



SEP

SES

TecNM

---

---

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA**

**“ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA EL MANEJO  
SUSTENTABLE DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL  
MUNICIPIO DE XALATLACO”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**PRESENTA:  
M.C ISIS NEFTALY MARTINEZ MORALES  
No. CONTROL: 1528D0008**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNANDEZ BERRIEL**

**CODIRECTOR DE TESIS:  
DRA. SARA OJEDA BENITEZ**

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, JULIO DE 2021



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca

Metepec, Edo. De México., 01/julio/2021  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
E INVESTIGACIÓN  
DEPI-3200-244/2021.

**C. ISIS NEFTALY MARTÍNEZ MORALES**  
**CANDIDATA AL GRADO DE DOCTOR**  
**EN CIENCIAS AMBIENTALES**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica dependiente de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su trabajo de Tesis titulado **"ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA EL MANEJO SUSTENTABLE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL MUNICIPIO DE XALATLACO"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo.

Sin más por el momento, quedo de usted.

**A T E N T A M E N T E**  
Excelencia en educación tecnológica.  
*Educación, integridad y ciencia.*

**JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**E INVESTIGACIÓN**



ccp. Archivo  
JLGR/NTG

Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista C.P.52149.  
Metepec, Edo. de México. Tels. Dirección 722 208 7205,  
Subd. Académica 722 208 7207; Subd. de Planeación 722 208 7206;  
Subd. Administrativa 722 208 7208; Conmutador 208 72 00.  
e-mail: info@toluca.tecnm.mx | toluca.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Toluca

Metepec, Edo. de México, 06/julio/2021

**DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS**  
**DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**PRESENTE**

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada "Análisis de Ciclo de Vida para el Manejo Sustentable de los Residuos Sólidos Urbanos en el Municipio de Xiatlaco", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Doctora en Ciencias Ambientales presenta el **C. Isis Neftaly Martínez Morales** con número de control **1528D0008** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

**ATENTAMENTE**

**DRA. MARÍA DEL CONSUELO**  
**HERNÁNDEZ BERRIEL**  
**DIRECTOR DE TESIS**

**DRA. SARA OJEDA BENÍTEZ**  
**CODIRECTOR DE TESIS**

**DR. ISAIAS DE LA ROSA GÓMEZ**  
**REVISOR DE TESIS**

**DRA. MARÍA DEL CONSUELO**  
**MAÑÓN SALAS**  
**REVISORA DE TESIS**

**DRA. SAMANTHA EUGENIA**  
**CRUZ SOTELO**  
**REVISORA DE TESIS**

**DR. NICOLÁS FLORES ALAMO**  
**REVISOR DE TESIS**

ccp. Archivo



Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista C.P. 52149.  
Metepec, Edo. de México. Tels. Dirección 722 208 7205,  
Subd. Académica 722 208 7207; Subd. de Planeación 722 208 7206;  
Subd. Administrativa 722 208 7208; Conmutador 208 72 00.  
e-mail: info@toluca.tecnm.mx | toluca.tecnm.mx



## AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por la beca otorgada durante el programa de Doctorado en Ciencias Ambientales del Instituto Tecnológico de Toluca

A la Dra. María del Consuelo Hernández Berriel por aceptarme bajo su tutela y participar como directora de tesis.

A la Dra. Sara Ojeda Benítez de la Universidad Autónoma de Baja California, por ser codirectora de tesis y brindarme sus conocimientos.

A la Dra. María del Consuelo Mañón Salas por el apoyo en los datos estadísticos, así como en la revisión de los mismos.

A la Dra. Samantha Eugenia Cruz Sotelo de la Universidad Autónoma de Baja California por proporcionarme las bases en Análisis de Ciclo de Vida.

Al Dr. Isaías de la Rosa por sus comentarios certeros hacia la tesis así como su revisión meticulosa.

A la Dra. Elena Regla Rosa Domínguez de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas por el apoyo brindado en el programa SIMAPRO y revisión de resultados.

Al Laboratorio de Residuos del Instituto Tecnológico de Toluca por el préstamo de equipos y espacio para el desarrollo experimental de este trabajo.

Al Dr. Hashimoto Seiji de la Universidad de Ritsumeikan por brindarme apoyo, conocimientos y préstamo de su laboratorio durante mi estancia en Japón.

Al H. Ayuntamiento de Xalatlaco por las facilidades brindadas para realización de estudio en campo.

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), por el financiamiento del Fondo Sectorial de Investigación Ambiental para el Proyecto de investigación “Ubicación de Rellenos Sanitarios Intermunicipales Futuros en el Estado de México y Estados aledaños”, clave SEMARNAT-2015-1-263315, del cual esta tesis es parte.

A mis compañeros del laboratorio de Residuos por el apoyo brindado durante la realización del estudio en campo: Elvira, Sergio, Yola, Dana, así como los compañeros de servicio social y residencias.

A mis amigas del posgrado: Jaqueline, Jess, Erika, Elizabeth, Ceci, Iris por estar siempre en las crisis y en los momentos de felicidad.

## DEDICATORIAS

*A mi gran inspiración “la madre naturaleza”.*

*A mi esposo, a ti te dedico mi mayor logro académico, sólo tú viste el esfuerzo puesto para que este proyecto saliera adelante. Gracias por estar a mi lado en numerosas noches de desvelo y por apoyarme cuando decidí irme al otro lado del mundo para reforzar mis conocimientos, te amo.*

*A mis dos grandes luces, a mi sol y mi luna; a ustedes hijas Sofi y Soleil, les dedico este triunfo, porque ustedes sufrieron conmigo esas noches de desvelo. Gracias por siempre brindarme una sonrisa cuando estaba estresada y un te amo que reconfortaba mi corazón. Las amo mis niñas.*

*A mis padres, todo lo que soy se los debo a ustedes; el amor que le tengo al medio ambiente ha sido gracias a ustedes; verlos trabajar y amar el campo. Algún día espero ser como ustedes y poder recompensarles todo lo que han hecho por mí. Este logro se los debo a ustedes.*

*A mis hermanos Yuri y Ulises por el apoyo emocional y a veces monetario que me brindaron en estos cuatros años; a mis cuñados Paco y Cíndy porque ustedes siempre me brindaron palabras de aliento; a mis sobrinos Damí, Saori, Javi y Yaretzi. Los amo a todos.*

*A mi familia política, mi suegra Gloria, mi suegro Jorge, no tengo las palabras para agradecer todo lo que me brindaron durante estos años de doctorado, a mi cuñado Misael porque, aunque estamos lejos, me llegaron las porras.*

*A mis amigas del posgrado y de la vida, ustedes fueron un gran pilar para nunca darme por vencida. A todas las personas que hicieron posible el proyecto, miles de gracias.*

*“Si supiera que el mundo se acaba mañana, yo, hoy todavía plantaría un árbol”. Martín Luther King.*

## RESUMEN

Para hacer frente a la cultura del “útese y tírese”, se diseñó el Manejo Integral de residuos sólidos urbanos (MIRSU), sin embargo, su implementación para resolver la problemática de los residuos sólidos urbanos (RSU), requiere el uso de herramientas que consideren los impactos ambientales en todas sus etapas; por lo que el objetivo del presente trabajo fue el análisis de ciclo de vida (ACV) del manejo de los RSU del municipio de Xalatlaco, Estado de México.

Para llevar a cabo esta investigación, se seleccionó como área de estudio el municipio de Xalatlaco, donde se aplicaron encuestas a la población y se recabó información sobre el manejo de sus RSU. Siguiendo la metodología del ACV se analizaron cuatro escenarios, tres propuestos (E1, E2 y E3) y el sistema actual (E0).

Las encuestas evidenciaron que el 91% de las personas se preocupan por el cuidado del medio ambiente, sin embargo, sólo el 20% está dispuesta a pagar por la recolección de sus residuos y separarlos en el origen. En cuanto a la composición de los RSU, se obtuvo un valor menor de residuos orgánicos a la media nacional y cerca de un 30% de residuos reciclables. El E0 rindió impactos negativos para Calentamiento Global (CG), Agotamiento del Ozono Estratosférico (AGE), Eutrofización Aguaterrestre (EUA), Ecotoxicidad en Agua (ECA) y Uso de Suelo (US) con excepción de AGE; mientras el E3 ofreció cargas con menores impactos ambientales, donde su éxito requiere la colaboración de la población de Xalatlaco. Considerando el entorno social, económico y ambiental de Xalatlaco, E2 se perfiló como la opción con mayor viabilidad económica. Fue posible adaptar y actualizar el inventario de ciclo de vida (ICV) de ECOINVENT 3.0 del software SIMAPRO® 8.0 para las condiciones del presente estudio, lo cual contribuyó a reducir la incertidumbre en los resultados de las simulaciones y abre la posibilidad para nuevos estudios bajo las condiciones de México.

## ABSTRACT

To deal with the culture of “use and throw away”, the Integral Management of urban solid waste (MIRSU) was designed, however, its implementation to solve the problem of urban solid waste (MSW), requires the use of tools that consider environmental impacts at all stages; Therefore, the objective of this work was the life cycle analysis (LCA) of the MSW management of the municipality of Xalatlaco, State of Mexico.

To carry out this research, the municipality of Xalatlaco was selected as the study area, where surveys were applied to the population and information was collected on the management of its MSW. Following the LCA methodology, four scenarios were analyzed, three proposed (E1, E2 and E3) and the current system (E0).

Surveys showed that 91% of people are concerned about caring for the environment, however, only 20% are willing to pay for the collection of their waste and separate it at the source. Regarding the composition of the MSW, a lower value of organic waste was obtained than the national average and about 30% of recyclable waste. E0 yielded negative impacts for Global Warming (GW), Stratospheric Ozone Depletion (SOD), Terrestrial Water Eutrophication (TWE), Water Ecotoxicity (WE) and Land Use (LU) with the exception of AGE; while E3 offered loads with lower environmental impacts, where its success requires the collaboration of the Xalatlaco population. Considering the social, economic and environmental environment of Xalatlaco, E2 emerged as the option with the greatest economic viability. It was possible to adapt and update the ECOINVENT 3.0 life cycle inventory (LCI) of the SIMAPRO® 8.0 software for the conditions of the present study, which contributed to reduce the uncertainty in the results of the simulations and opens the possibility for new studies under the conditions of Mexico

# INDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Residuos Sólidos Urbanos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 ANALISIS DE CICLO DE VIDA.....</b>	<b>13</b>
1.3.1 Objetivo, alcance y unidad funcional.....	15
1.3.2 Análisis de Inventario.....	16
1.3.3 Evaluación del impacto ambiental.....	17
<b>1.4 SUSTENTABILIDAD .....</b>	<b>19</b>
<b>1.5 TRABAJOS REPORTADOS .....</b>	<b>22</b>
<b>2. METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1 SELECCIÓN DEL MUNICIPIO .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 ANÁLISIS DEL MANEJO DE RSU DE MUNICIPIOS REPRESENTATIVOS .</b>	<b>27</b>
<b>2.3 ANÁLISIS SOCIAL DEL MUNICIPIO SELECCIONADO .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL MUNICIPIO SELECCIONADO .....</b>	<b>31</b>
2.4.1 Objetivo, unidad funcional y límites.....	31
2.4.2 Propuesta de escenarios del manejo de RSU del municipio .....	31
2.4.3 Inventario de Ciclo de Vida.....	34
<b>2.5 ANÁLISIS AMBIENTAL DEL MANEJO ACTUAL DE RSU Y ESCENARIOS PROPUESTOS .....</b>	<b>39</b>
<b>2.6 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL ESCENARIO SELECCIONADO Y DISEÑO DE PROPUESTA .....</b>	<b>40</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1 SELECCIÓN DEL MUNICIPIO .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2 ANÁLISIS DEL MANEJO DE RSU DE MUNICIPIOS REPRESENTATIVOS .</b>	<b>53</b>
<b>3.3 ANALISIS SOCIAL EN EL MUNICIPIO SELECCIONADO.....</b>	<b>61</b>
3.3.1 Responsabilidad sobre los RSU y disposición a pagar.....	63
3.3.2 Nivel socioeconómico y disposición a reciclar .....	64
<b>3.4 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA AL MANEJO DE RSU .....</b>	<b>67</b>
3.4.1 Objetivo, unidad funcional y límites.....	68
3.4.1 Unidad Funcional.....	68
3.4.2 Límites del sistema y alcance .....	68
3.4.3 Análisis de ciclo de inventario.....	69

<b>3.5 ANÁLISIS AMBIENTAL DEL MANEJO ACTUAL DE RSU Y ESCENARIOS PROPUESTOS .....</b>	<b>79</b>
3.5.1 Calentamiento Global .....	79
3.5.2 Agotamiento del Ozono estratosférico .....	81
3.5.3 Eutrofización Agua terrestre .....	82
3.5.4 Ecotoxicidad en agua terrestre .....	84
3.5.5 Uso de suelo .....	85
<b>3.6 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL ESCENARIO SELECCIONADO .....</b>	<b>86</b>
<b>4.CONCLUSIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>5. REFERENCIAS.....</b>	<b>92</b>

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.1 Municipios con recolección selectiva .....	10
Tabla 1.2 Tipos de tratamiento de RSU .....	11
Tabla. 1.3 Municipios con tratamiento de RSU .....	11
Tabla 1.4 Tipo y categoría de SDF .....	12
Tabla 1.5 Categorías de impacto ambiental .....	18
Continuación Tabla 1.5 Categorías de impacto ambiental .....	19
Tabla 1.6 Trabajos consultados .....	22
Tabla 2.1. Escala de correlación entre variables .....	26
Tabla 2.2 Escala verbal de Saaty .....	27
Tabla 2.3 Variables propuestas para análisis de comportamiento de la población .....	30
Tabla 2.4 Descripción del proceso seleccionado .....	31
Tabla 2.5. Normas mexicanas para caracterización física de RSU .....	35
Tabla 3.1 Lista de municipios del este del Estado de México y aledaños.....	42
Tabla 3.2 Análisis de correlación con todos los subcriterios .....	44
Tabla 3.3 Análisis de correlación subcriterios seleccionados .....	45
Tabla 3.4 Agrupamiento de municipios en clúster 1 .....	47
Continuación Tabla 3.4 Agrupamiento de municipios en clúster 1 .....	48
Tabla 3.5 Agrupamiento de municipios en clúster 2 .....	48
Tabla 3.6. Agrupamiento de municipios en clúster 3 .....	49
Tabla 3.7. Tabla general para clúster 1 .....	51
Tabla 3.8 Tabla general para clúster 2.....	52
Tabla 3.9 Porcentaje de robo a casa-habitación y transeuntes .....	52
Tabla 3.10 Análisis de Bandos Municipales.....	53
Tabla 3.11 Análisis de Cédulas de entrevista .....	54
Tabla 3.12 Generación de RSU por municipio seleccionado .....	58
Tabla 3.13 Recolección en municipios seleccionados .....	59
Tabla 3.14 Tipo de recolección en municipios seleccionados .....	59
Tabla 3.15 Tipo de vehículos en recolección.....	60

<b>Tabla 3.16 SDF en los municipios seleccionados .....</b>	<b>61</b>
<b>Tabla 3.17 Conocimiento y actitud de los habitantes de Xalatlaco.....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 3.18. Localidades por estrato socioeconómico.....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 3.19. Rutas de camiones del municipio de Xalatlaco.....</b>	<b>71</b>
<b>Tabla 3.20. Entradas y salidas de la etapa de recolección. ....</b>	<b>72</b>
<b>Tabla 3.21. Etapa de compostaje. ....</b>	<b>74</b>
<b>Tabla 3.22. Etapa de separación. ....</b>	<b>77</b>
<b>Tabla 3.23. Residuos inorgánicos reciclables. ....</b>	<b>78</b>
<b>Tabla 3.24 Entradas y salidas en la etapa de disposición final del E1 .....</b>	<b>78</b>
<b>Tabla 3.25 Aportación por etapa en calentamiento global .....</b>	<b>80</b>
<b>Tabla 3.26. Aportación por etapa en Ozono estratosférico .....</b>	<b>82</b>
<b>Tabla 3.27. Aportación por etapa en Eutrofización agua terrestre.....</b>	<b>83</b>
<b>Tabla 3.28. Aportación por etapa en Ecotoxicidad en agua terrestre .....</b>	<b>84</b>
<b>Tabla 3.29. Aportación por etapa en Uso de suelo .....</b>	<b>86</b>
<b>Tabla 3.30 Costos por tonelada manejada/d entre escenarios .....</b>	<b>87</b>

