



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
Ingeniería Ambiental – Residuos Sólidos

Análisis de Ciclo de Vida de las botellas de PET que se recolectan como residuo en el Municipio de Ecatepec de Morelos

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ULISES EMMANUEL JIMÉNEZ OCAMPO

TUTOR PRINCIPAL:

Alfonso Durán Moreno, Facultad de Química

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Constantino Gutiérrez Palacios, Facultad de Ingeniería
Leonor Patricia Güereca Hernández, Instituto de Ingeniería
María Neftalí Rojas Valencia, Instituto de Ingeniería

MÉXICO, D. F. OCTUBRE 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. en I. Constantino Gutiérrez Palacios

Secretario: Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández

Vocal: Dr. Carlos Antonio Caballero Valdés

1^{er.} Suplente: Dr. Alfonso Durán Moreno

2^{d o.} Suplente: Dra. María Neftalí Rojas Valencia

Lugar donde se realizó la tesis: 3er. Piso de las torre de ingeniería, Ciudad Universitaria.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Alfonso Durán Moreno

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	II
ÍNDICE DE TABLAS.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	5
1.3. ALCANCES.....	5
2. ANTECEDENTES.....	6
2.1. LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	6
2.1.1. <i>Composición</i>	6
2.1.2. <i>Gestión y Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos</i>	8
2.2. EL PET.....	12
2.2.1. <i>Producción de PET</i>	14
2.2.2. <i>Reciclaje de botellas de PET</i>	17
2.2.3. <i>Aplicaciones de las botellas de PET recicladas</i>	22
2.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	24
2.3.1. <i>Fase 1</i>	27
2.3.2. <i>Fase 2</i>	29
2.3.3. <i>Fase 3</i>	31
2.3.4. <i>Fase 4</i>	38
2.3.5. <i>Informe final</i>	39
2.3.6. <i>Revisión crítica</i>	39
2.3.7. <i>Herramientas informáticas para el ACV</i>	39
2.3.8. <i>Base de datos para el ACV</i>	40
2.4. APLICACIÓN DEL ACV A LAS BOTELLAS DE PET.....	41
3. CASO DE ESTUDIO.....	43
4. METODOLOGÍA.....	46
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
5.1. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LAS BOTELLAS DE PET EN ECATEPEC DE MORELOS.....	51
5.1.1. <i>Descripción general de las actuales operaciones de cada etapa del sistema de estudio</i>	51
5.1.2. <i>Análisis del inventario del ACV de las botellas de PET</i>	59
5.1.3. <i>Evaluación del impacto de las botellas de PET</i>	76
5.1.4. <i>Interpretación y discusión de resultados del ACV de las botellas de PET</i>	83
5.2. ALTERNATIVAS DE MEJORA AL MANEJO INTEGRAL DE LAS BOTELLAS DE PET.....	86
5.2.1. <i>Rediseño del sistema de recolección</i>	87
5.2.2. <i>Operación de planta de separación</i>	97
5.2.3. <i>Planta de reciclaje mecánico de botellas de PET</i>	101

5.2.4.	Aprovechamiento energético de las botellas de PET	106
5.2.5.	Otras propuestas	110
6.	CONCLUSIONES	114
7.	BIBLIOGRAFÍA	118
	ANEXO I: EMISIONES AL AIRE Y DESCARGAS AL AGUA GENERADAS EN CADA ETAPA DEL SISTEMA DE ESTUDIO	123
	ANEXO II: DISEÑO DE CONTENEDORES PARA CADA FUENTE DE GENERACIÓN	139
	ANEXO III. FUENTES DE GENERACIÓN	151
	ANEXO IV. REQUERIMIENTOS DE LA PLANTA DE SEPARACIÓN	153
	ANEXO V: INDICADORES ECONÓMICOS	160
	ANEXO VI: ESTUDIOS REQUERIDOS	163

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Etapas del ACV</i>	3
<i>Figura 2. Composición de RSU en México</i>	7
<i>Figura 3. Materiales reciclables presentes en los RSU generados en el Estado de México</i>	8
<i>Figura 4. Gestión Integral los Residuos Sólidos Urbanos</i>	9
<i>Figura 5. Síntesis de PET</i>	15
<i>Figura 6. Diagrama de flujo de la elaboración de botellas de PET</i>	16
<i>Figura 7. Toneladas de botellas de PET recuperadas en el mundo</i>	17
<i>Figura 8. Reciclaje mecánico</i>	18
<i>Figura 9. Hojuelas de PET</i>	19
<i>Figura 10. Pellets</i>	20
<i>Figura 11. Reciclado químico del PET</i>	21
<i>Figura 12. % de aplicación de PET reciclado en México</i>	23
<i>Figura 13. Análisis de Ciclo de Vida</i>	25
<i>Figura 14. Estructura general de un ACV</i>	26
<i>Figura 15. Clasificación de datos del inventario</i>	33
<i>Figura 16. Ecatepec de Morelos</i>	43
<i>Figura 17. Diagrama de flujo de la Metodología</i>	46
<i>Figura 18. Sistema de Estudio</i>	52
<i>Figura 19. Camiones de recolección en Ecatepec de Morelos</i>	54
<i>Figura 20. Proceso de reciclaje de las botellas de PET a fibra de poliéster</i>	56
<i>Figura 21. Mechones</i>	58
<i>Figura 22. Relleno Sanitario Chiconaulta</i>	59
<i>Figura 23. Diagrama del Inventario del ACV de las botellas de PET</i>	60
<i>Figura 24. Porcentaje de producción de energía eléctrica a partir de diversas materias primas</i>	66
<i>Figura 25. Balance de masa de las botellas de PET</i>	74
<i>Figura 26. ACV del Manejo Integral de las botellas de PET</i>	76
<i>Figura 27. Contribución porcentual de cada etapa del sistema de manejo de las botellas de PET en Ecatepec de Morelos</i> ..	77
<i>Figura 28. Contribución porcentual de cada operación proceso en el reciclaje de las botellas a fibra de poliéster</i>	79
<i>Figura 29. Contribución de cada operación en la exportación</i>	80
<i>Figura 30. Contribución de cada operación en los centros de acopio</i>	82

Figura 31. Propuesta del cartel para la frecuencia y horario de recolección del turno matutino.....	92
Figura 32. Ubicación geográfica de los 58 sitios que componen la ZONA 8 en Ecatepec de Morelos.	94
Figura 33. Ruta de Relección para la ZONA 8.	96
Figura 34. Planta de Separación, Ecatepec de Morelos.	97
Figura 35. Comportamiento del Valor Presente Neto durante la operación de la planta de separación.	100
Figura 36. Diagrama general de la planta de reciclaje de botellas "Ecatepec".	101
Figura 37. Propuesta de distribución general de la planta de reciclaje.	104
Figura 38. Comportamiento del Valor Presente Neto durante la operación de la planta de reciclaje.	105
Figura 39. Diagrama de flujo de la incineración de las botellas de PET.....	107
Figura 40. Comportamiento del Valor Presente Neto durante la operación del incinerador.	109
Figura 41. Tren de tratamiento de lixiviados.	111
Figura 42. Diagrama del sistema de aprovechamiento del biogás.	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Viscosidad intrínseca para aplicaciones de la resina de PET.....	13
Tabla 2. Uso de la resina de PET en México.....	14
Tabla 3. Propiedades del PET cristalizado.....	15
Tabla 4. Emisiones generadas en el MIRSU.	31
Tabla 5. Herramientas informáticos para estudios de ACV.	40
Tabla 6. Bases de datos utilizados en el Análisis del Inventario	41
Tabla 7. Indicadores socioeconómicos y culturales de Ecatepec de Morelos.	44
Tabla 8. Uso del suelo en Ecatepec de Morelos.	45
Tabla 9. Categorías de impacto a evaluar.	49
Tabla 10. Flujos de entrada y salida en la recolección de las botellas.	62
Tabla 11. Centros de acopio utilizados.	63
Tabla 12. Parámetros (destino Tecnología de Reciclaje).	64
Tabla 13. Parámetros (destino a exportación).	64
Tabla 14. Parámetros (destino a Tecnología de Reciclaje).	65
Tabla 15. Consumo promedio de combustible en centros de acopio.....	65
Tabla 16. Flujos de entrada y salida en los centros de acopio.	67
Tabla 17. Parámetros para transporte terrestre.	69
Tabla 18. Parámetros para transporte marítimo	69
Tabla 19. Flujos de entrada y salida en la exportación.....	69
Tabla 20. Parámetros (traslado de botellas a Nicolás Romero)	71
Tabla 21. Flujos de entrada y salida en el reciclaje de las botellas.	72
Tabla 22. Flujos de entrada y salida en la disposición final de las botellas.	73
Tabla 23. Emisiones al aire al agua por el uso de combustibles.	75
Tabla 24. Descargas al agua por el uso de combustibles.	75
Tabla 25. Emisiones al aire al agua por el uso de energía eléctrica.	75
Tabla 26. Descargas al agua por el uso de energía eléctrica	75
Tabla 27. Impactos generados en cada etapa del sistema.	77
Tabla 28. Impactos generados en cada proceso del reciclaje de las botellas.	79
Tabla 29. Impactos generados por el transporte en la exportación.	81
Tabla 30. Impactos generados por los centros de acopio.....	83
Tabla 31. Generación de RSU en la ZONA 8.....	89
Tabla 32. Masa y volumen de RSU a recolectar en cada fuente de generación.	90

<i>Tabla 33. Macro ruta para la ZONA 8.</i>	91
<i>Tabla 34. Pago por venta de materiales valorizables.</i>	99
<i>Tabla 35. Indicadores económicos de la planta de separación.</i>	100
<i>Tabla 36. Indicadores económicos de la planta de reciclaje de PET.</i>	105
<i>Tabla 37. Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos.</i>	108
<i>Tabla 38. Indicadores económicos del incinerador.</i>	109
<i>Tabla 39. Emisiones generadas por el uso de diesel como combustible en la recolección.</i>	123
<i>Tabla 40. Emisiones generadas por el uso de diesel como combustible en los centros de acopio.</i>	124
<i>Tabla 41. Emisiones generadas por el uso de energía eléctrica en los centros de acopio.</i>	126
<i>Tabla 42. Emisiones generadas por el uso de diesel como combustible en la exportación.</i>	128
<i>Tabla 43. Emisiones generadas por el uso de diésel como combustible en el reciclaje.</i>	129
<i>Tabla 44. Emisiones generadas por el uso del gas natural como combustible en el reciclaje.</i>	130
<i>Tabla 45. Emisiones generadas por el uso de energía eléctrica en el reciclaje.</i>	132
<i>Tabla 46. Parámetros de las aguas residuales descargadas por TdR</i>	134
<i>Tabla 47. Emisiones generadas por el uso de diesel como combustible en el relleno sanitario Chiconautla.</i>	134
<i>Tabla 48. Emisiones generadas por el uso de gasolina en el Relleno Sanitario Chiconautla.</i>	135
<i>Tabla 49. Composición de lixiviados en el Rellenos Sanitario Chiconautla.</i>	136
<i>Tabla 50. Composición general de biogás generado en el Rellenos Sanitario Chiconautla.</i>	137
<i>Tabla 51. Generación de RSU en la ZONA 8.</i>	139
<i>Tabla 52. Turno en la ruta de recolección.</i>	151
<i>Tabla 53. Composición y RSU recolectados.</i>	153
<i>Tabla 54. Recuperación de materiales en la planta de separación.</i>	154
<i>Tabla 55. Distancias entre la planta y los centros de compra venta de materiales.</i>	157
<i>Tabla 56. Determinación del Valor Presente Neto para la planta de separación de RSU.</i>	161
<i>Tabla 57. Determinación del Valor Presente Neto para la planta de reciclaje mecánico de las botellas de PET.</i>	161
<i>Tabla 58. Determinación del Valor Presente Neto para el incinerador.</i>	161
<i>Tabla 59. Tasa Interna de Retorno de cada alternativa.</i>	162

ABREVIATURAS

A: Acidificación

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

AD: Agotamiento abiótico

E: Eutrofización

GEI: Gases de efecto invernadero

GW: Calentamiento global

HT: Toxicidad humana

MIBPET: Manejo Integral de las botellas de PET

MIRSU: Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos

OLD: Agotamiento de la capa de ozono

PET: Polietilentereftalato

PO: Smog fotoquímico

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

SGA: Sistemas de Gestión Ambiental

TE: Toxicidad terrestre

RESUMEN

La presente investigación evalúa el impacto ambiental ocasionado por las botellas de PET que se recolectan como residuo dentro del municipio de Ecatepec de Morelos, utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida estandarizada por las normas ISO 14040/44. Lo anterior, para generar bases y fundamentos que coadyuven al desarrollo y planificación de una mejor estrategia de manejo de los RSU generados en este municipio.

El sistema de estudio corresponde al actual manejo de las botellas de PET que integran las etapas de generación, separación, recolección, transporte, reciclaje a fibra de poliéster y disposición final, que se desarrolla actualmente en Ecatepec de Morelos. La unidad funcional es 2,862 toneladas de botellas que fueron recolectadas durante el año 2011 por el servicio público de limpia de 935 fuentes de recolección (principalmente escuelas públicas y edificios gubernamentales).

Los datos para el inventario provienen de estadísticas e informes presentados por organismos privados y públicos de carácter municipal, estatal y federal. Las categorías de impacto evaluadas son el calentamiento global, eutrofización, acidificación, toxicidad humana, toxicidad terrestre, Smog fotoquímico, agotamiento de recursos abióticos y de la capa de ozono.

La identificación de los diferentes impactos ambientales asociados al sistema de estudio son indicadores que permitieron conocer los procesos de cada etapa del sistema que requieren de modificaciones en las actuales técnicas operacionales. En el mismo contexto, para minimizar el impacto ambiental generado por las botellas de PET y mejorar su estrategia de manejo, se planteó un rediseño del sistema de almacenamiento y recolección de los RSU, la operación de la planta de separación propiedad del municipio y la construcción de una planta de reciclaje mecánico, alternativas que son técnica, económica y ambientalmente viables.

ABSTRACT

This research evaluates the environmental impact caused by the PET bottles that are collected as waste inside the municipality of Ecatepec de Morelos, using the methodology of Life Cycle Assessment standardized by the ISO 14040/44. This, to generate bases and basics that contribute to the development and planning of a best management strategy of Municipal Solid Waste generated in this county.

The system of study corresponds to management of PET bottles comprising the steps of generation, separation, collection, transportation, recycling polyester fiber and landfill which is currently developing Ecatepec de Morelos. The functional unit is 2,862 tons of bottles that were collected in 2011 for public service clean of 935 sites (mainly public schools and government buildings).

The inventory data come from statistics and reports submitted by public and private agencies at the municipal, state and federal. The assessed impact categories are global warming, eutrophication, acidification, human toxicity, terrestrial toxicity, photochemical smog, abiotic resource depletion, and ozone layer depletion.

The identification of the different environmental impacts associated with the system of study, are indicators that allow knowing the processes of each stage of the system that require current operational techniques changes. In the same context, to minimize the environmental impact generated by the PET bottles and improve their management strategy, was proposed a redesign of the storage system and collection of MSW, the operation of the separation plant owned by the municipality and the construction of a recycling plant mechanical, alternatives that are technically, economically and environmentally viable.

1. INTRODUCCIÓN

En México, el proceso de industrialización se intensificó a partir de la segunda mitad del siglo XX derivando demanda de materias primas para satisfacer las necesidades de la población cada vez más numerosa y con patrones de consumo cada vez más abundantes (SEMARNAT, 2012).

En el año 2011, en el país se generaron 42.1 millones de toneladas de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) (INEGI, 2012), con una composición aproximada de 52% de residuos orgánicos, 36% potencialmente reciclables y 12% residuos no aprovechables (SEMARNAT, 2013).

El 64% de RSU generados en México son dispuestos en 260 rellenos sanitarios y 20 sitios controlados, por lo que se calcula que el 36% restante se encuentran dispuestos inadecuadamente en tiraderos a cielo abierto, barrancas, vía pública, entre otros (INEGI, 2012).

El Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos es una parte fundamental de la Gestión Integral de los Residuos e indica como efectuar las actividades de reducción en fuente, separación, reutilización, almacenamiento, transporte y disposición final, es decir, el desarrollo de la ingeniería básica de detalle y ambiental de cada etapa que integra el sistema de manejo.

Si el manejo de los RSU es ineficiente suelen presentarse diversas afectaciones al ambiente y a la población, entre las que se encuentran; la disposición inadecuada de RSU en: cuerpos de agua, terrenos abandonados y vía pública; la incineración a cielo abierto; contaminación de acuíferos por la filtración de lixiviados al suelo; malos olores; atracción de fauna nociva que son portadoras de distintas enfermedades; afectaciones al personal y a la población; entre otros (SEMARNAT, 2012).

Por otro lado, el consumo de la resina de polietilentereftalato (PET) ha registrado un rápido crecimiento en el mercado mundial de plástico debido a la continua expansión de las botellas para contener principalmente bebidas (Welle, 2011). En 2007, el consumo mundial de

botellas de PET fue de 15 millones de toneladas (Shen *et al.*, 2010), representando entre el 8% en peso y 12% en volumen del total de RSU generados a nivel mundial (Shukla y Harad, 2009).

En México la producción de resina de PET a partir de productos vírgenes en el año 2011 fue de 1.15 millones de toneladas. Se produjeron 38,000 toneladas de resina de PET a partir del reciclaje de las botellas y se importaron 40,000 toneladas procedentes de diferentes partes del mundo teniendo una disponibilidad total de resina de PET de 1.23 millones de toneladas, de las cuales, el 58.3% fueron destinadas para la producción de botellas (García, 2012).

La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental y los posibles impactos asociados con los productos y servicios ha aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y disminuir esos impactos. Una de las técnicas desarrolladas en este tema es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que se encuentra estandarizado por normas ISO 14040 e ISO 14044.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que identifica, caracteriza y cuantifica los impactos ambientales producidos dentro del ciclo de vida de un producto o servicio de una forma global y particular, identificando y contribuyendo a la identificación de oportunidades para mejorar el desempeño ambiental en las distintas etapas que integran el sistema de estudio. El ACV se encuentra compuesto de las siguientes etapas: *i)* definición de objetivos y alcances, *ii)* análisis de inventario, *iii)* evaluación de impactos y *iv)* interpretación de resultados (Aranda Usón *et al.*, 2006).

El alcance de un ACV depende del tema y del uso previsto del estudio, del sistema, el nivel de detalle, del sitio, entre otras consideraciones. La profundidad de este análisis puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo previsto.

El análisis del inventario comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes del sistema de estudio. Estas entradas y salidas corresponden al uso de materias primas, insumos, materiales, emisiones al aire, agua y suelo. La evaluación del impacto proporciona información numérica y gráfica de los resultados del inventario a fin de comprender mejor su impacto e importancia ambiental.

La interpretación de resultados es la fase final del procedimiento del ACV, en el cual se resumen y discuten los resultados de las etapas anteriores para establecer las correspondientes conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

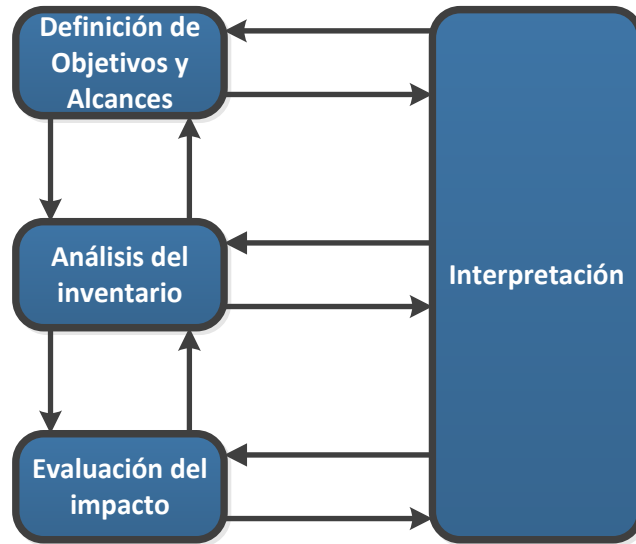


Figura 1. Etapas del ACV. Fuente: Adaptada de Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2008.

En la Figura 1 se plasma las cuatro etapas que integra la metodología de ACV, posteriormente se describirá a detalle es que consiste cada etapa.

1.1. Justificación

Ecatepec de Morelos es un municipio del centro del país que pertenece al Estado de México, cuenta con 1,656,107 habitantes y una superficie de 160.17 km² (INEGI, 2012). Su población cuenta con un nivel de estudio promedio de educación primaria y presentan una generación per cápita de 1.54 kg de RSU/hab*día y de 6.54 kg de botellas de PET/hab*año (Enríquez García, 2012).

El Manejo Integral de los RSU en Ecatepec de Morelos presenta diversas ineficiencias debido, entre otros factores, al bajo presupuesto que se asigna, a incumplimientos normativos y a intereses políticos. Actualmente carece de infraestructura indispensable para el manejo de RSU y presenta problemas de tiraderos e incineración de RSU a cielo abierto en la vía pública, malos olores, enfermedades gastrointestinales y lesiones en los trabajadores, atracción de fauna nociva, entre otras afectaciones.

Las botellas de PET como residuo producidas por las distintas fuentes de generación representan el 1.74% en peso del total de los RSU generados, de las cuales el 60% son dispuestas en el relleno sanitario Chiconautla sin ningún tratamiento previo a pesar de ser un material reciclable y de gran valor agregado. El restante 40% es transformado en nuevos productos dentro del territorio nacional y en el extranjero, principalmente en botellas, flejes, lámina y fibra de poliéster (García, 2012).

Por lo anterior, la presente investigación evalúa el impacto ambiental ocasionado por el actual Manejo Integral de las botellas de PET contemplando las etapas de recolección, transporte, almacenamiento, reciclaje, exportación y disposición final dentro de Ecatepec de Morelos utilizando el ACV como herramienta para la toma de decisiones responsables ambientalmente.

Los resultados obtenidos serán indicadores primordiales para el planteamiento y desarrollo de alternativas para la selección de la mejor estrategia de manejo de las botellas de PET, pudiendo aumentar la eficiencia global del sistema de manejo de RSU del municipio reduciendo el consumo de recursos y materiales.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Plantear alternativas de mejora para el Manejo Integral de las botellas de PET por medio de un Análisis de Ciclo de Vida, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales para el desarrollo y planificación de una mejor estrategia de manejo de los RSU generados en Ecatepec de Morelos.

1.2.2. Objetivos específicos

- ✚ Establecer el Estado del Arte sobre el Análisis de Ciclo de Vida y reciclaje de las botellas de PET.
- ✚ Elaborar un Análisis de Ciclo de Vida de las botellas de PET que se recolectan como residuo en Ecatepec de Morelos.
- ✚ Desarrollar alternativas que mitiguen las ineficientes técnicas, operacionales y ambientales presentes en el actual manejo de las botellas de PET en Ecatepec de Morelos.

1.3. Alcances

- ✚ Describir las características y requerimientos generales para la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida.
- ✚ Contrastar las condiciones de operación de las tecnologías de reciclaje de las botellas de PET que se desarrollan a nivel nacional e internacional.
- ✚ Conocer y analizar el impacto ambiental del actual manejo de las botellas de PET que se desarrolla en Ecatepec de Morelos.
- ✚ Generar bases y fundamentos que minimicen los impactos ambientales presentes en el actual Manejo Integral de los RSU y botellas de PET.

2. ANTECEDENTES

2.1. Los Residuos Sólidos Urbanos

El Gobierno Federal a través de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos define a los RSU como aquellos residuos generados en las casas habitación, como resultado de la eliminación de los materiales que utilizan en las actividades domésticas, de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de establecimientos y en la vía pública con características domiciliarias, los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.

2.1.1. Composición

La composición de los RSU es muy variada tanto en México como en todo el mundo. Tchobanoglous (1993) y Sharholy et al. (2007), mencionan que, en la mayoría de los casos, los RSU están compuestos de los siguientes materiales:

- ✚ Residuos de comida
- ✚ Papel
- ✚ Cartón
- ✚ Plásticos (PET, PEAD ,PEBD, PCV, PP, PS,)
- ✚ Textiles
- ✚ Caucho
- ✚ Cuero
- ✚ Residuos de jardinería
- ✚ Madera
- ✚ Vidrio
- ✚ Polvo
- ✚ Aluminio
- ✚ Metales
- ✚ Residuos sanitarios (toallas sanitarias, pañales, papel sanitario)
- ✚ Ceniza

En la Figura 2, se plasma la composición de RSU a nivel nacional para el año 2012, el corresponde a 52% de residuos orgánicos, papel y cartón en un 14%, vidrio 6%, plásticos 11%, metales 4% y textiles 1%, mientras que el 12% restante corresponde residuos no aprovechables como residuos sanitarios, polvo, entro otros (SEMARNAT, 2013).

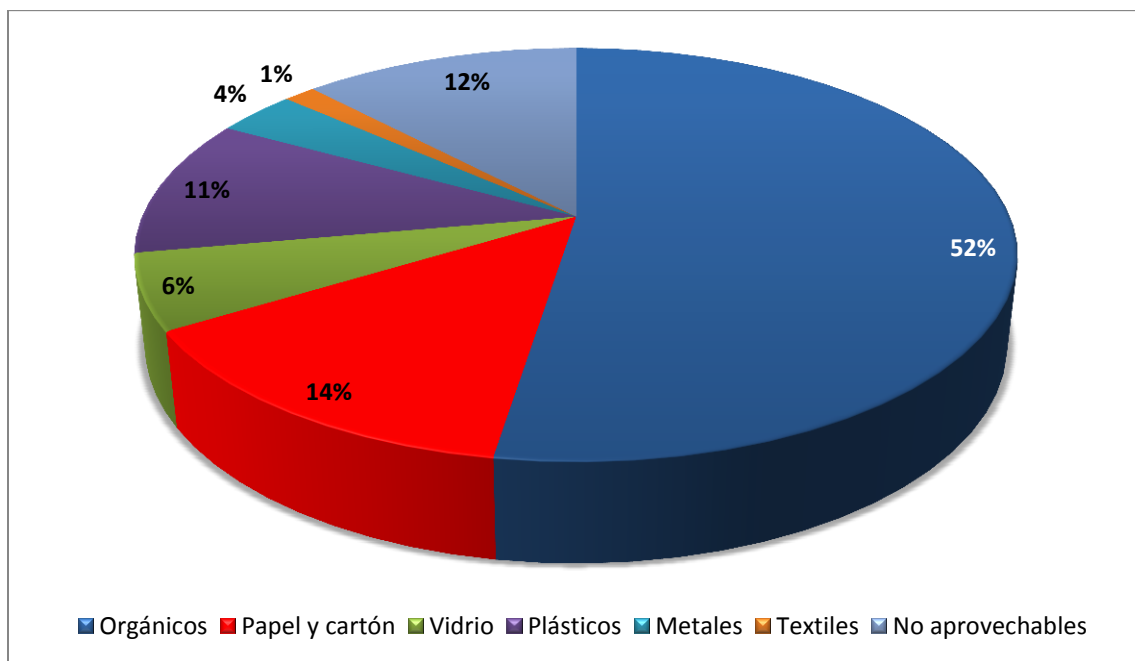


Figura 2. Composición de RSU en México. Fuente Adaptada de SEMARNAT, 2013.

La generación y composición de RSU presentada en la Figura 2, corresponde a datos nacionales, sin embargo la composición de cada municipio del país varía en función de diversos factores, dependiendo principalmente al nivel socioeconómico de la población, hábitos de consumo, desarrollo tecnológico, estándares de calidad de vida, nivel de educación, entre otros (SEMARNAT, 2013).

Durán et al. (2013), mencionan que en el año 2012, en el Estado de México se generaron 4.6 millones de toneladas de RSU, de las cuales, el 23.9% fueron dispuestas en 44 tiraderos a cielo abierto, 19.8% en 22 sitios controlados, 46.1% en 14 rellenos sanitarios y el restante 10.2% no fue recolectado, por lo que se considera que se encuentran dispuestas en algún lugar adecuada o inadecuadamente. El 35% de los RSU generados en el Estado de México corresponden a residuos reciclables, los cuales se encuentran caracterizados acorde a lo presentado en la Figura 3.

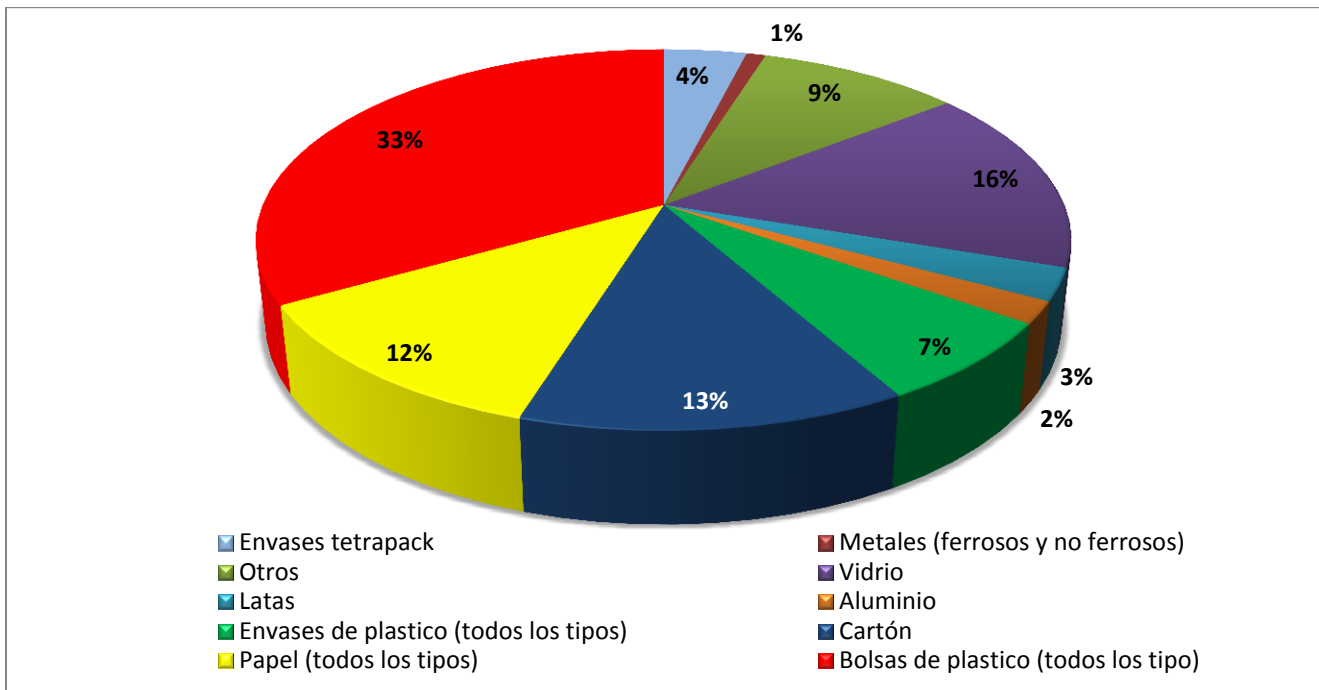


Figura 3. Materiales reciclables presentes en los RSU generados en el Estado de México.
Fuente: Adapta da de Durán et al., 2013.

Como se ilustra en la Figura 3 los materiales que se encuentran en mayor proporción son las bolsas de plástico, seguido del cartón y papel, y en una menor proporción se encuentra el aluminio y los metales ferrosos y no ferrosos.

2.1.2. Gestión y Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos

El Gobierno Federal a través de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos define a la Gestión Integral de los Residuos Sólidos como el conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo supervisión y evaluación para el manejo de los RSU desde su generación hasta la disposición final respondiendo a las necesidades y circunstancias de localidad o región. En la Figura 4, se presentan como un diagrama de flujo las etapas que conforman la Gestión de los RSU.

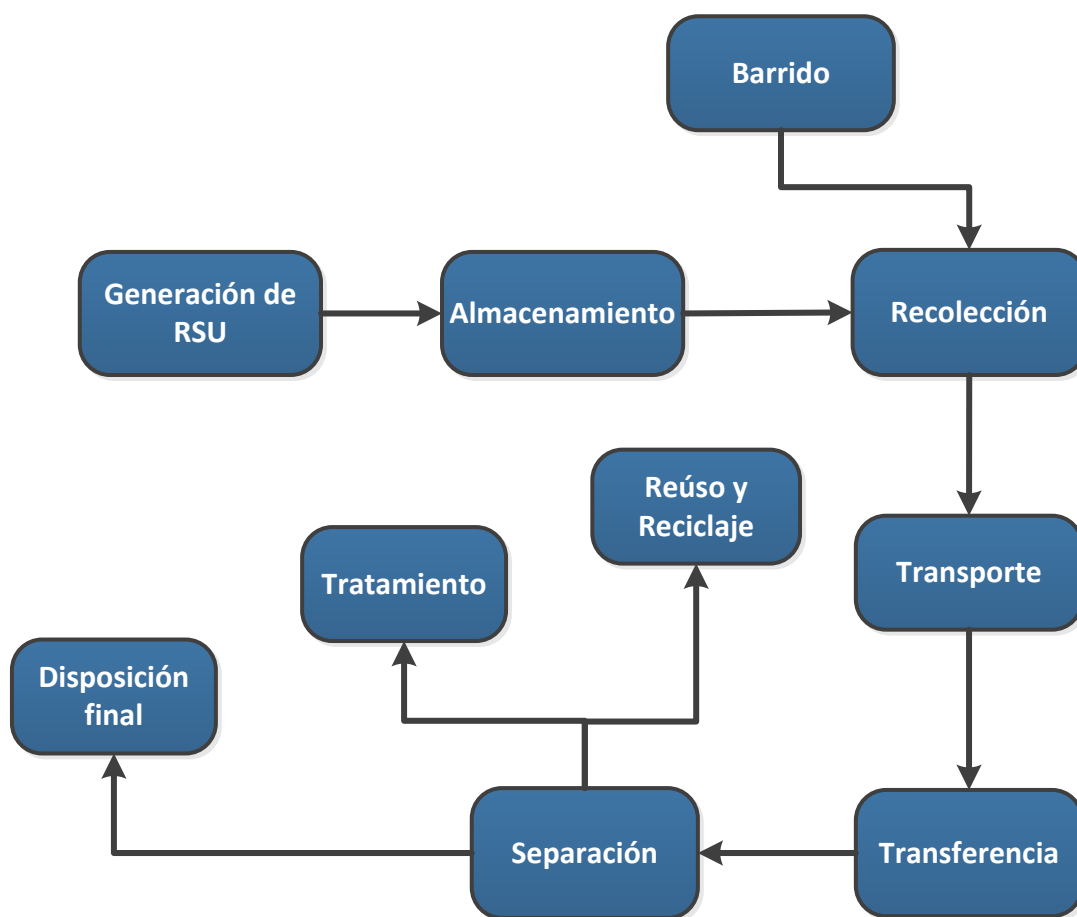


Figura 4. Gestión Integral los Residuos Sólidos Urbanos. Fuente: Aptada de SEMARNAT, 2011.

No todos los municipios cuentan con todas las etapas que presentan en la Figura 4, algunos pueden contar sólo con la recolección y disposición final, otros municipios más urbanizados pueden tener, estaciones de transferencia, planta de separación y planta de composta. Lo anterior depende principalmente del presupuesto que se le asigna al manejo de los RSU por parte del gobierno municipal.

De igual forma, el Gobierno Federal a través de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos define a al Manejo Integral de los RSU (MIRSU) como las actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social.

A continuación se describe brevemente algunas de las etapas que comúnmente integran el MIRSU en los diferentes municipios del país (SEMARNAT, 2012).

Generación

La generación de RSU abarca las actividades en las que los materiales son identificados como sin ningún valor adicional. La generación de RSU y su composición son función de la población, el nivel de vida, el grado de desarrollo económico, hábitos de consumo y los métodos de acondicionamiento de los mismos (SEMARNAT, 2012).

Almacenamiento

La calidad de operación de recolección y transporte de RSU depende de la forma adecuada del almacenamiento de los mismos. Por lo que un almacenamiento eficiente evita accidentes al personal del servicio de recolección y a la población, proliferación de fauna nociva, minimiza el impacto visual y olfativo, y facilita la recolección de los RSU.

El almacenamiento de los RSU se efectúa en diversos tipos de contenedores de diferentes formas, tamaños y capacidad los cuales deben ser adecuados para contener los RSU generados. Los contenedores deben ser principalmente de material resistente y de fácil manejo (Tchobanoglous, 1993).

Recolección

La recolección se puntualiza en la recogida de los residuos producidos y almacenados por las distintas fuentes de generación. Esta etapa es la parte medular del servicio de limpia y tiene como objetivo principal preservar la salud pública mediante la recolección de los RSU de diferentes fuentes de generación y transportarlos a la siguiente etapa de la gestión de los RSU en forma eficiente y al menor costo (SEMARNAT, 2012).

Transporte

El transporte se refiere a los medios, instalaciones y accesorios utilizados para efectuar el traslado de RSU desde un lugar a otro, generalmente más distante (. La infraestructura utilizada para esta etapa son camiones con compactación, sin compactación, de redilas, de volteo, principalmente, dependiendo de las características del municipio y del presupuesto asignado Tchobanoglous, 1993).

Transferencia

La transferencia está representada por el conjunto de equipos e instalaciones donde se lleva a cabo el transbordo de los RSU mediante gravedad o equipos mecanizados de los vehículos recolectores a vehículos de gran capacidad (mayor a 25 m³), para transportarlos a la siguiente etapa de la gestión de los RSU. La transferencia normalmente tiene lugar en las estaciones de transferencia (Instituto Nacional de Ecología, 2008).

Tratamiento

El tratamiento consiste en la transformación física, química, térmica o biológica de los RSU y su objetivo es que los materiales de mayor valor agregado contenidos en los RSU sean reutilizados para el mismo fin para el cual fueron hechos o bien fines diferentes (Tchobanoglous, 1993).

Reciclaje

El Gobierno Federal (2007), define al reciclaje como la transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos, teniendo como

cimientos la conservación o ahorro de energía, conservación o ahorro de recursos naturales, disminución del volumen de residuos que hay que eliminar y la protección del medio ambiente.

Disposición final

La disposición es la última etapa de la Gestión de los RSU, y la NOM-083-SEMARNAT-2003 la define como la acción de depositar permanentemente los RSU en sitios e instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas y sus elementos. Generalmente los RSU son dispuestos en rellenos sanitarios, sitios controlados y tiraderos a cielo abierto como las barrancas.

2.2. EI PET

El PET fue patentado como un polímero para fibra por J. R. Whinfield y J. T. Dickson en 1941. La producción comercial de fibra de poliéster comenzó en 1955, desde entonces, el PET ha presentado un continuo desarrollo tecnológico hasta lograr un alto nivel de sofisticación, basado en el espectacular crecimiento en la demanda del producto a escala mundial y a la diversificación de sus posibilidades de uso (Olabis, 1997 y Welle, 2011).

A partir de 1976 es que se usa para la fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes, principalmente para bebidas, sin embargo, el PET ha tenido un desarrollo extraordinario para empaques. En México se comenzó a utilizar para la fabricación de botellas a partir de 1985 y ha tenido gran aceptación por parte del consumidor, por lo que su uso se ha incrementado de manera considerable año tras año (Shen *et al.*, 2011).

El PET es un polímero elaborado a partir de dos materias primas derivadas del petróleo, etileno y paraxileno, los cuales tienen como compuestos básicos, el ácido tereftálico y el etilenglicol, y que al reaccionar ambos a temperaturas y presiones controladas producen la resina de PET.

Por las características de este polímero, se ha convertido en el material de embalaje más favorable en todo el mundo principalmente para envases de bebidas. La razón de este desarrollo son las propiedades que presenta dicho material, especialmente, los envases son ligeros, transparentes, brillantes y con alta resistencia a impactos, tienen cierre hermético, no alteran las propiedades del contenido y no son tóxicos (Brooks y Giles, 2002). La Tabla 1, muestra viscosidades para los distintos usos del PET.

Tabla 1. Viscosidad intrínseca para aplicaciones de la resina de PET.

Aplicación	η (dl/g)
Cinta de grabación	0.60
Fibra	0.65
Botellas para bebidas	0.73-0.8

Fuente: Firas y Dumitro, 2005.

La resina PET se produce en distintas especificaciones dependiendo su uso asignado, como se muestra en la Tabla 1, es decir, el valor de la viscosidad intrínseca es modificado dependiendo de la aplicación que tendrá la resina de PET para la producción de nuevos productos. La viscosidad intrínseca es una medida indirecta del peso molecular, o bien, el tamaño promedio de las moléculas que definen al polímero. Cualquier aumento o disminución de la viscosidad intrínseca significará una reducción o aumento del peso molecular (Brooks y Giles, 2002).

Otros mercados en donde es posible encontrar PET son la producción de botellas para bebidas, aceites, detergentes y productos de limpieza, cosméticos, alimentos, productos químicos; producción de PET grado textil; tubería; marcos; madera plástica; paredes, juguetes; entre otros materiales (Firas y Dumitro, 2005). En la Tabla 2, se presenta la composición del mercado de resina de PET en el territorio nacional.

Tabla 2. Uso de la resina de PET en México.

Artículo	Porcentaje (%)
Refrescos	52.8
Agua purificada	14.9
Aceite	14.5
Alimentos	7.0
Cuidado personal	2.2
Agroquímicos	1.4
Licores	0.3
Otros envases	1.5
Preforma exportada	5.4
Total	100

Fuente: G. D. F., 2002.

En México y como se menciona en la Tabla 2, la mayoría del uso de la resina de PET es para la fabricación de botellas para contener refrescos con el 52.8%.

2.2.1. Producción de PET

Industrialmente el PET se elabora a partir del ácido tereftálico (TPA) o el dimetiltereftalato (DMT), los cuales al hacer reaccionar por esterificación con etilenglicol a temperaturas cercanas a los 260 °C y presiones de 300 kPa aproximadamente se obtiene Bis-beta-hidroxi-etil-tereftalato, el cual en una fase sucesiva mediante una policondensación a temperaturas de entre 270 y 290°C y presiones de entre 50 y 100 kPa se obtiene como producto final la resina de PET. La producción de la resina se ejemplifica en la Figura 5 (Brooks y Giles, 2002).

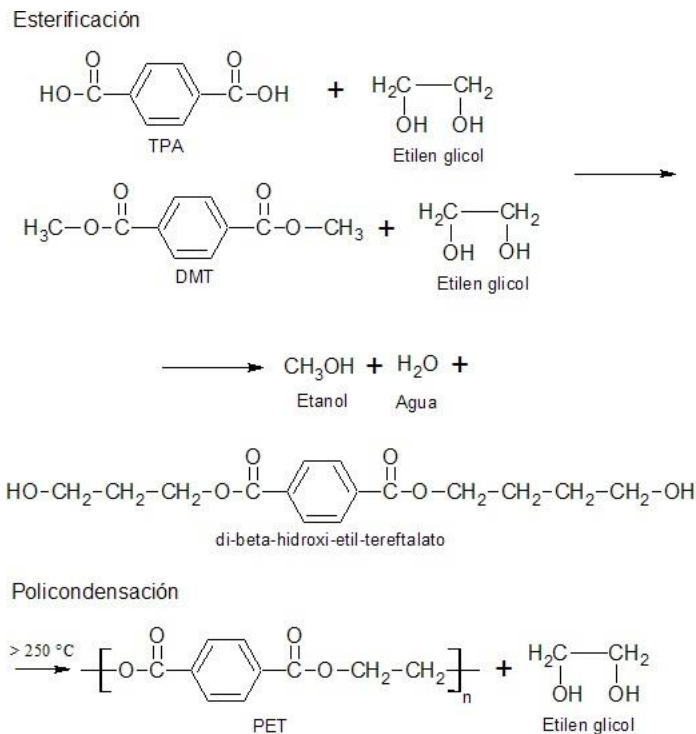


Figura 5. Síntesis de PET. Fuente: Giles y Bain, 2001.

La Figura 5 representa la reacción química de las materias primas para la producción de resina de PET.

Tabla 3. Propiedades del PET cristalizado.

Propiedad	Valor	Unidades
Peso molecular	192	g/mol
Densidad	1.41	g/cm ³
Temperatura de fusión	265	°C
Resistencia al impacto	90	J/m
Resistencia a la tensión	81	N/mm ²
Punto de fusión	260	°C

Fuente: Firas y Dumitro, 2005.

Algunas de las propiedades del PET cristalizado se muestran en la Tabla 3. Para la elaboración de botellas de PET son necesarios otros dos pasos, la cristalización y la polimerización. La cristalización consiste en el fenómeno físico con el cual las macromoléculas pasan de una estructura, en la cual su disposición espacial es desordenada, a una estructura uniforme opaca a la luz que le confiere a la resina una coloración “blanca lechosa” (Brooks y Giles, 2002).

En la polimerización, los monómeros presentes se unen para formar una larga molécula en forma de cadena de gran peso molecular y viscosidad intrínseca de entre 0.73 y 0.8 dl/g. El producto obtenido es enviado a un reactor cilíndrico en cuyo interior, es sometido con un flujo de gas inerte (nitrógeno) a temperaturas sobre los 200 y 250°C (Brooks y Giles, 2002).

Posteriormente el PET es fundido e inyectado en máquinas de cavidades múltiples (16”, 32”, 64”, entre otros), dando como resultado las preformas, que son recipientes aún no inflados y que sólo presentan la boca del envase en forma definitiva. Con lo anterior, las preformas son transportadas al proceso de sople-moldura (un proceso de calentamiento controlado), donde son estirados por medio de una varilla hasta el tamaño definitivo del envase.

Finalmente son inflados con aire a presión hasta que toman la forma exacta del molde deseado, obteniendo como producto final una botella transparente, fuerte y ligera, de alta resistencia a impactos, además de no alterar las propiedades del contenido, y lo principal, no son tóxicos (Morton-Jones, 1993; Firas y Dumitro, 2005; Brooks y Giles, 2002).

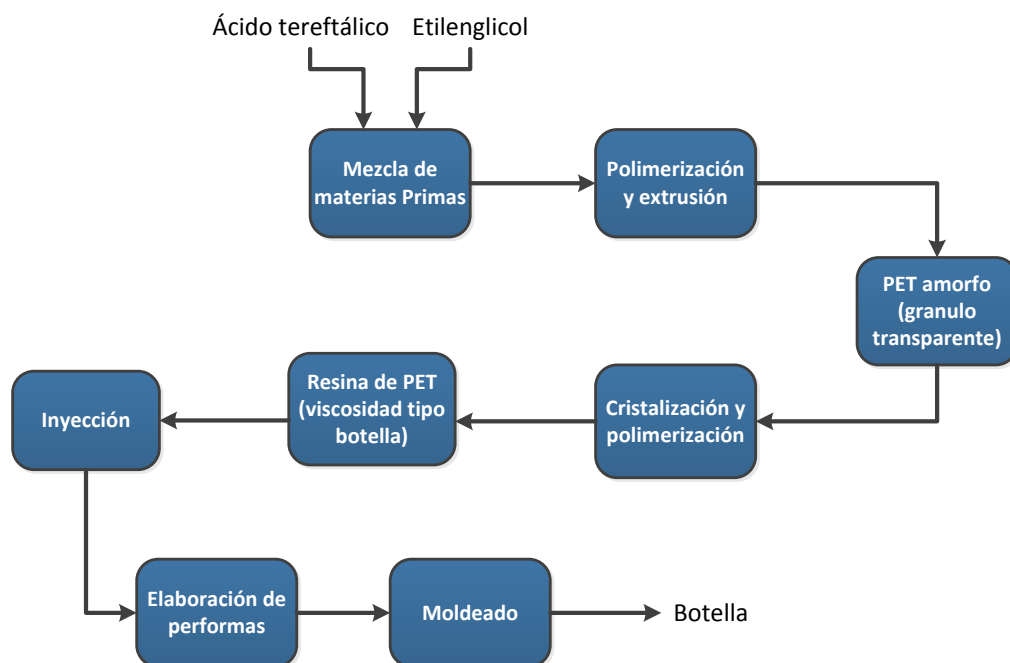


Figura 6. Diagrama de flujo de la elaboración de botellas de PET. Fuente: Adaptada de Brooks Giles, 2002.

En la Figura 6 se muestra el diagrama de flujo del proceso de elaboración de las botellas de PET compuesto primeramente por la mezcla de las materias primas, los procesos de

polimerización y cristalización para obtener la resina de PET y posteriormente a través del proceso de inyección o moldeo de obtienen las botellas deseadas.

