30 minutos. (Aracil, 2008)

Hornos de lecho fluidizado.- La incineración en lecho fluidizado es un método eficiente para combustión de partículas sólidas. Las tasas de generación de calor son del orden de 100000 a 150000 BTU/h-pie³ estándar. La incineración en lecho fluidizado implica una trituración mucho mayor, así como homogénea en el tamaño de las partículas. Este proceso funciona al inyectar partículas sólidas que constituyen el lecho en una corriente ascendente de gas en condiciones cuidadosamente controladas. La corriente de gas pasa entre las partículas del lecho y las pone en movimiento heterogéneo. Con esto se provoca que la masa tome características de fluido. (Trejo, 1996).

Horno rotatorio.- Los sistemas de horno rotatorio constan de un cuerpo cilíndrico recubierto de refractario y dispuesto horizontalmente, con una suave pendiente (1-5%) entre la entrada y la salida para facilitar el desplazamiento del residuo. El horno descansa sobre rodamientos que controlan la velocidad de giro del mismo, que suele variar entre 0.5 y 3 rpm y condiciona, junto con la longitud e inclinación del horno, el tiempo de residencia media de los sólidos en el mismo. (Aracil, 2008)

2.9.2. Reciclaje de plásticos

De los materiales plásticos con potencial de reciclaje que pueden ser encontrados en la corriente de los residuos comerciales se encuentra el tereftalato de polietileno (PET), el polietileno de media densidad (PE), el polietileno de alta densidad (HDPE), el polietileno de baja densidad (LDPE), el polipropileno (PP), el policloruro de vinilo (PVC) y el poliestileno (PS), estos materiales plásticos pueden ser recuperados por diversas vías de reciclaje (Figura 2.7), dependiendo del origen, tipo y condiciones del material. Estos procesos de reciclaje se clasifican en:

- a) Reciclaje primario: Re-extrusión
- b) Reciclaje secundario: Mecánico
- c) Reciclaje terciario: Químico
- d) Reciclaje cuaternario: Recuperación de energía.

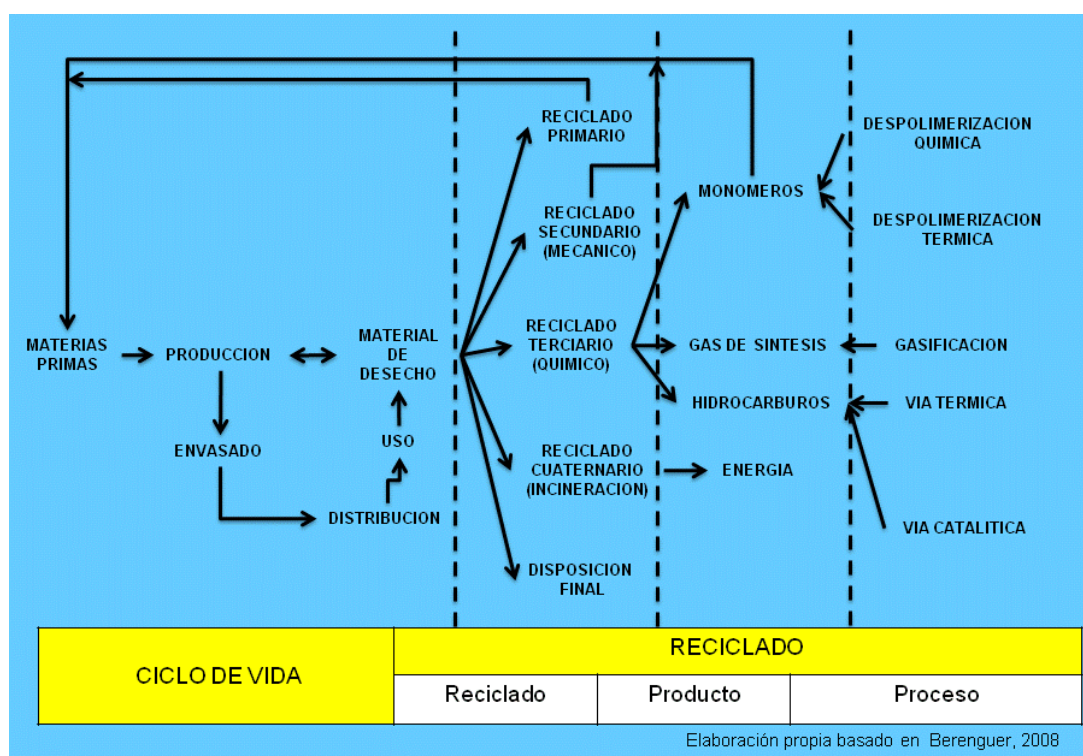


Figura 2.7. Vías de reciclado de plásticos

Contar con un adecuado método de separación de residuos previo al tratamiento es vital en el éxito de los procesos de recuperación, ya que son éstos procesos los que contribuyen a mejorar la calidad de los residuos que serán tratados y por ende la calidad y porcentaje de subproductos recuperados. Algunos métodos de separación de residuos plásticos son el método de segregación por densidad, el método de segregación triboelectrica, la técnica de aceleración de velocidad (Result Technology AG), la Espectroscopia de rayos X fluorescentes y la Espectroscopia NIR (Tachwali et al., 2007).

2.9.2.1. Reciclaje primario: Re-extrusión

Este tipo de reciclaje se lleva a cabo reintroduciendo al ciclo de extrusión los residuos plásticos provenientes de los procesos productivos y residuos de post-consumo, para producir productos de características similares a las originales. Este tipo de reciclaje solo es posible con residuos plásticos de un solo polímero y que se encuentren limpios.

2.9.2.2. Reciclaje secundario: Mecánico

Es el proceso de recuperación de residuos plásticos por medios mecánicos para ser reutilizado en la manufactura de productos plásticos (Mastellone, 1999. Citado por Al-Salem., 2009). Solo puede ser realizado con residuos plásticos de un solo polímero, entre más complejos y contaminados estén los residuos, es más difícil realizar el reciclaje mecánico por lo que la segregación, lavado y preparación es esencial si se desea producir productos finales de alta calidad.

Existen varios esquemas de reciclaje mecánico, uno de ellos es el descrito por Aznar et al. (2006) (Figura 2.8), es un proceso generalizado, los pasos del proceso se describen brevemente a continuación:

Triturado.- Residuos plásticos de tamaño grande son cortados y triturados para reducirlos a hojuelas de menor tamaño.

Separación de contaminantes.- Por centrifugado se separa el plástico de las impurezas como papel, polvo y otros.

Flotación.- En un tanque de flotación, por densidad son segregados los diferentes tipos de plásticos.

Molienda.- Las hojuelas de plástico de un solo polímero son molidas, como primer paso de reciclaje.

Lavado y secado.- Puede ser lavado con agua o lavado químico utilizando sosa caustica y tensoactivos para eliminar gomas.

Aglutinado.- El material se reúne y recolecta para ser almacenado una vez que se le han aplicado aditivos. En esta etapa el material puede ser vendido como materia prima o puede seguir con el procesamiento siguiente.

Extrusión.- El plástico es extruido y cortado, a lo que se le llama pellet

Enfriamiento.- Los pellets pasan por un proceso de enfriamiento en agua y quedan listos como producto final para venta como materia prima.

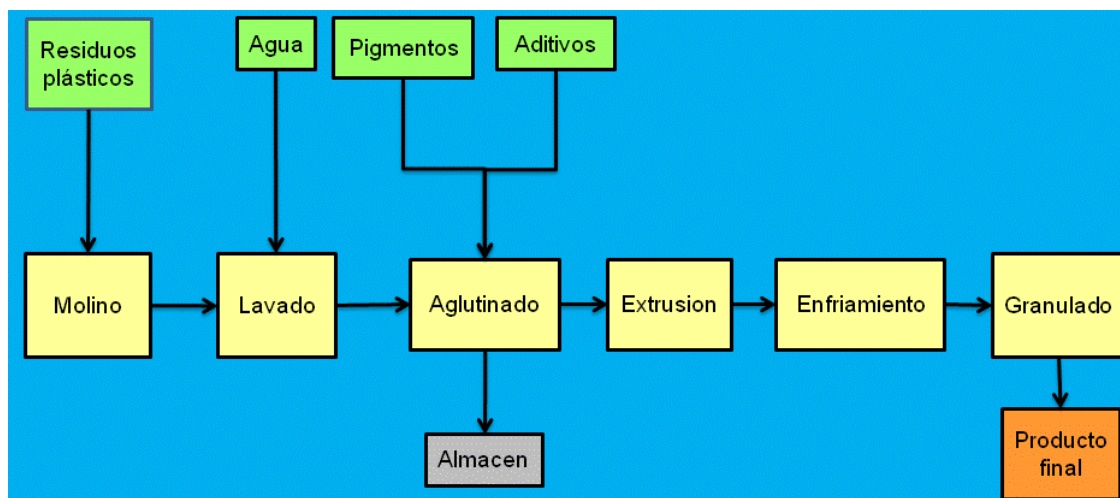


Figura 2.8. Esquema de reciclaje mecánico, descrito por Aznar et al. (2006)

Una vez que los residuos plásticos son reconvertidos en materia prima esta puede ser utilizada en cualquiera de las técnicas de moldeo de extrusión, inyección, soplado, vacío y/o inflado, para la fabricación de distintos productos.

2.9.2.3. Reciclaje terciario: Químico

El término de reciclaje químico se refiere a procesos tecnológicos avanzados que convierte material plástico en moléculas de menor tamaño, usualmente líquidos o gases, que son adecuados para la producción de nuevos petroquímicos y plásticos (Mastellone, 1999. Citado por Al-Salem et al. 2009).

Ha sido probado que los productos del reciclaje químico son útiles como combustible. La tecnología que lo ha permitido es el proceso de despolimerización. (Al-Salem, 2009).

La despolimerización agrupa las tecnologías que permiten la transformación de los polímeros en monómeros u oligómeros mediante aporte de calor, sin que un reactivo químico intervenga en las reacciones de ruptura de las cadenas. (CEDEX, 2007)

Craqueo térmico.- Este tipo de proceso implica la ruptura de las cadenas poliméricas constitutivas de los residuos plásticos por acción del calor en ausencia de oxígeno. Normalmente, el producto de reacción es una mezcla heterogénea de hidrocarburos líquidos, gaseosos y sólidos en función de la

temperatura a la que se desarrolla el proceso, que suele efectuarse entre 500 y 800°C. (CEDEX, 2007)

Craqueo catalítico.- Consiste en la degradación o rotura de las moléculas de polímero sobre un catalizador para obtener mezclas de hidrocarburos con aplicación como materia prima petroquímica, combustible, etc. Uno de los tipos de catalizadores más utilizados son las zeolitas.

Termólisis.- Es el tratamiento termo-químico que se le da a los residuos plásticos, permite la transformación de los polímeros en monómeros y oligómeros mediante el aporte de calor sin que intervenga un catalizador en la reacción de ruptura de las cadenas. El proceso de termólisis puede ser termo-químico avanzado (pirolisis, gasificación e hidrólisis).

Al- Salem et al. 2009, citando Mastellone (1999) muestra los distintos esquemas de termólisis relacionados a algunas tecnologías actuales y sus productos principales. (Figura 2.9).

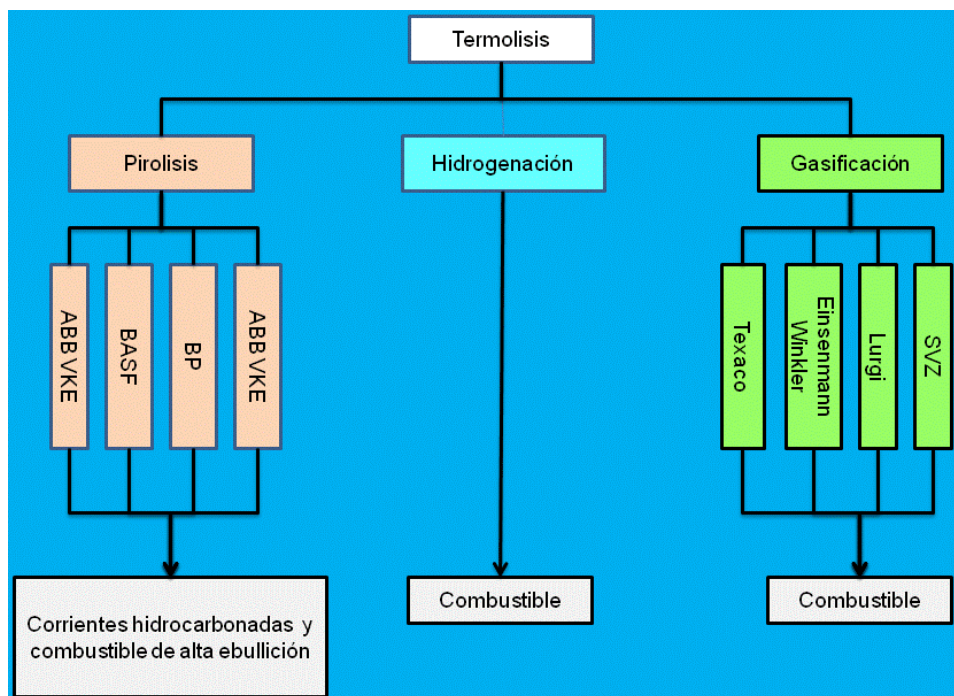


Figura 2.9. Esquemas de termólisis y sus productos (Al- Salem et al. 2009)

Pirolisis.- Es la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno o cualquier otro catalizador. Esta descomposición se produce a través de una

serie compleja de reacciones químicas y de procesos de transferencia de materia y calor. (Colomer y Gallardo, 2007).

Por medio de la pirolisis se pueden producir diferentes productos en función de la tecnología de tratamiento que se utilice. Los productos generados son:

Gases. Compuestos principalmente de CO, CO₂, CH₄, C₂H₆ y en pequeñas cantidades hidrocarburos ligeros.

El gas que se produce a través de la pirolisis de residuos y biomasa es limpio y de alto valor calórico. En este proceso el hidrocarburo contenido en los residuos es convertido en gas el cual puede ser utilizado en motores de gas, en la generación de energía o en aplicaciones de generación de vapor sin necesidad de darle el tratamiento que se les da a los gases de combustión. Este tipo de gas típicamente tiene un valor calorífico de 22-30Mj/m³ dependiendo del tipo de residuo que sea procesado. Los gases de mayor valor calórico son los generados a partir de materiales sintéticos como caucho y plásticos. (Al-Salem et al. 2009)

Líquidos. Compuesto por una gran mezcla de distintos productos como pueden ser: cetonas, ácido acético, compuestos aromáticos, y otras fracciones más pesadas.

Sólidos. El producto sólido de la pirolisis es un residuo carbonoso (char) que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo.

La pirolisis se lleva a cabo habitualmente a temperaturas de entre 400°C y 800 °C. Las proporciones relativas de los elementos producidos dependen de la composición de los residuos, de la temperatura y el tiempo que ésta se aplique. (Colomer y Gallardo, 2007).

Gasificación.- Es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso es transformado en un gas combustible de bajo poder calorífico, mediante una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante como aire, oxígeno, aire enriquecido con oxígeno y vapor de agua o hidrógeno.

De este proceso se obtienen monóxido de carbono, hidrógeno, metano, agua, nitrógeno y pequeñas cantidades de hidrocarburos superiores. Si el oxidante utilizado es aire, el gas producido es pobre y su poder calorífico no supera el 25% del gas natural, pero si el oxidante utilizado es oxígeno o aire enriquecido, el gas resultante tendrá un poder calorífico entre 25% y el 40% del gas natural, debido a la ausencia de nitrógeno. (Colomer y Gallardo, 2007).

Existen distintas tecnologías asociadas al proceso de gasificación, elegir alguna de ellas depende de varios factores como el tamaño y forma del residuo, el aprovechamiento de la energía del gas producido que vaya a hacerse y los factores económicos.

Un proceso de gasificación ideal para residuos plásticos debería producir gas de alto valor calórico, residuo carbonoso completamente quemado, productos metálicos fácil de ser segregado de las cenizas y no requerir de instalaciones adicionales para el abatimiento de la contaminación del agua y/o aire. (Al-Salem et al. 2009)

Hidrogenación.- Implica el tratamiento térmico del residuo plástico en presencia de hidrógeno, normalmente a temperaturas moderadas (400-500°C), y elevadas presiones (10-100 kPA). En ellos se emplean catalizadores bifuncionales (con funciones de craqueo e hidrogenación) compuestos por metales de transición soportados sobre matrices ácidos. (Aguado et al. 2003).

Disolución.- Los procedimientos de disolución de los plásticos permiten recuperar los polímeros purificados eliminando los materiales contaminantes contenidos en los desechos. Estos no implican la modificación química de las moléculas de polímeros, pero no corresponden ni a un reciclaje mecánico ni a una valorización energética de los residuos. (CEDEX, 2007)

Solvosis.- Es un procedimiento por el que el disolvente actúa también como reactivo. En función de la naturaleza del disolvente se distinguen distintas clases de solvosis como la quimiolisis (glicolisis, hidrólisis y metanolisis), en donde se utilizan también fluidos supercríticos. (CEDEX, 2007)

Hidrólisis.- Se realiza en medio básico (saponificación), lo que facilita el proceso, pero necesita una etapa de post-tratamiento para transformar el

producto en monómeros utilizables. Este procedimiento permite tratar los desechos coloreados y mezclados. (CEDEX, 2007)

Metanolisis.- Es un avanzado proceso de reciclaje que consiste en la aplicación de metanol en el PET. Este poliéster se descompone en sus moléculas básicas, incluidos el dimetiltereftalato y el etilenglicol, que pueden polimerizarse nuevamente para producir resina virgen. (CEDEX, 2007)

Glicosís.- Se realiza con etilenglicol y en condiciones menos severas que la metanolisis y la hidrólisis, lo que reduce los costes económicos, aunque es menos eficaz que ellas para el tratamiento de desechos coloreados y mezclados.

Los productos de la reacción pueden utilizarse para recuperar PET o como precursores de espumas de poliuretano o poliéster insaturados. (CEDEX, 2007)

2.9.2.4. Reciclaje cuaternario: Recuperación de energía

La recuperación de energía implica la incineración de residuos para producir energía en forma de calor y/o vapor para producir electricidad. Los residuos plásticos pueden ser utilizados para recuperar energía dado su alto poder calórico. La recuperación de energía es una alternativa cuando el reciclaje mecánico o químico no es viable. Se considera que la estrategia de incineración con recuperación de energía ahorra menos energía que la reducción en la generación de residuos o el reciclaje. (Trejo, 1996). Además, existen numerosas preocupaciones ambientales asociadas a la incineración de residuos plásticos como a la emisión de contaminantes como el CO₂, NO_x y SO_x, compuestos volátiles orgánicos, material particulado, metales pesados, Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) dibenzofuranos policlorados (PCDFs) y dioxinas. (Al-Salem et al. 2009)

Las tecnologías para la incineración de residuos plásticos son las mismas que las utilizadas en la incineración de residuos mixtos, como son los hornos de parrilla móvil, hornos de lecho fluidizado y hornos rotatorios.

2.9.3. Reciclaje de metales ferrosos y no ferrosos

Metales Ferrosos: Son los residuos originados en el proceso de producción, transformación y uso del acero. Son muy valorados para el reciclaje ya que

ahorran el 62% de energía respecto a la producción con mineral de hierro. (Colomer y Gallardo, 2007). Este material es de fácil recuperación, ya que es fácilmente identificable y además se puede recuperar utilizando imanes para separarlo del resto de los residuos. Los residuos de metales ferrosos son encontrados como latas, partes de automóviles, electrodomésticos, partes de construcción de puentes y edificios, entre otros.

Metales No Ferrosos: Son metales de alto valor como el aluminio, cobre, plomo, oro y platino de los equipos electrónicos. De los metales no ferrosos el aluminio es el metal más común en la corriente de residuos municipales. Se encuentran en latas de refrescos, electrodomésticos, partes de automóviles, ventanas, puertas y otros.

El proceso de fabricación de metales puede ser primario o secundario (Figura 2.10). El primario consiste en la obtención del metal a través de la reducción del mineral al estado metálico por medio de reductores como el carbón, este proceso se realiza a altas temperaturas con un elevado consumo de energía. El proceso secundario consiste en obtener el metal de la fusión del metal usado “chatarra”, este proceso consume menor energía. (CEMPRE, 1997)

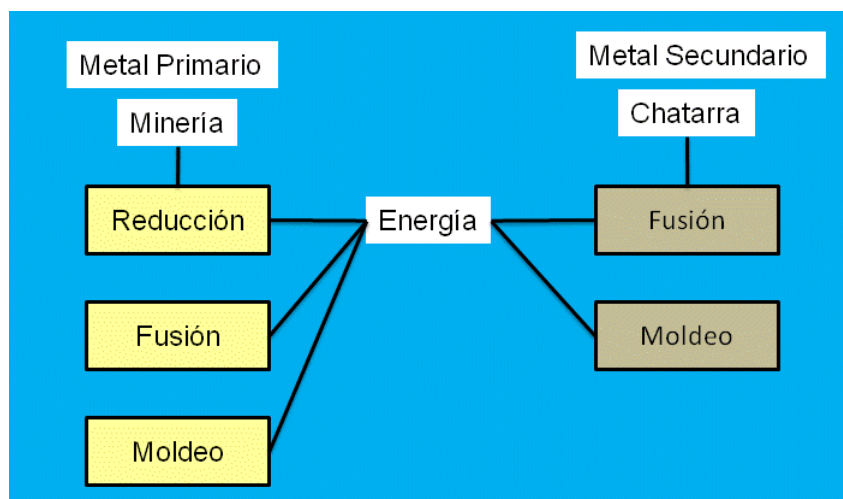


Figura 2.10. Etapas en la fabricación de metal primario y metal secundario

2.9.3.1. Reciclaje de metales no ferrosos (Aluminio)

El aluminio es un metal ligero extraído de la bauxita, el tercer elemento más común de la corteza terrestre, del cual se estima que hay reserva para 200 años.

Tiene las características que es un buen conductor de calor y de la electricidad. Es impermeable y no permite que las sustancias envasadas pierdan su sabor ni su aroma. Es de bajo peso y de alta resistencia, por eso es un material excepcional como barrera de protección y aislamiento. El aluminio se caracteriza porque se puede reciclar indefinidamente sin detrimento de su calidad.

El reciclaje y fundición de aluminio secundario requiere del pre-procesamiento de la chatarra de aluminio para eliminar impurezas, seguidas por la re-fundición del aluminio. Para mantener la pureza suficiente, el aluminio re-fundido es mezclado con aluminio puro producido en una planta de fundición principal (normalmente, una mezcla de 50-50). Antes de la fusión se utilizan diversas técnicas mecánicas, térmicas, químicas y magnéticas para separar contaminantes y materiales que no sean chatarra de aluminio. En contraste con el proceso de fundición de aluminio primario que requiere de intensas cargas de electricidad, la fusión de chatarra para producir aluminio secundario implica principalmente el uso de gas natural. (ESC, 2002)

Se puede elegir entre una variedad de hornos de fundición de aluminio, dependiendo de la producción deseada, la calidad y composición de la chatarra de aluminio a ser fundida y el tipo de proceso (por lotes o continua). Otros factores que influyen en la elección son el costo de capital, el tiempo de vida útil y la pérdida de metal. (ESC, 2002)

Horno Reberveratorio.- El horno calienta el aluminio hasta temperaturas de fundición por medio de llama directa a las paredes del quemador. El modo primario de transferencia de calor es a través de radiación de las paredes de ladrillo refractario hacia el aluminio, pero también la transferencia de calor por convección provee calentamiento adicional. (ESC, 2002)

Horno de crisol eléctrico.- Es similar a los hornos de crisol de gas, pero utiliza elementos de resistencias eléctricas para calentar el crisol y fundir el aluminio. Al igual que su contra parte de gas, los hornos de crisol eléctricos son pequeños y suelen utilizarse cuando la flexibilidad de la aleación es importante. (ESC, 2002)

Hornos rotativos.- Se utilizan casi exclusivamente para reciclar chatarra de aluminio de bajo grado y escorias “dross” (escoria “dross”: una mezcla de

aluminio y óxido de aluminio que se forma en la superficie de aluminio fundido. El horno opera mediante la rotación de la carga a través del horno que entra en contacto directo con un quemador de gas o con una pared refractaria, que directamente es calentada por los quemadores. (ESC, 2002)

Hornos de torre.- Se alimentan con aluminio desde la parte superior de una torre vertical, y los quemadores en la parte inferior de la torre derriten el aluminio. El principal modo de transferencia de calor en hornos de torre es a través de convección por pinzamiento directo de quemadores sobre el metal en la sección inferior de la torre y por los gases de combustión que viajan hacia la salida de la torre. (ESC, 2002)

Horno de sudoración.- Es un horno de chimenea seca que se utilizan para procesar la chatarra de aluminio que contiene cantidades considerables de hierro y zinc sin aleación. La carga es alimentada en una chimenea inclinada y se calienta por encima de la temperatura de fusión de zinc, pero por debajo de aluminio. El zinc fundido corre y se recoge. A continuación, la temperatura del horno se incrementa por encima del punto de fusión de aluminio, pero por debajo del punto de fusión de hierro. El aluminio fundido, a continuación recolectado separado del zinc y el hierro sólido es dejado atrás en el horno. (ESC, 2002)

2.9.4. Reciclaje de papel y cartón.

Las categorías principales de residuos de papel que pueden ser reciclados son:

Substitutos de pulpa.- Residuos de papel provenientes de los sobrantes de diversos procesos de fabricación-conversión de papel, es de muy alta calidad, limpia y sin impresión. Este grado de residuos de papel se recicla hasta en un 90% principalmente en la fabricación de papeles finos (Heitmann y Joyce).

Destintando de alto grado.- Esta categoría incluye residuos de papel limpio, ligeramente impresos y papeles de colores, libros y papel para impresoras de computadora y fotocopadoras. Estos residuos son los de más alto costo, mayor calidad final del espectro total de residuos de papel. Este tipo de fibras son incorporadas tradicionalmente en productos finales de alta calidad (Heitmann y Joyce). Sin embargo presentan dificultades de calidad durante la manufactura de

los productos finales, entre otras cosas debido a que las fibras se encuentran contaminadas con tintas de alta tecnología y otras sustancias de los procesos de impresión. Por lo que en los procesos donde se utilizan estas tipo de fibras es necesario el empleo de tecnologías avanzadas de destinado.

Cartón corrugado.- Estos son residuos de cajas de cartón corrugado provenientes de tiendas de mayoreo, comercios, industrias. Se compone en un 60 a 80% de pulpa suave no blanqueada con largas fibras y en un 10 a 20% de corrugado medio de alto rendimiento de fibras cortas y a menudo con un alto contenido de fibra reciclada. Este tipo de residuos son una gran fuente de fibras fuertes y se recicla cerca del 50% de lo que se genera. (Heitman y Joyce).

Papel periódico.- Este residuo es de gran generación, puede ser reciclado para convertirlo nuevamente en papel periódico, en la fabricación de cartón, productos moldeados de papel como los utilizados para empaque y embalaje, como aislante, y otros usos misceláneos.

Papeles mixtos.- Esta categoría que incluye una amplia diversidad de tipos y grados de papel, entre ellos se encuentran los papeles impresos y coloreados, los residuos de todo tipo de papel de oficina, entre otros. Es una alta fuente de fibra, pero requiere de tecnología avanzada de separación que puede no estar aún disponible o ser económicamente factible.

2.9.4.1. Tecnología de reciclado para fabricación de cartón y grados de papel no destintado

En los procesos de reciclaje para la fabricación de cartón o grados de papel no destintado donde la apariencia del producto final no es lo más importante, el objetivo es hacer eficiente la molienda (pulper) de los residuos de papel, para reducirlos a fibras individuales y remover los contaminantes que pudieran dañar la maquinaria o afectar la apariencia y resistencia de la pulpa y por ende del producto final.

El sistema básicamente consta de dos módulos principales, módulo de molienda (pulper), módulo de limpieza.

En el módulo de molienda se desfibra el papel y varios dispositivos remueven los contaminantes de gran tamaño como alambres, cuerdas y plásticos. El módulo de molienda por lo general se encuentra separado del módulo de limpieza por una barrera de pantalla. Esta pantalla permite pasar a la fibra y a los contaminantes de menor tamaño al módulo de limpieza, donde por medios mecánicos como los de pantalla y centrífugos, y químicos separa la mayor cantidad posible de contaminantes de la fibra. (Heitman y Joyce).

2.9.4.2. Tecnología de reciclado para fabricación de grados de papel destintado.

El proceso de reciclaje para grados de papel destintando generalmente comienza con un módulo de molienda (pulper) y un módulo de limpieza similar al utilizado en el reciclaje de cartón y papel grado destintado, pero con mayor énfasis en la eficiencia de la limpieza de la fibra.

En este proceso se agregan químicos a la molienda para quebrar la tinta y removerla de la fibra. Los dos métodos de destintado más comunes son el lavado y la flotación. Aunque también puede utilizarse un proceso combinado para una mejor limpieza. Otra técnica de destintado para remover tintas de base plástica como las utilizadas en impresoras láser y fotocopadoras, es la aglomeración, en la cual se agregan ciertos químicos que aglomeran las partículas de tinta en partículas de mayor tamaño que pueden ser removidas por un limpiador de pantalla o centrifugo. Para este tipo de tintas también puede emplearse la técnica de dispersión en frío. (Heitman y Joyce).

2.9.5. Reciclaje de vidrio

El vidrio es un material que por sus características es fácilmente recuperable. El vidrio es un silicato que funde a 1200°C. Está constituido esencialmente por sílice, caliza, carbonato sódico y otros materiales que le dan las diferentes coloraciones. Para la fabricación del vidrio los ingredientes se funden a 1400°C y luego se enfría la mezcla a 980°C. El proceso requiere de aproximadamente 4200 kilocalorías de energía para producir un kilo de vidrio. (Colomer y Gallardo, 2007). La chatarra de cristal requiere menor temperatura de fundición por lo que

requiere aproximadamente 26% menos energía que la requerida en la fabricación de vidrio virgen (Colomer y Gallardo, 2007).

De acuerdo a su aplicación el vidrio se clasifica en:

Vidrio Industrial.- Es todo aquel vidrio que no es utilizado como envase para productos alimenticios. El vidrio industrial es empleado en envases de productos químicos y biológicos, vidrio plano como ventanas, cristales blindados, fibra óptica, bombillas, etc.

Vidrio Doméstico.- Es todo aquel vidrio empleado para almacenar productos alimenticios como conservas, vinos, yogures, etc.

De acuerdo a su color el vidrio se clasifica en:

Vidrio Verde.- Es el utilizado en botellas de vino, cava, licores y cerveza.

Vidrio Blanco.- Es el utilizado en bebidas gaseosas, zumos y alimentos en general.

Vidrio Extra claro.- Es el utilizado en botellas de agua mineral, tarros, botellas de decoración, vasos y copas.

Vidrio Opaco.- Es el utilizado principalmente en botellas de cerveza y frascos de laboratorio.

2.9.5.1. Proceso de reciclaje de vidrio

El proceso de reciclaje de vidrio se lleva a cabo a través de cinco subprocesos principales, separación de contaminantes, separación manual de colores de vidrio, trituración y mezcla, fundición y moldeo y enfriamiento.

Separación de contaminantes.- En este proceso se separan todas las argollas, tapas metálicas y cualquier otro tipo de material distinto al vidrio que pudiera contaminar el proceso. El material se pasa por unas bandas transportadoras vibratorias y es sometido al campo magnético de un imán para separar los materiales ferrosos.

Separación manual de colores.- De forma manual mientras el material pasa por la banda transportadora, se van separando los distintos colores de vidrio a procesar (blanco, verde, extra claro y opaco). Cuando la separación de colores

no se lleva a cabo, la mezcla resultante se utiliza para producción de aislante de fibra de vidrio, base para construcción de carreteras y como material abrasivo para limpieza por chorro de arena. (Colomer y Gallardo, 2007)

Trituración y mezcla.- El vidrio separado de en la operación anterior es triturado hasta obtener una granulometría de menos de 10mm de diámetro. Este vidrio triturado es mezclado con otros compuestos como arena sílice, piedra caliza, carbonato de soda, sulfato de sodio y alúmina.

Fundición y moldeo.- La mezcla anterior derrite a altas temperaturas en el horno de fundición y con distintos moldes se elaboran distintas botellas y envases.

Enfriamiento.- Una vez que salen del molde van a un periodo de enfriamiento durante el cual pasan por bandas transportadoras equipadas con lectores ópticos para inspeccionar la calidad de los productos. Los productos segregados se trituran de nuevo y pasan a formar parte de la mezcla de fundición.

2.10. Análisis de ciclo de vida (ACV)

2.10.1. Orígenes

Los primeros estudios sobre aspectos relacionados al ciclo de vida de productos y materiales comienzan a partir de finales de los sesenta y comienzos de los setenta y se enfocaban en cuestiones como la eficiencia energética, el consumo de materias primas y en cierta medida en la eliminación de desechos.