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1 Jerarquía de Prevención y Gestión de RSU .....	5
Figura 1.2. Flujo del MIRSU .....	6
Figura 1.3. Recolección de RSU por municipio del Estado de México .....	9
Figura 1.4 Etapas del Análisis de Ciclo de Vida .....	15
Figura 1.5 Análisis de Inventario del Ciclo de Vida.....	17
Figura 2.1 Diagrama de bloques del método .....	24
Figura 2.2. Criterios y subcriterios diseñados.....	25
Figura 2.3. Escenarios propuestos .....	34
Figura 3.1 Mapa de municipios del este del Estado de México y aledaños .....	41
Figura 3.2 Análisis de clúster de los municipios.....	46
Figura 3.3. Modelo jerárquico para cada clúster seleccionado.....	50
Figura 3.4 Diagrama de flujo de bloques del municipio de Axapusco .....	55
Figura 3.5 Diagrama de flujo de bloques del municipio de Xalatlaco .....	56
Figura. 3.6 Diagrama de flujo de bloques del municipio de Huitzilac .....	57
Figura 3.7 Municipio de Xalatlaco .....	62
Figura 3.8 Porcentaje de participación del nivel socioeconómico “Medio” .....	66
Figura 3.9. Porcentaje de participación del nivel socioeconómico “Bajo” .....	66
Figura.3.10 Porcentaje de participación a reciclar .....	67
Figura 3.11. Límites del sistema .....	69
Figura 3.12 Caracterización física de RSU de Xalatlaco, Estado de México .....	70
Figura 3.13 Estudio de ruteo en camiones recolectores de Xalatlaco.....	72
Figura 3.14 Presencia de animales en la etapa de recolección.....	73
Figura 3.15 RSU de una casa tipo vecindad .....	73
Figura 3.16 Calles del municipio de Xalatlaco .....	74
Figura 3.17 Composta del municipio de Xalatlaco .....	75
Figura 3.18: Diagrama de Ishikawa en la etapa de compostaje .....	76
Figura 3.19 Pequeñas corrientes de lixiviados .....	76
Figura 3.20 Contribución al Impacto en la categoría cambio climático.....	81

<b>Figura 3.21. Contribución al Impacto en la categoría agotamiento del ozono ...</b>	<b>82</b>
<b>Figura 3.22. Contribución al Impacto en la categoría eutrofización agua terrestre .....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 3.23. Contribución al Impacto en la categoría Ecotoxicidad del agua ....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 3.24. Contribución al Impacto en la categoría uso del suelo.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 3.25 Diagrama de flujo del MIRSU propuesto .....</b>	<b>89</b>

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Banco Mundial “en el año 2018 había cerca de 7,594 millones de personas a nivel mundial y se prevé que para el 2030 el número se elevará a 1,000 millones de personas” (Banco Mundial, 2018). En México al 2015 había 119 millones de habitantes y se estima que para el 2050 se alcance la cantidad de 148.2 millones de personas, donde la mayoría estará concentrada en las grandes ciudades y demandará cierta cantidad de recursos para su desarrollo y bienestar; aunado a ello, cada actividad que se realiza genera residuos, los cuales pueden afectar el suelo, el aire y el agua (Kiss & Aguilar, 2006).

Dentro de las clasificaciones de los residuos sólidos destacan los residuos sólidos urbanos (RSU), los cuales son definidos como “aquellos generados en las casas habitación, y que resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas, de los productos que se consumen y de los embalajes o empaques” (DOF, 2015). De acuerdo a la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT , 2020), a nivel nacional se estima una generación de RSU de 128 t/d mientras que la producción *per cápita* de RSU llega a la cifra de 0.944 kg/hab-d; sin embargo esta cantidad llega a tener cambios según la zona, en el Noroeste se estima de 1.047 kg/hab-d mientras que en el centro se encuentra en 0.766 kg/hab-d, esto debido a las características particulares de cada zona.

Como ya se hizo mención, la generación de los residuos puede provocar daños al medio ambiente. Para evitar y remediar esto, es necesario aplicar un apropiado manejo integral, el cual consiste de múltiples etapas, acopladas unas con otras; sin embargo, ha sido una tarea laboriosa, el diseño del mismo, debido a que involucra conocimientos técnicos, económicos y sociales (Konstadinos, 2011). En México, la mayoría de los municipios se enfrentan a retos referentes a la aplicación de un correcto Manejo Integral de los RSU (MIRSU), debido principalmente a la falta de personal capacitado, así como de recursos económicos y de infraestructura (Soto, 2013).

Otra de las dificultades a las que se enfrentan las personas encargadas de estudiar y diseñar sistemas para el manejo de los RSU, es que las investigaciones se encuentran enfocadas principalmente a la caracterización de los mismos o a alguna etapa en específico; como es el caso de Castillo-González & De Medina-Salas., (2014), la cual está centrada en el estudio de la generación y caracterización de los residuos en Veracruz, México; los trabajos de Taboada-González *et al.*, (2011) y Hernández-Berriel *et al.* (2016) versan en estudios de caracterización en el sur y centro del país respectivamente; o está el estudio de Bernache (2012), el cual aborda el impacto ambiental que tienen los residuos en la etapa de disposición final.

Por lo tanto, para encontrar soluciones ambientalmente sustentables, donde se involucren diferentes opciones de tratamiento, es necesario el uso de herramientas que evalúen el impacto ambiental desde todas las áreas posibles, y que sea vea también de manera global. Dentro de la literatura se puede encontrar una variedad de instrumentos que cumplan con lo antes mencionado, como los sistemas de gestión ambiental, certificaciones ambientales, etiquetado ecológico, auditorías ambientales y análisis de ciclo de vida (ACV) (López Jara *et al.*, 2017), siendo esta última, la de mayor versatilidad, facilidad y aplicación dentro de diferentes áreas. El ACV es una herramienta que evalúa y mide los impactos ambientales asociados con productos o actividades a lo largo de su vida, donde se incluye la extracción, procesamiento de materias, manufactura, transporte, uso y disposición final; o como comúnmente se dice “de la cuna a la tumba” (Rebitzer *et al.*, 2004).

La ventaja que tiene el uso del ACV es la identificación de oportunidades que el producto o servicio puedan tener desde la mejora ambiental, lo que da como resultado la toma de decisiones planeadas y basadas en la eficiencia de ésta (Romero-Rodríguez, 2003). Si bien, el ACV fue creado para el sector industrial, desde los años 90's se ha utilizado para evaluar la factibilidad ambiental de opciones para el MIRSU en países como Asia y Europa (Chen & Christensen, 2010; Omid, Derakhshan, & Mokhtari, 2017; Otoma & Diaz, 2015; Woon & Lo, 2016), mientras que en América Latina han sido pocos los países que han utilizado dicha herramienta (Goicochea &

Fabregat, 2015; Mendes, Aramaki, & Hanaki, 2004; Ziegler-Rodriguez, Margallo, Aldaco, Vázquez-Rowe, & Kahhat, 2019), en este último resaltó la falta de datos de inventario en las bases de datos en los programas comerciales en términos de gestión de residuos. En México, hasta donde tienen conocimiento los autores, los proyectos donde se ha aplicado el ACV a los residuos son contados; se tiene el estudio de Cruz Sotelo et al. (2017), donde utilizaron la metodología para calcular el impacto ambiental al extender la vida útil de un teléfono celular; y el caso de Juárez et al. (2008), que aplicaron específicamente el ACV al Sistema de gestión de residuos municipales de la Ciudad de México.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue el ACV del manejo de los RSU del municipio de Xalatlaco. El primer capítulo comprende la base teórica en cuanto a los RSU, su manejo y el ACV; mientras que el segundo capítulo se describen los pasos de la metodología implementada. En el tercer capítulo se detallan los resultados de los diferentes escenarios analizados y finalmente se presentan las conclusiones.

## 1. FUNDAMENTOS

El desarrollo de cualquier actividad económica, desde la producción hasta el consumo, genera residuos, los cuales pueden llegar a tener un impacto negativo en el ambiente. Dentro de la clasificación que le da la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) a los residuos en México, se encuentran los residuos de manejo especial (RME) y los residuos sólidos urbanos (RSU).

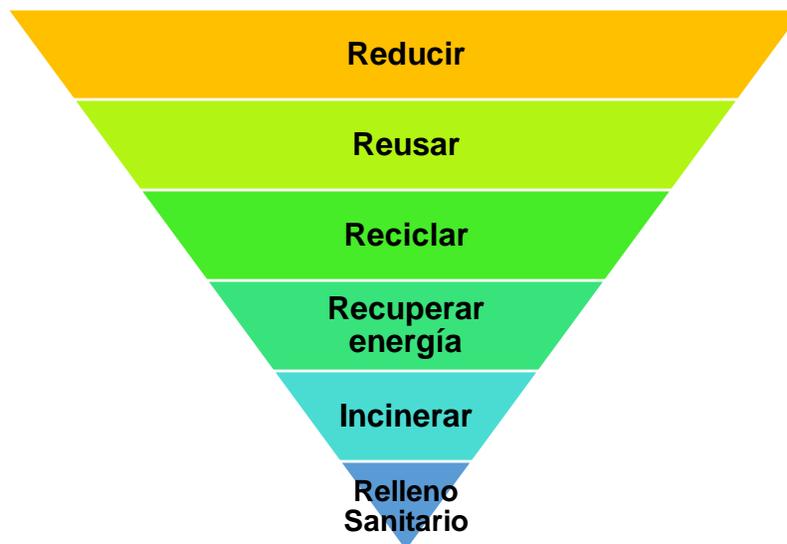
### 1.1 Residuos Sólidos Urbanos

Los RSU son aquellos generados en los procesos productivos, generados en grandes cantidades. De acuerdo a la SEMARNAT, son “todos aquellos generados en casa-habitación, y que resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas, de los productos que se consumen, de los envases, embalajes o empaques; así como los que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, así como los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos” (DOF, 2015). Para el año 2015, se estimaba que en México había cerca de 119 millones de personas, de las cuales cada uno llegó a generar aproximadamente 1 kg de RSU, dato parecido a lo que genera un país desarrollado (Ceballos-Pérez , 2012) y se prevé que esta cantidad de personas aumente a 148.2 millones para el 2050, aumentando también la producción de residuos.

La ausencia de una cultura de evaluación del impacto ambiental que produce el manejo de los RSU, ha impedido medir y reconocer las consecuencias que éstas traen (Núñez Espinoza, 2016). Uno de los cambios que sufre el medio ambiente por un inadecuado manejo es “la descomposición de suelos, agua y aire, así como una lista de enfermedades asociados a estos cambios” (Rangel, 2015). Aunado a esta falta de evaluación, el control de los residuos por parte de los municipios, tienen diversas áreas de oportunidad en casi todas sus ramas, desde el diseño hasta la ausencia de programas de educación y capacitación ambiental (Jaramillo *et al.*, 1999). Y es debido

al enfoque tradicional que se le ha dado al manejo, donde la recolección y la disposición final, principalmente en tiraderos a cielo abierto (TCA) o en el mejor de los casos en los Rellenos Sanitarios (RESA), los cuales, en varios casos, no operan de forma eficiente, ocasionando que no se vea reflejado en la minimización de los residuos.

Para tratar de mitigar estos obstáculos, se implementó el Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos (MIRSU), donde la parte más importante es que todas las etapas que lo conforman sean diseñadas e implementadas como un todo (Brito *et al.*, 2016); siempre rigiéndose bajo el concepto de la Jerarquía de Prevención y Gestión de RSU (Figura 1.1) donde lo primordial sea la reducción de los RSU por medio del rechazo, dejando al final y como última opción la disposición final de los mismos.



Fuente: FCC Recycling UK, 2011

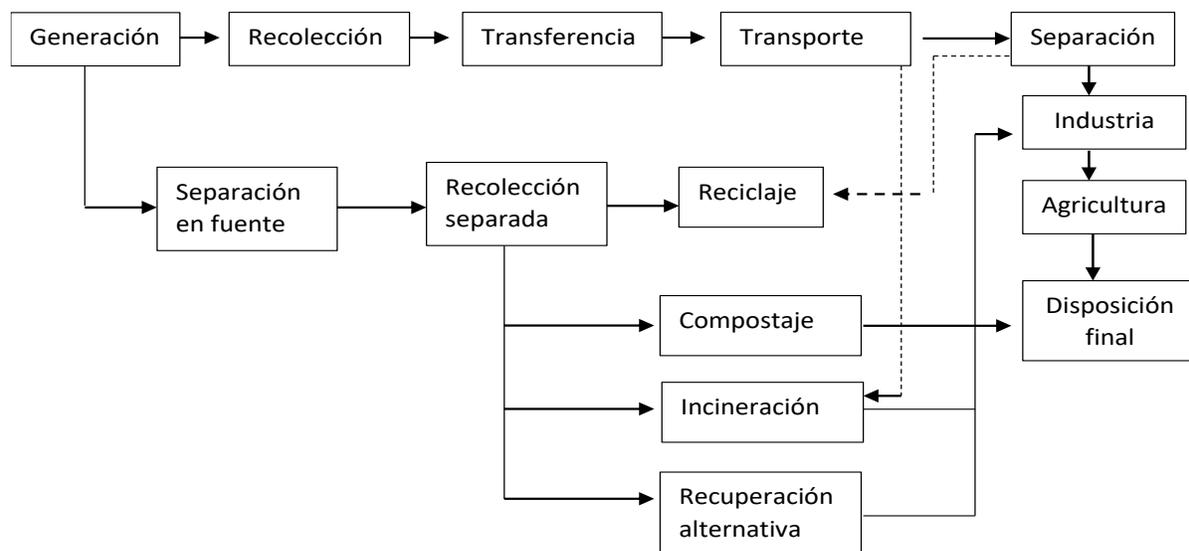
Figura 1.1 Jerarquía de Prevención y Gestión de RSU

Dentro de la reducción se hace hincapié al consumo de los productos a consumirse, ya que se procura generar la mínima cantidad de residuos posible, como segundo escalón, se llama reutilización al uso de un residuo sin ningún tratamiento químico, logrando una utilidad nueva a este y así lograr su tiempo de vida. Por su parte el reciclaje consiste en la transformación de un desecho en un nuevo producto por medio

de tratamientos físicos o químico, va de la mano de la recuperación de energía, donde se usan tratamiento términos controlados, un ejemplo puede ser la incineración cuando el potencial energético es usado para producir energía. Por último, la disposición final, es la opción menos deseada, sin embargo, la mayoría de RSU llega aquí, lo que implica que a largo plazo se ocasionen afectaciones al ambiente (Fernández-Badillo, 2020) .

## 1.2 Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos

Se le denomina MIRSU a “todas aquellas actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico, 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”; (Diario Oficial de la Federación, 2015) (Brito *et al.*, 2016) (Figura 1.2).