2.2.2. Reciclaje de botellas de PET

Actualmente a nivel mundial existen diferentes tecnologías de reciclaje de las botellas de PET. Algunas de ellas empezaron a desarrollarse a partir de 1970; *i)* reciclaje mecánico, *ii)* reciclaje secundario, *iii)* reciclaje químico y *iv)* aprovechamiento energético. Cada tecnología depende de diversos factores, como limpieza y homogeneidad de las botellas, valor agregado y la aplicación final (Firas y Dumitro, 2005; Welle, 2011).

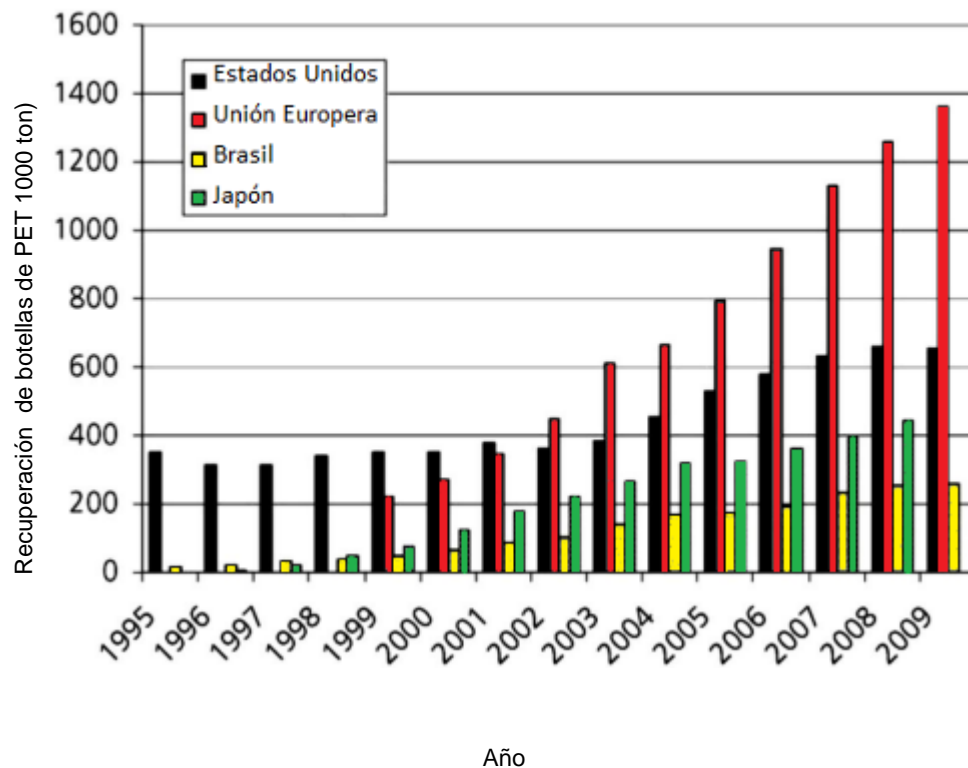


Figura 7. Toneladas de botellas de PET recuperadas en el mundo. Fuente: Welle, 2011.

En la Figura 7 se muestra las toneladas de botellas de PET recuperadas por distintos países del mundo para su posterior aprovechamiento. La tendencia del gráfico muestra que año tras año la cantidad de botellas de PET recuperadas aumenta.

Reciclaje primario

También llamado reciclaje mecánico, es la técnica más utilizada y consiste en la trituración y lavado de las botellas para producir hojuelas en distintas calidades dependiendo el tipo de lavado, y son destinadas a la producción de diversos materiales (exceptuando materiales que estén en contacto con alimentos). Adicional a lo anterior, se puede incluir una fundición de las botellas y producir pellets (Assadi *et al.*, 2004; Ávila y Duarte, 2003; Donnini *et al.*, 2010).

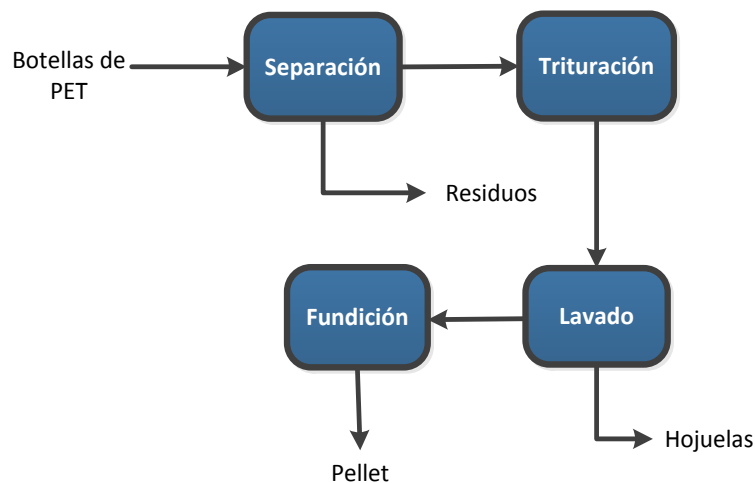


Figura 8. Reciclaje mecánico. Fuente: Adaptada de Brooks Giles, 2002.

Las etapas presentadas en la Figura 8, se describen brevemente a continuación:

La separación se realiza a partir de sistemas automatizados y manuales en dos diferentes niveles;

- ✚ Macro. Se realiza sobre el producto usando el reconocimiento óptico del color o de la forma.
- ✚ Micro. Se realiza por propiedad física específica como el tamaño, peso y densidad.

La trituración consiste en la reducción del volumen de las botellas de PET. Esta reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando las botellas por medios mecánicos hasta el tamaño deseado.

Generalmente las botellas de PET suelen estar contaminadas con residuos orgánicos, residuos peligrosos, papel, piedras, polvo, pegamento, entre otros materiales, por lo cual se realiza un lavado con agua a temperaturas cercanas a los 80°C y temperatura ambiente y en algunos de los casos dependiendo de calidad obtenida por los lavados con agua se aplica un lavado con NaOH como detergente.

Por medio de diferencia de densidades los contaminantes (tapas y etiquetas) del proceso son removidos mediante centrifugación. Finalmente el producto final son hojuelas de PET limpias.

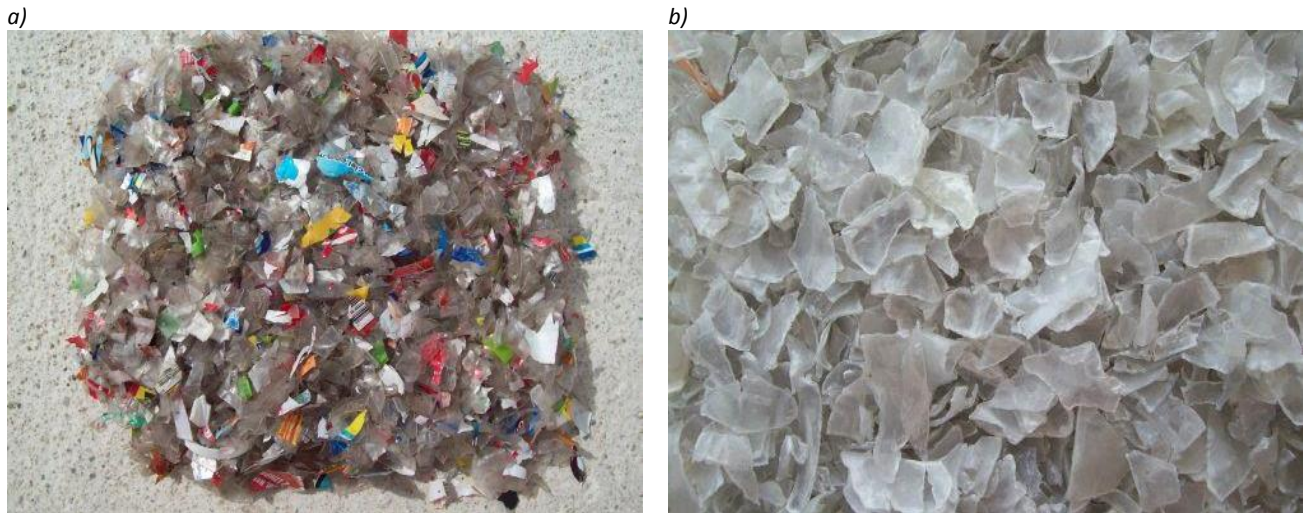


Figura 9. Hojuelas de PET a) sucia, b) limpia. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9 se presenta hojuelas de PET limpias y sucias que son producidas por el reciclaje mecánico de las botellas de PET. Las hojuelas limpias pueden ser vendidas o también pueden convertirse en pellets, para esto, las hojuelas son fundidas y el producto se pasa a través de un tubo para tomar la forma de espagueti y que al enfriarse en un baño de agua es cortado en pedacitos llamados pellets como lo muestra la Figura 10.



Figura 10. Pellets. Fuente: Elaboración propia.

El reciclado mecánico, en comparación con las demás tecnologías de reciclaje es el más económico, pero con la limitante de producir un producto final de menor calidad para un mercado más reducido con un mayor volumen de rechazos (Donnini *et al.*, 2010).

Reciclaje secundario

Esta tecnología convierte al plástico PET en artículos con propiedades que son inferiores a las del polímero original. La mezcla de plásticos, incluyendo tapas, etiquetas de papel, polvo, entre otros, son molidos y fundidos todos juntos en un extrusor. Los plásticos pasan por un tubo con una gran abertura hacia un baño con agua y posteriormente son cortados a distintas longitudes dependiendo de las especificaciones del cliente (Fortelný *et al.*, 2004).

Reciclaje terciario

También llamado reciclado químico es llevado a cabo por la total despolimerización en monómeros de las hojuelas para producir nuevamente resina de PET, previamente es realizado un reciclado mecánico. Las rupturas de este polímero se realizan principalmente por hidrólisis, metanólisis y glicolisis en reactores a temperaturas de hasta 300 °C y 11 MPa (Yang *et al.*, 2002). La desventaja principal de esta tecnología de reciclado son altos costos asociados. Sin embargo, el producto final es una resina de PET con la calidad necesaria para

volver a producir botellas u otro contenedor para almacenar alimentos (Barboza *et al.*, 2009; Viana *et al.*, 2011).

El diagrama de flujo del reciclado químico se encuentra plasmado en la Figura 11. El reciclado químico se facilita con el empleo de botellas de PET transparente, ya que sin pigmentos tiene mayor valor y mayor variedad de usos en el mercado (Abdelaal *et al.*, 2011; López y Gutiérrez, 2010).

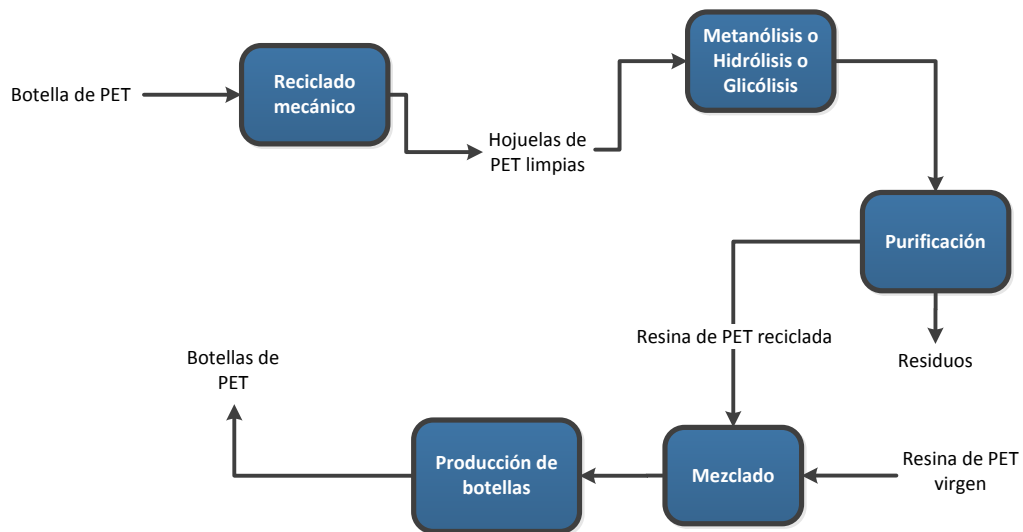


Figura 11. Reciclado químico del PET. Fuente: Adaptada de Brooks y Giles, 2002.

La parte central del reciclaje químico es la “lisis” que acompañado de un proceso de purificación a presiones y temperaturas controladas logra eliminar los contaminantes presentes en las hojuelas. En la Figura 11 se observa que el producto final obtenido en la purificación (resina de PET reciclada) es mezclado con productos vírgenes en una relación de % en peso de 20% resina reciclada y 80% resina virgen, lo anterior para que la calidad de la botellas no sea modificada en comparación con la producción de botellas con únicamente producto vírgenes (Brooks y Giles, 2002).

En el país sólo se existe una empresa que se utiliza el reciclado químico para la producción de botellas para contener alimentos (agua y refrescos), “Petsart” que se encuentra ubicada en la ciudad de Toluca dentro del Estado de México. Esta empresa produce y abastece de botellas para contener productos de “cocacola”, “gatorade”, “jarritos”, “gerber”, entre otros (García, 2012).

Reciclaje cuaternario



Denominado también aprovechamiento energético. El PET es un polímero que no contiene halógenos, azufre, o nitrógeno, por lo cual, su combustión produce sólo dióxido de carbono y agua con desprendimiento de energía, ya que en su estructura básica, el PET está compuesto de carbono, hidrógeno y oxígeno y puede utilizarse eficazmente como sustituto de los combustibles fósiles en la producción de energía dado que su poder calorífico corresponde a 23.04 MJ/kg (Chilton *et al.*, 2010).

El aprovechamiento energético de las botellas de PET constituye una opción digna de tenerse en cuenta, ya que contribuye a un ahorro de fuentes de energía no renovables (Colmer y Gallardo, 2007). Su inconveniente es que si su combustión no se lleva adecuadamente se pueden generar dioxinas y furanos causantes de afectaciones negativas al ambiente y a la población.

En México, solo el sector privado, como “cemex”, utiliza las botellas de PET en mezcla con la fracción inorgánica de los RSU (materiales con poder calorífico de consideración como papel, cartón, plásticos, entre otros), para sustituir a combustibles fósiles, y el calor generado por la incineración de los RSU, lo utilizan como combustible alternativo dentro del proceso de producción de cemento. Algunas de las ciudades que utilizan el aprovechamiento energético de las botellas de PET junto con la fracción inorgánica de los RSU para la producción de energía eléctrica por medio de la incineración son Londres capital de Inglaterra y Reino Unido, y Napoli en Italia.

2.2.3. Aplicaciones de las botellas de PET recicladas

En 2007, a nivel mundial se recuperaron aproximadamente 4.5 millones de toneladas de botellas de PET para posteriormente ser recicladas (Shen *et al.*, 2010). A continuación se enlistan algunas de las aplicaciones de las botellas de PET recicladas.

-  Fibra poliéster
-  Combustible alternativo

- ✚ Madera plástica
- ✚ Envases de productos no alimenticios
- ✚ Lamina
- ✚ Flejes
- ✚ Monofilamentos
- ✚ Productos industriales
- ✚ Carcasas de TV, radio y electrodomésticos
- ✚ Cajas de CD
- ✚ Piezas de equipos de audio.

Durante el año 2011, en México se generaron 716,000 toneladas de botellas de PET como RSU (lo anterior, considerando que el 100% de las botellas producidas corresponden a las botellas generados como RSU), de las cuales, el 39% se recuperó para su aprovechamiento, por lo que se estima que el restante 61% se encuentran dispuestas en algún lugar adecuada o inadecuadamente (García, 2012).

De las 283,000 toneladas de botellas de PET que lograron recuperarse, el 39.2% fueron exportadas principalmente a Estados Unidos, China, Sudamérica y el restante 60.8% fueron transformadas principalmente en botellas, flejes, laminas y fibra de poliéster dentro del territorio nacional como se ejemplifica en la Figura 12.

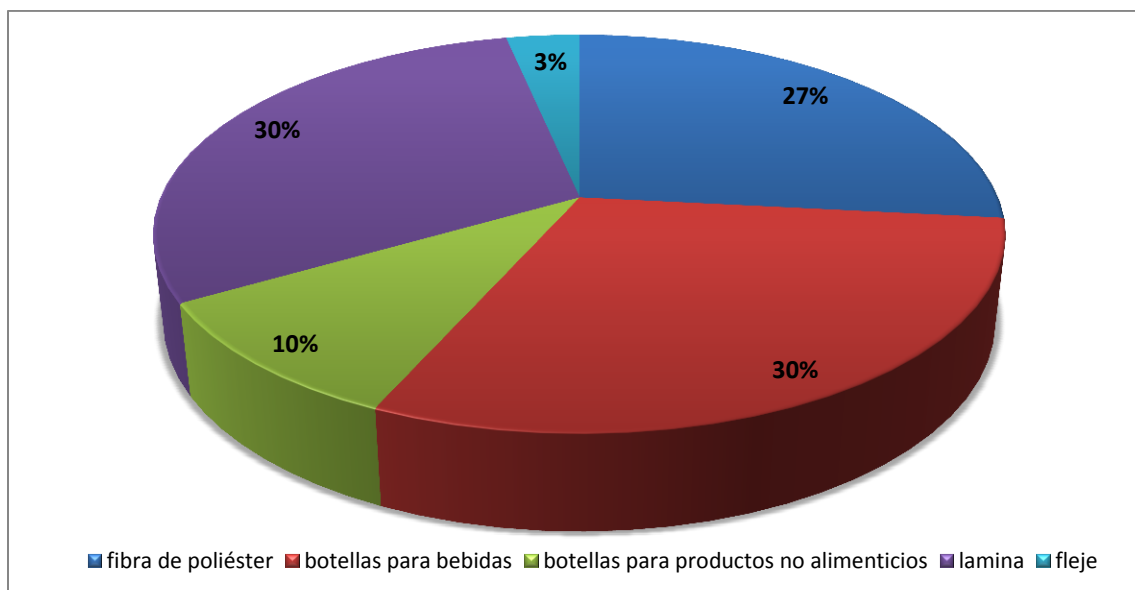


Figura 12. % de aplicación de PET reciclado en México. Fuente: (García, 2012).

Los porcentajes presentados en la Figura 12 corresponden a la producción de 32,000 toneladas de fibra de poliéster; 36,000 toneladas de botellas para contener productos alimenticios; 12,000 toneladas para la producción de botellas para contener productos no alimenticios; 36,000 toneladas de lámina; y 4,000 toneladas de flejes. Todo lo anterior a partir del reciclaje de 172,000 toneladas botellas de PET (García, 2012).

2.3. Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que identifica, cuantifica y caracteriza los diferentes impactos ambientales asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto o servicio (incluyendo las etapas de extracción, tratamiento, fabricación, transporte, distribución, uso, reciclado, reutilización, disposición final y demás etapas que integren el ciclo de vida del sistema de estudio como se ejemplifica en la Figura 13 (Shen *et al.*, 2010). De este modo se pueden comparar los impactos ambientales de diferentes materiales o de diferentes sistemas utilizados con un mismo propósito (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2008).

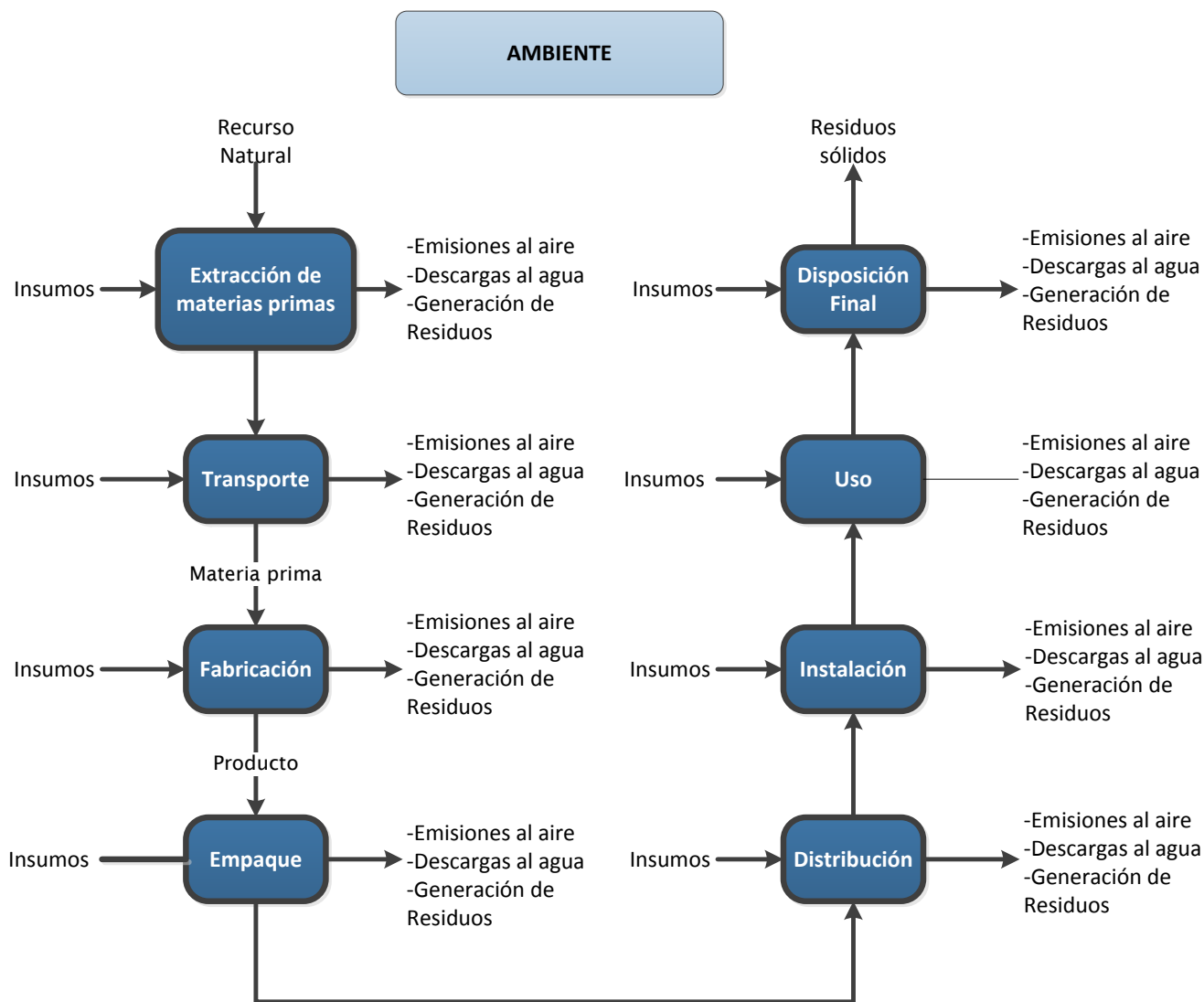


Figura 13. Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: Adaptada de Aranda Usón et al. 2006.

Las etapas que integran el sistema mostrado en la Figura 13, no siempre son las mismas debido a que los productos o servicios tienen su propia y única configuración, por lo cual cada ACV desarrollado es independiente y único.

Durante la última década, el ACV ha sido utilizado a nivel mundial como herramienta metodológica para evaluar el impacto ambiental asociado a un producto o servicio, y sus resultados permiten fundamentar la selección de la mejor estrategia de diseño o rediseño, mejorar el uso de recursos y materiales. Contribuyendo a la mejora continua y/o desarrollo de productos o servicios con la misma o mayor calidad pero generando menor cantidad de contaminantes al ambiente (Institute for Environment and Sustainability, 2010).

Las herramientas de ingeniería que se utilizan para el desarrollo de un ACV son los balances de materia y energía, cálculo de flujos de entrada y salida, análisis de flujo, análisis de riesgo ambiental, costos totales y el análisis de costo beneficio. Estas herramientas que modelan a los sistemas cuantitativamente están destinados a proporcionar información científica para facilitar la toma de decisiones incorporando aspectos ambientales (Chilton *et al.*, 2010).

La metodología para el desarrollo de un ACV y como se muestra en la Figura 14, consta de las siguientes cuatro fases (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2008):

- i)* Definición del objetivo y alcance
- ii)* Análisis de Inventario
- iii)* Evaluación de Impacto
- iv)* Interpretación de los resultados del estudio

Las fases activas o dinámicas, en las que se recopilan y evalúan los datos, son la segunda y la tercera. Las fases primera y cuarta pueden considerarse como fases estáticas. A partir de los resultados de una fase pueden reconsiderarse las hipótesis de la fase anterior y reconducirla hacia el camino que ofrezca el nuevo conocimiento adquirido. El ACV es, por lo tanto, un proceso que se retroalimenta y se enriquece a medida que se realiza.

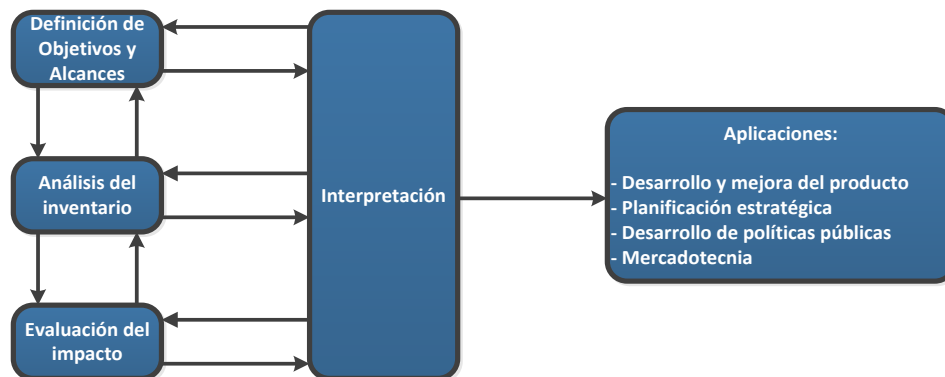


Figura 14. Estructura general de un ACV. Fuente: Adaptada de Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2008.

Las líneas de flujo en la Figura 14, van en ambos sentidos, hacia adelante y hacia atrás, debido a que el ACV es un proceso iterativo, es decir, conforme se va adquiriendo información sobre el sistema de estudio pueden modificarse los objetivos y alcances, adición

o supresión de impactos ambientales, principalmente. Lo anterior ocasiona que un ACV pueda ser adaptado a la disponibilidad de información para el desarrollo del mismo.

Los usos y aplicaciones del ACV son principalmente los siguientes (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2008):

- ✚ Identificación de oportunidades de mejora de los aspectos ambientales de los productos o servicios en todas las etapas de su ciclo de vida.
- ✚ Toma de decisiones relacionadas con la planificación estratégica, establecimiento de prioridades, diseño o rediseño de productos o procesos.
- ✚ Selección de indicadores de comportamiento ambiental relevantes incluyendo técnicas de medición, entre otros aspectos.

2.3.1. Fase 1

La primera fase para el desarrollo de un ACV consiste en la definición del objetivo de forma clara y consistente, estableciendo la finalidad del estudio, el producto implicado, la audiencia a la que se dirige, magnitud del estudio, las razones por las cuales se efectúa el estudio (Institute for Environment and Sustainability, 2010)..

Posteriormente es necesario plantear el alcance, el cual debe ser considerado la extensión, la profundidad y el detalle del estudio, además de los siguientes puntos:

- ✚ Las funciones del sistema o de los sistemas si se trata de estudios comparativos
- ✚ La unidad funcional
- ✚ El sistema que se va a estudiar
- ✚ Los límites del sistema del producto o servicio
- ✚ Los procedimientos de asignación
- ✚ Los tipos de impacto y la metodología de la evaluación del impacto, así como la interpretación posterior que se va a usar
- ✚ Los requisitos de los datos
- ✚ Los supuestos
- ✚ Las limitaciones

- ✚ Los requisitos de calidad de los datos iniciales
- ✚ El tipo de revisión crítica
- ✚ El tipo y el formato del informe que se requiere para el estudio

Lo anterior para tener seguridad de que todas las consideraciones sean compatible y suficientes para lograr el objeto previsto (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2008).

Función del sistema

La función del sistema define las características de operación del mismo. Hay que destacar que un sistema puede tener más de una función. Por lo anterior, si se pretende comparar dos sistemas diferentes, es preciso que desarrollen la misma función (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2008).

Unidad funcional

Proporciona una base de cálculo, a partir de la cual son matemáticamente normalizados todos los datos de entradas y salidas para asegurar la compatibilidad de los resultados del ACV, en otras palabras la unidad funcional es una base de cálculo (Institute for Environment and Sustainability, 2010).

Sistema y límites del sistema

El sistema se define como el conjunto de procesos unitarios o subsistemas necesarios que conectado material y energéticamente permiten la presencia del producto estudiado en el mercado. El sistema se suele representar por medio de un diagrama de proceso.

Los límites del sistema definen los procesos unitarios a ser incluidos en el sistema. Por tanto, es esta etapa del ACV toma decisiones respecto a que procesos unitarios serán modelados y el nivel de detalle con que serán estudiados. También se toman decisiones relativas a las emisiones al ambiente que serán evaluadas y el nivel de detalle de esta evaluación (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2008).

La elección de los elementos del sistema a modelar depende de la definición del objetivo y el alcance del estudio, de su aplicación y público previsto, de las suposiciones realizadas, de las restricciones en cuanto a datos y costos, entre otros. Cuando se establecen los límites del sistema, se considera varias etapas del ciclo de vida, procesos unitarios y flujos, por ejemplo los siguientes (Institute for Environment and Sustainability, 2010).

- ✚ Adquisición de materias primas (a cual incluye todas las operaciones para la extracción de materias primas).
- ✚ Entradas salidas en la secuencia principal de fabricación/procesamiento.
- ✚ Distribución/transporte.
- ✚ Producción y utilización de combustibles, electricidad y calor.
- ✚ Utilización y mantenimiento de productos.
- ✚ Disposición de los residuos del proceso y de los productos.
- ✚ Recuperación de productos utilizados (reutilización, reciclado y recuperación de energía).
- ✚ Producción de materiales secundarios.
- ✚ Producción, mantenimientos y desmantelamiento de los equipos, entre otros.

2.3.2. Fase 2

La fase 2 consiste en la elaboración del Análisis de Inventario e implica la recopilación de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar los flujos masa y energía que entran y salen del sistema durante todo el ciclo de vida, tomando como referencia la unidad funcional (Wittmaier y Langer, 2009).

Las entradas cuantificadas incluyen el uso de energía y materias primas como el agua, los combustibles fósiles y electricidad. Por su parte las salidas cuantificadas incluyen las emisiones al aire, agua, suelo, subproductos y otros residuos.

La realización de un análisis de inventario es un proceso iterativo. A medida que se recopilan los datos y se conoce mejor el sistema, pueden identificarse nuevos requisitos o limitaciones relativos a los datos que pueden conllevar un cambio con el procedimiento de obtención de los datos para que se pueda seguir cumpliendo el objetivo del estudio.

En resumen el desarrollo del Análisis de Inventario consta de tres pasos generales:

- ✚ Hacer un diagrama de flujo ilustrando las entradas y salidas de las etapas que están siendo evaluadas.
- ✚ Recopilación de los datos, consiste en llenar las hojas de cálculo o diagramas de flujos con la información numérica para cada corriente de los procesos considerados en el estudio.
- ✚ Señalar la calidad de los datos que se recopilarán para el estudio, dicha calidad dependerá de la precisión de los resultados esperados y de la disponibilidad de tiempo y recursos.

McDougall et al. (2002), mencionan que las emisiones al aire y descargas al agua presentadas en la Tabla 4 son producidas por el uso de combustibles (gasolina, diesel, gas natural) y uso de energía eléctrica en los sistemas de manejo de RSU.

Tabla 4. Emisiones generadas en el MIRSU.

Emisiones al aire	Descargas al agua	Suelo
Partículas	DBO/DQO	Hidrocarburos clorados
CO	Sólidos suspendidos	As
CO ₂	Compuestos orgánicos totales	Cd
CH ₄	Haluros orgánicos absorbibles	Cr
N ₂ O	Hidrocarburos clorados	Cu
NO _x	Dioxinas/furanos	Pb
SO _x	Fenoles	Mn
HCl	Aluminio (Al)	Hg
HF	Amonio (NH ₄ ⁺)	Ni
H ₂ S	As	Zn
Hidrocarburos clorados	Ba	As
Dioxinas/furanos	Cd	Cd
Amoniaco (NH ₃)	Cloruro (Cl ⁻)	NO ₃ ⁻
Arsénico (As)	Cr	PO ₄ ³⁻
Cadmio (Cd)	Cu	SO ₄ ²⁻
Cromo (Cr)	Cianuro (CN ⁻)	
Cobre (Cu)	Fluoruro (F ⁻)	
Plomo (Pb)	Fierro (Fe)	
Manganeso (Mn)	Plomo	
Mercurio (Hg)	Hg	
Níquel (Ni)	Ni	
Zinc (Zn)	Nitrato (NO ₃ ⁻)	
	Fosfato (PO ₄ ³⁻)	
	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	
	Sulfuro (S ²⁻)	
	Zn	

Fuente: McDougall et al. 2002

Los compuestos mencionados en la Tabla 4 serán utilizados para el desarrollo del inventario de los flujos de salida del presente trabajo.

2.3.3. Fase 3

La fase 3 que consiste en la evaluación de impactos, tiene como fundamento que los flujos de salida (principalmente las emisiones al aire, descargas al agua y generación de residuos sólidos) sean clasificados y consecutivamente multiplicadas por un factor para que finalmente sean caracterizadas en las distintas categorías de impacto evaluadas. Lo anterior para evaluar la importancia de los impactos ambientales generados por cada etapa que integra el sistema de estudio.

Los indicadores resultantes de la caracterización de las categorías de impacto reflejan las emisiones agregadas o los recursos utilizados para cada categoría de impacto. En general este proceso implica la asociación de datos de inventario con impactos ambientales específicos tratando de valorar dichos impactos. El nivel de detalle, la elección de impactos evaluados y las metodologías usadas dependen del objetivo y alcance del estudio.

La Evaluación de Impactos como parte de un ACV tiene como objetivo las siguientes actividades:

- ✚ Interpretar el inventario, analizando y evaluando los impactos producidos por todos los flujos de energía y materiales cuantificados en los distintos procesos del sistema.
- ✚ Identificar las oportunidades de mejora del sistema analizando y ayudar en su jerarquización.
- ✚ Caracterizar o comparar el sistema analizado y sus procesos unitarios en el tiempo.
- ✚ Realizar comparaciones relativas entre sistemas, basadas en los indicadores de categoría seleccionados.
- ✚ Indicar las variables ambientales para las que otras técnicas puedan aportar datos ambientales complementarios e información útil para los responsables de la toma de decisiones de una empresa.

La Evaluación de Impactos consta de tres elementos obligatorios; selección de categorías, clasificación y caracterización. Y cuenta con tres elementos opcionales; normalización, agrupación y valoración.

Elementos obligatorios

- ✚ Selección. Se seleccionan las categorías de impacto y los métodos de caracterización que se van a considerar en el estudio.
- ✚ Clasificación. Es la asignación de los datos del inventario a las diferentes categorías de impacto.

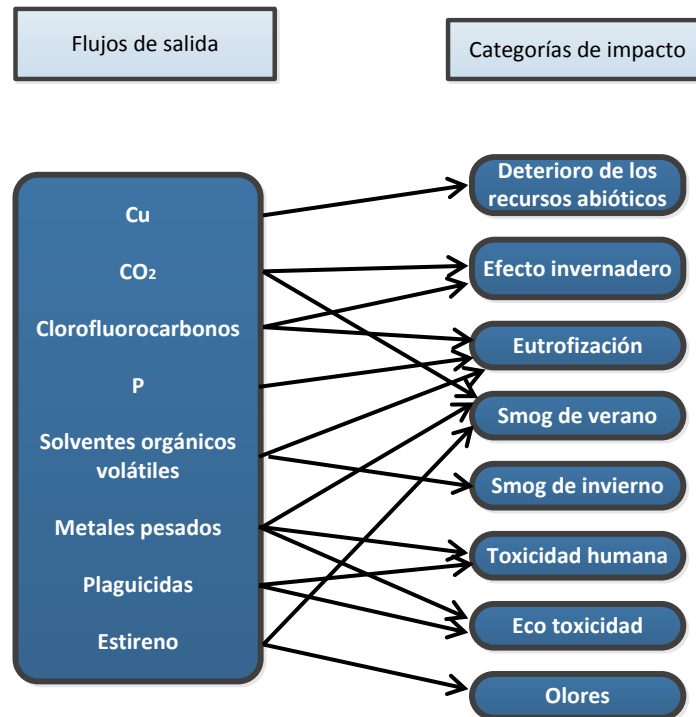


Figura 15. Clasificación de datos del inventario. Fuente: Adaptada de Aranda Usón et al., 2006.

Como se ejemplifica en la Figura 15, el CO₂ se asigna las categorías de impacto de efecto invernadero y smog de verano al igual que los restantes compuestos se asigna a otras categorías de impacto.

- ✚ Caracterización. Se refiere al cálculo del indicador de impacto para cada una de las categorías de impacto seleccionadas, usando factores de caracterización, los cuales son estimados usando modelos de caracterización y representan la contribución relativa de una sustancia en una categoría de impacto.

Elementos opcionales

- ✚ Normalización. Es el cálculo de la magnitud del indicador de impacto, el cual es calculado por medio del uso de información de referencia, como las emisiones en un área determinada.
- ✚ Agrupación. Es el proceso de clasificar las categorías de impacto por grupos de impacto similar o por categorías en una jerarquía determinada, por ejemplo, alta, media o baja prioridad.

- ✚ Valoración. Consiste en establecer unos factores que otorgan una importancia relativa a las distintas categorías de impactos para después sumarlas y obtener resultados ponderados en forma de un único índice ambiental global del sistema.

A continuación se presenta una descripción general de diferentes categorías de impacto.

Acidificación

La acidificación se refiere al aumento de la concentración de los iones hidrogeno (H^+) ocasionado por la emisiones antropogénicas y naturales, principalmente los NO_x , NH_3 y SO_2 , en los cuerpos de agua superficial, aguas subterráneas y suelo. Para casi todas las especies hay un grado óptimo de acidez definida, una desviación del mismo es perjudicial para las especies en cuestión. El cálculo del indicador de la acidificación se calcula acorde a la ecuación 1 (Bare et al, 2003):

$$Acidificación = \sum_i^n PA_i \times m_i \quad (Ec. 1)$$

Donde;

PA_i = potencial de acidificación del compuesto i

m_i = masa del compuesto i

Eutrofización

La eutrofización se refiere al enriquecimiento de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, en un cuerpo de agua favoreciendo el crecimiento excesivo de materia orgánica a partir de las descargas antropogénicas, provocando un crecimiento acelerado de algas y otras plantas verdes que cubren la superficie del agua y evita que la luz solar llegue a las capas inferiores. Como consecuencia de esto, el agua se enturbia, y al disminuir la cantidad de luz, la vegetación muere al no poder realizar la fotosíntesis, generando que otros microorganismos, como bacterias, se alimenten de la materia muerta, consumiendo el oxígeno que necesitaban especies marinas para vivir, y a la vez generando algas tóxicas y

microorganismos patógenos. El cálculo del indicador de eutrofización se obtiene a partir de la ecuación 2 (Bare et al, 2003).

$$Eutrofización = \sum_i^n PE_i \times m_i \quad (Ec. 2)$$

Donde;

PE_i = Potencial del Eutrofización del compuesto i

M_i = masa del compuesto i

El PE indica la contribución de una sustancia en la formación de biomasa a partir de la ecuación 3 (Güereca Hernández, 2006).

$$PE_i = \frac{v_i/m_i}{v_{ref}/m_{ref}} \quad (Ec. 3)$$

Donde;

v_i = Contribución a la eutrofización de una mol del compuesto i

v_{ref} = Contribución a la eutrofización de una mol del compuesto de referencia (N)

m_i = masa del compuesto i (kg/mol)

m_{ref} = masa del compuesto de referencia (kg/mol)

Calentamiento global

La categoría de cambio climático se refiere al cambio de temperatura de la Tierra causado por la acumulación de los gases de efecto invernadero (CO_2 , CO, CH_4 , CFC, NO_x , entre otros) ocasionando incendios forestales, afectaciones a los seres vivos, los ecosistemas, cuerpos de agua, agricultura, zonas costeras, entre otros. El Potencial de Calentamiento Global (PCG) es usado como el factor de caracterización para evaluar y agregar las intervenciones en la presente categoría.

El indicador de gases de efecto invernadero se deriva de dos propiedades básicas de cada gas. La primera es la habilidad para reflejar el calor y la segunda tiene que ver con la permanencia del gas en la atmósfera. Estas propiedades se comparan con las propiedades del CO_2 y son convertidas en CO_2 equivalentes los cuales pueden ser sumados para obtener

un indicador de gases de invernadero. En consecuencia el indicador global de gases de efecto invernadero se calcula a partir de la ecuación 4 (Bare et al, 2003).

$$\text{Cambio Climático} = \sum_i^n PCG_i \times m_i \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde;

PCG_i = potencial de calentamiento global del compuesto i

m_i = masa del compuesto

Efectos cancerígenos

Para determinar los daños a la salud humana por los efectos cancerígenos se requiere cubrir tres etapas separadas:

1) Análisis de Destino: Para emisiones al suelo con aire, agua, suelo urbano e industrial a través de la inhalación e ingestión de alimentos, agua y suelo. Los factores del análisis de destino se calculan a partir de la concentración en el aire, agua potable y la dosis presentada en los alimentos consumidos.

2) Análisis del Efecto: Se considera el concepto de unidad de riesgo para la estimación de la relación dosis-respuesta y consiste en una estimación probabilística de que un individuo promedio pueda desarrollar cáncer cuando se expone a concentraciones de $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la vida del individuo.

3) El Análisis de Daños: Para obtener la estimación de la gravedad de la enfermedad esta se caracteriza con el parámetro DALY (años de vida ajustados por discapacidad) conociendo previamente la duración de la enfermedad, la tasa de mortalidad y la edad de las personas afectadas. Por lo anterior y conociendo la estimación de los Años de Vida Perdidos (AVP) y los Años de Vida Deshabilitados (AVD) es posible determinar los DALYs a partir de la ecuación 5 (Güereca Hernández, 2006).

$$DALY = AVP + AVD \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde;

AVP = Años de Vida Perdidos

AVD = Años de Vida Deshabilitados por incidencia de cáncer

Extracción de combustibles fósiles

El daño causado por la disminución de combustibles fósiles se expresa en MJ/kg de material extraído, usando el concepto de energía SURPLUS. La energía SURPLUS se define como la diferencia entre la energía necesaria para extraer un recurso ahora y en algún momento del futuro. La futura energía SURPLUS se calculó acorde a la ecuación 6 (Güereca Hernández, 2006).

$$SURPLUS = Q \times N \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde;

Q = Cantidad total de energía extraída por el hombre antes de 1990

N = Número de veces que Q es extraída.

Efectos respiratorios

Las concentraciones ambientales de partículas en suspensión ($PM_{10, 2.5}$), los Nitratos, Sulfatos, NO_x , SO_x , O_3 , CO están fuertemente asociados con los cambios en las tasas de referencia de los síntomas respiratorios crónicos y agudos, así como las tasas de mortalidad. El indicador de los efectos respiratorios se expresa en DALYs (Bare et al, 2003).

Formación de oxidantes fotoquímicos

El ozono (O_3) es un gas muy oxidante reactivo producido de forma natural en pequeñas cantidades en la atmósfera terrestre. Sin embargo el ozono en la troposfera tiene efectos perjudiciales a la salud humana y en los ecosistemas. La caracterización de la formación de oxidantes fotoquímicos se relaciona con la formación de ozono en la troposfera. Las tasas de

formación de ozono en la troposfera se rigen por las reacciones influenciadas por las concentraciones de los NO_x, COVs, CO, CH₄ y las condiciones particulares de temperatura y luz solar. El indicador de formación de foto-oxidantes se calcula acorde a la ecuación 7. (Bare et al, 2003).

$$\text{Formación de foto – oxidantes} = \sum_i^n PCOF_i \times m_i \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde;

PCOF_i = potencial de formación de smog fotoquímico del compuesto i

m_i = masa del compuesto i

Toxicidad terrestre

Se relacionan los efectos de los compuestos tóxicos sobre los ecosistemas terrestres. Considerando que el factor transporte es de gran relevancia debido a que los contaminantes no permanecen en el medio físico (aire, suelo, agua) donde fueron emitidos y pueden desplazarse y afectar otros medios. El cálculo del indicador de toxicidad terrestre se obtiene a partir de la ecuación 8 (Bare et al, 2003).

$$\text{Toxicidad terrestre} = \sum_i^n PTT_i \times f_{i,z} \times m_i \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde;

PTT = Potencial de Toxicidad Terrestre del compuesto i

f_i = Fracción del compuesto i que se transporta hasta el medio z

m_i = masa del compuesto i

2.3.4. Fase 4

La fase 4 del ACV, se enfoca a la interpretación de todos los resultados obtenidos, cuantificando, verificando y evaluando la información resultante de las etapas precedentes, a fin de establecer las conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones en armonía

con el alcance y el objetivo definidos con el fin de encontrar mejoras al proceso (Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, 2008).

Dentro de esta fase de interpretación incluyen tres elementos fundamentales:

- ✚ Identificación de las variables significativas o procesos que conllevan un mayor impacto.
- ✚ Verificación de los resultados.
- ✚ Conclusiones y recomendaciones.

2.3.5. Informe final

En el informe se presenta todos los resultados, datos, métodos, y limitaciones de forma transparente y con el suficiente detalle para permitir la comprensión de las dificultades inherentes al estudio de ACV. El informe permite la utilización de los resultados e interpretación, de manera consistente con los objetivos del estudio.

2.3.6. Revisión crítica

La revisión crítica es un proceso para verificar si un ACV ha cumplido con los requisitos normativos en cuanto a la metodología, transparencia del informe, que los métodos usados en el ACV son científicamente y técnicamente válidos, si los datos obtenidos están en concordancia con objetivos planeados y si la interpretación refleja las limitaciones de los estudios. En este apartado se debe definir cuándo, cómo y quién realiza la revisión crítica.

2.3.7. Herramientas informáticas para el ACV

Debido a la gran cantidad de datos que hay que manejar para realizar un ACV, Aranda *et al.*, (2006) recomiendan disponer de una herramienta informática que permita afrontar de forma eficiente un estudio de un ACV. Actualmente existe un gran número de herramientas

informáticas en el mercado que permiten realizar estudios de ACV con distinto grado de detalle. A la hora de decidir qué herramienta adquirir, hay que considerar diversos criterios. Uno de los puntos clave es valorar el número de bases de datos que incorpora, su procedencia, calidad y extensión. En la Tabla 5, se presenta una recopilación de algunas de herramientas informáticas disponibles.

Tabla 5. Herramientas informáticas para estudios de ACV.

Programa	Compañía	País	Descripción general
Boustead	Boustead Consulting	Reino Unido	Herramienta muy completa indicada para realizar estudios de ACV dentro de la industria química, plásticos, acero, etc.
Eco-it	PRé Consultans	Países Bajos	Especialmente indicado para diseñadores de productos y envases.
Ecopro	Sinum AG.	Suiza	Permite la realización sencilla de ciclos de vida del producto.
Euklid	Fraunhofer-Institut	Alemania	Programa orientado a estudios de ACV de productos industriales.
Gabi	Universidad de Stuttgart	Alemania	Además de las posibilidades convencionales del ACV, este programa permite asociar costos a los flujos y realizar análisis económicos.
LCAit	Chalmers Industritenik	Suecia	Su aplicación principal es el sector de envases y productos de papel.
Miet	Universidad de Leiden	Países Bajos	Trabaja con MS Excel y se basa en datos ambientales de Estados Unidos. Es gratuito.
Simapro	PRé Consultans	Países Bajos	Permite realizar ACV completos con múltiples métodos de evaluación de impactos. Presenta completas y variadas bases de datos.
Team	Ecobilan	Francia	Herramienta muy completa, flexible y potente, aunque algo más compleja de utilizar. Permite introducir información relativa a costos.
Wisard	Pricewaterhouse Coopers	Francia	Indicado para el análisis del impacto económico y ambiental de Residuos Sólidos Urbanos.
Umberto	Ifeu-Intitud	Alemania	Ofrece datos de gran calidad y resultados transparentes.

Fuente: Adaptada de Aranda Usón et al., 2006.

Las herramientas informáticas presentadas en la Tabla 5, fueron desarrolladas en Europa debido al avance en investigaciones relacionadas al ACV que han llevado a cabo diversos países de este continente.