En 1969, Harry E. Teasley Jr. de la compañía Coca Cola le pide a el Midwest Research Institute (MRI) la realización del primer estudio multicriterios para comparar el consumo de recursos y emisiones al ambiente asociados con envases de bebidas. El estudio nunca fue publicado sin embargo es referenciado como el que marcó el inicio de los ACV. A partir de este estudio en Estados Unidos se empezó a llamar Análisis de Recursos y Perfil Ambiental (REPA) a la metodología para cuantificar los recursos y las descargas ambientales de los productos (Chacón, 2008).

En 1984, el Laboratorio Federal Suizo para el Ensayo y la Investigación de Materiales (EMPA) publicó un estudio de materiales de envase y embalaje. La

exhaustiva base de datos usada en este estudio fue publicada y sirvió para facilitar la posterior realización de numerosos ACVs.

Hasta finales de los ochenta y principios de los noventa, ACV consistía principalmente de estimaciones de las emisiones y normalmente las organizaciones los utilizaban internamente para evaluar alternativas de embalaje. Pero el deseo de pasar de las emisiones a las estimaciones de impacto llevó a la introducción de la evaluación de impacto de ciclo de vida, o la traducción de cantidades de emisiones a impactos ambientales reales.

Con la creciente gama de aplicaciones de los ACV surgió la necesidad de estandarizar la metodología y comenzaron esfuerzos para realizar dicha normalización. Actores importantes en esta área son la sociedad de toxicología ambiental y química (SETAC), el programa ambiental de Naciones Unidas (PNUMA), el centro de ciencias ambientales de la universidad de Leiden (CML) y la Organización Internacional de normalización (ISO).

En 1992 se fundó la Sociedad para la Promoción y Desarrollo de ACV (SPOLD) que fue una asociación de 20 empresas europeas (entre ellas Ciba, Danfoss, Dow Corning, Electricote de France, Procter & Gamble y Unilever) con la finalidad de ayudar en la construcción de metodologías sobre ACV y promover su aplicación en la industria. De las actividades de esta asociación se desprende la publicación por parte de SETAC en 1993 de su código de buenas prácticas, que describe los componentes de ACV (objetivo y definición del alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto y evaluación de mejora).

A finales de 1990 se incrementó la demanda de estándares sobre la metodología de ACV y la ISO basándose en el trabajo realizado por la SETAC empezó a desarrollar las normas ISO 14040 sobre Evaluación de Ciclo de Vida las cuales han sido publicadas desde 1997 con la última actualización en 2006. Anteriormente existían cuatro normas relacionadas al ACV (ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043) pero en la última revisión realizada en el 2006 se redujeron a dos normas que son la ISO 14040 y la ISO 14044.

- ISO 14040. Describe los principios y marco de trabajo para el ACV. Incluye la definición de los objetivos y alcance, la fase de inventario de

ciclo de vida, la fase del análisis del impacto de ciclo de vida, la fase de interpretación de ciclo de vida, la revisión y reporte del ACV, las limitaciones del ACV, la relación entre las distintas etapas del análisis y la condiciones para las elecciones de valor y elementos opcionales. No describe la técnica de ACV al detalle ni especifica las metodologías de cada fase. (ISO 14040, 2006).

- ISO14044. Especifica requerimientos y proporciona directrices para el ACV, incluyendo: definición del objetivo y el alcance del ACV, la fase de análisis del inventario de ciclo de vida, la fase de evaluación análisis de impacto de ciclo de vida, la fase de interpretación del ciclo de vida, revisión crítica e informe de ACV, limitaciones de ACV, relación entre las fases de ACV y condiciones de uso de las opciones de valor y elementos opcionales (ISO 14044, 2006)

2.10.2. Definición de análisis de ciclo de vida

ISO 14040 define el análisis de ciclo de vida como una metodología que consiste en la recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto (conjunto de procesos unitarios conectados material y energéticamente que realizan una o más funciones definidas) durante su ciclo de vida. (ISO 14040:2006 Gestión ambiental – Evaluación de Ciclo de Vida – Practicas y principios)

El ACV es una herramienta de gestión ambiental para comprender y comparar cómo es proporcionado un producto o servicio “de la cuna a la tumba”. La técnica examina cada etapa del ciclo de vida, desde la adquisición de materias primas, a través de la fabricación, distribución, uso, posible reutilización y/o reciclado y por ultimo su disposición final, incluyendo las fases intermedias de cada etapa. Se calculan las entradas (materiales, recursos y energía) y salidas (emisiones al aire, agua y residuos sólidos) para cada operación y/o procesos dentro de cada una de las etapas del sistema. Los problemas ambientales asociados con estas entradas y salidas son evaluados durante la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, proporcionando una visión general del impacto

ambiental del sistema durante todo su ciclo de vida. De esta forma el ACV permite tener una mejor comprensión de los sistemas y realizar comparaciones.

2.10.3 Etapas del análisis de ciclo de vida

El ACV consiste en cuatro etapas metodológicas (ISO 14040), definición de objetivos, análisis de inventario, evaluación de impacto de ciclo de vida e interpretación de ciclo de vida (Figura 2.11).

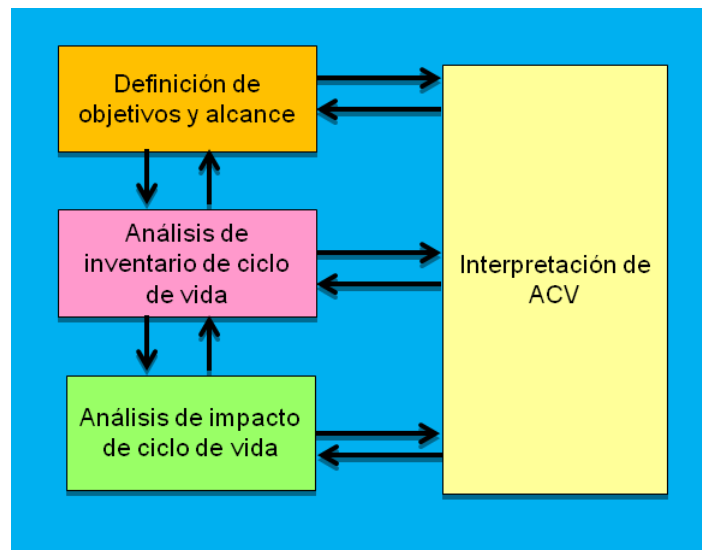


Figura 2.11 Las fases de un ACV según ISO 14040

2.10.3.1. Definición de objetivos y alcance

En esta primer etapa se define la unidad funcional para la comparación (normalmente por uso equivalente), así como el propósito del estudio, límites del sistema, etapas de ciclo de vida, procesos de unidad y ámbito de la evaluación, así como la definición de procesos que garantices la calidad de los datos.

Definición de objetivos. El objetivo de un estudio de ACV debe mencionar sin ambigüedades la aplicación planeada, las razones para llevar a cabo el estudio y la audiencia a quien va dirigido (ISO 14044).

Se declara la razón de realizar el estudio, se definen las opciones que serán comparadas y el uso de los resultados, se identifican los límites del sistema (técnico, geográfico y temporal) y el procedimiento para el manejo de datos.

Definición del alcance. Los alcances deben estar suficientemente bien definidos para asegurar que la amplitud, profundidad y detalles del estudio son compatibles y suficientes para abordar el objetivo planteado (ISO 14040)

Deben describirse claramente las funciones del sistema de producto, la unidad funcional, límites del sistema de producto, procedimientos de asignación, tipos de indicadores y metodología de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida , la Interpretación de Ciclo de Vida que va a utilizarse, requerimientos de datos, suposiciones y limitaciones.

Sistema de producto. Un sistema de producto es un conjunto de operaciones conectadas por flujos de productos intermedios, que realizan una o más funciones definidas. (ISO 14040)

El sistema de producto es el conjunto de operaciones interconectadas que se presentan durante el ciclo de vida de un producto o la presentación de un servicio determinado (Mc Dougall et al 2004)

Unidad funcional. La unidad funcional es una unidad de medida del desempeño de salidas funcionales del sistema de producto. Se expresa en términos de cantidad de producto y debe estar relacionado con la función de un servicio o producto. Todas las entradas y salidas se calculan por unidad funcional, por lo tanto cualquier alteración en el tamaño de la unidad funcional tendrá efecto importante en los resultados de la evaluación.

Límites del sistema. Los límites del sistema definen los procesos unitarios que serán incluidos en el sistema que va a modelarse. Idealmente, el sistema de producto debe modelarse de manera tal que las entradas y salidas en sus límites son flujos elementales. (ISO 14044)

Se debe determinar el grado de detalle que se incluirá en cada etapa del ciclo de vida y también cuáles serán las entradas y salidas que deben incluirse en el estudio.

2.10.3.2. Análisis de inventario de ciclo de vida

Proceso de contabilización de todas las entradas y salidas del sistema durante el ciclo de vida del producto. Esto implica la construcción de un balance de

materiales y energía para cada paso en el ciclo de vida, que resultará en una lista de materias primas e insumos de energía y de emisiones individuales al aire, agua y residuos sólidos que es llamada Inventario de Ciclo de Vida. El procedimiento para el análisis de inventario de ciclo de vida se muestra en la Figura 2.12.

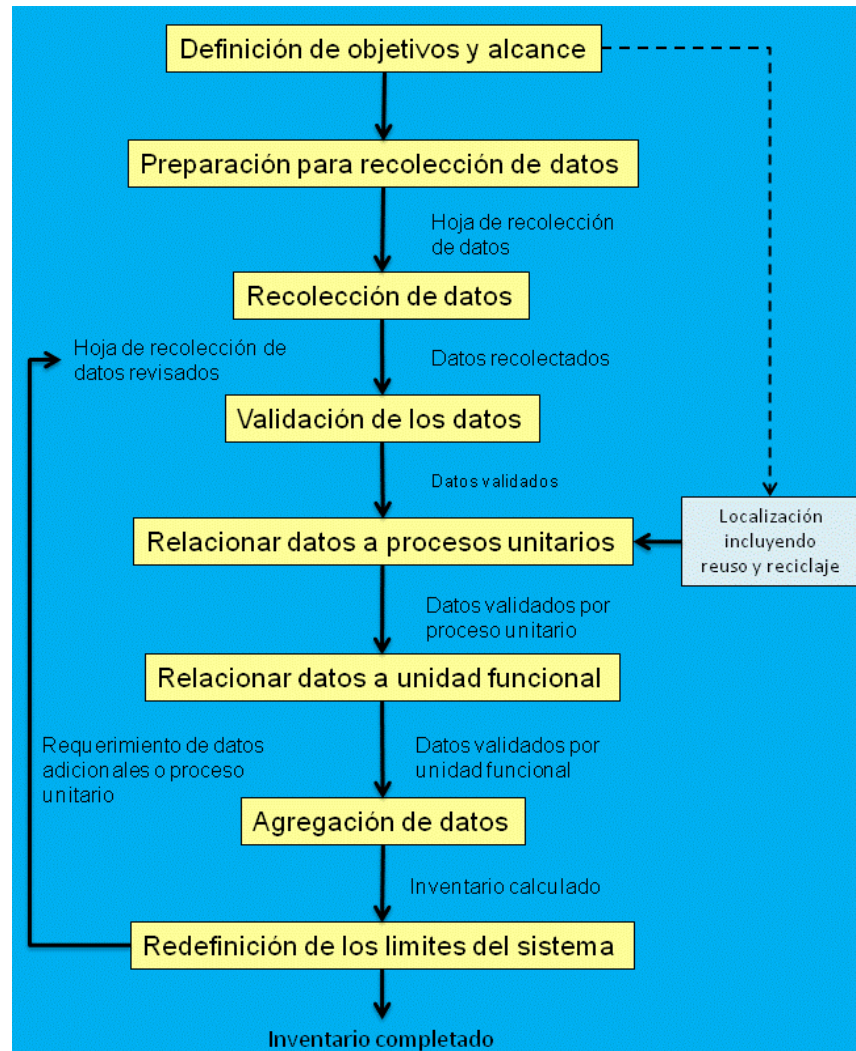


Figura 2.12. Procedimiento para el análisis de inventario de ciclo de vida. (ISO 14044)

Modelos de inventario de ciclo de vida para sistemas de gestión de residuos sólidos

Existe una amplia variedad de modelos de inventario de ciclo de vida específicos para evaluar sistemas de gestión de residuos sólidos tanto públicos como comerciales, todos ellos manejan su propia base de datos de emisiones y

dependiendo del modelo seleccionado, los resultados y conclusiones del estudio pueden variar, algunos de los modelos ofrecen también datos de entrada predeterminados.

IWM-2. (*Integrated Waste Management Version 2*) (McDougall et al, 2004), desarrollado por Procter & Gamble y disponible desde 2004. Este modelo que tiene una interface en ambiente Windows, permite calcular las cargas ambientales y los costos económicos del sistema de gestión de residuos modelado. Incluye los procesos unitarios de generación, recolección, almacenamiento, tratamiento biológico aerobio y anaerobio, tratamiento térmico, disposición final y generación de energía a partir de ellos. Todos los cálculos son transparentes para el usuario y los datos empleados pueden ser los predeterminados por el modelo o ingresados por el usuario. Los resultados se presentan en forma de inventario de emisiones y costos totales del sistema.

IWMMM. (*Integrated Waste Management Model for Municipalities*) (Haight, 2004), desarrollado por la Universidad de Waterloo (Canadá), con el apoyo de CSR/EPIC (*Corporation Supporting Recycling and the Environmental and Plastic Industry Council*), disponible desde 2000. Todos los datos de entrada al sistema deben ser proporcionados por el usuario ya que el sistema no cuenta con datos predeterminados excepto por el Mix Energético y la composición de los residuos. El resultado obtenido de este modelo se presenta en forma de inventario de emisiones.

WARM. (*Waste Reduction Model*) (EPA, 2006), desarrollado por la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos, disponible desde 2006. Este modelo calcula únicamente las emisiones de gases de efecto invernadero de un sistema de gestión de residuos, no calcula las emisiones al aire o al agua. Incluye los procesos unitarios de reducción en la fuente, reciclado, combustión, compostaje y disposición final. La interfase con el usuario es a través de una hoja de cálculo.

WRATE. (*Waste and Resource Assessment Tool for Environment*) (UK, *Environmet Agency, 2006*) desarrollado por la UK, Environment Agency, disponible desde 2006. La base de datos del modelo corresponde

principalmente al proceso de manejo de residuos de UK y la Unión Europea. La interface es amigable con el usuario. Los datos para modelar los escenarios pueden ser los predeterminado por el sistema o ingresados por el usuario. Cuenta con una amplia base de datos que está en continua revisión y actualización para el Mix Energético, composición de los residuos, procesos unitarios que incluyen las nuevas tecnologías de tratamiento, inventario de emisiones y metodologías de impacto de ciclo de vida. Los resultados son categorías de impacto ambiental potencial.

WISARD. (*Waste Integral Systems for Assessment of Recovery and Disposal*) (Ecobilan, 1999) desarrollado por Ecobilan, disponible desde 1999. Este sistema cuenta con una interface amigable para el usuario. Los procesos unitarios con los que cuenta son disposición en relleno sanitario, incineración, segregación – reciclaje, compostaje y digestión anaerobia. Los datos de entrada pueden ser ingresados por el usuario o utilizar los predeterminados por el sistema que cuenta con la base de datos Ecobilan. El sistema verifica la consistencia de los escenarios automáticamente. Incorpora las principales metodologías de evaluación de impacto ambiental de forma que el usuario puede decidir con que metodología desea calcular el potencial de impacto ambiental.

EASEWASTE. (*Environmental Assessment of Solid Waste Systems and Technologies*) (Kirkeby et al, 2006), desarrollado por Danmarks Tekniske Universitet (DTU), disponible desde 2005. Este modelo contiene datos preestablecidos de composición de residuos, eficiencias de segregación en la fuente y algunos procesos técnicos. Los procesos unitarios que incluye son recolección, transporte, PRM, tratamiento térmico, compostaje, digestión anaerobia, relleno sanitario, reciclaje, uso de tierra, utilización de materiales y utilización de energía. El usuario puede ingresar sus propios datos de entrada. El sistema calcula el flujo de masa, recursos utilizados y recuperación y provee un inventario de emisiones al aire, agua y tierra. Los inventarios detallados se agregan en categorías de impacto el sistema utiliza el método de evaluación de impacto EDIP como valor predeterminado, pero también pueden utilizarse otros métodos.

Calidad de los datos del inventario de ciclo de vida

Al elaborar un análisis de ciclo de vida se requiere de un gran número de datos procedentes de diversas fuentes y de éstos depende la calidad y credibilidad de los resultados del ACV.

De acuerdo a McDougall et al (2004), existen dos categorías de datos utilizados en un ACV de un sistema de gestión de residuos.

1. Datos específicos, con respecto a la producción y manejo de residuos
2. Datos genéricos, relativos a la producción de energía, extracción de materias primas y transporte.

Los requerimientos de calidad de los datos deben abordar problemas relacionados con el tiempo, la ubicación y la tecnología; precisión, representatividad de los datos y si éstos están o no completos; consistencia y reproducibilidad de los métodos utilizados a través del ACV; fuentes de información, su representatividad y la incertidumbre de la información.

2.10.3.3. Análisis de impacto de ciclo de vida (AICV)

La fase de AICV tiene como objetivo evaluar la importancia de los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del inventario de ciclo de vida. En general, este proceso implica asociar datos de inventario con categorías específicas de impacto ambiental e indicadores de categoría y con ello intentar entender estos impactos. La fase AICV también proporciona información para la fase de interpretación del ciclo de vida (ISO 14040).

El AICV se compone de varios elementos obligatorios tales como:

- *Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y método de caracterización*
- *Clasificación*

La etapa de clasificación requiere la identificación de los datos del inventario que son relevantes para cada categoría de impacto y la asignación de los resultados adecuados del ICV a cada categoría. (McDougall et al, 2004). Una categoría de impacto es una clase que

representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de producto.

- *Caracterización.*

La etapa de caracterización convierte los resultados del inventario de ciclo de vida en resultados de indicadores ambientales, requiere cálculos para evaluar la significancia relativa de cada factor contribuyente al impacto global del sistema convirtiéndolos en un indicador común. Cada categoría de impacto, por ejemplo: *potencial de calentamiento global*, requiere de una representación cuantitativa denominada indicador de categoría, por ejemplo: *dióxido de carbono equivalente*. La suma de diferentes intervenciones ambientales para una misma categoría se hará en la unidad del indicador de la categoría (ver Figura 2.13). Mediante los factores de caracterización las diferentes emisiones ambientales se convierten en unidades del indicador.

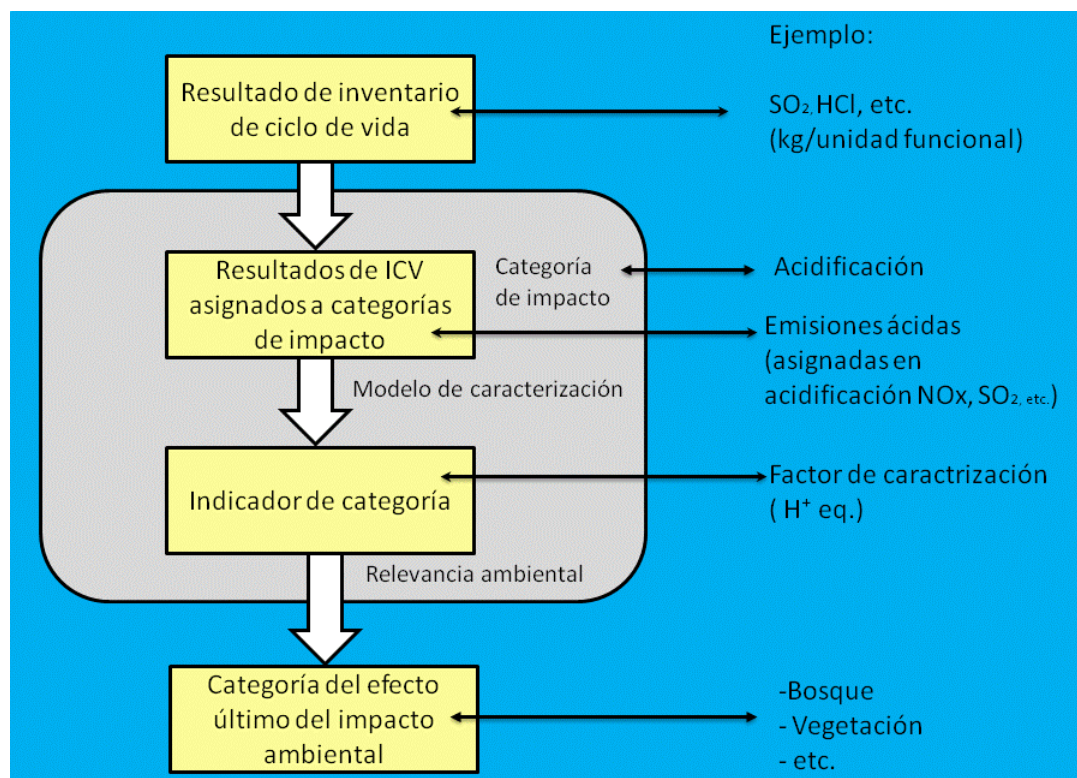


Figura 2.13. Concepto de indicador de categoría (ISO 14044)

También existen elementos opcionales como la normalización, agrupamiento, ponderación.

- *Normalización*

ISO 14044 define la normalización como el cálculo de la magnitud de los resultados del indicador de categoría en relación con alguna información de referencia. El objetivo de la normalización es comprender mejor la magnitud relativa de cada resultado de los indicadores del sistema bajo estudio. El sistema de referencia puede ser a escala geográfica global, nacional o local; o per cápita en un periodo determinado.

- *Agrupamiento*

El agrupamiento es la asignación de las categorías de impacto en uno o más grupos predefinidos en la definición del objetivo y alcance, e implica el ordenamiento y clasificación. (ISO 14044)

- *Ponderación*

La ponderación es el proceso de conversión de resultados de indicadores de diferentes categorías de impacto en calificaciones, utilizando factores numéricos que se basan en valores. Puede incluir el agrupamiento de los resultados ponderados en una calificación global (ISO 14044)

Tanto la fase de agrupamiento como la de ponderación están basadas en juicios de valor y no tiene una base científica, diferentes individuos, organizaciones y sociedades pueden tener distintas preferencias por lo que es posible que obtengan diferentes resultados aún basados en los mismos resultados de indicadores o resultados de indicadores normalizados.

Categorías de impacto ambiental

En la metodología de CML (Guineé et al 2002), se propone una lista de categorías de impacto basada en el trabajo de WIA-2 Working group on Impact Assessment de Udo de Haes et al (1999). Esta lista clasifica las categorías de impacto en tres grupos: Grupo A: Categorías de impacto base; Grupo B: Categorías de impacto específicas; Grupo C: Otras categorías de impacto. Las categorías de impacto del grupo A son las que se utilizan en la mayoría de los ACV (Guinee et al 2002). En la Tabla 2.3 se muestran las categorías de impacto ambiental del Grupo A y su indicador basados en la propuesta de Guinee et al. (2002).

Tabla 2.3. Categorías de impacto ambiental relacionadas a indicador de impacto ambiental.

Categorías de impacto A. Categorías de impacto base	Unidades de Indicador de impacto
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq
Impactos de uso de suelo	m ² . año
Cambio Climático	kg CO ₂ eq
Agotamiento de ozono estratosférico	Kg CFC-11 eq
Toxicidad humana	kg DBC eq
Ecotoxicidad Agua dulce Agua marina Terrestre	kg 1.4 DBC eq
Formación de foto-oxidantes	kg C ₂ H ₄ eq
Acidificación	kg SO ₂ eq.
Eutrofización	kg PO ₄ ³⁻ eq.

- Agotamiento de recursos abióticos

Los recursos abióticos son los recursos naturales, incluyendo los recursos energéticos como el mineral de hierro, petróleo y energía eólica.

Se pueden distinguir tres tipos de recursos abióticos: depósitos, fondos y flujos. Los depósitos son los recursos que no es posible regenerar en el tiempo de duración de una vida humana, como por ejemplo los depósitos de combustibles fósiles, minerales, sedimentos, arcilla, etc. Los fondos son recursos que se pueden regenerar como las aguas subterráneas y el suelo. Los flujos son recursos que pueden regenerarse constantemente como el viento, el agua de río y la energía solar.

- Cambio Climático

En la metodología CML se define el cambio climático como el impacto de las emisiones humanas al forzamiento radiativo. Pudiendo provocar impactos adversos en el ecosistema, la salud humana, y el bienestar material. La mayor parte de estas emisiones incrementan el forzamiento radiativo causando incremento en la temperatura de la superficie de la tierra. Es a lo que popularmente se le conoce como efecto invernadero. Esta categoría de impacto afectará a la salud humana, el ambiente natural y el ambiente modificado por el hombre

- Agotamiento de ozono estratosférico

Agotamiento del ozono estratosférico se refiere al adelgazamiento de la capa de ozono estratosférica como consecuencia de las emisiones antropogénicas. Esto provoca una mayor fracción de la radiación solar UV-B para llegar a la superficie terrestre, con efectos potencialmente nocivos sobre la salud humana, salud animal, los ecosistemas terrestres y acuáticos, ciclos materiales y bioquímicos (UNEP, 1998, citado en Guineé, 2001). Agotamiento del ozono estratosférico por lo tanto incide en las cuatro áreas de protección: salud humana, el medio ambiente, el entorno artificial y recursos naturales.

- Toxicidad humana

Esta categoría de impacto cubre los impactos en la salud humana de las sustancias tóxicas presentes en el medio ambiente. Su protección es la salud humana.

- Eco-toxicidad

Esta categoría de impacto cubre los efectos de sustancias tóxicas a los ecosistemas acuáticos, terrestres y sedimentos. El área de protección es el medio natural. El impacto eco-toxicológico, junto con el impacto toxicológico humano, son las categorías para las cuales el factor destino y transporte a través de diferentes medios son de mucha importancia. Las sustancias tóxicas no suelen permanecer en el compartimento medioambiental en el que se emiten, si no que tienden a propagarse a otros compartimentos, donde pueden ocasionar más daño. Por ejemplo los insecticidas también se sedimentan en los cursos de agua donde pueden causar grave daño a los organismos acuáticos.

- Formación de foto-oxidantes

La formación de foto-oxidante es la formación de compuestos químicos reactivos como el ozono por la acción de la luz solar sobre ciertos contaminantes primarios del aire. Estos compuestos reactivos pueden resultar perjudiciales para los ecosistemas, la salud humana y también pueden dañar los cultivos. Las áreas pertinentes de protección son la salud humana, el entorno artificial, el

entorno natural y recursos naturales (Udo de Haes et al., 1999 citado en Guineé et al. 2001).

Los foto-oxidantes pueden formarse en la troposfera bajo la influencia de la luz ultravioleta, a través de oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles (COV) y monóxido de carbono (CO) en presencia de óxidos de nitrógeno (NO_x). El ozono es considerado el más importante de estos compuestos oxidantes, junto con peroxyacetylnitrato. La formación de foto-oxidante, también es conocida como smog de verano o contaminación de aire secundario, contrasta con el smog de invierno, que se caracteriza por altos niveles de compuestos inorgánicos, principalmente partículas, monóxido de carbono y compuestos de azufre. Este último tipo de smog causa irritación bronquial, tos, etc.

- Acidificación

Los contaminantes acidificantes tienen una gran variedad de impactos sobre el suelo, las aguas subterráneas, aguas superficiales, organismos biológicos, ecosistemas y materiales (edificios). Ejemplos incluyen la mortalidad de peces en lagos, disminución de bosques y el desmoronamiento de materiales de construcción. Los contaminantes más acidificantes son el SO₂, NO_x y el NH_x. Las áreas de protección son el medio ambiente, el entorno artificial, salud humana y los recursos naturales.

La acidificación es una de las categorías de impacto, en la que la sensibilidad local juega un papel importante y la posibilidad de incluir las diferencias regionales en el modelo de ACV ha sido un tema clave en los últimos años. (Guineé et al., 2001)

- Eutrofización

La eutrofización cubre todos los posibles impactos de niveles ambientales excesivamente altos de macronutrientes, de los cuales los más importantes son nitrógeno (N) y fósforo (P). El enriquecimiento de nutrientes puede causar un cambio indeseable en composición de especies y producción elevada de biomasa en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Además, altas concentraciones de nutrientes en las aguas superficiales las pueden convertir en

una fuente inaceptable de agua potable. En los ecosistemas acuáticos un incremento en la producción de biomasa puede inducir a una depresión de los niveles de oxígeno, debido al consumo adicional de oxígeno por la descomposición de la biomasa (que se mide como demanda biológica de oxígeno DBO). Las áreas de protección son el medio ambiente, recursos naturales y el entorno artificial.

Métodos de análisis de impacto ambiental

Existen diferentes métodos de análisis de impacto ambiental que pueden clasificarse básicamente en dos tipos (1) Los que analizan el efecto último del impacto ambiental “*endpoint*” y (2) Los que analizan los efectos intermedios “*midpoints*”.

Los modelos de evaluación de efectos intermedios reflejan la potencia relativa de las cargas en un punto común medio dentro de la cadena de causa-efecto, además minimizan la cantidad de predicción y modelación incorporado al AICV, reduciendo la complejidad de la modelación. Los modelos de evaluación de efectos intermedios minimizan los supuestos y los juicios de valor, reflejan un mayor nivel de consenso social y son más sencillos de entender en comparación con los modelos que analizan el efecto último del impacto ambiental (Bare et al 2003)

Los modelos de evaluación del efecto último calculan las diferencias entre los estresores en un extremo de una cadena causa-efecto que pueden ser de interés para la comprensión del efecto final en la sociedad, tales como las medidas de cambio en la biodiversidad (Bare y Hofstetter, 2000), efectos sobre la salud humana, agotamiento de los recursos etc.

Algunos métodos de análisis de impacto de ciclo de vida de evaluación de efecto medio y evaluación de efecto final se presentan en la Tabla 2.4

Tabla 2.4. Modelos de evaluación de impacto de ciclo de vida

Modelo	Tipo de evaluación	Desarrolladores	País
CML 1992, actualizado en 2001	Midpoints	Guinée et al. (2001). Institute of Environmental Sciences (CML). Universiteit Leiden.	Países Bajos
EDIP 2003 (Environmental Development of Industrial Products)	Midpoints	Hauschild & Potting. (2005). Danish Ministry of the Environment.	Dinamarca
The Ecological Scarcity Method – Eco-Factor 2006	Endpoint	Frischknecht et al. (2009). Federal Office for the Environment, Bern	Suiza
TRACI 2005	Midpoints	Bare et al. (2003). US Environment Protection Agency (EPA)	Estados Unidos
EPS (Environmental Process Strategy)	Endpoints	Steen B. (1999). Centre for the environmental assessment of Products and Material systems	Suecia
Ecoindicador 95	Endpoints	Goedkoop. (1995). The Dutch NOH programe by PRé Consultants.	Países Bajos
Ecoindicador 99	Endpoints	Goedkoop eta al. (2001). The Dutch Ministry of Housing, Spactial Planning and Environment (VROM) programe by PRé Consultans	Países Bajos
ReCiPe	Midpoints y Endpoints	Goedkoop and Spriensmand (2009). The Dutch Ministry of Housing, Spactial Planning and Environment (VROM) programe by PRé Consultans	Países Bajos

En la Figura 2.14 se esquematiza la relación entre los resultados de inventario de ciclo de vida, indicadores de efectos intermedios “*midpoints*” e indicadores de efectos finales “*endpoints*”, del modelo de AICV ReCiPe 2008.