Fuente: SEMARNAT, 2012

Figura 1.2. Flujo del MIRSU

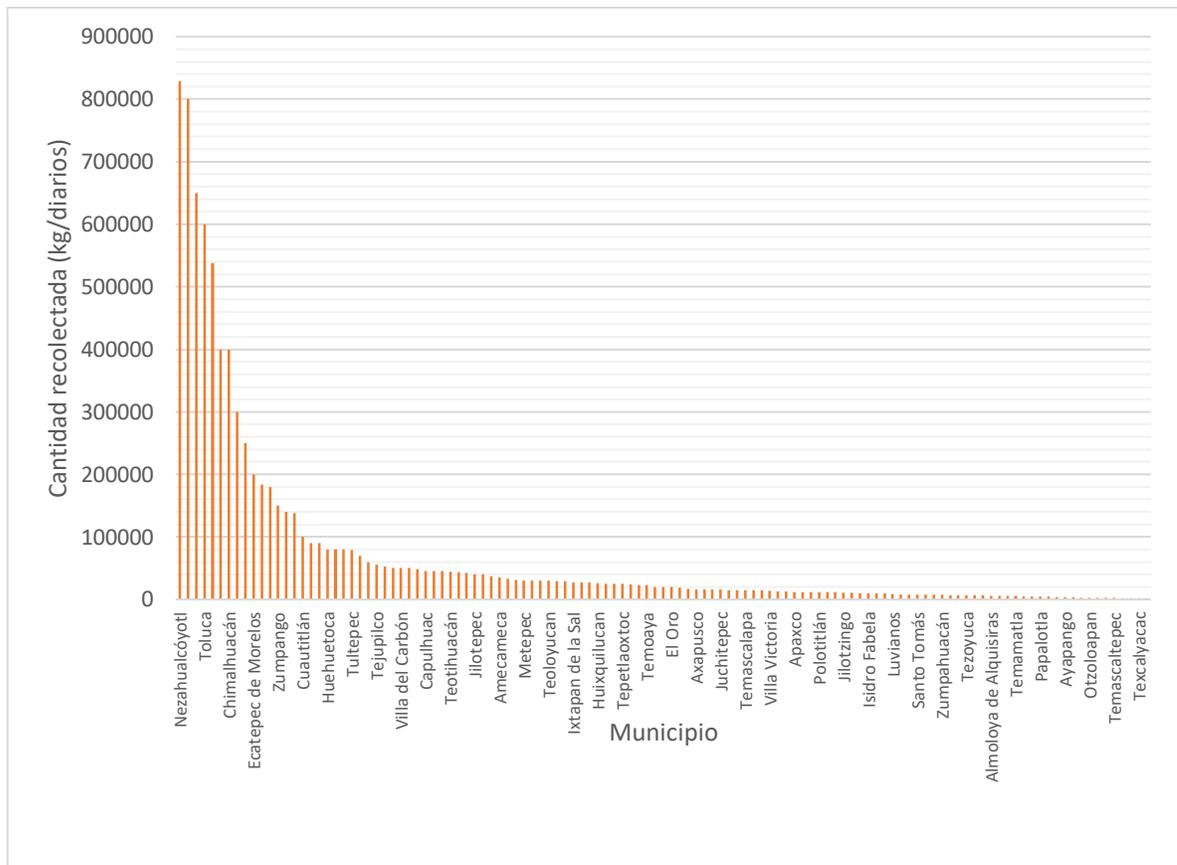
Las diferentes etapas del MIRSU pueden ser aplicadas de acuerdo con las características de cada municipio, desde las económicas hasta las sociales, sin embargo, las principales se enlistan a continuación:

a) Generación en fuente. Se le denomina “generador a toda aquella persona física que produce residuos, a través del desarrollo de procesos productivos o de consumo; mientras que fuente es cualquier establecimiento generador de RSU incluido dentro de los giros municipales a muestrear” (DOF, 2015; SEMARNAT, 1992). Las cifras reportadas sobre generación de RSU a nivel nacional llegan a presentar ciertas acotaciones debido a la falta de datos precisos, sin embargo, se han realizado aproximaciones con datos del crecimiento de la población. Se estima que en 20 años (1992 a 2012) la generación de RSU se ha incrementado en un 91.7% que es el equivalente a 42 mil 103 toneladas al año (SEMARNAT, 2012b). De acuerdo con el Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2015) se estima que las entidades con mayor crecimiento poblacional serán: Quintana Roo, Baja California, Campeche, Querétaro y el Estado de México, en este último reside el 13.5% de la población, para el 2015 contaba con una densidad poblacional de 17 millones habitantes y se calcula un incremento a 20 millones para el 2050, dicho crecimiento demográfico ha suscitado un aumento exponencial en la generación de RSU. En términos de generación *per cápita* (por habitante al día) para el año 2014 se determinó para el Estado de México de 0.447 kg/hab-d, siendo Tlanepantla un punto extremo con una cantidad de 0.686 y Teotihuacán el de menor cantidad con 0.267 kg/hab-d para dicho año.

b) Recolección: Esta etapa es uno de los elementos medulares del sistema de MIRSU, y generalmente es de los más costosos, lo que hace que el porcentaje de recolección se centre en su mayoría en las cabeceras municipales (SEDESOL, 2009). De acuerdo con cifras a nivel nacional, en el año 2012 la recolección representaba el 93.4% de los residuos generados para el mismo periodo (Rangel, 2015).

Desde el punto de vista ambiental y de salud pública, tiene una relevancia fundamental, ya que estos si son “recolectados de manera adecuada pueden ser recuperados o dispuestos adecuadamente” (Coad, 2011). Partiendo de esto, la recolección puede ser de manera mixta o separada; la primera es la forma más común, dado que en este sistema se requieren pocos cambios de comportamiento en los habitantes, ya que no precisa una separación en la fuente. Además, este tipo de recolección propicia que los trabajadores del sistema realicen una pre-pepena en los camiones, sin embargo, ésta llega a ser de manera manual y no es eficiente para una adecuada recuperación. La recolección selectiva implica que las fracciones sean separadas desde la fuente y posteriormente recolectadas de igual manera, de forma independiente. Las ventajas de este tipo de manejo es que se reduce la contaminación cruzada producidas por los mismos RSU; aunado a esto, se puede realizar un mejor tratamiento a cada uno de los residuos separados (SEMARNAT-GTZ, 2006).

En el Estado de México, de los 125 municipios que lo conforman, 123 cuentan con sistema de recolección; los tres municipios con mayor recolecta son Nezahualcóyotl, Naucalpan de Juárez y Tlanepantla de Baz con 829 000, 800 000 y 650 000 kg/día respectivamente, como se observa en la figura 1.3.



Fuente: INEGI, 2011.

Figura 1.3. Recolección de RSU por municipio del Estado de México

Dentro de estos datos de recolección, sólo 19 municipios tienen registro de llevar a cabo una recolección selectiva con diferentes porcentajes de éxito (Tabla 1.1) (INEGI, 2011). Cabe mencionar que el municipio de Xalatlaco no figura en esta información, sin embargo, lleva a cabo la recolección en dos partes: orgánicos e inorgánicos, de acuerdo con el plan municipal 2015-2018.

Tabla 1.1 Municipios con recolección selectiva

MUNICIPIO	PORCENTAJE (%)
Atizapán	80
Atizapán de Zaragoza	2
Atlacomulco	21
Calimaya	30
Coyotepec	80
Ixtlahuaca	1
Xalatlaco	70
Morelos	60
Ocuilan	10
Ozumba	10
Temascaltepec	75
Texcaltitlán	1
Texcalyacac	80
Toluca	30
Tonatico	5
Tultitlán	8
Valle de Bravo	20
Zumpango	60
Tonanitla	100

Fuente: INEGI, 2014

c) Tratamiento: De acuerdo con la (DOF, 2015) se le llama tratamiento de los RSU a “todos aquellos procedimientos físicos, químicos, biológicos o térmicos, mediante los cuales se cambian las características de los residuos y se reduce su volumen o peligrosidad”. Los métodos de tratamiento de los RSU, se pueden clasificar en varias formas, las cuales se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Tipos de tratamiento de RSU

TIPO DE PROCESO QUE INVOLUCRAN	CONFORME A LOS PROPÓSITOS
Separación (manual o mecanizada)	Separación (manual o mecanizada)
Trituración	Vitrificación
Separación magnética	Composteo
Compactación	Pirolisis
Procesos Químicos	Producción de Energía
Hidrólisis	Digestión Anaerobia
Oxidación	Incineración
Vitrificación	Pirolisis
Procesos Biológicos	Dstrucción de Agentes Infecciosos
Composteo	Incineración
Digestión Anaerobia	Microondas

Fuente: Esquer-Verdugo, 2009

De acuerdo con cifras del INEGI (2013), en el Estado de México, de los 125 municipios existentes a lo largo del territorio, un municipio contaba con tratamiento inorgánico y ocho con tratamiento orgánico (Tabla 1.3)

Tabla. 1.3 Municipios con tratamiento de RSU

MUNICIPIO	DOMINIO	PRODUCTO	T/DÍA	PERSONA	DESTINO
Atizapán de Zaragoza	Municipal	Composta	10	1	Parques y jardines
Capulhuac	Municipal	Composta	20	6	Parques, jardines
Xalatlaco	Municipal	Composta	SD	SD	parque y jardines
Mexicalzingo	Privada	Composta	3	SD	Distribución panteones y jardines
Nicolás Romero	Privada	Fertilizante	SD	SD	En proceso
Tepotztlán	Privada	Composta	SD	5	SD
Tequixquiac	Municipal	Composta	SD	2	Distribución en parques y jardines
Tonatico	Municipal	Composta	2	1	Distribución entre ejidatarios de la región
Chalco	Privada	Separación mecánica	SD	SD	SD

SD: sin datos proporcionados

Fuente: Molina, 2015.

d) Disposición Final: La disposición final de residuos debe ser limitada a aquellos cuya valorización o tratamiento no sea económicamente viable, tecnológicamente factible y ambientalmente adecuada (DOF, 2015). Sin embargo, en México sólo se reciclan cerca del 10% de todos los RSU generados, el 60.54% es dispuesto en RESA, el 15.93% en TCA y el 2.07% se desconoce su paradero (SEMARNAT, 2012a). Debido a la forma en la cual está diseñado el MIRSU en donde la mayoría de estos son dispuestos sin ser valorizados, estos porcentajes muestran los pocos esfuerzos de las autoridades por llevar a cabo un manejo integral, enfocándose en la construcción de sitios de disposición final; aun cuando el mal diseño y poco seguimiento a la normatividad sea la forma que más contamina. Las consecuencias de seguir con este modelo de disposición, será el posible aumento de impactos ambientales a suelo, aire y agua además de la desigualdad social, ya que en su mayoría estos sitios se encuentran ubicados en zonas con gente de bajos recursos (Massey, 2004).

Para el año 2014, dentro del Estado de México, se reportaron 76 sitios en operación, entre los cuales se encontraban 21 RESA, 20 sitios controlados (SC) y 35 TCA, en la tabla 1.4 se muestra la distribución.

Tabla 1.4 Tipo y categoría de SDF

MUNICIPIO	SDF	GRUPO	MUNICIPIO	SDF	GRUPO
Apaxco	RESA	C	Valle de Bravo	SC	B
Atizapan de Zaragoza	RESA	A	Villa del Carbón	SC	C
Ayapango	RESA	C	Acambay	TCA	C
Chicoloapan	RESA	A	Aculco	TCA	C
Chimalhuacán	RESA	A	Almoloya del Río	TCA	C
Coatepec Harinas	RESA	C	Amatepec	TCA	C
Cuautitlán Izcalli	RESA	A	Amecameca	TCA	C
Ecatepec de Morelos	RESA	A	Atlautla	TCA	C
Ixtapaluca (El milagro)	RESA	A	Axapusco	TCA	C
Ixtapaluca (La Cañada)	RESA	A	Chapa de Mota	TCA	C
Naucalpan de Juárez	RESA	A	Cocotitlán	TCA	D

Continuación Tabla 1.4 Tipo y categoría de SDF

MUNICIPIO	SDF	GRUPO	MUNICIPIO	SDF	GRUPO
Polotitlán	RESA	D	Isidro Fabela	TCA	D
San Antonio la Isla	RESA	A	Jaltenco	TCA	C
Tecámac	RESA	A	Joquicingo	TCA	D
Tepotzotlán	RESA	A	Mexicalzingo	TCA	C
Tlalnepantla de Baz	RESA	A	Morelos	TCA	D
Xonacatlán	RESA	A	Nopaltepec	TCA	D
Zacazonapan	RESA	D	Otumba	TCA	D
Zinacantepec	RESA	A	Ozumba	TCA	C
Atacomulco	SC	B	San José del Rincón	TCA	A
Calimaya	SC	C	San Martín de las Pirámides	TCA	C
Huehuetoca	SC	B	San Simón de Guerrero	TCA	D
Jilotepec	SC	C	San Tomás	TCA	C
Jiquipilco	SC	C	Sultepec	TCA	D
Jocotitlán	SC	B	Temamatla	TCA	C
Luvianos	SC	C	Temascalapa	TCA	C
Otzoloapan	SC	D	Tenango del Valle	TCA	D
Papalotla	SC	D	Tepetlixpa	TCA	C
San Felipe del Progreso	SC	C	Texcalyacac	TCA	C
Soyaniquilpan de Juárez	SC	D	Tlalmanalco	TCA	C
Tejupilco	SC	C	Tlatlaya	TCA	C
Temascaltepec	SC	C	Villa Victoria	TCA	C

Fuente: Mario Molina, 2015

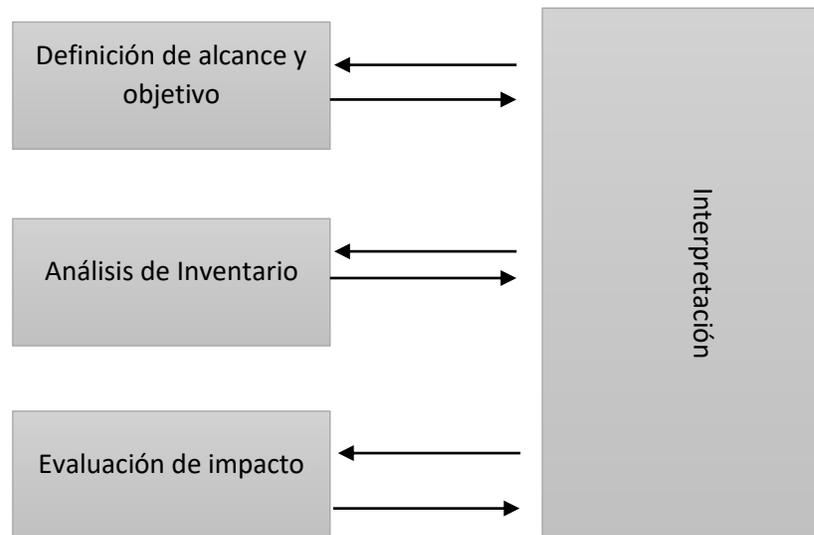
### 1.3 ANALISIS DE CICLO DE VIDA

Debido al problema ambiental presentado por los RSU, para este estudio, fue necesario el uso de metodologías que ayudaran a la evaluación desde diferentes áreas, entre los métodos que se han desarrollado destacan los Sistema de Gestión Ambiental, Certificaciones ambientales, Etiquetado Ecológico, Auditorías ambientales y Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (López Jara *et al.*, 2017; Rodríguez-Córdova, 2016). Si bien el uso de cada uno de ellos depende del objetivo del estudio, el ACV es una

metodología que “identifica, evalúa y cuantifica los impactos ambientales asociados con productos o actividades a lo largo de su vida, donde se incluye la extracción, procesamiento de materias, manufactura, transporte, uso y disposición final; o como comúnmente se dice “de la cuna a la tumba” mostrando así las oportunidades de mejora para cada una de las etapas” (Azapagic, 1999; Guinée, 2002; Rebitzer *et al.*, 2004).

Ésta trata los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización tratamiento final, reciclado, hasta la disposición final. Para esto se deben de considerar cuatro etapas: definición del objetivo y el alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto ambiental y fase de la interpretación (AENOR, 2006a) (Figura 1.4).