2.3.8. Base de datos para el ACV

Todas las herramientas informáticas que realizan ACV incorporan diversas bases de datos que utilizan dentro de la fase del ICV. Cabe destacar que en un estudio determinado se pueden utilizar datos procedentes de una única base de datos o combinar información de diversas bases de datos, en función de los requisitos de calidad de datos que se hayan definido estudiar (Aranda *et al.*, 2006). La Tabla 6, presenta diferentes bases de datos mundiales.

Tabla 6. Bases de datos utilizados en el Análisis del Inventario

Base de datos	País	Descripción general
BUWAL 250	Suiza	Incluye emisiones asociadas a la producción de energía y diversos procesos de producción de materiales, transporte y residuos.
ETH-ESU	Suiza	Abarca la producción e importación de combustibles, la producción y comercialización de electricidad, incluyendo las emisiones desde la extracción de energía primaria, el refinado, la extracción de recursos minerales, la producción de materias primas y materiales generales.
IDEMAT	Holanda	Está enfocada principalmente hacia la producción de materiales, englobando un total de 508 tipos de proceso.
INDUSTRY DATA	Internacional	Contiene datos recogidos y publicados por diversas asociaciones de industrias de carácter internacional, englobando 74 tipos de procesos.
FRANKLIN	Estados Unidos	Recopila información sobre materiales generales, transporte y energía, incluyendo un total de 78 tipos de procesos.
ECONVENT	Suiza	Contiene datos relacionados con la agricultura, alimentación, transporte, energía y los biocombustibles, biomateriales a granel y de la especialidad química, materiales de construcción, procesamiento de metales, tratamiento de residuos, una de las más completas bases de datos internacionales.

Fuente: Adaptada de Aranda Usón et al., 2006.

Las bases de datos presentadas en la Tabla 6, fueron desarrolladas para facilitar el desarrollo de ACV las cuales incluyen emisiones por la producción de energía, importación de combustibles, información de materiales, entre otras. Sin embargo, el uso de datos que no corresponden a valores reales aumenta el grado de incertidumbre de la investigación, por lo anterior entre más números reales sean utilizados, el ACV tendrá mayor confiabilidad.

2.4. Aplicación del ACV a las botellas de PET

Diversos estudios se han desarrollado para informar acerca de los impactos ambientales generados por las botellas de PET al final de su vida útil por medio de la aplicación del ACV con distintos objetivos. Estas investigaciones comparan tres o más alternativas de tratamiento y manejo de las botellas de PET, entre los que destacan los siguientes: *i)* comparación de los beneficios ambientales del aprovechamiento energético frente al reciclado mecánico (Perugini *et al.*, 2005), *ii)* comparación de tres rutas de reciclado químico por medio de botellas de PET como residuo (Sugiyama *et al.*, 2006), *iii)* evaluación de la eficiencia de reciclaje de las botellas de PET en comparación con los rellenos sanitarios y la incineración (Chilton *et al.*, 2010) y *iv)* evaluación de distintos caminos para la producción de fibra de PET con productos vírgenes y botellas recicladas (Shen *et al.*, 2010).

Igualmente Nakatani y Fujii (2010) compararon los escenarios de reciclaje nacional e internacional entre Japón y China, e Intini y Kuhtz (2011) evaluaron el perfil ecológico, ahorro de energía y los beneficios ambientales que presenta el reciclaje de botellas de PET para la producción de un aislante térmico.

En México, durante el año 2011 y 2012, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) desarrolló un ACV de las botellas de PET post consumo generadas a nivel nacional evaluando distintas categorías de impacto como la acidificación, eutrofización, cambio climático ,entre otras, Lo anterior, para que los municipios utilicen los resultados como herramienta de toma de decisiones en la optimización del sistema de manejo de los RSU. Los resultados de esta investigación aún no se han publicado, debido a que se encuentran en las revisiones finales por parte de especialistas en el tema (Encarnación Aguilar, 2013).

Estás investigaciones se han desarrollado con el fin de que los resultados obtenidos sean utilizados en la toma de decisiones para la selección de la mejor estrategia de manejo de las botellas de PET desde un punto de vista ambiental (Bovea e Ibáñez, 2010).

3. CASO DE ESTUDIO

Ecatepec de Morelos colinda con el Distrito Federal y los municipios Tlalnepantla, Nezahualcóyotl, Tecámac, Texcoco, es el municipio más poblado del país y pertenece a los 125 municipios que integran el Estado de México. En la Figura 16, se presenta el mapa geográfico del municipio.

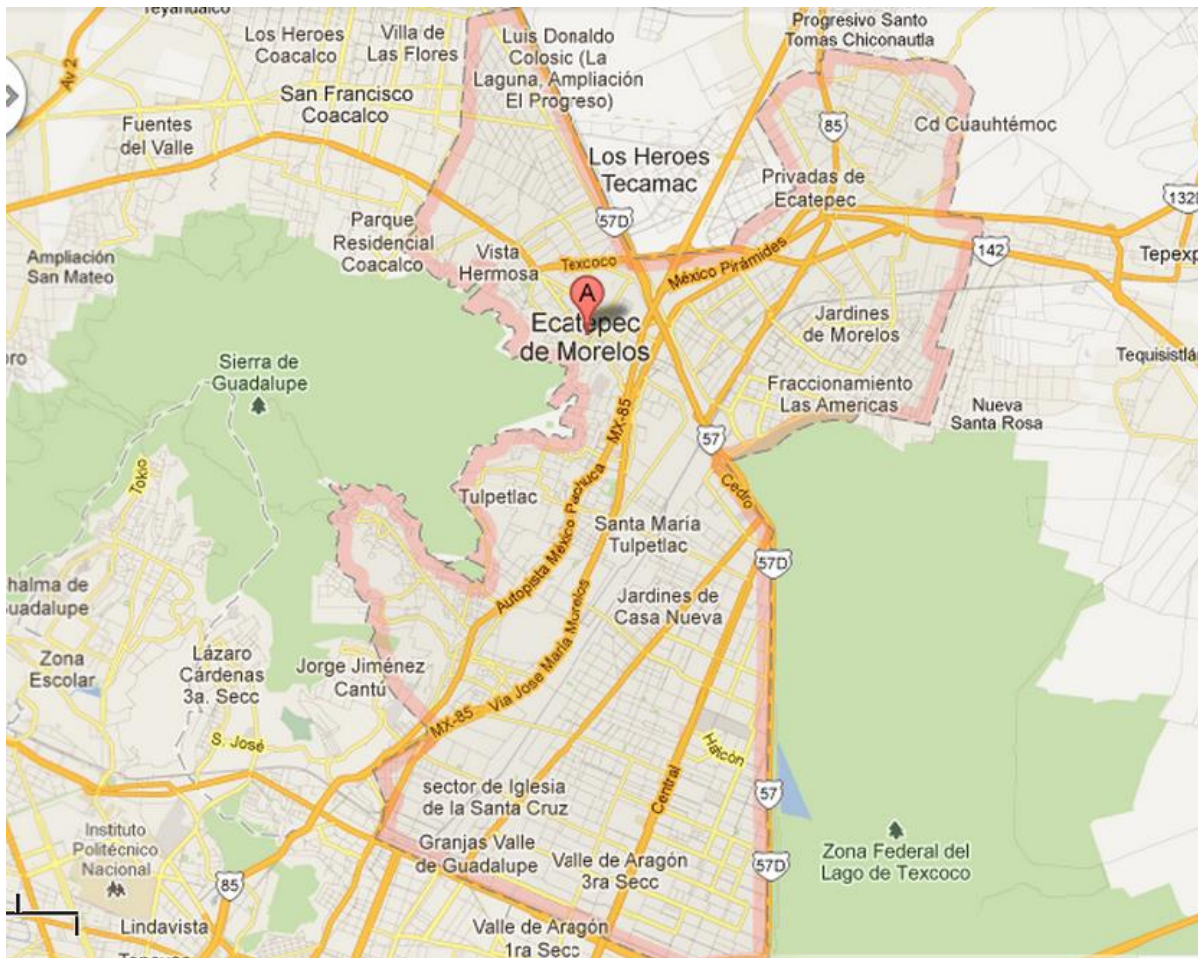


Figura 16. Ecatepec de Morelos. Fuente: <http://maps.google.com.mx/>

Ecatepec de Morelos, representa el 0.72% de la superficie total del Estado de México con 160.17 km². Cuenta con una población de 1,688,258 habitantes repartidos en 412,664 viviendas, presenta una densidad demográfica de 679 habitantes por kilómetro, una tasa anual de crecimiento de la población del 2.1% y una tasa promedio de mortalidad del 0.46% (INEGI, 2012).

Sólo el 57.74% de la población es derechohabiente a servicios de salud como el ISSSTE, el IMSS o el Seguro Popular. Ocupa el lugar 22 a nivel estatal y el 2,352 a nivel federal en marginación municipal. Su población tiene un nivel de estudio promedio de educación primaria y una generación per cápita de RSU de 1.54 kg/hab*día. (INEGI, 2012).

Tabla 7. Indicadores socioeconómicos y culturales de Ecatepec de Morelos.

Ecatepec de Morelos	Año 2010
Población total (habitantes)	1,656,107
% de población de 15 años o más analfabeta	2.7
% de población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela	3.63
% de población de 15 años y más con educación básica incompleta	31.45
% de población de 18 años y más con nivel profesional	11.54
% de población de 18 años y más con posgrado, 2010	0.44
% de población sin derecho a servicios de salud	42.26
% de viviendas particulares habitadas con piso de tierra	1.97
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de excusado o sanitario	0.77
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de agua entubada de la red pública	3.61
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de drenaje	0.32
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de energía eléctrica	0.11

Fuente: SEDESOL, 2012.

En la Tabla 7 se presentan algunos de los indicadores socioeconómicos y culturales de Ecatepec de Morelos resaltando que únicamente el 31% de la población mayor de 15 años no terminaron la primaria.

Entre las actividades económicas primarias que se desarrollan en Ecatepec de Morelos se encuentra la siembra de alfalfa, avena forrajera, frijol, maíz grano, producción de carne en canal de gallináceas y producción de leche de bovino. Las actividades secundarias se componen por producción de electricidad y las actividades terciarias corresponden al comercio en 33 tianguis, 134 mercados públicos y 1 central de abasto, comercios, restaurantes, transporte público, servicios de salud y de asistencia social, entre otros (INEGI, 2012).

Tabla 8. Uso del suelo en Ecatepec de Morelos.

Uso	km ²
Agricultura	25.13
Pastizal	14.63
Bosque	0.04
Matorral xerófilo	13.24
Otros tipos de vegetación	0.03
Vegetación secundaria	0.84
Área sin vegetación 9.33	9.33
Áreas urbanas	96.93

Fuente: INEGI, 2012.

Como se observa en la Tabla 8, casi el 97% del municipio corresponde a áreas urbanas, pese a lo anterior, diversas colonias carecen de los servicios básicos de drenaje, luz y agua potable afectando la calidad de vida de la población.

Debido a que el gobierno de Ecatepec de Morelos no tiene presupuesto necesario y ni el conocimiento para el desarrollo de un sistema de manejo eficiente de los RSU, el municipio presenta una cobertura de recolección del 30% atendiendo únicamente a 935 fuentes de generación (principalmente edificios gubernamentales y escuelas públicas), lo que deriva el aumento constante de tiraderos clandestinos en la vía pública y la incineración a cielo abierto, actividades que afectan a la salud de la población.

4. METODOLOGÍA

La metodología que se desarrollará se encuentra plasmada en la Figura 17 y se divide en tres etapas, las cuales se describen brevemente a continuación.

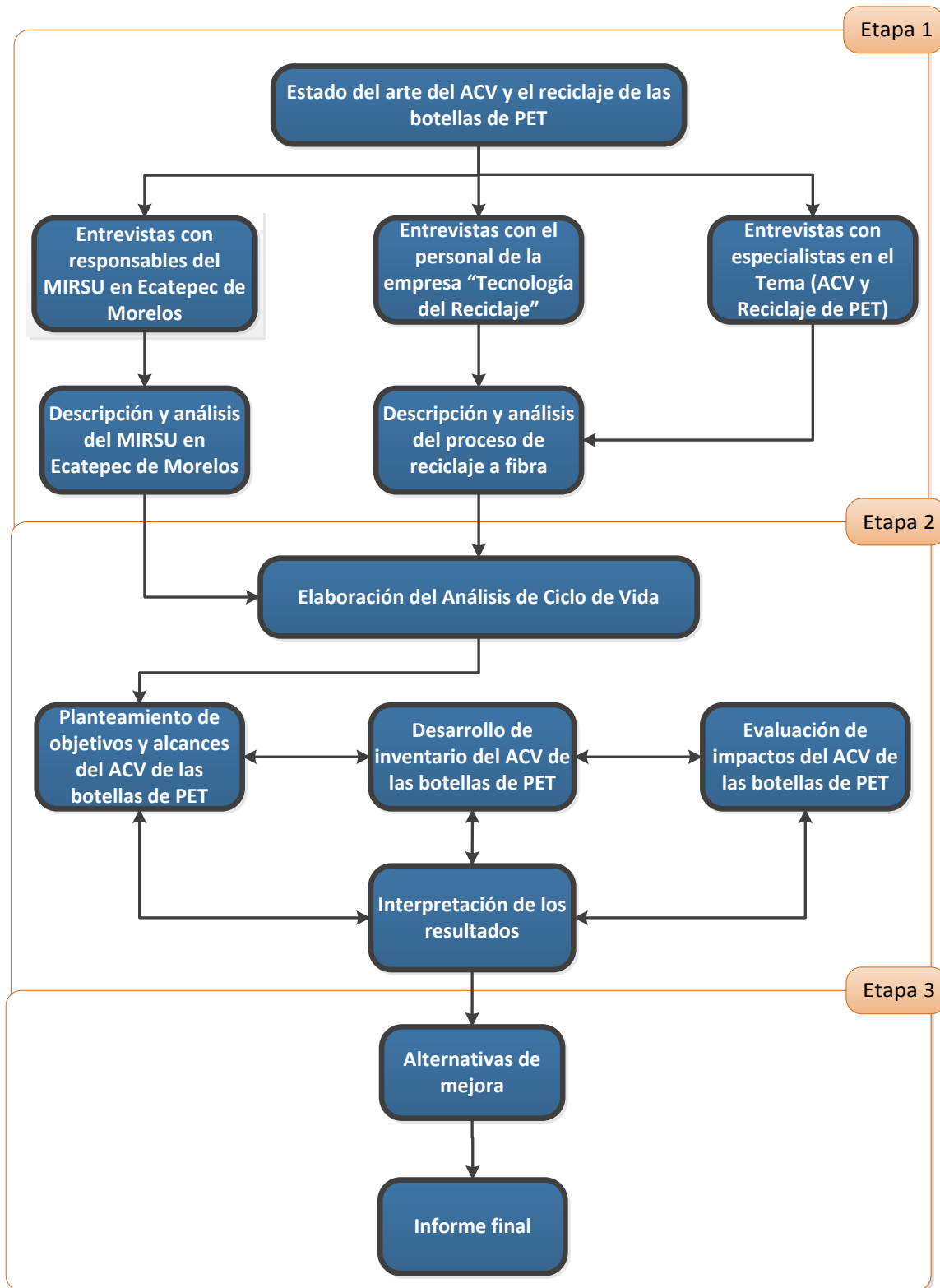


Figura 17. Diagrama de flujo de la Metodología.

Etapa 1

La primera etapa consistió en una revisión bibliográfica para desarrollar el estado del arte sobre el ACV y el reciclaje de las botellas de PET que se desarrolla a nivel nacional e internacional, y la elaboración del diagnóstico del manejo integral de los RSU y de las botellas de PET. Esto último, a través de visitas técnicas a la Secretaría de Servicios Públicos, Subdirección de confinamiento y disposición final ubicadas dentro del palacio municipal de Ecatepec de Morelos, visitas al relleno sanitario Chiconautla, encierro de vehículos de recolección, planta de separación y entrevistas con el personal encargado de estas actividades operadas por el municipio.

Además de visitas a organismos privados como la planta “Tecnología de Reciclaje” ubicada en el municipio de Tecámac la cual se encarga del reciclaje de las botellas a fibra de poliéster y la planta “ALCAMARE” ubicada en la carretera México-Lechería, responsable del almacenamiento temporal y exportación de las botellas y el desarrollo de entrevistas con los responsables de la operación de estas actividades.

Etapa 2

Se desarrolló un ACV de las botellas de PET que recolectan como RSU por el servicio de recolección de Ecatepec de Morelos. Lo anterior, para identificar y evaluar los impactos ambientales generados por las botellas de PET, y ofrecer fundamentos para el planteamiento de alternativas destinadas a la mejora continua del Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos dentro de este municipio.

El sistema de estudio integra las etapas de recolección, centros de acopio, exportación, reciclaje y disposición final particularizando a 935 fuentes de generación que corresponden a edificios gubernamentales, escuelas públicas (nivel básico, medio y superior), iglesias, mercados, parques, jardines, vía pública, vías primarias y secundarias ubicados dentro de la superficie de Ecatepec de Morelos, las botellas generadas en alguna otra fuente de generación no mencionada anteriormente (como las casas habitación) se encuentra fuera del






alcance de la investigación, y una población promedio atendida de 496,832 habitantes (Enríquez García, 2012).

Se tomó como base el MIRSU, reciclaje de botellas de PET y exportación actual efectuada por el gobierno municipal de Ecatepec de Morelos, Tecnología de Reciclaje S.A. de C.V. y ALCAMARE S.A de C.V. respectivamente, con sustento en informes y estadísticas presentados por parte de estos organismos durante el año 2011 y 2012.

Se consideraron sólo las botellas de PET recolectadas por el servicio público de limpia de Ecatepec de Morelos durante el año 2011, una generación per cápita de 6.4 kg de botellas de PET/hab*año y una unidad funcional de 2,862 toneladas de botellas de PET equivalente a 1.74% en peso del total de lo RSU generados y que también corresponde al 90% del total de las botellas de PET generadas dentro del municipio, el restante 10% no se consideraron para el desarrollo de la investigación debido a que el actual servicio de recolección presenta una cobertura de recolección del 90% sólo en las fuentes de generación antes mencionadas.

Para la evaluación de impactos se utilizó el software Sima Pro 7.3, el cual es un programa desarrollado por la empresa Holandesa PRé Consultants, que permite realizar ACV mediante el uso de bases de datos de inventario propias y bibliográficas (Ecoinvent, BUWAL, IDEMAT, ETH, IVAM).

SimaPro es una herramienta informática para almacenar, analizar y realizar un seguimiento del rendimiento ambiental de productos y/o servicios dentro de todo su ciclo de vida. Con esta herramienta se facilita el análisis y la representación gráfica de ciclos complejos de un modo sistemático y transparente. SimaPro permite elegir entre los siguientes métodos de evaluación de impacto (PRé, 2012):

-  CML 2 baseline 2000
-  Eco indicador 99
-  Ecological scarcity
-  EDIP 2003
-  EPD (2008)

- ✚ IMPACT 2002+
- ✚ TRACI, entre otros

Las categorías de impacto a evaluar empleadas por el software SimaPro se presentan en la Tabla 9. Estas categorías de impacto y el método de evaluación CML 2 baseline 2000, se seleccionaron con base en las revisiones bibliográficas para casos como Emma et al. (2012), Shen y Nieuwlaar (2011), Intini y Kuhtz (2011), Chilton et al. (2010), Rives y Rieradevall (2010), Shen et al. (2010), Cherubini y Bargili (2009), Bovea e Ibáñez (2010), Madival y Auras (2009) e Iriarte y Gabarrell (2009), en donde emplean las siguientes categorías de impacto y el método de evaluación mencionado.

Tabla 9. Categorías de impacto a evaluar.

Categoría	Abreviatura	Unidades en SimaPro
Agotamiento abiótico	AD	kg Sb eq
Acidificación	A	kg SO ₂ eq
Eutrofización	E	kg PO ₄ ³⁻ eq
Calentamiento global	GW	kg CO ₂ eq
Agotamiento de la capa de ozono	OLD	kg CFC ⁻¹¹ eq
Toxicidad humana	HT	kg 1,4-DB eq
Toxicidad terrestre	TE	kg 1,4-DB eq
Smog fotoquímico	PO	kg C ₂ H ₄ eq

Etapa 3

Esta etapa consistió en el desarrolló del informe final del ACV de las botellas de PET incluyendo todos los resultados obtenidos durante el trabajo, las alternativas de mejora orientadas a la elaboración de una mejor estrategia de manejo de las botellas de PET en Ecatepec de Morelos para lograr minimizar los impactos ambientales asociados a las mismas, las y las conclusiones correspondientes. Finalmente se llevó a cabo una revisión por parte de los especialistas en el tema.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con relación al estado del arte del ACV y del reciclaje de las botellas de PET, a nivel mundial se encuentran definidas, desde las últimas dos décadas del siglo XX, cuatro diferentes tecnologías de reciclaje de botellas de PET (reciclaje mecánico, secundario, químico y el aprovechamiento energético) con condiciones de operación y adecuaciones muy particulares dependiendo principalmente de la calidad del producto final y su uso posterior.

Hasta el 2011, en México solo se utiliza el reciclaje mecánico y el reciclaje químico para aprovechar las 283,000 toneladas de botellas de PET que son recuperadas anualmente a nivel nacional para producir principalmente, botellas para contener productos alimenticios y no alimenticios, flejes, fibra de poliéster y lámina.

El reciclaje mecánico es la tecnología de mayor uso en México y es empleado para procesar el 70% de las botellas de PET que son recuperadas a nivel nacional. Lo anterior, debido a que en comparación con el reciclaje químico y el aprovechamiento energético, el reciclaje mecánico requiere de una menor inversión económica. Sin embargo, el producto final de esta tecnología es una hojuela con una calidad que se limita a la producción de materiales que no estén en contacto con productos alimenticios.

El principal inconveniente del reciclaje químico son los altos costos asociados, los cuales se derivan de los costos de equipamiento y consumo de insumos que se requieren para alcanzar condiciones de operación de 300°C y presiones de 11 MPa. Su ventaja es que el producto final es una resina con calidad necesaria para producir botellas que contengan alimentos, en consecuencia ya no es necesario utilizar materia prima virgen para producir la misma botella. En México, el reciclaje químico es utilizado para procesar el 30% de las botellas de PET recuperadas a nivel nacional

Por otro lado, el ACV es usado a nivel mundial como insumo para evaluar el impacto ambiental asociado a un producto o servicio, y sus resultados se utilizan para fundamentar la selección de la mejor estrategia de diseño o rediseño, mejorar el uso de recursos y materiales; contribuyendo a la mejora continua y/o desarrollo de productos o servicios con la misma o mayor calidad pero generando menor cantidad de contaminantes al ambiente.

Para la elaboración del ACV es necesario contar con información real y precisa sobre la operación de cada etapa que integra el sistema de estudio, como también el uso de software (s) para agilizar la información relacionada con los flujos de entrada y salida del sistema y su evaluación ambiental, aunque no es indispensable, dado que las primeras y recientes investigaciones en tema de ACV han presentado resultados confiables a partir del uso de hojas de cálculo y uso de ecuaciones. La ventaja del uso del software es la rapidez para presentar resultados y su desventaja los altos costos de adquisición.

5.1. Análisis de Ciclo de Vida de las botellas de PET en Ecatepec de Morelos

5.1.1. Descripción general de las actuales operaciones de cada etapa del sistema de estudio

El sistema de estudio inicia con la generación de botellas de PET cuando éstas se convierten en RSU procedentes de las distintas fuentes de generación y finaliza cuando las botellas son: *i)* exportadas, *ii)* recicladas a fibra de poliéster o *iii)* dispuestas en el relleno sanitario. La producción de botellas (a partir del ácido tereftálico y etilenglicol) y el reciclaje realizado fuera del país se encuentran fuera del alcance de este estudio.

El sistema de estudio está compuesto por los procesos presentados en la Figura 18, posteriormente se describirá a detalle cada una de las etapas.

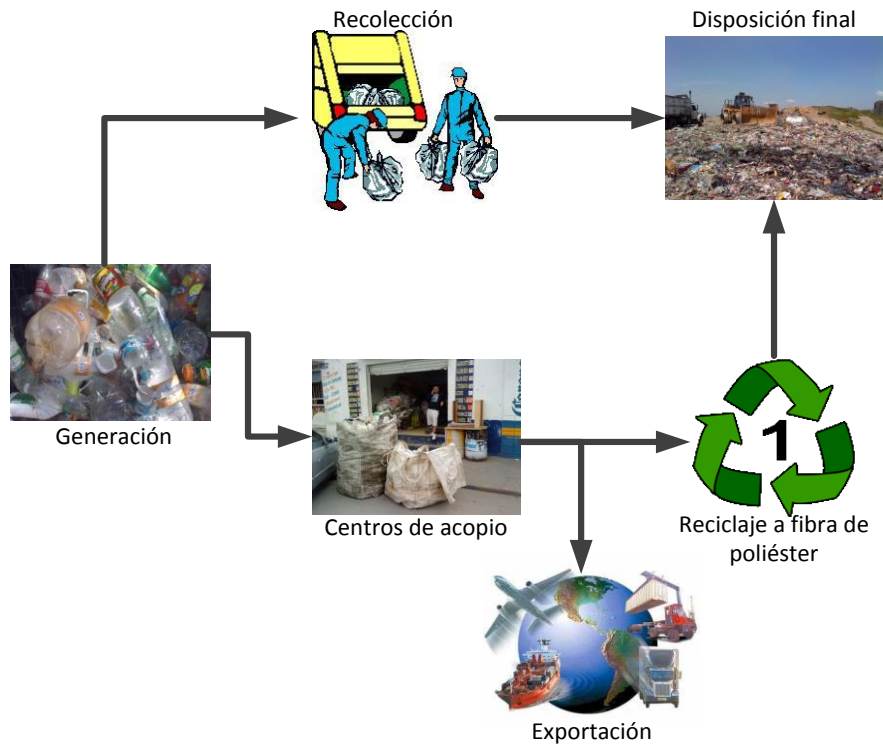


Figura 18. Sistema de Estudio. Fuente: Elaboración propia.

De las etapas que conforman el sistema de estudio presentado en la Figura 18 solamente las etapas de recolección y disposición final son operadas por el gobierno municipal de Ecatepec de Morelos. Las etapas de centros de acopio, exportación y reciclaje a fibra de poliéster son operados por organismos privados.

Generación

Durante el año 2011, en Ecatepec de Morelos se generaron 500 ton/día de RSU con 496,832 habitantes beneficiados por el servicio de recolección y disposición final (Enríquez García, 2012).

Recolección

La recolección de los RSU y en consecuencia de las botellas de PET (debido a que en Ecatepec no existe recolección diferenciada), se realiza por camiones recolectores propiedad del municipio en las 935 fuentes de generación antes mencionadas.

El servicio de recolección es gratuito para estos 935 sitios (la población atendida no paga por el servicio) y los trabajadores que laboran en él reciben un salario mensual, prestaciones, equipos auxiliares y de seguridad (uniforme, guantes, cubre bocas, calzado, pala, escoba, lentes, extintor, entre otros). Se les otorga estos equipos 3 veces por año (Enríquez García, 2012).

En Ecatepec de Morelos no existe recolección diferenciada, por lo tanto todos los RSU se encuentran mezclados y los trabajadores del servicio de recolección son los que se encargan de separar informalmente las botellas de PET y otros residuos valorizables como el cartón, papel, vidrio, y aluminio, para posteriormente venderlas en diferentes centros de acopio, siendo esta actividad un beneficio económico para ellos.

Las rutas de recolección realizadas se efectúan por decisión de los operadores de los vehículos recolectores. Los camiones recolectores operan de lunes a domingo en tres turnos que duran entre 8 y 10 horas. El método de recolección es “intradomiciliario” y “de acera”. La frecuencia de recolección es de 1 hasta 7 veces por semana, dependiendo a cada cuanto se solicite el servicio, de la generación y características de almacenamiento de los RSU de cada fuente de generación (Enríquez García, 2012).

Se cuenta con un parque vehicular de 36 unidades de diferentes características (con compactación, sin compactación, carga frontal, volteo, redilas) y una capacidad promedio de 16 toneladas con antigüedad máxima de entre 13 y 15 años, de los cuales el 50% operan diariamente y el restante alternadamente dependiendo del presupuesto que se les asigna para el consumo de combustible y mantenimiento (Enríquez García, 2012).

Los camiones utilizados para la recolección de los RSU generados se presentan en la Figura 19.

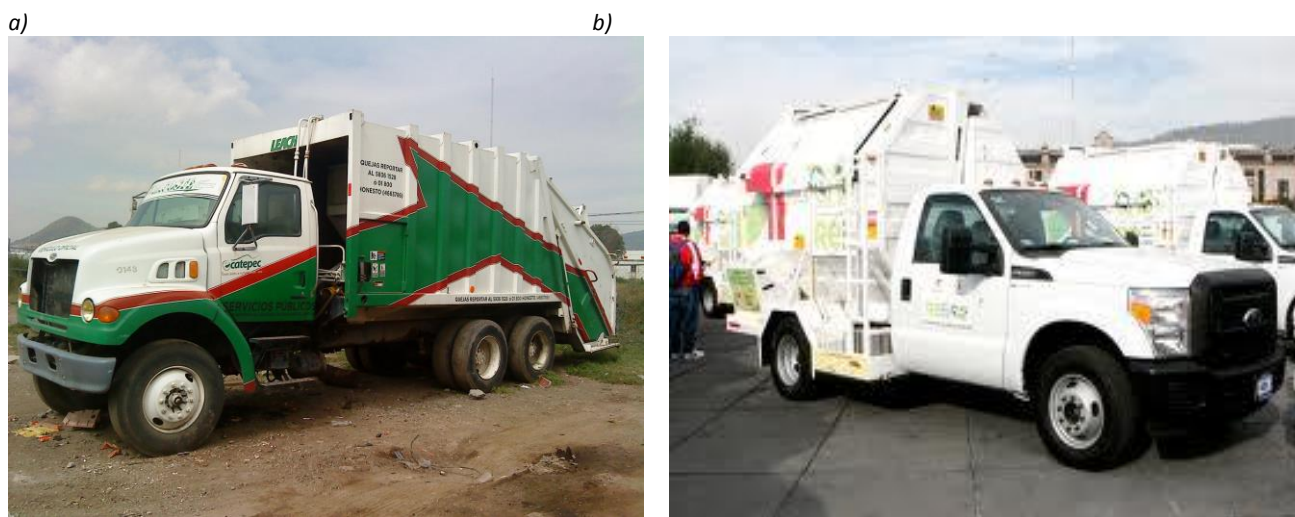


Figura 19. Camiones de recolección en Ecatepec de Morelos. a) con compactación, b) sin compactación. Fuente: Elaboración propia.

Los vehículos presentados en la Figura 19 son ejemplos de camiones que se utilizan en la recolección de los RSU en Ecatepec de Morelos, también se cuentan con otros tipos de vehículos como de volteo, camionetas y camión de redilas.

Centros de acopio

La Cámara de Comercio de Ecatepec de Morelos menciona que dentro de la superficie del municipio se encuentran ubicados alrededor de 600 centros de acopio de los cuales 100 están en regla con la Cámara de Comercio del municipio y 500 operan clandestinamente. En estos centros de acopio se compran y almacenan temporalmente las botellas de PET que son previamente separadas informalmente por el personal del servicio de recolección para posteriormente ser vendidas a empresas privadas (“AVANGARD” y “ALCAMARE”) que exportan las botellas principalmente a China o bien son trasladadas a la planta Tecnología de Reciclaje ubicada en el municipio de Tecámac, Estado de México, en donde son transformadas a fibra de poliéster.

Exportación

ALCAMARE S D R.L. D C.V. es una empresa que se encuentra ubicada en la Carretera Lechería-Texcoco km 46.5 Colonia El Carmen en Ecatepec de Morelos. Este organismo privado que se dedica a exportar las botellas de PET previamente trituradas y que a su vez son enviadas a Estados Unidos, Centroamérica, Europa y los principales mercados de Asia para ser transformados en nuevo productos.

Reciclaje a fibra de poliéster

La planta “Tecnología de Reciclaje” (TdR) es una empresa dedicada al reciclaje de las botellas de PET con una antigüedad de 9 años de operación. Operando los 365 días del año en cuatro turnos de 12 horas, dos turnos de lunes a jueves y dos turnos de jueves a domingo utilizando los días jueves para capacitar a su personal (Flores Cobián, 2012). Los productos que obtienen son hojuela, fibra de poliéster y geotextil.

El proceso de reciclaje de las botellas de PET para la producción de la fibra de poliéster está compuesto por 10 etapas, las cuales se enlistan (Flores Cobián, 2012):

- ✚ Recepción de botellas.
- ✚ Separación manual (separación de botella de color verde y transparente)
- ✚ Trituración de las botellas
- ✚ Lavado
- ✚ Centrifugación
- ✚ Control de calidad
- ✚ Extrusión
- ✚ Tren de rizado
- ✚ Compactación
- ✚ Almacenamiento
- ✚ Venta

El proceso de reciclaje a fibra de poliéster se presenta en la Figura 20, e inicia con la recepción de botellas en el interior de la planta y estas pueden llegar a granel o bien ya compactadas. La planta cuenta con una báscula que pesa los camiones una vez cuando entran y una vez después de descargar las botellas de PET transportadas, que por diferencia de pesos es como se conoce la cantidad de materia prima que ingresa por camión.

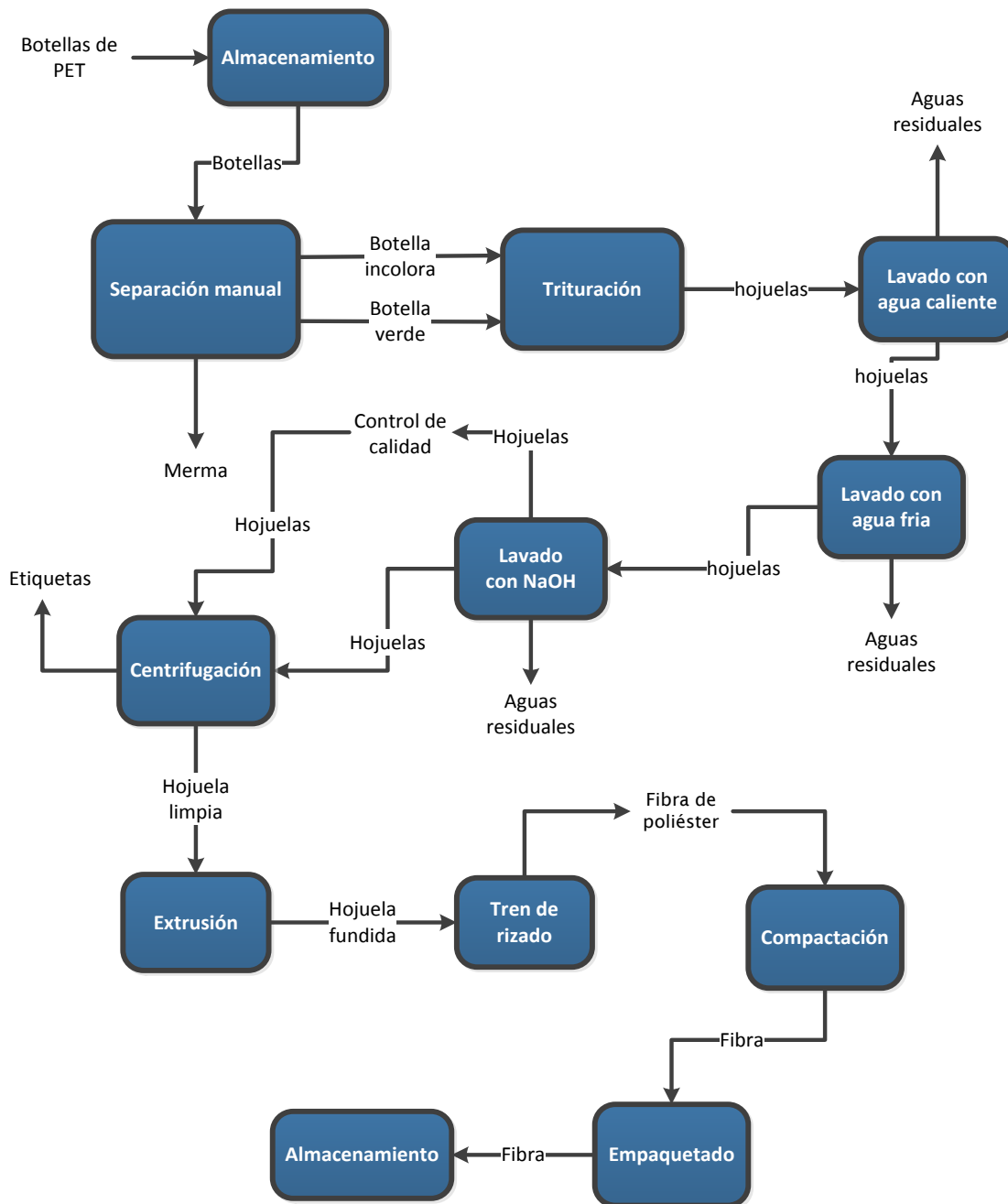


Figura 20. Proceso de reciclaje de las botellas de PET a fibra de poliéster. Fuente: Adaptada de Flores Cobián, 2012.

El proceso de reciclaje a fibra de poliéster presentado en la Figura 20 es independiente y puede o no coincidir con las tecnologías de reciclaje desarrolladas en otras partes del mundo. Primeramente las botellas son almacenadas en una superficie especial para esta actividad, en la cual algunos de los trabajadores van separando manualmente los materiales que no deben ingresar al proceso, como botellas de color azul, color durazno, metales, papel y otros plásticos.

El ingreso de las botellas a la trituración se realiza por medio de camiones y de bandas transportadoras para facilitar el movimiento de las botellas de PET. El ingreso de las botellas de PET a la trituradora se realiza por lotes, es decir, se procesan las botellas de PET de color verde y las incoloras por separado.

Una vez trituradas las botellas de PET, ya sea de color verde o las incoloras son transportadas al área de lavado, el cual consta de tres etapas: la primera consiste en un lavado con agua a temperatura de 80°C aproximadamente, la segunda etapa un lavado con agua a temperatura ambiente y una tercer etapa de lavado que se realiza con NaOH con una concentración de 1.8% en volumen como detergente. Para eliminar las etiquetas y tapas se emplea una centrifugación (Flores Cobián, 2012).

El producto final de la etapa anterior es la hojuela de PET “limpia”. Para verificarlo es llevada al área de control de calidad (muestras aleatorias) para realizar los análisis correspondientes y verificar que las hojuelas cumplan los requerimientos necesarios para la elaboración del proceso siguiente, de no ser así, son modificados los parámetros de operación de lavado como la temperatura y concentración de la NaOH.

Una vez que las hojuelas han pasado por la etapa de control de calidad son llevadas al extrusor donde son fundidas a una temperatura aproximada de 240°C. La disolución acuosa obtenida es conducida a unos filtros llamados “spreas”. Las spreas son filtros que dividen a la disolución en 700 filamentos, los cuales son enfriados con agua y aire. Con los 700 filamentos se forman tiras de “mechones” (ver Figura 21) que son almacenados temporalmente en contenedores (Flores Cobián, 2012).



Figura 21. Mechones

Si se desea que los “mechones” tengan color, se le agrega colorante durante la extrusión de la hojuela limpia, excepto cuando se desea que los mechones sean de color verde debido a que la hojuela de este color ya trae color en su composición.

Los mechones almacenados son introducidos a la siguiente etapa del proceso la cual es el tren de rizado. En esta etapa los mechones son introducidos por bandas transportadoras a un equipo en el cual se hidrata con vapor de agua para esponjar el material y hacerlo más estable. El producto final es la *fibra de poliéster* con o sin color. La fibra seguidamente es estirada y transportada por maquinaria automática al área de compactación, donde es compactada y almacenada para su posterior venta (Flores Cobián, 2012).

Disposición final

El relleno Sanitario Chiconautla se encuentra ubicado a un costado del reclusorio de Chiconautla en el municipio de Ecatepec de Morelos. Anteriormente operó como tiradero a cielo abierto hasta el año de 1999, posteriormente en los años 2000 al 2003, 17 de las 32 hectáreas que componen la superficie total del sitio fueron saneadas y para el año 2003 obtiene el título de relleno sanitario por parte de la SEMARNAT, cumpliendo con lo que estipula la normatividad vigente en el tema.

El Relleno Sanitario Chiconautla sólo acepta RSU generados por las 935 fuentes de generación y los RSU recolectados por los camiones recolectores municipales. Recibe un promedio de 450 y 500 toneladas de RSU mezclados por día (Medina Acosta, 2012).



Figura 22. Relleno Sanitario Chiconautla. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 22, se observa el ingreso de un vehículo compactador que se dirige a descargar los RSU en la superficie destinada para esta actividad. El método de operación empleado en el relleno sanitario es el de “celda diaria”, con dimensiones aproximadas de 6 metros de altura y 25 metros de ancho y largo. Alrededor de toda la superficie del relleno se encuentran 5 tubos de venteo donde es quemado el biogás generado, además se generan un promedio de 24,000 litros de lixiviados, los cuales son reinyectados al sitio ocasionando un almacenamiento diario del 25% en las tres lagunas con que se cuenta (Medina Acosta, 2012). Se tiene una balanza para tener registro de los RSU que ingresan al relleno sanitario.

5.1.2. Análisis del inventario del ACV de las botellas de PET

Como se mencionó anteriormente, el análisis del inventario consiste en la recopilación de todos los flujos de entrada y de salida de cada una de las etapas que conforman el sistema

de estudio. En la Figura 23, se plasma el sistema de estudio señalando los principales flujos de entrada y salida.

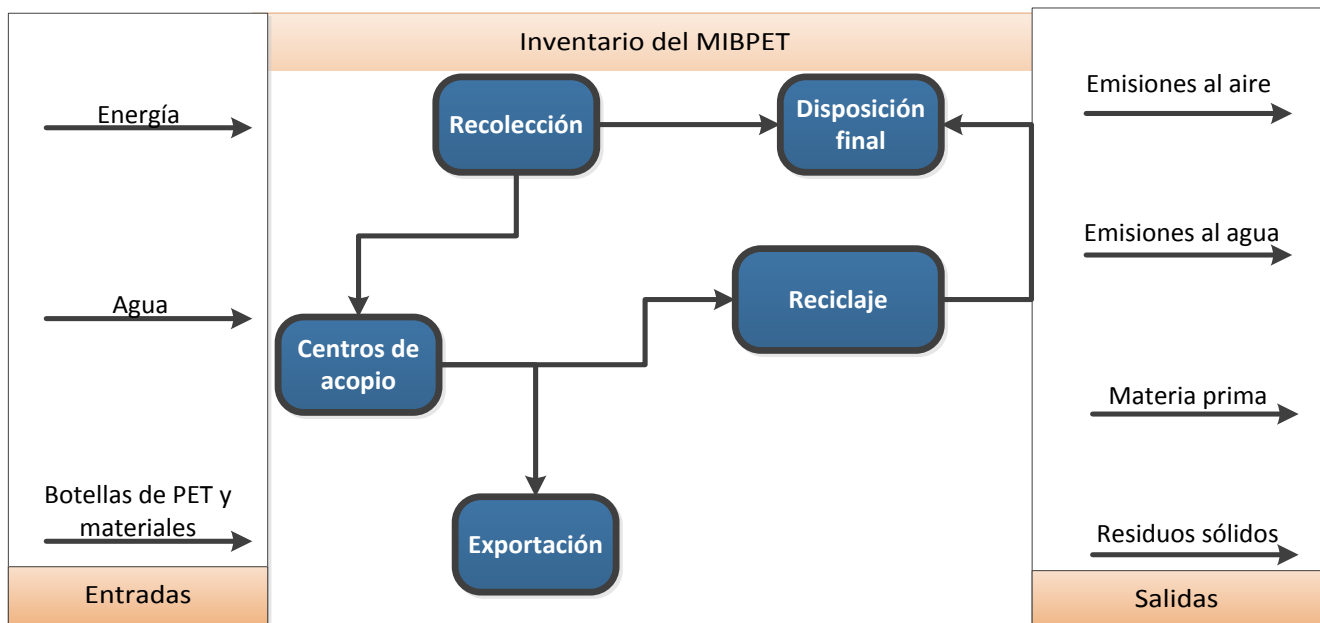


Figura 23. Diagrama del Inventario del ACV de las botellas de PET. Fuente: Elaboración propia.

En el presente apartado son cuantificadas por medio de hojas de cálculo las entradas y salidas que se muestran en la Figura 23 las cuales posteriormente ambos flujos serán ingresados manualmente a las herramientas informáticas para su evaluación ambiental.

Generación

En el año 2011 se generaron 3,180 toneladas de botellas de PET como residuo, lo que equivale al 1.74% en peso de las 182,500 toneladas de RSU generadas anualmente (García, 2012).

Recolección

El servicio de recolección tiene una eficiencia de recolección del 90% en los 935 sitios. Sin embargo, a nivel municipal tiene una eficiencia de recolección del 30% (Enríquez García, 2012). Por lo anterior, el servicio de recolección recolectó durante el año 2011 2,862 toneladas de botellas de PET, el restante 10% se encuentra en algún lugar dispuesto inadecuadamente.

De las 2,862 toneladas de botellas de PET que se recolectaron, el 39% se recuperó informalmente (el personal del servicio de recolección recuperó las botellas de PET antes de ingresarlas al camión recolector) y fueron trasladadas a la etapa de centros de acopio, el restante 61% fueron dispuestas en el relleno sanitario Chiconautla sin ningún tratamiento (García, 2012). La Figura 25, representa la distribución de las 3,180 toneladas de botellas de PET generadas en las etapas que integran el sistema de estudio dentro de Ecatepec de Morelos.

Las principales cargas ambientales asociadas con la recolección de las botellas de PET corresponden al transporte requerido el cual consume combustible diesel y a su vez produce emisiones al aire. La etapa de recolección inicia cuando las botellas de PET son recolectadas de las 935 fuentes de generación y termina cuando son dispuestas en el relleno sanitario, previamente antes de pasar por los centros de acopio.

Los camiones recolectores, como se mencionó anteriormente, recolectan los RSU mezclados y el requerimiento de combustible durante el año 2011 para el desarrollo de esta operación fue de 782,000 litros de diesel (Enríquez García, 2012). Para determinar el consumo de combustible empleado para recolectar únicamente las botellas de PET se usó el coeficiente de reparto en %peso.

Los coeficientes de reparto son el porcentaje que representa alguna de las propiedades físicas (masa y/o volumen) de un material en relación con el total de RSU. Estos coeficientes pueden ser en %peso, %volumen, densidad, entre otros. Dentro del mismo contexto, las botellas de PET representan el 1.74% en peso eso del total de los RSU recolectados en

Ecatepec de Morelos, en consecuencia el consumo de combustible para recolectar las 2,862 toneladas de botellas de PET fue de 13,606.8 litros de diesel.

Tabla 10. Flujos de entrada y salida en la recolección de las botellas.

Flujo	Cantidad	Unidades
Entradas		
botellas de PET	2862	ton/año
Diésel como combustible	13606.8	L/año
Salidas		
Botellas a los centros de acopio	1131.07	ton/año
Botellas a disposición final	1730.93	ton/año
Emisiones al aire	Ver ANEXO I	ton/año
Descargas al agua	Ver ANEXO I	ton/año

En la Tabla 10, se presentan los flujos de entrada y salida que presenta la recolección y que posteriormente serán evaluados ambientalmente por medio de SimaPro.

A partir de lo reportado en McDougald et al. (2002), y el consumo de combustible se desarrolló una hoja de cálculo la cual se presenta en el ANEXO I: EMISIONES AL AIRE Y DESCARGAS AL AGUA GENERADAS EN CADA ETAPA DEL SISTEMA DE ESTUDIO, lo anterior para determinar las emisiones generadas por el uso de combustibles (gasolina, diésel y gás natural). Cabe señalar que este procedimiento se realizó para los casos que requieren consumo de combustible.

Centros de acopio

Las botellas de PET son separadas informalmente de los demás RSU por los trabajadores del servicio de recolección antes de ser ingresados al camión compactador para su posterior venta a los casi 600 centros de acopio que se encuentran en Ecatepec de Morelos.

El parque vehicular que se utiliza para el traslado de las botellas de PET a los centros de acopio es el mismo que se usa en la recolección de los 935 sitios. Para transportar las botellas de PET de los centros de acopio a la etapa de exportación y/o reciclaje a fibra de poliéster generalmente se realiza en camiones de carga de forma a granel, en pacas y

costales dependiendo los requerimientos de los compradores y características de almacenamiento de los centros de acopio.