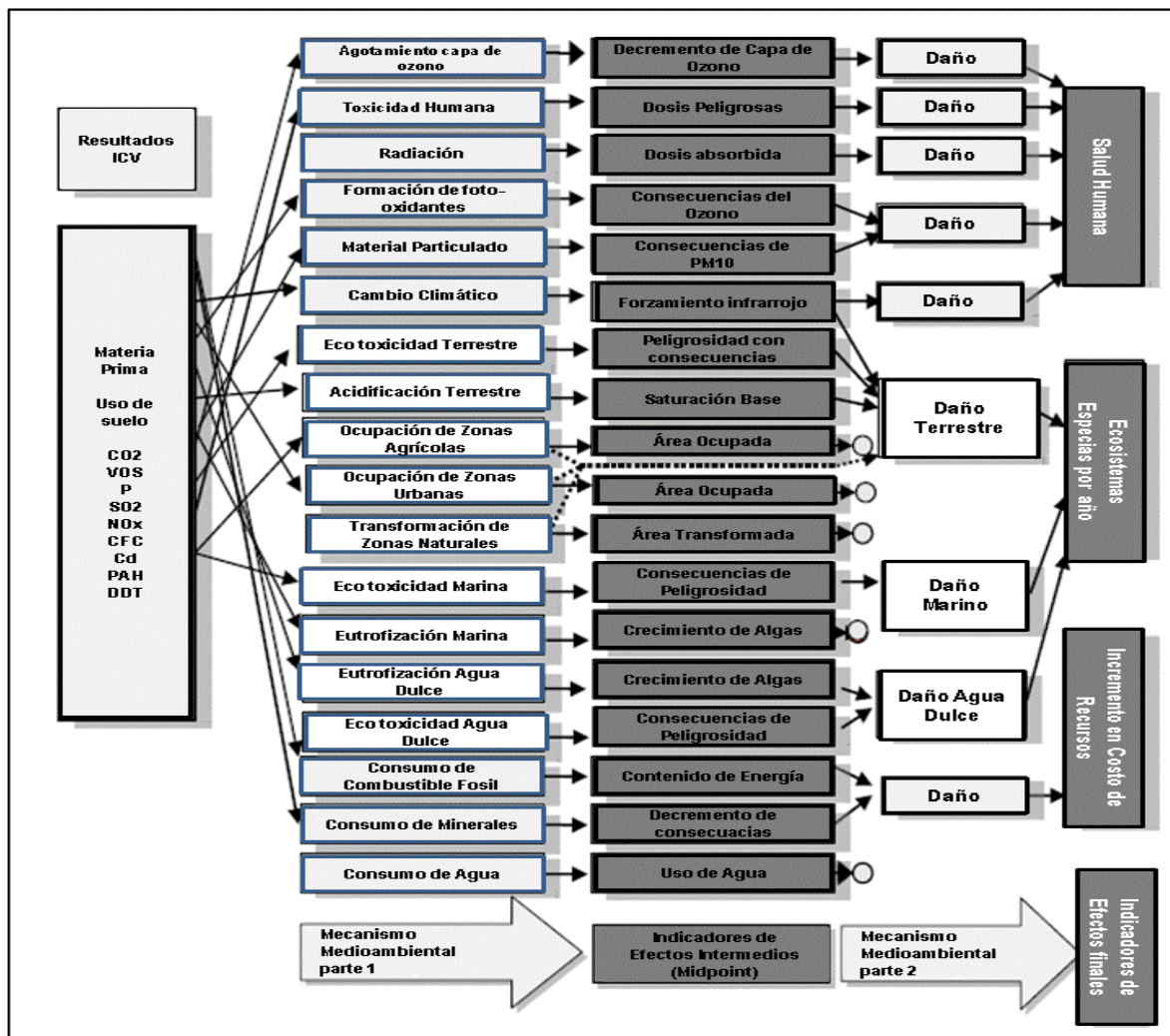


Figura 2.14. Relación entre el ICV, los indicadores intermedios e indicadores finales en el modelo de AICV ReCiPe 2008.

2.10.3.4. Interpretación de análisis de ciclo de vida

La interpretación del ciclo de vida es la fase en que se evalúan los resultados del análisis y todas las opciones y supuestos realizados durante el curso del análisis en términos de solidez y robustez; los elementos principales de la fase de interpretación de ciclo de vida son la evaluación de resultados, análisis de resultados y la formulación de conclusiones y recomendaciones. (Guineé et al., 2001). La relación entre la fase de interpretación de ciclo de vida y los otros elementos del ACV se esquematizan en la Figura 2.15.

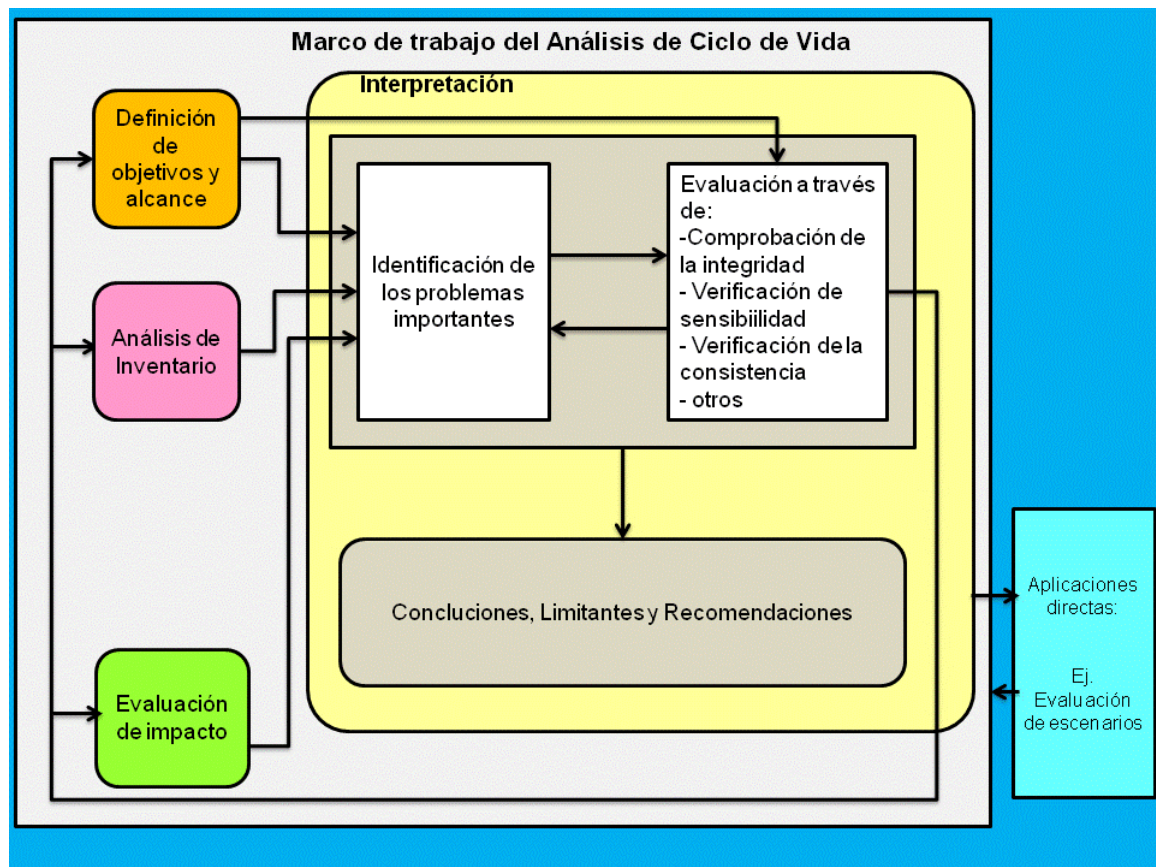


Figura 2.15. Relaciones entre los elementos de la fase de interpretación y las otras fases de ACV (ISO/FDIS 14044: 2006)

El método CML (Guineé et al. 2001) propone un proceso para la interpretación de ciclo de vida consistente en 1) comprobación de la consistencia, 2) verificación de la integridad, 3) análisis de contribución, 4) análisis de sensibilidad y 5) conclusiones y recomendaciones.

- **Comprobación de la consistencia**

El objetivo de la comprobación de la consistencia es determinar si los supuestos, métodos, modelos y datos son consistentes con el objetivo y alcance del estudio, tanto durante el ciclo de vida del producto y a través de las diferentes opciones analizadas. Guineé et al. (2001) propone iniciar la interpretación de ACV con la comprobación de consistencia al contrario de ISO 14044 (que la ubica después de las técnicas de verificación de integridad y análisis de sensibilidad) por que indica que si no hay consistencia todos los otros análisis de resultados y sensibilidad serían intrascendentes.

- **Verificación de la integridad**

Al verificar la integridad se asegura de que esté disponible y completa toda la información relevante y datos necesarios para la fase de interpretación de resultados.

- **Análisis de contribución**

En el análisis de contribución se calcula la contribución general de los resultados de los diversos actores. Usualmente éstos son expresados en porcentajes. El análisis de contribución responde a las preguntas acerca de la contribución de los flujos ambientales específicos, procesos o impactos a un determinado puntaje ambiental.

- **Análisis de sensibilidad**

Para poder utilizar el ACV como una herramienta para la toma de decisiones, se requiere información sobre la solidez de los resultados obtenidos. Por esta razón éste elemento de la fase de interpretación de ciclo de vida evalúa la influencia que tienen en los resultados las variaciones en los datos de los procesos, elección de modelos y otras variables. En el análisis de sensibilidad, estos cambios se llevan a cabo deliberadamente con el fin de determinar la robustez de los resultados en relación con estas variaciones.

Capítulo 3. Metodología

Esta investigación se desarrolló en el área urbana de la ciudad de Mexicali cabecera municipal y capital de estado de Baja California, México. Ésta ciudad colinda al norte con Estados Unidos de América; al este con el estado de Sonora y el Golfo de California; al sur con el Golfo de California y el municipio de Ensenada; al oeste con los municipios de Ensenada y Tecate (Gobierno del estado de Baja California, 2008). (Figura 3.1).



Figura 3.1. Municipios de Baja California y cabeceras municipales

El municipio de Mexicali cuenta con una población de aproximadamente un millón de habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2010) y genera en promedio 1300 toneladas de residuos sólidos urbanos al día de acuerdo a datos proporcionados por el departamento del servicio de limpia del municipio, se estima que el 67% corresponden a residuos domiciliarios, 22% a residuos comerciales y 11% de residuos industriales.

Actualmente en el municipio de Mexicali existen aproximadamente 20,330 establecimientos comerciales y de servicio (Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas [DENUE], 2011) de los cuales el 56.45% se considera micro-negocio. De acuerdo a la estratificación de empresas publicado en los Censos Económicos de 2009 existen cuatro estratos de negocio dentro del sector comercial basado en el personal ocupado, estos son definidos como negocios micro, chico, mediano y grande. Los micro-negocios son los establecimientos comerciales o de servicio que cuentan con un número de 0 a 10 empleados.

Los residuos comerciales son los que se generan dentro de establecimientos comerciales y de servicio como consecuencia de la actividad que se desarrolla en los diferentes circuitos de distribución de bienes de consumo (embalajes, residuos orgánicos de mercados entre otros.). De acuerdo a la Ley General para la Gestión Integral de Residuos (2003) los residuos comerciales son considerados como residuos sólidos urbanos cuando son generados por micro y pequeños generadores y son considerados como residuos especiales cuando son generados por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

El objeto de estudio de esta investigación son los residuos generados por los micro-negocios del sector comercial ubicados dentro del área urbana de la ciudad de Mexicali. (Figura 3.2).

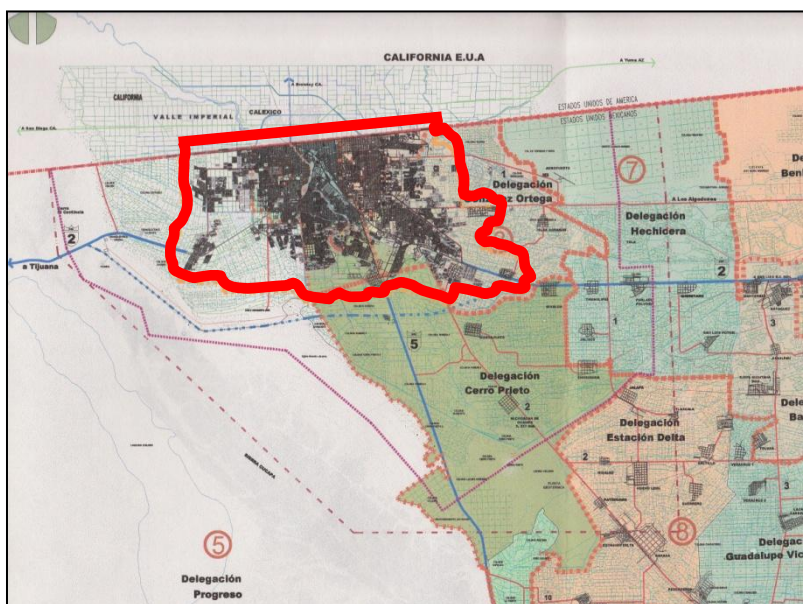


Figura 3.2. Delimitación del área urbana de la ciudad de Mexicali

Para desarrollar esta investigación la metodología se estructuró en cuatro etapas:

1. Análisis de la situación actual del sistema de manejo de residuos comerciales en la ciudad de Mexicali,
2. Estudio de generación y caracterización de los residuos comerciales,
3. Identificación de tecnologías disponibles a nivel comercial para recuperación y reciclaje de residuos sólidos,
4. Evaluación de escenarios de recuperación y reciclaje de residuos sólidos comerciales.

3.1. Situación actual del sistema de manejo de residuos comerciales en Mexicali

Para analizar la situación actual del manejo de los residuos comerciales se identificaron los actores involucrados en el sistema, la forma en la que interactúan, el flujo que siguen los residuos desde su generación hasta su disposición final, la infraestructura de la ciudad en relación al manejo de los residuos, el mercado de reciclables existente y los costos involucrados.

Para ello primeramente se realizó un análisis del sistema de manejo de residuos comerciales y se identificaron a los grupos que integran el sistema que son: los generadores de residuos, recolectores, acopiadores de reciclables, recicladores, sitios de disposición final e instituciones de gobierno.

3.1.1. Generadores de residuos comerciales

Con relación a los generadores de residuos de este sector fue necesario conocer la cantidad total de establecimientos comerciales y de servicios existentes, el giro al que pertenecen, su localización y la cantidad promedio de residuos generados. Para conocer éstos datos se consultaron bases de datos de INEGI de los censos económicos del 2009 y del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas actualizado al 2011, además se realizó una búsqueda específica para localizar y contabilizar las unidades económicas consideradas como micro-negocios. Para conocer la cantidad estimada de residuos generados por este sector se realizó un estudio de generación y composición de residuos.

3.1.2. Recolectores

Para analizar las actividades de los prestadores del servicio de recolección, se diseñó un instrumento (ANEXO 1), en el que se incluyeron preguntas para conocer los tipos de comercios a los que presta servicio, el destino de los residuos recolectados, el flujo de los residuos desde la recolección hasta su disposición, la infraestructura con la que cuentan, la relación con los demás recolectores, su relación con el municipio y con el sitio de disposición, identificar si realizan recuperación de reciclables o algún proceso de reciclaje, la cantidad de residuos que recolectan, el tipo de recolección que realizan: mixta o fraccionada, el costo de recolección por tonelada de residuos y la forma en la que disponen de los residuos.

3.1.3 Acopiadores

Para conocer el mercado de reciclables en Mexicali se elaboró un directorio de acopiadores de reciclables en la ciudad, por lo que para efectos de este trabajo fue necesario establecer una definición de acopiador.

El acopiador es una empresa que compra y vende reciclables y el único proceso que realiza es la segregación, prensado y transporte. Para obtener la información referente a la oferta y demanda de los materiales, precios de compra/venta, ofertantes y demandantes, entre otros, se diseñó un instrumento (ANEXO 2).

3.1.4. Recicladores

Con el objetivo de identificar las tecnologías de reciclaje que actualmente se emplean en la ciudad de Mexicali, se consultó la base de datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas y se hizo un sondeo de las empresas dedicadas al reciclaje de residuos; se definió el concepto de reciclador para el desarrollo de este trabajo como la empresa que realiza procesos de transformación de los materiales desechados ya sea limpieza, triturado, conversión u otro. Para obtener la información requerida se realizaron visitas a los recicladores y se les aplicó una entrevista. (ANEXO 2).

3.1.5. Sitios de disposición final

Se realizaron visitas al sitio de disposición final de los residuos comerciales para identificar los tratamientos de estabilización, recuperación de reciclables, proceso de disposición u otros que se estuvieran realizando.

3.2. Muestreo para cuantificar los residuos comerciales

En la (Figura 3.3) se muestran los pasos metodológicos para realizar el estudio de generación y caracterización de los residuos comerciales.



Figura 3.3. Metodología para la caracterización y cuantificación de residuos comerciales

Se definieron y seleccionaron los sujetos de estudio con base a tres criterios de inclusión:

1. Tipo de actividad económica:
 - a. Establecimientos con actividad económica comercial.- Tiendas de abarrotes, licorerías, venta de frutas y verduras al menudeo, carnicerías, farmacias, refaccionarias, joyerías, tiendas de ropa, librerías, ferreterías y otros.
 - b. Establecimientos con actividad económica de servicios.- Restaurantes, bares y discotecas, consultorios médicos, estéticas, oficinas, gimnasios, servicios cambiarios, pequeños institutos educativos, mensajerías y otros.
2. Tamaño del establecimiento, basado en el número de personal ocupado de 0 a 10.
3. Servicio de recolección de residuos, proporcionado por el departamento de limpia del municipio

3.2.1. Determinación de la muestra para selección de micronegocios

Para definir el tamaño de la muestra para determinar la generación se utilizó la ecuación Ec.(1) con lo que se aseguraba tener un tamaño de muestra lo suficientemente grande para ser representativo de la población.

Con un nivel de confianza del 95%, error muestral de 0.04, μ , σ y p desconocidas,

$$n = \frac{\left[\frac{Z_{\alpha}}{2} \right]^2 pq}{E^2} \quad \text{Ec.(1)}$$

n : Tamaño de muestra

p : Proporción de la población

q : 1-p

E : Error

A partir de la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas se determinó el total de micro-comercios establecidos en la ciudad

de Mexicali y su localización geográfica, además junto con el departamento de limpia del municipio se analizaron las rutas de recolección con la finalidad de elegir la más representativa al cumplir con las siguientes características: 1) sólo recolectar residuos generados por los tipos de establecimientos definidos y 2) que incluyera la cantidad de comercios necesarios para la muestra.

Una vez seleccionada la ruta se analizó la logística de recolección y la zona de alcance de la ruta. (Figura 3.4).

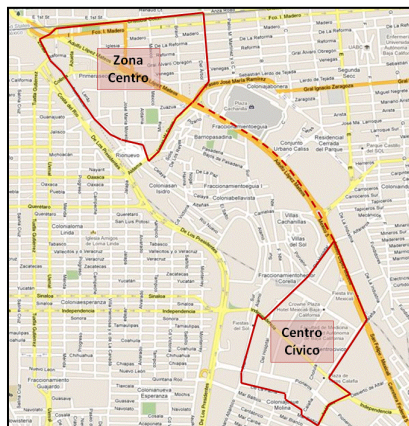


Figura 3.4. Zonas de estudio de caracterización.

Para estimar la generación de residuos se analizaron los datos históricos de recolección proporcionados por el servicio de limpia del municipio.

3.2.2. Cuantificación de sub-productos

La caracterización y cuantificación de sub-productos se efectuó en el relleno sanitario de la ciudad, durante cinco días consecutivos de lunes a viernes en Marzo del 2011.

El tamaño de la población se definió como todos los residuos generados por los establecimientos de la ruta seleccionada durante una semana. Se eligió como unidad de muestreo los residuos recolectados durante el turno matutino, debido a que únicamente durante éste turno es posible obtener una muestra de todo el universo de residuos generados en esta zona durante las actividades matutinas, vespertinas y nocturnas. Para calcular el tamaño mínimo de la muestra total se consideró un muestreo aleatorio sin reemplazo de una población finita con un

grado de confianza del 95% y un error de 0.04, con μ , σ y p desconocidas, con la ecuación Ec.(2) y las sub-muestras se definieron con base a la muestra mínima total dividida entre los días especificados para el muestreo.

$$n = \frac{Npq[Z\alpha/2]^2}{pq[Z\alpha/2]^2 + (N-1)E^2} \quad \text{Ec. (2)}$$

En donde:

n : Tamaño de muestra.

N : Tamaño de la población

p : Proporción de la población

q : 1-p

E : Error

Debido a las características dimensionales de los residuos comerciales que impiden la homogenización y toma de muestras como marca la norma NMX-AA-015-1985, se desarrolló una forma alternativa para realizar la caracterización.

Primeramente se analizó la ruta de recolección y se observó que el recorrido siempre se realizaba en la misma secuencia y horarios, por lo que en cada día el camión recolector pasa por los mismos establecimientos en el mismo orden y a la misma hora; a partir de esto se dedujo que si el recorrido se realiza conforme a lo establecido, la distribución de los residuos dentro del camión en los distintos días de recolección era la misma.

Suponiendo lo anterior, se estableció un patrón de muestreo que consistió en dividir los montículos de residuos recolectados durante cada día en cinco cuadrantes como se presenta en la (Figura 3.5), se seleccionó la primer sub-muestra del cuadrante asignado para el primer día y se fue rotando de cuadrante en los días sucesivos de muestreo hasta completar el total de sub-muestras, obteniendo al final de los cinco días una muestra total representativa de toda el área de muestreo.

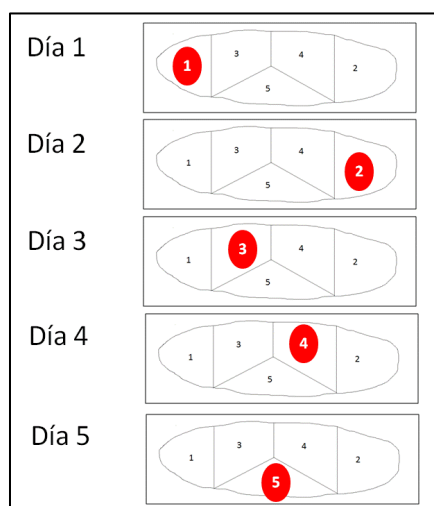


Figura 3.5. Patrón de muestreo por cuadrantes

Durante el muestreo se trabajó con el apoyo del personal del departamento del servicio de limpia de municipio; se tomaron muestras de cada uno de los sub-productos hasta completar la muestra total establecida del día. Los subproductos se depositaron en bolsas de plástico de 58.42cm x 119.38cm de calibre 1.5 mil, se pesaron y se registró este peso en una hoja de registro de campo para selección y cuantificación de subproductos como lo marca la NMX-AA-022-1985 (SECOFI 1985) con modificaciones de acuerdo al tipo de subproductos presentes en el flujo de los residuos comerciales, quedando como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Selección y cuantificación de sub-productos

Sub-producto	Peso kg.	Observaciones
Restos de comida		
Residuos de jardín		
Restos de animales sin procesar y huesos		
Papel periódico, revistas, bond		
Papel encerado		
Papel plastificado		
Cartón corrugado		
Madera		
Tetrapac		
PET		
HDPE		
LDPE		
PP		
PS		
PVC		
Otros plásticos		
Aluminio		

Metales ferrosos		
Vidrio transparente y color		
Textiles		
Papel Sanitario, servilletas, toallas de cocina, toallas para secarse las manos.		
Toallas sanitarias y pañales		
Peligrosos: Envases de aerosol, envases de plaguicidas, medicinas, pilas, envases de: cloro, desengrasantes, aceite)		
Otros orgánicos (cuero, caucho)		
Otros inorgánicos (loza, electrodomésticos, electrónicos, partes de vehículos)		

Se determinó el peso volumétrico de los residuos y de los sub-productos de acuerdo a la norma NMX-AA-019-1985 (SECOFI 1985). El porcentaje en peso de cada uno de los sub-productos se obtuvo con base a la norma NMX-AA-022-1985 (SECOFI 1985) con la ecuación Ec.(3),

$$PS = (G1 / G) \times 100 \quad \text{Ec. (3)}$$

En donde:

PS : Porcentaje del subproducto considerado.

G1 : Peso del subproducto considerado, en kg descontando el peso de la bolsa empleada.

G : Peso total de la muestra

Para determinar el potencial de valorización de los residuos cuantificados se clasificaron en cuatro categorías en base a la propuesta de modificación de la NMX-AA-22-1985 realizada por Espinoza, Raygoza, Turpin y Cisneros, 2008.

- I. Residuos recuperables: reutilizables y reciclables
- II. Residuos con alto poder calorífico
- III. Residuos orgánicos biodegradables
- IV. Residuos para disposición en rellenos sanitarios u otros espacios

Las categorías se integraron como se muestra en la Tabla 2.5 el criterio de clasificación fue excluyente, por lo que cada residuo solo puede ser clasificado en una de las cuatro categorías.

Tabla 2.5 Categorías de subproductos por su potencial de valorización

Categoría	Productos
I. Subproductos recuperables: reutilizables y reciclables.	Papel, cartón, tetrapack, madera, PET, HDPE, LDPE, PP, PS, aluminio, metales ferrosos, vidrio y textiles.
II. Subproductos con alto poder calorífico.	Papel sanitario, servilletas, toallas para manos, toallas sanitarias, pañales y otros plásticos
III. Subproductos orgánicos biodegradables.	Restos de comida, residuos de jardín, restos de animales sin procesar y huesos.
IV. Subproductos para disposición en rellenos sanitarios u otros.	Peligrosos, electrodomésticos, electrónicos, partes de vehículos

3.3. Tecnologías disponibles a nivel comercial para recuperación y reciclaje de residuos sólidos.

Para identificar las tecnologías disponibles para la recuperación y reciclaje de residuos, se tomó como base la cadena de valorización de residuos que se muestra en la Figura 2.2, se identificaron las distintas tecnologías de tratamiento y reciclaje de residuos a través de una investigación bibliográfica, se incluyeron únicamente aquellas tecnologías disponibles a nivel comercial, por su viabilidad para ser introducidas en el sistema de manejo de residuos comerciales de la ciudad.

Para los escenarios se seleccionó un proceso de recolección segregada por ser un factor clave en la reducción de la contaminación de los materiales reciclables y de los residuos orgánicos putrescibles, que contribuye al incremento en el porcentaje de recuperación tanto de material reciclable como de valorización de la materia orgánica.

Para la segregación de los materiales reciclables se seleccionó la Planta de Recuperación de Materiales Semiautomatizada (PRMS), descartando la recuperación manual y la recuperación automatizada, al tomar en cuenta los

factores de capacidad, costos de inversión, costos de operación y número de empleados. En la Tabla 3.2 se muestran los datos de los tres tipos de planta de recuperación de materiales (PRM). La PRMS tiene una capacidad de procesamiento de 100 ton/día suficiente para la generación actual de residuos comerciales, además los costos de operación son menores a los de la recuperación manual.

Tabla 3.2. Capacidades de procesamiento y costos de tres tipos de PRM

	PRM Manual	PRM Semiautomatizada	PRM Automatizada
Capacidad de procesamiento*	50 ton/día	100 ton/día	500 ton/día
Costo de inversión*	\$73000 dls	\$200000 dls	\$1000000 dls
Costo de operación**	\$600 pesos/ton	\$122 pesos/ton	No se tiene el dato
Número de empleados	50 o mas	25 – 30	80 o mas

* Basado en Marketing, R., & For, C. (2003).

** Basado en datos actuales de PRM en Mexicali

Para la selección de los tratamientos de los residuos orgánicos se consideraron las opciones de 1) compostaje, 2) digestión anaerobia, 3) relleno sanitario con recuperación de energía.

Se eligieron los tratamientos de compostaje y digestión anaerobia por los siguientes factores: La naturaleza de los residuos y los sub-productos obtenidos de estos tratamientos.

La tercera opción de confinar los residuos orgánicos en el relleno sanitario con captación de los gases y generación de energía se descartó ya que el relleno sanitario existente en el municipio recibe todos los residuos urbanos, actualmente está concesionado a una empresa particular que no tiene contemplado la captación de gases durante los próximos 20 años que es el periodo de la concesión.

El tratamiento térmico de los residuos como la incineración se descartó debido a que estos procesos requieren de una alta inversión inicial y altos costos de mantenimiento, además para ser costeados deben procesar grandes cantidades de residuos mínimo 180,000 toneladas anuales y ser eficientes (Rand et al. 2000), lo cual depende en gran medida del valor calorífico contenido en los

residuos, por lo tanto requiere de una composición y generación de residuos estable durante todo el año. Los residuos que genera un proceso de incineración son: cenizas, escoria y agua residual de los procesos de limpieza, pero además pueden emitir gases nocivos si no se lleva a cabo la incineración correctamente. Otro factor fundamental en la decisión de descartar este tipo de tratamiento fue la legislación en materia de residuos sólidos que a pesar de permitir la instalación de plantas de incineración de acuerdo a la NOM-098-SEMARNAT-2002, está sujeta al cumplimiento de los estatutos del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP) que busca reducir o eliminar las liberaciones no intencionales de COP's en fuentes estacionarias (como los incineradores de residuos) o difusas (como la quema de basura o de rastrojo agrícola a cielo abierto y el incendio de vertederos de basura) mediante la adopción de “mejores técnicas disponibles” y “mejores prácticas ambientales”, obligando así a tener un estricto control técnico / ambiental de las plantas incineradoras.

3.4. Evaluación de escenarios de recuperación y reciclaje de residuos sólidos comerciales.

Para evaluar los escenarios de recuperación y reciclaje de residuos sólidos comerciales se utilizó la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), para ello se diseñaron cinco diferentes escenarios de manejo de residuos incluyendo el escenario actual y se compararon sus cargas ambientales y costos económicos, utilizando el modelo de Manejo Integral de Residuos IWM-2 desarrollado por McDougall, White, Franke y Hindle. (2004) y la metodología propuesta por el estándar ISO 14040-44 (2006) y la metodología CML (Guineé et al., 2001) para el análisis de impacto de ciclo de vida.

3.4.1. Análisis de ciclo de vida (ACV)

En esta etapa se aplicó el ACV por ser una herramienta adecuada para la evaluación de las cargas ambientales asociadas al proceso del manejo de los residuos comerciales a través de la identificación y cuantificación de las entradas de energía y materiales y las salidas de residuos liberados al ambiente. El ACV consiste en cuatro pasos metodológicos 1) Definición de objetivos y alcance, 2)

Análisis de inventario de ciclo de vida, 3) Análisis de impacto del ciclo de vida e
4) Interpretación del ciclo de vida

3.4.2. Objetivos y alcance

En este estudio se utilizó el ACV con el objetivo de comparar distintos escenarios de recuperación y reciclaje de residuos sólidos comerciales generados en micro-comercios en la ciudad de Mexicali, de acuerdo a sus cargas ambientales, consumo de energía y costos económicos.

La unidad funcional del sistema es el manejo adecuado de todos los residuos generados por micro-negocios comerciales y de servicio de la ciudad de Mexicali.

Los escenarios se diseñaron con base a la situación actual del manejo de los residuos urbanos de la ciudad, además se consideran los sistemas de manejo, procesos y tecnologías utilizadas con éxito en el mundo para crear propuestas. Para objeto de esta investigación se consideran los procesos de recolección mixta o segregada, segregación en planta de recuperación de materiales manual (PRMM) o semiautomatizada, tratamientos biológicos de compostaje o producción de biogás, reciclaje de los sub-productos que se recuperan actualmente en la ciudad pero también de los que tienen potencial y no se han recuperado y disposición final sin generación de energía; también se tomaron en consideración los principios que fundamentan la gestión integral de los residuos en México y las líneas de acción para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos propuestas en el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012, para crear una serie de combinaciones que den como resultado los cinco escenarios que se presentan en la (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Escenarios propuestos para el manejo integral de residuos sólidos comerciales

Escenario	Recolección		PRMM	PRMS	Comp.	Biogás	Reciclaje	Disp. Final
	Mixta	Segregada						Sin cap. GEI
E0	X							X
E1	X		X				X	X
E2		X		X			X	X
E3		X		X	X		X	X
E4		X		X		X	X	X

El escenario base E0, propone el sistema más básico de todos con recolección mixta y disposición final en relleno sanitario del 100% de los residuos y sin recuperación de energía; el escenario actual E1, es el que se lleva actualmente en la ciudad de Mexicali con recolección mixta, pero recuperación de reciclables de forma manual y disposición final sin recuperación de energía. Los escenarios E2, E3 y E4 proponen recolección segregada en dos fracciones (orgánicos / inorgánicos), con recuperación de reciclables en una PRMS; los tratamientos biológicos de la fracción orgánica considerados son el compostaje para el escenario E3 y la digestión anaerobia con generación de energía para el E4.

El alcance del estudio está dado por los límites del sistema que se definen por las entradas, productos y salidas de materiales, energía, residuos y costos. Las entradas son las mismas para todos los escenarios, pero las salidas dependen de los elementos que conformen el escenario propuesto. En la Figura 3.6 se presenta un esquema de los límites del sistema.