Dentro de la evaluación del impacto ambiental, la selección de las categorías de impacto deben ser coherentes con el objetivo y las características del sistema estudiado y, pueden seleccionarse entre las trece más comunes: consumo de recursos, calentamiento global, reducción de la capa de ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad, acidificación, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicas, uso de suelo, ruidos y olores, efectos a la salud en el lugar de trabajo y generación de residuos (ISO 14040, 2007; Llanes *et. al.*, 2006).



Fuente: ISO 14044, 2006

Figura 1.4 Etapas del Análisis de Ciclo de Vida

La ventaja que tiene el uso del ACV es la identificación de oportunidades que el producto o servicio puedan tener desde la mejora ambiental, lo que da como resultado la toma de decisiones planeadas y basadas en la eficiencia de ésta (Romero Rodríguez, 2003).

### 1.3.1 Objetivo, alcance y unidad funcional

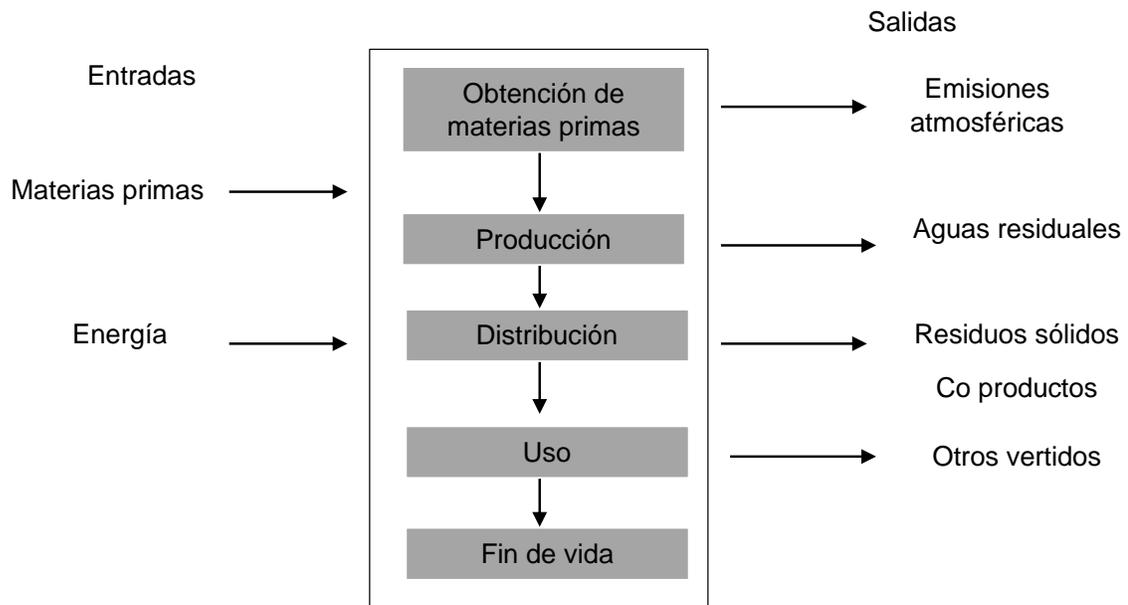
La realización de un estudio de ACV, se puede llevar a cabo por diferentes motivos, por lo que en un principio se deben establecer el o los objetivo(s). Aquí se exponen las razones por los que se desarrolla el estudio, la aplicación prevista y a quién va dirigido. El objetivo del estudio puede ser variado y depende de la persona que lo está estudiando puesto que existen casos en los cuales este paso puede satisfacerse únicamente con un análisis de inventario y una interpretación. Aquí se establecen las razones para la aplicación del estudio, el público previsto y como se darán a conocer los resultados; mientras que el alcance incluye los puntos: unidad funcional, los límites del sistema y los procedimientos de asignación (Guinée, 2002).

El alcance consiste en la definición de la amplitud y profundidad y detalle del estudio, al definirse, se deben esclarecer de la forma más clara y precisa las funciones del producto o proceso. Dentro de la unidad funcional se define la cuantificación de estas funciones, debido a su definición la cual es la cantidad de productos o servicios que se necesitan para cumplir la función; representa la base para establecer comparaciones con otros estudios, las entradas y salidas, así como al sistema a estudiar, puede ser de tipo físico (por ejemplo: una botella, un carro, una puerta) o de tipo funcional (1m<sup>2</sup> de una superficie, 1 m<sup>3</sup> de agua), si es necesario la comparación de dos sistemas, estos deben de estar definidos bajo la mismas unidades funcionales (Ruiz Fernandez, 2007).

Debido a que un estudio de ACV puede llegar a ser tan extenso como el sistema lo establezca, es necesario la definición de límites, criterios de exclusión y limitación económicas (Güereca, 2006).

### **1.3.2 Análisis de Inventario**

El proceso de análisis de inventario es básicamente la recolecta de los datos involucrados dentro del proceso o producto a estudiar, mediante las herramientas necesarias. En este se incluye la identificación y cuantificación de las entradas (consumo de recursos) y salidas (emisiones al aire, suelo, aguas y generación de residuos) del sistema del producto (AENOR, 2006a). Los datos para cada proceso unitario dentro de los límites del sistema pueden clasificarse como: las entradas de energía, materia prima, los productos o subproductos, residuos, emisiones al aire, los vertidos al agua y suelo entre otros aspectos ambientales.



Fuente: Pascual-Sevilla, 2013

Figura 1.5 Análisis de Inventario del Ciclo de Vida

Por estas características, esta etapa es la más larga y la que se debe de realizar con mayor cuidado y precisión, debido a que si existen errores estos pueden llegar a afectar los resultados finales. Los datos necesarios pueden ser obtenidos de bases de datos establecidas (datos genéricos) o a partir de datos recolectados (datos en campo) (Ruiz -Fernandez, 2007).

### 1.3.3 Evaluación del impacto ambiental.

En la evaluación del impacto de ciclo de vida, "se utilizan los resultados del análisis del inventario, se evalúa la importancia de los potenciales impactos ambientales generados y por último, se llega a la interpretación de los resultados, de acuerdo con los objetivos y alcance del estudio, también a las conclusiones, y se dan recomendaciones basadas en dichos resultados. Esta fase comprende las siguientes etapas:

- a) Selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos a usar.
- b) Clasificación de los datos del inventario es cada una de las categorías de impacto.  
Se define a la categoría de impacto como aquella representación del resultado ambiental generado por el (los) proceso(s) o sistemas de un producto.
- c) Caracterización de datos, es el modelaje, mediante los factores de caracterización de los datos de inventario para cada una de las categorías establecidas ” (Leiva, 2016).

Existen diferentes métodos de evaluación de impacto y cada uno de ellos incluye diferentes categorías de impacto y metodologías, el cual se deberá escoger dependiendo del objetivo y límites establecidos. A continuación, se muestran algunos de los principales métodos que se utilizan: CML 1992, CML 2001, ECO-INDICATOR 95, ECO-INDICATOR 99, HUELLA ECOLOGICA, ECOPOINT 97, Cumulative Energy Demand, Cumulative Exergy Demand, EDIP/UMIP 97, EDIP 2003, EPS 2000, IPCC 2007, TRACI y EPD 2007.

Mientras que la tabla 1.5 muestra algunas de las categorías de impacto que contienen estos métodos.

Tabla 1.5 Categorías de impacto ambiental

CATEGORÍAS DE IMPACTO	DESCRIPCIÓN
Agotamiento recursos abióticos	Disminución de la disponibilidad de recursos naturales. Se incluye en esta categoría recursos abióticos y energía, se puede calcular por medio de la fórmula: $AR = \sum F_i \times m_i$ donde AR es el indicador de agotamiento de recursos abioticos, $m_i$ es la cantidad del recurso utilizado, en kg, $m^3$ o MJ, y $F_i$ es el factor de caracterización de este recurso.
Uso de suelo	Denota impactos medioambientales referidos a la ocupación y transformación física de áreas de terreno.
Cambio climático	Se basa en los modelos desarrollados basados en el IPCC (Panel Internacional en Cambio Climatico), se expresa como potencial de calentamiento global para un plazo de 100 años.

Continuación Tabla 1.5 Categorías de impacto ambiental

Reducción capa de ozono	Los valores de este impacto se miden a través de aquellos hidrocarburos que contiene fluor, cloro y bromo o los bien llamados CFC. El daño se expresa en kg de CFC <sup>-11</sup> <sub>eq</sub> .
Ecotoxicidad	Son los daños a la calidad del ecosistema, como resultado de la emisión de sustancias tóxicas al aire, agua y tierra. Las sustancias que se concentran en la evaluación de los metales, tomando como referencia el cromo. El impacto se expresa en fracción potencialmente afectada (PAF) m <sup>2</sup> año/kg emisión.
Eutrofización	Se denomina eutrofización es causada por el nitrógeno, fosforo y sustancias orgánicas, El resultado se expresa en kg de PO <sub>4eq</sub> .

---

Fuente: Adaptado de Pascual-Sevilla, 2013

## **1.4 SUSTENTABILIDAD**

Se define que un sistema es sostenible cuando este presenta la capacidad de continuar en un futuro mediante la incorporación de principios económicos, ambientales y sociales. En términos de RSU el diseño tradicional que se ha manejado durante años, se ha enfocado en su mayoría en términos financieros y menos en la sostenibilidad ambiental y en el bienestar social. Por lo que es prescindible el cambio del manejo de los RSU a un MIRSU, ya que este último establece una solución completa y sostenible a la gestión de los residuos, basado en tres criterios principales: eficiencia ambiental, aceptación social y economía; ha surgido principalmente de la presión social y a los movimientos ambientalistas (Asefi *et al.*, 2020).

Debido a esto, los países en desarrollo han optado por instaurar, un MIRSU enfocado en las 4r's; reducción, recuperación, reciclaje y reutilización así como la producción de energía a partir de los RSU; además han optado por seguir la tendencia cero residuos, la cual fomenta la fabricación y uso sostenible de productos, optimiza la reutilización de recursos y minimiza la incineración así como la disposición final (David *et. al*, 2020). En contra parte en países de ingresos medianos y bajos, el diseño e implementación de tecnologías y soluciones técnicas en todas las etapas que conforman el manejo de RSU, ha sido complejo, aun contando con diversas herramientas y enfoques para su mejora (Perteghella *et.al*, 2020), como ejemplo se tiene México, en donde las municipalidades no cuentan con los suficientes recursos económicos para aplicar un MIRSU sustentable y los costos que se generan, como los del transporte y la disposición final ante un volumen de RSU cada vez mayor, son respuesta a un inadecuado manejo de estos, así mismo se debe sumar el costo del personal en la separación de estos, si se desea y planea sus aprovechamiento (Díaz-Cuenca *et.al*, 2018).

A pesar de esto, el sector informal (recolectores en calle, segregadores en sitio) es de suma importancia al momento de hablar de la recuperación de residuos con un valor reciclable (Abu Qdais, 2007; Ahmed *et al.*, 2007; Asim *et.al*, 2012). Por ello este grupo juega un papel importante para la conservación de los recursos y protección el medio ambiente y es de especial relevancia que los tomadores de decisiones y los planeadores del MIRSU de los municipios tomen en cuenta los beneficios económicos, ambientales y sociales de incorporar el reciclaje informal dentro de su manejo (Wilson, *et al.*, 2009). Existen estudios referente a la importancia de estos actores en todo el MIRSU, por ejemplo, en India, Egipto, Filipinas, Tailandia e Indonesia los SP son parte esencial de la cadena productiva de los residuos aunque en su mayoría trabajen de manera ilegal (Dias, 2016) o en el caso de Brasil donde se ha estudiado la importancia que tienen los SP, partiendo de un reconocimiento y una formalización de estas personas, a través de la formación de cooperativas y regulaciones públicas (Gutberlet, 2015). Mientras que en China, gracias a la pepena informal, el reciclado de material se

encuentra en un 6.8 a 7.3% siendo que del 70% al 80% de estos son recolectados por dicha actividad (Dias, 2016).

En consecuencia es necesario o para asegurar los objetivos de sostenibilidad, es necesario el optimizar el manejo de los RSU; lo que hace que el análisis de la recolección, el tratamiento, la conversión de energía y la disposición de estos, por medio de herramientas que vean al sistema como un todo, sea esencial al momento de diseñar (Taşkın & Demir, 2020). Así que es urgente el uso de herramientas como lo es el ACV dentro de los sistemas de manejo de RSU, por lo que el objetivo de este trabajo fue el de evaluar los impactos ambientales del sistema de manejo de RSU y tres escenarios propuestos del municipio de Xalatlaco mediante el ACV.

.

## 1.5 TRABAJOS REPORTADOS

La tabla 1.6 muestra algunos de los trabajos consultados durante la realización del proyecto, referentes a los temas de ACV e indicadores:

Tabla 1.6 Trabajos consultados

AUTOR, AÑO, PAÍS	TITULO	IDEA PRINCIPAL
Yang et al., 2014	<i>Household hazardous waste quantification, characterization and management in China's cities: A case study of Suzhou</i>	Propusieron un método en el cual mediante estándares económicos y medioambientales en cada uno de los procesos del manejo, encontrando que la medida más eficaz con la mayor disminución del impacto ambiental por costo unitario es aumentar la proporción de separación de RSU.
Atiq Uz – Zaman, 2014, Australia	<i>Measuring waste management performance using the Zero Waste Index: the case of Adelaide, Australia</i>	En términos del indicador Zero – Waste, se observa que a pesar de tener un 82.5% para el 2020 de desviación de materia virgen, puede que Adelaide no esté significativamente avanzada en sustitución de materiales.
Goulart Coelho, 2014, Francia	<i>Proposal of an environmental performance index to assess solid waste treatment technologies</i>	Analizan el tratamiento con menor impacto ambiental por medio de un índice propuesto basados en las leyes ambientales de Brasil
Goicochea – Cardoso, 2015, Cuba	<i>Evaluación ambiental del manejo de residuos sólidos domésticos en La Habana, Cuba</i>	Proponen un estudio sistemático donde todas las etapas del MIRSU sea evaluado mediante un análisis de ciclo de vida
Britto et al., 2016, Ecuador	Diseño De Un Sistema De Gestión Integral Para El Manejo De Residuos Sólidos En El Mercado “La Merced”	Diseñaron un proyecto de MIRSU para el Mercado “La Merced”, el cual integra lineamientos y procedimientos para aplicar estrategias de aprovechamiento (reciclaje y composta) con la finalidad de mitigar impactos ambientales negativos.
Cáilean & Teodosiu, 2016, Rumania	<i>An assessment of the Romanian solid waste management system based on sustainable development indicators</i>	En términos de huella de carbono (GEI) del MIRSU Rumano, indica resultados de -1.2 a 0.3 CO <sub>2eq</sub> / ton de RSU

Jiang <i>et al.</i> , 2017, China	<i>A Survey on the characteristics of trash bins in Singapore</i>	<i>En términos de reciclaje Singapur adopto el minimizar los RSU pero maximizar su reciclaje como una solución a largo plazo para el problema de su MIRSU, esto mediante un estudio para colocar contenedores adecuados para el reciclaje en puntos estratégicos, aunado a esto, diseñó una aplicación para que la ciudadanía conozca donde están dichos contenedores</i>
Jouhara <i>et al.</i> , 2017	<i>Municipal waste management systems for domestic use</i>	Indica que la recolección es uno de los puntos más débiles de todo el MIRSU, debido a las grandes distancias que existen del último punto de recolección al SDF.
Botello – Álvarez <i>et al.</i> , 2018, México	Informal collection, recycling and export of valuable waste as transcendent factor in the municipal solid waste management: Latin-American reality	El reciclaje informal de RSU tiene el potencial de disminuir, el índice de cambio climático, por los gases de efecto invernadero (GEI), en un 10% durante todo el MIRSU
Wang, Dong, & Yin, (2018)	Antecedents of urban residents' separate collection intentions for household solid waste and their willingness to pay: Evidence from China	Intención de separar y aplicación de políticas, agrado por pagar y aplicación de políticas
Bertanza <i>et al.</i> , 2018, Italia	<i>Techno-economic performance indicators of municipal solid waste collection strategies</i>	Sugieren un conjunto de indicadores para la etapa de recolección, considerando mano de obra, vehículos y contenedores por separado
Song <i>et al.</i> , 2019)	Understanding residents and enterprises' perceptions, behaviors, and their willing to pay for resources recycling in Macau	Categorías: Conocimiento y percepción del reciclaje, comportamiento y actitudes y agrado por pagar para efectuar recuperación y reciclaje