La Cámara de Comercio de Ecatepec de Morelos menciona que en el municipio existe un promedio de 600 centros de acopio de diferentes capacidades. La operación de la mayoría de estos centros es trasladar las botellas de PET almacenadas a otro centro de acopio de mayor capacidad, y este último centro de acopio traslada sus botellas de PET a otro de centro de acopio con mucho mayor capacidad (estas actividades se realizan tantas veces como sea necesario) hasta llegar a los dos centros de acopio que manejan el mayor flujo de botellas de PET en el municipio.

Mencionado lo anterior, en la Tabla 11, se presentan los centros de acopio que fueron utilizados como base para el desarrollo del inventario de esta etapa, los cuales son los centros de acopio de mayor capacidad y responsables de trasladar las botellas de PET a las etapas de exportación y/o reciclaje a fibra de poliéster con un flujo de entrada de 1,131.07 toneladas anuales de botellas de PET.

Tabla 11. Centros de acopio utilizados.

Centro de acopio	Ubicación
Alcamare	Carretera Lechería-Texcoco Km 46.5 Col. El Carmen
Carretera México Pachuca	Km 15 de la autopista México-Cuernavaca

De acuerdo al tipo de procesamiento de materia prima que emplean los centros de acopio mencionados en la Tabla 11, que pueden recibir botellas de PET a granel, compactadas, en pacas u hojuelas, se considera que el 39% de las botellas de PET que ingresan a la presente etapa son trituradas y posteriormente enviadas a la etapa de exportación (García, 2012)., el restante 61% consideran que las botellas de PET son trasladadas a granel a TdR para su reciclaje a fibra

La etapa que conforman los centros de acopio inicia cuando las botellas de PET ingresan a los mismos por la compra de las botellas y concluye cuando las botellas son dispuestas en el área de almacenamiento temporal de las empresas que transforman las botellas en diferentes productos y exportación de las mismas.

Para estimar el consumo de combustible (diesel) y energía eléctrica para transportar las botellas de PET a las diferentes instalaciones donde son transformadas en otros productos, se considera el promedio consumido por dos diferentes centros utilizando como apoyo las siguientes consideraciones:

a) ALCAMARE S. A. de C. V.

Ubicación: Carretera Lechería-Texcoco Km 46.5 Col. El Carmen.

Destino de las botellas: Exportación y Tecnología de Reciclaje

Ubicación: Los Héroes Tecámac, Estado de México

Medio de transporte: Camión de carga

Tabla 12. Parámetros (destino Tecnología de Reciclaje).

	Cantidad	Unidades
botellas de PET recuperadas en el centro de acopio	343.675	ton/año
Distancia viaje redondo entre el centro de acopio y TdR	9	km
botellas de PET transportadas a TdR	343.675	ton/año
Capacidad de los camiones transportadores	5	ton
Viajes	69	#/año
% de vehículos que utilizan diesel como combustible	100	%
Rendimiento de diesel en el camión	3.5	km/L
Distancia total recorrida	621	km/año
Diesel consumido	177.43	L/año

La Tabla 12, muestra los parámetros considerados para determinar el consumo de diesel que demanda el centro ALCAMARE para trasladar a granel 343.7 toneladas botellas de PET anualmente a la etapa de reciclaje a fibra.

Tabla 13. Parámetros (destino a exportación).

	Cantidad	Unidades
botellas de PET recuperadas en el centro de acopio	443.71	ton/año
botellas de PET trituradas	443.71	ton/año
Potencia de la trituradora	20	HP
Capacidad de operación de la trituradora	280	kg/h
Tiempo requerido para triturar 443.71 ton	1,227.41	horas
Energía requerida para triturar 443.71 ton	18,312.967	kWh/año

La Tabla 13, muestra los parámetros considerados para determinar el consumo de energía eléctrica que se demanda el centro ALCAMRE para triturar 443.71 toneladas de botellas de PET que posteriormente son exportadas como hojuelas sucias. Las hojuelas sucias es una mezcla de hojuelas de PET en combinación con tapas, etiquetas y otros residuos.

b) Carretera México-Pachuca km 15.
 Ubicación: Autopista México-Pachuca km. 15.
 Destino de las botellas: Tecnología de Reciclaje
 Ubicación: Los Héroes Tecámac
 Medio de transporte: Camión de carga

Tabla 14. Parámetros (destino a Tecnología de Reciclaje).

Parámetro	Cantidad	Unidades
botellas de PET recuperadas en el centro de acopio	343.675	ton/año
Distancia viaje redondo entre el centro de acopio y TdR	30	km
botellas de PET transportadas a TdR	343.675	ton/año
Capacidad de los camiones transportadores	5	ton
Viajes	69	#/año
% de vehículos que utilizan diesel como combustible	100	%
Rendimiento de diesel en el camión	3.5	km/L
Distancia total recorrida	2070	km/año
Diesel consumido	591.42	L/año

La Tabla 14, muestra los parámetros considerados para determinar el consumo de diesel que demanda el centro Carretera México-Pachuca para trasladar a granel 343.675 toneladas botellas de PET anualmente a la etapa de reciclaje a fibra.

El consumo de diesel se determina acorde al promedio de diesel empleado por los dos centros de acopio como se explica en la Tabla 15, a partir de los resultados obtenidos en la Tabla 12 y Tabla 14.

Tabla 15. Consumo promedio de combustible en centros de acopio.

Centro de acopio	Consumo de combustible (L/año)
ALCAMARE	177.43
MÉXICO-PACHUCA	591.42
Total	768.85
Promedio	384.425

Por lo mencionado en la Tabla 12, Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15, la etapa de centros de acopio presenta una aportación energética total de 18,313 kWh para triturar las botellas de PET y 384.4 litros de diésel como combustible usado para transportar las botellas a la siguiente etapa del sistema (exportación y/o reciclaje).

El cálculo de las emisiones por uso de energía eléctrica (kWh), se determinó a partir del “mix eléctrico generado en el país que menciona CFE (2012), que es derivado de distintas fuentes de generación (gas natural, diesel, carbón, eólicas, hidráulica, nuclear) y se presenta en la Figura 24.

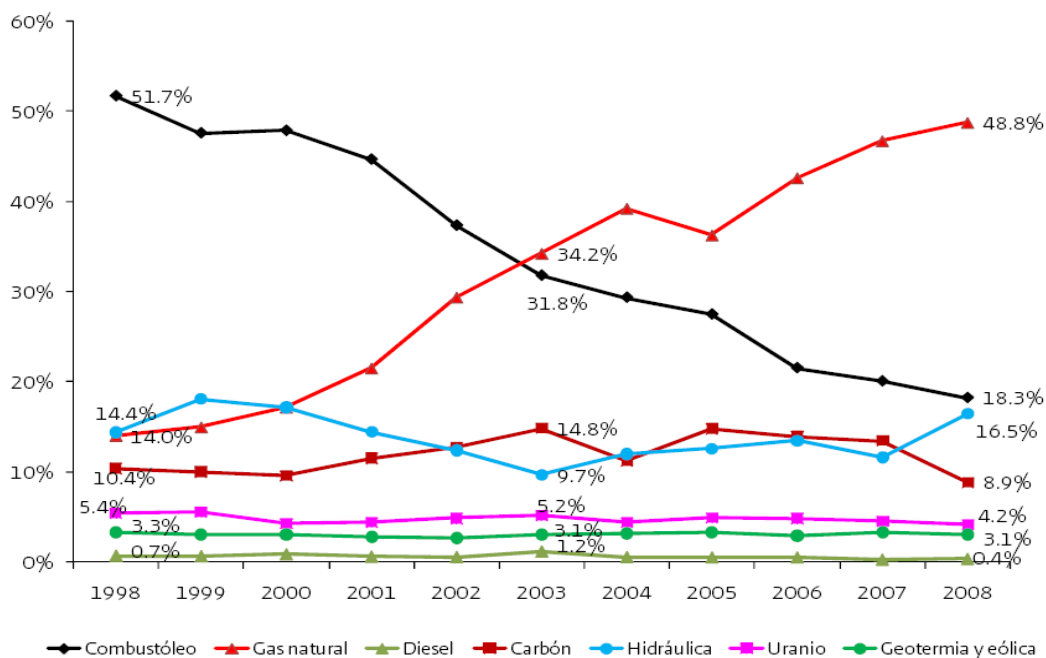


Figura 24. Porcentaje de producción de energía eléctrica a partir de diversas materias primas. Fuente: CFE, 2012.

A partir de lo reportado en McDougald et al. (2002), y los porcentajes de generación de energía eléctrica que se muestran en la Figura 24 se desarrolló una hoja de cálculo, la cual se presenta en el ANEXO I: EMISIONES AL AIRE Y DESCARGAS AL AGUA GENERADAS EN CADA ETAPA DEL SISTEMA DE ESTUDIO, para determinar las emisiones totales generadas por el uso de energía eléctrica. Cabe señalar que este procedimiento se realizó para los casos que requieren consumo de energía eléctrica (uso kWh). En la Tabla 16, se presentan los flujos de entrada y salida en la etapa de centros de acopio.

Tabla 16. Flujos de entrada y salida en los centros de acopio.

Flujo	Cantidad	Unidades
Entradas		
Botellas de PET	1131.07	ton/año
Diesel como combustible	384.425	L/año
Energía eléctrica	9156.483	kWh/año
Salidas		
Botellas a Exportación	443.73	ton/año
Botellas a Reciclaje	687.35	ton/año
Emisiones al aire	Ver ANEXO I	ton/año
Descargas al agua	Ver ANEXO I	ton/año

En la Tabla 16, se presentan los flujos de entrada y salida que presenta los centros de acopio y que posteriormente serán evaluados ambientalmente por medio de SimaPro.

Exportación

ALCAMARE S de R.L. de C.V. se encuentra ubicada en la Carretera Lechería-Texcoco km 46.5 Colonia El Carmen en Ecatepec de Morelos. Es una empresa que se dedica a exportar las botellas de PET como hojuelas sucias en mezcla con tapas y etiquetas a Estados Unidos, Centroamérica, Europa y los principales mercados de Asia para ser transformados en otros productos.

ALCAMARE tritura 443.73 toneladas de botellas de PET anualmente procedentes de Ecatepec de Morelos, obteniendo como producto hojuelas sucias que contienen PET, etiquetas y tapas. Esta mezcla de los tres plásticos es exportada a diferentes partes del mundo, por lo cual no se generan residuos que deban ser tratados. Para fines prácticos se considera que la exportación se divide en dos etapas, la primera es el transporte terrestre y la segunda el transporte marítimo.

El transporte terrestre se realiza por paquetería de carga pesada, utilizando trailers de carga con capacidad de 30 toneladas que utilizan diesel como combustible. El transporte marítimo se realiza en barcos que transportan contenedores que de igual forma utilizan diesel como combustible. Para el cálculo del consumo de combustible para el transporte marítimo y terrestre se consideraron 4 destinos los cuales se enuncian a continuación con sus respectivas características.

a) Caso 1

Punto de partida: ALCAMARE S. A. de C. V.
Medio de transporte a 1ª escala: camión de carga
1ª escala: Puerto de Veracruz
Distancia entre el punto de partida y 1ª escala (km): 428
2ª escala: Houston, Texas
Medio de transporte a 2ª escala: barco
Distancia entre 1ª escala y 2ª escala (km): 1179.63
Distancia total recorrida (km): 1607.63

b) Caso 2

Punto de partida: ALCAMARE S. A. de C. V.
Medio de transporte a 1ª escala: camión de carga
1ª escala: Puerto de Veracruz
Distancia entre el punto de partida y 1ª escala (km): 428
2ª escala: Balboa, Panamá
Medio de transporte a 2ª escala: barco
Distancia entre 1ª escala y 2ª escala (km): 2118.39
Distancia total recorrida (km): 2546.39

c) Caso 3

Punto de partida: ALCAMARE S. A. de C. V.
Medio de transporte a 1ª escala: camión de carga
1ª escala: Puerto de Veracruz
Distancia entre el punto de partida y 1ª escala (km): 428
2ª escala: Vigo, España
Medio de transporte a 2ª escala: barco
Distancia entre 1ª escala y 2ª escala (km): 9269.97
Distancia total recorrida (km): 9697.97

d) Caso 4

Punto de partida: ALCAMARE S. A. de C. V.
Medio de transporte a 1ª escala: camión de carga
1ª escala: Puerto de Manzanillo
Distancia entre el punto de partida y 1ª escala (km): 786
2ª escala: Shanghai, China
Medio de transporte a 2ª escala: barco
Distancia entre 1ª escala y 2ª escala (km): 12586.95
Distancia total recorrida (km): 13372.95

Por lo anterior se tiene una distancia promedio para el transporte terrestre de 517.5 km y para el transporte marítimo de 6,288.73 km. Estas distancias son utilizadas para la determinación del consumo de combustible a partir de los parámetros presentados en la Tabla 17 y Tabla 18.

Tabla 17. Parámetros para transporte terrestre.

	Cantidad	Unidades
botellas de PET transportadas al puerto de Veracruz y Manzanillo	443.71	ton/año
Distancia promedio entre el centro de acopio y los puertos	517.5	km
Capacidad de carga de los camiones transportadores	30	ton
Número de viajes	15	
Rendimiento de diesel en el camión (ALMEX, 2012)	1.5	km/L
Distancia total recorrida	15525	km/año
Diesel consumido	10350	L

Tabla 18. Parámetros para transporte marítimo.

	Cantidad	Unidades
Botellas de PET transportadas alrededor del mundo	443.71	ton/año
Coefficiente de reparto de las botellas de PET en el barco	0.228	% en peso
Número de viajes (El portal de los barcos, 2010)	1	#/año
Velocidad del barco (El portal de los barcos, 2010)	42.6	km/h
Potencia del barco (El portal de los barcos, 2010)	90,000	HP
Rendimiento de diesel del barco (El portal de los barcos, 2010)	250	ton/día
Distancia total recorrida	6,288.73	km/año
Tiempo de transporte	159.77	h
Consumo de diesel	2372.874	L/año

En consecuencia a partir de lo presenta en la Tabla 17 y Tabla 18 el consumo de combustible que demanda la exportación para trasladar las botellas de PET a diferentes partes del mundo corresponde a la suma del diesel consumido por el transporte terrestre y marítimo dando un total de 12,722.874 litros diesel anuales.

Tabla 19. Flujos de entrada y salida en la exportación.

Flujo	Cantidad	Unidades
Entradas		
botellas de PET	443.73	ton/año
Diesel como combustible	12722.847	Litros/año
Salidas		
Producción de nuevos productos	443.73	ton/año
Emisiones al aire	Ver ANEXO I	ton/año
Descargas al agua	Ver ANEXO I	ton/año

En la Tabla 19, se presentan los flujos de entrada y salida que presenta la exportación dentro del sistema de estudio y que posteriormente serán evaluados ambientalmente por medio de SimaPro.

Reciclaje a fibra de poliéster

El reciclaje de las botellas de PET a fibra de poliéster es llevado a cabo por la empresa TdR la cual recibió en el año 2011 687 toneladas de botellas de PET provenientes de los centros de acopio mencionados anteriormente y que equivalen al 6.3% del total que recibe por año TdR, de los cuales se lograron producir 481 toneladas de fibra de poliéster y se generaron 206 toneladas de residuos que corresponden a botellas que no cumplen con los requerimientos de calidad del proceso de reciclaje además de tapas y etiquetas, posteriormente son trasladados al relleno sanitario del Municipio Nicolás Romero en el Estado de México por vehículos propiedad de TdR.

El reciclaje de botellas de PET a fibra requiere de 3.4 toneladas de NaOH 1.8% en volumen y el uso de 992 filtros para extrusión. La energía consumida en la etapa de trituración fue de 206,140 kWh y en la etapa de producción de fibra de 445,709 kWh dando un total de 651,849 kWh en todo el proceso de reciclaje. El agua consumida por TdR en el año 2011 en la etapa de lavado fue de 859 m³ con una descarga de aguas residuales de 601 m³ y un consumo de gas natural como combustible de 7,143 m³ (Flores Cobián, 2012).

Cabe destacar que los 7,143 m³ de gas natural se calcularon de acuerdo a lo presentado a continuación, debido a que la planta TdR no proporcionó el dato exacto de consumo de gas natural por cuestiones de confidencialidad.

Datos:

$$T1 = 18^{\circ}\text{C}$$

$$T2 = 80^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = 62^{\circ}\text{C}$$

$$C_{p\text{H}_2\text{O}} = 4.18 \text{ J/g } ^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{C}_{\text{Gas Natural}}} (\text{SENER, 2012}) = 37.296 \text{ MJ/m}^3$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 858.918 \text{ m}^3$$

Considerando la densidad del agua 1 g/mL

$$\text{Masa}_{\text{H}_2\text{O}} = 858 \times 10^6 \text{ g}$$

$$\text{A partir de } Q = m \times C_p \times \Delta T$$

Por lo anterior, el calor requerido para incrementar la temperatura del agua a un ΔT de 62 grados centígrados corresponde a:

$$Q = 2.22 \times 10^{11} \text{ J} = 222,000 \text{ MJ}$$

Con el dato del poder calorífico del gas natural y el calor requerido es posible determinar el volumen necesario del mismo para calentar el agua.

$$V = \frac{Q}{P_{C_{gas \text{ nat}}}}$$

$$V = 5,952.39 \text{ m}^3$$

Considerando un factor de seguridad de 1.2;

$$V = 5,952.39 \text{ m}^3 \times 1.2$$

$$V = 7,142.868 \text{ m}^3$$

Las botellas de PET que no son útiles para el proceso de reciclaje son enviadas al relleno sanitario de Nicolás Romero, Estado de México el cual es operado por Biosistemas Sustentable, filial de TdR. Para determinar el consumo de combustible que se requiere para trasladar las botellas al relleno sanitario se consideran los parámetros presentados a continuación.

a) Diesel requerido para el transporte de las botellas a Nicolás Romero

Ubicación de destino: Los Héroes Tecámac

Medio de transporte: camión compactador

Destino de las botellas: Nicolás Romero

Tabla 20. Parámetros (traslado de botellas a Nicolás Romero)

	Cantidad	Unidades
Distancia viaje redondo entre el TdR y el relleno	78	km
botellas de PET transportadas al relleno sanitario	206.205	ton/año
Capacidad de los camiones transportadores	18	ton
Número de viajes	12	#/año
Rendimiento de diesel en el camión (Flores Cobián, 2012)	2.3	km/L
Distancia total recorrida	936	km/año
Diesel consumido por el transporte	407	L/año

Por lo presentado en la Tabla 20 se requieren 407 litros de diesel para transportar los rechazos que corresponden a botellas de PET que no cumplen la calidad para ser recicladas, tapas y etiquetas al relleno sanitario de Nicolás Romero.

Tabla 21. Flujos de entrada y salida en el reciclaje de las botellas.

Flujo	Cantidad	Unidades
Entradas		
botellas de PET	687.35	ton/año
Diésel como combustible	407	L/año
Energía eléctrica	651849.12	kWh/año
NaOH 1.8% en volumen	3.43	ton/año
Agua	858.918	m ³ /año
Gas natural	7142.85	m ³ /año
Salidas		
Fibra de poliéster	481.145	ton/año
Merma	206.205	ton/año
Aguas residuales	601.242	m ³ /año
Emisiones al aire	Ver ANEXO I	g/año
Descargas al agua	Ver ANEXO I	g/año

En la Tabla 21, se presentan los flujos de entrada y salida que presenta el reciclaje a fibra de poliéster y que posteriormente serán evaluados ambientalmente por medio de SimaPro.

Disposición final

Durante el año 2011 el relleno sanitario Chiconautla recibió 1,739.93 toneladas de botellas de PET provenientes de las 935 fuentes de generación y 206.205 toneladas de merma proveniente de TdR para su disposición final, lo que equivale al 1.18% del total de los RSU que ingresan al relleno sanitario.

El consumo anual de agua y combustible (diesel y gasolina) para la disposición final de las botellas fue de 1,507.47 L de agua, 5,276 L de diesel y 431 L de gasolina. También son requeridas anualmente 271.3 toneladas de tepetate como material de cobertura anualmente (Medina Acosta, 2012).

Medina Acosta (2012), menciona que para el año 2011 en el relleno sanitario Chiconautl se generaron 8,760 m³ de lixiviados, los cuales fueron captados y almacenado en las tres lagunas que tiene el relleno. Los 8,760 m³ de lixiviados fueron reinyectados nuevamente al relleno para acelerar la biodegradación de los RSU enterrados con ayuda de tres pipas propiedad del gobierno de Ecatepec de Morelos

De los lixiviados reinyectados el 75% queda mezclado con los RSU enterrados y aproximadamente 25% regresa a ser almacenado en las lagunas sin algún tratamiento fisicoquímico posterior.

Enríquez García (2012), menciona que en el relleno sanitario Chiconautla presenta una tasa de generación de biogás de 231.48 m³/ton de RSU dispuesta, los cuales al no tener un aprovechamiento, es decir captarlo y utilizarlo como combustible alternativo, sólo es quemado en los 5 pozos de venteo que tiene el relleno en toda su superficie. En la Tabla 22, se presentan los flujos de entrada y salida en la disposición final de las botellas.

Tabla 22. Flujos de entrada y salida en la disposición final de las botellas.

Flujo	Cantidad	Unidades
Entradas		
botellas de PET	1937.135	ton/año
Diesel como combustible	5276.075	L/año
Gasolina como combustible	430.7	kWh/año
Tepetate	271.34	ton/año
Agua	1.507	m ³ /año
Salidas		
Biogás	448643	m ³ /año
Lixiviados	25.842	m ³ /año
Emisiones al aire	Ver ANEXO I	ton/año
Descargas al agua	Ver ANEXO I	ton/año

En la Tabla 22, se presentan los flujos de entrada y salida que presenta la disposición final de las botellas de PET dentro del sistema de estudio y que posteriormente serán evaluados ambientalmente por medio del SimaPro 7.3.

En la Figura 25, se presenta el balance general de masa de las botellas de PET generadas en Ecatepec de Morelos considerando todas las etapas que componen el sistema de estudio.

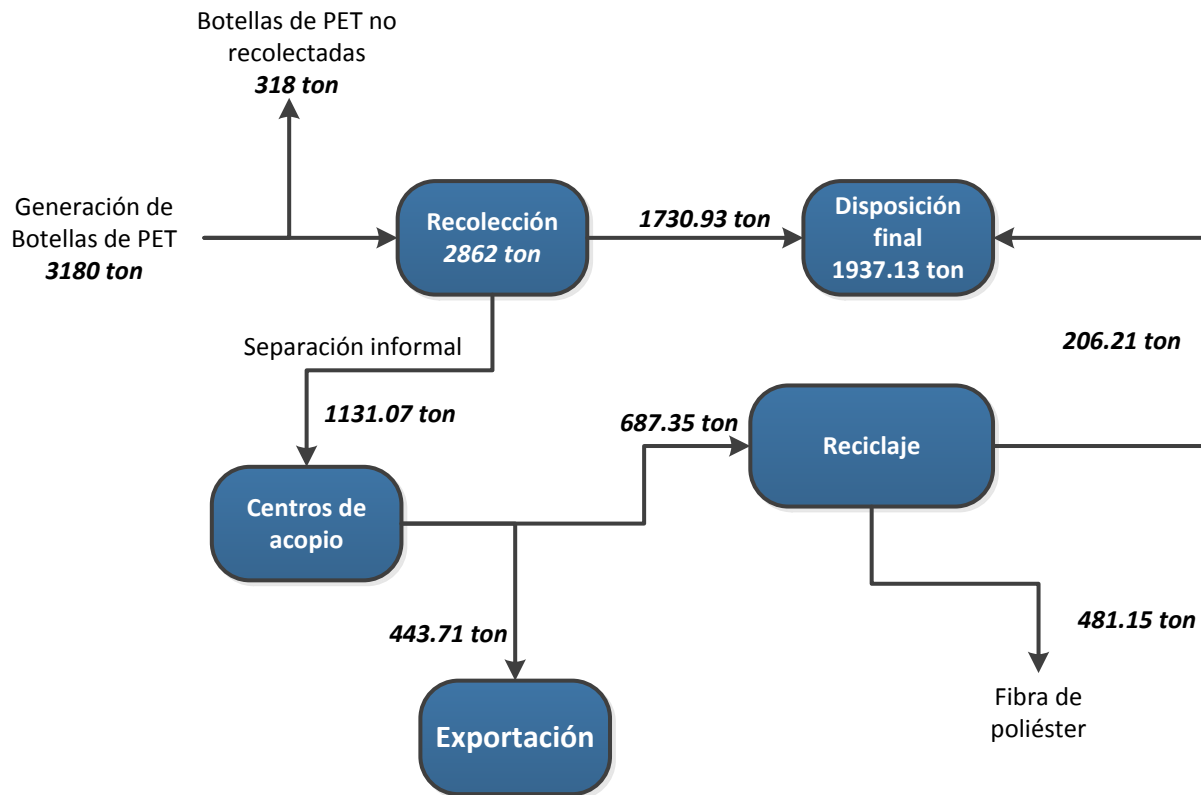


Figura 25. Balance de masa de las botellas de PET.

El balance de masa que se presenta en la Figura 25, es fundamental para realizar los cálculos necesarios y determinar los consumos de combustible y energía eléctrica requeridos por cada etapa del sistema de estudio.

Cabe destacar que en este apartado sólo se presentan las emisiones al aire y descargas al agua de mayor producción por el uso de combustibles y uso de kWh en cada etapa del sistema de estudio, sin embargo, en el ANEXO I: EMISIONES AL AIRE Y DESCARGAS AL AGUA GENERADAS EN CADA ETAPA DEL SISTEMA DE ESTUDIO, se enlistan todas las emisiones y descargas generadas en cada etapa del sistema.

Las principales emisiones al aire y descargas al agua generadas por el consumo de combustibles en cada una de las etapas del sistema se muestran la Tabla 23 y Tabla 24 en unidades de ton/año. Lo anterior fue obtenido con base en lo reportado por McDougall et al. (2002).

Tabla 23. Emisiones al aire al agua por el uso de combustibles.

Emisiones (ton/año)		Partículas	CO	CO ₂	CH ₄	NO _x	SO _x
Etapas	Recolección	0.0169	0.2252	41.0327	0.0499	0.7384	0.0618
	Centros de Acopio	0.0003	0.0042	0.7728	0.0009	0.0139	0.0012
	Exportación	0.0158	0.2105	38.3671	0.0467	0.6904	0.0578
	Reciclaje	0.0014	0.0137	17.5845	0.0476	0.0394	0.0111
	Disposición final	0.0071	0.0944	17.2093	0.0209	0.3097	0.0259

Tabla 24. Descargas al agua por el uso de combustibles.

Descargas (ton/año)		DBO	DQO	SS	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Metales pesados
Etapas	Recolección	5.62 x10 ⁻⁵	1.84 x10 ⁻³	3.57 x10 ⁻²	4.11 x10 ⁻⁴	1.62 x10 ⁻⁵	5.62 x10 ⁻⁵
	Centros de Acopio	1.06 x10 ⁻⁶	3.47 x10 ⁻⁵	6.72 x10 ⁻⁴	7.75 x10 ⁻⁶	3.06 x10 ⁻⁷	1.06 x10 ⁻⁶
	Exportación	5.26 x10 ⁻⁵	1.72 x10 ⁻³	3.33 x10 ⁻²	3.85 x10 ⁻⁴	1.52 x10 ⁻⁵	5.26 x10 ⁻⁵
	Reciclaje	2.47 x10 ⁻⁶	6.58 x10 ⁻⁵	9.14 x10 ⁻³	1.98 x10 ⁻⁵	1.52 x10 ⁻⁵	2.47 x10 ⁻⁶
	Disposición final	2.36 x10 ⁻⁵	7.72 x10 ⁻⁴	1.50 x10 ⁻²	1.73 x10 ⁻⁴	6.80 x10 ⁻⁶	2.36 x10 ⁻⁵

En la Tabla 23 y Tabla 24, es posible observar que el CO₂ es el compuesto de mayor magnitud emitido al aire y los Sólidos Suspendidos (SS) los descargados al agua.

Los emisiones de mayor producción al aire y descargas al agua generados por el consumo de energía eléctrica se esquematizan en la Tabla 25 y Tabla 26 en unidades de toneladas/año, fueron obtenidas con base en lo reportado por McDougall et al. (2002), solamente en las etapas de centros de acopio y reciclaje debido a que estas dos etapas son las únicas del sistema que requieren de energía eléctrica para realizar su operación.

Tabla 25. Emisiones al aire al agua por el uso de energía eléctrica.

Emisiones (ton/año)		Partículas	CO	CO ₂	CH ₄	NO _x	SO _x
Etapas	Centros de Acopio	0.0073	0.0033	12.5873	0.0290	0.0276	0.0073
	Reciclaje	0.2600	0.1180	448.0439	1.0318	0.9822	0.2600

Tabla 26. Descargas al agua por el uso de energía eléctrica.

Descargas (ton/año)		DBO	DQO	SS	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Metales pesados
Etapas	Centros de Acopio	4.02 x10 ⁻⁶	7.58 x10 ⁻⁵	6.13 x10 ⁻³	1.19 x10 ⁻⁴	1.94 x10 ⁻⁴	4.02 x10 ⁻⁶
	Reciclaje	1.43 x10 ⁻⁴	2.70 x10 ⁻³	2.18 x10 ⁻¹	4.22 x10 ⁻³	6.91 x10 ⁻³	1.43 x10 ⁻⁴

De igual forma en la Tabla 25 y Tabla 26 es posible observar que el CO₂ es el compuesto de mayor magnitud emitido al aire y los Sólidos Suspendidos (SS) descargados al agua.

5.1.3. Evaluación del impacto de las botellas de PET

En este apartado, a través de tablas y gráficos, se presentan los impactos ambientales generados por cada categoría evaluada y las contribuciones porcentuales de los procesos que conforman cada sistema.

En la Figura 26, se plasma el diagrama de flujo obtenido en el software SimaPro 7.3, el cual representa la situación actual del ciclo de vida de las botellas de PET que fueron recolectadas por el servicio público de limpia.

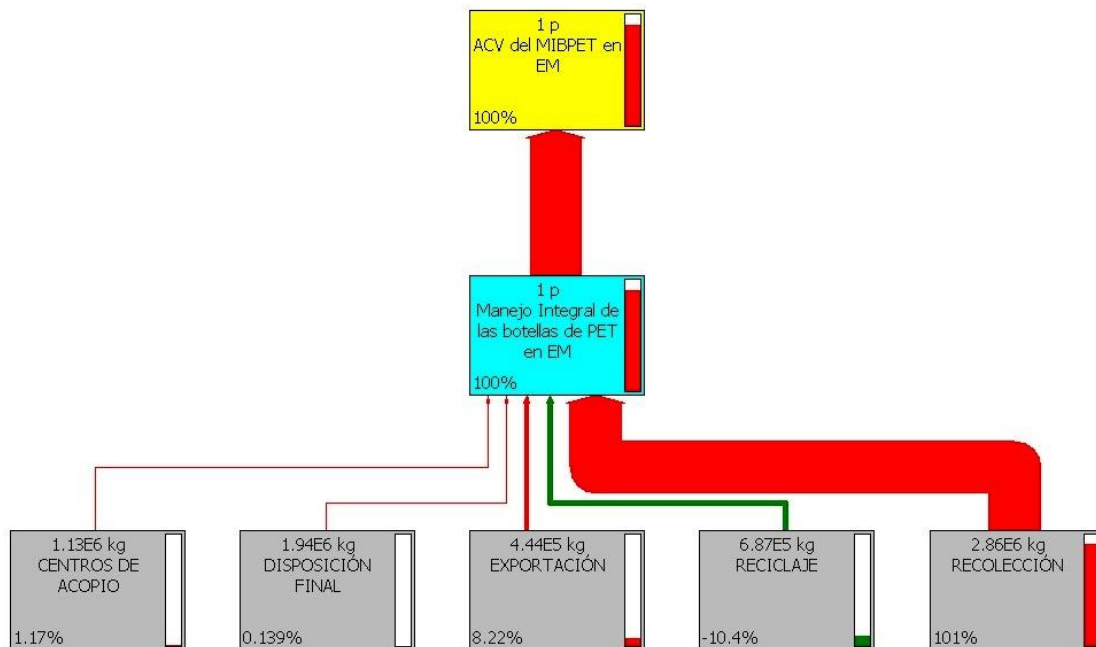


Figura 26. ACV del Manejo Integral de las botellas de PET.

El grosor de las flechas de la Figura 26, representan el impacto ambiental de cada una de las etapas, cabe mencionar que la etapa de reciclaje, se refiere al reciclaje de las botellas de PET a fibra de poliéster.

En la Tabla 27, se presentan los resultados generales del sistema de estudio, es decir, los kilogramos equivalentes (kg eq) asociados a las distintas categorías de impacto evaluadas para cada una de las etapas que integran el sistema de estudio.

Tabla 27. Impactos generados en cada etapa del sistema.

Categoría de impacto	Unidades	Recolección	Centros de acopio	Exportación	Reciclaje a fibra	Disposición final	Total
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	1.07×10^5	1.26×10^3	8.57×10^3	-1.54×10^4	111	1.32×10^5
Acidificación	kg SO ₂ eq	9.12×10^4	1.06×10^3	7.72×10^3	-5.22×10^3	178	1.05×10^5
Eutrofización	kg PO ₄ ³⁻ eq	1.63×10^4	190	1.42×10^3	-60	38.8	1.80×10^4
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	1.79×10^7	2.09×10^5	1.46×10^6	-1.08×10^6	1.73×10^4	2.07×10^7
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC ⁻¹¹ eq	0.000592	0.000478	4.72×10^{-5}	0.0342	6.42×10^{-5}	3.54×10^{-2}
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	1.41×10^{-7}	1.61×10^5	1.12×10^6	-181×10^6	2.31×10^4	1.82×10^8
Toxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	685	32.4	54.7	1.32×10^3	1.26	2.09×10^3
Smog fotoquímico	kg C ₂ H ₄ eq	3.98×10^3	46.2	319	-283	5.97	4.63×10^3

En la Figura 27, se plasma la contribución porcentual de igual forma en todas las etapas del sistema y todas categorías de impacto evaluadas. Esta determinación se realizó mediante la división entre la carga emitida por etapa y la carga total para cada categoría de impacto, datos que se presentan en la Tabla 27. Las siglas que se muestran en la Figura 27, Figura 28, Figura 29 y Figura 30 corresponden a las categorías de impacto mencionadas en la Tabla 9, de igual forma, para todos los gráficos se realizó el mismo procedimiento para determinar la contribución porcentual.

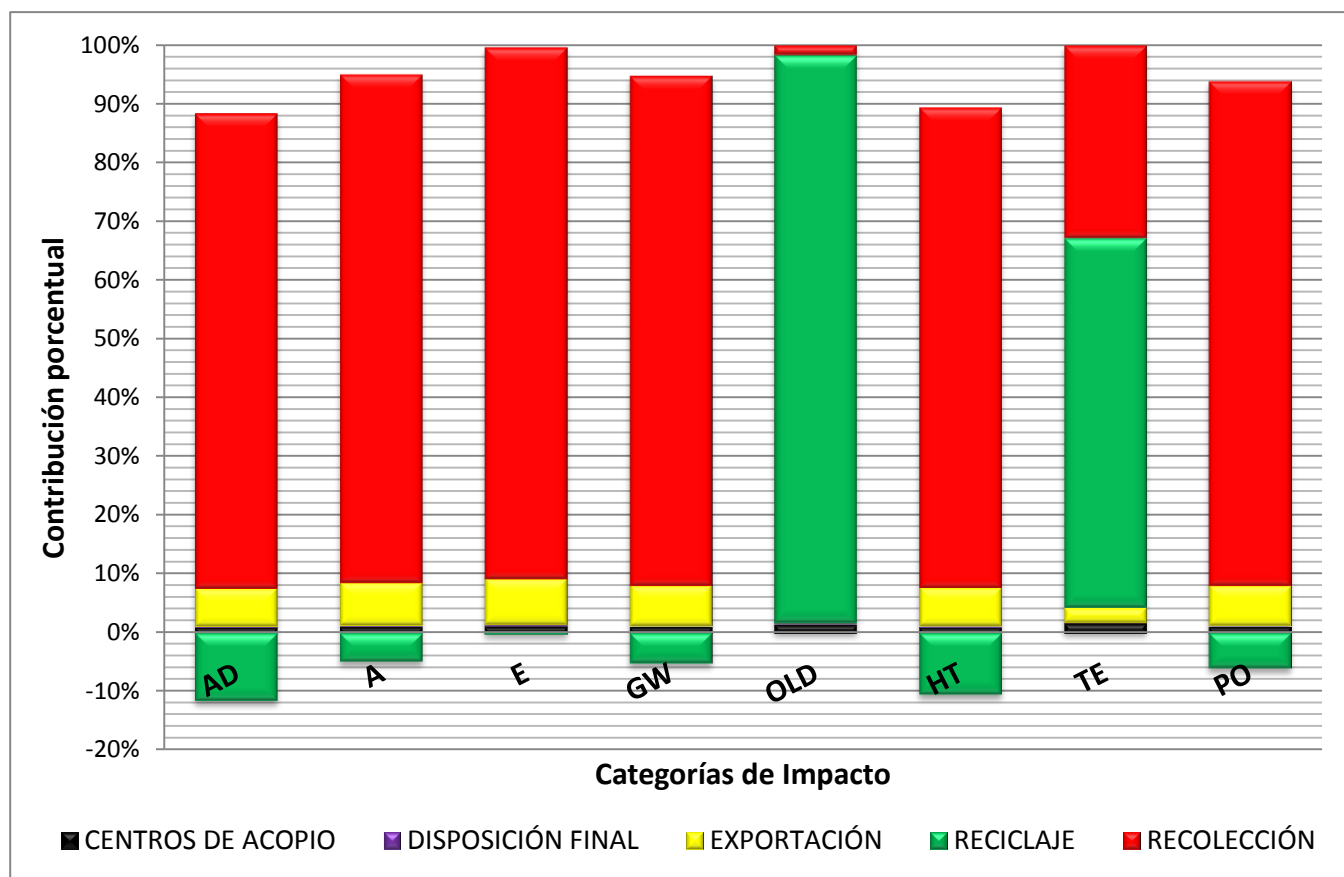


Figura 27. Contribución porcentual de cada etapa del sistema de manejo de las botellas de PET en Ecatepec de Morelos.

La Figura 27 muestra la contribución porcentual de cada etapa del sistema de estudio en las distintas categorías de impacto y en donde se observa que la recolección aporta entre el 80 y 90% de contribución en todas las categorías exceptuando toxicidad terrestre y agotamiento de la capa de ozono, categorías en donde la recolección aporta la segunda mayor carga del sistema de estudio con el 25 y 2% respectivamente.

Las emisiones generadas y emitidas al ambiente por acción de la recolección se asocian al transporte de las 2,862 toneladas de botellas de PET que son destinadas a las etapas de disposición final y centros de acopio. Lo anterior coincide con la investigación Iriarte y Gabarrell (2009), que mencionan que el transporte representa la mayor fuente de emisiones en la recolección de los RSU.

Los signos negativos en algunos de los valores que se observan en la Tabla 27 indican que la cantidad de kg eq mostrados son evitados, es decir no se producen ni son emitidos al ambiente, lo cual representa un beneficio ambiental.

El reciclaje de las botellas a fibra de poliéster, en las categorías agotamiento de la capa de ozono y toxicidad terrestre presenta la mayor carga del sistema con el 65% y 95% respectivamente. Sin embargo, anualmente logra evitar la generación de kg eq de Sb, SO₂, PO₄³⁻, CO₂, 1,4-DB y C₂H₄, emisiones asociadas a las seis categorías restantes. Lo anterior a pesar de ser la etapa que requiere la mayor cantidad de insumos para operar, en comparación con las demás etapas del sistema de manejo de las botellas.

En la Figura 28, se plasma las contribuciones porcentuales de cada proceso que componen la etapa de reciclaje a fibra de poliéster y donde es posible observar que la trituración junto con la extrusión representa la principal y mayor fuente de generación de emisiones al ambiente. Las emisiones se encuentran asociadas al consumo de energía eléctrica que utiliza el triturador y extrusor principalmente.

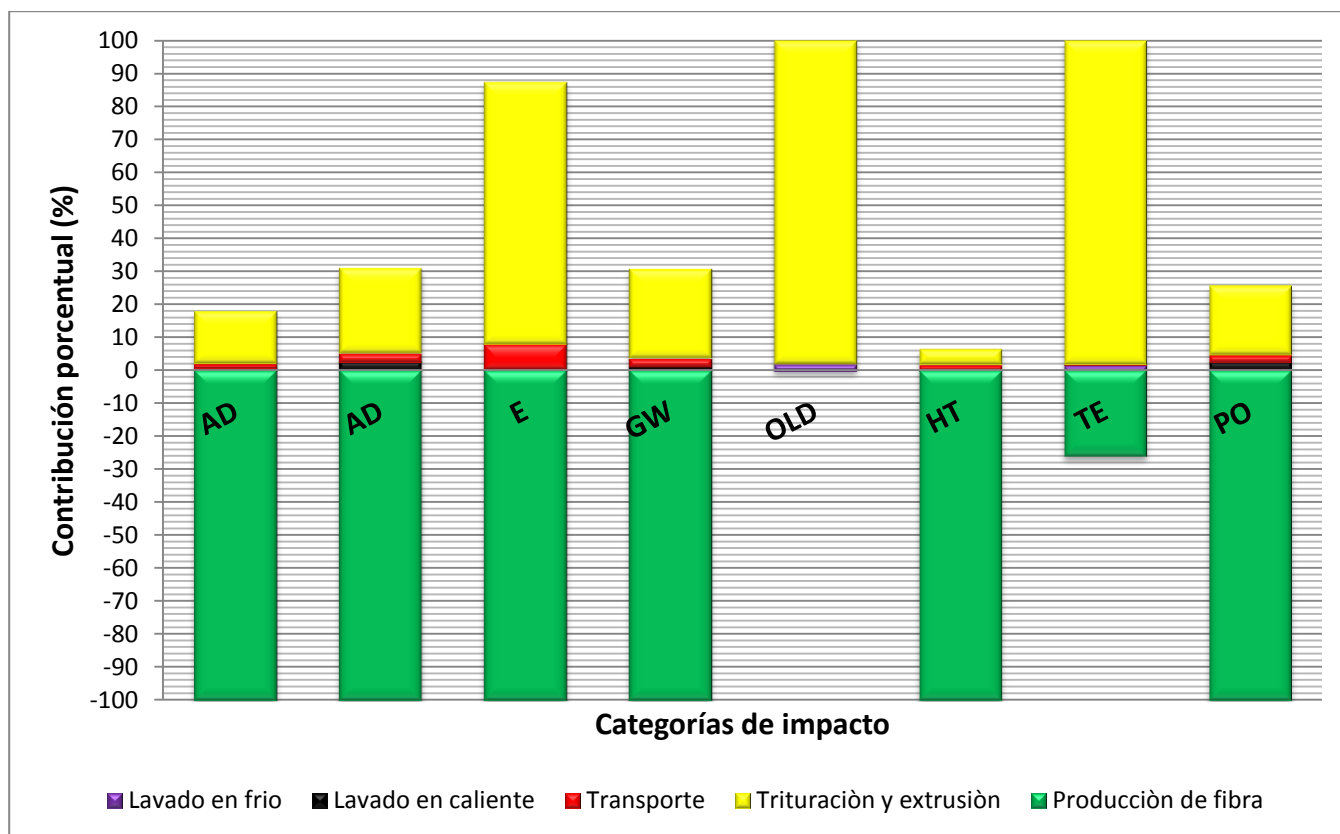


Figura 28. Contribución porcentual de cada operación proceso en el reciclaje de las botellas a fibra de poliéster.

De igual forma, se observa en la Tabla 28, que la trituración y extrusión son las operaciones responsables de producir anualmente 0.615 kg CO₂ eq y los 0.136 kg 1,4-DB eq en las categorías de calentamiento global y toxicidad humana, respectivamente. Lo anterior concuerda con lo reportado por Madival y Auras (2009) que mencionan que en el reciclaje, el consumo de energía eléctrica seguido del transporte son los principales aportadores de emisiones al ambiente.

Tabla 28. Impactos generados en cada proceso del reciclaje de las botellas.

Categoría de impacto	Unidades	Lavado en frío	Lavado en caliente	Trasporte	Trituración y extrusión	Producción de fibra	Total
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	3.79 x10 ⁻⁵	0.000215	0.000337	0.00436	-0.0273	0.0322499
Acidificación	kg SO ₂ eq	4.73 x10 ⁻⁵	0.00025	0.000286	0.00285	-0.011	0.0144333
Eutrofización	kg PO ₄ ³⁻ eq	1.36 x10 ⁻⁶	3.11 x10 ⁻⁶	5.12 x10 ⁻⁵	0.000553	-0.000696	0.0013047
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	0.00517	0.0248	0.0562	0.615	-2.27	2.97117
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC ⁻¹¹ eq	9.64 x10 ⁻¹⁰	1.26 x10 ⁻¹⁴	1.86 x10 ⁻¹²	4.88 x10 ⁻⁸	0.0	0.0000001
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	0.00124	0.00713	0.0442	0.136	-2.82	3.00857
Toxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	4.5 x10 ⁻⁵	4.94 x10 ⁻⁷	2.15 x10 ⁻⁶	0.00255	-0.00068	0.0032776
Smog fotoquímico	kg C ₂ H ₄ eq	3.31 x10 ⁻⁶	1.07 x10 ⁻⁵	1.25 x10 ⁻⁵	0.000117	-0.000554	0.0006975

Por otro lado, la producción de fibra de poliéster a partir de botellas de PET provenientes de los RSU, evita utilizar 481 toneladas de productos vírgenes (ácido tereftálico y etilenglicol, y el consumo de diferentes insumos) para la producción de la misma fibra de poliéster. Lo anterior evita la producción y emisión de 2.27 kg eq de CO₂ y 2.82 kg eq de 1,4-DB anualmente en las categorías de calentamiento global y toxicidad humana respectivamente, además de otras cargas en las distintas categorías de impactos.

La exportación, en todas las categorías de impacto presenta resultados similares. Es decir, en todas las categorías evaluadas la exportación participa con la tercer mayor carga de diversos compuestos, con hasta el 10% de la contribución total del sistema exceptuando la categoría de agotamiento de capa de ozono en donde la exportación corresponde a la cuarta mayor contribución con 4.72 kg eq de CFC-11 como se observa en la Tabla 27 y Figura 27 respectivamente. En la Tabla 29 y Figura 29 se presenta una comparación ambiental entre el transporte terrestre y marítimo, operaciones que componen la etapa de exportación.