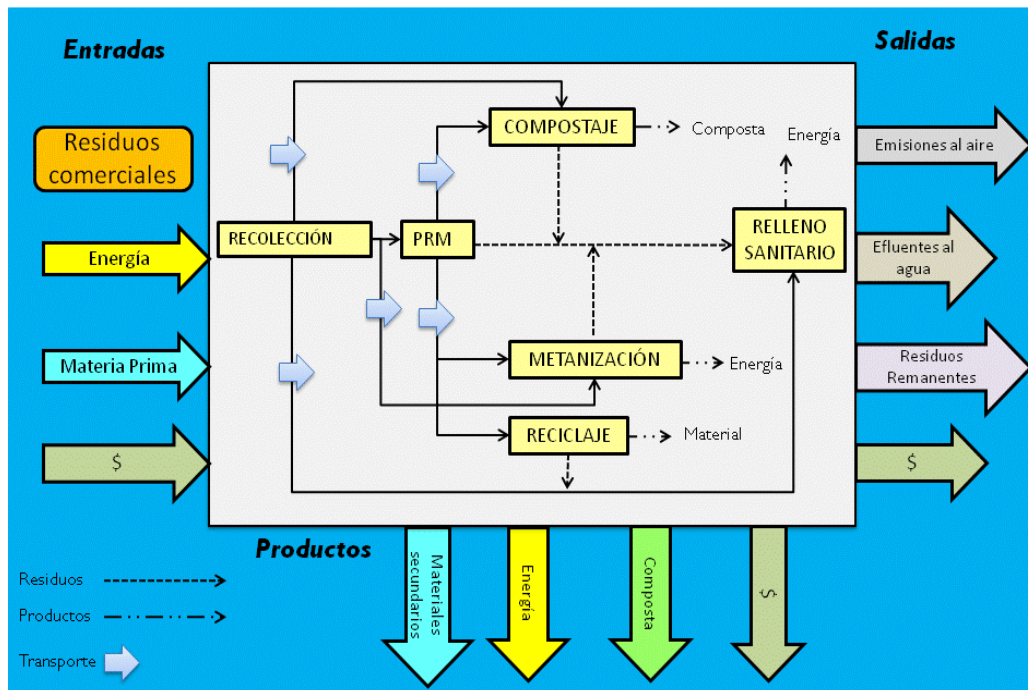


Figura 3.6. Alcance del estudio.

Las entradas son los residuos comerciales a partir del punto donde sale del comercio y la energía que es utilizada en el sistema de manejo de residuos comerciales, así como los costos de entrada al sistema.

Las salidas son los residuos como emisiones a la atmosfera, efluentes al agua, residuos sólidos remanentes y costos de operación.

Los productos son la energía generada, los materiales recuperados, la composta y los ingresos generados por el sistema.

3.4.2. Inventario de ciclo de vida (ICV)

El inventario de ciclo de vida se refiere a la recolección de datos y los procedimientos de cálculo necesarios para completar el inventario. El objetivo del ICV para residuos sólidos es el de predecir, de manera tan cercana como sea posible la realidad, las cargas ambientales de un sistema de gestión integral de residuos.

Los datos que se utilizaron para el ICV se obtuvieron de distintas fuentes. Los datos específicos, relativos a la generación, características, composición y transporte fueron generados mediante investigación de campo; los datos genéricos relativos a la generación de energía, tratamientos de reciclaje y

segregación, fueron recabados a través de fuentes bibliográficas y los datos de extracción de materias primas y emisiones al ambiente y residuos totales son los resultados que arroja el modelo de ICV utilizado IWM-2. Los datos referentes a los costos económicos son determinados sobre la base de costo por tonelada de residuos recolectados, en lo posible se utilizaron datos locales reales, en caso contrario se utilizaron estimados de otras regiones.

3.4.3. Datos de entrada para los escenarios

3.4.3.1. Definición de sistema

El primer paso para realizar el ICV de los escenarios fue definir la cantidad y composición de los residuos generados, así como el número de comercios que integran el sistema. Los datos se obtuvieron del estudio de generación y caracterización de los residuos comerciales generados por micro-comercios en la ciudad de Mexicali, el cual se presenta en este mismo documento. También se requirieron los datos sobre el tipo de combustible que utilizan los camiones recolectores y la mezcla de generación energética para México (CFE, 2011). Los datos de entrada se presentan en las Tabla 3.4, Tabla 3.5 y Tabla 3.6.

Tabla 3.4. Residuos generados y tipo de combustible

Total de micro-comercios en el sistema	8544 comercios
Total de residuos generados al año	47620 ton
Tipo de combustible utilizado en vehículos recolectores	Diesel

Tabla 3.5. Composición de residuos

Residuo	Papel y Cartón	Vidrio	Metal	Plástico	Textiles	Orgánicos	Otros
%	18.5	4.7	5.9	19.7	4.9	36.8	9.5

Tabla 3.6. Mezcla de generación de electricidad (CFE, 2011)

Fuente	%
HIDRAULICA	11.96
GEOTERMIA	2.29
EOLICA	0.03
CARBON	6.44
NUCLEAR	3.38
HIDROCARBUROS	75.9

3.4.3.2. Recolección y transporte

Con las distancias recorridas durante todo el sistema, el modelo IWM-2 estima el consumo de combustible, excepto para la recolección donde el usuario debe ingresar este dato en forma directa.

Para obtener el consumo de combustible durante el proceso de recolección fue necesario primero sacar la distancia recorrida durante todo el proceso, para lo cual se identificó la ubicación geográfica de cada uno de los micro-comercios establecidos en la ciudad de Mexicali estos datos se obtuvieron de la base de datos del DENU, luego esta información fue ingresada en un sistema de información geográfica (GIS) Global Mapper, ya con los datos en el sistema se trazaron las rutas de recolección de RC (ANEXO 6) todas las rutas finalizan en la unidad de transferencia, obteniéndose así el total de distancia recorrida y con esto el consumo de combustible.

Para estimar las distancia hacia procesos como la planta de recuperación de materiales, planta de compostaje y planta de digestión anaerobia, se proyectó su posible localización tomando en cuenta el actual flujo de los procesos, fue así que se supuso que la PRM se localizaría en el centro de transferencia actual y tanto los proceso de compostaje como de digestión anaerobia se localizaría a máximo 2 km del relleno sanitario actual.

Las distancias entre el centro de acopio de reciclables y las plantas de tratamiento se determinaron con base a lo observado en campo; los plásticos y aluminio se exportan a Estados Unidos, mientras que el papel y el metal se venden a las recicladoras locales. Los datos de todas las distancias recorridas se presentan en la (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Distancias recorridas en la etapa del manejo de residuos

Ruta	Km un sentido
Origen - ruta recolección - Transferencia	1504
Origen- ruta recolección - PRM	1504
Origen – ruta recolección - compostaje	1532
Origen – ruta recolección – Biogasificación	1532
Transferencia – relleno	28
Compostaje - relleno	2
Biogasificación - relleno	2
PRM - relleno	28
Relleno sanitario - acopio de reciclables	28
Acopio rec. - recicladora de papel	45
Acopio rec. – siderúrgica	45
Acopio rec. - recicladora de plástico	400
Acopio rec. recicladora de aluminio	400

3.4.3.3. Planta de recuperación de materiales (PRM)

Se tomaron en cuenta dos tipos de PRM para la creación de los escenarios (a) Planta de Recuperación de Materiales Manual (PRMM) en la cual todas las operaciones de segregación se realizan por los operarios y solo dos prensas y un monta cargas para empacar el material y (b) Planta de Recuperación de Materiales Semiautomatizada (PRMS) donde se utilizan magnetos y corriente

Eddy para segregar los metales, bandas transportadoras sobre la cual los operarios realizan la segregación, prensas y montacargas.

En el escenario actual E1 se realiza la recuperación de reciclables (papel, cartón, plásticos rígidos, aluminio, metales ferrosos) en el relleno sanitario de forma manual, la información obtenida en campo sobre esta actividad se ingresaron como datos de entrada para la PRMM; se estimó un consumo de combustible de 4kwh/ton y 2.2lt/ton de residuos ingresados.

Los datos de entrada para la PRMS se estimaron en base a datos obtenidos de la literatura; para una PRM que recibe reciclables mixtos McDougal et al, (2004) propone un consumo de combustible de 24 kwh/ton y 0.87 lt/ton de diesel; y Marketing, R., & For, C. (2003) 20 kwh/ton y 0.77 lt/ton de diesel. Para la creación de los escenarios de este estudio se determinó un consumo de combustibles de 20kwh/ton y 0.80 lt/ton de diesel.

Los datos de recuperación anual para la PRMS se estimaron con base al grado de contaminación de los materiales reciclables secos de recolección en la acera y el porcentaje de reciclables rechazados en la PRM por contaminación presentados por McDougal et al, 2004, además se determinó la recuperación de plástico flexible. En la Tabla 3.8 se muestran los datos de recuperación para PRMM y PRMS.

Tabla 3.8. Grado de contaminación de reciclables

Residuos recuperados	%
Contaminación de reciclables con residuos orgánicos	2.50%
Otros contaminantes	2.50%
Rechazo de reciclables segregados por contaminación en PRM	30%

La recuperación anual para la PRMM fue estimada en base a los datos de recuperación total de residuos en el relleno sanitario del 8.8%.

En la Tabla 3.9 se muestran los datos de recuperación para la PRMM y PRMS

Tabla 3.9. Residuos recuperados en escenario actual

	PRMM	PRMS
Residuos recuperados	Ton/año	Ton/año
Papel y cartón	722	5858
Metales ferrosos	170	1424
Aluminio	53	445
Plástico rígido (PET, PEAD)	412	3069
Plástico flexible (PEBD)	0	3169

3.4.3.4. Tratamientos para residuos orgánicos

De la gama de tratamientos que pueden ser empleados para el tratamiento de los residuos orgánicos, en este estudio sólo se consideran la digestión aeróbica para la producción de composta y la digestión anaeróbica con generación de energía.

a. Compostaje

Los datos de entrada para la planta de compostaje en pilas al aire libre se estimaron en base a datos obtenidos de la literatura; McDougal et al, (2004) propone un consumo de combustible de 30kwh/ton; Scaglia et al. (2004) estima 50kwh/ton; y Bovea et al. (2010) indica un consumo de energía de 19.57kwh/ton, 0.36lts de diesel y 0.054m³ de agua. Para la creación de los escenarios de este estudio se determinó un consumo de combustibles de 30kwh/ton

La producción de composta vendible se determinó calculando 50% de pérdida de masa y 25% de residuo durante el cribado en base a los datos de McDougall (2004).

b. Digestión anaerobia

Los datos de entrada para la planta de digestión anaeróbica (fermentación en seco) de la fracción orgánica de los RSC se tomaron de la literatura. En relación

al consumo de energía Murphy & Power (2009) estiman un consumo de 45kwh/ton; McDougall et al (2004) estima un consumo de 50kwh/ton. En cuanto a la generación de biogás Wailand (2001, 2010) indica para bioresiduos una generación de 120Nm³/ton de sustrato y para residuos de comida una generación de 240Nm³/ton de sustrato; DeBaere (2008) 126.3Nm³/ton de sustrato; y Gebrezagabher (2010) 116.76Nm³/ton de sustrato. Todos los procesos con un tiempo de retención entre 40 – 70 días.

Para la creación de los escenarios de este estudio se determinó un consumo de combustibles de 50kwh/ton y una producción de energía de 190kwh/ton de residuos ingresados, con una pérdida de masa del 60%.

3.4.3.5. Relleno Sanitario y unidad de transferencia

Se consideró la disposición final en el relleno sanitario para todos los escenarios sin generación de energía, sin captación de gases, sin tratamiento de lixiviados ya que es la condición actual y no se tienen datos que indiquen un cambio en los próximos 10 años.

Para el relleno sanitario se estimó un consumo de diesel de 0.2lts/ton de residuos y para la unidad de transferencia un consumo de diesel de 1.7lts/ton. En ambos procesos se consideró un consumo cero de energía eléctrica, de acuerdo a la información que nos proporcionaron en los sitios.

3.4.3.6. Costos

Los costos de recolección, transferencia y disposición se obtuvieron directamente del departamento del servicio de limpia del municipio de Mexicali, el costo de segregación se estimó con base a los precios de compra de los intermediarios del mercado de reciclables en la ciudad para la segregación manual y para la segregación semi-manual se estimaron los costos de operación de una planta de segregación de materiales con capacidad para 100 ton/día (ANEXO 4). Los costos de reciclaje y los ingresos por la venta de reciclables se estimaron en base a los costos actuales del mercado internacional de reciclables. Los costos de la planta de compostaje corresponden al proyecto de inversión para una planta de composta de residuos agrícolas para el valle de Mexicali; y los costos de operación de la planta de digestión anaerobia se

obtuvieron de las estimaciones realizadas en Murphy y Power (2009) y Gebrezgabher (2010). La (Tabla 3.10) presenta los costos estimados para este estudio.

Tabla 3.10. Costos del sistema

Procesos	\$ / ton
Recolección	593.06
Transferencia	83.2
RS.	132.6
PRM (M)	2605
PRM (SM)	226
Compostaje	375
Biometanización	402.7

3.4.4. Análisis de impacto e interpretación de ciclo de vida

Para realizar el análisis de impacto e interpretación de ciclo de vida, se estableció el enfoque de un flujo de residuos constante y se compara el desempeño de los diferentes sistemas de recuperación y reciclaje de residuos comerciales. La elección entre las distintas opciones de escenarios se basa en criterios múltiples dónde tanto las categorías ambientales como las económicas son consideradas importantes. Siguiendo la metodología del estándar ISO 14040-44 los resultados arrojados por el ICV se clasificaron en siete categorías de impacto ambiental potencial: calentamiento global (kg CO₂ eq.), acidificación (kg SO₂ eq.), eutrofización (kg PO₄⁻ eq.), formación de foto-oxidantes (kg de etileno eq.), agotamiento de recurso abiótico (kg Sb eq.), toxicidad humana, ecotoxicidad terrestre (kg 1.4 DBC eq.) y ecotoxicidad acuática (kg 1.4 DBC eq.), además de la energía total empleada, volumen total de residuos enviados a disposición final y costo totales del sistema. Los factores de caracterización aplicados para cada categoría de impacto seleccionada son los propuestos por

el método CML-*Centrum voor Milieukunde Universiteit Leiden* (Guinee et al, 2002).

En el análisis de sensibilidad se examinó cómo los resultados de los diferentes escenarios son afectados por el modelo de inventario de ciclo de vida utilizado. Los resultados del inventario de ciclo de vida obtenidos del modelo IWM-2 se compararon con los obtenidos del modelo Integral Waste Management Model for Municipalities (IWMMM) desarrollado por Corporation Supporting Recycling, Environmental (CSR), Environmental and Plastics Industrial Council (EPIC) y University of Waterloo en 2004; éste tipo de análisis de sensibilidad fue empleado por Bovea et al (2010) en el análisis de ciclo de vida para estrategias de manejo de residuos sólidos municipales en España, con distintos modelos de inventario de ciclo de vida.

Capítulo 4. Resultados

Este capítulo se encuentra organizado en tres apartados. En el primero se presentan los resultados del estudio de generación y caracterización de los residuos comerciales (RC) realizado en Marzo de 2011, la información generada se utilizó como datos de entrada para la evaluación de los distintos escenarios de manejo de residuos comerciales. En la segunda parte se presentan y comparan los resultados del Inventario de Ciclo de Vida obtenidos del modelo IWM-2 en costos económicos y cargas ambientales caracterizadas en siete categorías de impacto ambiental potencial, así como la normalización de los datos. En el tercer apartado se realiza el análisis de sensibilidad.

4.1. Generación y caracterización de los residuos comerciales

4.1.1. Generación de residuos comerciales a nivel micro-negocio

Se definió el tamaño de la muestra para la estimación de la generación de RC, a partir de la cantidad total y localización geográfica de los micro-comercios establecidos en el área urbana de Mexicali tomando la información de la base de datos del DENUE. Se determinó la muestra mínima y se seleccionó la ruta 20: Centro/Centro Cívico para llevar a cabo el estudio. Los datos del total de micro-comercios localizados en el área urbana, el tamaño de muestra mínima para la estimación de la generación de residuos, la ruta seleccionada y el número de micro-comercios que la integran se muestran en la (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Población, muestra mínima, muestra real

Población (Total de micro- comercios en área urbana)	Muestra mínima	Ruta Seccionada	Muestra Real (Total de micro- comercios en Ruta 20)
8544	600	Ruta 20 :Centro/Centro cívico	900

Se identificaron los distintos tipos de establecimientos que integraban los 900 comercios de la muestra y se clasificaron en 16 giros como se muestra en la (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Clasificación de los micronegocios por giro comercial

Giro de negocio	%
Restaurantes, bares y discotecas	22.10
Consultorios médicos	17.57
Oficinas particulares y de gobierno	15.87
Abarrotes, licorerías, frutas y verduras, carnes y aves	10.09
Venta de ropa, zapatos, sombreros, accesorios	7.82
Farmacias y ópticas	7.36
Centros cambiarios, financieros y de empeños	4.08
Otros (mensajerías, venta de pinturas, gimnasios)	3.28
Florerías	2.04
Institutos educativos de pequeño tamaño	1.92
Refaccionarias, artículos electrónicos y celulares	1.92
Joyerías	1.81
Librerías, papelerías y fotocopiado	1.81
Hoteles	1.81
Fotográficas	0.34
Estéticas	0.11

La generación se estimó con los datos históricos de tres meses de generación de los 900 comercios de la ruta seleccionada, como se presenta en la (Tabla 4.3), dando una generación promedio por día por establecimiento de 15.46kg.

Tabla 4.3. Datos de recolección durante el 2010.

Mes (2010)	Total recolectado (kg)	Días recolectados	Generación promedio por día	Generación promedio por día por comercio (kg)
Abril	319704	22	14532	16.14
Mayo	297255	21	14155	15.72
Diciembre*	209040	16	13065	14.51
Totales	825999	59	13917.33	15.46

*En diciembre se descartaron los días 24, 25, 30 y 31

4.1.2. Caracterización y cuantificación de sub-productos

Los resultados de la caracterización se presentan en la Figura 4.1. Entre los sub-productos que tuvieron una mayor generación se encuentran los restos de comida con el 17.6%, cartón corrugado con el 15.5%, residuos de jardín con el 13.2% y plástico de baja densidad (LDPE) con el 10.6%.

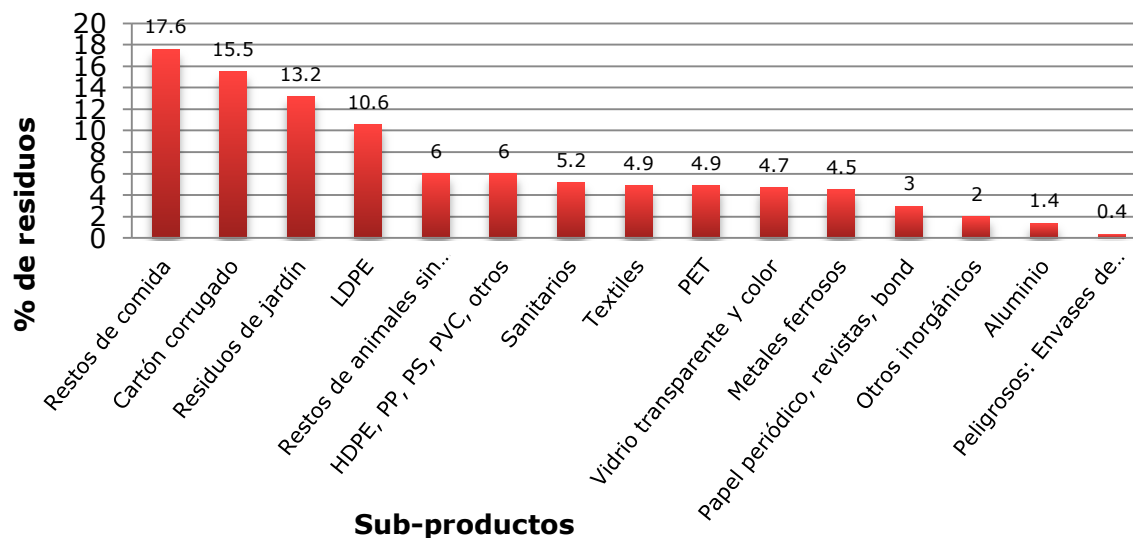


Figura 4.1. Composición de sub-productos de residuos comerciales

Agrupando los sub-productos en ocho categorías principales tenemos una distribución como se muestra en la (Figura 4.2). La categoría de orgánicos putrescibles está integrada por restos de comida, residuos de jardín y restos de animales sin procesar y huesos; la categoría de plásticos está conformada por polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), policloruro de vinilo (PVC), tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y otros plásticos.



Figura 4.2. Principales categorías de sub-productos

En la

Figura 4.3 se presentan los resultados de la caracterización en las cuatro categorías por potencial de valorización en las que se clasificaron los residuos comerciales muestreados.

El porcentaje más alto corresponde a los materiales reciclables (56.1%), seguido de los subproductos biodegradables (36.8%), los cuales pueden ser aprovechados como composta o para generación de biogás.

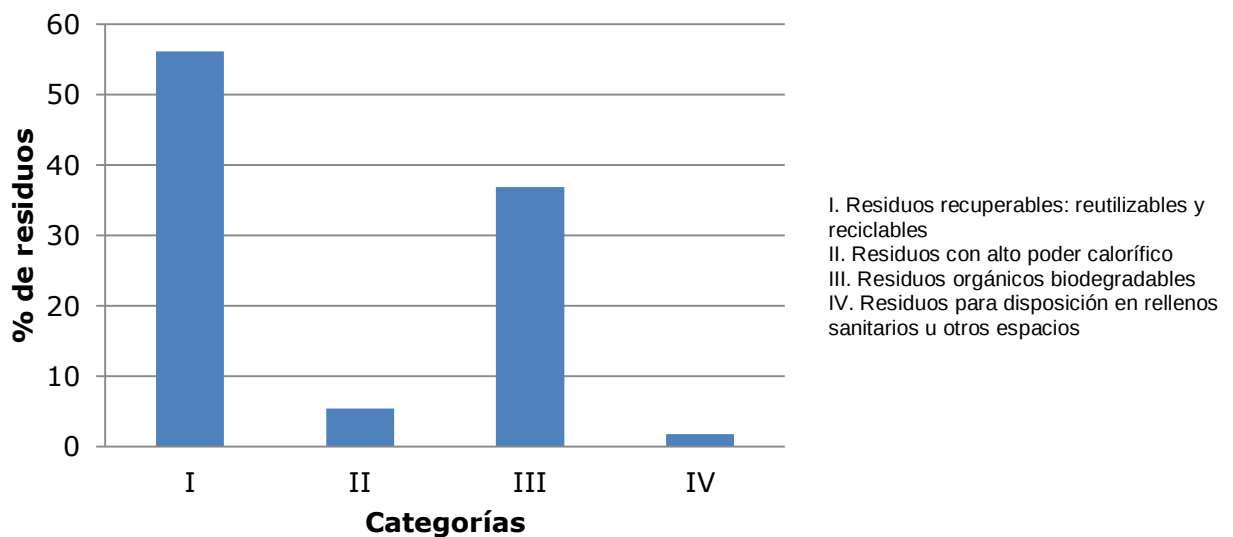


Figura 4.3. Categorización por potencial de valorización

4.2. Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de los escenarios propuestos.

En esta sección se presentan los resultados del inventario de ciclo de vida de los escenarios con relación a los recursos empleados de combustibles, costos y efluentes generados como residuos sólidos, emisiones a la atmósfera y agua, clasificados en ocho categorías de impacto ambiental potencial: calentamiento global (GWP), acidificación (AP), eutrofización (EP), formación de foto-oxidantes (POCP), agotamiento de recurso abiótico (ADP), toxicidad humana (HTP₁₀₀), ecotoxicidad terrestre (TTP) y ecotoxicidad acuática (ATP).

4.2.1 Escenarios

Los escenarios se diseñaron con base a la situación actual del manejo de los residuos urbanos de la ciudad, la normatividad presente, además se consideraron los sistemas de manejo, procesos y tecnologías utilizadas con éxito en el mundo para crear propuestas.

El escenario base E0 incluye únicamente recolección mixta y disposición final en relleno sanitario sin generación de energía (GE) ni captación de gases de efecto invernadero (GEI); el escenario actual E1 está integrado por los procesos de recolección mixta, recuperación informal de reciclables y disposición final en relleno sanitario sin GE y sin captación de GEI; el escenario E2 incluye recolección segregada, recuperación de reciclables en PRMM, y disposición final en relleno sanitario sin GE y sin captación de GEI; el escenario E3 compuesto por los procesos de recolección segregada, recuperación de reciclables en PRMS, compostaje de la fracción orgánica y disposición final en relleno sanitario sin GE y sin captación de GEI; y el escenario E4 formado por los procesos de recuperación segregada, recuperación en PRMS de reciclables, digestión anaerobia de la fracción orgánica con generación de energía y disposición final en relleno sanitario sin GE y sin captación de GEI. El balance de masas de las distintas propuestas se muestra gráficamente en las Figura 4.4 a 4.8.

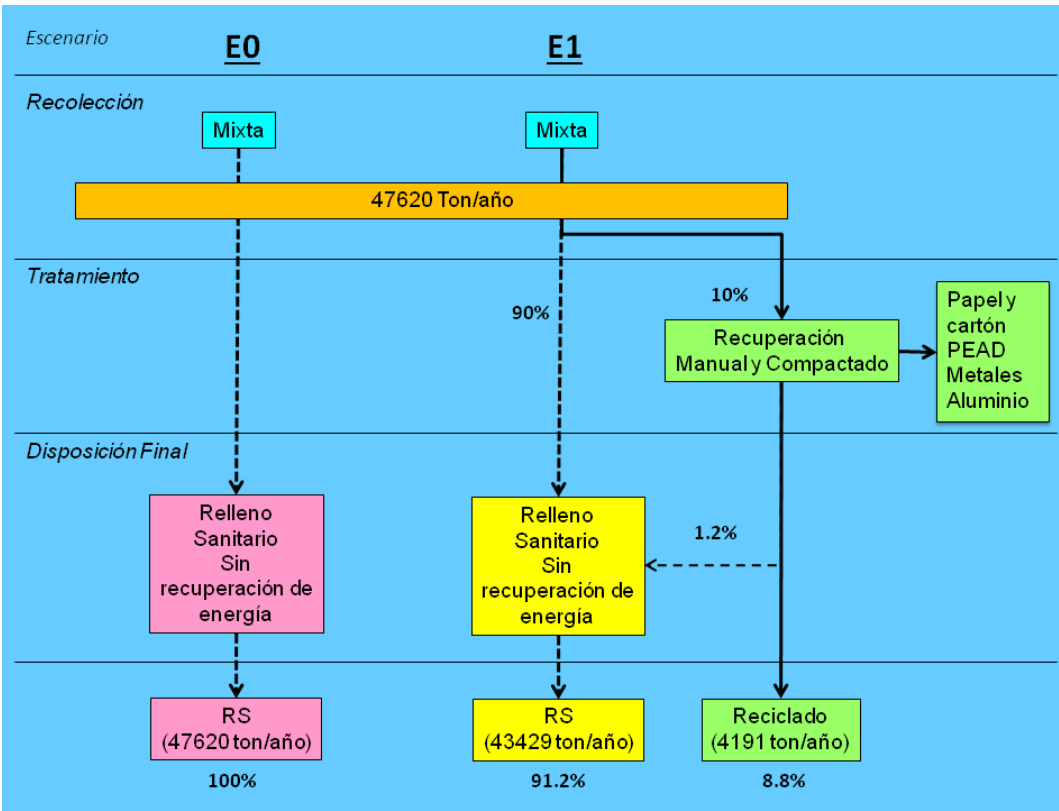


Figura 4.4. Balance de masas de escenarios E0 y E1

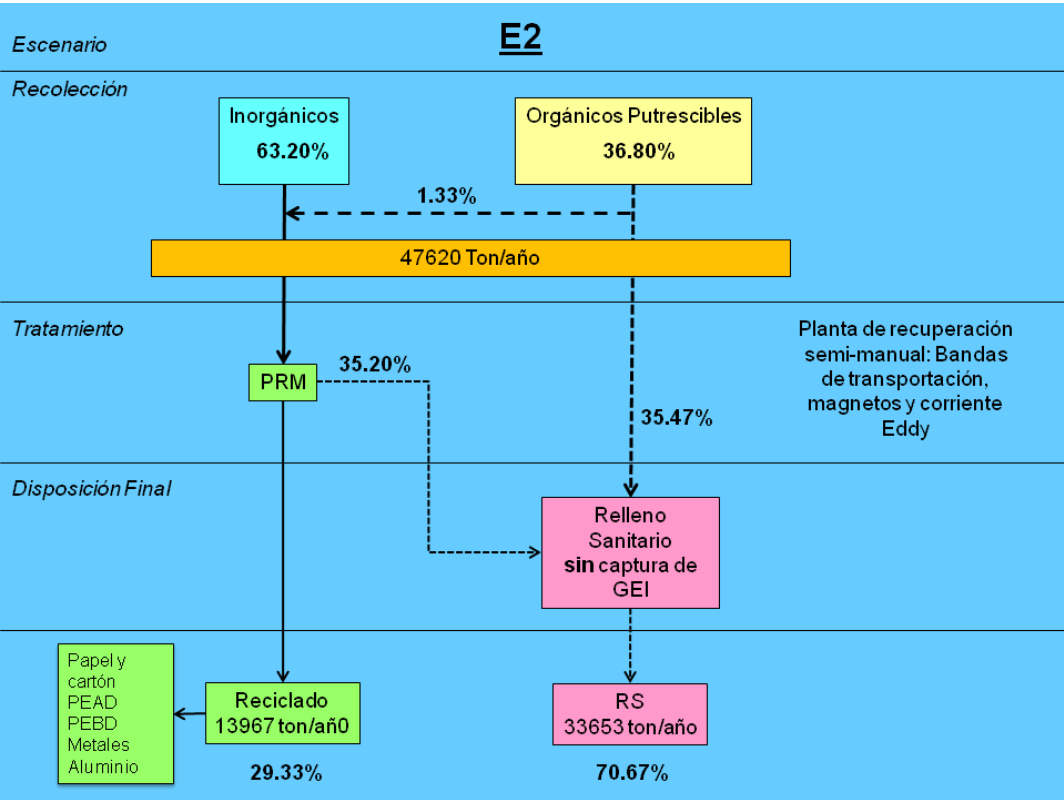


Figura 4.5. Balance de masas del escenario E2

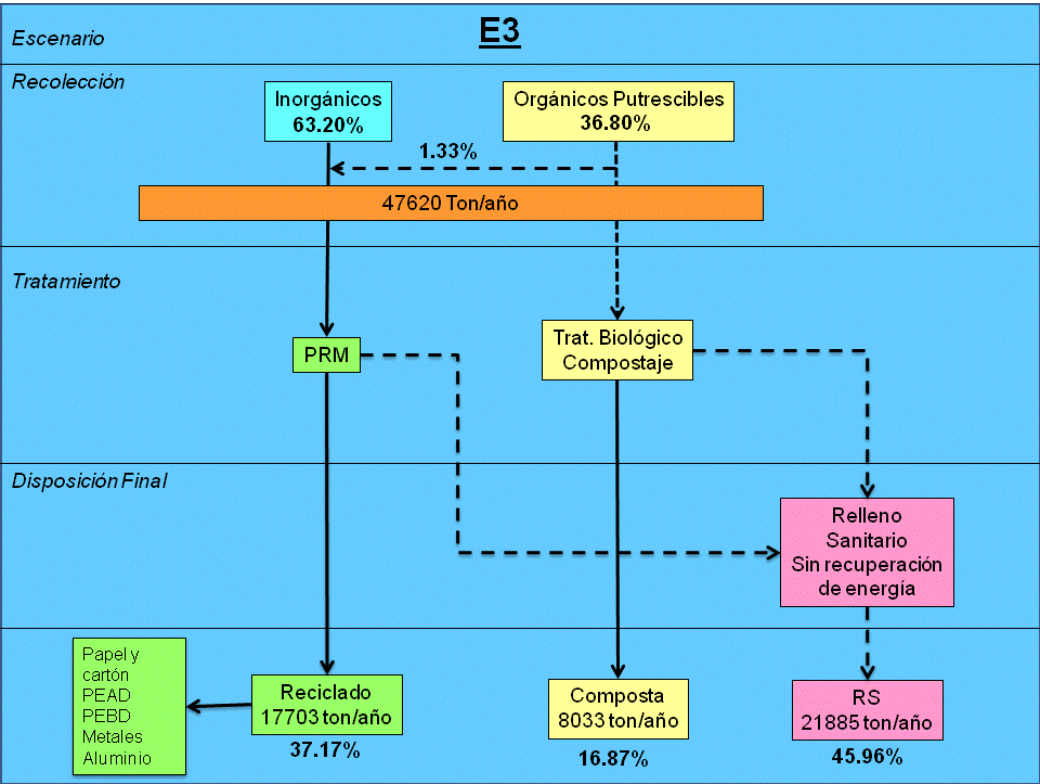


Figura 4.6. Balance de masas del escenario E3

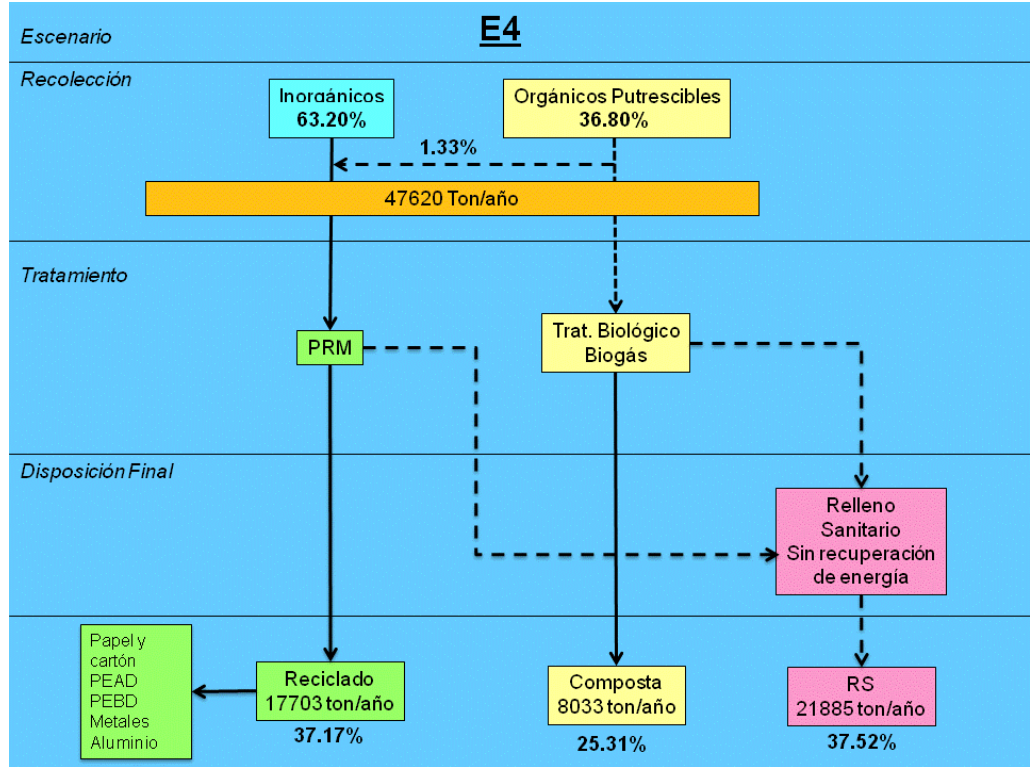


Figura 4.7. Balance de masa de escenario E4

4.2.2. Costos anuales, consumo de combustible y residuos finales

4.2.2.1. Costos

Al abordar el tema de los costos del sistema de manejo de residuos el objetivo principal es minimizar las cargas ambientales manteniendo los costos en un nivel aceptable, esto es, manteniendo el costo actual o con un pequeño incremento justificable. En este estudio se analizaron sólo los costos de operación de los diferentes sistemas, con base a éstos se compararon las cinco alternativas y, se dejaron de lado los costos de inversión inicial. Los resultados de los costos anuales del sistema indicaron un costo negativo en los escenarios E3 y E4 atribuible a la comercialización de sub-productos reciclables, composta o energía, mientras que los escenarios E2, E1 y E0 son escenarios con costos irre recuperables que el generador o en este caso el municipio debe afrontar. En la (Figura 4.8) se muestran los costos anuales de los cinco escenarios.