## 2. METODOLOGIA

La aplicación del método para la realización del siguiente trabajo fue basado en las normas ISO 14040 e ISO 14044 (AENOR, 2006a, 2006b), la figura 2.1 muestra los pasos generales que se siguieron:

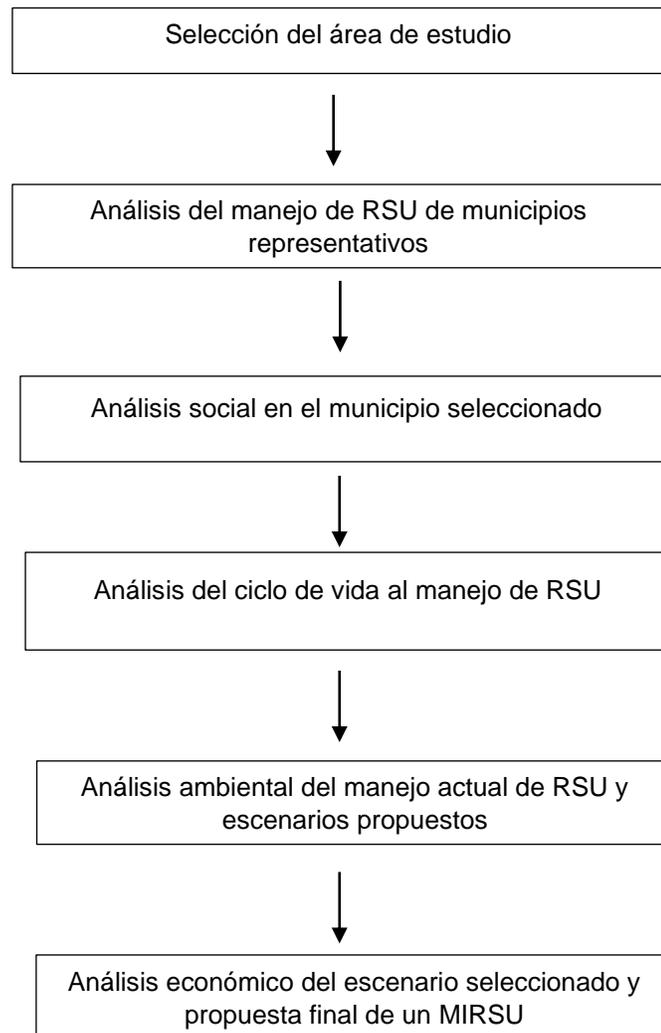


Figura 2.1 Diagrama de bloques del método

## 2.1 SELECCIÓN DEL MUNICIPIO

El presente trabajo de investigación doctoral forma parte del Proyecto SEMARNAT-2015-1-263315, denominado “Ubicación de Rellenos Sanitarios Intermunicipales Futuros en el Estado de México y Estados aledaños”. El Estado de México fue dividido en cuatro ejes, conforme a los puntos cardinales (Norte, Sur, Este y Oeste). Para este estudio se consideró la parte Noreste de dicha Entidad Federativa, así como los municipios colindantes de los estados vecinos.

Mediante Mapa Digital de INEGI (2017), se elaboró una lista con los municipios que conforman la zona antes mencionada. Establecidos los nombres de los municipios, se recopiló información documental oficial de cada uno de éstos, referente a la generación de RSU y sus variables, de diferentes fuentes de divulgación. Para establecer alguna correlación entre ellos, los datos obtenidos fueron agrupados en criterios y subcriterios como se muestra en la figura 2.2:

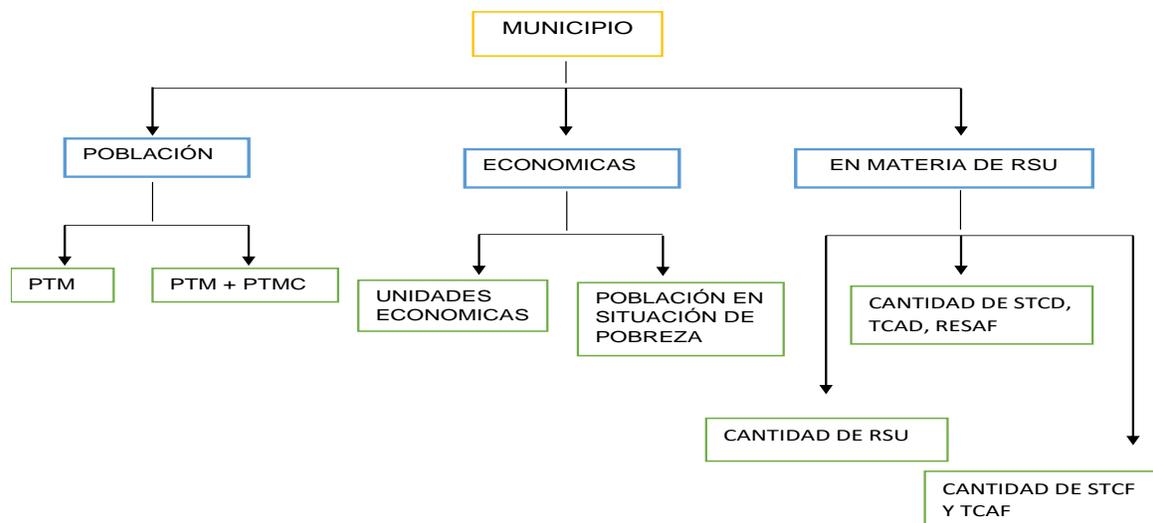


Figura 2.2. Criterios y subcriterios diseñados

\*PTM: población total municipal, PTMC: población total municipal colindante, \*\*STCD: sitio de tierra controlado dentro, TCAD: tiradero a cielo abierto dentro, RESAD: relleno sanitario dentro\*\*\*STCF: sitio de tierra controlado fuera, TCAF: tiradero a cielo abierto fuera, RESAF: relleno sanitario fuera.

Una vez recopilada la información de los municipios, se efectuó el “Análisis de correlación de Pearson” por medio del software SPSS (2017). Se elaboraron los gráficos de dispersión de los subcriterios seleccionados, con el fin de determinar su grado de relación y reducir la multicolinealidad, usándose como referencia la tabla 2.1 (Ortega *et al.*, 2009).

Tabla 2.1. Escala de correlación entre variables

RANGO	RELACIÓN
-1	Correlación negativa perfecta
-0.5	Correlación negativa fuerte moderada débil
0	Ninguna correlación
+0.5	Correlación positiva moderada fuerte
+1	Correlación positiva perfecta

La identificación de la correlación existente entre las variables hizo posible la exclusión de algunas de estas y así continuar con la agrupación de municipios con las mismas características. Para ésto se aplicó la técnica de clúster jerárquico (Fernández-Santana, 1991), a través del software SPSS (2017). Una vez obtenidos los grupos, se eligió un municipio representativo para cada uno de los clúster obtenido, mediante el método jerárquico (AHP) (Saaty, 1980); en el cual se definió un objetivo, criterios, subcriterio y alternativas.

Establecidos los criterios y subcriterios, se ponderaron mediante la escala verbal de Saaty (1990), en donde mediante una matriz de juicios se determinó el vector de prioridad, el cual es usado para comparar los elementos de la matriz (Tabla 2.2). Se evaluó dicha matriz de criterios y subcriterios, realizando la comparación de cada una de las alternativas (Municipios) con respecto a los subcriterios evaluados. Cabe mencionar que para cada matriz se calculó la congruencia de los juicios con el radio de inconsistencia (IR) y la estimación del índice de consistencia (CI) de la matriz de

juicios. En los casos en que se detectaron inconsistencias, el proceso de evaluación de las matrices fue repetido.

Tabla 2.2 Escala verbal de Saaty

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL	DEFINICIÓN
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo
3	Importancia moderada de un elemento u otro	La experiencia y el juicio están a favor de un elemento sobre otro
5	Importancia fuerte de un elemento sobre otro	Un elemento es fuertemente favorecido
7	Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro	Un elemento es muy dominante
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro	Un elemento es favorecido por al menos un orden de magnitud de diferencia
2,4,6,8	Valores intermedios sobre dos juicios adyacentes	Se usan como compromisos entre dos juicios
Incrementos 0,1	Valores intermedios en incrementos	Utilización para graduación más fina de juicios

Fuente: Saaty, 1988

## 2.2 ANÁLISIS DEL MANEJO DE RSU DE MUNICIPIOS REPRESENTATIVOS

Una vez seleccionados los municipios representativos de cada uno de los clústeres, se llevó a cabo una revisión a los Bandos Municipales, para recabar toda la información posible sobre el MIRSU, de cada uno. A través de llamadas telefónicas, se concretaron citas con el personal encargado del manejo de los RSU de cada uno de los municipios seleccionados, con el fin de rectificar los datos encontrados y recabar información adicional o faltante. La recolección de información con el personal encargado del manejo de los RSU, se realizó por medio de una Cédula de Entrevista (CE) (Anexo A), elaborada por el equipo de trabajo de la Línea de Generación y Aplicación del

Conocimiento (LGAC) “Tratamiento de Contaminantes y Gestión Ambiental”, clave LGAC-2017-TOLU-DAMB-26, del Instituto Tecnológico de Toluca.

Dicha CE fue elaborada a partir de la “Guía para la elaboración de Planes Maestros para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales (PMGIRSM) y de la Ley General para la prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)” y comprende las etapas de generación, recolección, tratamiento, transferencia y disposición final de los RSU (DOF, 2015; SEMARNAT-GTZ, 2006).

Con la información recopilada y mediante diagramas de flujo, se presentaron las etapas del MIRSU, así como la evaluación correspondiente. Las etapas fueron descritas como se muestra a continuación:

- a) Generación de RSU: La información recopilada a través de la CE y datos de las bases de INEGI (2015), fue enfocada a la cantidad de habitantes de los municipios estudiados; con estos datos, se estimó la generación *per cápita*, basado en la “NMX-061-1985- Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de la Generación” (SEMARNAT, 1992).
- b) Recolección y transporte: Tomando como base la CE, se realizó la verificación de la recolección, con mayor atención a los vehículos utilizados.
- c) Tratamiento de RSU: Durante esta etapa se recabo información sobre el tipo de tratamiento que utiliza el municipio, así como el o los subproductos generados.
- d) Sitios de disposición final: Se recabo información sobre el tipo de SDF, así como los años de servicio y la maquinaria utilizada dentro de éste.

Aunado a este análisis para la selección del municipio a estudiar, se tomó en cuenta el porcentaje de participación de los municipios seleccionados, el cual fue calculado a partir de las CE, además se consideró el costo de gasolina actual tipo magna, tomando como punto de partida el Instituto Tecnológico de Toluca.

### 2.3 ANÁLISIS SOCIAL DEL MUNICIPIO SELECCIONADO

Una vez elegido el municipio a estudiar, se llevó a cabo la aplicación de encuestas a una muestra representativa de la población, para estudiar el punto de vista sobre el MIRSU del lugar; para lo cual se consideró el número total de casas establecidas en el “Plan de Desarrollo Municipal”, así como la base de datos de “Encuesta Intercensal 2015” proporcionada por el INEGI (2015). Mediante la fórmula de tamaño de muestras para poblaciones finitas (Ecuación 2.1) y los datos obtenidos, con un porcentaje de 95% de nivel de confianza, se obtuvo el tamaño de muestra requerido de casas habitación a encuestar.

$$n = \frac{N * Z_a^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) + Z_a^2 * p * q} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

N; total de la población a estudiar

Z<sub>a</sub>; el porcentaje de confianza

p; proporción esperada

q = 1-p, de = precisión

Las casas fueron seleccionadas al azar, por medio de un mapa catastral proporcionado por las autoridades del ayuntamiento del municipio seleccionado, la encuesta se aplicó a la persona que se encontraba en la casa-habitación. El instrumento diseñado fue denominado “Cedula de Encuesta para aplicación de Casa-Habitación” (Anexo B), elaborado por el equipo de trabajo; la cual estuvo integrada de una serie de 51 preguntas, divididas en dos secciones: I) Gestión de residuos y II) Características de la vivienda. La aplicación de las encuestas se realizó en un periodo de tres días para cubrir las casas seleccionadas. El equipo de trabajo estuvo integrado por ocho personas, las cuales fueron capacitadas con anterioridad, para así disminuir el error en las respuestas.

Para el estudio referente al punto de vista y actitudes sobre el reciclaje de los habitantes del municipio, las preguntas fueron divididas y recopiladas en seis diferentes variables propuestas: Actitud, Conocimiento, Percepción del MIRSU, Datos socioeconómicos, Responsabilidad y Disposición a pagar (Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Variables propuestas para análisis de comportamiento de la población

TIPO	VARIABLES	PREGUNTA ENTREVISTA
Q1	Actitud	¿Considera importante mejorar la calidad del medio ambiente?, Al consumir un producto en la calle ¿Qué hace con el residuo?, ¿Barre la calle frente a su casa?
Q2	Conocimiento	¿Considera que los residuos pueden ser aprovechados?, ¿Sabe qué es una composta?, ¿Sabe dónde son depositados los residuos que genera?
Q3	Manejo de los RSU	¿Cuántas veces pasa a la semana el camión de recolección por los residuos?, ¿Considera que el camión recolector es adecuado para transportar residuos?, ¿Qué hace cuando el sistema de recolección municipal no brinda el servicio de limpia?, ¿Cómo considera el servicio de recolección de residuos?, ¿Qué cambio propondría en el sistema de recolección?
Q4	Datos socioeconómicos	Estatus socioeconómico
Q5	Responsabilidad	¿Con que frecuencia realiza la separación de los residuos? ¿A quién considera como responsable de la separación de los residuos? Si no separa los residuos ¿cuál es la razón por la que no lo hace?
Q6	Disposición a pagar	¿Coopera en la remuneración económica por la recolección de los residuos?, ¿Si existiera una tarifa semanal por un mejor servicio cuanto estuviera dispuesto a pagar?

## 2.4 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL MUNICIPIO SELECCIONADO

El estudio de ACV fue elaborado conforme a las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 (AENOR, 2006), comenzando con la definición del Objetivo y la Unidad funcional del sistema de MIRSU estudiado. Posteriormente, se llevó a cabo la recopilación y cálculo del Inventario de Ciclo de Vida (ICV).

### 2.4.1 Objetivo, unidad funcional y límites

El primer paso para realizar un ACV, desde la normatividad establecida, es la definición del objetivo bajo las siguientes preguntas: ¿Qué hace?, ¿Cómo lo hace?, ¿Con qué lo hace?, que para este trabajo se responden en la tabla 2.4 (AENOR, 2006a),

Tabla 2.4 Descripción del proceso seleccionado

Función ¿Qué hace?	Comportamiento ¿Cómo lo hace?	Estructura ¿Con qué lo hace?
Administración de RSU del municipio seleccionado	Operaciones controladas	De forma manual Vehículos específicos Personal

### 2.4.2 Propuesta de escenarios del manejo de RSU del municipio

El escenario de referencia, se estableció a partir del manejo de los RSU del municipio de Xalatlaco y se denominó Escenario base (E0). Para los escenarios propuestos se seleccionaron las tecnologías reportadas como reciclaje (Banar *et al.*, 2009), compostaje (Omid *et al.*, 2017) y RESA (Sharma & Chandel, 2017; Sivakumar Babu *et al.*, 2014) de la literatura estudiada. En la figura 2.3 se muestra los cuatro escenarios incluyendo el escenario base.