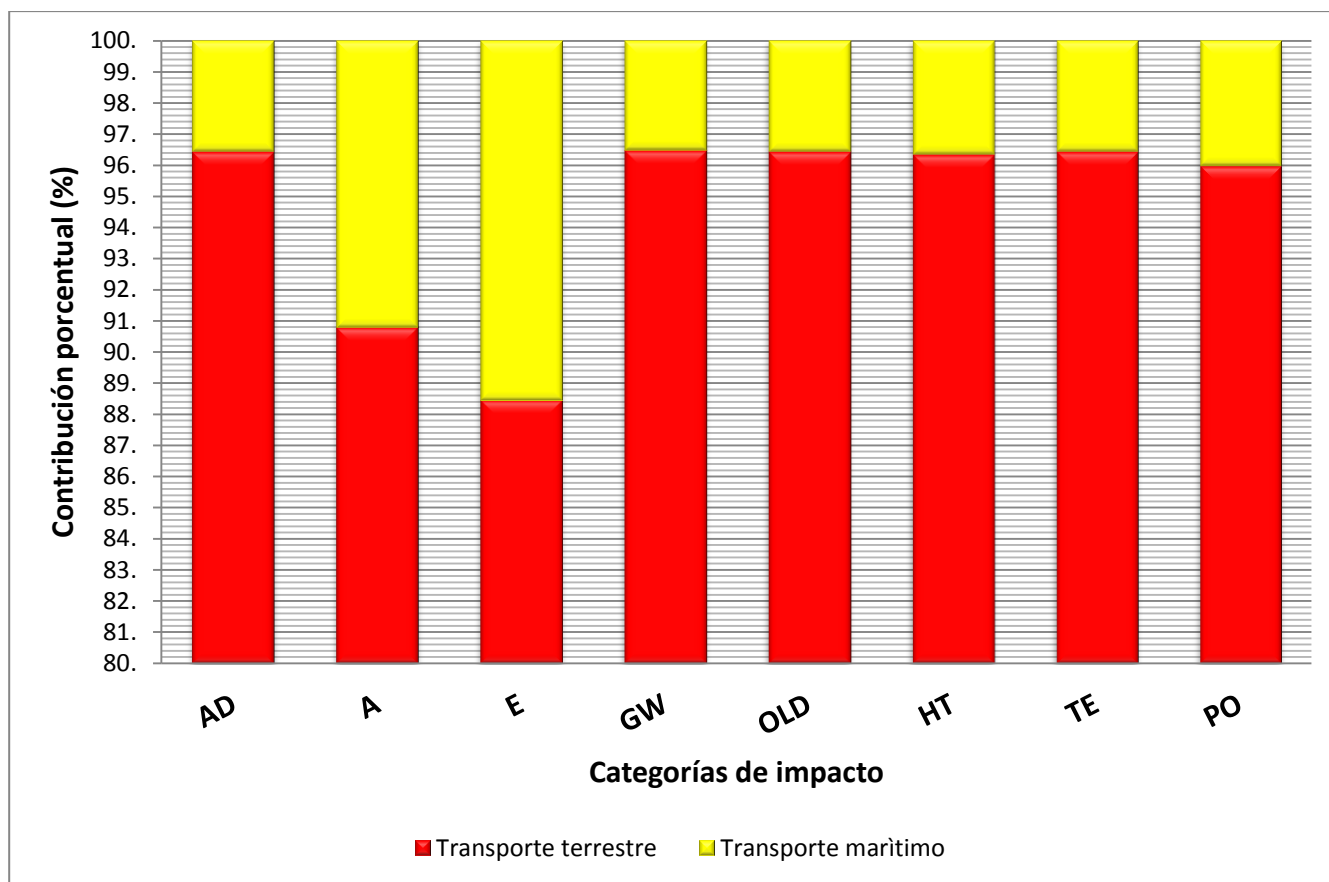


Figura 29. Contribución de cada operación en la exportación.

Los impactos generados en la exportación se encuentran asociados al consumo de combustible (diesel) empleado en el transporte terrestre y el transporte marítimo. Simapro, acorde a su metodología de cálculo y como se muestra en la Figura 29, el transporte terrestre aporta del 86 al 96% de contribución en todas las categorías de impactos en comparación con el transporte marítimo que aporta entre el 4 y 12%. La Tabla 29, muestra los kg eq generados por el transporte terrestre y marítimo dentro de la etapa de exportación en las categorías de impacto evaluadas.

Tabla 29. Impactos generados por el transporte en la exportación.

Categoría de impacto	Unidades	Transporte terrestre	Transporte marítimo	Total
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	0.0186	0.00069	0.01929
Acidificación	kg SO ₂ eq	0.0158	0.0016	0.0174
Eutrofización	kg PO ₄ ³⁻ eq	0.00283	0.00037	0.0032
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	3.11	0.114	3.224
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC ⁻¹¹ eq	1.03 x10 ⁻¹⁰	3.8 x10 ⁻¹²	0.000001
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	2.44	0.0929	2.5329
Toxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0.000119	4.4 x10 ⁻⁶	0.000123
Smog fotoquímico	kg C ₂ H ₄ eq	0.00069	2.9 x10 ⁻⁵	0.01929

Por otro lado los centros de acopio y la disposición final de las botellas de PET son las etapas del sistema que menor requerimiento y consumo de insumos presenta (en comparación con la recolección, exportación y reciclaje). Su comportamiento en la evaluación de impactos fue constante, en otras palabras, los centros de acopio y la disposición final corresponden a la cuarta y quinta mayor aportación de los distintos impactos ambientales evaluados con menos del 1% de contribución en todas las categorías, exceptuando la categoría agotamiento de la capa de ozono en donde los centros de acopio contribuyen con la tercer mayor carga con 0.000478 kg eq de CFC⁻¹¹, lo anterior se presenta en la Tabla 27.

Los impactos ambientales asociados a los centros de acopio se asocian a la operación de los trituradores que reducen el tamaño de partícula de las botellas y en consecuencia facilitan su transporte a las etapas de exportación y/o reciclaje. El transporte es una de las operaciones que conforman a los centros de acopio, el cual se encuentra asociado al consumo de combustible que se requiere para trasladar las botellas a las siguientes etapas del sistema de estudio.

En la Figura 30 y Tabla 30, son comparados los impactos generados por la trituración y el transporte de las botellas. SimaPro indica que el transporte representa más del 95% de la contribución en seis diferentes categorías de impacto, sin embargo en las categorías OLD y TE la trituración contribuye con el 76 y 99%, respectivamente.

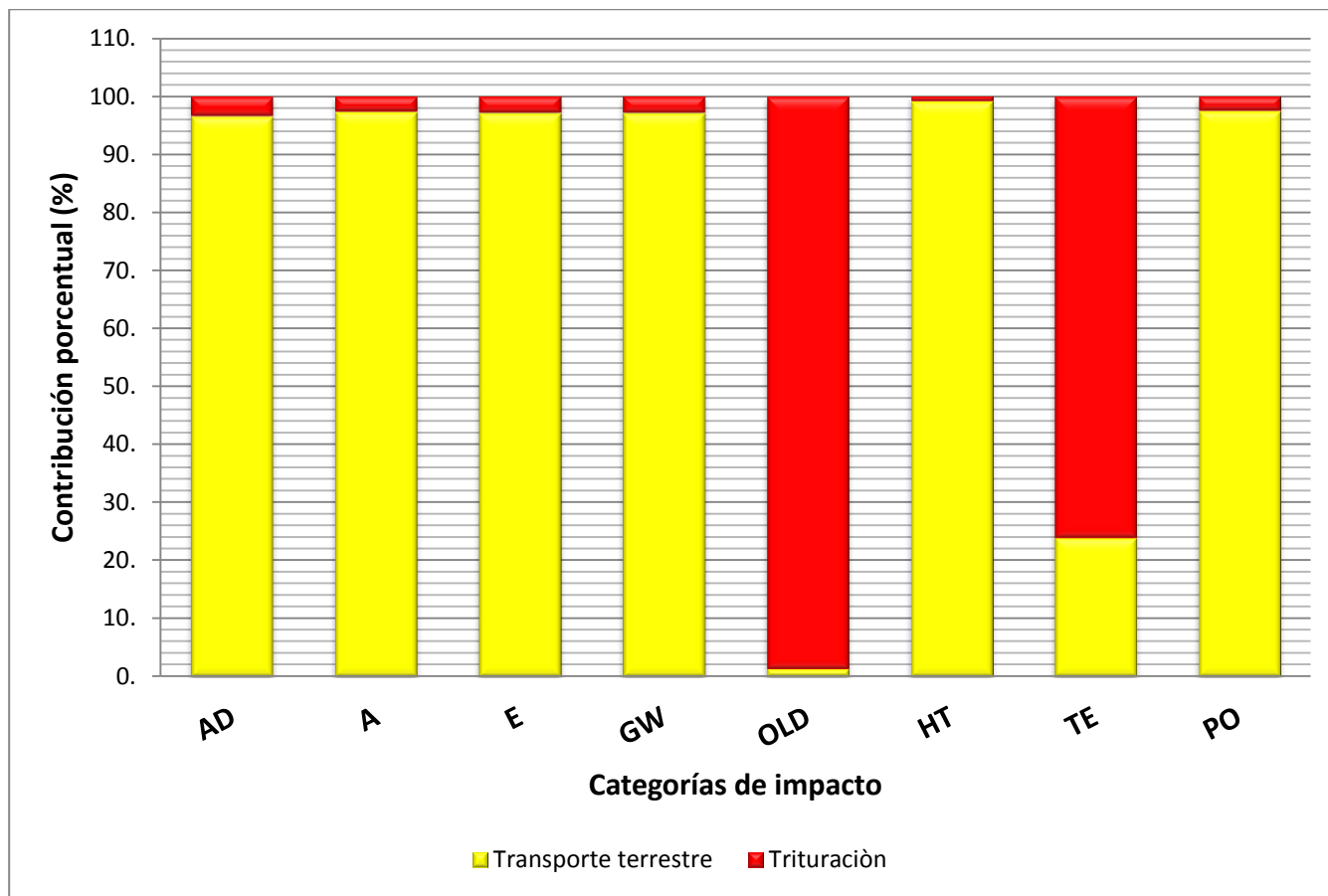


Figura 30. Contribución de cada operación en los centros de acopio.

La Figura 30, muestra la contribución porcentual del transporte terrestre y la trituración de las botellas en las categorías de impacto evaluadas. La Tabla 30, muestra los kg eq generados por el transporte terrestre y la trituración de las botellas de PET dentro de la etapa de centros de acopio.

Tabla 30. Impactos generados por los centros de acopio.

Categoría de impacto	Unidades	Transporte terrestre	Trituración	Total
Agotamiento abiótico	kg Sb eq	0.00108	3.72×10^{-5}	0.001117
Acidificación	kg SO ₂ eq	0.000913	2.44×10^{-5}	0.000937
Eutrofización	kg PO ₄ ³⁻ eq	0.000164	4.72×10^{-6}	0.000169
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	0.18	0.00525	0.18525
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC ⁻¹¹ eq	5.93×10^{-12}	4.16×10^{-10}	0.000001
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	0.141	0.00116	0.14216
Toxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	6.86×10^{-6}	2.17×10^{-5}	0.000029
Smog fotoquímico	kg C ₂ H ₄ eq	3.99×10^{-5}	9.98×10^{-7}	0.000041

La disposición final recibe anualmente en promedio 1,937 toneladas de botellas de PET, es la segunda etapa, seguido de la recolección, que maneja la mayor cantidad de botellas. Pese a lo anterior representa la quinta mayor aportación porcentual con menos del 1% en la todas las categorías de impacto.

5.1.4. Interpretación y discusión de resultados del ACV de las botellas de PET

El comportamiento de la etapa de recolección en la evaluación de impactos se deriva principalmente a los 13,606 litros de diesel que demanda anualmente. Actualmente en Ecatepec de Morelos las rutas de recolección son desarrolladas bajo criterio del chofer del vehículo recolector al igual que en diversos municipios del país (SEMARNAT, 2013). No existe un método, frecuencia y horario de recolección fijo, es decir, dependiendo de cuándo se solicite el servicio y de las características de la generación y almacenamiento de los RSU en las 935 fuentes de generación es como se asigna una frecuencia de recolección, la cual puede ser 1, ó 2, ó 3 ó hasta 7 veces por semana a alguna hora entre las 9 de la mañana y las 6 de la tarde.

El municipio no recolecta RSU provenientes de las casas habitación, sitios que deben ser prioridad acorde con lo establecido por el Gobierno Federal (2007). Recolecta unicamente a escuelas de nivel básico, medio y superior, edificios públicos completamente gratis, debido a que el gobierno no tiene el presupuesto necesario para recolectar a las casas habitación (Enríquez García, 2012)

En consecuencia, el gobierno municipal otorga concesiones a particulares los cuales son los responsables de recolectar los RSU provenientes de las casas habitación y demás fuentes de generación que no fueron consideradas para el desarrollo de la investigación. El principal efecto de las concesiones es que el servicio de recolección deja de ser un servicio público porque los particulares cobran los RSU recolectados. El costo por entregar RSU a los particulares varía entre los ocho y hasta treinta pesos dependiendo de la cantidad entregada. Si la población no cubre la cuota solicitada, el camión no acepta los RSU y éstos son depositados clandestinamente por la población en sitios inadecuados (principalmente en la vía pública) ocasionando tiraderos clandestinos y atracción de fauna nociva.

Los camiones concesionados no recolectan los RSU de los tiraderos clandestinos en la vía pública debido a que no es su obligación, por lo que los camiones municipales utilizan el combustible asignado para recolectar, además de las 935 fuentes de generación, los tiraderos clandestinos encontrados dentro de la superficie del municipio. Lo anterior ocasiona que exista un consumo de diesel extra para recolectar estos sitios.

También hay que destacar que los vehículos de recolección que operan en Ecatepec datan del año 2000 y no se les realiza la correspondiente verificación vehicular. Pese a lo anterior, los vehículos operan diariamente debido a que Enríquez García (2012) menciona que el presupuesto asignado para la recolección de RSU es muy limitado, por lo cual no es posible realizar mantenimiento ni correctivo ni preventivo o bien, la renovación del parque vehicular, además de un diseño eficiente de rutas de recolección.

El personal del servicio de recolección recupera anualmente mediante una separación informal 1,131.07 toneladas de botellas de PET que a su vez son enviadas a la etapa de exportación o reciclaje. El personal del servicio en vez de utilizar un tercero para trasladar las botellas a las etapas antes mencionadas, utilizan el mismo vehículo municipal, ocasionando que exista un consumo de combustible extra para esta actividad.

La recolección de los tiraderos clandestinos, el mal diseño de las rutas de recolección, el transporte de las botellas recuperadas mediante la separación informal y la falta del mantenimiento preventivo y correctivo tienen como consecuencia que la recolección

requiera de los 13,606 litros de diesel y sea la etapa del sistema que presente la mayor contribución en la mayoría de las categorías de impacto evaluadas. Caso similar a lo presentado por Kolmy et al. (2012) y Bovea e Ibáñez, (2010) quienes mencionan que la recolección, junto con el transporte de las botellas, en comparación con el reciclaje, la disposición final y el aprovechamiento energético, presenta la mayor contribución en todas las categorías de impacto evaluadas.

Para producir 481 toneladas de fibra de poliéster, anualmente se requiere de 687.35 toneladas de botellas de PET; 7,142 m³ de gas natural; 651,849.12 kWh de energía eléctrica; 3.43 toneladas de NaOH, 859 m³ de agua; 407 litros de diesel que, en comparación con las demás etapas del sistema, el reciclaje presenta el mayor consumo de insumos para desarrollar su operación.

Pese a lo anterior el reciclaje de las botellas de PET para producir fibra de poliéster ofrece una reducción de emisiones en comparación con la producción de la fibra a partir de material virgen, el cual logra evitar hasta un 12% de los impactos generados en seis de las ocho categorías de impacto evaluadas. Lo anterior coincide con las investigaciones de Shen et al. (2010), Chilton et al. (2010), Intini (2011) y Kolmy et al. (2012) que comparan la producción de fibra a partir del reciclaje de las botellas de PET que fueron recolectadas como RSU y la producción de fibra a partir de productos vírgenes, y que mencionan que el reciclaje de las botellas reduce los impactos generados en las categorías de smog fotoquímico, uso de combustibles fósiles y cambio climático.

La exportación dentro del sistema de estudio, sólo considera el transporte de las botellas de PET a Estados Unidos, China, Panamá y España. El reciclaje de las botellas para producir nuevos productos en los países antes mencionados se encuentra fuera del alcance del estudio. No obstante lo anterior, conviene mencionar que Nakatani y Fujii (2010) señalan que el reciclaje nacional, en comparación con el reciclaje hecho en otros países reduce los impactos ambientales ocasionados por el transporte terrestre y marítimo empleado en la exportación de las botellas de PET.

En otras palabras, si las 443.73 toneladas de botellas que se exportan anualmente se reciclaran en TdR o cualquier otra empresa dentro del territorio nacional, se ahorrarían los 12,723 litros de diesel que demanda esta etapa y en consecuencia la exportación no presentaría ninguna aportación en el impacto ambiental del sistema de estudio.

La disposición final de las botellas de PET en el relleno sanitario Chiconautla genera contribuciones en todas las categorías de impacto, aunque no son significativas en comparación con las demás etapas del sistema. Sin embargo, las emisiones se encuentran asociadas a la generación de lixiviados (los cuales pueden filtrarse al suelo y contaminar los acuíferos), generación de biogás, uso de suelo y consumo de combustible (diesel y gasolina) que se requiere para operar el equipamiento para elaborar la celda diaria en el relleno sanitario (McDougall *et al.*, 2002).

Aunque el relleno sanitario Chiconautla cumple con lo establecido con la NOM-083-SEMARNAT y presenta la menor contribución en las categorías de impacto evaluadas, la disposición final representa la peor alternativa para el tratamiento de las de las botellas de PET, tal y como lo establecen Kolmy *et al.* (2012), Cherubini y Bargili (2009) que lo asocian al uso de suelo y a los beneficios ambientales y económicos que ofrece el reciclaje de las botellas de PET.

Los centros de acopio son establecimientos en donde se almacenan temporalmente las botellas de PET a través de la compra venta de este material y posteriormente son enviadas a las etapas de exportación y reciclaje. Algunos de los centros de acopio venden las botellas previamente trituradas y otros las venden a granel. Los impactos generados por esta etapa se asocian únicamente al consumo de energía eléctrica y consumo de diesel que se requiere para triturar y transportar las botellas de PET a las siguientes etapas del sistema.

5.2. Alternativas de mejora al Manejo Integral de las botellas de PET

Cherubini y Bargili (2009), Rigamonti y Grosso, (2009) y Wittmaier y Langer (2009) mencionan que en los últimos años la metodología del ACV se encuentra en crecimiento y es utilizada como insumo para la toma de decisiones respecto a la elección de los sistemas de

manejo de RSU y de estrategias relativas a la prioridad del uso de los recursos, logrando ofrecer una visión general de los aspectos ambientales generados por las diferentes sistemas de estudio.

Dentro del mismo contexto, primeramente fue posible identificar las etapas que mayor contribución presentan en las categorías evaluadas (siendo la recolección la principal contribución del sistema) para posteriormente plantear y desarrollar alternativas de mejora que pretenden aumentar la eficiencia, reducir los costos, materiales e insumos que se requieren y en consecuencia minimizar los impactos ambientales presentes en el actual manejo de las botellas de PET y RSU en Ecatepec de Morelos. Lo anterior en términos de Eco-eficiencia significa reducir el consumo de recursos naturales para desarrollar un servicio con la misma o mayor calidad pero emitiendo menos contaminantes al ambiente.

Las etapas de reciclaje a fibra de poliéster, centros de acopio y exportación no se incluyen en las alternativas propuestas debido a que estas etapas la desarrollan organismos privados los cuales no proporcionaron la información necesaria para elaborar alternativas de mejora en las mismas.

5.2.1. Rediseño del sistema de recolección

Tchobanoglous (1994), menciona que la parte medular del MIRSU corresponde a la recolección, la cual implica hasta el 70% de los costos asociados al sistema de manejo y tiene como objetivo preservar la salud pública mediante la recolección de los RSU generados y encaminarlos por medio de un equipo de transporte adecuado a la siguiente etapa de la gestión de los RSU.

SEDESOL (1997), el Instituto Brasileño de Administración Municipal (2006) y Intini (2011) mencionan que para el diseño de un sistema de recolección eficiente, en el que se minimicen los costos e impactos ambientales asociados, se deben considerar los siguientes parámetros técnicos y operativos: procedencia y composición de los RSU, frecuencia y horario de recolección, método y rutas de recolección, y características de los vehículos recolectores.

Procedencia y composición

Los 935 sitios considerados en el presente trabajo generan 500 toneladas de RSU por día. La composición de los RSU se considera un aproximado de un 49.5% de residuos orgánicos (residuos de comida y de jardinería) y un 50.5% de residuos inorgánicos (papel, cartón, vidrio, plástico, metales, textiles, otros), datos que fueron presentados por la caracterización de RSU realizada por Durán y Garcés (2012). Las botellas de PET equivalen al 1.21% en peso del total de RSU generados

Las botellas de PET y en consecuencia los RSU provienen de las 935 fuentes de generación que corresponden a escuelas de nivel básico, medio y superior, edificios públicos, mercados, parques, jardines, vía pública, vías primarias y secundarias, entre otras.

La Secretaria de Obras Públicas de Ecatepec de Morelos divide al municipio en 19 zonas, que son atendidas por camiones recolectores propiedad del municipio. Como se mencionó anteriormente, en Ecatepec de Morelos los RSU se recolectan mezclados (orgánicos e inorgánicos).

Como un ejemplo de un diseño adecuado de rutas de recolección se propondrán nuevas rutas para la ZONA 8, una de las 19 ZONAS que integra el municipio además de ser una de las de las más conflictivas (Enríquez García, 2012), en esta zona se encuentran ubicados 57 fuentes de generación como se muestra en la Figura 32.

En la Tabla 31, se plasman la generación per cápita de RSU de las 57 fuentes de generación que integran la ZONA 8. La generación fue determinada a partir de las generación per cápita de cada fuente mencionada por la Organización Panamericana de la Salud y la Organización Mundial de la Salud (2010) y la composición de los RSU presentados por Durán y Garcés (2012).

Tabla 31. Generación de RSU en la ZONA 8.

Sitos	Generación (kg/día)
Jardín de Niños	7.2
Primaria	30.8
Secundaria	55.25
Nivel medio superior	108
Deportivo san Agustín 1 sección	9.2
Parque San Felipe	9.2
Agencia del ministerio público	16.56
Biblioteca San Agustín	2.07
Bodega SAPASE	3.105
Centro cultural hermanos	10.8
Centro de rehabilitación e integración social	15.348
Centro de salud	17.906
Consejo de participación ciudadana	4.14
Academia de policías	10.5
IFE	2.484
Lechería San Agustín	1.656
Pozo No. 13	2.07
Protección civil y bomberos	5.175
Seguridad Pública 3ª sección	10.35
Iglesia	2.07

Fuente Adaptada de (Organización Panamericana de la Salud /Organización Mundial de la Salud, 2010)

A partir de la producción de RSU de las 57 fuentes de generación presentada en la Tabla 31, se diseñó la capacidad de los contenedores a utilizar en las distintas fuentes para almacenar los residuos orgánicos y residuos inorgánicos separadamente. Este diseño se presenta en el ANEXO II: DISEÑO DE CONTENEDORES PARA CADA FUENTE DE GENERACIÓN. La Tabla 32, muestra la masa y volumen de RSU que recolectará el camión ECCO 1173, vehículo asignado a la ZONA 8.

La masa y el volumen fueron determinados a partir del diseño de los contenedores realizado para cada fuente de generación. La capacidad de volumen que puede transportar el camión recolector es de 45 m³ por lo cual el camión tendrá la capacidad de recorrer todos los sitios indicados sin llegar al tope de su capacidad.

Tabla 32. Masa y volumen de RSU a recolectar en cada fuente de generación.

Sitos	Residuos orgánicos (kg)	Volumen de residuos orgánicos (m ³)	Residuos inorgánicos (kg)	Volumen de residuos inorgánicos (m ³)
Jardín de Niños (5)	53.5	0.18	9.1	0.64
Primarias (23)	1,053.40	3.588	1,789.40	9.706
Secundarias (7)	574.35	1.96	951.3	6.895
Nivel medio superior (2)	321	0.84	545	3.85
Deportivo San Agustín 1ª sección	18.4	0.0624	32.55	0.2299
Deportivo San Agustín 3ª sección	18.4	0.0624	32.55	0.2299
Agencia del ministerio público	32.8	0.11	58.54	0.414
Biblioteca San Agustín	4.1	0.0143	7.32	0.051
Bodega SAPASE	6.16	0.0208	9.42	0.0665
Centro cultural hermanos	16.05	0.055	33	0.233
Centro de rehabilitación e integración social	22.8	0.078	46.5	0.328
Centro de salud	26.61	0.091	45.21	0.319
Consejo de participación ciudadana	6.15	0.0208	10.45	0.0738
Academia de policías	15.6	0.052	31.8	0.224
IFE	3.7	0.0125	7.5	0.053
Lechería San Agustín	2.46	0.0082	5.04	0.0356
Pozo No. 13	3.075	0.0103	6.27	0.044
Protección civil y bomberos	10.24	0.0345	18.27	0.129
Seguridad Pública 3ª sección	20.48	0.068	36.61	0.258
Iglesia (5)	20.5	0.069	36.575	0.255
Total	2,229.775	7.3372	3,712.405	24.0347

La Tabla 32, muestra la masa y volumen de RSU que recolectará el camión ECCO 1173, vehículo asignado por el gobierno municipal para operar en la ZONA 8.

Frecuencia y horarios de recolección

La frecuencia de recolección de RSU define el tiempo transcurrido entre dos recolecciones sucesivas en un mismo sitio o en una misma zona. En general, las restricciones económicas son el factor determinante de la frecuencia de recolección de RSU. Cuanto mayor sea la frecuencia, mayor será el costo total del servicio (SEDESOL, 1997) y debe realizarse siempre los mismos días de la semana y a la misma hora en función principalmente de la cantidad de RSU que se generan, composición, clima, días festivos e infraestructura disponible. Para el presente caso, se propone desarrollar una frecuencia de recolección de dos veces por semana siendo los días martes y viernes los días a recolectar los residuos orgánicos y una vez por semana los residuos inorgánicos, los días miércoles.

Los horarios de recolección son un punto central para un buen entendimiento entre el servicio de recolección y la población servida. En la medida que para la población le quede claro en qué horarios se recogerá sus RSU y estos se cumplan, será más fácil mantener el orden y disminuir problemas de dispersión de los mismos. Para la asignación de los horarios de recolección se considera principalmente el tráfico de la localidad, horarios de trabajo y escolares (SEMARNAT, 2011).

A partir de la macro ruta que se presenta en la Tabla 33, se diseñó el cartel que se presenta en la Figura 29 y que servirá como aviso a las fuentes de generación para que estén al tanto de la hora y que días en que se recolectarán sus RSU.

Tabla 33. Macro ruta para la ZONA 8.

Macro ruta	Actividad	Horario	Tiempo propio	Tiempo acumulado
Vehículo _{Eco-1179} Macro ruta ₁	Ingreso del personal a lugar de trabajo.	8:00-8:15	15	15
	Preparación del personal y del equipo de trabajo (vehículo de recolección)	8:15-8:30	15	30
	Traslado al punto de inicio de la micro-ruta	8:30-8:37	7	37
	Recolección de los RSU en el área asignada (57 sitios).	8:37-13:30	293	330
	Comida del personal	13:30-15:00	90	420
	Recolección de los RSU en el área asignada (continuación).	15:00-17:07	127	547
	Traslado al destino de descarga Relleno Sanitario Chiconautla.	17:07-17:47	40	587
	Ingreso y descarga de los RSU en el Relleno Sanitario Chiconautla.	17:47-18:07	15	602
	Salida del Relleno Sanitario Chiconautla.	18:07-18:10	3	605
	Traslado al encierro de los vehículos recolectores.	18:10-18:30	20	625
	Tiempo total de la MACRO-RUTA₁ = 10 horas con 25 minutos			

La macro ruta presentada en la Tabla 33, corresponde al recorrido por parte del vehículo recolector a todos los sitios obligados. Cabe mencionar que se considera una separación en fuente dado que la mayoría de las fuentes de generación corresponden a escuelas y edificios públicos, lugares en donde es más conveniente iniciar con la concientización, difusión y capacitación en tema de prevención y separación en fuente de los RSU al menos en orgánicos e inorgánicos para aumentar el aprovechamiento de los RSU valorizables.

ecatepec
Dedicados a cumplir 2000-2012

H. Ayuntamiento Constitucional
de Ecatepec de Morelos.
Dirección de Servicios Públicos

HORARIO Y FRECUENCIA DE RECOLECCIÓN

Turno	Horario	L	M	Mi	J	V	S	D
Matutino	8:37-13:30	X					X	
Vespertino								
Nocturno								

Lunes (L), Martes (M), Miércoles (Mi), Jueves (J), Viernes (V), Sábado (S), Domingo (D).

Ecatepec Te quiero... limpio

Quejas: 5836 1528

Figura 31. Propuesta del cartel para la frecuencia y horario de recolección del turno matutino.

Al colocar el cartel que se representa en la Figura 31, la población deberá respetar y adaptarse a los horarios y frecuencias asignadas para la recolección de sus RSU tanto orgánicos e inorgánicos.

Método de Recolección

El método de recolección que se propone es el método de contenedores debido a que las características físicas de las fuentes de generación y que se adaptan a los requerimientos generales de este método, es decir, las fuentes de generación tienen superficie disponible para instalar contenedores en lugares accesibles al vehículo recolector para no afectar a terceros y considerando como fundamento los resultados obtenidos por Iriarte y Gabarrell (2009) en donde por medio de un ACV se analizaron tres diferentes métodos de recolección; método de contenedores, de acera y neumático, y en donde se identificó que el método de contenedores es el método que menor contribución ambiental presenta en todas las categorías evaluadas.

Diseño de rutas de recolección

Una fase importante del sistema de recolección es la que comúnmente se conoce como ruta, la cual no es otra cosa que los recorridos específicos que deben realizar diariamente los vehículos recolectores en las zonas de su localidad, teniendo como fin de recolectar los RSU generados en un tiempo y costo mínimo.

Actualmente en Ecatepec de Morelos el diseño de las rutas de recolección se realiza con base en juicio y experiencia de los operadores de los camiones recolectores quienes la hacen de proyectistas. Obviamente que el criterio y experiencia tanto del jefe de limpia como de los operadores no es siempre el mejor, por lo cual, la mayoría de las rutas de recolección diseñadas por ellos presentan diversas deficiencias, entre las que se encuentran: exceso de consumo de combustible y horas hombre, tiempos muertos, reducción en la cobertura de recolección, aumento de tiraderos clandestinos principalmente. La ubicación de las 57 fuentes que integran la ZONA 8 se plasma en la Figura 32.



Figura 32. Ubicación geográfica de los 58 sitios que componen la ZONA 8 en Ecatepec de Morelos.

A partir de la Figura 32, es posible conocer la ubicación exacta de las fuentes. También es necesario tener en cuenta para el diseño de las rutas las siguientes consideraciones:

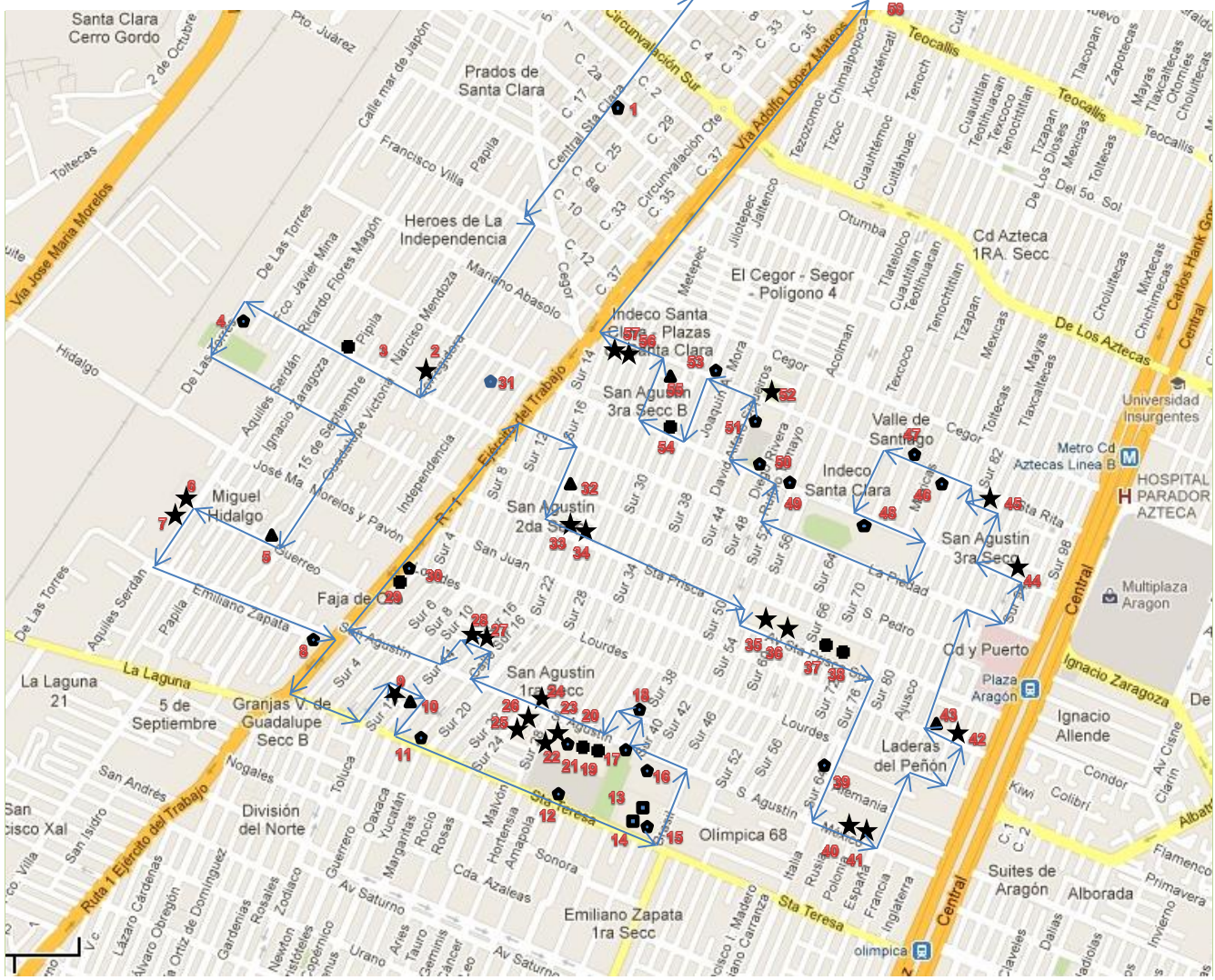
- ✚ Los recorridos no deben fragmentarse ni traslaparse con movimientos innecesarios.
- ✚ Cada recorrido debe consistir en tramos que queden dentro de la misma área de la localidad de estudio.

- ✚ Las rutas deben iniciarse en puntos más cercanos al encierro de los camiones y conforme avanza el recorrido deben ir acercándose al lugar de transferencia o disposición final.
- ✚ Deben incluir las disposiciones de tránsito.
- ✚ Las fuentes de generación que se encuentren en vialidades con exceso de tráfico, deben recorrerse en las horas en que éste sea mínimo.
- ✚ En las calles muy angostas o callejones, es preferible que los vehículos recolectores no entren en ellas sino que esperen en la esquina y que el personal vaya a buscar los RSU.
- ✚ Es preciso reconocer muy bien la topografía propia de la ZONA para que las rutas no causen daños o afectaciones a terceros.

Finalmente a partir de la ubicación geográfica de las fuentes de generación de RSU, características de almacenamiento y demás parámetros, se diseñó una nueva ruta de recolección la cual se plasma en la Figura 33, que debe desarrollar el Camión ECO-1173 con capacidad de 16 toneladas con compactación.

Inicio de micro ruta
(Encierro de vehículos)

Relleno Sanitario



- ★ Primarias
- Secundarias
- Nivel medio superior
- ▲ Jardín de Niños
- ◆ Edificios Públicos

Figura 33. Ruta de Relección para la ZONA 8.

Dentro de la misma Figura 33, se enumeran las fuentes de generación, el número 1 comprende al primer sitio atendido y al 58 el último, en el ANEXO III. FUENTES DE GENERACIÓN se presenta el nombre de cada sitio acorde al número asignado. La recolección de los residuos inorgánicos tiene como destino la planta de separación y los residuos orgánicos son trasladados a la planta de composta que tiene el municipio.

Tchobanoglous y Theisen (1993) y Gutiérrez Galicia (2008), mencionan que un diseño eficiente de las rutas de recolección puede reducirse hasta un 40% la demanda de combustible que requiere esta etapa; en consecuencia la implementación de la ruta de recolección diseñada para la ZONA 8, en conjunto con nuevas rutas de recolección diseñadas para las restantes 19 ZONAS, podrán minimizar los impactos ambientales generados por esta etapa y ahorrar recursos económicos que pueden ser utilizados para aumentar la cobertura de recolección que presenta el municipio.

5.2.2. Operación de planta de separación

Ecatepec de Morelos cuenta con una planta de separación que se encuentra a un costado del relleno sanitario Chiconautla. Esta planta de separación inició sus operaciones el 18 de agosto del 2008 con vida útil de 15 años. Sin embargo, los principales problemas que presentaba eran los costos de consumo de energía, mantenimiento, combustible e intereses políticos que ocasionaron que la planta detuviera su operación el 15 de octubre del 2008.



Figura 34. Planta de Separación, Ecatepec de Morelos. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 34, se observa que la planta de separación, la cual está compuesta por tres bloques en donde las actividades desarrolladas son idénticas. Durante su operación se recuperaban vidrio, cartón, papel, plásticos, aluminio, metales principalmente

Actualmente la planta no opera y lo único que necesita para su funcionamiento son recursos económicos para cubrir los costos totales de operación, dado que toda la infraestructura con que se cuenta está en buen estado (Medina Acosta, 2012).

Por otro lado, Cherubini y Bargili (2009), Rigamonti y Grosso (2009), y Slagstad y Brattebø (2012) mencionan que una planta de separación ofrece mejores beneficios ambientales en comparación con disponer directamente los RSU en los rellenos sanitarios sin ningún tratamiento previo, además de aumentar la eficiencia global del sistema de manejo de los RSU.

En el mismo contexto, la propuesta es operar nuevamente la planta de separación, para lo cual, como se mencionó anteriormente, es necesario contar con recursos económicos. Los recursos económicos obtenidos por la venta de los materiales valorizables serán empleados para cubrir los costos totales de operación de la planta y otras actividades.

La planta operará los 365 días del año con una operación de seis horas por día. Al implementar una recolección diferenciada en al menos residuos orgánicos y residuos inorgánicos, se considera que los residuos orgánicos son trasladados a la planta de composta que cuenta el municipio y los residuos inorgánicos son enviados a la planta de separación.

Anualmente serán recolectados 82,946.25 toneladas de residuos inorgánicos (50.5%) de los cuales, se considera que el 3% de los residuos valorizables (papel, cartón, plásticos, aluminio, metales, entre otros) son recuperados informalmente por el personal previo a ser introducidos al camión recolector para su posterior venta, logrando un beneficio económico para el personal. Por lo anterior se considera un flujo de entrada a la planta de 81,707.96 ton/año de residuos inorgánicos (ver ANEXO IV: Requerimientos de la planta de separación).

A partir de la caracterización realizada por Durán y Garcés (2012) y los porcentajes de recuperación de materiales en las plantas de separación mencionadas por Rigamonti y Grosso (2009), se desarrolló una hoja de cálculo, la cual se muestra en el ANEXO IV: Requerimientos de la planta de separación, para determinar la cantidad de RSU valorizables que serán posible recuperar. Los resultados indican que anualmente 17,484.847 toneladas de RSU valorizables serán recuperado para su posterior venta y un flujo de salida 64,222.85 toneladas de residuos inorgánicos logrando una eficiencia de recuperación estimada de RSU en la planta del 21.4%. El nombre de los materiales recuperados, cantidad y el pago por su venta se plasman en la Tabla 34.

Tabla 34. Pago por venta de materiales valorizables.

Material	ton/año recuperadas para su venta	Precio de venta (MXN)	pago total (MXN)
Cartón	3,267.704	600	1,960,622.685
Lata de aluminio	191.187	20,000	3,823,74
Material ferroso	1,108.884	4,400	4,879,092.24
Papel	4,230.012	1,000	4,230,012.375
Botellas de PET	1,349.461	6,000	8,096,769.45
HDPE	1,338.309	12,000	16,059,708
PVC	189.593	2,000	379,187.55
LDPE	479.56	1,200	575,472.87
PP	936.816	5,000	4,684,081.5
Tetra pack	1,226.783	2,000	2,453,566.5
Vidrio de color	860.341	300	258,102.45
Vidrio transparente	2,306.193	500	1,153,096.594
Total	17,484.847	Total	48,553,452.21

Considerando un panorama en donde existe un acuerdo de compra venta de materiales entre las empresas que se encargan de reciclar o exportar los RSU presentados en la Tabla 34 y la planta de separación, anualmente se obtendrán 48,553,452.21 de pesos los cuales serán utilizados para cubrir los costos totales de operación.

En la Tabla 35, se presentan los costos totales e operación que se requieren para operar nuevamente la planta de separación, además de los indicadores Valor Presente Neto y Tasa Interna de Retorno. En el ANEXO IV: REQUERIMIENTOS DE LA PLANTA DE SEPARACIÓN SE DESCRIBE A DETALLE EL CÁLCULO DE LOS MISMOS.

Tabla 35. Indicadores económicos de la planta de separación.

Indicador	Cantidad (MXN)
Inversión inicial	15,956,179
Flujo neto de efectivo	12,957,038.4
Ganancias por venta de materiales	48,553,452.21
Valor Presente Neto	85,102,085.7
Tasa Interna de Retorno	112

Los datos presentados en la Tabla 35, presentan los principales indicadores económicos que son requeridos para determinar la viabilidad económica de la propuesta plateada. En la Figura 35, se presenta en comportamiento del Valor Presente Neto durante 10 años de operación de la planta.

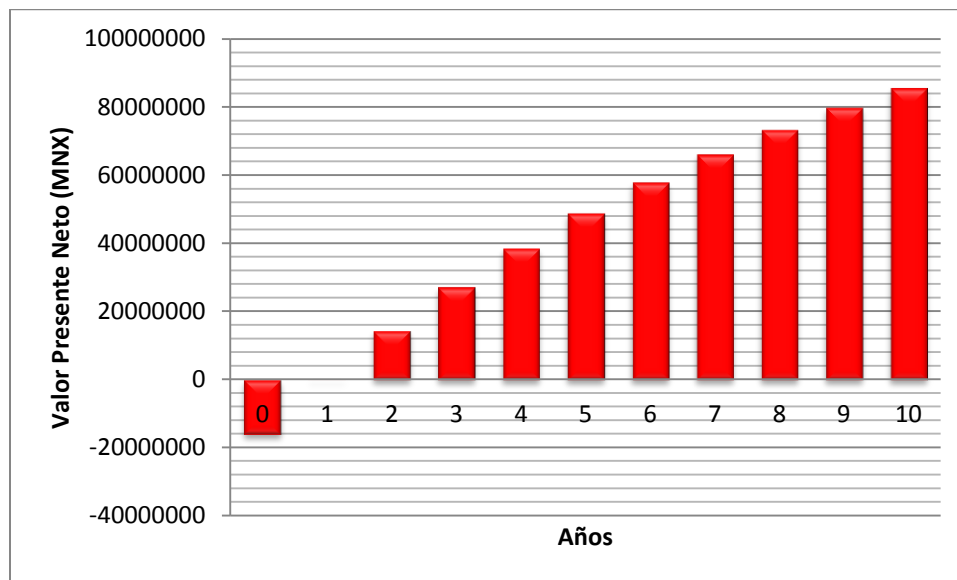


Figura 35. Comportamiento del Valor Presente Neto durante la operación de la planta de separación.

Es posible observar en la Figura 35, a final del primer año de operación de la planta, los 15,956,179 de pesos de inversión inicial serán retornados y durante el segundo año de operación se presentaran ganancias económicas de consideración. Por todo lo anterior, la planta de separación representa un alternativa económica y ambientalmente viable debido a que se minimiza la cantidad de RSU dispuestos en el relleno sanitario y se generan recursos económicos por la venta de los materiales valorizables para ser utilizados, por ejemplo, en cubrir la demanda de combustible de las etapas de recolección y disposición final.

5.2.3. Planta de reciclaje mecánico de botellas de PET

El reciclaje de las botellas de PET para la producción de nuevos productos presenta diversos beneficios económicos, técnicos, sociales y ambientales, y con fundamento en la investigación de Chilton et al. (2010) Shen et al. (2010) y Kolmy et al. (2012) que muestran que el reciclaje de las botellas de PET en comparación con la incineración y la disposición final de las mismas presenta una reducción neta de emisiones de CO₂, monóxido de carbono, gases ácidos, partículas, metales pesados y dioxinas, y que la producción de hojuelas para la elaboración de diversos materiales en comparación con el uso de productos vírgenes para el mismo objetivo presentan una reducción de impactos ambientales globales hasta en un 40% dependiendo de las configuraciones del sistema de reciclaje (Shen y Nieuwlaar, 2011; Kumar y Ramjeeawon, 2013); una de las alternativas propuestas es instalar una planta de reciclaje de botellas de PET que obtenga como producto final hojuelas en distintas calidades para su posterior venta.

Se pretende que la planta se instale a un costado del relleno sanitario y de la planta de separación. La planta de reciclaje se encontraría dividida en tres secciones; trituración, lavado I y lavado II. En la Figura 36, se presenta un diagrama general de la planta de reciclaje.

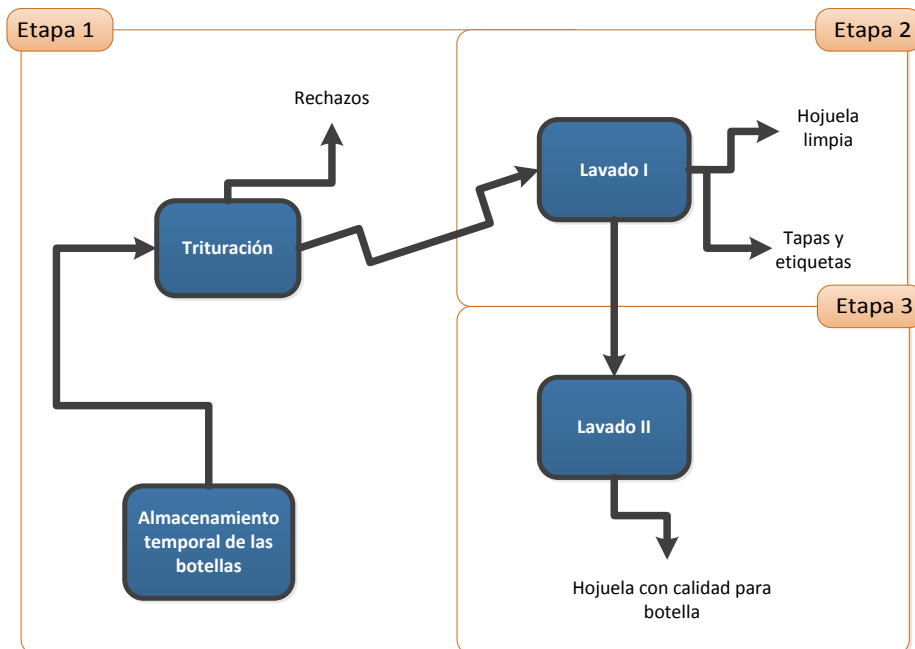


Figura 36. Diagrama general de la planta de reciclaje de botellas "Ecatepec".

A continuación se describe la composición y funcionamiento de cada etapa de la planta de reciclaje que se presenta en la Figura 36.

Etapa 1

Esta etapa está conformada por el almacenamiento temporal y trituración. Previo a estas actividades y considerando la operación de la planta de separación que se mencionó en el apartado anterior, el flujo de entrada a la planta es de 1,349.5 toneladas de botellas de PET anualmente y un flujo de salida de 944.6 toneladas como hojuelas y 404.9 toneladas por año que corresponden a rechazos, es decir, botellas de PET que no cubren la calidad para ser reciclados, tapas y etiquetas.

Antes de que las botellas de PET sean recicladas son pesadas para tener un control de los flujos máxicos de las entradas y salidas dentro de la planta. Posteriormente son destinadas al área de almacenamiento temporal en donde se eliminan etiquetas, tapas y rechazos manualmente.

La trituración de las botellas de PET tiene como resultado producir “hojuelas de PET sucias” en combinación con etiquetas y tapas. Las hojuelas de PET sucias son enviadas a la Etapa 2 para su lavado y posterior venta.

Etapa 2

Esta etapa se encuentra compuesta por el lavado de las botellas. Consecutivamente el producto obtenido de la Etapa 1 es enviado a un tanque de lavado con agua a temperatura ambiente, seguidamente estas hojuelas son ingresadas a un centrifugador para eliminar las etiquetas y tapas presentes por medio de diferencia de densidades.

Posteriormente las hojuelas son enviadas a un tanque de lavado con agua caliente (aproximadamente 80°C) en mezcla con NaOH como detergente. Finalmente las hojuelas

son ingresadas a un tercer tanque de lavado, esta vez con agua a temperatura ambiente. El producto obtenido de la etapa de lavado son hojuelas de PET limpias que posteriormente son almacenadas temporalmente y destinadas a su venta para la producción de botellas que contengan productos no alimenticios, flejes, lámina, fibra de poliéster, entre otros.

Etapa 3

Kolmy et al. (2012) y Welle (2011) mencionan que un lavado con NaOH concentrada puede obtener hojuelas con la calidad necesaria para producir botellas que contenga alimentos sin necesidad de un reciclaje químico que en comparación con el reciclado mecánico es mucho más costoso. Por lo anterior las hojuelas obtenidas en la Etapa 2 son lavadas con NaOH concentrado y posteriormente con agua a temperatura ambiente para eliminar los restos de NaOH presentes.