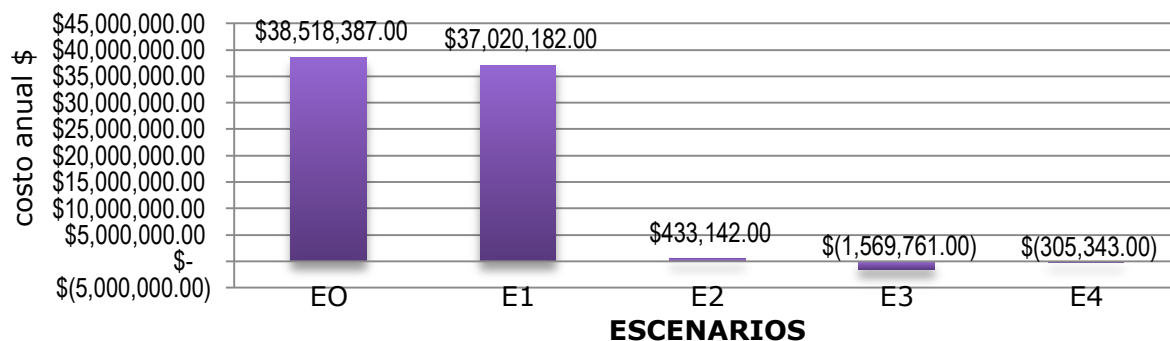


Figura 4.8. Costo anual de escenarios

4.2.2.2. Combustibles

En todos los escenarios excepto en el escenario base E0 el consumo de combustible resultó con datos negativos, que significa ahorro en consumo de combustibles en el sistema global, que el modelo IWM-2 carga como ahorro en el consumo del sistema local. El escenario de mayor ahorro en consumo de combustibles fue E4, seguido de E2 y E3, el escenario E1 aunque también hubo ahorro en consumo de combustible es 70% menor al del escenario E3. En la Figura 4.9 se muestran gráficamente el consumo de combustible anual para los cinco escenarios.

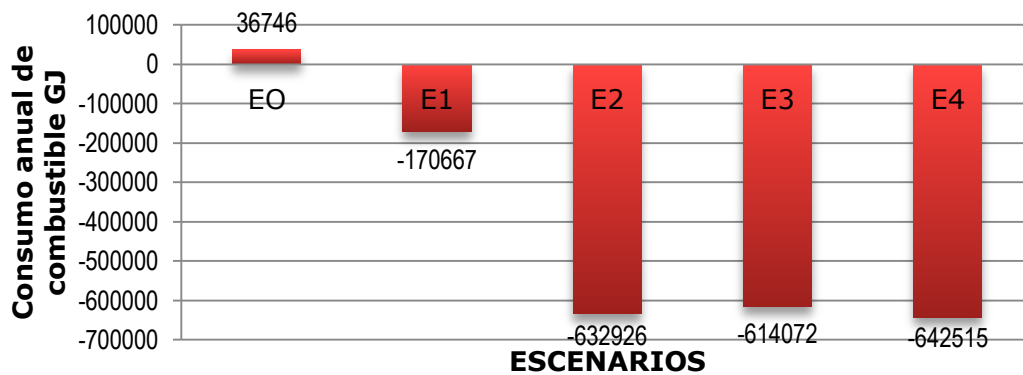


Figura 4.9. Consumo anual de combustible para los escenarios

4.2.2.3. Residuos finales

El dato de residuos sólidos finales se refiere a todos los residuos generados durante todo el ciclo de vida del sistema evaluado, incluye los residuos generados durante la producción de energía, tratamiento de residuos, actividades de reciclaje y los ahorros generados. El escenario con mayor generación de residuos sólidos finales es E0, como se observa en la Figura 4.10 hay una tendencia descendente conforme se van agregando tratamientos de recuperación de residuos al sistema de manejo, siendo los escenarios con recuperación de materiales reciclables y tratamiento de la fracción orgánica E3 y E4 los de menor generación de residuos sólidos finales.

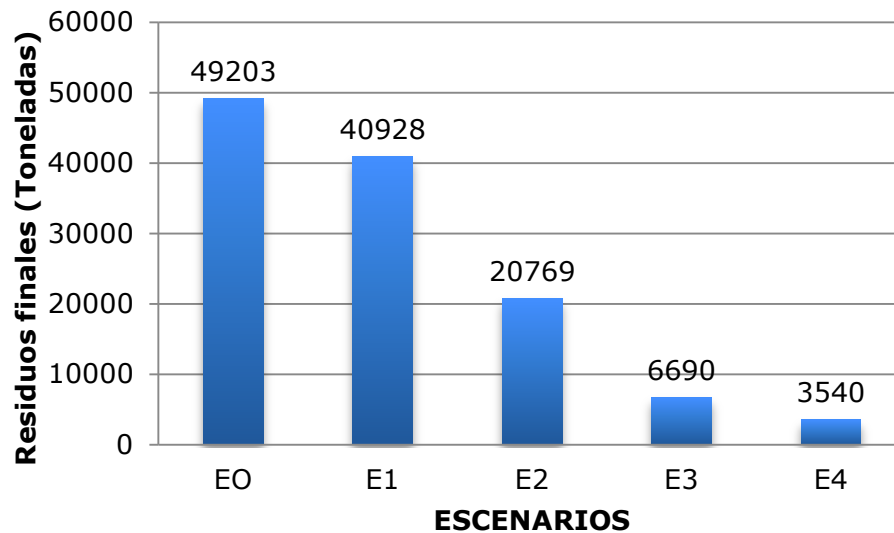


Figura 4.10. Residuos sólidos finales para los escenarios

4.2.3 Categorías de impacto ambiental

Al aplicar el modelo de ICV IWM-2, los resultados presentan emisiones al aire y agua, los cuales se clasificaron en siete indicadores de impacto ambiental (calentamiento global, formación de foto-oxidantes, acidificación, eutrofización, agotamiento de recurso abiótico, toxicidad humana 100 años, eco-toxicidad terrestre y eco-toxicidad acuática) y se compararon las cargas ambientales aportadas por cada uno de los escenarios. Los resultados se presentan en el ANEXO 5. Cada indicador de impacto ambiental se obtiene de la sumatoria de los resultados del ICV convertidos en kg equivalentes / tonelada de RC de las emisiones correspondientes al impacto que se desea calcular.

Los resultados y comparativo de las cinco opciones de manejo de residuos comerciales evaluados en las siete categorías de impacto ambiental se muestran gráficamente en las Figura 4.11 a 4.19, los resultados muestran que el escenario E4 con recolección segregada, recuperación de reciclables y digestión anaerobia de la fracción orgánica con generación de energía, es el de menor contribución para las categorías de impacto de GWP, POCP, AP, EP, ADP, HTP₁₀₀, TTP y ATP. El escenario E0 (base) con recolección mixta y disposición final es el mayor contribuyente en estas mismas categorías, seguido de E1 que es el escenario actual con recolección mixta, 8.8% de recuperación de reciclables y

disposición final en relleno sanitario. Sin embargo estos dos últimos escenarios son los de menor contribución para la categoría de impacto ADP.

Para las categorías de impacto ambiental AP, EP, HTP₁₀₀, TTP y ATP, el escenario de menor contribución después del E4 es el E2 a pesar de no efectuar ningún tipo de tratamiento para la fracción orgánica, presenta datos de cargas ambientales menores a los del escenario E3 en el que se realiza compostaje de la fracción orgánica.

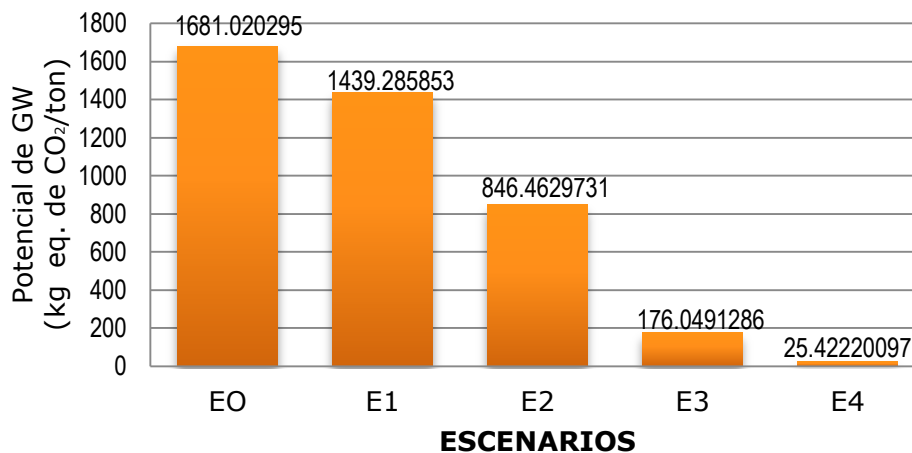


Figura 4.11. Potencial de calentamiento global (GWP) para los escenarios propuestos

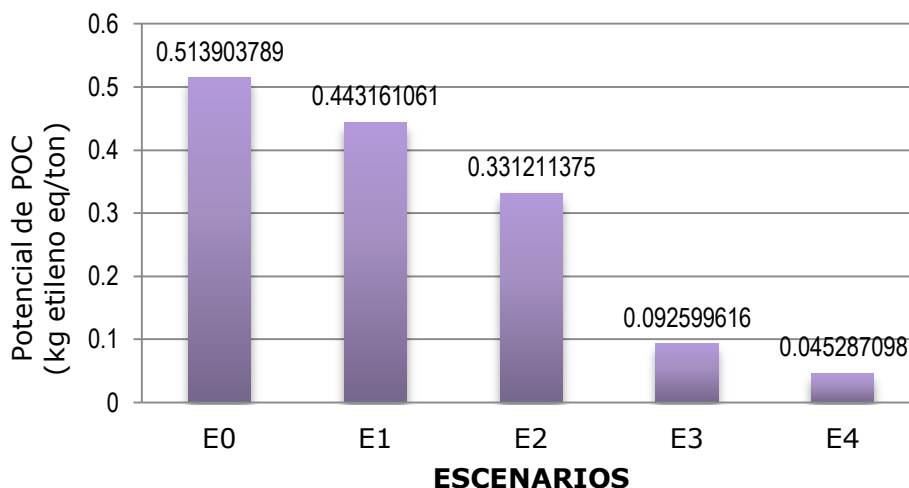


Figura 4.12. Potencial de formación de foto-oxidantes (POCP) para los escenarios propuestos

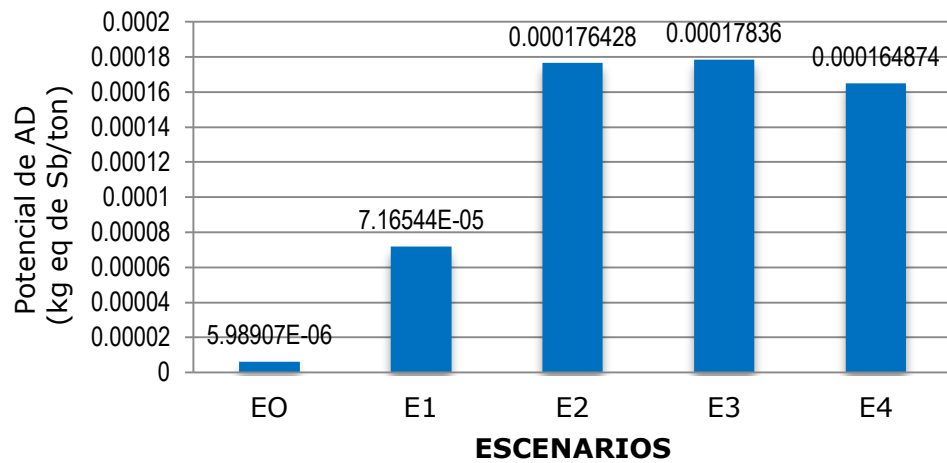


Figura 4.13. Potencial de agotamiento de recurso abiótico (ADP) para los escenarios propuestos

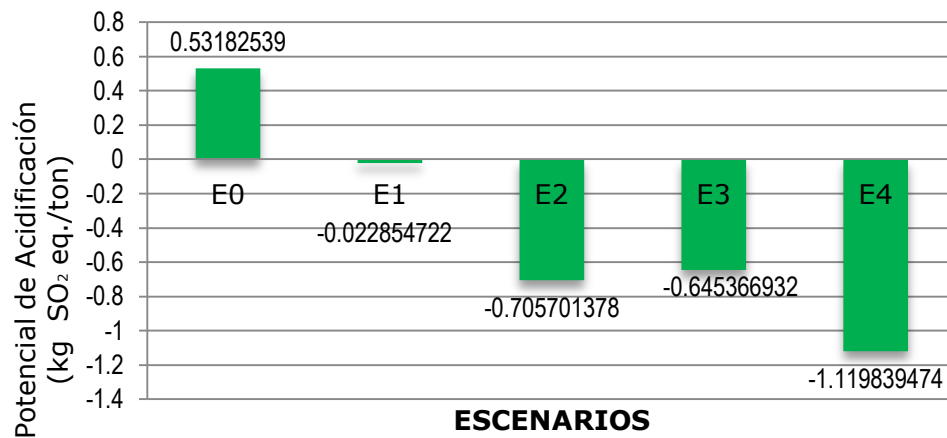


Figura 4.14. Potencial de acidificación (AP) para los escenarios propuestos

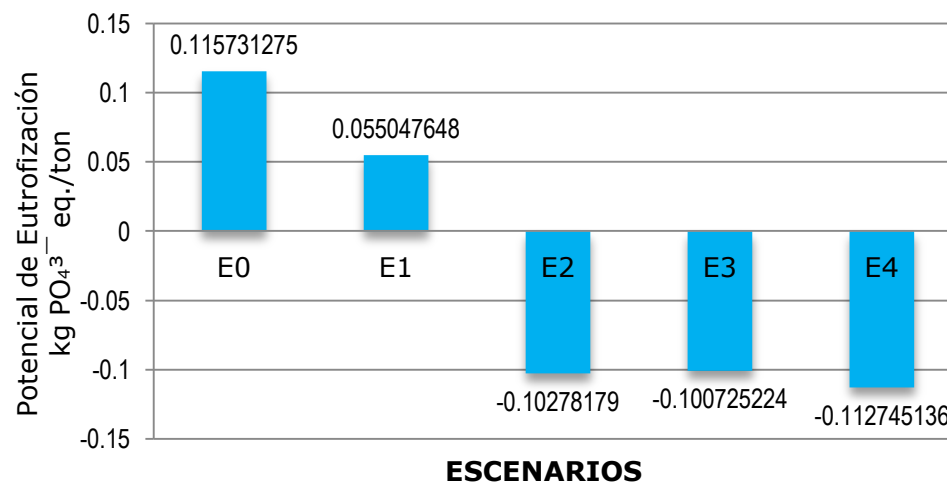


Figura 4.15. Potencial de eutrofización (EP) para los escenarios propuestos

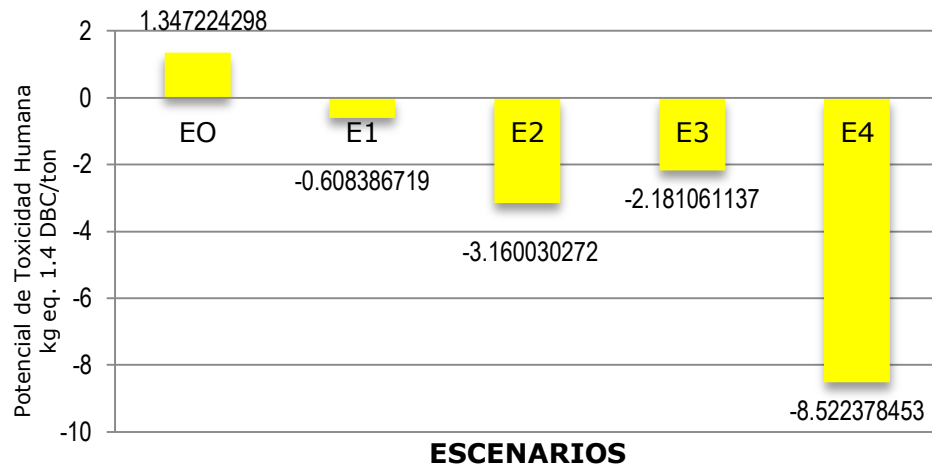


Figure 4.13 Potencial de toxicidad humana (HTP100) para los escenarios propuesto

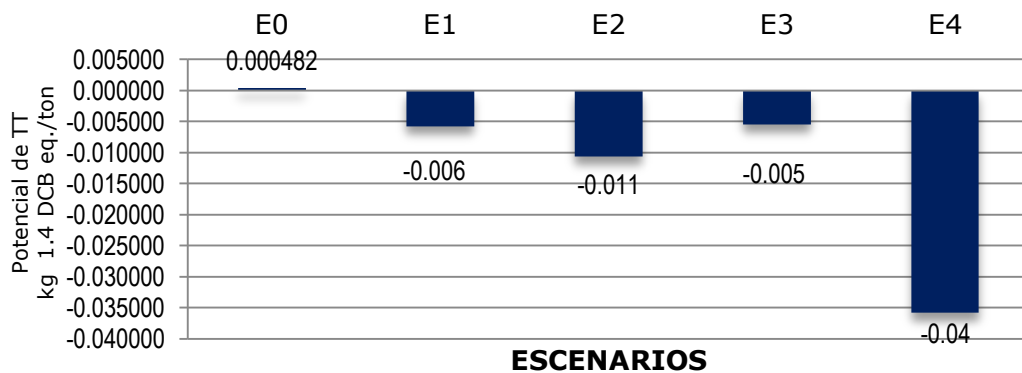


Figure 4.14 Potencial de ecotoxicidad terrestre (TTP) para los escenarios propuestos

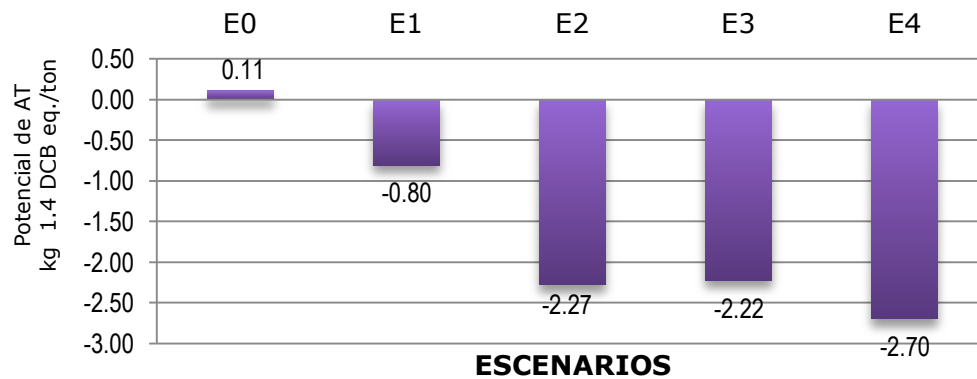


Figure 4.15 Potencial de ecotoxicidad acuática (ATP) para los escenarios propuestos

4.3. Normalización de los datos

El objetivo de normalizar los resultados de los indicadores es entender su importancia y magnitud para cada uno de los sistemas estudiados (Guinee,2002). De acuerdo a ISO 14042 con la normalización de los datos se calcula la magnitud de los resultados de los indicadores en relación a un sistema de referencia en un periodo de tiempo dado. Para este estudio el sistema de referencia es el mundo durante el año 2000; los factores de normalización son los propuestos por Sleeswijk et al. (2008).

En la Tabla 4.4 se muestran los factores de normalización de referencia para el mundo en el año 2000 para cada una de las categorías de impacto de interés,

Tabla 4.4. Factores de normalización. Mundial año 2000 (Wegener Sleeswijk et al., 2008)

Categoría de impacto	Factor de Caracterización
Agotamiento de recurso abiótico	2.09E+08
Calentamiento climático	4.18E+13
Toxicidad Humana	2.58E+12
Ecotoxicidad agua dulce	2.36E+12
Ecotoxicidad agua marina	1.94E+14
Ecotoxicidad sedimento agua dulce	2.47E+12
Ecotoxicidad sedimento agua marina	1.69E+14
Ecotoxicidad terrestre	1.09E+12
Formación de foto oxidantes	3.98E+10
Acidificación	2.39E+11
Eutrofización	1.58E+11

Los resultados normalizados de los indicadores ambientales se muestran de forma gráfica en la Figura 4.16, en ella se puede apreciar que los indicadores ambientales de potencial de calentamiento global (GWP), potencial de formación de foto-oxidantes (POCP) y potencial de acidificación (AP) son los de mayor impacto en relación con los valores de referencia, mientras que las categorías de

agotamiento de recurso abiótico (ADP), toxicidad humana (HTP), eutrofización, ecotoxicidad acuática (ATP) y terrestre (TTP) son de menor impacto.

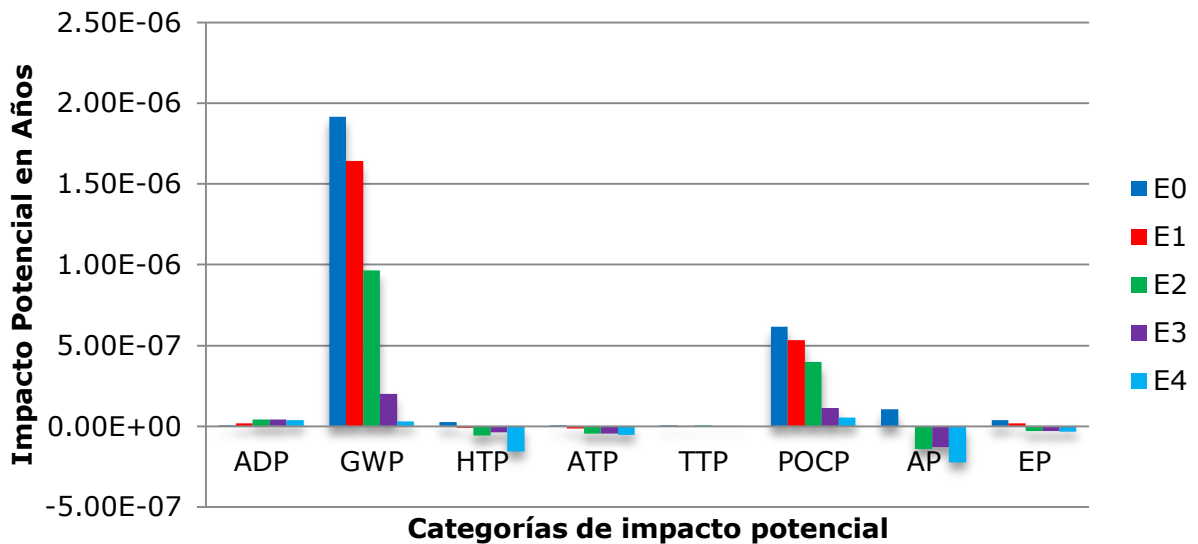


Figura 4.16. Categorías de impacto potencial, datos normalizados

Los datos normalizados nos indican que el escenario de mayor contribución para los indicadores GWP, POCP y AP es el escenario base E0, siguiendo en orden descendente E2, E3 y E4 que es el de menor contribución y por lo tanto el de mejor desempeño ambiental.

4.4. Análisis de contribución

Durante el análisis de contribución se calculó para cada escenario la aportación a la carga ambiental total y costos de cada una de las etapas del ciclo de vida del sistema de manejo de residuos.

4.4.1. Costos

El proceso que aporta mayores costos al sistema de manejo es el de recolección de los residuos, como se observa en la figura 4.18 para todos los escenarios el costo es el mismo debido a que se diseñaron los cinco escenarios bajo los mismos parámetros en cuanto a distancias recorridas y equipo de recolección. El siguiente proceso en aportación de costos al sistema es la etapa de confinamiento de los residuos en el relleno sanitario y con una menor aportación

de costos está el proceso de reciclaje. La etapa de segregación de materiales no contribuye al costo del sistema al contrario reduce el costo, debido a que en esta actividad se genera una ganancia financiera por la venta de los materiales reciclables segregados.

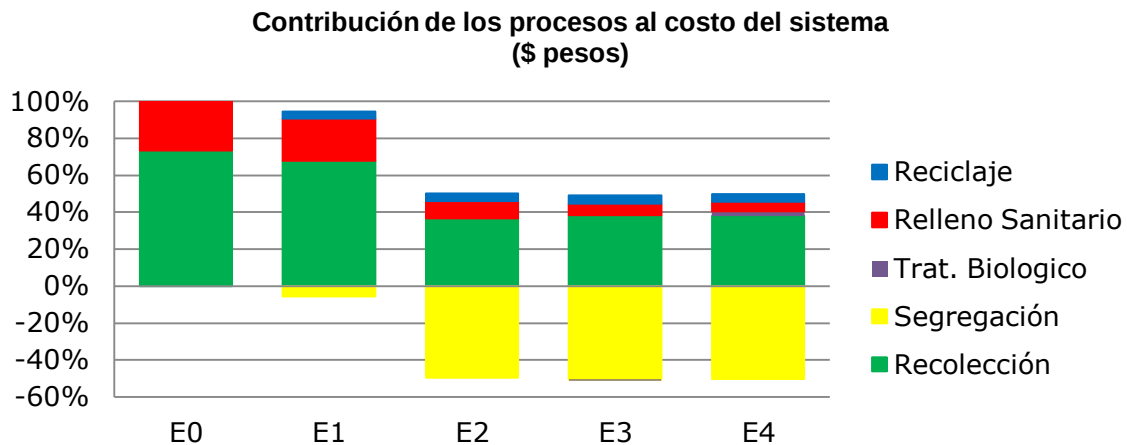


Figura 4.17 Contribución de cada etapa del ciclo de vida de la gestión de residuos a los costos del sistema.

4.4.2. Residuos

En relación a la contribución de las etapas del sistema de manejo de residuos al total de residuos sólidos generados tenemos que para los escenarios E0 y E1 la etapa de confinamiento en el relleno sanitario es la de mayor aportación y se fundamenta en el hecho de que en estos escenarios el nivel de recuperación de material es muy bajo siendo de 0% y 8.8% respectivamente, en cambio en los escenarios E2, E3 y E4 disminuye la cantidad de residuos sólidos que llegan al relleno sanitario debido a la recuperación de materiales. La etapa que le sigue en aportación de residuos es la de segregación de materiales, durante la cual debido al nivel de contaminación de los materiales es rechazada una parte de los materiales segregados. Se puede también observar en la figura 4.19 como la actividad de reciclaje reduce el aporte de residuos sólidos finales, este dato significa la cantidad de residuos que no se generaron al emplear materiales reciclables en comparación con el uso de materia prima virgen.

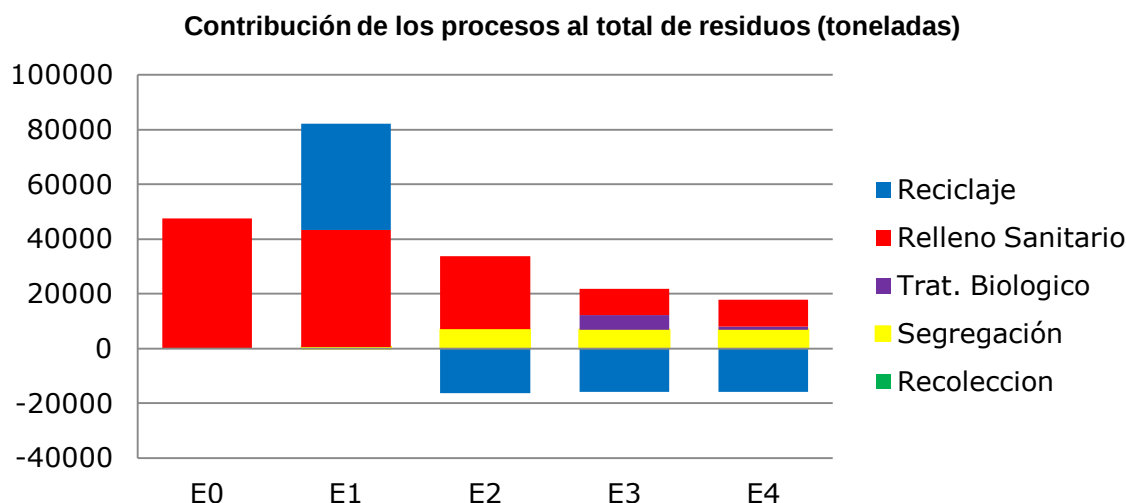


Figura 4.18 Contribución de cada etapa del ciclo de vida de la gestión de residuos al total de residuos sólidos finales (toneladas)

4.4.3. Categorías de impacto

En las figuras 4.20 a 4.27 se muestran la contribución de las distintas etapas del ciclo de vida del sistema de manejo de residuos sólidos a las cargas ambientales.

En los resultados del análisis de contribución podemos observar que las etapas de recolección, segregación y confinamiento en relleno sanitario de los residuos son los procesos que aportan la mayor carga ambiental las categorías de impacto como calentamiento global, formación de foto oxidantes, acidificación, eutrofización, toxicidad humana, toxicidad terrestre y acuática.

Por otra parte la etapa de reciclaje para la mayoría de las categorías de impacto ambiental la contribución es negativa, esto quiere decir que disminuyen la carga ambiental, excepto en la categoría de potencial de agotamiento de recurso abiótico en el que el reciclaje es el de mayor contribución.

Con relación a la etapa de tratamiento biológico el correspondiente a biogasificación en el escenario E4 contribuye negativamente en todas las categorías de impacto ambiental, mientras que el tratamiento biológico de compostaje del escenario E5 tiene una contribución positiva sobre el potencial de acidificación, potencial de agotamiento abiótico y ecotoxicidad humana, terrestre y acuática.