Escenario 0.: Este escenario corresponde la situación del manejo de RSU del municipio de Xalatlaco al momento del estudio. Todos los RSU generados, son recolectados de forma selectiva, punto por punto, por medio de tres vehículos de carga. De estos el 2.5% perteneciente a los RO, respecto a la UF, son recolectados, trasladados al sitio no controlado (SNC) (Diaz-Archundia *et al.*, 2017) del municipio y tratados mediante el proceso de compostaje; debido a las características de la operación y para fines de éste estudio se le denominó “Compostaje empírico”, el proceso comienza al ser recibidos por un trabajador, el cual por medio de una pala los mezcla con tierra y forma pilas. Se observó que el mezclado no era homogéneo, ya que se detectaron algunos plásticos entre los RO.

Los RIR acopiados, por los tres vehículos, son dispuestos en el frente de tiro del SNC, en donde son separados manualmente por los recicladores primarios (también conocidos como “pepenadores”), debido a que la actividad es llevada sin algún procedimiento estandarizado y en condiciones rudimentarias, la cantidad recuperada es de la mitad de los RIR dispuestos, representando el 11.6%.

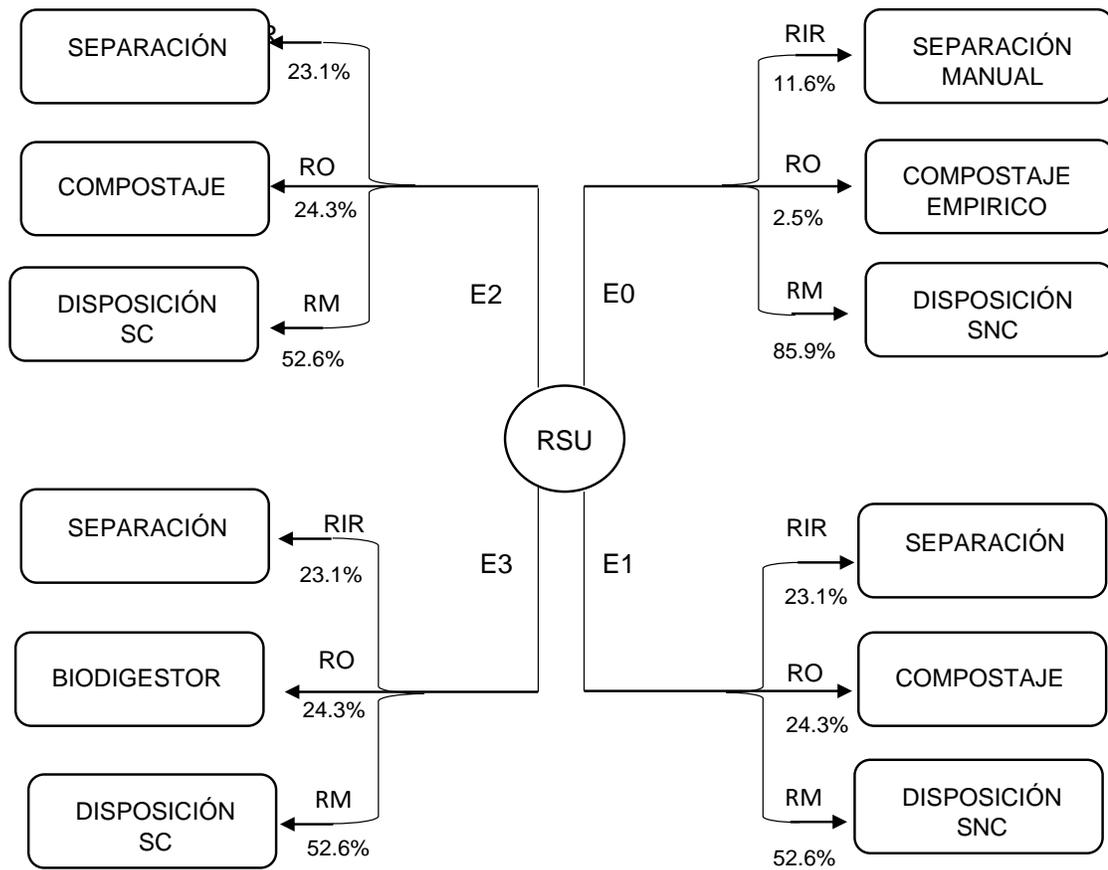
El resto de los RSU, denominados RM, equivalentes al 85.9% son dispuestos en el SNC. El sitio no cuenta con recuperación de gases no recolección de lixiviados, por lo que en el software SIMAPRO ® 8.0, fue diseñado como no RESA.

a) Escenario 1. Separación y compostaje mecánico : El enfoque de este escenario fue el aumento de la separación de los RIR y su aprovechamiento, por ese motivo se consideró la integración de los recicladores primarios dentro de la cuadrilla oficial y se contempló el uso de una banda transportadora (Martinez-Morales *et al.*, 2017; Ormaza-Salamea, 2015) por medio de la cual se estimó una separación correspondiente al 23.1%.

Se contempló la separación del 100% de RO desde casa habitación, por lo que el porcentaje entrante a la planta de compostaje mecánico fue de 24.3% (Sánchez-Velasco *et al.*, 2016), el resto de los residuos se dispusieron en el SNC (52.6%).

b) Escenario 2. Disposición en Relleno Sanitario: Este escenario se centró en la disposición final de los RM (52.6%), dentro de un RESA. Para el modelaje se consideraron las características de infraestructura y operación, la barrera geológica sobre las celdas de disposición, control de biogás, captación y recirculación de lixiviados recolectados así como una fosa con geomembrana, de acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2004).

c) Escenario 3. Tratamiento anaerobio: Este escenario se trataron los RO (24.3%) por medio de digestión anaerobia. El resto RIR y RM se trabajaron con base a los escenarios antes descritos.



RIR; residuos inorgánicos reciclables, RO; residuos orgánicos, RM; residuos mixtos

Figura 2.3. Escenarios propuestos

### 2.4.3 Inventario de Ciclo de Vida

El ICV es la actividad con mayor relevancia y tiempo. Para un análisis con mayor precisión del ICV, el MIRSU fue analizado mediante las actividades que se describen a continuación:

- a) Caracterización física. Esta actividad consistió en la recopilación de información referente a los RSU, mediante la caracterización *in situ*, la cual fue realizada de acuerdo con las normas que se listan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Normas mexicanas para caracterización física de RSU

Norma	Nombre
NMX-AA-015-1985	“Protección Al Ambiente - Contaminación del Suelo - Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método de Cuarteo”
NMX-AA-019-1985	“Protección Al Ambiente -Contaminación del Suelo - Residuos Sólidos Municipales - Peso Volumétrico "In Situ".
NMX-AA-022-1985	“Protección Al Ambiente-Contaminación del Suelo- Residuos Sólidos Municipales-Selección y Cuantificación de Subproductos”.

- b) Recolección. La información recopilada fue a través de la CE, se consideró la siguiente información: tipo de combustible, kilómetros recorridos, tipo de camión.

Mientras que, para el cálculo de las entradas, se recurrió al dato del combustible usado por los camiones de cargas, por lo que se evaluaron los kilómetros recorridos; para ello se registraron las diferentes distancias transitadas cada día en cada ruta y el flujo de recolección. El valor promedio de combustible usado por los camiones por día se correlacionó a una tonelada recolectada.

Las salidas, que son representadas por el  $CO_{2eq}$ , se estimaron utilizando las ecuaciones 2.1 a 2.6 (SEMARNAT, 2015b).

$$E_{CO_2} = \sum_{i=1} VC_i * PC_i * FECO_{2i} \quad (Ec. 2.1)$$

$$E_{CH_4} = \sum_{i=1} VC_i * PC_i * FECH_{4i} \quad (Ec 2.2)$$

$$E_{N_2O} = \sum_{i=1} VC_i * PC_i * FEN_{2O} \quad (Ec 2.3)$$

$$ECO_{2e}(CO_2) = ECO_2 \quad (Ec 2.4)$$

$$ECO_{2e}(CH_4) = ECH_4 * PCGCH_4 \quad (Ec 2.5)$$

$$ENO_{2e}(CH_4) = ENO_2 * PCGCH_4 \quad (Ec 2.6)$$

Donde:

$E_{CO_2}$  , Emisión de bióxido de carbono (kg  $CO_2$ )

$E_{CH_4}$ ; Emisión de metano (kg  $CH_4$ )

$E_{N_2O}$ ; Emisión de óxido nitroso (kg  $N_2O$ )

$E_{vv}$  ; evapotranspiración sobre el SDF

$E_{ev}$  ; Escurrimiento sobre el SDF

$E(CO_{2e})(CO_2)$ ; Emisión del bióxido de carbono equivalente (kg  $CO_2$ )

$E(CO_{2e})(CH_4)$ ; Emisión del bióxido de carbono equivalente proveniente de las emisiones de metano (kg  $CO_{2eq}$ )

$E_{CO_{2e}}(N_2O)$ ; Emisión del bióxido de carbono equivalente proveniente de las emisiones de óxido nitroso (kg  $CO_{2eq}$ )

$F_{ECO_2}$ ; Factor de emisión de bióxido de carbono del -ésimo combustible (t/MJ)  $F_{ECH_4}$  = Factor de emisión del metano del i-ésimo combustible (t/MJ)

$F_{EN_2O}$ ; Factor de emisión del óxido nitroso del i-ésimo combustible (t/MJ).

$PCG_{CH_4}$ ; potencial de calentamiento global del metano (kg  $CO_2$ / kg  $CH_4$ )

El combustible utilizado por los camiones recolectores fue diésel mexicano, el cual de acuerdo con (PEMEX, 2008) tiene un valor calorífico de 45 MJ/kg, el factor de emisión para el bióxido de carbono ( $CO_2$ ) de 0.0000741 t  $CO_2$ /MJ, para el metano ( $CH_4$ ) y el óxido nitroso ( $N_2O$ ) fue de 0.0000039 t  $CH_4$ /MJ y de 0.0000039 t  $N_2O$ /MJ respectivamente, mientras que el potencial de calentamiento considerado para el  $CH_4$  fue de 28 kg de  $CO_{2eq}$ /kg de  $CH_4$  y para el  $N_2O$  fue el 265  $CO_{2eq}$ /kg de  $N_2O$  (SEMARNAT, 2015a).

c) Compostaje. Para el caso de la actividad de compostaje, el estudio se enfocó en el proceso que se realiza en el municipio elegido, aplicando el Diagrama de Ishikawa, para la evaluación del sistema actual. Dentro del modelado del E0, el compostaje no fue considerado debido a que el proceso se lleva a cabo de manera empírica, donde no fue posible coleccionar información sobre la salida o entrada de algún combustible o energía, mientras que para los E1 y E2 donde se involucró la

construcción de una planta de compostaje, se tomó en cuenta una trituradora de residuos, así como un minicargador para el arrastre de esta.

d) Separación. Para el diseño del E0, en términos de separación, debido a las condiciones empíricas en las que se realizan, no fueron calculadas las entradas y salidas. En los E1 a E3 se consideró el gasto energético y de combustible de los equipos requeridos en los procesos propuestos, dichos valores fueron obtenidos directamente de las bases de datos del programa SIMAPRO ® 8.0. Dentro de esta etapa se tomó en cuenta lo reportado por Martínez Morales, (2016), en donde se establece que existe tiempos muertos dentro de los trabajadores por lo que se estableció una eficiencia del 50% para dicha separación. Para los E1, E2 y E3, donde se propone una planta de segregación. Los datos de construcción y operación para la digestión anaerobia fueron obtenidos por la dataset de Ecoinvent Biowaste {RoW}| treatment of biowaste by anaerobic digestion | APOS, U y adaptado a las condiciones del estudio de la base de datos ECOINVENT 3.0 de SIMAPRO ® 8.0, el flujo de los RI y sus variantes fueron considerados como en los escenarios E1 y E2.

f) Disposición final. Para el caso del SDF como SNC se consideró la alternativa “No relleno sanitario” (ECOINVENT, 2019) mientras que los datos para el SDF como RESA fueron los indicados en el software SIMAPRO ® 8.0, que tiene entre sus características de infraestructura y operación: barrera geológica o hidráulica sobre las celdas de disposición, control de biogás, captación y recirculación de lixiviados colectados en una fosa con geomembrana, drenaje pluvial y un área de emergencia para los RSU durante una eventualidad. En este proceso, la evaluación se enfocó en la generación de biogás y de lixiviados, este último producto de la degradación de los RSU depositados (Kiss & Aguilar, 2006).

Para la estimación del biogás producido dentro del SDF, se empleó el Modelo Mexicano de Biogás (MMB) versión 2 (Ecuación 2.7); los valores de índice de generación de metano (k) y potencial de metano (L0) se seleccionaron tomando como base a la zona geográfica del municipio, correspondientes al centro/interior de México (Aguilar-Virgen et al., 2011).

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[ \frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

i, Incremento de 1 año

j; incremento de generación de metano (1/año)

k; índice de generación de metano(m<sub>3</sub>/Mg) (0.160, 0.075, 0.032, 0.016)

L<sub>0</sub>; generación potencial de metano (m<sub>3</sub>/Mg) (69, 138, 214, 202)

M<sub>i</sub>; masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)

MCF; factor de ajuste por incendios

n; es el año del cálculo

Q<sub>LFG</sub>; Flujo de biogás máximo esperado (m<sup>3</sup>/año)

ti j; edad de la sección j de la masa de residuos.

Para el flujo de lixiviados generado, se utilizó un balance hídrico (Gómez-Beltrán, 2014) (Ecuaciones 2.8-2.10), donde los valores de precipitación en el SDF fueron considerados de acuerdo a las condiciones climatológicas del municipio de Xalatlaco para el año 2017 de acuerdo a datos de (CONAGUA, 2017), los cuales fueron promediados por día para obtener el dato de precipitación a usar.

$$I_v = PP_v - E_{v_v} - E_{e_v} \quad (\text{Ec 2.8})$$

$$E_{v_v} = P_{p_v} * C_{e_v} \quad (\text{Ec 2.9})$$

$$E_{e_v} = P_{p_v} * C_{e_v} \quad (\text{Ec 2.10})$$

Donde:

C<sub>ev</sub>; Constante de escurrimiento en zonas sin vegetación (0.20)

I<sub>v</sub>; Generación de lixiviados (m<sup>3</sup>)

E<sub>v<sub>v</sub></sub>; evapotranspiración sobre el SDF;

$E_{ev}$ ; Ecurrimiento sobre el SDF

$PP_v$ ; precipitación sobre el SDF ( $m^3/año$ )

Para el cálculo del valor de evapotranspiración se utilizó el modelo de Thornthwaile (Montaner & Sánchez, 1988) (Ecuaciones 2.11-2.13).

$$ETP_{THO} = e * L \quad (Ec. 2.11)$$

$$e = 16 * (10 * ((t_m/l))^a) \quad (Ec. 2.12)$$

$$L = \sum ij; ij = (t_m/5)^{1.514} \quad (Ec. 2.13)$$

Donde:

$ETP_{THO}$ ; evapotranspiración ajustada

$e$ ; evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes)

$t_m$ ; temperatura media mensual en °C

$l$ ; índice de calor anual

$L$ ; factor de corrección del número de días del mes

Adicionalmente se caracterizaron los lixiviados generados en el SDF aplicando la NMX-AA-026-SCFI-2010 “Medición de Nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas” (COTEMARNAT, 2001b) y la NMX-AA-028-SCFI-2001 “Análisis de agua-Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en agua naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas (COTEMARNAT, 2001a).

## **2.5 ANÁLISIS AMBIENTAL DEL MANEJO ACTUAL DE RSU Y ESCENARIOS PROPUESTOS**

Para la evaluación del impacto ambiental producido por el manejo de los RSU, se utilizó el software SIMAPRO 8.0 ®, con la metodología RECIPE en su versión punto medio. Las categorías de impacto seleccionadas fueron: Calentamiento Global (CG),

Agotamiento del Ozono Estratosférico (AGE), Eutrofización Acuaterrestre (EUA), Ecotoxicidad en Agua (ECA) y Uso de Suelo (US).