El lavado con NaOH concentrado reducirá hasta en un 30% el tamaño de partícula de las hojuelas pero el producto final (hojuelas limpias) tendrá la calidad para contenedores de calidad alimentaria. En la Figura 37, se plasma la propuesta de distribución general de la planta de reciclaje.

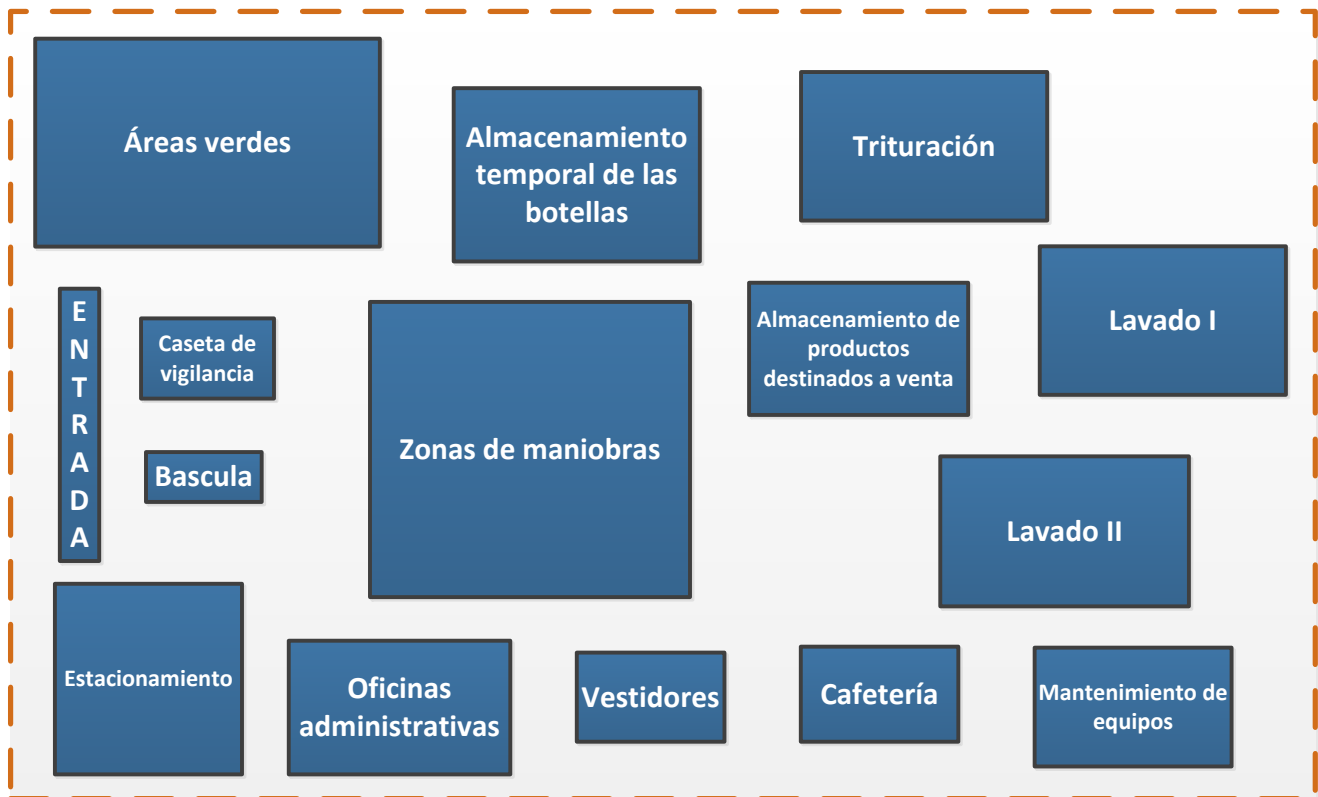


Figura 37. Propuesta de distribución general de la planta de reciclaje.

Los recursos económicos obtenidos por la venta de las hojuelas producidas en la planta serán utilizados para cubrir los costos asociados a la operación de la misma. El proyecto de la instalación de la planta de reciclaje es por etapas, pero para el presente estudio sólo se considerará el diseño de la planta contemplando la Etapa 1 y Etapa 2. En posteriores investigaciones y con el creciente aumento de la producción en la planta se diseñará a detalle la Etapa 3.

Actualmente TdR tiene un precio de compra de hojuela limpia de 8 pesos el kilogramo y considerando que las 944.6 toneladas de botellas de PET se venderán a esta empresa, anualmente se generarán 7,556,000 de pesos que serán utilizados para cubrir los costos totales de operación de la planta. En la Tabla 36, se presentan los indicadores económicos para determinar la viabilidad de la instalación de la nueva planta de reciclaje de PET con una capacidad de 4 toneladas de botellas de PET para producir hojuela con calidad para fibra, flejes, laminas, entre otros productos

Tabla 36. Indicadores económicos de la planta de reciclaje de PET.

Indicador	Cantidad (MXN) para el año 2013
Inversión inicial (García Pantigozo, 2009)	5,396,103
Costos de operación (García Pantigozo, 2009)	4,316,882
Ganancia por venta de hojuelas (Flores Cobián, 2012)	12,279,800
Flujos netos de efectivo	4,622,662.463
Valor Presente Neto	207,229,701
Tasa Interna de Retorno	85

Los datos presentados en la Tabla 36 presentan los principales indicadores económicos que son requeridos para determinar la viabilidad económica de la propuesta de instalación de una nueva planta de reciclaje de botellas de PET. En la Figura 38, se presenta en comportamiento del Valor Presente Neto durante 10 años de operación de la planta. Se consideran una vida útil de diez años debido a que diez años es la vida útil de los equipos requeridos.

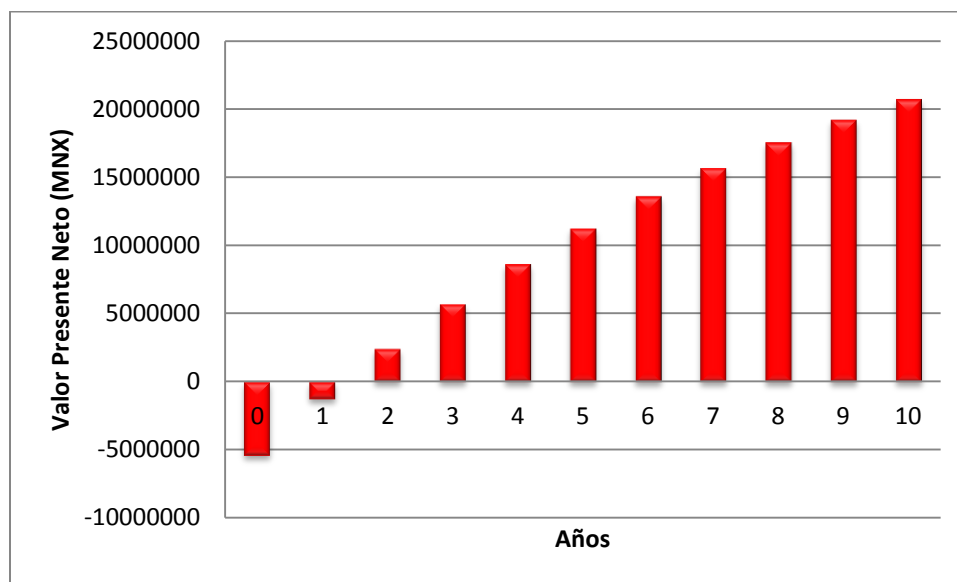


Figura 38. Comportamiento del Valor Presente Neto durante la operación de la planta de reciclaje.

Es posible observar en la Figura 38, durante el segundo año de operación de la planta de reciclaje los 5,396,103 de pesos de inversión inicial serán retornados, y durante los posteriores años de operación se obtendrán ganancias económicas de consideración, lo anterior con base en los valores de Valor Presente Neto y Tasa Interna de Retorno que son números positivos. En consecuencia la instalación de la planta de reciclaje mecánico de las botellas de PET representa un alternativa económica y ambientalmente viable debido,

además de generar recursos económicos, se minimiza las emisiones netas de CO₂, monóxido de carbono, gases ácidos, partículas, metales pesados y dioxinas ocasionadas por el uso de productos vírgenes para la producción de un mismo producto, la cantidad de botellas de PET dispuestas en el relleno sanitario y en consecuencia una reducción de impactos ambientales en términos de agotamiento abiótico, acidificación, eutrofización, calentamiento global, toxicidad humana y smog fotoquímico.

5.2.4. Aprovechamiento energético de las botellas de PET

El Relleno Sanitario Chiconautla recibe anualmente 164,250 toneladas de RSU, de las cuales el 1.74% corresponden a botellas de PET para su disposición final. El relleno sanitario Chiconautla tiene un tiempo de vida útil de 6 meses (Medina Acosta, 2012) en consecuencia cada vez hay menos superficie para disponer los RSU.

Actualmente la disposición final de las botellas PET y los RSU ya no es una opción de tratamiento (Cherubini y Bargili, 2009). Por lo anterior, para minimizar la cantidad de botellas dispuestas en el relleno se plantea incluir la incineración al manejo integral de las botellas para generar energía eléctrica y abastecerla a la planta de separación o abastecer el alumbrado público.

El aprovechamiento energético por medio de la incineración de las botellas presenta reducción de emisiones atmosféricas de monóxido de carbono, gases ácidos, y partículas en comparación con la disposición final (Chilton *et al.*, 2010; Shen *et al.*, 2010). Además la incineración tiene la ventaja de reducir hasta un 90% en volumen y 70% en masa de los residuos (Tchobanoglous y Theisen, 1993).

Sin embargo, la mayor preocupación de esta tecnología son las emisiones atmosféricas, principalmente metales pesados, dioxinas y furanos. Pese a lo anterior, Cherubini y Bargili (2009) mencionan que la incineración para generar energía eléctrica es la mejor opción en comparación con disponer las botellas de PET en el relleno sanitario sin ningún tratamiento previo.

En la propuesta planeada se considera un esquema en donde el incinerador empleado cumple en todos los términos con la normatividad vigente en el tema de incineración. En la Figura 39, se presenta el proceso de incineración general que se desarrollará. En la Tabla 37, se presenta las emisiones máximas permisibles que deben ser descargadas al ambiente por los procesos de incineración de residuos en el territorio nacional.

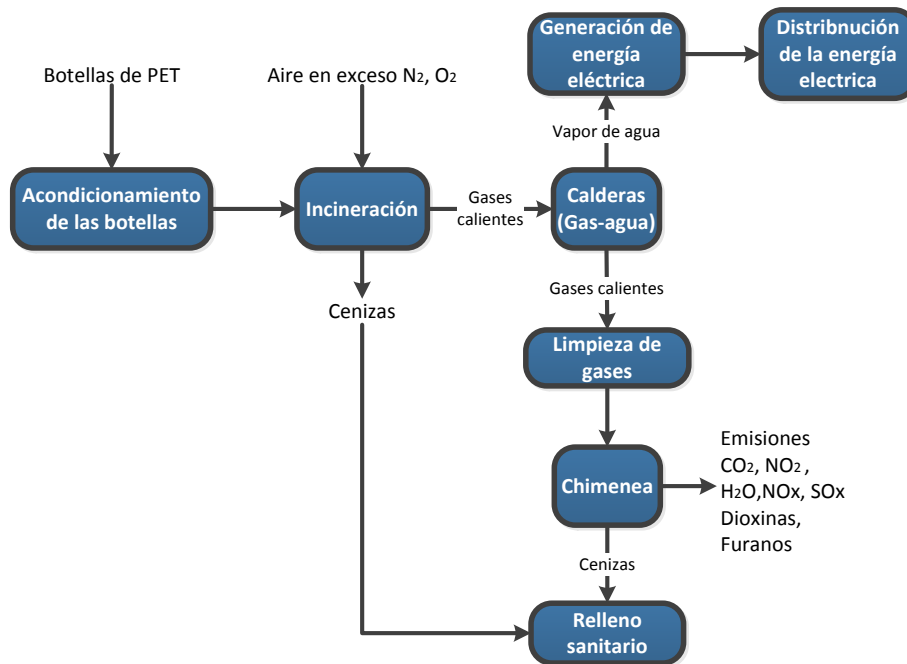


Figura 39. Diagrama de flujo de la incineración de las botellas de PET. Fuente: Adaptada de Castells y Cadavid, 2005.

Como se muestra en la Figura 39, el proceso de incineración de las botellas de PET inicia con un acondicionamiento de las mismas y seguidamente la incineración con exceso de aire para producir cenizas que son trasladadas al relleno sanitario para su disposición y gases calientes que son destinados a una caldera que calienta el agua generando vapor de agua, lo que hace funcionar una turbina para finalmente generar energía eléctrica.

Parte de los gases calientes generados son tratados por un sistema de limpieza de gases para eliminar principalmente partículas. Finalmente las emisiones emitidas al aire por la chimenea son principalmente el CO₂, NO₂, H₂O, NO_x, SO_x, Dioxinas y furanos.

Tabla 37. Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos.

Contaminante (mg/m ³)	Límite de emisión
CO	63
HCl	15
NO _x	300
SO ₂	80
Partículas	50
AS, Se, Co, Ni, Mg, Sn	0.7 (suma total)
Cd	0.07
Pb, Cr, Cu, Zn	0.7 (suma total)
Hg	0.07
Dioxinas y furanos (ng/m ³)	0.5

Fuente: Adaptada de Gobierno Federal, 2002.

Los compuestos y las respectivas cantidades presentadas en la Tabla 37 representan las emisiones que serán emitidas al aire por acción de la incineración de las botellas de PET.

Los rechazos obtenidos en la planta de separación, son destinados a incineración para generar energía eléctrica aprovechando su poder calorífico 10,922 MJ/ton (Durán y Garcés Rodríguez, 2012) y de 23.04 MJ/kg para las botellas de PET (Chilton *et al.*, 2010) con un contenido de humedad del 6%

El flujo de entrada del incinerador que corresponde a 61,000 ton/año de residuos inorgánicos y un flujo de salida de 18,300 ton/año (cenizas principalmente). A continuación se presentan la cantidad de energía eléctrica generada a partir de la incineración de los residuos inorgánicos y de las botellas de PET.

Datos

Flujo de entrada = 61,000 ton de residuos inorgánicos/año

Poder calorífico (Durán y Garcés, 2012)= 10,922 MJ/ton

Eficiencia del generador eléctrico = 0.4

Calor generado = (1092 MJ/ton)(61,000 ton/año)

= 666,242,000 MJ/año

Energía eléctrica generada = (666,730 MJ/año)(0.4) = 266,496,800 MJ/año

= 74,619,104 kWh/año

Los recursos económicos obtenidos por la venta de energía eléctrica a CFE serán utilizados para cubrir los costos asociados a la operación del incinerador. Actualmente CFE tiene un precio de venta del kWh en 1.34 pesos, considerando este valor, anualmente se obtendría 99,989,599.36 de pesos destinados a cubrir los costos totales de operación. En la Tabla 38 se presentan los indicadores económicos para determinar la viabilidad de la instalación del incinerador para generar energía eléctrica y abastecerla a la planta de separación, planta de reciclaje o al alumbrado público.

Tabla 38. Indicadores económicos del incinerador.

Indicador	Cantidad (MNX)
Inversión inicial (Saldívar Ríos, 2004)	381,413,500
Costos de operación (Saldívar Ríos, 2004)	71,500,000
Ganancia por venta de energía eléctrica	99,989,599.36
Flujos netos de efectivo	-21,094,155.64
Valor Presente Neto	-179,593,271

Los datos presentados en la Tabla 38 presentan los principales indicadores económicos que son requeridos para determinar la viabilidad económica de la propuesta de instalación de una nueva planta de reciclaje de botellas de PET. En la Figura 40 se presenta el comportamiento del Valor Presente Neto durante 20 años de operación de la planta de incineración.

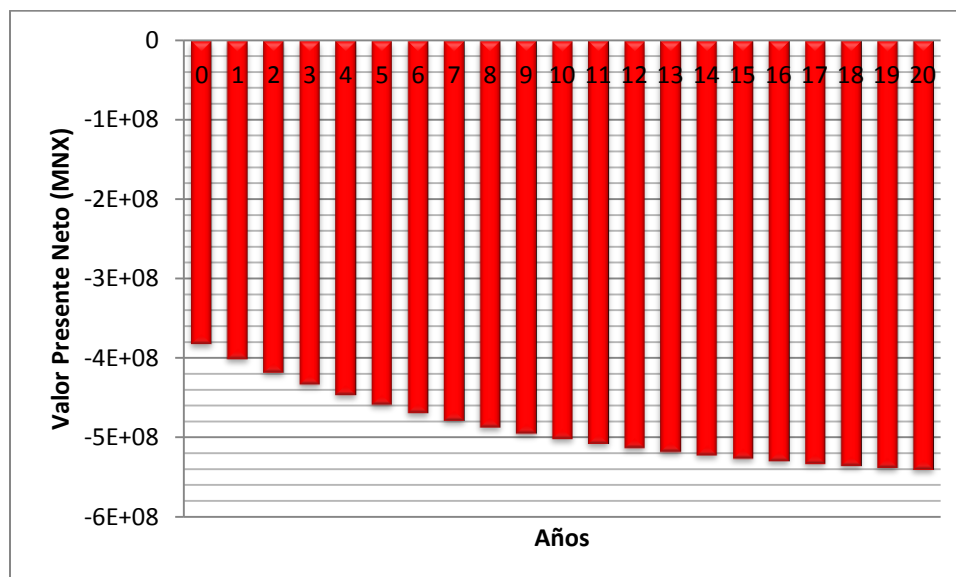


Figura 40. Comportamiento del Valor Presente Neto durante la operación del incinerador.

Es posible observar en la Figura 40, el valor del Valor Presente Neto es negativo en consecuencia la inversión no es viable debido a que desde el primer año de operación del

incinerador se presentan pérdidas económicas ya que las ganancias netas (ahorros) son insuficientes para cubrir tanto la inversión y los costos de operación.

Sin embargo, Güereca (2006) y Wittmaier y Langer (2009) mencionan que la incineración con recuperación energética generando electricidad, presenta una reducción neta de emisiones atmosféricas de monóxido de carbono, gases ácidos, partículas, metales pesados, dioxinas y furanos generando impactos al ambiente en forma de acidificación y toxicidad terrestre, pero mitigando el impacto al ambiente en términos de eutrofización, disminución de ozono estratosférico, cambio climático, formación de foto-oxidantes, efectos cancerígenos, efectos respiratorios y uso de combustibles fósiles resultando una alternativa ambientalmente viable.

5.2.5. Otras propuestas

Tratamiento de lixiviados

En el Relleno Sanitario de Chiconautla se depositan en promedio 450 toneladas de RSU diariamente y se estima un promedio de generación de lixiviados de 8,760 m³ anualmente, los cuales con ayuda de dos pipas propiedad del municipio son reinyectados en puntos estratégicos del relleno para acelerar la biodegradación de los RSU. Se estima que el 75% de los lixiviados permanecen en el interior del relleno y el restante 25% regresan por gravedad a las lagunas de almacenamiento.

Por lo anterior 2,190 m³ queda almacenado sin ningún tratamiento posterior. En las épocas de lluvias principalmente, los lixiviados almacenados suelen desbordarse de las lagunas y se filtran al suelo directamente ocasionando contaminación del suelo y de los acuíferos presentes.

La propuesta presentada en este numeral es un tren de tratamiento que permita utilizar estos lixiviados (ya tratados) para abastecer de agua al penal de Chiconautla que se encuentra ubicado a un costado del Relleno Sanitario. El tren de tratamiento está compuesto como lo indica la Figura 41.

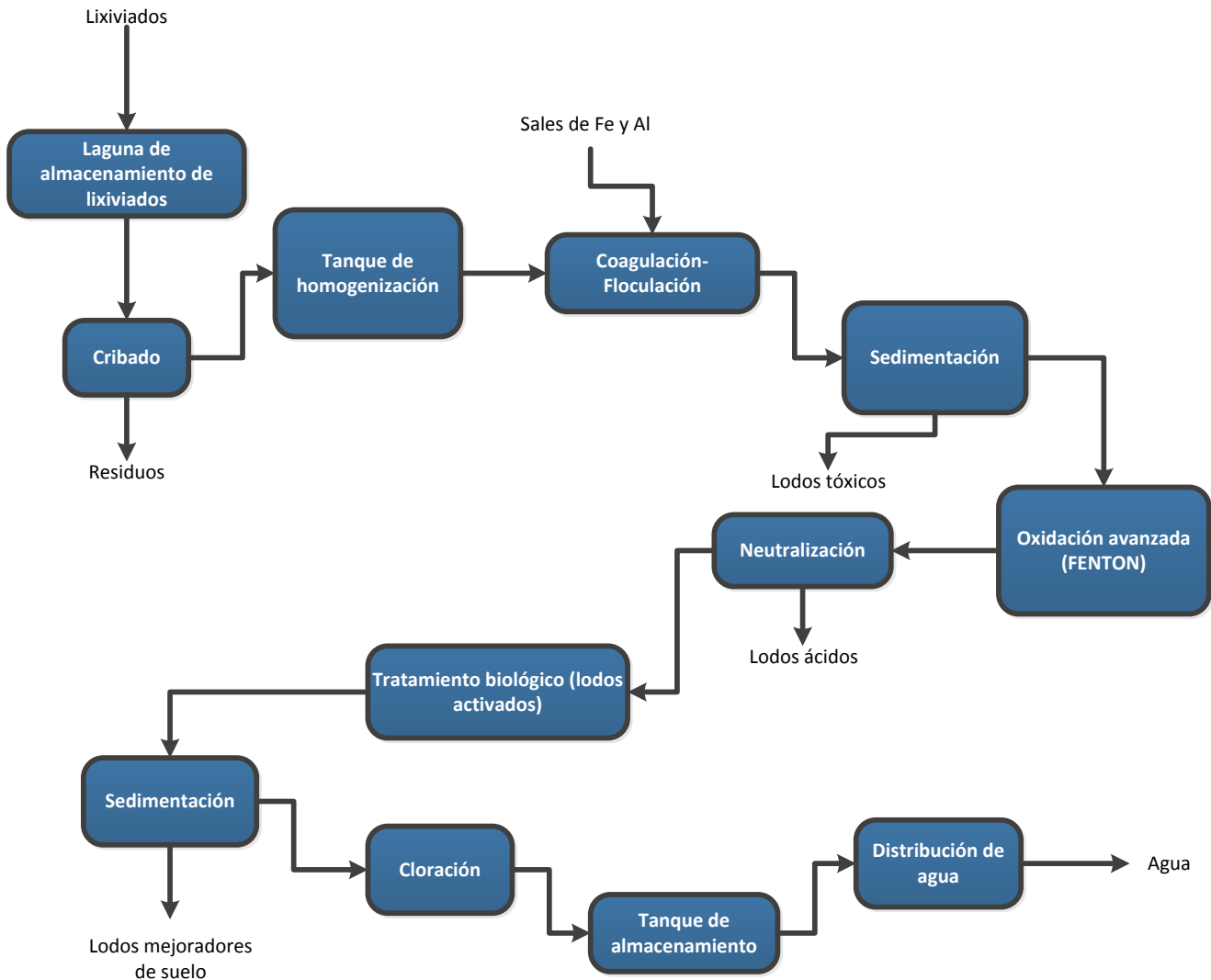


Figura 41. Tren de tratamiento de lixiviados. Adaptada de Deng y Englehardt, 2006.

Como se observa en la Figura 41, el tren de tratamiento inicia con un cribado para eliminar los materiales de gran tamaño, principalmente, ramas, hojas, plásticos, entre otros. Posteriormente los lixiviados son ingresados a un tanque de homogenización en el cual se les añade sales de Al o Fe para iniciar el proceso de coagulación floculación. En la primera sedimentación se eliminan lodos tóxicos que contienen principalmente metales pesados, estos lodos deberán ser tratados como residuos peligrosos debido al alto contenido de materiales muy dañinos para la salud.

Consecutivamente se aplica un proceso de oxidación avanzada (FENTON) para decrecer la cantidad de DQO presente y aumentar la DBO contenida en los lixiviados para

posteriormente aplicarse un tratamiento biológico (lodos activados) en donde se obtienen lodos que pueden ser utilizados como mejoradores de suelo.

Como última etapa del sistema de tratamiento el agua obtenida es ingresada a un proceso de cloración para eliminar principalmente patógenos. Finalmente el agua es almacenada y distribuida al penal de Chiconautla que como se mencionó anteriormente se encuentra a un costado del Relleno Sanitario.

El agua obtenida puede ser utilizada en las descarga las excreciones generadas por los internos, lavado de patios, baños, celdas, riego de áreas verdes. En consecuencia si los lixiviados generados fuesen tratados, el consumo de agua del municipio de Ecatepec de Morelos ahorraría un estimado de 1,752 m³ de agua anualmente, considerando una eficiencia de operación del 80%, y en consecuencia evitar la filtración de metales pesados, compuestos orgánicos, y de más compuestos que se encuentran en las composición de los lixiviados.

Aprovechamiento del biogás

En el mismo sentido Bovea e Ibáñez Forés (2010) mencionan que un relleno sanitario que opera con un sistema de captación de biogás para generar energía eléctrica, puede reducir hasta un 50% los impactos producidos en comparación con un relleno que opera sin aprovechamiento del biogás.

Con base en lo anterior y considerando que el relleno sanitario Chiconautla tiene una tasa de generación de 231.48 m³ de biogás por toneladas de RSU dispuesta (Medina Acosta, 2012), se plantea un sistema de captación y aprovechamiento del mismo para producir energía eléctrica para abastecer a la planta de separación o al penal Chiconautla. En la Figura 42, se plasma el diagrama general del sistema de captación y generación de energía eléctrica empleando el biogás generado en el relleno sanitario Chiconautla.

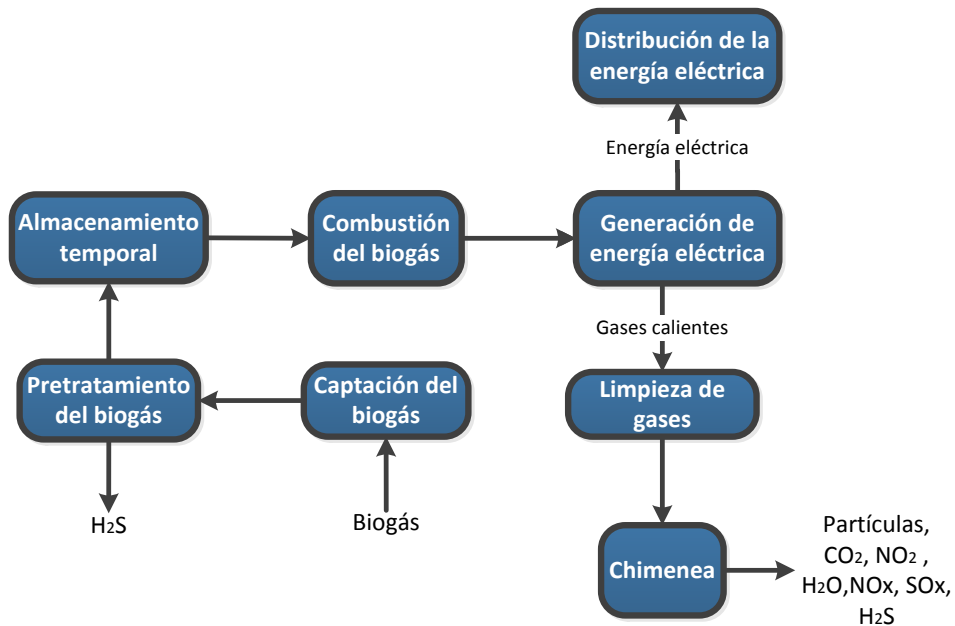


Figura 42. Diagrama del sistema de aprovechamiento del biogás.

Como se observa en la Figura 42, el sistema de aprovechamiento del biogás comienza con la captación del mismo de los 5 tubos de venteo, posteriormente al biogás se le aplica un pretratamiento para eliminar el H₂S presente. El producto obtenido en el pretratamiento es enviado a tanques de almacenamiento temporal para posteriormente llevar a cabo la combustión y la generación de energía eléctrica, y finalmente la distribución de la energía y la emisión de compuestos al aire (CO₂, NO₂, H₂O, NO_x, SO_x y H₂S) presentes o generados en el proceso. Con el aprovechamiento del biogás se podrá reducir las emisiones (CH₄ y CO₂ principales compuestos que ocasionan el cambio climático) producidas en el relleno sanitario por efecto de la degradaciones de los RSU.

6. CONCLUSIONES

Se desarrollaron alternativas de mejora al actual manejo de las botellas de PET en Ecatepec de Morelos, utilizando como fundamento los resultados obtenidos durante la elaboración de un ACV de las mismas. Las alternativas que a priori se consideran económica y ambientalmente viables y que conforman una mejor estrategia de manejo son *i)* rediseño del sistema de recolección y almacenamiento de los RSU, *ii)* operación de la planta de separación propiedad del municipio, y *iii)* construcción de una nueva planta de reciclaje mecánico de botellas de PET.

Las alternativas deben desarrollarse por etapas y de manera conjunta con la disposición final, lo anterior, para aumentar la eficiencia global del sistema de manejo de las botellas de PET, y evitar que al menos el 80% de las mismas recolectadas por el servicio público de limpia del municipio, sean dispuestas en el relleno sanitario Chiconautla sin ningún aprovechamiento previo.

La selección y aplicación de las tecnologías de reciclaje de las botellas de PET que actualmente se desarrollan, infiere principalmente en el costo de inversión, calidad de materia prima a procesar y el producto final obtenido, lo que conlleva a adecuar muy particularmente las condiciones de operación y requerimientos de insumos para la operación de la tecnología seleccionada.

Se elaboró un ACV de las botellas de PET como residuo en Ecatepec de Morelos, el cual indica que todas las etapas del sistema de estudio contribuyen en todas las categorías de impacto evaluadas, cada una con diferente porcentaje dependiendo principalmente del consumo de insumos, materiales, operación y equipamiento. El orden jerárquico de contribución de impacto ambiental en orden de mayor a menor es el siguiente: recolección, reciclaje a fibra de poliéster, exportación, centros de acopio y finalmente la disposición final.

En el mismo sentido, la recolección contribuye como la mayor contribución porcentual en seis categorías debido al exceso de combustible que demanda el servicio de recolección, y que a su vez se encuentra asociado a la mala planeación y ejecución del servicio por parte del

gobierno municipal, por lo que es necesario una modificación o rediseño al sistema actual de recolección.

El reciclaje a fibra de poliéster que desarrolla TdR, evita todas las categorías de impacto exceptuando el agotamiento de la capa de ozono y la toxicidad terrestre a pesar de ser la etapa que utiliza la mayor cantidad de insumos y materiales para desarrollar su operación en comparación con las restantes etapas del sistema de estudio. Lo anterior, debido a que se reducen las emisiones generadas por sustituir y ahorrar material virgen por botellas de PET como residuo para la producción de fibra de poliéster.

Los impactos ambientales generados por la exportación se derivan del uso de combustible que demanda el transporte terrestre y marítimo que se requiere para trasladar las botellas de PET a otros países, impactos que pueden evitarse minimizando la exportación, dado que los beneficios que presentan las tecnologías de reciclaje de las botellas que se desarrollan en el extranjero, al igual que las que se desarrollan en el país, son los mismos, principalmente, la reducción del consumo de material virgen (ácido tereftálico y etilenglicol).

Los centros de acopio y la disposición final de las botellas de PET contribuyen en todas las categorías de impacto evaluadas, sin embargo, las emisiones generadas por estas etapas no son representativas en comparación con la recolección, el reciclaje y la exportación, no obstante, las emisiones generadas generan impactos al ambiente, los cuales se asocian al consumo de energía eléctrica y uso de combustibles fósiles necesarios para triturar, transportar y construir la celda diaria en donde son dispuestas de manera permanente las botellas de PET recolectadas.

La falta de información por parte de los organismos públicos y privados relacionada con la operación del sistema de estudio ocasionó dificultades para obtener los resultados de la evaluación de impactos, no obstante, los resultados del ACV de las botellas de PET son confiables debido a que los datos faltantes se obtuvieron de manera indirecta por medio del uso de técnicas de ingeniería y el uso de bases de datos de la Unión Europea y de los Estados Unidos. De aquí la necesidad de desarrollar bases de datos nacionales o generar datos para tener una mayor precisión de los resultados obtenidos.

Tomando como fundamento los resultados del ACV de las botellas de PET se desarrollaron diferentes alternativas destinadas a la selección de la mejor estrategia de manejo de las botellas de PET, las cuales podrán mitigar las ineficiencias técnicas, operacionales y ambientales presentes en el actual manejo de las botellas de PET y se propone aplicar esta política a las restantes 19 ZONAS que integran el municipio.

Dentro del mismo contexto, el rediseño del sistema de recolección y almacenamiento planteado, caso particular la de la ZONA 8 de Ecatepec de Morelos considerando la capacidad de contenedores, separación en fuente, horario, frecuencia y rutas de recolección, reducirá el consumo de combustible que demanda la etapa de recolección en al menos 20%, en consecuencia minimizar los impactos ambientales asociados a su operación.

Con la operación de la planta de separación trabajando con el 21.4% de eficiencia de recuperación, se aprovechará y evitará que al menos el 47.15% de las botellas de PET enviadas al relleno sanitario Chiconautla, sean dispuestas sin ningún tratamiento o aprovechamiento previo, y en consecuencia minimizar los impactos y costos asociados a su disposición final.

La inversión inicial que se requiere para operar nuevamente la planta de separación será retornada durante el primer año de operación y se generarán recursos económicos por la venta de las botellas de PET y otros RSU valorizables que podrán ser utilizados para cubrir la demanda de combustible que requiere el servicio de recolección o aumentar su cobertura que actualmente es del 30%.

La construcción de una nueva planta de reciclaje para producir hojuelas con diferentes calidades para su posterior venta aumentará en al menos en un 130% la cantidad de botellas que se reciclan actualmente dentro del municipio y en consecuencia minimizar su disposición final y exportación, como también mitigar los impactos ambientales y costos asociados por estas etapas.

La inversión inicial requerida para la construcción de una nueva planta de reciclaje será retornada durante el segundo año de operación y se generarán recursos económicos que podrán ser utilizados en aumentar la capacidad de la planta, aumentar la calidad de las hojuelas producidas, entre otras actividades relacionadas al manejo de las botellas de PET o los RSU en general.

El inconveniente de la implementación de la incineración de las botellas de PET junto con la fracción inorgánica de los RSU para generar energía eléctrica es que las ganancias por la venta de energía no cubren durante los 20 años de vida útil la inversión inicial ni sus costos de operación, lo que ocasiona que en términos económicos la alternativa no resulte viable, pero en términos ambientales si lo sea debido a que la tecnología de incineración reduce las emisiones atmosféricas generadas por la disposición final de las botellas de PET.

Generarán

6.1. Futuras investigaciones

Las alternativas propuestas se plantearon y desarrollaron a nivel conceptual. El siguiente paso es desarrollar los estudios de mercado, técnicos, socioeconómicos y ambientales considerando todos los aspectos requeridos en la ingeniería de detalle para corroborar su viabilidad. En el ANEXO VI se menciona una breve descripción y los requerimientos generales para desarrollar los estudios antes mencionados.

Posteriormente se pretende realizar una propuesta al gobierno de Ecatepec de Morelos para implementar las alternativas, llevar la propuesta a licitación, y de ganar el concurso, desarrollar el proyecto de inversión relacionado con mejorar la eficiencia global del sistema de manejo de los RSU en el municipio.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abdelaal M. Y., Tariq S. y Makki M. S. (2011). Chemical transformation of pet waste through glycolysis. *Construction and Building Materials*, 3267–3271.
- ALMEX. (2012). *Almex la logística del éxito*. Recuperado el 28 de Octubre de 2012, de www.almex.com.mx
- Aranda Usón A., Zabalza Bribián I. y Martínez Garcia A. (2006). *El Análisis de Ciclo de Vida como Herramienta de Gestión Empresarial*. Madrid: FC Editorial, 63-100.
- Assadi R., Colin X. y Verdu J. (2004). Irreversible structural changes during PET recycling by extrusion. *Polymer*, 4403–4412.
- Ávila, A. y Duarte M. (2003). A mechanical analysis on recycled PET/HDPE composites. *Polymer Degradation and Stability*, 373–382.
- Barboza E., Lopezb D. y Amicoa S. (2009). Determination of a recyclability index for the PET glycolysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 122–128.
- Bare J., Norris G., Pennington D., y McKone T. (2003). TRACI: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 49-78.
- Blank L, y Tarquin A. (2006). *Ingeniería económica*. India: Mc Graw Hill, 126-183.
- Bovea M. e Ibáñez Forés V. (2010). Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. *Waste Management*, 2383-2395.
- Brooks D. W. y Giles G. A. (2002). *PET Packaging Technology*. Londres: Sheffield Academic Press., 37-168.
- Castells X. E. y Cadavid C. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Cataluña, España: Ediciones Díaz de santos, 72-148.
- CFE. (2012). *Comisión Federal de Electricidad*. Recuperado el 13 de Octubre de 2012, de <http://www.cfe.gob.mx>
- Cherubini F. y Bargili S. (2009). Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*, 2116-2123.
- Chiltom T., Burnley S. y Nesaratnam S. (2010). A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of post-consumer PET. *Resources, Conservation and Recycling*, 1241-1249.
- Coelho T., Castro R., y Gabbo Jr. J. (2011). PET containers in Brazil: Opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 291–299.
- Colmer Mendoza F. y Gallardo Izquierdo, A. (2007). *Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos*. Valencia: De la UPV, 182-254.
- den Boer J. y Jager J. (2007). LCA-IWM: A decision support tool for sustainability assessment of waste management systems. *Waste Management*, 1032–1045.
- Deng Y. y Englehardt J. (2006). Treatment of landfill leachete by Fenton process. *ScienceDirect*, 3683-3694.

- Donnini Mancini S., Saide Schuwartzman J. A. y Rodriguez Noriega, A. (2010). Additional steps in mechanical recycling of PET. *Journal of Cleaner Production*, 92–100.
- Durán Moreno A. y Garcés Rodríguez M. (2012). Características y análisis de composición de los residuos sólidos de la Ciudad de México. *Contaminación ambiental*, 39-46.
- El portal de los barcos. (2010). *El portal de los barcos*. Recuperado el 23 de Octubre de 2012, de www.elportaldelosbarcos.com
- Emma Kolmy C., Azzaro C. y Hubert A. (2012). Multiobjective waste management optimization strategy coupling life cycle assessment and genetic algorithms: Application to PET bottles. *Resources, Conservation and Recycling*, 66-81.
- Encarnación Aguilar, Guillermo (19 de Marzo de 2013). Entrevista con el Subdirector de Investigación sobre el Manejo Integral de Residuos del INECC. (Jiménez Ocampo, Ulises, Entrevistador).
- Enríquez García, Franco (20 de Septiembre de 2012). Entrevista con el subsecretario de la secretaría de Obras Públicas de Ecatepec de Morelos. (Jiménez Ocampo, Ulises, Entrevistador)
- Federal Office for the Environment. (2011). *Environmental Impacts of Swiss Consumption and Production. A combination of input - output analysis with life cycle assessment*. Bern: Swiss Confederation.
- Firas A. y Dumitro P. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 1453–1477.
- Flores Cobián, G. (30 de Septiembre de 2012). Entrevista con el gerente de planta de TdR. (Jiménez Ocampo, Ulises, Entrevistador).
- Fortelný I., Michálkova D. y Krulis Z. (2004). An efficient method of material recycling of municipal plastic waste. *Polymer Degradation and Stability*, 975–979.
- G.D.F. (2002). *El PET y su situación actual en el Distrito Federal*. México: Secretaría del medio ambiente, 5-13.
- García Pantigozo J. (2009). *Planta de reciclado para producción de hojuelas de PET*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 32-38.
- García, Santiago (8 de Julio de 2012). Entrevista con Ing. Santiago García, gerente general de APREPET. (Jiménez Ocampo, Ulises, Entrevistador)
- Giles G. y Bain D. (2001). *Technology of Plastic Packaging for the Consumer Market*. Londres: Sheffield Academic Press.
- Gobierno Federal. (2002). *NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes*. México: SEMARNAT, 18-20.
- Gobierno Federal. (2007). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. México: Diario Oficial de la Federación 19 de Junio.
- Güereca Hernández L. P. (2006). *Desarrollo de una metodología para la valoración en el Análisis del Ciclo de Vida aplicada a la Gestión Integral de los Residuos Municipales*. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña, 91-153.

- Gutiérrez Galicia F. (2008). *Análisis del Sistema de Recolección de Residuos Sólidos Urbanos en el Centro Histórico de Morelia, aplicando Sistemas de Información Geográfica*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, 62-84.
- INEGI. (2012). *Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos*. Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de www.inegi.org.mx
- Institute for Environment and Sustainability. (2010). *ILCD Handbook. International reference Life Cycle Data System. General guide for Life Cycle Assessment*. Luxembourg: European Union, 29-304.
- Instituto Brasileño de Administración Municipal. (2006). *Manual de Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales en Ciudades de América Latina y el Caribe*. Brasil, 50-253.
- Instituto Mexicano de Normalización y Certificación. (2008). *NMX-SSA-14040-IMNC-2008. Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Principios y Marco de Referencia*. México., 7-18.
- Instituto Mexicano de Normalización y Certificación. (2008). *NMX-SSA-14044-IMNC-2008. Gestión Ambiental - Análisis del Ciclo de Vida - Requisitos y Directrices*. México, 7-35.
- Instituto Nacional de Ecología. (2008). *Estaciones de Transferencia de Residuos Sólidos en Áreas Urbanas*. México: INE, 25-63.
- Intini F. y Kuhtz S. (2011). Recycling in buildings: an LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer PET bottles. *International Journal Life Cycle Assessment*, 306-315.
- Iriarte A. y Gabarrell X. (2009). LCA of selective waste collection systems in dense urban areas. *Waste Management*, 903-914.
- Kumar R. y Ramjeeawon T. (2013). Comparative life cycle assessment and social life cycle assessment of used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. *International Journal Life Cycle Assessment* , 155–171.
- López Fonseca R. y Gutiérrez Ortiz J. (2010). Chemical recycling of post-consumer PET wastes by glycolysis in the presence of metal salts. *Polymer Degradation and Stability*, 1022–1028.
- Madival S. y Auras R. (2009). Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology. *Journal of Cleaner Production*, 1183-119.
- Madrid Meneses, A. (2011). *Estimación de costos para plantas de proceso tomando como base una planta de polietileno de baja densidad*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, 16-49.
- McDougall F., White P., Franke M. e Hindle P. (2002). *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory*. UK: Blackwell Publishing, 85-370.
- Medina Acosta, J. (23 de Septiembre de 2012). Entrevista con el jefe de departamento de disposición final de residuos de Ecatepec de Morelos (Jiménez Ocampo, Ulises, Entrevistador).
- Mendoza, A. (13 de Abril de 2012). Entrevista con el director general de la cámara de comercio del Municipio de Ecatepec de Morelos. (Jiménez Ocampo, Ulises, Entrevistador).

- Morton-Jones. (1993). *Procesamiento de plásticos: inyección, moldeo, hule, PVC*. México: Limusa, 44-85.
- Nakatani J. y Fujii M. (2010). Life-cycle assessment of domestic and transboundary recycling of post consumer PET bottles. *International Journal Cycle Assess*, 590-597.
- Olabis O. (1997). *Handbook of thermoplastics*. New York: Marcel Dekker, 31-75.
- Organización Panamericana de la Salud /Organización Mundial de la Salud. (2010). *Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2012, de <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/analisis/mexico/mexico.html>
- Parra J., Ania C., Arenillas A. y Rubiera F. (2004). High value carbon materials from PET recycling. *Applied Surface Science*, 304–308.
- Poeschl M., Ward S. y Owende P. (2012). Environmental impacts of biogas deployment-Part I: life cycle inventory for evaluation of production process emissions to air. *Journal of Cleaner Production*, 168-183.
- PRé. (2012). *PRé sustainability*. Recuperado el 10 de Octubre de 2012, de <http://www.pre-sustainability.com>
- Rigamonti L. y Grosso M. (2009). Influence of assumptions about selection and recycling efficiencies on the LCA of integrated waste management systems. *International Journal Life Cycle Assessment* , 411-419.
- Rives J. y Rieradevall J. (2010). LCA comparison of container systems in municipal solid waste management. *Waste Management*, 949–957.
- Saldívar Ríos R. (2004). *Análisis técnico para la localización de incineradores en estaciones de transferencia de la Ciudad de México*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, 74-81.
- SCT. (2004). *Rendimientos combustible para vehículos, maquinaria y equipo de conservación*. Recuperado el 4 de Abril de 2013, de http://www.capufe.gob.mx/normateca/normas/77_Bases_para_la_Administracion_del_Parque_de_Maquinaria_a_cargo_de_CAPUFE_dic_05/Anexo05.pdf
- SEDESOL. (1997). *Manual Técnico sobre Generación, Recolección y Transferencia de Residuos Sólidos Municipales*. México, 25-143.
- SEDESOL. (2006). *Manual para el Diseño de Rutas de Recolección de Residuos Sólidos Municipales*. México, 9-27.
- SEDESOL. (2012). *Secretaría de Desarrollo Social*. Recuperado el 6 de Julio de 2012, de <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=15&mun=033>
- SEDESOL. (2012). *Unidad de Microrregiones*. Recuperado el 13 de Junio de 2012, de <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/indRezSocial.aspx?ent=15&mun=033>
- SEMARNAT. (2011). *Curso Gestión Integral de Residuos Sólidos y Residuos de Manejo Especial*. Recuperado el 18 de Enero de 2011, de www.semarnat.gob.mx
- SEMARNAT. (2012). *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos naturales*. Recuperado el 31 de Julio de 2013, de http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/index.html

- SEMARNAT. (2013). *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 31 de Julio de 2013, de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RSM01_03&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce
- SENER. (2012). *Secretaría de Energía*. Recuperado el 22 de Octubre de 2012, de http://www.sener.gob.mx/res/Acerca_de/ListaCombustiblesConsideranIdentificarUsuariosPac.pdf
- SENER. (2012). *Secretaría de Energía*. Recuperado el 5 de Actubre de 2012, de http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_694_a2_tablas_y_figura?page=2
- Sharholy M., Ahmad K., Mahmood G., y Trivedi R. (2007). Municipal solid waste management in Indian cities. *Waste Management*, 459–467.
- Shen L. y Nieuwlaar E. (2011). Life cycle energy and GHG emissions of PET recycling: change-oriented effects. *International Journal Life Cycle Assessment*, 522–536.
- Shen L., Worrell E. y Patel M. (2010). Open-loop recycling: A LCA case study of PET. *Resources, Conservation and Recycling*, 34–52.
- Shukla S. y Harad A. (2009). Chemical recycling of PET waste into hydrophobic textile dyestuffs. *Polymer Degradation and Stability*, 604–609.
- Slagstad H. y Brattebø H. (2012). LCA for household waste management when planning a new urban settlement. *Waste Management*, 1482–1490.
- Society of Environmental Toxicology and Chemistry. (2012). *SETAC*. Recuperado el 26 de Abril de 2012, de <http://www.setac.org/>
- Tchobanoglous G. y Theisen H. (1993). *Integrated Solid Waste Management*. California: McGraw-Hill, 43-878.
- Viana M., Carvalho G. y Riul A. (2011). Chemical recycling of PET by catalyzed glycolysis: Kinetics of the heterogeneous reaction. *Chemical Engineering Journal*, 210–219.
- Welle F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling-An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 865–875.
- Williams P. T. (2005). *Waste Treatment and Disposal*. Reino Unido: John Wiley y Sons, 63-357.
- Wittmaier M. y Langer S. (2009). Possibilities and limitations of life cycle assessment (LCA) in the development of waste utilization systems – Applied examples for a region in Northern Germany. *Waste Management*, 1732–1738.
- Yang Y., Lu Y., Xiang H. y Xu Y. (2002). Study on methanolytic depolymerization of PET with supercritical methanol for chemical recycling. *Polymer Degradation and Stability*, 185–191.

ANEXO I: EMISIONES AL AIRE Y DESCARGAS AL AGUA GENERADAS EN CADA ETAPA DEL SISTEMA DE ESTUDIO

En este apartado se presenta todas las emisiones al aire, descargas al agua y generación de residuo sólidos generados por el uso de combustibles (diésel, gasolina y gas natural) y uso de energía eléctrica en cada etapa del sistema de estudio.