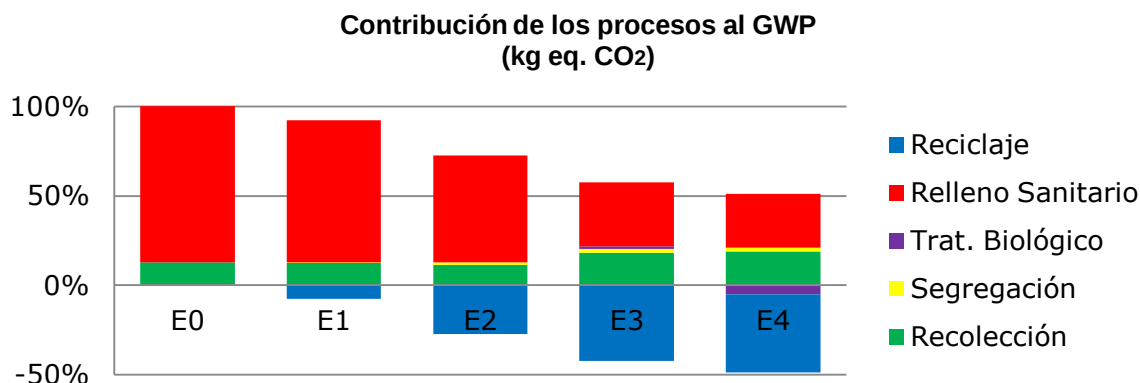


Figura 4.19 Contribución de cada etapa del ciclo de vida de la gestión de residuos al potencial de calentamiento global

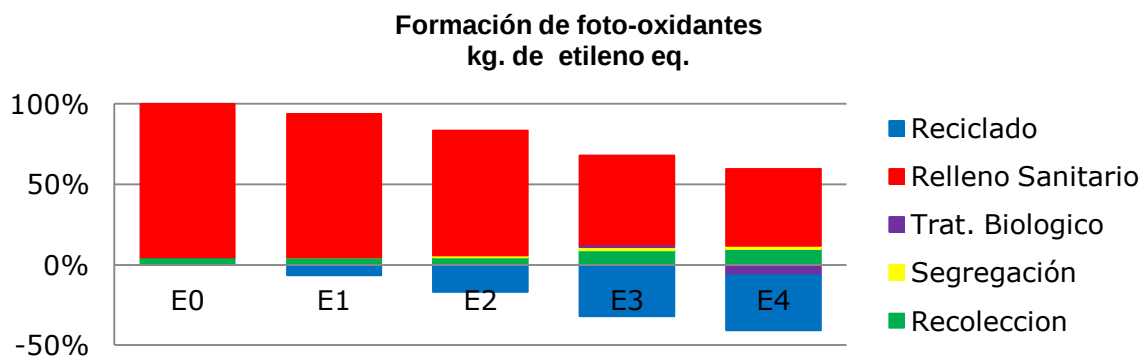


Figura 4.20 Contribución de cada etapa del ciclo de vida de la gestión de residuos al potencial de formación de foto-oxidantes

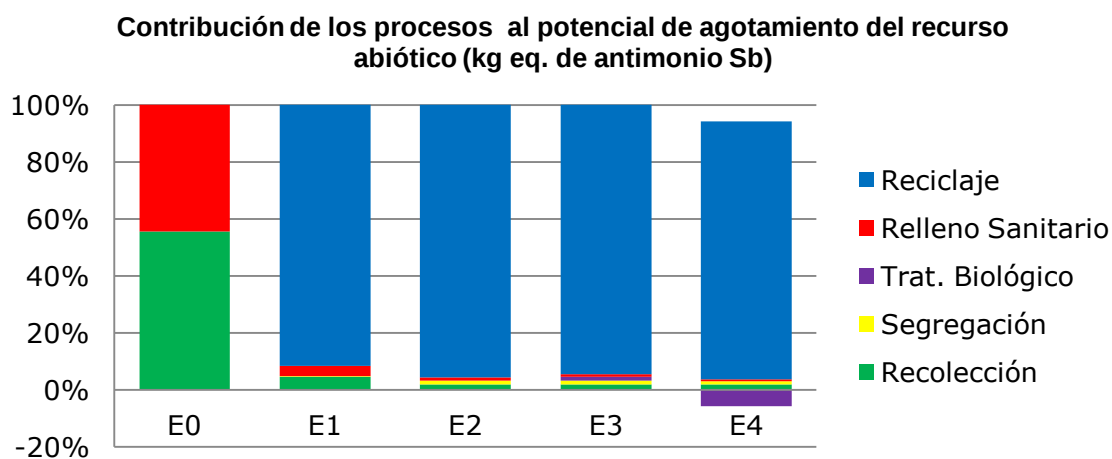


Figura 4.21 Contribución de cada etapa del ciclo de vida de la gestión de residuos al potencial de agotamiento de recurso abiótico

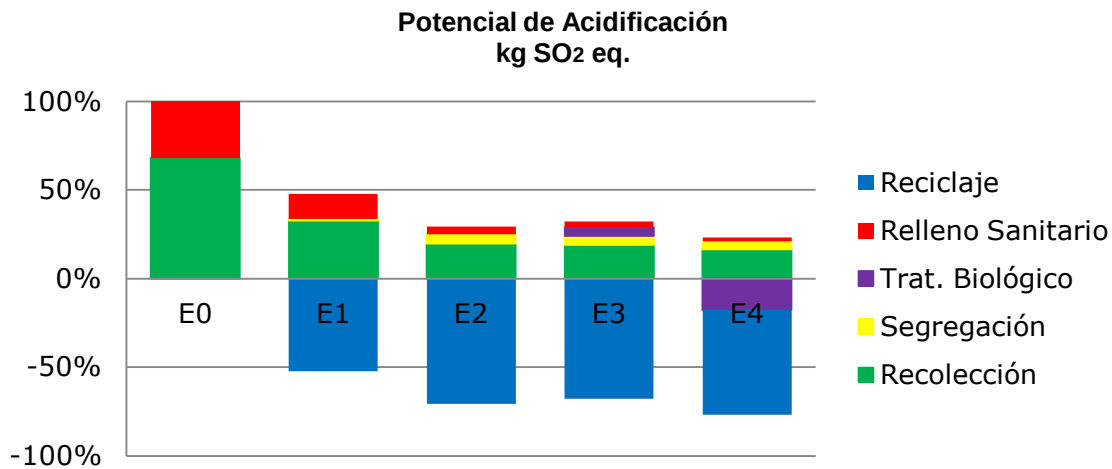


Figura 4.22 Contribución de cada etapa del ciclo de vida de la gestión de residuos al potencial de acidificación.

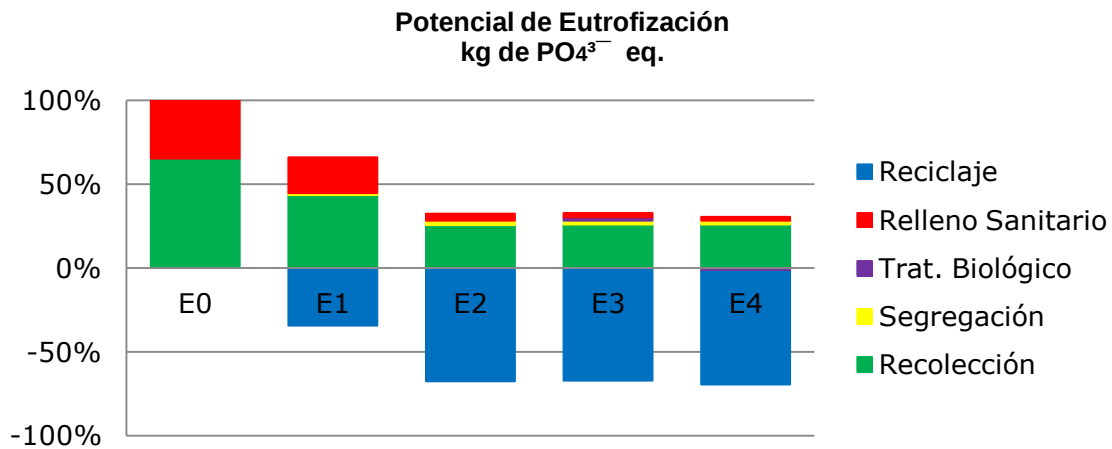


Figura 4.23 Contribución de cada etapa del ciclo de vida de la gestión de residuos al potencia de eutrofización

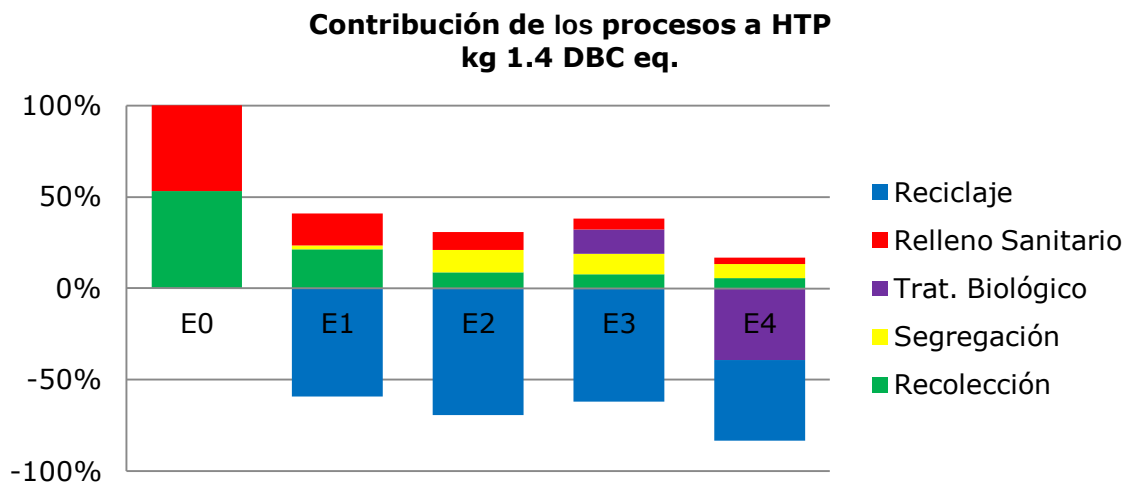


Figura 4.24 Contribución de cada etapa del ciclo de vida de la gestión de residuos al potencial de toxicidad humana

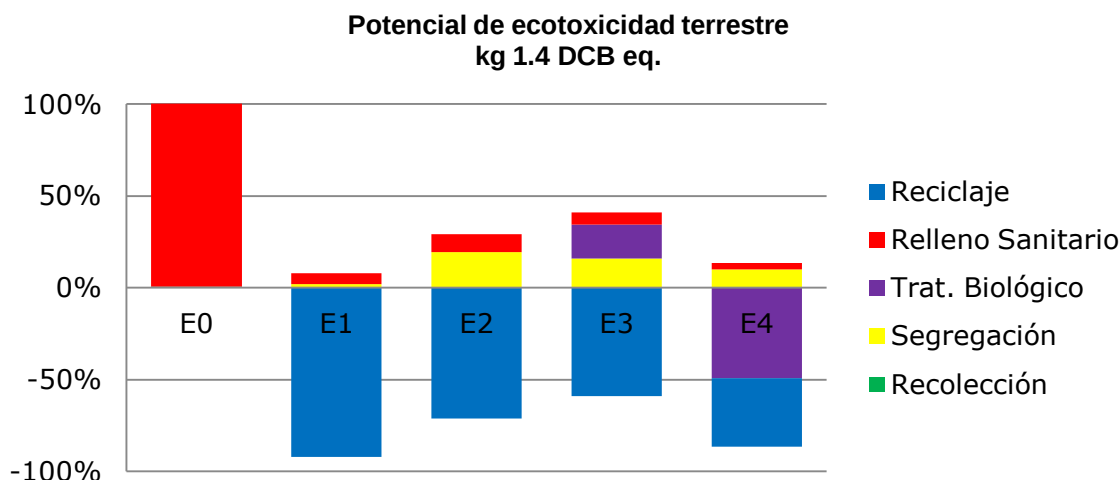


Figura 4.25 Contribución de cada etapa del ciclo de vida de la gestión de residuos al potencial de ecotoxicidad terrestre.

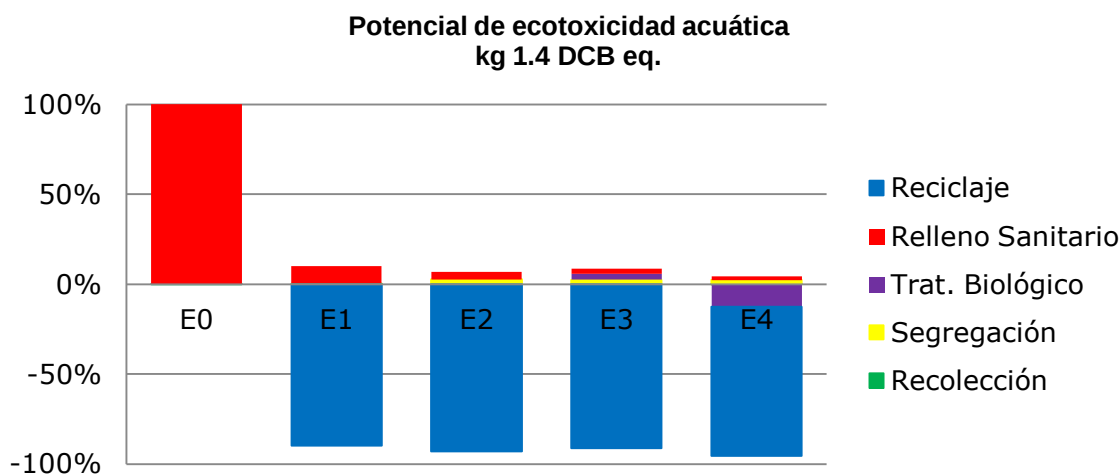


Figura 4.26 Contribución de cada etapa del ciclo de vida de la gestión de residuos al potencial de ecotoxicidad acuática.

4.5. Análisis de sensibilidad

Para esta etapa se analizaron los sistemas de manejo propuestos en dos análisis, el primero modificando la variable modelo de inventario de ciclo vida utilizando dos modelos distintos para evaluar si los indicadores de impacto ambiental difieren significativamente al emplear el modelo IWM-2 en comparación al IWMMM. En el segundo análisis se modificó la variable de porcentaje de contaminación de los residuos de recolección segregada y se evaluaron los indicadores de impacto ambiental con porcentajes de contaminación del 20%, 30% y 40%..

4.5.1 IWM-2 Vs IWMMM

Se emplearon los mismos datos de entrada en ambos modelos y se evaluó el consumo de combustible, los residuos sólidos finales, y los indicadores ambientales de mayor impacto GWP, POCP y AP. Los resultados para cada categoría de impacto se muestran en las Figura 4.27 a 4.31, en ambos modelos los indicadores ambientales mantienen la misma tendencia para los escenarios, coincidiendo en el E0 como el de mayor contribución al impacto ambiental y el E4 como el de mejor desempeño ambiental.

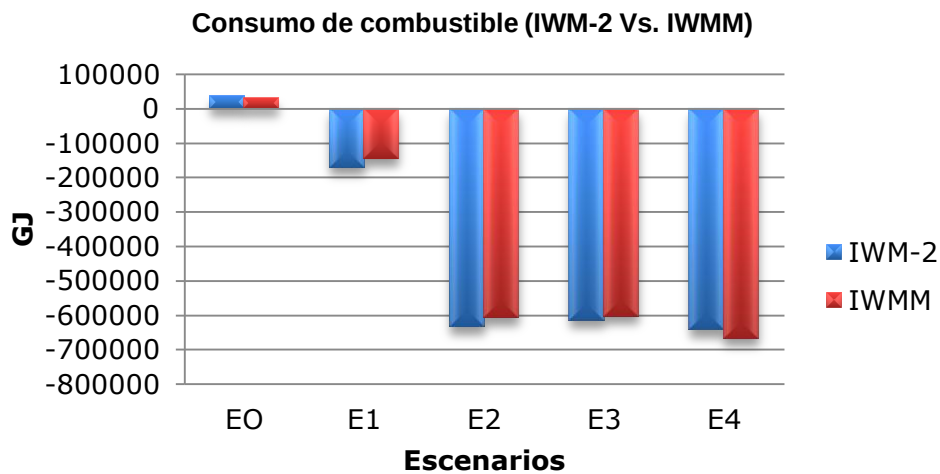


Figura 4.27. Comparación de resultados de consumo de combustible (IWM-2 Vs. IWMM)

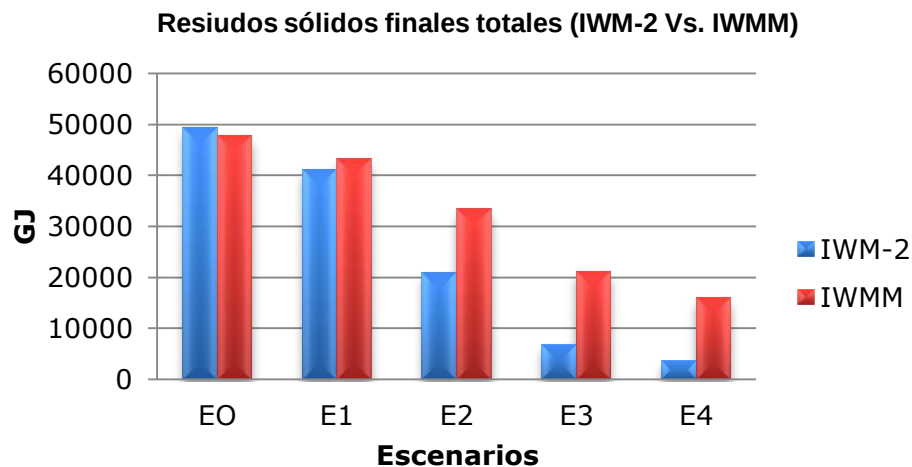


Figura 4.28. Comparación de resultados de residuos finales totales (IWM-2 vs. IWMMM)

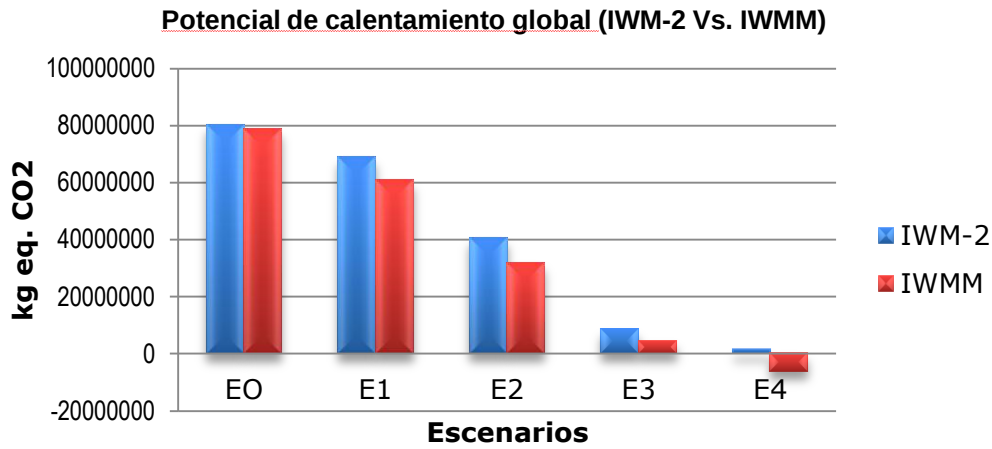


Figura 4.29. Comparación de resultados de potencial de calentamiento global (IWM-2 vs. IWMM)

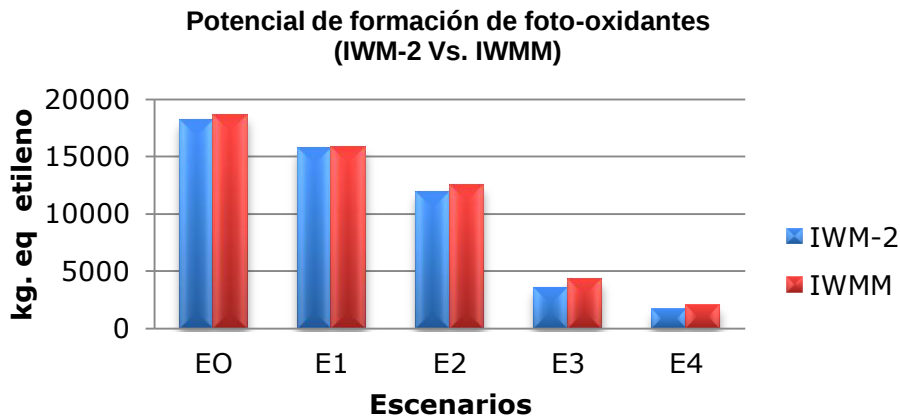


Figura 4.30. Comparación de resultados de potencial formación de foto-oxidantes (IWM-2 vs. IWMM)

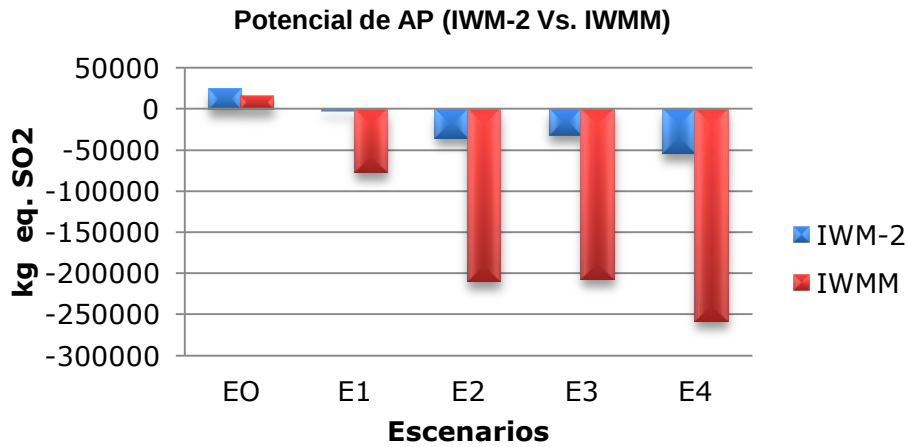


Figura 4.31. Comparación de resultados de potencial de acidificación (IWM-2 v. IWMM)

4.5.2 Porcentaje de contaminación de material segregado

Se evaluaron los cinco escenarios en tres diferentes porcentajes de contaminación de los residuos segregados 20%, 30% y 40%, y se calculó el consumo de combustible, los residuos sólidos finales, y los indicadores ambientales de mayor impacto GWP, POCP y AP. Los resultados para cada categoría de impacto se muestran en las Figura 4.33 a 4.37, a pesar de los tres diferentes porcentajes de contaminación los modelos en cada uno de los indicadores ambientales mantienen la misma tendencia para los escenarios, coincidiendo en el E0 como el de mayor contribución al impacto ambiental y el E4 como el de mejor desempeño ambiental.

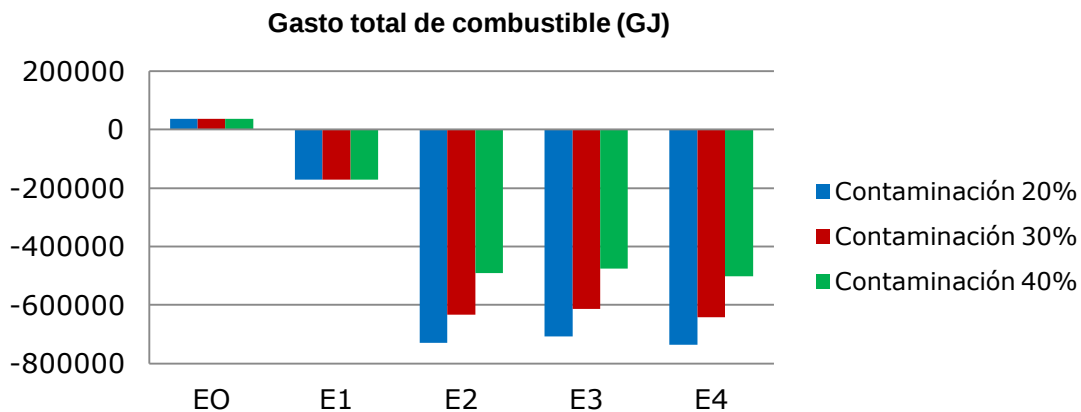


Figura 4.32. Resultados de consumo de combustible por porcentaje de contaminación de los residuos reciclables en recolección segregada.

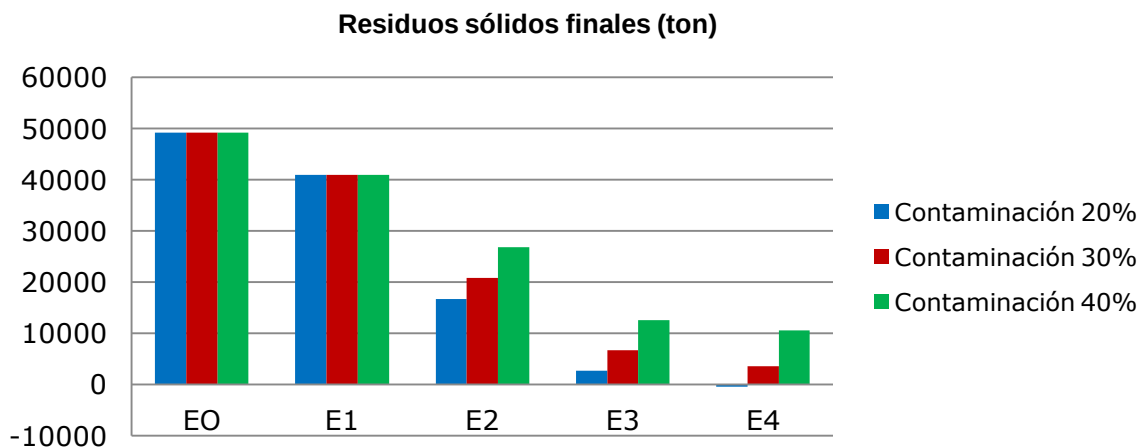


Figura 4.33 Resultados de residuos sólidos finales por porcentaje de contaminación de los residuos reciclables de recolección segregada

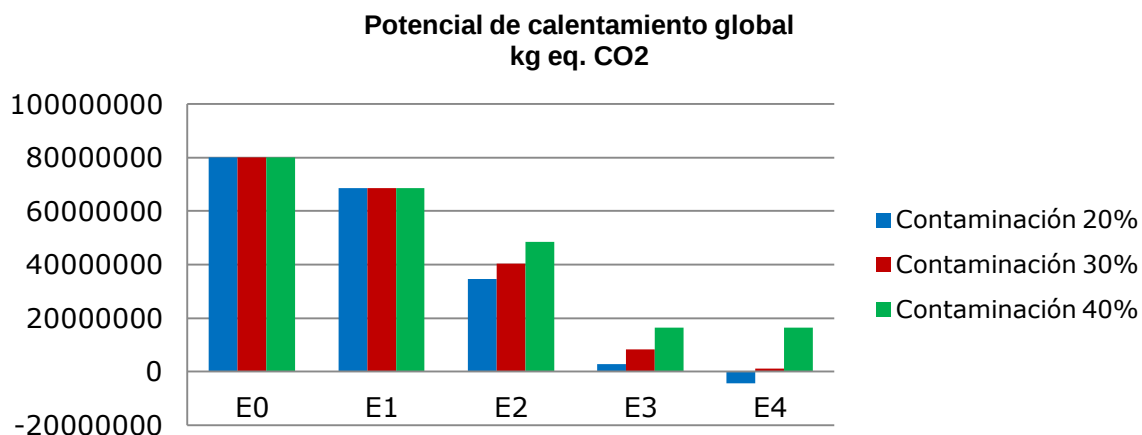


Figura 4.34 Resultados de potencial de calentamiento global por porcentaje de contaminación de los residuos reciclables de recolección segregada

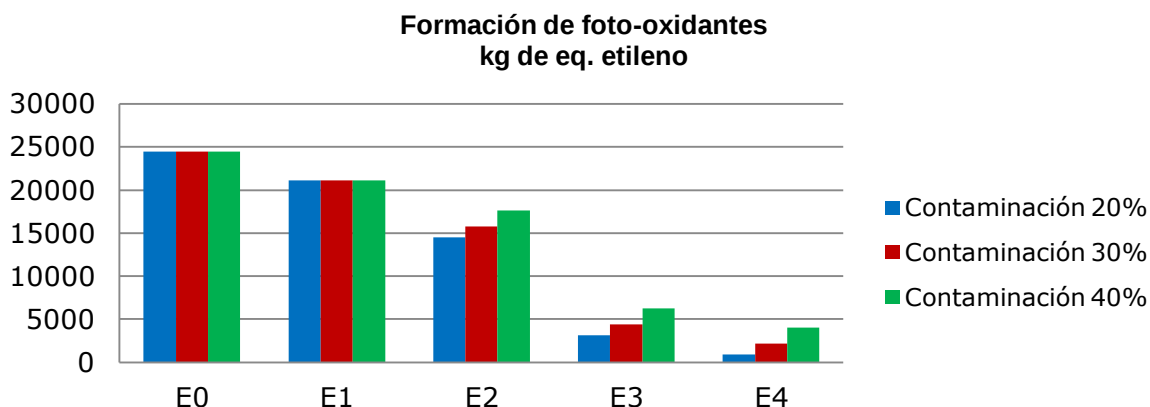


Figura 4.35 Resultados de potencial de formación de foto oxidantes por porcentaje de contaminación de los residuos reciclables de recolección segregada

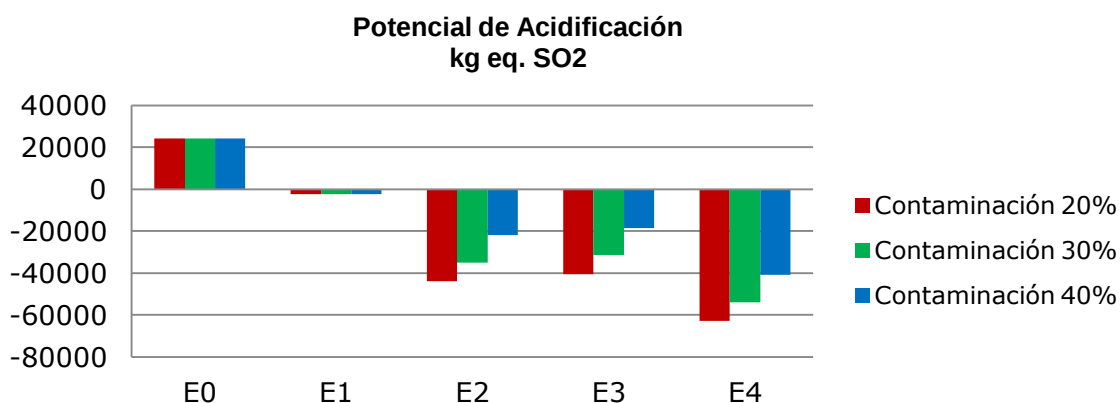


Figura 4.36 Resultados de potencial de acidificación por porcentaje de contaminación de los residuos reciclables de recolección segregada

Capítulo 5. Discusión

5.1. Estudio de generación y caracterización de residuos comerciales.

Se identificaron 16 giros de negocio en la siguiente proporción: servicio de restaurantes y bares con el 22.1%, consultorios médicos con el 17.5%, oficinas con el 15.8%, mercados de abarrotes y alimentos frescos con el 10.1%, comercios de ropa, misceláneos y ópticas con el 15.1% y otros con el 19.4%. Los giros de negocio de este estudio son diversos en comparación con los estudios realizados por Norrie et al (1997) que solo representa un solo giro de supermercados o el realizado por Buenrostro et al (1999) de mercados municipales en el que se detectaron 31 giros comerciales pero solo seis (los relacionados con venta o preparación de alimentos) se consideraron significativos en relación a la cantidad de residuos que generan.

La generación diaria por comercio de 15.46kg se estimó en base a los datos de tres meses de recolección correspondientes a los 900 comercios muestra, se descartaron los días festivos para evitar sobre estimar el dato de generación.

Los resultados de la caracterización de los residuos comerciales indican que hay una proporción del 36.8% de residuos orgánicos putrescibles, un 56.1% son materiales reciclables y el 7.1% no son aprovechables.

Estos resultados son similares a lo encontrado en Norrie *et al.* (1997) residuos de supermercados en Canadá donde, la composición que reportó fue de 40 % de orgánicos y 60 % de inorgánicos; esto puede deberse a que Mexicali por ser una ciudad ubicada en frontera con Estados Unidos el patrón de consumo de sus habitantes se asemejan a los de un país desarrollado como lo es Canadá. Y a los obtenidos en la caracterización de residuos municipales de Ensenada, B.C. por Aguilar *et al.* (2010), las proporciones de las distintas categorías de residuos son muy similares. Aun cuando son residuos de distintas fuentes, en este último se obtuvo 37.36 % de orgánicos, 22.49% de papel y cartón y 23.8% de plásticos,

en comparación con 19.1% de papel y cartón y 21.5 de plásticos generados por los micronegocios de este estudio, esto puede ser debido a la similitud y cercanía de las ciudades y el periodo en que ambas investigaciones fueron realizadas.

Sin embargo es completamente diferente a lo encontrado en el estudio de mercados municipales de Morelia realizado por Buenrostro *et al.* (1999) dónde se observó 80 % de orgánicos a pesar de ser residuos comerciales procedentes del mismo país, sin embargo el giro comercial predominante era el de preparación y venta de alimentos contrario a lo encontrado en este estudio en el que existen cuatro giros dominantes que le dan una característica de heterogeneidad a los residuos generados.