## **2.6 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL ESCENARIO SELECCIONADO Y DISEÑO DE PROPUESTA**

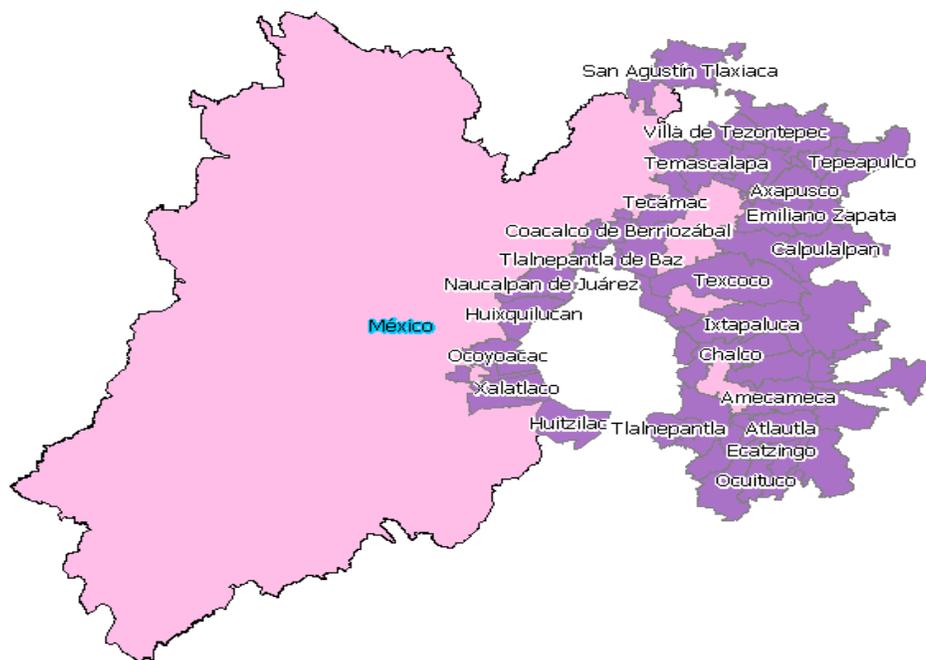
Una vez concluida la selección del escenario por medio del análisis ambiental, se procedió al cálculo del costo por tonelada de RSU, con apoyo de información documental recopilada, determinándose costos de energía, agua y combustible, por cada tecnología propuesta. Se consideró el precio de combustible y energía vigente al momento de realizar las estimaciones.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados de este proyecto de investigación, incluyendo la selección del municipio, el ACV y el análisis económico.

#### 3.1 SELECCIÓN DEL MUNICIPIO

En la figura 3.1 se muestra el mapa digital de escritorio del INEGI (2017) para la selección de los municipios del Noreste del Estado de México. y los colindantes de los estados aledaños. Una vez visualizados en el mapa, se ordenaron los municipios en una lista por Estado (Tabla 3.1)



Fuente: INEGI, 2017

Figura 3.1 Mapa de municipios del este del Estado de México y aledaños

Tabla 3.1 Lista de municipios del este del Estado de México y aledaños

EDO.MÉX.	HIDALGO	MORELOS	PUEBLA	TLAXCALA
Amecameca	Ecatepec de Morelos	Emiliano Zapata	Atlatlahuacán	Huejotzingo
Atlautla	Huixquilucan	San Agustín Tlaxiaca	Ocuituco	San Nicolás de los Ranchos
Axapusco	Ixtapaluca	Tepeapulco	Tetela del Volcán	San Salvador el Verde
Ecatzingo	Naucalpan de Juárez	Tlanalapa	Tlalnepantla	Tochimilco
Juchitepec	Temascalapa	Villa de Tezontepec	Totolapan	Tlahuapan
Nopaltepec	Texcoco	Zempoala	Yecapixtla	
Ocoyoacac	Tultitlán	Tizayuca	Huitzilac	
Otumba	Xalatlaco			
Ozumba	La Paz			
Tecámac	Nezahualcóyotl			
Tepetlaoxtoc	Tlalnepantla de Baz			
Tepetlixpa	Valle de Chalco Solidaridad			
Tianguistenco	Chalco			
Tlalmanalco	Coacalco de Berriozábal			

Fuente: INEGI, 2017.

La información documental de cada uno de los municipios respecto a los criterios: Población, Económicas y en Materia de RSU; se presenta en el Anexo C.

Con esta información capturada en el software SPSS, se realizó el estudio de análisis de correlación de Pearson y las gráficas de dispersión-correlación (Anexo D) y con ayuda de la tabla 2.3, se encontraron los subcriterios con una fuerte correlación, es decir aquellos que tuvieron un valor a Pearson mayor a 0.5 (Tabla 3.2).

Para corroborar que los subcriterios seleccionados fueran los correctos, se corrió por segunda ocasión el análisis de correlación. La tabla 3.3 muestra que los valores de Pearson fueron menores a 0.5, lo que indica que la correlación entre éstos es débil. Se observó que el único subcriterio con un valor mayor fue PTM contra Cantidad de STCD, sin embargo, como sólo fue con una variable, se decidió tomar en cuenta para el siguiente estudio.

Tabla 3.2 Análisis de correlación con todos los subcriterios

VARIABLES		PobTotal	PobTotal Mun	DenPob	UniEcon	PobPobreza	CantRSU	#RESA dentro	#SCdentro	#TCAdentro	#RESAfuera	#SCfuera	#TCAfuera
PobTotal	Pearson Correlation	1.000	0.576	0.771	0.910	-0.523	0.840	-0.082	0.273	-0.157	0.061	0.329	-0.127
	Sig. (2-tailed)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.580	0.060	0.286	0.682	0.022	0.391
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
PobTotalMun	Pearson Correlation	0.576	1.000	0.799	0.598	-0.392	0.416	-0.283	0.546	-0.031	-0.200	0.414	-0.088
	Sig. (2-tailed)	0.000		0.000	0.000	0.006	0.003	0.051	0.000	0.834	0.174	0.003	0.552
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
DenPob	Pearson Correlation	0.771	0.799	1.000	0.849	-0.482	0.679	-0.218	0.497	-0.096	-0.033	0.255	-0.134
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000		0.000	0.001	0.000	0.136	0.000	0.515	0.821	0.081	0.364
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
UniEcon	Pearson Correlation	0.910	0.598	0.849	1.000	-0.429	0.901	-0.138	0.352	-0.155	0.039	0.267	-0.058
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000		0.002	0.000	0.348	0.014	0.293	0.793	0.067	0.698
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
PobPobreza	Pearson Correlation	-0.523	-0.392	-0.482	-0.429	1.000	-0.276	0.004	-0.145	-0.103	-0.088	-0.373	-0.130
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.006	0.001	0.002		0.057	0.976	0.326	0.486	0.551	0.009	0.377
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
CantRSU	Pearson Correlation	0.840	0.416	0.679	0.901	-0.276	1.000	-0.153	0.223	-0.157	0.032	0.175	-0.055
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.003	0.000	0.000	0.057		0.300	0.128	0.287	0.832	0.234	0.713
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
NoRESA dentro	Pearson Correlation	-0.082	-0.283	-0.218	-0.138	0.004	-0.153	1.000	-0.197	-0.040	0.115	-0.259	0.171
	Sig. (2-tailed)	0.580	0.051	0.136	0.348	0.976	0.300		0.180	0.787	0.437	0.075	0.244
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
NumSCdentro	Pearson Correlation	0.273	0.546	0.497	0.352	-0.145	0.223	-0.197	1.000	-0.213	-0.098	-0.098	-0.037
	Sig. (2-tailed)	0.060	0.000	0.000	0.014	0.326	0.128	0.180		0.145	0.509	0.510	0.801
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
NumTCA dentro	Pearson Correlation	-0.157	-0.031	-0.096	-0.155	-0.103	-0.157	-0.040	-0.213	1.000	-0.033	0.026	0.049
	Sig. (2-tailed)	0.286	0.834	0.515	0.293	0.486	0.287	0.787	0.145		0.825	0.863	0.742
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
NoRESAfuera	Pearson Correlation	0.061	-0.200	-0.033	0.039	-0.088	0.032	0.115	-0.098	-0.033	1.000	0.074	0.111
	Sig. (2-tailed)	0.682	0.174	0.821	0.793	0.551	0.832	0.437	0.509	0.825		0.618	0.455
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
NoSCfuera	Pearson Correlation	0.329	0.414	0.255	0.267	-0.373	0.175	-0.259	-0.098	0.026	0.074	1.000	-0.039
	Sig. (2-tailed)	0.022	0.003	0.081	0.067	0.009	0.234	0.075	0.510	0.863	0.618		0.793
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
NoTCAfuera	Pearson Correlation	-0.127	-0.088	-0.134	-0.058	-0.130	-0.055	0.171	-0.037	0.049	0.111	-0.039	1.000
	Sig. (2-tailed)	0.391	0.552	0.364	0.698	0.377	0.713	0.244	0.801	0.742	0.455	0.793	
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
**	Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).												
*	Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).												

Tabla 3.3 Análisis de correlación subcriterios seleccionados

VARIABLES		#RESAdentro	#SCdentro	#TCAdentro	#RESAfuera	#SCfuera	#TCAfuera	PobPobreza	PobTotalMun
#RESAdentro	Pearson Correlation	1.000	-0.197	-0.040	0.115	-0.259	0.171	0.004	-0.283
	Sig. (2-tailed)		0.180	0.787	0.437	0.075	0.244	0.976	0.051
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
#SCdentro	Pearson Correlation	-0.197	1.000	-0.213	-0.098	-0.098	-0.037	-0.145	0.546
	Sig. (2-tailed)	0.180		0.145	0.509	0.510	0.801	0.326	0.000
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
#TCAdentro	Pearson Correlation	-0.040	-0.213	1.000	-0.033	0.026	0.049	-0.103	-0.031
	Sig. (2-tailed)	0.787	0.145		0.825	0.863	0.742	0.486	0.834
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
#RESAfuera	Pearson Correlation	0.115	-0.098	-0.033	1.000	0.074	0.111	-0.088	-0.200
	Sig. (2-tailed)	0.437	0.509	0.825		0.618	0.455	0.551	0.174
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
#SCfuera	Pearson Correlation	-0.259	-0.098	0.026	0.074	1.000	-0.039	-0.373	0.414
	Sig. (2-tailed)	0.075	0.510	0.863	0.618		0.793	0.009	0.003
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
#TCAfuera	Pearson Correlation	0.171	-0.037	0.049	0.111	-0.039	1.000	-0.130	-0.088
	Sig. (2-tailed)	0.244	0.801	0.742	0.455	0.793		0.377	0.552
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
PobPobreza	Pearson Correlation	0.004	-0.145	-0.103	-0.088	-0.373	-0.130	1.000	-0.392
	Sig. (2-tailed)	0.976	0.326	0.486	0.551	0.009	0.377		0.006
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
PobTotalMun	Pearson Correlation	-0.283	0.546	-0.031	-0.200	0.414	-0.088	-0.392	1.000
	Sig. (2-tailed)	0.051	0.000	0.834	0.174	0.003	0.552	0.006	
	N	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000	48.000
**	Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).								

Para finalizar la selección de municipios, se llevó a cabo el análisis de clúster jerárquico, el cual arrojó que el conjunto de municipios antes mencionados se aglomeró en tres clúster (Figura 3.2). Con esta partición gráfica se llevó a cabo el agrupamiento de los municipios en tabla 3.4, con el objetivo de visualizar de mejor manera cada uno de éstos.

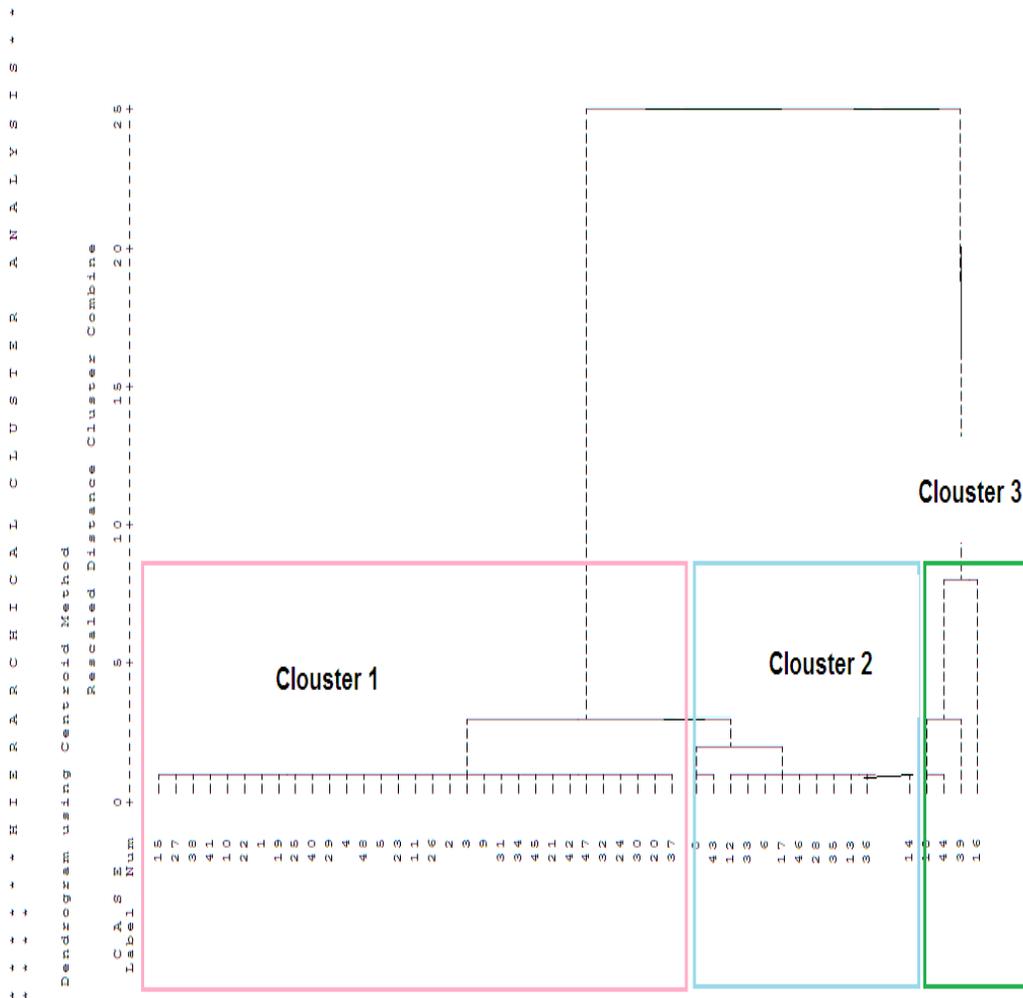


Figura 3.2 Análisis de clúster de los municipios

Tabla 3.4 Agrupamiento de municipios en clúster 1

IDEDO	ESTADO	ID MUNICIPIO	NOMBRE MUNICIPIO	ID EDO COLINDANTE	ESTADO COLINDANTE	ZONA MCMS
15	Edo. Mex	9	Amecameca	21	Puebla	ESTE
17	Morelos	2	Atlatlahuacan	15	Edo. Mex	ESTE
15	Edo. Mex	15	Atlautla	17	Morelos	ESTE
15	Edo. Mex	16	Axapusco	13	Hidalgo	NORESTE
29	Tlaxcala	6	Calpulalpan	15	Edo. Mex	ESTE
15	Edo. Mex	34	Ecatzingo	17	Morelos	ESTE
13	Hidalgo	21	Emiliano Zapata	15	Edo. Mex	ESTE
21	Puebla	74	Huejotzingo	15	Edo. Mex	ESTE
15	Edo. Mex	50	Juchitepec	17	Morelos	ESTE
15	Edo. Mex	61	Nopaltepec	13	Hidalgo	NORESTE
15	Edo. Mex	62	Ocoyoacac	9	DF	ESTE
17	Morelos	16	Ocuituco	15	Edo. Mex	SURESTE
15	Edo. Mex	65	Otumba	13	Hidalgo	NORESTE
15	Edo. Mex	68	Ozumba	17	Morelos	ESTE
13	Hidalgo	52	San Agustín Tlaxiaca	15	Edo. Mex	NORESTE
21	Puebla	138	San Nicolás de los Ranchos	15	Edo. Mex	ESTE
21	Puebla	143	San Salvador el Verde	15	Edo. Mex	ESTE
15	Edo. Mex	81	Tecámac	13	Hidalgo	NORESTE