Recolección

Tabla 39. Emisiones generadas por el uso de diésel como combustible en la recolección.

Diésel utilizado en la recolección 13,606.8 litros

Emisiones al aire

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diésel	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Partículas	1.2432	16915.9738	0.016915974
CO	16.548	225165.326	0.225165326
CO ₂	3015.6	41032666.1	41.03266608
CH ₄	3.6708	49947.8414	0.049947841
NO _x	54.264	738359.395	0.738359395
N ₂ O	0.072828	990.95603	0.000990956
SO _x	4.5444	61834.7419	0.061834742
HCl	0.0061656	83.8940861	8.38941 x 10 ⁻⁵
HF	0.00064428	8.7665891	8.76659 x 10 ⁻⁶
Hidrocarburos clorados	1.73 x 10 ⁻⁸	0.00023545	2.35452 x 10 ⁻¹⁰
NH ₃	0.000081984	1.11553989	1.11554 x 10 ⁻⁶
Cd	0.000029316	0.39889695	3.98897 x 10 ⁻⁷
Pb	0.00016128	2.1945047	2.1945 x 10 ⁻⁶
Mn	2.47 x 10 ⁻⁶	0.03360335	3.36034 x 10 ⁻⁸
Hg	3.02 x 10 ⁻⁶	0.04103267	4.10327 x 10 ⁻⁸
Ni	0.0014532	19.7734018	1.97734 x 10 ⁻⁵
Zn	0.000966	13.1441688	1.31442 x 10 ⁻⁵

Descargas al agua

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diésel	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
DBO	0.0041328	56.234183	5.62342 x 10 ⁻⁵
DQO	0.13524	1840.18363	0.001840184
Sólidos suspendidos	2.6208	35660.7014	0.035660701
Compuestos orgánicos totales	0.42252	5749.14514	0.005749145
Haluros orgánicos absorbibles	0.0001806	2.45738808	2.45739 x 10 ⁻⁶
Hidrocarburos clorados	0.00004023	0.5474832	5.47483 x 10 ⁻⁷
Fenol	0.0060816	82.7511149	8.27511 x 10 ⁻⁵
Al	0.012096	164.587853	0.000164588
NH ₄	0.1008	1371.56544	0.001371565

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
As	0.00006014	0.81836738	8.18367×10^{-5}
Ba	0.11592	1577.30026	0.0015773
Cd	0.00005098	0.69378352	6.93784×10^{-7}
Cl ⁻	24.528	333747.59	0.33374759
Cr	0.00050736	6.90354605	6.90355×10^{-6}
Cu	0.00014196	1.93162133	1.93162×10^{-6}
CN ⁻	0.00018144	2.46881779	2.46882×10^{-6}
Fe	0.025788	350.892158	0.000350892
Pb	0.00012342	1.67935126	1.67935×10^{-6}
Hg	4.536×10^{-7}	0.00617204	6.17204×10^{-9}
Ni	0.00018816	2.56025549	2.56026×10^{-6}
NO ₃ ⁻	0.03024	411.469632	0.00041147
PO ₄ ³⁻	0.0011928	16.230191	1.62302×10^{-5}
SO ₄ ²⁻	0.8652	11772.6034	0.011772603
S ²⁻	0.0014448	19.6591046	1.96591×10^{-5}
Zn	0.00053676	7.30358597	7.30359×10^{-6}

Generación de Residuos Sólidos

	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Residuos sólidos totales en gramos	Residuos sólidos totales en ton
Residuos sólidos	5.7	77558.76	0.07755876

Centros de acopio

Tabla 40. Emisiones generadas por el uso de diesel como combustible en los centros de acopio.

Diésel utilizado en los centros de acopio **384.425 litros**

Emisiones al aire

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Partículas	1.2432	477.6996	0.0004777
CO	16.548	6358.569	0.006358569
CO ₂	3015.6	1158744.3	1.1587443
CH ₄	3.6708	1410.5049	0.001410505
NO _x	54.264	20850.942	0.020850942
N ₂ O	0.072828	27.984159	2.79842×10^{-5}
SO _x	4.5444	1746.1857	0.001746186
HCl	0.0061656	2.3691318	2.36913×10^{-6}
HF	0.00064428	0.24756459	2.47565×10^{-7}
Hidrocarburos clorados	1.73×10^{-8}	6.64906×10^{-6}	6.64906×10^{-12}
NH ₃	0.000081984	0.031502352	3.15024×10^{-8}
Cd	0.000029316	0.011264673	1.12647×10^{-8}
Pb	0.00016128	0.06197184	6.19718×10^{-8}
Mn	2.47×10^{-6}	0.000948944	9.48944×10^{-8}
Hg	3.02×10^{-6}	0.001158744	1.15874×10^{-9}

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Ni	0.0014532	0.5583921	5.58392×10^{-7}
Zn	0.000966	0.3711855	3.71186×10^{-7}

Descargas al agua

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
DBO	0.0041328	1.5880284	1.58803×10^{-6}
DQO	0.13524	51.96597	5.1966×10^{-5}
Solidos suspendidos	2.6208	1007.0424	0.001007042
Compuestos orgánicos totales	0.42252	162.35331	0.000162353
Haluros orgánicos absorbibles	0.0001806	0.06939555	6.93956×10^{-8}
Hidrocarburos clorados	0.00004023	0.015460683	1.54607×10^{-8}
Fenol	0.0060816	2.3368548	2.33685×10^{-6}
Al	0.012096	4.647888	4.64789×10^{-6}
NH ₄	0.1008	38.7324	3.87324×10^{-5}
As	0.00006014	0.023110332	2.31103×10^{-8}
Ba	0.11592	44.54226	4.45423×10^{-5}
Cd	0.00005098	0.019592139	1.95921×10^{-8}
Cl ⁻	24.528	9424.884	0.009424884
Cr	0.00050736	0.19495308	1.94953×10^{-7}
Cu	0.00014196	0.05454813	5.45481×10^{-8}
CN ⁻	0.00018144	0.06971832	6.97183×10^{-8}
Fe	0.025788	9.909039	9.90904×10^{-6}
Pb	0.00012342	0.047424135	4.74241×10^{-8}
Hg	4.536×10^{-7}	0.000174296	1.74296×10^{-10}
Ni	0.00018816	0.07230048	7.23005×10^{-8}
NO ₃ ⁻	0.03024	11.61972	1.16197×10^{-5}
PO ₄ ³⁻	0.0011928	0.4583334	4.58333×10^{-7}
SO ₄ ²⁻	0.8652	332.4531	0.000332453
S ²⁻	0.0014448	0.5551644	5.55164×10^{-7}
Zn	0.00053676	0.20625003	2.0625×10^{-7}

Generación de Residuos Sólidos

	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Residuos sólidos totales en gramos	Residuos sólidos totales en ton
Residuos sólidos	5.7	2190.225	0.002190225

Tabla 41. Emisiones generadas por el uso de energía eléctrica en los centros de acopio.

Energía eléctrica utilizada en los centros de acopio	18,312.967 kWh
------------------------------------------------------	----------------

Combustible	Fracción de producción de energía en México	kWh generados por cada combustible
Carbón	0.089	1629.85344
Petróleo	0.183	3351.27168
Gas Natural	0.488	8936.72448
Nuclear	0.042	769.14432

Emisiones al aire

Compuesto	Carbón	Emisiones	Petróleo	Emisiones	Gas natural	Emisiones	Nuclear	Emisiones	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Partículas	1.73	2819.646451	0.376	1260.07815	0.0652	582.674436	0.0179	13.7676833	4676.16672	0.00467617
CO	0.125	203.73168	0.223	747.333585	0.267	2386.10544	0.00565	4.34566541	3341.51637	0.00334152
CO ₂	979	1595626.518	880	2949119.08	767	6854467.68	5.71	4391.81407	11403605.1	11.4036051
CH ₄	4.26	6943.175654	1.1	3686.39885	1.76	15728.6351	0.0138	10.6141916	26368.8238	0.02636882
NO _x	2.52	4107.230669	1.96	6568.49249	1.49	13315.7195	0.0199	15.305972	24006.7486	0.02400675
N ₂ O	0.00606	9.876911846	0.0194	65.0146706	0.00558	49.8669226	0.000152	0.11690994	124.875415	0.00012488
SO _x	4.02	6552.010829	9.3	31166.8266	0.265	2368.23199	0.0214	16.4596884	40103.5291	0.04010353
HCl	0.3	488.956032	0.00969	32.4738226	0.000619	5.53183245	0.000361	0.2776611	527.239348	0.00052724
HF	0.0319	51.99232474	0.000973	3.26078734	0.0000528	0.47185905	0.000108	0.08306759	55.8080387	5.5808 x 10 ⁻⁵
CH-clorados	1.06 x 10 ⁻⁸	1.72764 x 10 ⁻⁵	1.55 x 10 ⁻⁹	5.1945 x 10 ⁻⁶	1.55 x 10 ⁻⁹	1.3852 x 10 ⁻⁵	7.61E x 10 ⁻⁷	0.00058532	0.00062164	6.2164 x 10 ⁻¹⁰
NH ₃	0.00584	9.51834409	0.000756	2.53356139	0.000194	1.73372455	0.000146	0.11229507	13.8979251	1.3898 x 10 ⁻⁵
Cd	0.0000046	0.007595117	0.0000596	0.19973579	2.29 x 10 ⁻⁷	0.00204651	1.23 x 10 ⁻⁷	9.4605 x 10 ⁻⁵	0.20947202	2.0947 x 10 ⁻⁷
Pb	0.000183	0.29826318	0.000518	1.73595873	0.00000361	0.03226158	7.95 x 10 ⁻⁷	0.00061147	2.06709495	2.0671 x 10 ⁻⁶
Mn	0.000111	0.180913732	0.000158	0.52950093	0.00000296	0.0264527	1.94 x 10 ⁻⁷	0.00014921	0.73701658	7.3702 x 10 ⁻⁷
Hg	0.0000385	0.062749357	0.0000027	0.00935005	0.0000146	0.13047618	1.46 x 10 ⁻⁷	0.0001123	0.20268788	2.0269 x 10 ⁻⁷
Ni	0.000464	0.756251996	0.00452	15.147748	0.00000488	0.04361122	0.00000398	0.00306119	15.9506724	1.5951 x 10 ⁻⁵
Zn	0.00035	0.570448704	0.000379	1.27013197	0.00000582	0.05201174	0.00000948	0.00729149	1.8998839	1.8999 x 10 ⁻⁶

Descargas al agua

Compuesto	Carbón	Descargas	Petróleo	Descargas	Gas natural	Descargas	Nuclear	Descargas	Descargas totales en gramos	Descargas totales en ton
DBO	0.00013	0.2265496	0.000601	2.01411428	0.0000195	0.17426613	0.0000245	0.01884404	2.43377407	2.4338 x 10 ⁻⁶
DQO	0.00435	7.0898624	0.0107	35.858607	0.000249	2.2252444	0.000167	0.1284471	45.3021609	4.5302 x 10 ⁻⁵
SS	0.0363	59.163679	0.786	2634.09954	0.22	1966.07939	0.0802	61.6853745	4721.02798	0.00472103
Compuestos orgánicos totales	0.00494	8.0514759	0.107	358.58607	0.239	2135.87715	0.00312	2.39973028	2504.91443	0.00250491
Haluros orgánicos absorbibles	0.000002	0.002477	0.0000476	0.15952053	1.18 x 10 ⁻⁷	0.00105453	8.69 x 10 ⁻⁸	6.6839 x 10 ⁻⁵	0.16311928	1.6312 x 10 ⁻⁷
CH-clorados	0.0000004	0.0008018	0.0000121	0.04055039	0.00000338	0.03020613	4.6 x 10 ⁻⁸	3.5381 x 10 ⁻⁵	0.07159378	7.1594 x 10 ⁻⁸
Fenol	0.0000662	0.1078962	0.00198	6.63551793	0.0000386	0.34495756	0.00000361	0.00277661	7.0911484	7.0911 x 10 ⁻⁶
Al	0.975	1589.1071	0.00399	13.371574	0.089	795.368479	0.0102	7.84527206	2405.69243	0.00240569
NH ₄	0.00142	2.3143918	0.0138	46.2475492	0.000664	5.93398505	0.00426	3.2765548	57.7724809	5.7772 x 10 ⁻⁵
As	0.00197	3.2108112	0.000019	0.06367416	0.000178	1.59073696	0.00000807	0.00620699	4.87142939	4.8714 x 10 ⁻⁶
Ba	0.0791	128.92140	0.0348	116.624254	0.00719	64.255049	0.000108	0.08306759	309.883778	0.00030988
Cd	0.0000507	0.0826335	0.000015	0.05026908	0.00000449	0.04012589	0.00000249	0.00191517	0.17494371	1.7494 x 10 ⁻⁷
Cl ⁻	6.3	10268.076	7.38	24732.385	0.631	5639.07315	0.136	104.603628	40744.1384	0.04074414
Cr	0.00977	15.923668	0.000156	0.52279838	0.000911	8.141356	0.0000348	0.02676622	24.6145887	2.4615 x 10 ⁻⁵
Cu	0.00489	7.9699833	0.0000441	0.14779108	0.000445	3.97684239	0.000001	0.00076914	12.0953859	1.2095 x 10 ⁻⁵
CN ⁻	0.0000062	0.0102354	0.0000528	0.17694714	0.0000685	0.61216563	1.61 x 10 ⁻⁷	0.00012383	0.79947208	7.9947 x 10 ⁻⁷
Fe	0.303	493.84559	0.00827	27.7150168	0.0282	252.01563	0.00559	4.29951675	777.875756	0.00077788
Pb	0.0049	7.9862818	0.0000413	0.13840752	0.000448	4.00365257	0.000502	0.38611045	12.5144524	1.2514 x 10 ⁻⁵
Hg	0.0000013	0.0022654	1.65 x 10 ⁻⁷	0.00055296	7.82 x 10 ⁻⁷	0.00698852	1.05 x 10 ⁻⁸	8.076 x 10 ⁻⁶	0.00981505	9.8151 x 10 ⁻⁹
Ni	0.00493	8.0351774	0.0000583	0.19537914	0.000448	4.00365257	0.0000167	0.01284471	12.2470539	1.2247 x 10 ⁻⁵
NO ₃ ⁻	0.0235	38.301555	0.00927	31.0662885	0.0000527	0.47096538	0.000531	0.40841563	70.2472253	7.0247 x 10 ⁻⁵
PO ₄ ³⁻	0.0585	95.346426	0.000369	1.23661925	0.00533	47.6327415	0.0000633	0.04868684	144.264474	0.00014426
SO ₄ ²⁻	4.35	7089.8624	0.274	918.24844	0.462	4128.76671	2.07	1592.12874	13729.0064	0.01372901
S ²⁻	0.000014	0.0228179	0.000421	1.41088538	0.0000648	0.57909975	0.00000263	0.00202285	2.01482592	2.0148 x 10 ⁻⁶
Zn	0.00982	16.005160	0.000159	0.5328522	0.000894	7.98943169	0.0000572	0.04399506	24.5714397	2.4571 x 10 ⁻⁵

Generación de Residuos Sólidos

	Carbón	Residuos	Petróleo	Residuos	Gas Natural	Residuos	Nuclear	Residuos	Residuos totales en gramos	Residuos totales en ton
Residuos sólidos	219.9	358404.7715	16.5	55295.9827	27.1	242185.233	4	3076.57728	658962.565	0.65896256

Exportación

Tabla 42. Emisiones generadas por el uso de diesel como combustible en la exportación.

Diésel utilizado en la exportación 12,722.847 litros

Emisiones al aire

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Partículas	1.2432	15817.07696	0.015817077
CO	16.548	210538.119	0.210538119
CO ₂	3015.6	38367098.83	38.36709883
CH ₄	3.6708	46703.12588	0.046703126
NO _x	54.264	690394.0347	0.690394035
N ₂ O	0.072828	926.5814677	0.000926581
SO _x	4.5444	57817.82861	0.057817829
HCl	0.0061656	78.44415193	7.84442 x 10 ⁻⁵
HF	0.00064428	8.197093261	8.19709 x 10 ⁻⁶
Hidrocarburos clorados	1.73 x 10 ⁻⁸	0.000220157	2.20157 x 10 ⁻¹⁰
NH ₃	0.000081984	1.043072102	1.04307 x 10 ⁻⁶
Cd	0.000029316	0.372983774	3.72984 x 10 ⁻⁷
Pb	0.00016128	2.051945119	2.05195 x 10 ⁻⁶
Mn	2.47 x 10 ⁻⁶	0.03142041	3.14204 x 10 ⁻⁸
Hg	3.02 x 10 ⁻⁶	0.038367099	3.83671 x 10 ⁻⁸
Ni	0.0014532	18.4888805	1.84889 x 10 ⁻⁵
Zn	0.000966	12.29029628	1.22903 x 10 ⁻⁵

Descargas al agua

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
DBO	0.0041328	52.58109367	5.25811 x 10 ⁻⁵
DQO	0.13524	1720.64148	0.001720641
Sólidos suspendidos	2.6208	33344.10818	0.033344108
Compuestos orgánicos totales	0.42252	5375.668722	0.005375669
Haluros orgánicos absorbibles	0.0001806	2.297751044	2.29775 x 10 ⁻⁶
Hidrocarburos clorados	0.00004023	0.511917558	5.11918 x 10 ⁻⁷
Fenol	0.0060816	77.37543052	7.73754 x 10 ⁻⁵
Al	0.012096	153.8958839	0.000153896
NH ₄	0.1008	1282.465699	0.001282466
As	0.00006014	0.765204534	7.65205 x 10 ⁻⁷
Ba	0.11592	1474.835554	0.001474836
Cd	0.00005098	0.6487139	6.48714 x 10 ⁻⁷
Cl ⁻	24.528	312066.6535	0.312066653
Cr	0.00050736	6.455077353	6.45508 x 10 ⁻⁶
Cu	0.00014196	1.806139193	1.80614 x 10 ⁻⁶
CN ⁻	0.00018144	2.308438259	2.30844 x 10 ⁻⁶
Fe	0.025788	328.0974747	0.000328097
Pb	0.00012342	1.570257109	1.57026 x 10 ⁻⁶
Hg	4.536 x 10 ⁻⁷	0.005771096	5.7711 x 10 ⁻⁹
Ni	0.00018816	2.393935972	2.39394 x 10 ⁻⁶

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Emissiones totales en gramos	Emissiones totales en ton
NO ₃ ⁻	0.03024	384.7397098	0.00038474
PO ₄ ³⁻	0.0011928	15.17584411	1.51758 x 10 ⁻⁵
SO ₄ ²⁻	0.8652	11007.83058	0.011007831
S ²⁻	0.0014448	18.38200836	1.8382 x 10 ⁻⁵
Zn	0.00053676	6.829129848	6.82913 x 10 ⁻⁶

Generación de Residuos Sólidos

	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Residuos sólidos totales en gramos	Residuos sólidos totales en ton
Residuos sólidos	5.7	72520.3818	0.072520382

Reciclaje a fibra de poliéster

Tabla 43. Emisiones generadas por el uso de diésel como combustible en el reciclaje.

Diesel utilizado en el reciclaje 407 litros

Emisiones al aire

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Emissiones totales en gramos	Emissiones totales en ton
Partículas	1.2432	505.9824	0.000505982
CO	16.548	6735.036	0.006735036
CO ₂	3015.6	1227349.2	1.2273492
CH ₄	3.6708	1494.0156	0.001494016
NO _x	54.264	22085.448	0.022085448
N ₂ O	0.072828	29.640996	2.9641 x 10 ⁻⁵
SO _x	4.5444	1849.5708	0.001849571
HCl	0.0061656	2.5093992	2.5094 x 10 ⁻⁶
HF	0.00064428	0.26222196	2.62222 x 10 ⁻⁷
Hidrocarburos clorados	1.73 x 10 ⁻⁸	7.04273 x 10 ⁻⁶	7.04273 x 10 ⁻¹²
NH ₃	0.000081984	0.033367488	3.33675 x 10 ⁻⁸
Cd	0.000029316	0.011931612	1.19316 x 10 ⁻⁸
Pb	0.00016128	0.06564096	6.5641 x 10 ⁻⁸
Mn	2.47 x 10 ⁻⁶	0.001005127	1.00513 x 10 ⁻⁹
Hg	3.02 x 10 ⁻⁶	0.001227349	1.22735 x 10 ⁻⁹
Ni	0.0014532	0.5914524	5.91452 x 10 ⁻⁷
Zn	0.000966	0.393162	3.93162 x 10 ⁻⁷

Descargas al agua

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel)	Emissiones totales en gramos	Emissiones totales en ton
DBO	0.0041328	1.6820496	1.68205 x 10 ⁻⁶
DQO	0.13524	55.04268	5.50427 x 10 ⁻⁵
Sólidos suspendidos	2.6208	1066.6656	0.001066666
Compuestos orgánicos totales	0.42252	171.96564	0.000171966
Haluros orgánicos absorbibles	0.0001806	0.0735042	7.35042 x 10 ⁻⁸

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel)	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Hidrocarburos clorados	0.00004023	0.016376052	1.63761×10^{-8}
Fenol	0.0060816	2.4752112	2.47521×10^{-6}
Al	0.012096	4.923072	4.92307×10^{-6}
NH ₄	0.1008	41.0256	4.10256×10^{-5}
As	0.00006014	0.024478608	2.44786×10^{-8}
Ba	0.11592	47.17944	4.71794×10^{-5}
Cd	0.00005098	0.020752116	2.07521×10^{-8}
Cl ⁻	24.528	9982.896	0.009982896
Cr	0.00050736	0.20649552	2.06496×10^{-7}
Cu	0.00014196	0.05777772	5.77777×10^{-8}
CN ⁻	0.00018144	0.07384608	7.38461×10^{-8}
Fe	0.025788	10.495716	1.04957×10^{-5}
Pb	0.00012342	0.05023194	5.02319×10^{-8}
Hg	4.536×10^{-7}	0.000184615	1.84615×10^{-10}
Ni	0.00018816	0.07658112	7.65811×10^{-8}
NO ₃ ⁻	0.03024	12.30768	1.23077×10^{-5}
PO ₄ ³⁻	0.0011928	0.4854696	4.8547×10^{-7}
SO ₄ ²⁻	0.8652	352.1364	0.000352136
S ²⁻	0.0014448	0.5880336	5.88034×10^{-7}
Zn	0.00053676	0.21846132	2.18461×10^{-7}

Generación de Residuos Sólidos

	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Residuos sólidos totales en gramos	Residuos sólidos totales en ton
Residuos sólidos	5.7	2319.9	0.0023199

Tabla 44. Emisiones generadas por el uso del gas natural como combustible en el reciclaje.

Gas natural utilizado en el reciclaje $7,142.85 \text{ m}^3$

Emisiones al aire

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 m ³ de gas natural	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Partículas	0.123	878.572764	0.000878573
CO	0.97	6928.58196	0.006928582
CO ₂	2290	16357167.72	16.35716772
CH ₄	6.46	46142.92728	0.046142927
NO _x	2.43	17357.16924	0.017357169
N ₂ O	0.0247	176.4288396	0.000176429
SO _x	1.29	9214.29972	0.0092143
HCl	0.0143	102.1430124	0.000102143
HF	0.00151	10.78573068	1.07857×10^{-5}
Hidrocarburos clorados	5.04×10^{-8}	0.000360001	3.60001×10^{-10}
NH ₃	0.000228	1.628573904	1.62857×10^{-6}
Cd	0.00000172	0.012285733	1.22857×10^{-8}
Pb	0.0000166	0.118571609	1.18572×10^{-7}
Mn	0.00000718	0.051285792	5.12858×10^{-8}
Hg	0.0000725	0.51785793	5.17858×10^{-7}

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 m ³ de gas natural	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Ni	0.0000994	0.710001079	7.10001 x 10 ⁻⁷
Zn	0.0000343	0.245000372	2.45 x 10 ⁻⁷

Descargas al agua

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 m ³ de gas natural	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
DBO	0.000111	0.792858348	7.92858 x 10 ⁻⁷
DQO	0.0015	10.714302	1.07143 x 10 ⁻⁵
Solidos suspendidos	1.13	8071.44084	0.008071441
Compuestos orgánicos totales	1.11	7928.58348	0.007928583
Haluros orgánicos absorbibles	0.00000131	0.009357157	9.35716 x 10 ⁻⁹
Hidrocarburos clorados	0.0000173	0.123571616	1.23572 x 10 ⁻⁷
Fenol	0.000232	1.657145376	1.65715 x 10 ⁻⁶
Al	0.0346	247.1432328	0.000247143
NH ₄	0.000811	5.792865948	5.79287 x 10 ⁻⁶
As	0.0000696	0.497143613	4.97144 x 10 ⁻⁷
Ba	0.00363	25.92861084	2.59286 x 10 ⁻⁵
Cd	0.0000023	0.016428596	1.64286 x 10 ⁻⁸
Cl ⁻	0.0437	312.1433316	0.000312143
Cr	0.000455	3.25000494	3.25 x 10 ⁻⁶
Cu	0.000171	1.221430428	1.22143 x 10 ⁻⁶
CN ⁻	0.00000274	0.019571458	1.95715 x 10 ⁻⁸
Fe	0.056	400.000608	0.000400001
Pb	0.000204	1.457145072	1.45715 x 10 ⁻⁶
Hg	0.00000367	0.026214326	2.62143 x 10 ⁻⁸
Ni	0.000174	1.242859032	1.24286 x 10 ⁻⁶
NO ₃ ⁻	0.00105	7.5000114	7.50001 x 10 ⁻⁶
PO ₄ ³⁻	0.00206	14.71430808	1.47143 x 10 ⁻⁵
SO ₄ ²⁻	0.0391	279.2861388	0.000279286
S ²⁻	0.0000125	0.08928585	8.92859 x 10 ⁻⁸
Zn	0.000349	2.492860932	2.49286 x 10 ⁻⁶

Generación de Residuos Sólidos

	Gramos generados por el uso de 1 m ³ de gas natural	Residuos sólidos totales en gramos	Residuos sólidos totales en ton
Residuos sólidos	3	21428.604	0.021428604

Tabla 45. Emisiones generadas por el uso de energía eléctrica en el reciclaje.

Energía eléctrica utilizada en los centros de acopio 651,849.12 kWh

Combustible	Fración de producción de energía en México	kWh generados por cada combustible
Carbón	0.089	58014.57168
Petróleo	0.183	119288.389
Gas Natural	0.488	318102.3706
Nuclear	0.042	27377.66304

Emisiones al aire

Compuesto	Carbón	Emisiones	Petróleo	Emisiones	Gas Natural	Emisiones	Nuclear	Emisiones	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Partículas	1.73	100365.209	0.376	44852.4342	0.0652	20740.2746	0.0179	490.060168	166447.978	0.16644798
CO	0.125	7251.82146	0.223	26601.3107	0.267	84933.3329	0.00565	154.683796	118941.149	0.11894115
CO ₂	979	56796265.67	880	104973782	767	243984518	5.71	156326.456	405910893	405.910893
CH ₄	4.26	247142.0754	1.1	131217.228	1.76	559860.172	0.0138	377.81175	938597.287	0.93859729
NO _x	2.52	146196.7206	1.96	233805.242	1.49	473972.532	0.0199	544.815494	854519.311	0.85451931
N ₂ O	0.00606	351.5683044	0.0194	2314.19475	0.00558	1775.01123	0.000152	4.16140478	4444.93568	0.00444494
SO _x	4.02	233218.5782	9.3	1109382.02	0.265	84297.1282	0.0214	585.881989	1427483.61	1.42748361
HCl	0.3	17404.3715	0.00969	1155.90449	0.000619	196.905367	0.000361	9.88333636	18767.0647	0.01876706
HF	0.0319	1850.664837	0.000973	116.067602	0.0000528	16.7958052	0.000108	2.95678761	1986.48503	0.00198649
CH-clorados	1.06 x 10 ⁻⁸	0.000614954	1.55 x 10 ⁻⁹	0.0001849	1.55 x 10 ⁻⁹	0.00049306	7.61 x 10 ⁻⁷	0.0208344	0.02212731	2.2127 x 10 ⁻⁸
NH ₃	0.00584	338.8050986	0.000756	90.1820221	0.000194	61.7118599	0.000146	3.9971388	494.696119	0.0004947
Cd	0.00000466	0.270347904	0.0000596	7.10958798	2.29 x 10 ⁻⁷	0.07284544	1.23 x 10 ⁻⁷	0.00336745	7.45614878	7.4561 x 10 ⁻⁶
Pb	0.000183	10.61666662	0.000518	61.7913855	0.00000361	1.14834956	7.95 x 10 ⁻⁷	0.02176524	73.5781669	7.3578 x 10 ⁻⁵
Mn	0.000111	6.439617456	0.000158	18.8475655	0.00000296	0.94158302	1.94 x 10 ⁻⁷	0.00531127	26.2340772	2.6234 x 10 ⁻⁵
Hg	0.0000385	2.23356101	0.00000279	0.33281461	0.0000146	4.64429461	1.46 x 10 ⁻⁷	0.00399714	7.21466736	7.2147 x 10 ⁻⁶
Ni	0.000464	26.91876126	0.00452	539.183518	0.00000488	1.55233957	0.00000398	0.1089631	567.763582	0.00056776
Zn	0.00035	20.30510009	0.000379	45.2102994	0.00000582	1.8513558	0.00000948	0.25954025	67.6262955	6.7626 x 10 ⁻⁵

Descargas al agua

Compuesto	Carbón	Descargas	Petróleo	Descargas	Gas Natural	Descargas	Nuclear	Descargas	Descargas totales en gramos	Descargas totales en ton
DBO	0.000139	8.0640254	0.000601	71.6923218	0.0000195	6.20299623	0.0000245	0.67075274	86.6300962	8.663 x 10 ⁻⁵
DQO	0.00435	252.36338	0.0107	1276.38576	0.000249	79.2074903	0.000167	4.57206973	1612.52871	0.00161253
SS	0.0363	2105.9289	0.786	93760.6737	0.22	69982.5215	0.0802	2195.68858	168044.813	0.16804481
Compuestos orgánicos totales	0.00494	286.59198	0.107	12763.8576	0.239	76026.4666	0.00312	85.4183087	89162.3345	0.08916233
Haluros orgánicos absorbibles	0.0000015	0.0881821	0.0000476	5.67812731	1.18 x 10 ⁻⁷	0.03753608	8.69 x 10 ⁻⁸	0.00237912	5.80622466	5.8062 x 10 ⁻⁶
CH-clorados	0.0000004	0.0285431	0.0000121	1.44338951	0.00000338	1.07518601	4.6 x 10 ⁻⁸	0.00125937	2.54837806	2.5484 x 10 ⁻⁶
Fenol	0.0000662	3.8405646	0.00198	236.19101	0.0000386	12.2787515	0.00000361	0.09883336	252.40916	0.00025241
Al	0.975	56564.207	0.00399	475.960672	0.089	28311.111	0.0102	279.252163	85630.5312	0.08563053
NH ₄	0.00142	82.380691	0.0138	1646.17977	0.000664	211.219974	0.00426	116.628845	2056.40928	0.00205641
As	0.00197	114.28870	0.000019	2.26647939	0.000178	56.622222	0.00000807	0.22093774	173.398345	0.0001734
Ba	0.0791	4588.9526	0.0348	4151.23594	0.00719	2287.15604	0.000108	2.95678761	11030.3014	0.0110303
Cd	0.0000507	2.9413387	0.000015	1.78932583	0.00000449	1.42827964	0.00000249	0.06817038	6.22711464	6.2271 x 10 ⁻⁶
Cl ⁻	6.3	365491.80	7.38	880348.311	0.631	200722.596	0.136	3723.36217	1450286.07	1.45028607
Cr	0.00977	566.80236	0.000156	18.6089887	0.000911	289.79126	0.0000348	0.95274267	876.155356	0.00087616
Cu	0.00489	283.69125	0.0000441	5.26061795	0.000445	141.555555	0.000001	0.02737766	430.534806	0.00043053
CN ⁻	0.0000062	0.3643315	0.0000528	6.29842694	0.0000685	21.7900124	1.61 x 10 ⁻⁷	0.0044078	28.4571786	2.8457 x 10 ⁻⁵
Fe	0.303	17578.415	0.00827	986.514977	0.0282	8970.48685	0.00559	153.041136	27688.4582	0.02768846
Pb	0.0049	284.27140	0.0000413	4.92661046	0.000448	142.509862	0.000502	13.7435868	445.451461	0.00044545
Hg	0.0000013	0.0806402	1.65 x 10 ⁻⁷	0.01968258	7.82 x 10 ⁻⁷	0.24875605	1.05 x 10 ⁻⁸	0.00028747	0.34936636	3.4937 x 10 ⁻⁷
Ni	0.00493	286.01183	0.0000583	6.95451308	0.000448	142.509862	0.0000167	0.45720697	435.93342	0.00043593
NO ₃ ⁻	0.0235	1363.3424	0.00927	1105.80337	0.0000527	16.7639949	0.000531	14.5375391	2500.44733	0.00250045
PO ₄ ³⁻	0.0585	3393.8524	0.000369	44.0174155	0.00533	1695.48564	0.0000633	1.73300607	5135.0885	0.00513509
SO ₄ ²⁻	4.35	252363.38	0.274	32685.0186	0.462	146963.295	2.07	56671.7625	488683.463	0.48868346
S ²⁻	0.000014	0.8122040	0.000421	50.2204118	0.0000648	20.6130336	0.00000263	0.07200325	71.7176526	7.1718 x 10 ⁻⁵
Zn	0.00982	569.70309	0.000159	18.9668538	0.000894	284.383519	0.0000572	1.56600233	874.619469	0.00087462

Generación de Residuos Sólidos

	Carbón	Residuos	Petróleo	Residuos	Gas Natural	Residuos	Nuclear	Residuos	Residuos totales en gramos	Residuos totales en ton
Residuos sólidos	219.9	12757404.31	16.5	1968258.42	27.1	8620574.24	4	109510.652	23455747.6	23.4557476

Tabla 46. Parámetros de las aguas residuales descargadas por TdR a T = 40°C y pH =7.75

Parámetro	mg/L
Grasas y aceites	75
Solidos sedimentables (mL/L)	7.5
As	0.75
Cd	0.75
CN-	1.5
Cu	15
Cr ⁶⁺	0.75
Hg	0.015
Ni	6
Pb	1.5
Zn	9
Solidos suspendidos totales	60
DBO	60

Disposición final

Tabla 47. Emisiones generadas por el uso de diesel como combustible en el relleno sanitario Chiconautla.

Diesel utilizado en la disposición final 5,276.075 litros

Emisiones al aire

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Partículas	1.2432	6559.21644	0.006559216
CO	16.548	87308.4891	0.087308489
CO ₂	3015.6	15910531.8	15.91053177
CH ₄	3.6708	19367.4161	0.019367416
NO _x	54.264	286300.934	0.286300934
N ₂ O	0.072828	384.24599	0.000384246
SO _x	4.5444	23976.5952	0.023976595
HCl	0.0061656	32.530168	3.25302 x 10 ⁻⁵
HF	0.00064428	3.3992696	3.39927 x 10 ⁻⁶
Hidrocarburos clorados	1.73 x 10 ⁻⁸	9.1297 x 10 ⁻⁵	9.12972 x 10 ⁻¹¹
NH ₃	0.000081984	0.43255373	4.32554 x 10 ⁻⁷
Cd	0.000029316	0.15467341	1.54673 x 10 ⁻⁷
Pb	0.00016128	0.85092538	8.50925 x 10 ⁻⁷
Mn	2.47 x 10 ⁻⁶	0.01302979	1.30298 x 10 ⁻⁸
Hg	3.02 x 10 ⁻⁶	0.01591053	1.59105 x 10 ⁻⁸
Ni	0.0014532	7.66719219	7.66719 x 10 ⁻⁶
Zn	0.000966	5.09668845	5.09669 x 10 ⁻⁶

Descargas al agua

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
DBO	0.0041328	21.8049628	2.1805 x 10 ⁻⁵
DQO	0.13524	713.536383	0.000713536

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Solidos suspendidos	2.6208	13827.5374	0.013827537
Compuestos orgánicos totales	0.42252	2229.24721	0.002229247
Haluros orgánicos absorbibles	0.0001806	0.95285915	9.52859×10^{-7}
Hidrocarburos clorados	0.00004023	0.21228815	2.12288×10^{-7}
Fenol	0.0060816	32.0869777	3.2087×10^{-5}
Al	0.012096	63.8194032	6.38194×10^{-5}
NH ₄	0.1008	531.82836	0.000531828
As	0.00006014	0.31732425	3.17324×10^{-7}
Ba	0.11592	611.602614	0.000611603
Cd	0.00005098	0.26901651	2.69017×10^{-7}
Cl ⁻	24.528	129411.568	0.129411568
Cr	0.00050736	2.67686941	2.67687×10^{-6}
Cu	0.00014196	0.74899161	7.48992×10^{-7}
CN ⁻	0.00018144	0.95729105	9.57291×10^{-7}
Fe	0.025788	136.059422	0.000136059
Pb	0.00012342	0.65117318	6.51173×10^{-7}
Hg	4.536×10^{-7}	0.00239323	2.39323×10^{-9}
Ni	0.00018816	0.99274627	9.92746×10^{-7}
NO ₃ ⁻	0.03024	159.548508	0.000159549
PO ₄ ³⁻	0.0011928	6.29330226	6.2933×10^{-6}
SO ₄ ²⁻	0.8652	4564.86009	0.00456486
S ²⁻	0.0014448	7.62287316	7.62287×10^{-6}
Zn	0.00053676	2.83198602	2.83199×10^{-6}

Generación de Residuos Sólidos

	Gramos generados por el uso de 1 litro de diesel	Residuos sólidos totales en gramos	Residuos sólidos totales en ton
Residuos sólidos	5.7	30073.6275	0.030073628

Tabla 48. Emisiones generadas por el uso de gasolina en el Relleno Sanitario Chiconautla.

Gasolina utilizada en la disposición final 430.7 litros

Emisiones al aire

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de gasolina	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Partículas	0.498	214.4886	0.000214489
CO	65.025	28006.2675	0.028006268
CO ₂	2985	1285639.5	1.2856395
CH ₄	3.9375	1695.88125	0.001695881
NO _x	28.875	12436.4625	0.012436463
N ₂ O	0.23175	99.814725	9.98147×10^{-5}
SO _x	4.8975	2109.35325	0.002109353
HCl	0.01335	5.749845	5.74985×10^{-6}
HF	0.001395	0.6008265	6.00827×10^{-7}
Hidrocarburos clorados	3.38×10^{-8}	1.45361×10^{-5}	1.45361×10^{-11}
NH ₃	0.000156	0.0671892	6.71892×10^{-8}
Cd	0.00012075	0.052007025	5.2007×10^{-8}

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de gasolina	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
Pb	0.003105	1.3373235	1.33732×10^{-6}
Mn	4.81×10^{-6}	0.00207059	2.07059×10^{-9}
Hg	0.000008475	0.003650183	3.65018×10^{-9}
Ni	0.0026025	1.12089675	1.1209×10^{-6}
Zn	0.000825	0.3553275	3.55328×10^{-7}

Descargas al agua

Compuesto	Gramos generados por el uso de 1 litro de gasolina)	Emisiones totales en gramos	Emisiones totales en ton
DBO	0.003915	1.6861905	1.68619×10^{-6}
DQO	0.1275	54.91425	5.49143×10^{-5}
Solidos suspendidos	2.565	1104.7455	0.001104746
Compuestos orgánicos totales	0.4275	184.12425	0.000184124
Haluros orgánicos absorbibles	0.000171	0.0736497	7.36497×10^{-8}
Hidrocarburos clorados	0.00003937	0.016958813	1.69588×10^{-8}
Fenol	0.005895	2.5389765	2.53898×10^{-6}
Al	0.0234	10.07838	1.00784×10^{-5}
NH ₄	0.09525	41.024175	4.10242×10^{-5}
As	0.000081	0.0348867	3.48867×10^{-8}
Ba	0.114	49.0998	4.90998×10^{-5}
Cd	0.0000492	0.02119044	2.11904×10^{-8}
Cl ⁻	23.85	10272.195	0.010272195
Cr	0.00060825	0.261973275	2.61973×10^{-7}
Cu	0.00019425	0.083663475	8.36635×10^{-8}
CN ⁻	0.00017175	0.073972725	7.39727×10^{-8}
Fe	0.0438	18.86466	1.88647×10^{-5}
Pb	0.00018825	0.081079275	8.10793×10^{-8}
Hg	4.9725×10^{-7}	0.000214166	2.14166×10^{-10}
Ni	0.00024	0.103368	1.03368×10^{-7}
NO ₃ ⁻	0.028875	12.4364625	1.24365×10^{-5}
PO ₄ ³⁻	0.00183	0.788181	7.88181×10^{-7}
SO ₄ ²⁻	1.05	452.235	0.000452235
S ²⁻	0.001365	0.5879055	5.87906×10^{-7}
Zn	0.00062625	0.269725875	2.69726×10^{-7}

Generación de Residuos Sólidos

	Gramos generados por el uso de 1 litro de gasolina	Residuos sólidos totales en gramos	Residuos sólidos totales en ton
Residuos sólidos	5.3	2282.71	0.00228271

Tabla 49. Composición de lixiviados en el Rellenos Sanitario Chiconautla.

Compuesto	mg/L
Al	2.4
NH ₄ ⁺	210
(Sb)	0.066
As	0.014
Be	0.0048
Cd	0.014
Cl	590

Compuesto	mg/L
Cr	0.06
Cu	0.054
F	0.39
Fe	95
Pb	0.063
Hg	0.0006
Ni	0.17
Zn	0.68
Haluros orgánicos absorbibles	2
DBO	1900
1,1,1-tricloroetano	0.086
1,2-dicloroetano	0.01
2,4-dicloroetano	0.13
Benzoapireno	0.00025
Benceno	0.037
Clorobenceno	0.007
Cloroformo	0.029
Clorofenol	0.00051
Diclorometano	0.44
Dioxinas/furanos	.32 ng
Endrina	0.00025
Etilbenceno	0.058
Hexaclorobenceno	0.0018
Isoforona	0.076
PCB	0.00073
Pentaclorofenol	0.045
Fenol	0.38
Tetraclorometano	0.2
Tolueno	0.41
Toxafeno	0.001
Tricloroetano	0.043
Cloruro de vinilo	0.04

Fuente: McDougall et al. 2002.

Tabla 50. Composición general de biogás generado en el Rellenos Sanitario Chiconautla.

Compuesto	Valor promedio (ppm)	Valor máximo (ppm)
Metano (CH ₄)	52.8	% EN VOLUMEN
Dióxido de carbono (CO ₂)	44.1	% EN VOLUMEN
Oxígeno (O ₂)	0.5	% EN VOLUMEN
Nitrógeno (N ₂)	2	% EN VOLUMEN
Acrolitrilo	0.41	26.1
Benceno	2.81	144.03
Tetracloruro de carbono	-	0.89
Clorobenceno	0.93	40
1,2-Dicloroetano	0.12	3.6
1,1,1-Tricloroetano	0.41	7.7
1,1-Dicloroetano	4.72	30
1,1,2,2-Tricloroetano	nd	3.8
Cloroetano	1.81	22
Cloroformo	nd	3.11
1,1-Dicloroetano	0.14	2
Trans-1,2-Dicloroetano	3.81	27
Etilbenceno	8.16	69.94
Cloruro de metileno	21.15	366

Compuesto	Valor promedio (ppm)	Valor máximo (ppm)
Clorometano	1.33	17.4
Fluorotriclorometano	1.21	15.8
Diclorodifluorometano	15.1	160
Tetracloroetano	7.18	33.4
Tolueno	51.66	659.39
Tricloroetano	3.65	31
Cloruro de vinilo	6.75	42
Isómeros de xileno totales	17.05	144
Metilacetona	9.09	86
Metilisobutilcetona	1.43	13
Acetona	6.51	56
Clorodifluorometano	3.03	32
Diclorofluorometano	4.23	50.8
Sulfuro de hidrogeno	21	100
Etano	850.68	1780
Propano	24.16	328
Butano	4.93	36
Pentano	5.74	133
Hexano	7.21	35.55

Fuente: Adaptada de McDougall et al. 2002.

ANEXO II: DISEÑO DE CONTENEDORES PARA CADA FUENTE DE GENERACIÓN

En la Tabla 51, se presenta la generación per cápita de RSU de las 57 fuentes de generación que integran la ZONA 8.

Tabla 51. Generación de RSU en la ZONA 8.

Fuentes de generación	Cantidad	Población (según corresponda)	Generación per cápita	Unidades	Generación de RSU (kg/día)	Generación total (kg /día)
Jardín de Niños	5	180 alumnos	0.04	kg/alumno *día	7.2 (c/u)	36
Primaria	23	560 alumnos	0.055	kg/alumno *día	30.8 (c/u)	708.4
Secundaria	7	850 alumnos	0.065	kg/alumno * día	55.25 (c/u)	386.75
Nivel medio superior	2	1800 alumnos	0.06	kg/alumno*día	108 (c/u)	216
Deportivo san Agustín 1 sección	1	37800 m ²	0.163	kg/m ² *día	6161.4	9.2
Parque San Felipe	1	26400 m ²	0.163	kg/m ² *día	4303.2	9.2
Agencia del ministerio público	1	80 empleados	0.207	kg/empleado*día	16.56	16.56
Biblioteca San Agustín	1	10 empleados	0.207	kg/empleado*día	2.07	2.07
Bodega SAPASE	1	15 empleados	0.207	kg/empleado*día	3.105	3.105
Centro cultural hermanos	1	200 espectador	0.054	kg/espectador*evento	10.8	10.8
Centro de rehabilitación e integración social	1	12 consultorios	1.279	kg/consultorio*día	15.348	15.348
Centro de salud	1	14 consultorios	1.279	kg/consultorio*día	17.906	17.906
Consejo de participación ciudadana	1	20 empleados	0.207	kg/empleado*día	4.14	4.14
Academia de policías	1	150 alumnos	0.070	kg/alumno*día	10.5	10.5
IFE	1	12 empleados	0.207	kg/empleado*día	2.484	2.484
Lechería San Agustín	1	8 empleados	0.207	kg/empleado*día	1.656	1.656
Pozo No. 13	1	10 empleados	0.207	kg/empleado*día	2.07	2.07
Protección civil y bomberos	1	25 empleados	0.207	kg/empleado*día	5.175	5.175
Seguridad Pública 3ª sección	1	50 empleados	0.207	kg/empleado*día	10.35	10.35
Iglesia	5	10 empleados	0.207	kg/empleado*día	2.07 (c/u)	10.35
Total	57					1,478.064

A continuación se presenta el volumen de diseño de los contenedores a utilizar en cada una de las fuentes de generación antes mencionadas. A partir de la caracterización de RSU presentada por Durán y Garcés (2012) se considera que el 49.5% corresponden a residuos orgánicos y el restante 50.5% a residuos inorgánicos con un peso volumétrico (PV) para residuos orgánicos de 385.71 kg/m³ y de 184 kg/m³ para residuos inorgánicos.

Jardín de niños (JN)

Datos:

Generación de RSU = 7.2 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a viernes

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (3.564 kg/día)(3 días)

= 10.7 kg

a) Para residuos orgánicos

Generación = 3.564 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 3

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$$V_{\text{teórico}} = P/PV$$

$$= (10.7 \text{ kg})/(385.71 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 0.028 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen real} = FS * V_{\text{teórico}}$$

$$= (1.3)(0.028)$$

$$= 0.036 \text{ m}^3 = 36 \text{ L}$$

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 3.636 kg/día
 Frecuencia de recolección = 1 veces/semana
 Periodo crítico (PC) = 5

$$\text{Generación total (GT)} = GT * PC$$

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 35 L para residuos orgánicos y 130 L para residuos inorgánicos.