La caracterización de los residuos se realizó en el periodo de una semana, teniendo así la fotografía de un punto en el tiempo del comportamiento de los mismos, sin embargo se recomienda en el futuro continuar con el estudio de caracterización durante las cuatro estaciones del año y de esta forma conocer la dinámica de la composición de estos residuos durante el año y tener mayor información para diseñar un plan de integral de manejo de residuos acorde a las necesidades del sector.

Los datos obtenidos en la caracterización fue la base para el diseño de los escenarios del sistema de manejo de residuos comerciales para Mexicali, tomando en cuenta que más de la mitad de ellos son reciclables con valor en el mercado y el resto biodegradables con posibilidad de aprovechamiento para la producción de composta o biogás.

5.2. Evaluación de escenarios de manejo de residuos comerciales

Los cinco escenarios del sistema de manejo de residuos comerciales se diseñaron tomando en cuenta primero un escenario base E0 que solo incluye recolección y confinamiento en relleno sanitario; en el escenario E1 se representa el sistema de manejo de residuos actual con datos reales de consumo de combustible, recuperación de reciclables, confinamiento en relleno sanitario y costos de manejo del sistema; los escenarios E2, E3 y E4 son

sistemas de manejo de residuos propuesto en los que se incluye la recolección segregada considerando que el consumo de combustible es igual al actual, recuperación de reciclables en planta de recuperación de materiales semiautomática estimando una capacidad de 100 toneladas de materiales al día y tratamientos biológico de compostaje/biogás; y para todos los escenarios se consideró el relleno sanitario en la situación actual sin captación de gases. Otros estudios como en Ozeler et al. (2006), Bovea et al (2010), Zhao et al. (2009) en el diseño de sus escenarios para el manejo de residuos municipales además de incluir las etapas de recolección, segregación, recuperación de reciclables, tratamientos biológicos (compostaje/biogás), también incluyen procesos de recuperación de la energía de los residuos como la incineración o relleno sanitario con generación de energía; para el caso de esta investigación estos procesos no fueron incluidos por dos razones específicas, la primera es que el relleno sanitario actual concesionado a la empresa PASA por 20 años no tiene hasta el momento considerado la captación de gases y generación de energía y en segundo lugar es que éstos escenarios fueron diseñados para el manejo de los residuos comerciales generados en micro-negocios, que cuentan con una gran cantidad de material recuperable, y los residuos remanentes son una cantidad mucho menor a la requerida para un proceso de incineración de alto costo de inversión inicial y mantenimiento.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que los escenarios de recolección segregada como E2, E3 y E4 tendrían un costo de operación menor en comparación con los escenarios E0 y E1 a pesar de que los primeros son sistemas más complejos al incorporar reciclaje, compostaje y digestión anaerobia en comparación con los segundos, esto se atribuye a que durante el diseño de los escenarios se definió que la recolección mixta y la segregada requieren de los mismos recursos, lo que implica que esta actividad no incrementa el costo de operación de los sistemas, además en los sistemas E2, E3 y E4 se consideraron ingresos económicos por la comercialización de reciclables, composta y energía generados que permite financiar el sistema.

Los escenarios que incluyen entre sus procesos la actividad de recuperación de materiales son los que resultaron con menor gasto de combustible en el sistema

global, a pesar que en el sistema local este tipo de escenarios consumen mayor cantidad de combustible, sin embargo, este ahorro se atribuye principalmente al material recuperado en las actividades de reciclaje por las cuales el modelo IWM-2 atribuye una sustitución 1:1, esto significa que por cada unidad de material recuperado se sustituye la misma cantidad de materia prima virgen, aunque en la realidad esto no es siempre cierto. Además el modelo supone que se incurre en un mayor consumo de combustible y cargas ambientales durante la obtención de materia prima virgen versus la recuperación de material reciclado. Sin embargo Bovea et al. (2010) concluye que el ratio de sustitución de los materiales durante el análisis no tiene ninguna influencia al momento de la elección del escenario con mejor eficiencia ambiental.

La diferencia entre los residuos generados por los escenarios E3 y E4 aun cuando en ambos se recupera el 33.17% de reciclables se debe a que en E3 los residuos orgánicos son tratados por digestión aeróbica para la producción de composta, pero solo el 50% de la composta generada se consideró comercializable por lo que el resto sigue siendo un residuo que termina en el relleno sanitario; en el escenario E4 los residuos orgánicos son tratados por digestión anaerobia para la producción de biogás y posterior generación de energía, y no se generan residuos ya que el efluente se puede utilizar como fertilizante y los sólidos como composta, además durante la digestión anaerobia no se liberan gases a la atmósfera ya que el metano producido puede ser utilizado para la generación de energía o puede quemarse, al contrario de lo que sucede durante el proceso de compostaje.

Los resultados de los indicadores ambientales para los escenarios E0, E1, E2, E3 y E4 utilizando el modelo IWM-2 muestran que el mejor desempeño ambiental lo tiene los escenarios con recolección segregada siendo E4 el que presenta mayor ahorro en combustibles, menor generación de residuos finales y el de menor contribución en todas las categorías de impacto ambiental excepto en agotamiento de recurso biótico. E2 presenta una menor contribución que E3 en las categorías de impacto de acidificación, eutrofización, toxicidad humana y ecotoxicidad terrestre y acuática, pero E3 tiene una menor aportación en potencial de calentamiento global y formación de foto-oxidantes, que son

indicadores de mayor contribución al impacto ambiental de acuerdo a los datos normalizados en relación con el sistema de referencia; con esto se deduce que E3 tiene mejor desempeño ambiental que E2, además de un menor costo anual. Los resultados concuerdan con los obtenidos en Ozeler et al (2006), Zhao et al (2009) y Bovea et al (2010) en el que los mejores escenarios son los que incluyen segregación, reciclaje, digestión anaerobia de la fracción orgánica, pero si además incluye generación de energía se mejora la eficiencia ambiental del sistema en comparación de los otros sistemas.

La elección de la mejor alternativa de manejo depende tanto de desempeño ambiental, como de los costos del sistema queda entre los escenarios de recolección segregada, compostaje y digestión anaerobia E3 y E4 la mejor elección. El más económico es el E3 pero E4 tiene mejor desempeño ambiental. Para tomar la mejor decisión se deberá estimar la inversión inicial de ambos escenarios para conocer el retorno de inversión, los costos de mantenimiento, la experiencia en uso, infraestructura necesaria y los factores sociales, lo cual se sugiere para una investigación futura.

La normalización de los resultados se realizó de acuerdo a la metodología CML (Guinee, 2002) con el sistema de referencia del mundo durante el año 2000; con los factores de normalización propuestos por Sleeswijk et al. (2008), se eligió por ser el sistema más actual disponible. Al normalizar los resultados se determinó que las categorías de impacto ambiental de mayor importancia por su contribución a la carga ambiental son el potencial de calentamiento global, potencial de acidificación y potencial de formación de foto- oxidantes.

Identificar las etapas del ciclo de vida del sistema de manejo de residuos que contribuye en mayor grado a las categorías de impacto sobre todo a aquellas de mayor importancia de acuerdo a la normalización de los resultados, es importante para enfocar los esfuerzos para la mejora de la eficiencia ambiental de dichos procesos y por lo tanto de todo el sistema.

De acuerdo al análisis de contribución las etapas del sistema de manejo de residuos asociadas al mayor impacto potencial de calentamiento global, acidificación y formación de foto-oxidantes son los procesos de recolección,

segregación y relleno sanitario. Debido a que los dos primeros procesos consumen una gran cantidad de energía en comparación con las otras etapas del sistema y el tercero es una etapa de almacenamiento de los residuos en los cuales se degradan liberando emisiones al ambiente. Y por otra parte la etapa de reciclaje contribuye a la reducción de la carga ambiental, debido a la recuperación de materiales y su sustitución por materiales vírgenes. Esto coincide con los resultados obtenidos en Brambilla et al. (2009), Bovea et al (2010), Pires et al (2011). Es por esto que lograr una disminución en el consumo de energía mejorando el proceso de recolección y segregación así como la reducción de residuos que llegan al relleno sanitario y la captación de gases de relleno sanitario impactaría directamente en la reducción de la carga ambiental del sistema.

En este estudio se consideró el mismo proceso de recolección y relleno sanitario para todos los escenarios, debido a esto las etapas de recolección y almacenamiento final no hacen alguna diferencia entre la elección de los escenarios, sin embargo sería adecuado desarrollar escenarios donde se evalúen distintos procesos de recolección y manejo de relleno sanitario para encontrar la combinación óptima para el caso de estudio.

A través del análisis de sensibilidad se determinó la robustez del modelo de análisis de ciclo de vida con el que fueron evaluados los escenarios para ello se modificaron dos variables de entrada; una fue el modelo de inventario de ciclo de vida y la otra variable fue el grado de contaminación de los materiales segregados, en ambos casos aun cuando los resultados de las emisiones variaron la elección del escenario más eficiente se mantuvo en todos los casos. Esto concuerda con los análisis de sensibilidad llevados a cabo en Bovea et al (2010) y Pires et al. (2011) donde a pesar de los cambios en los modelos de inventario, cambio en el grado de sustitución o cambio en la eficiencia de reciclaje, no se identifica una diferencia en la elección del escenario con mejor eficiencia ambiental.

Capítulo 6. Conclusiones

Un óptimo manejo de los residuos sólidos urbanos requiere del diseño de un sistema integral adecuado para la localidad en el que todos los participantes involucrados (sociedad, gobierno e iniciativa privada) trabajen en conjunto para desarrollar, implementar y mantener la mejor alternativa que mitigue la carga ambiental en equilibrio con su costo económico y aceptación social. Para lo cual es necesario analizar todas las fuentes de generación que integran los residuos urbanos y tener una visión completa de la problemática y sus vertientes; es aquí que el estudio de los residuos comerciales como parte de la corriente de los residuos urbanos toma importancia.

En esta investigación se abordó el estudio de los residuos comerciales de un sector en específico que es el del micro-negocio, con el objetivo de evaluar escenarios para su recuperación y reciclaje.

El manejo de estos residuos actualmente sigue la corriente de los residuos urbanos domiciliarios perdiendo así su potencial de aprovechamiento; una alternativa a lo anterior sería sujetar a un plan de manejo a los residuos generados en establecimientos comerciales con el objetivo de maximizar su valorización e incrementar la vida útil del sitio de disposición final, de acuerdo a lo establecido en las líneas de acción para la prevención y gestión integral de residuos sólidos urbanos estipulado en el PNPGIR 2009-2012.

Actualmente existen 8544 micro-negocios en el área urbana. En base a la muestra observada se estimó una generación de residuos de 15.46 kg al día por establecimientos. Este grupo de comercios se divide en 16 distintos giros de negocio, siendo los más frecuentes el de servicio de restaurantes y bares (22.1%), consultorios médicos (17.5%), oficinas diversas (15.8%), mercados de abarrotes y venta de alimentos frescos (10.1%), almacenes de ropa, misceláneos, farmacias y ópticas (15.1%) y otros (19.9%).

Los residuos generados por este sector se componen en su mayoría de materiales de empaque y embalaje, así como de orgánicos putrescibles; una

recolección segregada podría incrementar su potencial de valorización al evitar la contaminación de los materiales reciclables. Durante la caracterización se determinó que el 56.1% son residuos reutilizables y reciclables, el 36.8% corresponde a residuos orgánicos putrescibles, 5.4% residuos con alto poder calorífico y solo el 1.7% de residuos para disposición final.

Una de las aportaciones de esta investigación es el desarrollo de una nueva metodología de caracterización de residuos más adecuada y eficiente para las características dimensionales de los residuos comerciales a través de toma de muestras por secciones asegurando así tener una muestra total representativa; al contrario del método del cuarteo propuesto en la NMX-AA-015-1985 diseñada para residuos domiciliarios.

El análisis de ciclo de vida es una herramienta que permite modelar un sistema de manejo de residuos y evaluar las entradas, salidas y su impacto ambiental. En el ACV una etapa crucial es la obtención de los datos de entrada para el inventario de ciclo de vida, obtener la mayor cantidad de datos locales es lo ideal para un ACV lo más apegado a la realidad posible, sin embargo existe una falta de información de datos de inventario para México, por lo que se requiere que en nuestro país se desarrolle una base de datos acorde a las circunstancias del país.

Durante esta investigación se desarrollaron cinco escenarios de manejo de residuos, un escenario base, un escenario actual y tres escenarios propuestos de manejo integral que combina los procesos de recuperación de materiales, tratamiento biológico aerobio (compostaje) y anaerobio (biogás).

Los factores de carga ambiental de los sistemas de residuos son evaluados dependiendo de la relevancia del consumo de materia prima, energía y la emisión de contaminantes. Los escenarios propuestos buscan mejorar la eficiencia ambiental en base al incremento del valor de los residuos al considerarlos materiales alternos a los recursos naturales vírgenes, la reducción de residuos dispuestos en el relleno sanitario y la disminución de las emisiones liberadas al ambiente del ciclo de vida del sistema de manejo de los residuos.

El sistema de manejo que integra los procesos de recolección segregada, recuperación de materiales reciclables, digestión anaerobia de la fracción orgánica y disposición final de los residuos en el relleno sanitario (E4) es el sistema de manejo de mejor eficiencia ambiental seguido del escenario que incluye la digestión aerobia de los residuos orgánicos putrescibles (E3), en comparación con los otros escenarios evaluados (E0, E1, E2).

Las etapas de ciclo de vida del manejo de los residuos que mayormente contribuyen al costo y carga ambiental de todos los escenarios evaluados en esta investigación son los procesos de recolección y disposición final. Diseñar alternativas de planes de recolección y relleno sanitario con captación de gases ofrecería una considerable mejora al sistema actual y a los escenarios aquí propuestos.

Los resultados obtenidos en esta investigación encuentran su aplicación en el diseño de planes de manejo para los residuos comerciales generados en micro-negocios, sin embargo para el diseño de un sistema adecuado para todos los residuos comerciales de la ciudad es necesario realizar el análisis de los residuos generados en los comercios de tamaño chico, medio y grande, y complementar los resultados aquí encontrados para el diseño de un sistema de manejo de residuos comerciales para la ciudad de Mexicali.

Bibliografía:

- Aarnio, T and Hämäläinen, A. (2008). Challenges in packaging waste management in the fast food industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 612-621.
- Aguado, J., Serrano D., Escola, J.M. and San Miguel, G. (2003). *Plásticos Modernos*, 86, 539-546.
- Aguilar-Virgen, Q., Armijo-de Vega, C., Taboada-González, P. A., and Ojeda-Benítez, S. (2010). Municipal solid waste generation and characterization in Ensenada , México., 140–145. *The open waste management journal*, 3, 140-145.
- Al-Salem, S.M. and Lettieri, P. (2009). Life cycle assessment (LCA) of municipal solid waste management in the state of Kuwait. *European journal of scientific research*, 34, 395-405.
- Al-Salem, S.M. and Lettieri P. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29, 2625-2643.
- Aracil Saéz, I. (2008). Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirolisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP). Tesis de doctorado en ingeniería química, Universidad de Alicante, España
- Athanassiou, M. and Zabaniotou, A. (2008). Techno-economic assessment of recycling practices of municipal solid wastes in Cyprus. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1474-1483.
- Aznar, M.P., M.A. Caballero, J.A. Sancho and E. Frances, 2006. Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant. *Fuel Proc. Technol.*, 87: 409-420
- Bare, J., and Hofstetter, P. (2000). Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. *The international journal of life cycle assessment*, 5(6), 319–326.
- Bare, J.C., Norris, G.A., Pennington, D.W., and McKone, T. 2003. "TRACI – The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts." *Journal of Industrial Ecology*. 6(3-4), pp 49-78. The MIT Press.
- Barradas Rebolledo, A. (2009). Gestión integral de residuos sólidos municipales: Estado del Arte. Instituto Tecnológico de Minatitlán, Veracruz, México.
- Barton, J.R., Dalley, D. and Patel, S. (1996). Life cycle assessment for waste management. *Waste management*, 16, 35-50.
- Beccali, G., Cellura, M., and Mistretta, M. (2001). Managing municipal solid waste. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(4), 243–249
- Berenguer Muñoz, D. (2008). Craqueo catalítico de polímeros; estudio de diferentes sistemas polímero/catalizador. Tesis de doctorado en química, Universidad de Alicante, España.
- Bovea, M.D. (2002). Valoración de productos ecológicos, aplicación al diseño de mobiliario de oficina. Memoria de tesis doctoral. Universitat I, Departamento de Tecnología
- Bovea, M. D., Ibáñez-Forés, V., Gallardo, a, and Colomer-Mendoza, F. J. (2010). Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A

Spanish case study. *Waste management (New York, N.Y.)*, 30(11), 2383-95. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.wasman.2010.03.001

Brambilla Pisoni, E., Raccanelli, R., Dotelli, G., Botta, D., and Melià, P. (2009). Accounting for transportation impacts in the environmental assessment of waste management plans. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(3), 248–256.

Buenrostro, O. (2001). Gestión de residuos sólidos municipales en México: Un caso de estudio. *Ciencia y desarrollo*, 27, 13-21.

Buenrostro, O., Bernache, G., Cram, S. y Bocco, G. (1999). Análisis de la generación de residuos en los mercados municipales de Morelia, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 15, 27-32.

Buenrostro, O., Márquez, L. and Pinette, F. (2008). Consumption patterns and household hazardous solid waste generation in an urban settlement in Mexico. *Waste Management*, 28, S2-S66.

Catálogo de Normas Mexicanas. (2009). NMX-019-1985. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo- Residuos Sólidos Municipales- Peso Volumétrico in situ. Disponible en: <http://normas.economia.gob.mx/normasmx/index.nmx>

Catálogo de Normas Mexicanas. (2009). NMX-022-1985. Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo -Residuos Sólidos Municipales - Selección y Cuantificación de Subproductos. Disponible en: <http://normas.economia.gob.mx/normasmx/index.nmx>

Centro de estudios y experimentación de obras públicas CEDEX. (2007). Ficha técnica 5.3. Residuos plásticos procedentes del balizamiento de carreteras. Ministerio de fomento. Ministerio de medio ambiente. España. Disponible en: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/ficha.aspx?idresiduo=416&idmenu=425>

Chacón, J.R. (2008) Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida, con una biografía selecta. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* No. 72. Pp 37 -70.

Cleary, J. (2010). The incorporation of waste prevention activities into life cycle assessments of municipal solid waste management systems: methodological issues. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(6), 579–589.

Colomer, F. J. y Gallardo, A. (2007). Tratamiento de residuos sólidos. México: LIMUSA.

Comisión de cooperación ecológica fronteriza. COCEF. (2007). Diagnóstico e indicadores de residuos sólidos municipales de las principales ciudades de la frontera norte de México.

Comisión Europea. (2005). Estrategia sobre la prevención y el reciclado de los residuos COM (2005)666- No publicado en el Diario Oficial. Disponible en: http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/l28168_es.htm

Comisión Europea. (2009). Environment, Waste. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>

Comisión Federal de Electricidad. CFE. (2011). Estadísticas - Generación. Disponible en: http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Estadisticas/Paginas/Generacion.aspx

Compromiso empresarial para el reciclaje CEMPRE – Uruguay (1997). Residuos sólidos urbanos: Manual de gestión integral. Disponible en: www.cempre.org.uy

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos de 1917. Legislación federal vigente al 6 de Diciembre de 2009.

De Baere L and Mattheeuws B. (2008). State of the art 2008 – anaerobic digestion of solid waste. *Waste Management World* 9:1-8

Dobos, I. and Richter, K. (2006). A production/recycling model with quality consideration. *International Journal of production economics*, 104, 571-579.

Ecobilan (1999). DEAM, life-cycle inventory database developed by the Ecobilan Group.

Economopoulos P., A. (2010). Technoeconomic aspects of alternative municipal solid wastes methods. *Waste Management*, 30, 707-715

Elcock, D. (2007). Life cycle thinking for the oil and gas exploration and production industry. Environmental science division. Argonne National Laboratory.

Energy Solution Center ESC, (2002). The Heat Treat Consortium Energy Solutions Center Inc. Metal Advisor. Disponible en: http://www.energysolutionscenter.org/heat treat/metalsadvisor/aluminum/recycle_and_scrap_melting/recycle_and_scrap_melting_process_description.htm

EPA (2006). Waste Reduction Model (WARM). Climate Change and Waste. US Environmental Protection Agency. Disponible en: http://www.epa.gov/climatechange/waste/calculators/Warm_home.html.

Espinoza, R.M., Delfín, I., Raygoza, M. I. Tyrpin, S. y Cisneros, A. (2008). Propuesta de actualización de la NMX-AA-22-1985, selección y cuantificación de subproductos en residuos sólidos urbanos. XVI Congreso Nacional de ingeniería sanitaria y ciencias ambientales. La sustentabilidad en las grandes ciudades.

Fierro, A., Armijo, C., Taboada, P., Aguilar, Q., y Bravo, M. (2008). Problemática de la generación de residuos sólidos en supermercados de la ciudad de Mexicali, Baja California. XVI Congreso Nacional de ingeniería sanitaria y ciencias ambientales. La sustentabilidad en las grandes ciudades.

Frischknecht, R, Steiner, R. and Niels, J. 2009: The ecological scarcity method – eco-factors 2006. A method for impact assessment in LCA. Environmental studies no. 0906. Federal office for the environment, Bern: 188 pp.

Garrik, L and Jhih-Shyang, S. (2007). A flexible inventory model for municipal solid waste recycling. *Socio-Economic Planning Sciences*, 41, 61-89.

Gebrezgabher, S. a., Meuwissen, M. P. M., Prins, B. a. M., and Lansink, A. G. J. M. O. (2010). Economic analysis of anaerobic digestion—A case of Green power biogas plant in The Netherlands. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 57(2), 109-115. Royal Netherlands Society for Agriculture Sciences. doi:10.1016/j.njas.2009.07.006

Gobierno del estado de Baja California (2008). Portal ciudadano, Medio físico, Mexicali. Disponible en: http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/municipios/mexicali/medio_fisico_m.jsp

Goedkoop M.J.; (1995). De Eco-indicator 95, Final report; NOH report 9523; PRé Consultants; Amersfoort (NL); July 1995; ISBN 90-72130-77-4.

Goedkoop, M. and Spriensmand, R. (2001). Eco Indicator 99, A damage oriented method for life cycle impact assessment. Metodology Report. 3rd. Edition. Product Ecology Consultants. The Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment. 132 pp.

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. D., Struijs, J., and Zelm, R. V. (2009). ReCiPe 2008. The Dutch Ministry of Housing, Spacial Planning and Environment : 126 pp.

Gómez, G., Meneses, M., Ballinas, L., and Castells, F. (2009). Seasonal characterization of municipal solid waste (MSW) in the city of Chihuahua, Mexico. Waste management (New York, N.Y.), 29(7), 2018–24 pp.

Guinee, J.,(2002). Handbook on Life Cycle Assessment. An Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers.

Haight, M. E. (2004). Technical report: Integrated solid waste management model. University of Waterloo.

Hauschild, M., and Potting, J. (2005). Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment The EDIP2003 methodology. Environmental News. Danish Ministry of the Environment. Environmental Protection Agency, 80, 195.

Heitmann, J. A. and Joyce, T. W. (Sin fecha). Paper recycling state of the art and future directions. North Carolina State University. Department of wood and paper science.

Hong, R. J., Wang, G. F., Guo, R. Z., Cheng, X., Liu, Q., Zhang, P. J., and Qian, G. R. (2006). Life cycle assessment of BMT-based integrated municipal solid waste management: Case study in Pudong, China. Resources, Conservation and Recycling, 49(2), 129–146.

Instituto nacional de ecología (INE). (2007). Residuos sólidos urbanos. Capítulo 4. Actualizado el 15 de noviembre de 2007. Disponible en: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/495/residuos.html>

Instituto nacional de ecología (INE). (2009). www.ine.gob.mx

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2004). Censos económicos 2004. Sitio en internet: www.inegi.gob.mx

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Censo de población y vivienda 2010. Censos y conteos de población y vivienda. Sitio de internet: www.censo2010.org.mx

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2011). Directorio estadístico nacional de unidades económicas 03/2011. Sitio en internet: www.inegi.org.mx

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2012). Rellenos sanitarios y de tierra controlados, por entidad federativa, 2011. Actualizado el 29 de junio de 2012. Sitio de internet: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb130&c=21640&s=est>

ISO 14040 (2006) Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. International Standard. Disponible en www.iso.org.

ISO 14044 (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines Management environnemental. International Standard. Disponible en www.iso.org.

Jensen, A.A., Møller, L.T. and Schidt, A. (1997). Life Cycle Assessment (LCA). A guide to approaches, experiences and information. Environmental Issues Series. No. 6. European Environmental Agency.

- Khoo, H. H. (2009). Life cycle impact assessment of various waste conversion technologies. *Waste management*, 29(6), 1892–900
- Kirkeby, J. T., Birgisdottir, H., Hasen, T.L., Christensen, T.H., Bhander, G.S and Hauschild, M. (2006). Environmental assessment of solid waste systems and technologies: EASEWASTE. *Waste Management & Research*, 24(1), 3–15.
- Koci, V. and Trecakova, T. (2011). Mixed municipal waste management in the Czech Republic from the point of view of the LCA method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(2), 113–124
- Kofoworola, O. F. (2007). Recovery and recycling practices in municipal solid waste management in Lagos, Nigeria. *Waste management (New York, N.Y.)*, 27(9), 1139–43.
- Magrinho, A. and Semiao, V. (2007). On the effect of annual evolution of rejected and non-rejected rates in the screening process of packaging wastes on meeting target recycling rates. *Resources, Conservation and Recycling*, 51, 561-576.
- Manfredi, S. and Christensen, H.T. (2009). Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. *Waste management*, 29, 32-43.
- Marketing, R., and For, C. (2003). Material recovery facility handbook. Recycling Marketing Cooperative for Tennessee, USA.
- Martínez Arce, E., Daza, D., Tello Espinoza, P., Soulier Faure, M., y Terraza, H. (2010). Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y El Caribe 2010. Organización Panamericana de la Salud. 158pp.
- Mattson, C.H., Berg, P.E.O. and Clarkson, P. A. (2003). The development of systems for property close collection of recyclables: experiences from Sweden and England. *Resources, Conservation and Recycling*, 38, 39-57.
- Mc Dougall, F., White, P., Franke, M. y Hindle, P. (2004). Gestión integral de residuos sólidos: Inventario de ciclo de vida. Venezuela: Procter and Gamble Industrial, S.C.A.
- Mc Neil, S.J., Sunderland, M.R. and Zaitseva, L.I. (2007). Close-loop wool carpet recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 51, 220-224.
- Ministry of Housing Spatial Planning and Environment, 2000., Eco-indicator 99. Manual for designers A damage oriented method for life cycle impact assessment.
- Muñoz-Cadena, C. E., Arenas-Huertero, F. J., and Ramón-Gallegos, E. (2009). Comparative analysis of the street generation of inorganic urban solid waste (IUSW) in two neighborhoods of Mexico City. *Waste management*, 29(3), 1167–75
- Muñoz, I., Rieradevall, J., Doménech, X., and Milà, L. (2004). LCA application to integrated waste management planning in Gipuzkoa (Spain). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(4), 272–280.
- Murphy, J.D. and Power, N. (2009). Technical and economic analysis of biogas production in Ireland utilizing three different crop rotations. *Applied Energy*. 86(1), 25-36.
- Nahman Antón. (2009). Extended producer responsibility for packing waste in South Africa: Current approaches and lessons learned. *Resources, Conservation and Recycling*, en prensa.

Norrie, J., Lafortune, P. and Beauchamp, C.J. (1997). Characterization of waste materials originating from Quebec supermarkets and an assessment of recycling potencial. *Resources, Conservation and Recycling*, 19, 265-277

OECD. (2005). *Enviromental Data - Compendium 2004*

OECD (2009). *Factbook. Economic, Environmental and Social Statistics, Municipal Waste*. Disponible en: <http://puck.sourceoecd.org/vl=1776693/cl=23/nw=1/rpsv/factbook2009/08/02/02/index.htm>

Organización Panamericana de la Salud / Organización Mundial de la Salud, OPS y OMS (1996). *Serie Estudios No. 10. Plan Regional de Inversiones en Ambiente y Salud. Análisis Sectorial de Residuos Sólidos en México*.

Ojeda Benitez, S., Armijo de Vega, C. and Ramírez Barreto Ma. E. (2002). Formal and informal recovery of recyclables in Mexicali, Mexico: handling alternatives. *Resources, Conservation and Recycling*, 34, 273-288

Ojeda Benítez, S., Armijo de Vega, C. and Ramírez Barreto Ma. E. (2003). Characterization and quantification of household solid wastes in a mexican city. *Resources, Conservation and Recycling*, 39, 211-222.

Ojeda Benitez, S., Armijo de Vega, C., and Marquez Montenegro, M. (2008). Household solid waste characterization by family socioeconomic profile as unit of analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 7, 992–999

Ojeda Benítez, S., Lozano Olvera, G., Morelos R. A., and Armijo de Vega, C. (2008). Mathematical modeling to predict residential solid waste generation. *Waste Management*, 28, S7-S13.

Ozeler, D., Yetiş, U., and Demirer, G. N. (2006). Life cycle assessment of municipal solid waste management methods: Ankara case study. *Environment international*, 32(3), 405–11.

Pati, R.K., Vrat, P. and Kumar, P. (2006). Economic analysis of paper recycling vis a vis word as raw material. *International Journal of Production Economics*, 103, 489-508.

Pires, A., Chang, N.-B., and Martinho, G. (2011). Reliability-based life cycle assessment for future solid waste management alternatives in Portugal. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(4), 316–337.

Rand, T., Haukohl, J. and Marxen, U. 2000. Municipal solid waste incineration requirements for a successful project. *World bank technical paper No. 462*

Reglamento de protección al ambiente para el municipio de Mexicali, Baja California. Disponible en: www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/BAJA%20CALIFORNIA/Municipios/Mexicali/MexicaliReg14.pdf

Reglamento para la preservación del aseo publico en el municipio de Mexicali, Baja California. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/BAJA%20CALIFORNIA/Municipios/Mexicali/MexicaliReg46.pdf>

Rigamonti, L., Grosso, M. and Giugliano, M. (2009). Life cycle assessment for optimising the level of separated collection in integrated MSW management systems. *Waste management*, 29(2), 934–44.

Scaglia, B., Tambone, F., Centemero, M. e Favonio, E., (2004). Il compostaggio dei rifiuti urbani (Urban waste composting). Quaderno di Ingegneria Ambientale No. 40: I processi aerobici per il trattamento dei rifiuti urbani, a cura di F. Adani, pp. 26–46.

SECOFI (1985). Norma Oficial Mexicana NMX-019-1985. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo- Residuos Sólidos Municipales- Peso Volumétrico in situ. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación. 18 de Marzo de 1985.

SECOFI (1985). Norma Oficial Mexicana NMX-022-1985. Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo -Residuos Sólidos Municipales - Selección y Cuantificación de Subproductos. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación. 18 de Marzo de 1985.

Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, SMADF (2010). Residuos Sólidos. Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/index.htm>

Secretaría de protección al ambiente del gobierno del estado de baja california. (2008)., Diagnóstico ambiental, Valle de Mexicali, Contaminación de suelo. http://www.bajacalifornia.gob.mx/spa/problematika/mexicali_valle.html

Secretaría de protección al ambiente del gobierno del estado de baja california. (2008). Ley de prevención y gestión integral de residuos para el estado de Baja California. Disponible en: www.bajacalifornia.gob.mx

SEDESOL (1996). Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales. Disponible en:<http://www.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/Resource/1592/1/images/ManualTecnicosobreGeneracionRecoleccion.pdf>

SEDESOL. (2005). El Manejo de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial en México. Sancho y Cervera, J. – Rosiles, G.

SEDESOL. (2006). Manual para determinar la Factibilidad de Reducción y Reuso de Residuos Sólidos Municipales. Disponible en: http://sedesol2006.sedesol.gob.mx/subsecretarias/desarrollourbano/sancho/manuales/manuales_residuos_solidos/Reduccion_Reuso.pdf

SEMARNAT. (2005). Indicadores básicos de desempeño ambiental en México: 2005. Disponible en: www.semarnat.gob.mx.

SEMARNAT (2009). Ley general para el equilibrio ecológico y la protección al ambiente. Disponible en: www.semarnat.gob.mx

SEMARNAT (2009). Ley General para la Prevención y Gestión de Residuos Sólidos, 2003. Última reforma publicada 2007. Disponible en: www.semarnat.gob.mx

SEMARNAT (2009). NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección de sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos urbanos y de manejo especial. Disponible en: www.semarnat.gob.mx

SEMARNAT (2009). Programa nacional para la prevención y gestión integral de los residuos 2009-2012.

SEMARNAT (2009). Reglamento de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos. Disponible en: www.semarnat.gob.mx

SEMARNAT .(2009). Residuos sólidos urbanos. Indicadores de presión, estado y respuesta. http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/snria/Documents/04_r_s_municipales.html

SEMARNAT (2009). Reglamento de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos. Disponible en: www.semarnat.gob.mx

SEMARNAT (2012). Residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Disponible en: www.semarnat.gob.mx/temas/residuos/solidos/Paginas/solidos.aspx. Modificado 14 feb 2012

Sharma, V. K. (2000). Wastepaper in Mumbai (India) an approach for abridged life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(1), 12–18.

Sleeswijk, A. W., Van Oers, L. F. C. M., Guinée, J. B., Struijs, J., & Huijbregts, M. a J. (2008). Normalisation in product life cycle assessment: an LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *The Science of the total environment*, 390(1), 227–40.

Steen, B. (1999) A systematic approach to environmental strategies in product development (EPS).Version 2000 - General system characteristics. Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems. Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning. CPM report 1999:4.

Tachwali, Y., Al-Assaf, Y. and Al-Ali, A.R. (2007). Automatic multistage classification system for plastic bottles recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 266-285.

Trejo, R. (1996). Procesamiento de la basura urbana. Ed. Trillas. México. 283p.

Ueta, K. and Kaizumi, H. (2001). Reducing household waste: Japan learns from Germany. *Environmental: Science and policy for sustainable development*, 43, 9.

Udo de Haes, H.A., Joliet, O., Finnveden G., Hauschild M., Krewitt W. and Müller-Wenk R. (1999). Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle Impact assessment. Background document for the second working group on life cycle Impact assessment of SETAC-Europe (WIA-2). *The international journal of life cycle assessment* 4 (2): 66–74

UK Environmental Agency (2006). Waste and Resources Assessment Tool for the Environment (WRATE). Disponible en: <http://www.environment-agency.gov.uk/research/commercial/102929.aspx>

Waste at every stage. (2006). In *UNEP/GRID-Arendal Maps and Graphics Library*. Retrieved 04:34, November 5, 2009 from http://maps.grida.no/go/graphic/waste_at_every_stage.

Weiland, P. (2001). Anaerobic waste digestion in Germany – Status and recent developments, 415-421.

Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied microbiology and biotechnology*, 85(4), 849-60. doi:10.1007/s00253-009-2246-7

Woodard, R., Bench, M., Harder, M. K., and Stantzios, N. (2004). The optimisation of household waste recycling centres for increased recycling—a case study in Sussex, UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 43(1), 75–93.

Ying Zhuang, Song-Wei Wu, Yun-Long Wang, Wei-Xiang Wu and Ying-Xu Chen (2008). Source separation of household waste: A case study in China. *Waste management*, 28, 2022-2030.

Zamorano, M., Molero, E., Grindlay, A., Rodríguez, M.L., Hurtado, A. and Calvo, F.J. (2009). A planning scenario for the application of geographical information systems in municipal

waste collection: A case of Churriana de la Vega (Granada, Spain). *Resources, Conservation and Recycling*, en prensa

Zhao, W., Van der Voet, E., Zhang, Y., and Huppes, G. (2009). Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: case study of Tianjin, China. *The Science of the total environment*, 407(5), 1517–26.

ANEXOS

ANEXO 1. Formato de entrevista para compañías de servicio de recolección de residuos

Compañía:	Dirección:	Teléfono:
Horario de trabajo:	Responsable:	Años trabajando:

- ¿Cuál es el giro de la compañía?
Solo recolector () Recolector/Acopiador ()
- ¿A qué tipo de establecimientos le presta el servicio de recolección de basura?
Casas habitación () Comercio y Servicio () Industriales ()
Peligrosos ()
- Presta servicio a establecimientos en :
Solo ciudad de Mexicali () Ciudad y Valle de Mexicali ()
- ¿Con cuántos clientes cuenta?

- ¿Cuántos de estos clientes son establecimientos comerciales y de servicio, cuantos industriales y cuantos residenciales?

Residenciales	Comerciales	Industriales

- ¿De qué tamaño promedio son los establecimientos comerciales a los que presta servicio?
Micro () Pequeño () Mediano () Grande ()
- ¿Cuál es la cantidad promedio mensual de residuos recolectados?

- ¿Del total recolectado que porcentaje son provenientes del sector comercial, del sector industrial y residencial?

Residenciales	Comerciales	Industriales

- ¿Dónde depositan los residuos recolectados?

- ¿Cuál es su costo de operación por tonelada de residuos recolectados, para el caso de los residuos comerciales?

11. Cuál es el requerimiento de diesel por tonelada de residuos recolectados?

12. ¿Existe algún tipo de recuperación de materiales reciclables? Si () No ()
¿Cuáles?

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

13. ¿Del total de residuos recolectados que porcentaje se recupera?

14. ¿Dónde se realiza esta recuperación?

15. Del total de residuos recuperados, ¿qué proporción es de cada uno de los distintos reciclables?

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

16. ¿Cuál es el destino de los materiales recuperados?
Mercado Nacional () Exportación ()

17. ¿Cuál es el reciclable de mayor demanda?

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

18. ¿Cuál es el reciclable de menor demanda?

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

19. ¿Existe algún material reciclable que no se recupera por falta de demanda del mercado?
¿Cuál?

ANEXO 2. Formato de entrevista para acopiadores/recicladores

Compañía:	Dirección:	Teléfono:
Horario de trabajo:	Responsable:	Años trabajando:

1.- ¿Qué material se recibe en este lugar?

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

2.- ¿A quién le compran el material?

1	Cartón	
2	Papel bond	
3	PET	
4	Papel Periódico	
5	Latas de aluminio	
6	Latas de hojalata	
7	Plástico alta densidad	
8	Plástico de baja densidad	
9	Vidrio	

3.- ¿A qué tipo de compañías venden el material?

1	Cartón	
2	Papel bond	
3	PET	
4	Papel Periódico	
5	Latas de aluminio	
6	Latas de hojalata	
7	Plástico alta densidad	
8	Plástico de baja densidad	
9	Vidrio	

4.- ¿Dónde se localizan las compañías compradoras del material?

1	Cartón	
2	Papel bond	
3	PET	
4	Papel Periódico	
5	Latas de aluminio	
6	Latas de hojalata	
7	Plástico alta densidad	
8	Plástico de baja densidad	
9	Vidrio	

5.- ¿Cuánto material reciben por día en este centro?

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

6.- ¿A qué precio compra el material que usted acopia ?

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

7.- ¿Cuál es su porcentaje de ganancia por tonelada de material vendido?

(Si no es posible dar información aproximada por cada tipo de material, indicar solo el porcentaje promedio aproximado)

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

8.- ¿De qué forma reciben el material? Limpio () Revuelto () Otra ()

¿Afecta el precio de compra? _____

9.- ¿Antes de vender el material que compran lo almacenan? Si () No ()

¿Cuánto tiempo? _____

10.- ¿Cómo transporta el material que vende?

Camión (1). Tren (2). Barco (3).

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

11.- ¿Cuál es el material que prefiere adquirir?

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

¿Por qué ese material en especial?

PROCESO DE TRANSFORMACION O TRATAMIENTO

12.- ¿Realizan algún proceso de transformación o tratamiento de algún otro tipo como segregación, limpieza o transformación antes de venderlo? SI () NO () ir a 19... y finalizar

13.- ¿En qué consiste este proceso?

14.- ¿Cuál es el producto final de su proceso?

Material Segregado	Material Segregado y Limpio	Material Triturado	Material compactado	Material Parcialmente Procesado	Materia Prima	Producto Final

15.- ¿Cuál es el porcentaje de recuperación por tonelada recibida después de que el material es procesado?

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

16.- Cuál es el consumo de electricidad mensual del proceso

17.- Cuál es su consumo de agua mensual del proceso?

18.- Cuál es su consumo de diesel mensual del proceso?

19.- ¿Cuál es costo de operación por tonelada por tipo de material? O costo de operación promedio?

1	Cartón		6	Latas de hojalata	
2	Papel bond		7	Plástico alta densidad	
3	PET		8	Plástico de baja densidad	
4	Papel Periódico		9	Vidrio	
5	Latas de aluminio		10		

20.- ¿Qué tipo de desechos produce el proceso?

RSU	Reciclables no aptos para venta	Lodos	Agua residual	Gases	Otros

21.- ¿Qué tipo de maquinaria y tecnología utiliza en su proceso?

22.- ¿Cuánto personal operativo trabaja en la planta?

23.- ¿Conoce alguna otra compañía que se dedique a realizar una actividad similar a la suya?

ANEXO 3. Lista de acopiadores de materiales reciclables en la ciudad de Mexicali

- | | |
|---|---|
| 1. Metales Gaby | 31. Multirecicladora de baja california |
| 2. Almacén de cartón | 32. Recicladora |
| 3. Centro de reciclaje TNT | 33. Recicladora campestre |
| 4. Chatarra Palafox | 34. Recicladora Castro |
| 5. Chatarrera rubí | 35. Recicladora de cartón |
| 6. Compra de chatarra (sta. Isabel) | 36. Recicladora Guadalupana |
| 7. Compra venta de chatarra | 37. Recicladora Leandro valle |
| 8. Compra venta de metales | 38. Recicladora palaco |
| 9. Desechos metálicos | 39. Recicladora TNT |
| 10. Empresas fraba | 40. Recicladora Vallarta |
| 11. Evericon internacional de México | 41. Recycling container resort |
| 12. Hermanos escobar | 42. Venta de cartón |
| 13. La Cachanilla | 43. Yarda lupita |
| 14. Materiales gastelum | 44. Yarda marlot |
| 15. Materiales reciclables de Mexicali | 45. Yarda meño |
| 16. Mercados de equipos industriales el yaqui | 46. Yarda Xochimilco |
| 17. Metales Ana | |
| 18. Metales cruz azul | |
| 19. Metales el chino | |
| 20. Metales el mini | |
| 21. Metales el negro | |
| 22. Metales gallo | |
| 23. Metales hidalgo | |
| 24. Metales Jalapa | |
| 25. Metales la roca | |
| 26. Metales los olivos | |
| 27. Metales melisa | |
| 28. Metales Pamela | |
| 29. Metales pro hogar | |
| 30. Metales pueblo nuevo | |

ANEXO 4. Costos de operación de una PRM de capacidad máxima 100 ton/día

Salarios		Costo unitario	Costo diario	Costo mensual	Costo anual	
Operadores generales (25)	25	\$143.00	\$3,575.00	\$107,250.00	\$1,304,875.00	
Operador de montacargas (2)	2	\$200.00	\$400.00	\$12,000.00	\$146,000.00	
Mantenimiento	1	\$230.00	\$100.47	\$3,014.10	\$83,950.00	
Supervisor	1	\$230.00	\$100.47	\$3,014.10	\$83,950.00	
Seguro y prestaciones 40% de salarios			\$1,670.38	\$50,111.28	\$647,510.00	
Total			\$5,846.32	\$175,389.48	\$ 2,266,285.00	
	Unid ades	Unidade s diarias	Precio unitario	Costo diario	Costo mensual	Costo anual
Mantenimiento (2dls/ton = 24 pesos/ton)	100		\$24.00	\$2,400	\$72,000	\$876,000
Electricidad (20kwh/ton) (\$1.22/kwh)	100	2000	\$1.22	\$2,440.00	\$73,200	\$890,600
Agua (70Gal Diarios Persona = 0.308m³) (\$25/m³)	29	8.932	\$25.00	\$223.30	\$6,699	\$81,505
Gasolina (0.2 gal/ton) (\$8.16/lt en 2011)	100	20	\$ 8.16	\$163.20	\$4,896	\$59,568
Total				\$5,227	\$156,795	\$1,907,673
Otros servicios 15% de costos de operación				\$783.98	\$23,519.25	\$286,150.88

Costo total anual	\$ 4,460,108.38
Costo total por tonelada ingresada (36500ton/anual)	\$122.19
Costo total por tonelada saliente (Ton salientes el 46% del ingreso de res.)	\$ 265.64

Se pueden obtener 16668 ton/anuales de reciclables = 45.66ton/día (papel, vidrio, metal, aluminio, film, rígido, textiles. Pero para E2, E3 y E4 NO SE RECUPERA vidrio ni textiles quedando solo 13648ton/anuales = 37.39 ton/día. La entrada diaria a la PRM es de 82.43ton esto es 30097ton/anual por que entran todos los materiales reciclables con o sin mercado. Esto quiere decir que de 100% de materiales que entran a la PRM solo se recupera el 45.3%. Para fines prácticos de cálculo de costos la capacidad de entrada se estimara en 100 ton/día y la capacidad de salida de 46 ton/día

ANEXO 5. Categorías de impacto ambiental relacionadas a los indicadores de impacto ambiental y factores equivalentes para los escenarios propuestos

			Resultados de ICV				
			E0	E1	E2	E3	E4
GWP (kg CO ₂ eq.)	Emisiones						
	CO		0.256022	-0.07128	-0.675954	-0.679815	-0.691292
	CO ₂		179.3444	99.28175	-90.62365	-145.8139	-194.6185
	CH ₄		59.18179	54.46533	46.77954	16.97	13.58723
	NO _x		0.833375	0.633467	-0.141715	-0.106927	-0.206157
		Factor Equivalente	Indicador de impacto ambiental				
			E0	E1	E2	E3	E4
	CO	2	0.512044	-0.14256	-1.351908	-1.359629	-1.382583
	CO ₂	1	179.3444	99.28175	-90.62365	-145.8139	-194.6185
	CH ₄	21	1242.817	1143.772	982.3703	356.37	285.3319
	NO _x	310	258.3464	196.3748	-43.93177	-33.14737	-63.90854
			1681.02	1439.286	846.463	176.0491	25.4222
POCP (kg de etileno eq.)			Resultados de ICV				
	Emisiones		E0	E1	E2	E3	E4
	CO		0.256022	-0.07128	-0.675954	-0.679815	-0.691292
	CH ₄		59.18179	54.46533	46.77954	16.97	13.58723
	NO _x		0.833375	0.633467	-0.141715	-0.106927	-0.206157
	SO _x		0.069792	-0.310875	-0.55987	-0.507166	-0.859474
	Total HC ^b		0.301	0.277593	0.239487	0.087674	0.070807
		Factor Equivalente	Indicador de impacto ambiental				
			E0	E1	E2	E3	E4
	CO	0.027	0.006913	-0.001925	-0.018251	-0.018355	-0.018665
	CH ₄	0.006	0.355091	0.326792	0.280677	0.10182	0.081523
	NO _x	0.028	0.023335	0.017737	-0.003968	-0.002994	-0.005772
	SO _x	0.048	0.00335	-0.014922	-0.026874	-0.024344	-0.041255
	Total HC ^b	0.416	0.125216	0.115479	0.099627	0.036473	0.029456
			0.513904	0.443161	0.331211	0.0926	0.045287
AP (kg SO ₂ eq.)			Resultados de ICV				
	Emisiones		E0	E1	E2	E3	E4
	NO _x		0.833375	0.633467	-0.141715	-0.106927	-0.206157
	SO _x		0.069792	-0.310875	-0.55987	-0.507166	-0.859474
	HCl		0.009877	0.007957	0.004967	0.0002	-0.001436
	HF		0.001957	0.001692	0.001285	0.000328	6.4E-05
	H ₂ S		0.0301	0.02778	0.023996	0.008815	0.007139
	Ammonia		0	0.003559	0.00936	0.006416	0.006956
		Factor Equivalente	Indicador de impacto ambiental				

			E0	E1	E2	E3	E4
	NOx	0.5	0.416688	0.316734	-0.070858	-0.053464	-0.103078
	SOx	1.2	0.08375	-0.37305	-0.671844	-0.608599	-1.031369
	HCl	0.88	0.008692	0.007002	0.004371	0.000176	-0.001264
	HF	1.6	0.00313	0.002707	0.002056	0.000525	0.000102
	H2S	0.65	0.019565	0.018057	0.015598	0.00573	0.00464
	Ammonia	1.6	0	0.005695	0.014976	0.010266	0.011129
			0.531825	-0.022855	-0.705701	-0.645367	-1.119839
EP (kg PO ₄ ³⁻ eq.)			Resultados de ICV				
	Emisiones		E0	E1	E2	E3	E4
	AIRE						
	NOx		0.833375	0.633467	-0.141715	-0.106927	-0.206157
	Ammonia		0	0.003559	0.00936	0.006416	0.006956
	AGUA						
	COD		0.285982	-1.465765	-4.339052	-4.463633	-4.48587
	Ammonium		0.003336	0.003357	0.003244	0.007025	0.011553
	Nitrate		4.62E-07	0.031607	0.083167	0.083264	0.08284
	Phosphate		2.1E-08	-0.00057	-0.001563	-0.001515	-0.001786
	Factor Equivalente		Indicador de impacto ambiental				
			E0	E1	E2	E3	E4
	Nox	0.13	0.108339	0.082351	-0.018423	-0.013901	-0.0268
	Ammonia	0.35	0	0.001246	0.003276	0.002246	0.002434
	AGUA						
	COD	0.022	0.006292	-0.032247	-0.095459	-0.0982	-0.098689
	Ammonium	0.33	0.001101	0.001108	0.001071	0.002318	0.003812
	Nitrate	0.1	4.62E-08	0.003161	0.008317	0.008326	0.008284
	Phosphate	1	2.1E-08	-0.00057	-0.001563	-0.001515	-0.001786
			0.115731	0.055048	-0.102782	-0.100725	-0.112745
ADP (kg Sb eq.)			Resultados de ICV				
	Emisiones		E0	E1	E2	E3	E4
	Arsenic		2.1E-06	-4.59E-05	-0.000126	-0.000125	-0.000134
	Barium		1.78E-06	-0.002167	-0.005575	-0.005291	-0.006898
	Cadmium		2.1E-06	1.45E-06	1.05E-07	-5.25E-07	-1.3E-06
	Chloride		0.385546	0.993779	1.978512	2.025274	1.724376
	Chromium		9.01E-06	-0.000237	-0.000644	-0.000635	-0.000685
	Copper		8.11E-06	-6.18E-05	-0.00019	-0.000192	-0.000216
	Fluoride		5.85E-05	4.45E-05	1.73E-05	-3.36E-07	-2.1E-06
	Iron		0.014646	0.009982	0.001358	-0.003067	-0.004735
	Lead		9.45E-06	-0.000113	-0.000315	-0.000313	-0.000337
	Mercury		8.4E-08	1.68E-07	2.73E-07	2.52E-07	2.31E-07
	Nickel		2.55E-05	-9.49E-05	-0.000296	-0.000298	-0.000323
	Phosphate		2.1E-08	-0.00057	-0.001563	-0.001515	-0.001786
	Sulphate		0.013288	0.212084	0.530623	0.536383	0.502595
	Suphide		0	-2.06E-06	-3.3E-06	-7.77E-07	-1.65E-05

	Zinc		0.000102	-0.000136	-0.000539	-0.00056	-0.000613
		Factor Equivalente	Indicador de impacto ambiental				
			E0	E1	E2	E3	E4
	Arsenic	0.00917	1.93E-08	-4.21E-07	-1.15E-06	-1.14E-06	-1.23E-06
	Barium	1.06E-10	1.89E-16	-2.3E-13	-5.91E-13	-5.61E-13	-7.31E-13
	Cadmium	0.33	6.93E-07	4.78E-07	3.46E-08	-1.73E-07	-4.3E-07
	Chloride	4.86E-08	1.87E-08	4.83E-08	9.62E-08	9.84E-08	8.38E-08
	Chromium	0.000858	7.73E-09	-2.03E-07	-5.52E-07	-5.45E-07	-5.88E-07
	Copper	0.00194	1.57E-08	-1.2E-07	-3.69E-07	-3.73E-07	-4.19E-07
	Fluoride	0.00000296	1.73E-10	1.32E-10	5.12E-11	-9.95E-13	-6.22E-12
	Iron	8.43E-08	1.23E-09	8.42E-10	1.14E-10	-2.59E-10	-3.99E-10
	Lead	0.035	3.31E-07	-3.94E-06	-1.1E-05	-1.09E-05	-1.18E-05
	Mercury	0.495	4.16E-08	8.32E-08	1.35E-07	1.25E-07	1.14E-07
	Nickel	0.000108	2.75E-09	-1.02E-08	-3.2E-08	-3.22E-08	-3.49E-08
	Phosphate	0.0000844	1.77E-12	-4.81E-08	-1.32E-07	-1.28E-07	-1.51E-07
	Sulphate	0.000358	4.76E-06	7.59E-05	0.00019	0.000192	0.00018
	Suphide	0.000358	0	-7.37E-10	-1.18E-09	-2.78E-10	-5.92E-09
	Zinc	0.000992	1.01E-07	-1.35E-07	-5.35E-07	-5.56E-07	-6.09E-07
			5.99E-06	7.17E-05	0.000176	0.000178	0.000165
HTP100 (kg 1.4 DCB eq.)			Resultados de ICV				
	Emisiones		E0	E1	E2	E3	E4
	AIRE						
	Particulates		0.019093	-0.069612	-0.210362	-0.202504	-0.223298
	NOx		0.833375	0.633467	-0.141715	-0.106927	-0.206157
	SOx		0.069792	-0.310875	-0.55987	-0.507166	-0.859474
	HCl		0.009877	0.007957	0.004967	0.0002	-0.001436
	HF		0.001957	0.001692	0.001285	0.000328	6.4E-05
	H2S		0.0301	0.02778	0.023996	0.008815	0.007139
	Ammonia		0	0.003559	0.00936	0.006416	0.006956
	Cadmium		8.4E-07	-1.05E-06	-3.82E-06	-3.86E-06	-6.09E-06
	Chromium		1.05E-07	6.09E-07	1.45E-06	1.41E-06	1.41E-06
	Copper		0	2.75E-06	7.43E-06	7.43E-06	7.43E-06
	Lead		7.77E-07	4.77E-05	0.000132	0.000135	0.000115
	Nickel		2.1E-08	-3.61E-05	-6.4E-05	-3.48E-05	-0.0002
	Zinc		1.13E-05	5.02E-06	-2.75E-06	-5.77E-06	-2.15E-05
	AGUA						
	Arsenic		2.1E-06	-4.59E-05	-0.000126	-0.000125	-0.000134
	Barium		1.78E-06	-0.002167	-0.005575	-0.005291	-0.006898
	Cadmium		2.1E-06	1.45E-06	1.05E-07	-5.25E-07	-1.3E-06
	Copper		8.11E-06	-6.18E-05	-0.00019	-0.000192	-0.000216
	Lead		9.45E-06	-0.000113	-0.000315	-0.000313	-0.000337
	Mercury		8.4E-08	1.68E-07	2.73E-07	2.52E-07	2.31E-07
	Nickel		2.55E-05	-9.49E-05	-0.000296	-0.000298	-0.000323
	Zinc		0.000102	-0.000136	-0.000539	-0.00056	-0.000613

		Factor Equivalente	Indicador de impacto ambiental				
	AIRE		E0	E1	E2	E3	E4
	Particulates	0.82	0.015656	-0.057082	-0.172497	-0.166053	-0.183105
	NOx	1.2	1.00005	0.760161	-0.170058	-0.128312	-0.247388
	SOx	0.096	0.0067	-0.029844	-0.053748	-0.048688	-0.08251
	HCl	0.5	0.004939	0.003979	0.002484	1E-04	-0.000718
	HF	94	0.183912	0.159052	0.120771	0.030821	0.006013
	H2S	0.22	0.006622	0.006112	0.005279	0.001939	0.001571
	Ammonia	0.1	0	0.000356	0.000936	0.000642	0.000696
	Cadmium	150000	0.125997	-0.157497	-0.573289	-0.579588	-0.913482
	Chromium	37	3.88E-06	2.25E-05	5.36E-05	5.21E-05	5.21E-05
	Copper	4300	0	0.011829	0.031966	0.031966	0.031966
	Lead	29	2.25E-05	0.001383	0.003825	0.003914	0.003349
	Nickel	35000	0.000735	-1.264175	-2.24097	-1.217136	-7
	Zinc	96	0.001085	0.000482	-0.000264	-0.000554	-0.002062
	AGUA						
	Arsenic	130	0.000273	-0.00597	-0.016358	-0.016186	-0.017417
	Barium	15	2.68E-05	-0.032504	-0.083628	-0.07936	-0.103474
	Cadmium	11	2.31E-05	1.59E-05	1.15E-06	-5.77E-06	-1.43E-05
	Copper	0.45	3.65E-06	-2.78E-05	-8.55E-05	-8.66E-05	-9.73E-05
	Lead	5.2	4.91E-05	-0.000586	-0.001638	-0.001625	-0.001751
	Mercury	100	8.4E-06	1.68E-05	2.73E-05	2.52E-05	2.31E-05
	Nickel	43	0.001096	-0.00408	-0.012724	-0.012807	-0.0139
	Zinc	0.21	2.14E-05	-2.85E-05	-0.000113	-0.000118	-0.000129
			1.347224	-0.608387	-3.16003	-2.181061	-8.522378
TTP (kg 1.4 DCB eq.)			Resultados de ICV				
	Emisiones		E0	E1	E2	E3	E4
	AIRE						
	HF		0.001957	0.001692	0.001285	0.000328	6.4E-05
	Cadmium		8.4E-07	-1.05E-06	-3.82E-06	-3.86E-06	-6.09E-06
	Chromium		1.05E-07	6.09E-07	1.45E-06	1.41E-06	1.41E-06
	Copper		0	2.75E-06	7.43E-06	7.43E-06	7.43E-06
	Lead		7.77E-07	4.77E-05	0.000132	0.000135	0.000115
	Mercury		0	-1.47E-07	-3.36E-07	-2.73E-07	-6.3E-07
	Nickel		2.1E-08	-3.61E-05	-6.4E-05	-3.48E-05	-0.0002
	Zinc		1.13E-05	5.02E-06	-2.75E-06	-5.77E-06	-2.15E-05
	AGUA		0	0	0	0	0
	Phenols		5.7E-05	1.15E-06	-7.46E-05	-7.61E-05	-0.00015
	Arsenic		2.1E-06	-4.59E-05	-0.000126	-0.000125	-0.000134
	Barium		1.78E-06	-0.002167	-0.005575	-0.005291	-0.006898
	Cadmium		2.1E-06	1.45E-06	1.05E-07	-5.25E-07	-1.3E-06
	Chromium		9.01E-06	-0.000237	-0.000644	-0.000635	-0.000685
	Lead		9.45E-06	-0.000113	-0.000315	-0.000313	-0.000337
	Mercury		8.4E-08	1.68E-07	2.73E-07	2.52E-07	2.31E-07
	Nickel		2.55E-05	-9.49E-05	-0.000296	-0.000298	-0.000323

	Zinc		0.000102	-0.000136	-0.000539	-0.00056	-0.000613
		Factor Equivalente	Indicador de impacto ambiental				
			E0	E1	E2	E3	E4
	AIRE						
	HF	0.0029	5.67E-06	4.91E-06	3.73E-06	9.51E-07	1.85E-07
	Cadmium	81	6.8E-05	-8.5E-05	-0.00031	-0.000313	-0.000493
	Chromium	3000	0.000315	0.001827	0.004347	0.004221	0.004221
	Copper	7	0	1.93E-05	5.2E-05	5.2E-05	5.2E-05
	Lead	16	1.24E-05	0.000763	0.00211	0.002159	0.001848
	Mercury	28000	0	-0.004116	-0.009408	-0.007644	-0.01764
	Nickel	120	2.52E-06	-0.004334	-0.007683	-0.004173	-0.024
	Zinc	0.0012	1.36E-08	6.02E-09	-3.3E-09	-6.93E-09	-2.58E-08
	AGUA		0	0	0	0	0
	Phenols	0.0000025	1.42E-10	2.89E-12	-1.86E-10	-1.9E-10	-3.74E-10
	Arsenic	1E-17	2.1E-23	-4.59E-22	-1.26E-21	-1.25E-21	-1.34E-21
	Barium	5.1E-19	9.1E-25	-1.11E-21	-2.84E-21	-2.7E-21	-3.52E-21
	Cadmium	1.4E-20	2.94E-26	2.03E-26	1.47E-27	-7.35E-27	-1.82E-26
	Chromium	2.3E-19	2.07E-24	-5.44E-23	-1.48E-22	-1.46E-22	-1.58E-22
	Lead	4.8E-22	4.54E-27	-5.41E-26	-1.51E-25	-1.5E-25	-1.62E-25
	Mercury	930	7.81E-05	0.000156	0.000254	0.000234	0.000215
	Nickel	1E-18	2.55E-23	-9.49E-23	-2.96E-22	-2.98E-22	-3.23E-22
	Zinc	0.0001	1.02E-08	-1.36E-08	-5.39E-08	-5.6E-08	-6.13E-08
			0.000482	-0.005765	-0.010634	-0.005462	-0.035797
ATP (kg 1.4 DCB eq.)			Resultados de ICV				
	Emisiones		E0	E1	E2	E3	E4
	AIRE						
	HF		0.001957	0.001692	0.001285	0.000328	6.4E-05
	Cadmium		8.4E-07	-1.05E-06	-3.82E-06	-3.86E-06	-6.09E-06
	Chromium		1.05E-07	6.09E-07	1.45E-06	1.41E-06	1.41E-06
	Copper		0	2.75E-06	7.43E-06	7.43E-06	7.43E-06
	Lead		7.77E-07	4.77E-05	0.000132	0.000135	0.000115
	Mercury		0	-1.47E-07	-3.36E-07	-2.73E-07	-6.3E-07
	Nickel		2.1E-08	-3.61E-05	-6.4E-05	-3.48E-05	-0.0002
	Zinc		1.13E-05	5.02E-06	-2.75E-06	-5.77E-06	-2.15E-05
	AGUA						
	Phenols		5.7E-05	1.15E-06	-7.46E-05	-7.61E-05	-0.00015
	Arsenic		2.1E-06	-4.59E-05	-0.000126	-0.000125	-0.000134
	Barium		1.78E-06	-0.002167	-0.005575	-0.005291	-0.006898
	Cadmium		2.1E-06	1.45E-06	1.05E-07	-5.25E-07	-1.3E-06
	Chromium		9.01E-06	-0.000237	-0.000644	-0.000635	-0.000685
	Lead		9.45E-06	-0.000113	-0.000315	-0.000313	-0.000337
	Mercury		8.4E-08	1.68E-07	2.73E-07	2.52E-07	2.31E-07
	Nickel		2.55E-05	-9.49E-05	-0.000296	-0.000298	-0.000323
	Zinc		0.000102	-0.000136	-0.000539	-0.00056	-0.000613
		Factor Equivalente	Indicador de impacto ambiental				
			E0	E1	E2	E3	E4

	AIRE						
	HF	4.60E+00	9.00E-03	7.78E-03	5.91E-03	1.51E-03	2.94E-04
	Cadmium	2.90E+02	2.44E-04	-3.04E-04	-1.11E-03	-1.12E-03	-1.77E-03
	Chromium	1.90E+00	1.99E-07	1.16E-06	2.75E-06	2.67E-06	2.67E-06
	Copper	2.20E+02	0.00E+00	6.05E-04	1.64E-03	1.64E-03	1.64E-03
	Lead	2.40E+00	1.86E-06	1.14E-04	3.17E-04	3.24E-04	2.77E-04
	Mercury	3.20E+02	0.00E+00	-4.70E-05	-1.08E-04	-8.74E-05	-2.02E-04
	Nickel	6.30E+00	1.32E-07	-2.28E-04	-4.03E-04	-2.19E-04	-1.26E-03
	Zinc	1.80E+01	2.03E-04	9.03E-05	-4.95E-05	-1.04E-04	-3.87E-04
	AGUA						
	Phenols	2.40E+02	1.37E-02	2.77E-04	-1.79E-02	-1.83E-02	-3.59E-02
	Arsenic	2.10E+02	4.41E-04	-9.64E-03	-2.64E-02	-2.61E-02	-2.81E-02
	Barium	2.30E+02	4.11E-04	-4.98E-01	-1.28E+00	-1.22E+00	-1.59E+00
	Cadmium	1.50E+03	3.15E-03	2.17E-03	1.57E-04	-7.87E-04	-1.95E-03
	Chromium	6.90E+00	6.22E-05	-1.63E-03	-4.44E-03	-4.38E-03	-4.73E-03
	Lead	9.60E+00	9.07E-05	-1.08E-03	-3.02E-03	-3.00E-03	-3.23E-03
	Mercury	1.70E+03	1.43E-04	2.86E-04	4.64E-04	4.28E-04	3.93E-04
	Nickel	3.20E+03	8.16E-02	-3.04E-01	-9.47E-01	-9.53E-01	-1.03E+00
	Zinc	7.10E-05	7.24E-09	-9.63E-09	-3.83E-08	-3.98E-08	-4.36E-08
			1.09E-01	-8.04E-01	-2.27E+00	-2.22E+00	-2.70E+00

ANEXO 6. Localización de establecimientos comerciales y rutas de recolección de residuos comerciales.