 Primarias (PM)

Datos
 Generación de RSU (GRSU) = 30.8 kg/día
 Factor de seguridad (FS) = 1.3
 Días laborales: lunes a viernes

a) Para residuos orgánicos

Generación = kg/día
 Frecuencia de recolección = 2 veces/semana
 Periodo crítico (PC) = 3

$$\text{Generación total (GT)} = GT * \text{Periodo Crítico}$$

$$= (15.25 \text{ kg/día})(3 \text{ días})$$

$$= 45.8 \text{ kg}$$

A partir de:

$$PV = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$V_{\text{teórico}} = P/PV$$

$$= (45.8 \text{ kg})/(385.71 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 0.12 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen real} = FS * V_{\text{teórico}}$$

$$= (3.456 \text{ kg/día})(5 \text{ días})$$

$$= 18.2 \text{ kg/día}$$

A partir de:
 $PV = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$

$$V_{\text{teórico}} = P/PV$$

$$= (18.2 \text{ kg})/(184 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 0.098 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen real} = FS * V_{\text{teórico}}$$

$$= (1.3)(0.098)$$

$$= 0.128 \text{ m}^3 = 128.58 \text{ L}$$

$$= (1.3)(0.12)$$

$$= 0.156 \text{ m}^3 = 156 \text{ L}$$

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 15.56 kg/día
 Frecuencia de recolección = 1 veces/semana
 Periodo crítico (PC) = 5

$$\text{Generación total (GT)} = GT * PC$$

$$= (15.56 \text{ kg/día})(5 \text{ días})$$

$$= 77.8 \text{ kg/día}$$

A partir de:

$$PV = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$V_{\text{teórico}} = P/PV$$

$$= (77.8 \text{ kg})/(184 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 0.422 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen real} = FS * V_{\text{teórico}}$$

$$= (1.3)(0.422)$$

$$= 0.549 \text{ m}^3 = 549.67 \text{ L}$$

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 156 L para residuos orgánicos y 550 L para residuos inorgánicos en las primarias.

Secundarias

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 55.25 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a viernes

a) Para residuos orgánicos

Generación = 27.35 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 3

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (27.35 kg/día)(3 días)

= 82.05 kg

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (82.05 kg)/(385.71 kg/m³)

= 0.212 m³

Volumen real = FS * $V_{\text{teórico}}$

= (1.3)(0.212)

= 0.28 m³ = 280 L

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 27.9 kg/día

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 5

Generación total (GT) = GT*PC

= (27.9/día)(5 días)

= 139.5 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (139.5 kg)/(184 kg/m³)

= 0.758 m³

Volumen real = FS * $V_{\text{teórico}}$

= (1.3)(0.758)

= 0.985 m³ = 985 L

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 280 L para residuos orgánicos y 1,000 L para residuos inorgánicos en las secundarias.

Escuelas de nivel medio superior (NMS)

Datos

Generación de RSU = 108 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a viernes

a) Para residuos orgánicos

Generación = 53.5 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 3

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (53.5 kg/día)(3 días)

= 160.5 kg

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (160.5 kg)/(385.71 kg/m³)

= 0.42 m³

Volumen real = FS * $V_{\text{teórico}}$

= (1.3)(0.42)

= 0.55m³ = 550 L

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 54.5 kg/día

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 5

Generación total (GT) = GT*PC

= (54.5 kg/día)(5 días)

= 272.5 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (272.5 kg)/(184 kg/m³)

= 1.48 m³

$$\begin{aligned} \text{Volumen real} &= \text{FS} * V_{\text{teórico}} &= 1.925 \text{ m}^3 = 1925 \text{ L} \\ &= (1.3)(1.48) \end{aligned}$$

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 550 L para residuos orgánicos y 1,925 L para residuos inorgánicos en las escuelas de nivel medio superior.

Deportivo san Agustín 1ª y 3ª sección

$$\begin{aligned} \text{Datos} & &= (1.3)(0.048) \\ \text{Generación de RSU (GRSU)} &= 9.2 \text{ kg/día} &= 0.0624 \text{ m}^3 = 62.4 \text{ L} \\ \text{Factor de seguridad (FS)} &= 1.3 \\ \text{Días laborales:} & \text{lunes a domingo} \end{aligned}$$

a) Para residuos orgánicos

$$\begin{aligned} \text{Generación} &= 4.6 \text{ kg/día} \\ \text{Frecuencia de recolección} &= 2 \text{ veces/semana} \\ \text{Periodo crítico (PC)} &= 4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Generación total (GT)} &= \text{GT} * \text{Periodo Crítico} \\ &= (4.6 \text{ kg/día})(4 \text{ días}) \\ &= 18.4 \text{ kg} \end{aligned}$$

A partir de:

$$\text{PV} = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{teórico}} &= \text{P}/\text{PV} \\ &= (18.4 \text{ kg})/(385.71 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.048 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Volumen real} = \text{FS} * V_{\text{teórico}}$$

$$\begin{aligned} \text{b) Para residuos inorgánicos} \\ \text{Generación} &= 4.65 \text{ kg/día} \\ \text{Frecuencia de recolección} &= 1 \text{ veces/semana} \\ \text{Periodo crítico (PC)} &= 7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Generación total (GT)} &= \text{GT} * \text{PC} \\ &= (4.65/\text{día})(7 \text{ días}) \\ &= 32.55 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

A partir de:

$$\text{PV} = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{teórico}} &= \text{P}/\text{PV} \\ &= (32.55 \text{ kg})/(184 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.176 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen real} &= \text{FS} * V_{\text{teórico}} \\ &= (1.3)(0.176) \\ &= 0.2299 \text{ m}^3 = 229.9 \text{ L} \end{aligned}$$

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 63 L para residuos orgánicos y 230 L para residuos inorgánicos en ambos deportivos.

Agencia del ministerio público

$$\begin{aligned} \text{Datos} & & \text{A partir de:} \\ \text{Generación de RSU (GRSU)} &= 16.56 \text{ kg/día} & \text{PV} = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)} \\ \text{Factor de seguridad (FS)} &= 1.3 \\ \text{Días laborales:} & \text{lunes a domingo} \end{aligned}$$

a) Para residuos orgánicos

$$\begin{aligned} \text{Generación} &= 8.2 \text{ kg/día} \\ \text{Frecuencia de recolección} &= 2 \text{ veces/semana} \\ \text{Periodo crítico (PC)} &= 4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Generación total (GT)} &= \text{GT} * \text{Periodo Crítico} \\ &= (8.2 \text{ kg/día})(4 \text{ días}) \\ &= 32.8 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{teórico}} &= \text{P}/\text{PV} \\ &= (32.8 \text{ kg})/(385.71 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.085 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen real} &= \text{FS} * V_{\text{teórico}} \\ &= (1.3)(0.085) \\ &= 0.11 \text{ m}^3 = 110 \text{ L} \end{aligned}$$

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 8.363 kg/día

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 7

Generación total (GT) = GT*PC

= (8.363 kg/día)(7 días)

= 58.54 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (58.54 kg)/(184 kg/m³)

= 0.3181 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.3181)

= 0.414 m³ = 414 L

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 110 L para residuos orgánicos y 415 L para residuos inorgánicos en la agencia del ministerio público.

 Biblioteca San Agustín

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 2.07 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a domingo

a) Para residuos orgánicos

Generación = 1.025 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 4

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (1.025 kg/día)(4 días)

= 4.1 kg

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (4.1 kg)/(385.71 kg/m³)

= 0.011 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.011)

= 0.0143 m³ = 14.3 L

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 1.045 kg/día

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 7

Generación total (GT) = GT*PC

= (1.045 kg/día)(7 días)

= 7.32 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (7.32 kg)/(184 kg/m³)

= 0.039 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.039)

= 0.05171 m³ = 51.71 L

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 15 L para residuos orgánicos y 52 L para residuos inorgánicos en la biblioteca.

 Bodega SAPASE

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 3.105/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a sábado

a) Para residuos orgánicos

Generación = 1.54 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 4

$$\begin{aligned} \text{Generación total (GT)} &= \text{GT} * \text{Periodo Crítico} \\ &= (1.54 \text{ kg/día})(4 \text{ días}) \\ &= 6.16 \text{ kg} \end{aligned}$$

A partir de:

$$\text{PV} = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{teórico}} &= \text{P}/\text{PV} \\ &= (6.16 \text{ kg})/(385.71 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.016 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen real} &= \text{FS} * V_{\text{teórico}} \\ &= (1.3)(0.016) \\ &= 0.0208 \text{ m}^3 = 20.8 \text{ L} \end{aligned}$$

b) Para residuos inorgánicos

$$\text{Generación} = 1.57 \text{ kg/día}$$

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 21 L para residuos orgánicos y 67 L para residuos inorgánicos en la Bodega SAPASE.

$$\begin{aligned} \text{Frecuencia de recolección} &= 1 \text{ veces/semana} \\ \text{Periodo crítico (PC)} &= 6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Generación total (GT)} &= \text{GT} * \text{PC} \\ &= (1.57 / \text{día})(6 \text{ días}) \\ &= 9.42 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

A partir de:

$$\text{PV} = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{teórico}} &= \text{P}/\text{PV} \\ &= (9.42 \text{ kg})/(184 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.051 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen real} &= \text{FS} * V_{\text{teórico}} \\ &= (1.3)(0.051) \\ &= 0.0665 \text{ m}^3 = 66.55 \text{ L} \end{aligned}$$

Centro Cultural Hermanos

Datos

$$\text{Generación de RSU (GRSU)} = 10.8 \text{ kg/día}$$

$$\text{Factor de seguridad (FS)} = 1.3$$

Días laborales: martes a domingo

a) Para residuos orgánicos

$$\text{Generación} = 5.35 \text{ kg/día}$$

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

$$\text{Periodo crítico (PC)} = 3$$

$$\begin{aligned} \text{Generación total (GT)} &= \text{GT} * \text{Periodo Crítico} \\ &= (5.35 \text{ kg/día})(3 \text{ días}) \\ &= 16.05 \text{ kg} \end{aligned}$$

A partir de:

$$\text{PV} = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{teórico}} &= \text{P}/\text{PV} \\ &= (16.05 \text{ kg})/(385.71 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.042 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Volumen real} = \text{FS} * V_{\text{teórico}}$$

$$\begin{aligned} &= (1.3)(0.042) \\ &= 0.055 \text{ m}^3 = 55 \text{ L} \end{aligned}$$

b) Para residuos inorgánicos

$$\text{Generación} = 5.5 \text{ kg/día}$$

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

$$\text{Periodo crítico (PC)} = 6$$

$$\begin{aligned} \text{Generación total (GT)} &= \text{GT} * \text{PC} \\ &= (5.5 \text{ kg/día})(6 \text{ días}) \\ &= 33 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

A partir de:

$$\text{PV} = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{teórico}} &= \text{P}/\text{PV} \\ &= (33 \text{ kg})/(184 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.179 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen real} &= \text{FS} * V_{\text{teórico}} \\ &= (1.3)(0.179) \\ &= 0.233 \text{ m}^3 = 233 \text{ L} \end{aligned}$$

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 55 L para residuos orgánicos y 235 L para residuos inorgánicos en el centro cultural.

✚ Centro de rehabilitación e integración social

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 15.348 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a sábado

a) Para residuos orgánicos

Generación = 7.6 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 3

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (7.6 kg/día)(3 días)

= 22.8 kg

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (22.8 kg)/(385.71 kg/m³)

= 0.06 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.06)

= 0.078 m³ = 78 L

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 7.75 kg/día

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 6

Generación total (GT) = GT*PC

= (7.75 kg/día)(6 días)

= 46.5 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (46.5 kg)/(184 kg/m³)

= 0.252 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.252)

= 0.328 m³ = 328 L

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 80 L para residuos orgánicos y 330 L para residuos inorgánicos en el centro de rehabilitación.

✚ Centro de salud

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 17.906 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a sábado

a) Para residuos orgánicos

Generación = 8.87 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 3

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (8.87 kg/día)(3 días)

= 26.61 kg

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (26.61 kg)/(385.71 kg/m³)

= 0.07 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.07)

= 0.091 m³ = 91 L

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 9.042 kg/día

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 6

Generación total (GT) = GT*PC

= (9.042 /día)(6 días)

= 54.252 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (54.252 kg)/(184 kg/m³)

= 0.295 m³

$$\begin{aligned} \text{Volumen real} &= FS * V_{\text{teórico}} &= 0.319\text{m}^3 = 319.41 \text{ L} \\ &= (1.3)(0.245) \end{aligned}$$

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 95 L para residuos orgánicos y 320 L para residuos inorgánicos en el centro de salud.

Consejo de participación ciudadana

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 4.14 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a viernes

a) Para residuos orgánicos

Generación = 2.05 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 3

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (2.05 kg/día)(3 días)

= 6.15 kg

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (6.15 kg)/(385.71 kg/m³)

= 0.016 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.016)

= 0.0208 m³ = 20.8 L

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 2.09 kg/día

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 5

Generación total (GT) = GT*PC

= (2.09 kg/día)(5 días)

= 10.45 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (10.45 kg)/(184 kg/m³)

= 0.0567 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.0567)

= 0.0738 m³ = 73.8 L

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 21 L para residuos orgánicos y 75 L para residuos inorgánicos en el consejo de participación ciudadana.

Academia de policías

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 10.5 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a sábado

a) Para residuos orgánicos

Generación = 5.2 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 3

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (5.2 kg/día)(3 días)

= 15.6 kg

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (15.6 kg)/(385.71 kg/m³)

= 0.04 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.04)

= 0.052 m³ = 52 L

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 5.3 kg/día

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 6

Generación total (GT) = GT*PC

= (5.3 kg /día)(5 días)

= 31.8 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (31.8 kg)/(184 kg/m³)

= 0.172 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.172)

= 0.224 m³ = 224 L

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 55 L para residuos orgánicos y 225 L para residuos inorgánicos en la academia de policías.

 IFE

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 2.484 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a sábado

a) Para residuos orgánicos

Generación = 1.23 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 3

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (1.23 kg/día)(3 días)

= 3.7 kg

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (3.7 kg)/(385.71 kg/m³)

= 0.0096 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.0096)

= 0.0125m³ = 12.5 L

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 1.25 kg/día

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 6

Generación total (GT) = GT*PC

= (1.25/día)(6 días)

= 7.5 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (7.5 kg)/(184 kg/m³)

= 0.04 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.04)

= 0.053 m³ = 53 L

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 15 L para residuos orgánicos y 55 L para residuos inorgánicos en las oficinas del IFE.

 Lechería San Agustín

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 1.656 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a sábado

a) Para residuos orgánicos

Generación = 0.82 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 3

$$\begin{aligned} \text{Generación total (GT)} &= \text{GT} * \text{Periodo Crítico} \\ &= (0.82 \text{ kg/día})(3 \text{ días}) \\ &= 2.46 \text{ kg} \end{aligned}$$

A partir de:

$$\text{PV} = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{teórico}} &= \text{P}/\text{PV} \\ &= (2.46 \text{ kg})/(385.71 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.0063 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen real} &= \text{FS} * V_{\text{teórico}} \\ &= (1.3)(0.0063) \\ &= 0.0082 \text{ m}^3 = 8.2 \text{ L} \end{aligned}$$

b) Para residuos inorgánicos

$$\text{Generación} = 0.084 \text{ kg/día}$$

$$\begin{aligned} \text{Frecuencia de recolección} &= 1 \text{ veces/semana} \\ \text{Periodo crítico (PC)} &= 6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Generación total (GT)} &= \text{GT} * \text{PC} \\ &= (0.84/\text{día})(6 \text{ días}) \\ &= 5.04 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

A partir de:

$$\text{PV} = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{teórico}} &= \text{P}/\text{PV} \\ &= (5.04 \text{ kg})/(184 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.027 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen real} &= \text{FS} * V_{\text{teórico}} \\ &= (1.3)(0.027) \\ &= 0.0356 \text{ m}^3 = 35.6 \text{ L} \end{aligned}$$

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 10 L para residuos orgánicos y 40 L para residuos inorgánicos en la lechería San Agustín.

Pozo No.13

Datos

$$\text{Generación de RSU (GRSU)} = 2.07 \text{ kg/día}$$

$$\text{Factor de seguridad (FS)} = 1.3$$

Días laborales: lunes sábado

a) Para residuos orgánicos

$$\text{Generación} = 1.025 \text{ kg/día}$$

$$\text{Frecuencia de recolección} = 2 \text{ veces/semana}$$

$$\text{Periodo crítico (PC)} = 3$$

$$\begin{aligned} \text{Generación total (GT)} &= \text{GT} * \text{Periodo Crítico} \\ &= (1.025 \text{ kg/día})(3 \text{ días}) \\ &= 3.075 \text{ kg} \end{aligned}$$

A partir de:

$$\text{PV} = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{teórico}} &= \text{P}/\text{PV} \\ &= (3.075 \text{ kg})/(385.71 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.00797 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen real} &= \text{FS} * V_{\text{teórico}} \\ &= (1.3)(0.00797) \end{aligned}$$

$$= 0.0103 \text{ m}^3 = 10.36 \text{ L}$$

b) Para residuos inorgánicos

$$\text{Generación} = 1.045 \text{ kg/día}$$

$$\text{Frecuencia de recolección} = 1 \text{ veces/semana}$$

$$\text{Periodo crítico (PC)} = 6$$

$$\begin{aligned} \text{Generación total (GT)} &= \text{GT} * \text{PC} \\ &= (1.045 \text{ kg/día})(6 \text{ días}) \\ &= 6.27 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

A partir de:

$$\text{PV} = \text{Peso (P)}/\text{Volumen (V)}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{teórico}} &= \text{P}/\text{PV} \\ &= (6.27 \text{ kg})/(184 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.034 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen real} &= \text{FS} * V_{\text{teórico}} \\ &= (1.3)(0.034) \\ &= 0.044 \text{ m}^3 = 42.3 \text{ L} \end{aligned}$$

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 15L para residuos orgánicos y 45 L para residuos inorgánicos en el pozo No. 13.

🚒 Protección civil y bomberos

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 5.175 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a domingo

a) Para residuos orgánicos

Generación = 2.56 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 4

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (2.56 kg/día)(4 días)

= 10.24 kg

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (10.24 kg)/(385.71 kg/m³)

= 0.0265 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.0265)

= 0.0345 m³ = 34.5 L

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 2.61 kg/día

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 7

Generación total (GT) = GT*PC

= (2.61 kg/día)(7 días)

= 18.27 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (18.27 kg)/(184 kg/m³)

= 0.099 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.099)

= 0.129 m³ = 129 L

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 35 L para residuos orgánicos y 130 L para residuos inorgánicos en las instalaciones de protección civil y bomberos.

🚒 Seguridad Pública 3ª sección

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 10.35 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a domingo

a) Para residuos orgánicos

Generación = 5.12 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 4

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (5.12kg/día)(4 días)

= 20.48 kg

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (20.48 kg)/(385.71 kg/m³)

= 0.053 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.053)

= 0.068 m³ = 69 L

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 5.23 kg/día

PV = kg/m³

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 7

Generación total (GT) = GT*PC

= (5.23 kg día)(7 días)

= 36.61 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$$V_{\text{teórico}} = P/PV$$

$$= (36.61 \text{ kg})/(184 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 0.198 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen real} = FS * V_{\text{teórico}}$$

$$= (1.3)(0.198)$$

$$= 0.258 \text{ m}^3 = 258.65 \text{ L}$$

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 70 L para residuos orgánicos y 260 L para residuos inorgánicos en las oficinas de seguridad pública de la 3ª sección de San Agustín.

iglesia

Datos

Generación de RSU (GRSU) = 2.07 kg/día

Factor de seguridad (FS) = 1.3

Días laborales: lunes a domingo

a) Para residuos orgánicos

Generación = 1.024 kg/día

Frecuencia de recolección = 2 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 4

Generación total (GT) = GT*Periodo Crítico

= (1.024 kg/día)(4 días)

= 4.1 kg

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (4.1 kg)/(385.71 kg/m³)

= 0.0106 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

$$= (1.3)(0.0106)$$

$$= 0.0138 \text{ m}^3 = 13.78 \text{ L}$$

b) Para residuos inorgánicos

Generación = 1.045 kg/día

Frecuencia de recolección = 1 veces/semana

Periodo crítico (PC) = 7

Generación total (GT) = GT*PC

= (1.045 kg/día)(7 días)

= 7.315 kg/día

A partir de:

PV = Peso (P)/Volumen (V)

$V_{\text{teórico}} = P/PV$

= (7.315 kg)/(184 kg/m³)

= 0.039 m³

Volumen real = FS * V_{teórico}

= (1.3)(0.039)

= 0.051 m³ = 51.68 L

Por lo anterior se recomienda emplear un contenedor con capacidad de 15 L para residuos orgánicos y 55 L para residuos inorgánicos en las iglesias.

ANEXO III. FUENTES DE GENERACIÓN

En la Tabla 52, se enlista las fuentes de generación que integran la ZONA 8 y el turno asignado dentro de la propuesta de ruta de recolección diseñada.

Tabla 52. Turno en la ruta de recolección.

Turno	Fuente de generación	Ubicación	Colonia
00	Encierro de vehículos	Av. Corregidora	
1	IFE	Prados de Santa Clara No. 8	Jardines de Santa Clara
2	Prim Escudo Nacional	Corregidora s/n	Héroes de la Independencia
3	Sec. No. 673 Miguel Hidalgo y Costilla	Av. Ignacio Aldama s/n	Héroes de la Independencia
4	Protección civil y bomberos	Av. De las Torres e Ignacio Aldama	Miguel Hidalgo
5	JN. Issac Ochoterena y Mendieta	Guadalupe Victoria y Guerrero s/n	Miguel Hidalgo
6	Prim. Plan de Iguala	Aquiles Serdán s/n	Miguel Hidalgo
7	Prim. Vicente Guerrero	Aquiles Serdán s/n	Miguel Hidalgo
8	Centro de Salud Miguel Hidalgo	Independencia y Emiliano Zapata s/n	Miguel Hidalgo
9	Prim. 5 de Mayo	Cda. De Sur 10 y 16 s/n	San Agustín 1ª Sección
10	JN. Topiltzin	Cda. De Sur 10 y 16 s/n	San Agustín 1ª Sección
11	Consejo de participación ciudadana	Av. Santa Teresa s/n	San Agustín 1ª Sección
12	Deportivo San Agustín	Av. Santa Teresa y Guanajuato	San Agustín 1ª Sección
13	Preparatoria No. 3 Juan Rulfo	Av. San Agustín s/n	San Agustín 1ª Sección
14	Preparatoria No. 259	Av. San Agustín s/n	San Agustín 1ª Sección
15	Centro de rehabilitación e integración social	Av. Santa Teresa y Brasil	San Agustín 1ª Sección
16	Procuraduría general de justicia	Av. San Agustín s/n	San Agustín 1ª Sección
17	Centro Cultural Hermanos Revueltas	Av. San Agustín y Sur 40	San Agustín 1ª Sección
18	Parroquia Nuestra Señora de Guadalupe Madre de la Reconciliación	Sur 36 s/n	San Agustín 1ª Sección
19	Sec. Sor Juana Inés de la Cruz	Av. San Agustín y Sur 36	San Agustín 1ª Sección
20	Sec. Sor Juana Inés de la Cruz	Av. San Agustín y Sur 36	San Agustín 1ª Sección
21	Lechería LICONSA	Av. San Agustín s/n	San Agustín 1ª Sección
22	Prim. 20 de Noviembre	Av. San Agustín No. 74	San Agustín 1ª Sección
23	Prim. Niño Artillero	Av. San Agustín No. 74	San Agustín 1ª Sección
24	Prim. Miguel Hidalgo	Av. San Agustín y Sur 26	San Agustín 1ª Sección
25	Prim. José Ma. Morelos y Pavón	Av. San Agustín y Sur 24	San Agustín 1ª Sección
26	Prim. José Martí	Av. San Agustín y Sur 24	San Agustín 1ª Sección
27	Prim. Apatzingán	Sur 10 y Sur 12	San Agustín 1ª Sección
28	Prim. Constitución de Apatzingán	Sur 10 y Sur 12	San Agustín 1ª Sección
29	Sec. Josefa Ortiz de Domínguez	Av. Adolfo López Mateos y Av. Lourdes	San Agustín 1ª Sección
30	Bodega SAPASE	Av. Adolfo López Mateos y Av. Lourdes	San Agustín 1ª Sección
31	Pozo No. 13	Adolfo López Mateos y Av. Piedad	San Agustín 3ª Sección
32	JN. Eduardo Liceaga	Sur 18 y Av. San Pedro	San Agustín 2ª Sección
33	Prim. Emiliano Zapata	Av. Santa Prisca s/n	San Agustín 2ª Sección
34	Prim. Rafael Ramírez	Av. Santa Prisca s/n	San Agustín 2ª Sección
35	Prim Adolfo López Mateos	Av. Santa Prisca s/n	San Agustín 2ª Sección
36	Prim. Carlos Carrillo	Av. Santa Prisca s/n	San Agustín 2ª Sección
37	Sec. Calmecac	Av. Santa Prisca y Sur 66	San Agustín 2ª Sección
38	Sec. Calmecac	Av. Santa Prisca y Sur 66	San Agustín 2ª Sección
39	Parroquia de la Inmaculada Concepción	Italia y Checoslovaquia	Laderas del Peñón
40	Prim. Agustín Torres Vélez	Av. San Felipe y Sur 90	Laderas del Peñón
41	Prim. Sebastián Lerdo de Tejada	Av. San Felipe y Sur 90	Laderas del Peñón
42	Prim. Gabino Barreda	Laderas de Monte Albán s/n	Laderas del Peñón
43	JN. Vidal Alcocer	Laderas del Peñón	Laderas del Peñón

Turno	Fuente de generación	Ubicación	Colonia
44	Prim. Juan Escutia	Sur 80 y Sur 86	San Agustín 3ª sección
45	Prim. Felipe Carrillo Puerto	Av. Santa Rita s/n	San Agustín 3ª sección
46	Biblioteca San Agustín	Av. Santa Rita y Zapotecas	San Agustín 3ª sección
47	Parroquia Corpus Cristi	Av. Santa Rita s/n	San Agustín 3ª sección
48	Deportivo San Felipe	Sur 56 y Sur 80	San Agustín 3ª sección
49	Seguridad Pública San Agustín 3ª sección	Sur 56 s/n	San Agustín 3ª sección
50	Academia de Policías	Diego rivera s/n	San Agustín 3ª sección
51	Parroquia de San Martín de Porres	Alfaro Siqueiros y Av. Santa Rita	San Agustín 3ª sección
52	Prim. Margarita Maza de Juárez	Cerrada de Santa Rita s/n	San Agustín 3ª sección
53	Iglesia de la Lupita	Av. Santa Rita y Sur 34	San Agustín 3ª sección
54	Sec. Margarita Maza de Juárez	Av. San Felipe entre Sur 26 y Sur 32	San Agustín 3ª sección
55	JN. José Mariano Michelena	Av. Santa Rita y Sur 30	San Agustín 3ª sección
56	Prim. Benito Juárez	Av. Santa Rita y Sur 16 s/n	San Agustín 3ª sección
57	Prim Hermanos Serdán	Av. Santa Rita y Sur 16 s/n	San Agustín 3ª sección
58	Relleno sanitario	Av. Cerezo reclusorio s/n	Chiconautla

ANEXO IV. Requerimientos de la planta de separación

RSU generados (Enríquez García, 2012)= 182,500 ton/año

Eficiencia de recolección (Enríquez García, 2012) = 90%

% de recuperación informal (Enríquez García, 2012) = 3%

Residuos orgánicos = residuos de comida y jardinería

Residuos inorgánicos = RSU – Residuos orgánicos

Tabla 53. Composición y RSU recolectados.

Material	% de composición	ton/año recolectadas	ton/año recuperados informalmente
Cartón	2.93	4,812.525	144.375
Cuero	0.02	32.85	0
Hueso animal	0.04	65.7	0
Lata de aluminio	0.2	328.5	9.855
Loza y cerámica	0.72	1,182.6	0
Madera	0.45	739.125	0
Material de construcción	1.87	3,071.475	0
Material eléctrico	0.06	98.55	2.956
Material ferroso	1.16	1,905.3	57.159
Material no ferroso (aluminio)	0.13	213.525	6.405
Panales/toallas	5.05	8,294.625	0
Papel aluminio	0.09	147.825	4.434
Papel de impresión	1.76	2,890.8	86.724
Papel de revista	0.79	1,297.575	38.927
Papel encerado	0.44	722.7	21.681
Papel sanitario	5.72	9,395.1	281.853
Otros papeles	1	1,642.5	49.275
Periódico	1.82	2,989.35	89.680
Botellas de PET	1.21	1,987.425	59.622
HDPE	1.2	1,971	59.13
PVC	0.17	279.225	8.376
LDPE4	0.43	706.275	21.188
PP	0.84	1,379.7	41.391
PS	0.58	952.65	28.579
Otros plásticos	0.85	1,396.125	41.883
Bolsa de plástico	6.46	10,610.55	0
Residuos finos	0.8	1,314	0
Residuos orgánicos	49.5	81,303.75	0
Residuos especiales (medicinas caducas, pilas, llantas, y punzo-cortantes)	1.35	2,217.375	0
Residuos peligrosos (jeringas)	0.13	213.525	0
Tetra pack	1.1	1,806.75	54.202
Trapo (material sintético)	3.64	5,978.7	0
Unicel poliuretano expandido	1.42	2,332.35	0
Vidrio de color	0.72	1,182.6	35.478
Vidrio transparente	1.93	3,170.025	95.1
Zapatos	0.35	574.875	0
Biológico infecciosos	0.05	82.125	0
Papel estraza	0.08	131.4	0
Otros	2.94	4,828.95	0
Total	100	164,250	1,238.28075

Fuente: Adaptada de (Durán y Garcés, 2012)

Los RSU que son trasladados a la planta de separación corresponden a la diferencia entre los RSU generados y los RSU recuperados informalmente por parte del personal. Por lo anterior la cantidad de RSU enviados a la planta de separación (flujo de entrada) corresponden a 81,707.96 toneladas de residuos inorgánicos anualmente. Cabe destacar que los residuos orgánicos recolectados son trasladados a la planta de composta que tiene instalada el municipio. En la Tabla 54, se plasma las toneladas recuperadas en la planta de separación considerando los % de recuperación de los materiales.

Tabla 54. Recuperación de materiales en la planta de separación.

Material	ton/año ingresadas a la planta	% de recuperación	ton/año recuperadas en planta
Cartón	4,668.149	0.7	3,267.704
Cuero	32.85	0	0
Hueso animal	65.7	0	0
Lata de aluminio	318.645	0.6	191.187
Loza y cerámica	1,182.6	0	0
Madera	739.125	0	0
Material de construcción	3,071.475	0	0
Material eléctrico	95.593		0
Material ferroso	1,848.141	0.6	1,108.884
Material no ferroso (aluminio)	207.119	0.4	0
Panales/toallas	8,294.625	0	0
Papel aluminio	143.39025	0.45	64.525
Papel de impresión	2,804.076	0.45	1,261.834
Papel de revista	1,258.647	0.45	566.391
Papel encerado	701.019	0.45	315.458
Papel sanitario	9,113.247	0.45	0
Otros papeles	1,593.225	0.45	716.951
Periódico	2,899.669	0.45	1,304.851
Botellas de PET	1,927.802	0.7	1,349.461
HDPE	1911.87	0.7	1,338.309
PVC	270.848	0.7	189.593
LDPE4	685.086	0.7	479.56
PP	1,338.309	0.7	936.816
PS	924.070	0	0
Otros plásticos	1,354.241	0	0
Bolsa de plástico	10,610.55	0	0
Residuos finos	1314	0	0
Residuos especiales (medicinas caducas, pilas, llantas, y punzo-cortantes)	2,217.375	0	0
Residuos peligrosos (jeringas)	213.525	0	0
Tetra pack	1,752.547	0.7	1,226.783
Trapo (material sintético)	5,978.7	0	0
Unicel poliuretano expandido	2,332.35	0	0
Vidrio de color	1,147.122	0.75	860.341
Vidrio transparente	3,074.924	0.75	2,306.193
Zapatos	574.875	0	0
Biológico infecciosos	82.125	0	0
Papel estraza	131.4	0	0
Otros	4,828.95	0	0

Material	ton/año ingresadas a la planta	% de recuperación	ton/año recuperadas en planta
Total	81,707.969	21.4	17,484.847

El flujo de salida es determinado por la diferencia entre el flujo de entrada de residuos inorgánicos a la planta y las toneladas de residuos inorgánicos valorizables que fueron recuperadas durante la operación de la misma, resultando un flujo de salida 64,222.85 toneladas por año de residuos inorgánicos que son destinadas a la siguiente etapa del manejo de los RSU.

“Estimación de costos de la planta de separación”

❖ Infraestructura

Como se mencionó anteriormente la planta ya se encuentra construida solo se requiere la inversión necesaria para operarla. Dentro de la infraestructura instalada se encuentran motores de 10 HP que hacen funcionar las bandas transportadoras, área para mantenimiento, área de separación de residuos, entre otras.

La inversión para la construcción de la planta fue de 70,000,000 (año 2008). Por lo cual para determinar el costo en el tiempo presente se considera lo establecido en la ecuación 8, acorde a lo mencionado por Blank y Tarquin (2006).

$$C_t = C_0 \left(\frac{I_t}{I_0} \right) \quad \text{Ec. (a)}$$

Donde;

C_t = costo estimado en el tiempo presente t

C_0 = costo en el tiempo anterior t_0

I_t = valor del índice en el tiempo t (2013)

I_0 = valor del índice en el tiempo t_0 (2008)

Acorde a la Ecuación a, se presenta los siguientes datos:

$C_t = ?$

$C_0 = 70,000,000$ de pesos

$I_t = 99.16$ (INEGI, 2012)

$I_0 = 78.08$ (INEGI, 2012)

$$C_t = 70,000,000 \left(\frac{99.16}{78.08} \right)$$

Por lo anterior, la inversión para el año 2013 corresponde a 88,898,565.6 de pesos. El valor de la inversión será utilizado para determinar los costos de mantenimiento y costos del personal administrativo.

❖ Energía eléctrica

El cálculo del requerimiento y costo energético se determinó de la siguiente manera considerando diversos aspectos:

Datos

10 motores de 30 HP cada uno

Horas de operación: 6 h/día = 2190 h/año

Días laborales: 365 días

Costo por kWh (PROFECO, 2012) = \$1.34/kWh

Requerimiento energético de 1 motor:

1 HP = 0.7456 kw

30 HP = 22.371 kw

kWh = Potencia (P) x tiempo (t)

kWh = (22.371 kw) (2190 h/año)

kWh = 48,992.482/año

Requerimiento energético de los 10 motores:

(48992.48159 kWh/año) (10) = **489,924.82 kWh/año**

Costo por el consumo de 489 924.8159 kWh

(\$1.34/kWh) (489,924.8159 kWh) = \$ 656,500/año

Los costos para cubrir la energía eléctrica corresponden a 656,500 de pesos por año

❖ Combustible

Se cuenta con un cargador frontal marca Caterpillar, Modelos 914G con potencia neta de 100 HP que usa diesel como combustible, un camión de volteo que se encarga de trasladar los RSU que no fueron recuperados al relleno sanitario, y un camión de carga para trasladar los materiales valorizables a la siguiente etapa de su manejo, los equipos utilizan diesel como combustible. Para determinar el consumo del combustible y sus costos asociados se consideraron los siguientes parámetros.

a) diesel requerido para cargador frontal

Rendimiento de combustible (SCT, 2004) = 15 L/h

Tiempo de operación (t) = 1,096 h

Diesel requerido = (15 L/h)(1,096 h) = 16,440 L/año

Costo por litro diesel (PEMEX,2012) = \$11.08

Costo total del diesel = (16,440 L)(\$11.08/L) = 182,155.2 de pesos anuales

b) diesel requerido para el transporte de los RSU a disposición final o incineraciónCapacidad del camión 7m³

Rendimiento de combustible (SCT, 2004) = 2.5 L/km

RSU a incinerador = 60039.31 ton/año

PV de los RSU en el camión = 250 kg/m³V de RSU en el camión = 2,400,157.25 m³

Distacia recorrida por viaje = 1 km

de viajes = 342,879.6

Distancia total recorrida = 342,879.6 km

Diesel consumido = 137,159.04 L

Costo de diesel (PEMEX, 2013)= \$11.08/L

Costo total de diesel = 1,519,722.16 pesos/año

c) diesel requerido para el transporte de RSU valorizables a plantas de reciclaje y centros de acopio

La ubicación de las plantas de reciclaje y centros de acopio como la distancia que existe entre ellos y la planta de separación se presenta en la Tabla 55. A partir de las distancias, rendimiento de combustible y capacidad de carga empleado se determinó la cantidad de combustible requerido para esta operación.

Tabla 55. Distancias entre la planta y los centros de compra venta de materiales.

Material	Ubicación de destino	Distancia recorrida por viaje (km)	# de viajes	Distancia recorrida total (km)
Cartón	Avenida central S/N, Colonia Miguel Hidalgo. Ecatepec de Morelos	33.8	408.463	13,806.051
Lata de aluminio	Jardines de Santa Clara, Ecatepec de Morelos	44.2	23.898	1056.308
Material ferroso	Hidalgo S/N predio Salinas, San Cristóbal Ecatepec CP. 55000	23.4	138.611	3243.487
Papel	Avenida de las Torres 87, Colonia Jalapa, 55090 Ecatepec de Morelos, Estado de México.	29.2	528.752	15,439.545
Botellas de PET	Los Héroes S/N Fracc. Industrial Tecámac Edo. de México C.P.55740	18.4	168.683	3103.762
HDPE	Poniente 44 3725 e, San Salvador Xochimilco C.P.02870, Azcapotzalco, Distrito Federal	65.8	167.289	11,007.592
PVC	Poniente 44 3725 e, San Salvador Xochimilco C.P.02870, Azcapotzalco, Distrito Federal	65.8	23.699	1559.409
LDPE	Poniente 44 3725 e, San Salvador Xochimilco C.P.02870, Azcapotzalco, Distrito Federal	65.8	59.945	3944.387
PP	Poniente 44 3725 e, San Salvador Xochimilco C.P.02870, Azcapotzalco, Distrito Federal	65.8	117.102	7,705.314
Tetra pack	AVENIDA CENTRAL S/N, Colonia Miguel Hidalgo. Ecatepec de Morelos	33.8	153.348	5,183.159
Vidrio	Avenida Naucalpan No. 180, Colonia: La Cañada, C.P. 53570, Naucalpan de Juárez, Estado de México	85	395.813	33,644.431
Distancia total (km)				99693.445

Datos

Capacidad del camión = 8 ton

Rendimiento del camión (SCT, 2004)= 2.5 km/L

Distancia total a recorrer = 99,693.45 km

Consumo de diesel = 39,877.38 L

Precio de diese (PEMEX, 2013) = \$ 11.08/L

Costo por consumo de 39,877.38 L diesel = 441,841.37 pesos/año

Los costos para cubrir el consumo de diesel que demanda las actividades antes mencionadas (inciso, a, b y c) corresponden a 2,143,718.73 de pesos por año

❖ Personal operativo

Durante la operación de la planta en el año 2008 se contaba con un total de 33 personas encargadas del mantenimiento, operación de los equipos y recuperación de los RSU valorizables e intendencia. Dentro de este análisis se considera el mismo número de personas que gozan de un mismo sueldo equivalente a 95 pesos diarios acorde a lo establecido por la Secretaria del Trabajo y Prevención Social para el año 2013.

El costo para cubrir el salario nominal del personal operativo corresponde a 981,255 pesos anuales. El salario real (SR) es determinado a partir de lo establecido a la Ecuación 9 (Blank y Tarquin, 2006).

$$SR = SN \times FARS \quad \text{Ec (9)}$$

Donde;

SR = salario nominal

SN = salario real

FARS = Factor de salario real, generalmente corresponde a 1.7 y en él se contempla costos de seguro médico, prestaciones, aguinaldos, entre otros aspectos.

$$SR = 981,255 \times 1.7$$

El salario real para el personal de la operación es de 1,668,133.5 de pesos anuales.

❖ Mantenimiento

Blank y Tarquin (2006) mencionan que los costos de mantenimiento corresponden al 7% de la inversión, en consecuencia el costo del mantenimiento corresponde a 6,222,900 de pesos anuales

❖ Adquisición de camiones

a) camión de volteo de 7m³ de capacidad

Costo unitario= 500,000 de pesos

b) camión de carga de 8 ton

Costo unitario = 320,000 de pesos

El costo por la adquisición de los camiones para trasladar los RSU a los siguientes destinos de su manejo corresponde a 820,000 pesos.

❖ Personal administrativo

Madrid Meneses (2011), menciona que los costos asociados al personal administrativo corresponden al 5% de los costos de la inversión. En consecuencia los costos fijos variables corresponden a 4,444,928.3 de pesos.

La inversión inicial necesaria para operar nuevamente la planta es de 15,956,179 de pesos (que incluyen, costos de mantenimiento, insumos y salarios principalmente).

ANEXO V: Indicadores económicos

Valor Presente Neto

Para calcular el valor presente neto se trasladan los flujos de los años futuros al tiempo presente y se restan de la inversión inicial. Los flujos se descuentan a una tasa de referencia “*i*” de 12% que fija la Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP) y lo establecido en la Ecuación 11. En la se presentan los flujos datos de cada año para calcular el correspondiente Valor Presente Neto.

$$\text{Valor Presente Neto} = - P + \frac{FNE_1}{(1+i)^1} + \frac{FNE_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FNE_n}{(1+i)^n} \quad (\text{Ec. 11})$$

Dónde:

FNE_n = flujo neto de efectivo del año *n*, que corresponde a la ganancia neta después de impuestos en el año *n*.

P = inversión inicial en el año cero.

i = tasa de referencia (12 %)

Si el Valor Presente Neto es positivo, significa que habrá ganancia más allá de haber recuperado el dinero invertido y deberá aceptarse la inversión. Si el Valor Presente Neto es negativo, significa que las ganancias no son suficientes para recuperar el dinero invertido. Si éste es el resultado, debe rechazarse la inversión. Si el Valor Presente Neto es igual a cero, significa que solo se ha recuperado la tasa de referencia y, por tanto debe aceptarse la inversión.

A partir de los años de operación de la planta, la inversión inicial, los flujos netos de efectivo anuales y la correspondiente tasa de referencia se diseñó la Tabla 56, Tabla 57 y Tabla 58 que ilustran el cálculo del Valor Presente Neto de cada alternativa propuesta. El recuadro azul representa el valor numérico del Valor Presente Neto.

Tabla 56. Determinación del Valor Presente Neto para la planta de separación de RSU.

Año	Flujo neto de efectivo (MNX)	Descuento	Valor actual	Valor Presente Neto (MNX)
0	-15,956,179.83	1	0	-15,956,179.8
1	17,957,038.4	0.89	16,033,070	76,890.17
2	17,957,038.4	0.80	14,315,241.1	14,392,131.2
3	17,957,038.4	0.71	12,781,465.2	27,173,596.5
4	17,957,038.4	0.64	11,412,022.5	38,585,619
5	17,957,038.4	0.57	10,189,305.8	48,774,924.9
6	17,957,038.4	0.51	9,097,594.5	57,872,519.4
7	17,957,038.4	0.45	8,122,852.23	65,995,371.6
8	17,957,038.4	0.40	7,252,546.63	73,247,918.2
9	17,957,038.4	0.36	6,475,488.07	79,723,406.3
10	17,957,038.4	0.32	5,781,685.77	85,505,092.1

Tabla 57. Determinación del Valor Presente Neto para la planta de reciclaje mecánico de las botellas de PET.

Año	Flujo neto de efectivo (MNX)	Descuento	Valor actual	Valor Presente Neto(MNX)
0	-5,396,103	1	0	-5,396,103
1	4,622,662.463	0.893	4,127,377.199	-1,268,725.8
2	4,622,662.463	0.797	3,685,158.214	2,416,432.41
3	4,622,662.463	0.712	3,290,319.834	5,706,752.25
4	4,622,662.463	0.636	2,937,785.566	8,644,537.81
5	4,622,662.463	0.567	2,623,022.827	11,267,560.6
6	4,622,662.463	0.507	2,341,984.667	13,609,545.3
7	4,622,662.463	0.452	2,091,057.738	15,700,603
8	4,622,662.463	0.404	1,867,015.838	17,567,618.9
9	4,622,662.463	0.361	1,666,978.426	19,234,597.3
10	4,622,662.463	0.322	1,488,373.595	20,722,970.9

Tabla 58. Determinación del Valor Presente Neto para el incinerador.

Año	Flujo neto de efectivo (MNX)	Descuento	Valor actual	Valor Presente Neto(MNX)
0	-381,413,500	1	0	-381,413,500
1	-21,094,155.64	0.893	-18,834,067.54	-400,247,567.5
2	-21,094,155.64	0.797	-16,816,131.73	-417,063,699.3
3	-21,094,155.64	0.712	-15,014,403.33	-432,078,102.6
4	-21,094,155.64	0.636	-13,405,717.26	-445,483,819.9
5	-21,094,155.64	0.567	-11,969,390.41	-457,453,210.3
6	-21,094,155.64	0.507	-10,686,955.72	-468,140,166
7	-21,094,155.64	0.452	-9,541,924.752	-477,682,090.7
8	-21,094,155.64	0.404	-8,519,575.671	-486,201,666.4
9	-21,094,155.64	0.361	-7,606,763.992	-493,808,430.4
10	-21,094,155.64	0.322	-6,791,753.565	-500,600,184
11	-21,094,155.64	0.287	-6,064,065.683	-506,664,249.6
12	-21,094,155.64	0.257	-5,414,344.36	-512,078,594
13	-21,094,155.64	0.229	-4,834,236.035	-516,912,830
14	-21,094,155.64	0.205	-4,316,282.174	-521,229,112.2
15	-21,094,155.64	0.183	-3,853,823.37	-525,082,935.6

Año	Flujo neto de efectivo (MNX)	Descuento	Valor actual	Valor Presente Neto(MNX)
16	-21,094,155.64	0.163	-3440913.723	-528,523,849.3
17	--21,094,155.64	0.146	-3,072,244.396	-531,596,093.7
18	-21,094,155.64	0.130	-2,743,075.353	-534,339,169.1
19	-21,094,155.64	0.116	-2,449,174.423	-536,788,343.5
20	--21,094,155.64	0.104	-2,186,762.877	-538,975,106.4

Tasa Interna de Retorno

La Tasa Interna de Retorno es la “*i*” (tasa de referencia) que hace que el valor futuro de la inversión sea igual a la suma de los valores futuros de los flujos de efectivo en el año *n*, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P = \frac{FNE_1}{(1+i)^1} + \frac{FNE_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FNE_n}{(1+i)^n}$$

De la ecuación anterior se conoce *P* que es la inversión inicial en el año cero, y todas las *FNE* que son el flujo neto de efectivo del año *n*, por lo que la única incógnita es la “*i*” o tasa interna de rendimiento. Si el valor de la Tasa Interna de Retorno es igual o mayor a cero el proyecto es rentable, y si el valor es menor a cero el proyecto no es viable, en consecuencia debe rechazarse la inversión. En la Tabla 59, se presenta el valor de la Tasa Interna de Retorno para cada alternativa propuesta.

Tabla 59. Tasa Interna de Retorno de cada alternativa.

Alternativa	Tasa Interna de Retorno (%)
Planta de separación	112
Planta de reciclaje mecánico	85
Incinerador	No aplica

ANEXO VI: Estudios requeridos

Estudio de mercado

Consiste en la determinación y cuantificación de la demanda y oferta. Particularmente, la demanda por el servicio público de limpia está representada la cantidad de RSU generados y que requieren ser manejados adecuadamente. La oferta se encuentra determinada por la capacidad operativa instalada de cada etapa del servicio, considerando la vida útil de los equipos y los recursos físicos y humanos disponibles.

Estudio técnico

Define los aspectos fundamentales de la ingeniería de la propuesta, es decir, comprende todo aquello que tenga relación con el funcionamiento y operación de las alternativas. Dentro de los aspectos técnicos se encuentra la vida útil, oferta del servicios con la implementación de la alternativa, listado de infraestructura y equipos requeridos, insumos, personal, disponibilidad de materias primas, localización, determinación del tamaño de la “planta”, tecnología empleada y capacidad, características y especificaciones del producto, diagrama de bloques, DFPs, descripción del procesos, balance de materia y energía, requerimientos y características del equipo tanto del proceso como de los servicios auxiliares, diagrama de distribución general del equipo, estimación de costos, entre otros.

Estudio socioeconómico

Consiste en la determinación de la inversión en activos fijo y capital de trabajo, desarrollo del calendario de inversiones, determinación de presupuestos de ingresos y los presupuestos de costos y gastos, determinación de las fuentes de financiamiento adecuadas. Además de determinar los costos de la inversión a precios sociales, identificar, valorar y cuantificar los beneficios sociales directos, indirectos y externalidades presentes en cada una de las alternativas propuestas.

Estudio ambiental

La evaluación ambiental se desarrollará por medio de un ACV incluyendo todos los requerimientos que se necesitan para su elaboración, comparando el sistema actual con el sistema propuesto, para lo cual es necesario contar con toda la información presentada en el estudio técnico.