Continuación Tabla 3.4 Agrupamiento de municipios en clúster 1

IDEDO	ESTADO	ID MUNICIPIO	NOMBRE MUNICIPIO	ID EDO COLINDANTE	ESTADO COLINDANTE	ZONA MCMS
13	Hidalgo	61	Tepeapulco	15	Edo. Mex	ESTE
15	Edo. Mex	93	Tepetlaoxtoc	29	Tlaxcala	ESTE
15	Edo. Mex	94	Tepetlixpa	17	Morelos	ESTE
17	Morelos	22	Tetela del Volcán	15	Edo. Mex	SURESTE
15	Edo. Mex	101	Tianguistenco	9	DF	SURESTE
15	Edo. Mex	103	Tlalmanalco	21	Puebla	ESTE
17	Morelos	23	Tlalnepantla	15	Edo. Mex	SURESTE
13	Hidalgo	72	Tlanalapa	15	Edo. Mex	NORESTE
21	Puebla	188	Tochimilco	15	Edo. Mex	ESTE
17	Morelos	27	Totolapan	15	Edo. Mex	ESTE
13	Hidalgo	66	Villa de Tezontepec	15	Edo. Mex	NORESTE
17	Morelos	30	Yecapixtla	15	Edo. Mex	ESTE
13	Hidalgo	83	Zempoala	15	Edo. Mex	NORESTE

Tabla 3.5 Agrupamiento de municipios en clúster 2

IDEDO	ESTADO	ID MUNICIPIO	NOMBRE MUNICIPIO	ID EDO COLINDANTE	ESTADO COLINDANTE	ZONA MCMS
15	Edo. Mex	25	Chalco	9	DF	ESTE
15	Edo. Mex	20	Coacalco de Berriozábal	9	DF	NORESTE
15	Edo. Mex	33	Ecatepec de Morelos	9	DF	NORESTE
17	Morelos	9	Huitzilac	15	Edo. Mex	SURESTE
15	Edo. Mex	37	Huixquilucan	9	DF	ESTE
15	Edo. Mex	39	Ixtapaluca	21	Puebla	ESTE
15	Edo. Mex	57	Naucalpan de Juárez	9	DF	NORESTE
15	Edo. Mex	84	Temascalapa	13	Hidalgo	NORESTE
15	Edo. Mex	99	Texcoco	21	Puebla	ESTE
13	Hidalgo	69	Tizayuca	15	Edo. Mex	NORESTE
21	Puebla	180	Tlahuapan	15	Edo. Mex	ESTE
15	Edo. Mex	109	Tultitlán	9	DF	NORESTE
15	Edo. Mex	43	Xalatlaco	9	DF	SURESTE

Tabla 3.6. Agrupamiento de municipios en clúster 3

IDEDO	ESTADO	ID MUNICIPIO	NOMBRE MUNICIPIO	ID EDO COLINDANTE	ESTADO COLINDANTE	ZONA MCMS
15	Edo. Mex	70	La Paz	9	DF	ESTE
15	Edo. Mex	58	Nezahualcóyotl	9	DF	ESTE
15	Edo. Mex	104	Tlalnepantla de Baz	9	DF	NORESTE
15	Edo. Mex	122	Valle de Chalco Solidaridad	9	DF	ESTE

Una vez realizado el estudio de conglomerados, se utilizó el Método Jerárquico, para la selección del municipio representativo de cada uno de los clústers; para esto se comenzó con la creación del modelo para la toma de decisión, en donde se definió el objetivo y los criterios. La figura 3.3 muestra dicho modelo.

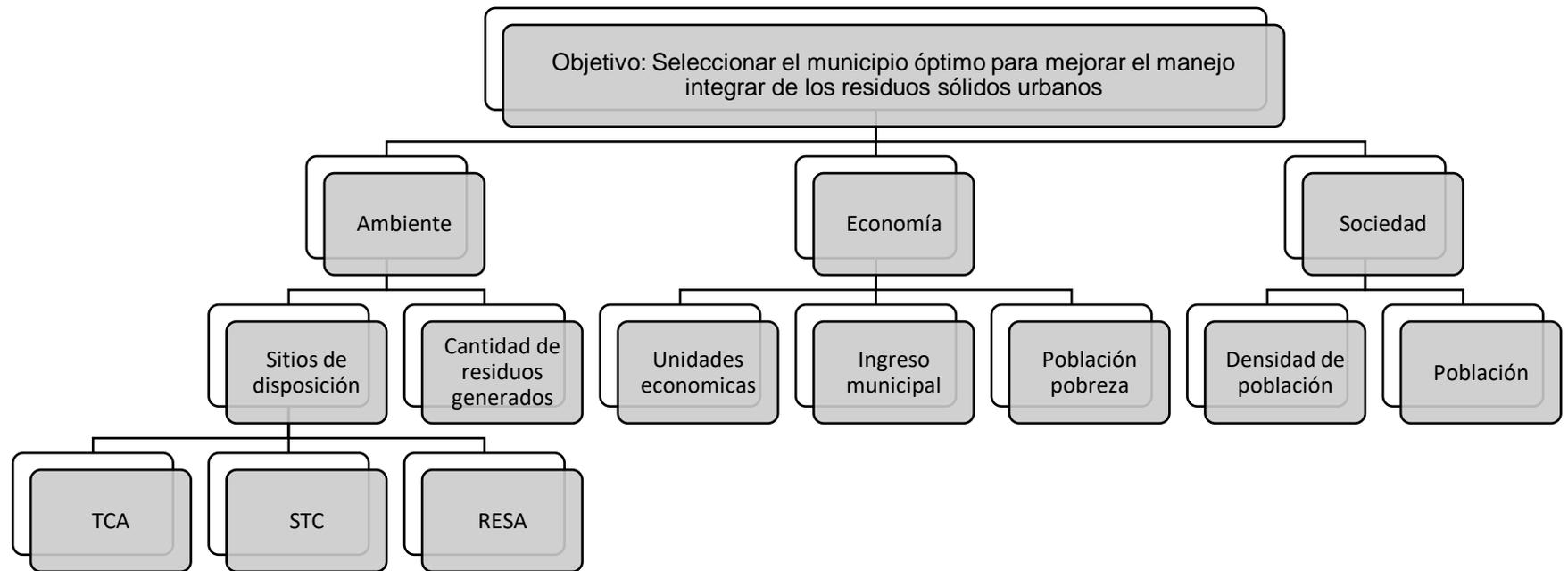


Figura 3.3. Modelo jerárquico para cada clúster seleccionado.

Se realizaron las matrices de comparaciones entre los subcriterios de cada criterio (Anexo D). Observó que se le asignó un peso mayor a los TCA y a la disminución de los RSU. Con la información conjunta y con el estudio del método jerárquico, se encontraron los municipios representativos para cada uno de los clústers. Se hace hincapié que para la selección de estos lugares, también se llevó a cabo el cálculo del costo de transporte, por características propias del mismo proyecto; por lo que se calcularon los kilómetros desde el Instituto Tecnológico de Toluca, sitio que sirvió de concentración de personal y equipo, hasta la cabecera municipal de cada uno de los municipios y, se consideró el precio de gasolina magna en \$16.72 (dieciséis pesos 72/100 MXN). El anexo E muestran los diferentes costos para cada municipio. Para el clúster 1 los municipios con menor costo fueron: Ocoyoacac, Tianguistenco, Tlalnepantla y Huehuetoca. Para el clúster 2 los municipios con menor costos en términos de gasolina gastada fueron: Huixquilucan, Xalatlaco, Naucalpan de Juárez y Huitzilac, mientras que para el clúster tres los municipios con menor costo fueron La Paz y Valle de Chalco Solidaridad con un 72.27% y un 89.53%.

Sumando todas estas características, se encontró que el municipio idóneo para el estudio es: para el clúster 1 Axapusco, debido a que Juchitepec, se le contactó, pero no se recibió respuesta favorable (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Tabla general para clúster 1

NOMBRE MUNICIPIO	VECTOR DE PRIORIDADES TOTAL	COSTO (\$)
Juchitepec	0.02714	112.19
Axapusco	0.02027	148.86
Amecameca	0.01833	129.45
Atlautla	0.02302	133.76

Para el clúster dos los municipios seleccionados fueron Xalatlaco y Huitzilac, debido a que su costo es menor, como lo muestra la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Tabla general para clúster 2

NOMBRE MUNICIPIO	VECTOR DE PRIORIDADES TOTAL	Costo (\$)
Xalatlaco	0.30484	37.75
Ixtapaluca	0.07349	100.32
Huitzilac	0.05892	74.43

Cabe mencionar que los municipios del clúster 3 no fueron seleccionados por las condiciones de seguridad (Tabla 3.9) y particularidades de cada municipio.

Tabla 3.9 Porcentaje de robo a casa-habitación y transeúntes.

MUNICIPIO	INCIDENCIA	ROBO A TRANSEÚNTES
Atizapán de Zaragoza	30	142
Ecatepec de Morelos	61	199
Naucalpan de Juárez	45	361
Nezahualcóyotl	30	66
Tlanepantla de Baz	47	245
La Paz	43	

Fuente: ONC, 2016.

### 3.2 ANÁLISIS DEL MANEJO DE RSU DE MUNICIPIOS REPRESENTATIVOS

De la revisión de los Bandos Municipales, se observó que dentro de éstos se encuentran las etapas establecidas para el MIRSU. Cabe resaltar que en dos municipios (Axapusco y Huitzilac) se señaló que existe Estación de transferencia, sin embargo, de acuerdo con el análisis de las CE esta etapa no se realiza (Tabla 3.10)

Tabla 3.10 Análisis de Bandos Municipales

	GEN	ALM	BARR	REC	SEP	HOSP	TRANS	EST TRANS	TRAT	DIS FIN
Axapusco	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	No	Si	Si
Huitzilac	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	No	Si	Si
Xalatlaco	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Si

Alm: Almacenamiento; Barr: Barrido; Dis Fin: Disposición final ; Eco: Unidades Económicas; transferencia; Est Tran: Estación de ; Gen:Generación, Hosp: Hospitales Rec: Recolección; Sec Ban Mun: Sección en Bando Municipal.Sep: Recolección Separada; Uni; Trans: Transporte;; Trat: tratamiento

Tabla 3.11 Análisis de Cédulas de entrevista

	GEN	ALM	BARR	REC	SEP	HOSP	TRANS	EST TRANS	TRAT	DIS FIN
Axapusco	No	Si	Si	Si	No	No	Si	No	No	Si
Huitzilac	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	No	No	Si
Xalatlaco	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	No	Si	Si

Alm: Almacenamiento; Barr: Barrido; Dis Fin: Disposición final ; Eco: Unidades Económicas; transferencia; Est Tran: Estación de ; Gen:Generación, Hosp: Hospitales Rec: Recolección; ,; Sec Ban Mun: Sección en Bando Municipal.Sep: Recolección Separada; Uni; Trans: Transporte;; Trat: tratamiento

Tomando como base las CE se realizaron los diagramas de flujo de bloques de cada MIRSU de los municipios seleccionados, los cuales son mostrados en las figuras 3.4 a la 3.11.

Figura 3.4 Diagrama de flujo de bloques del municipio de Axapusco

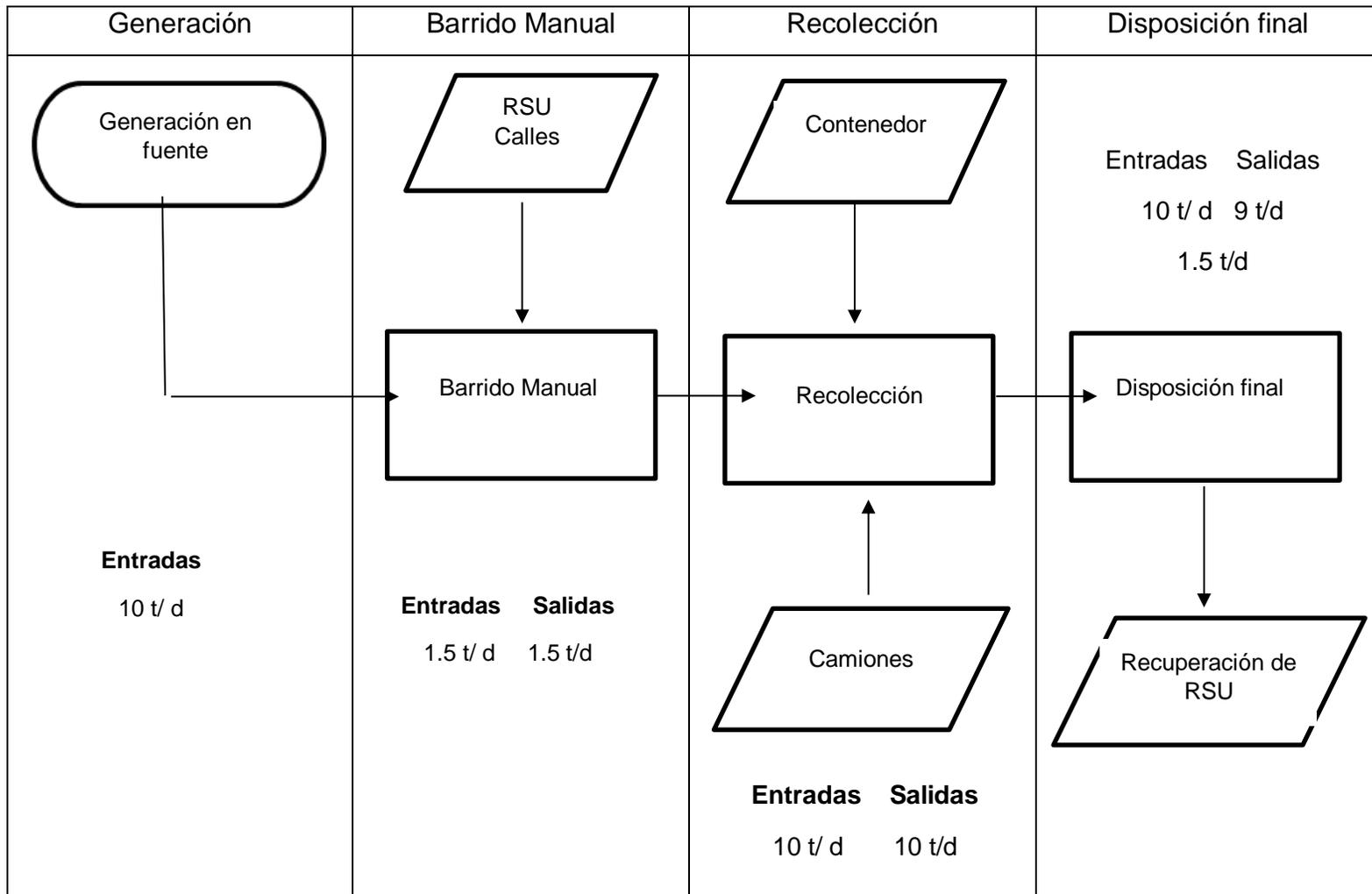


Figura 3.5 Diagrama de flujo de bloques del municipio de Xalatlaco

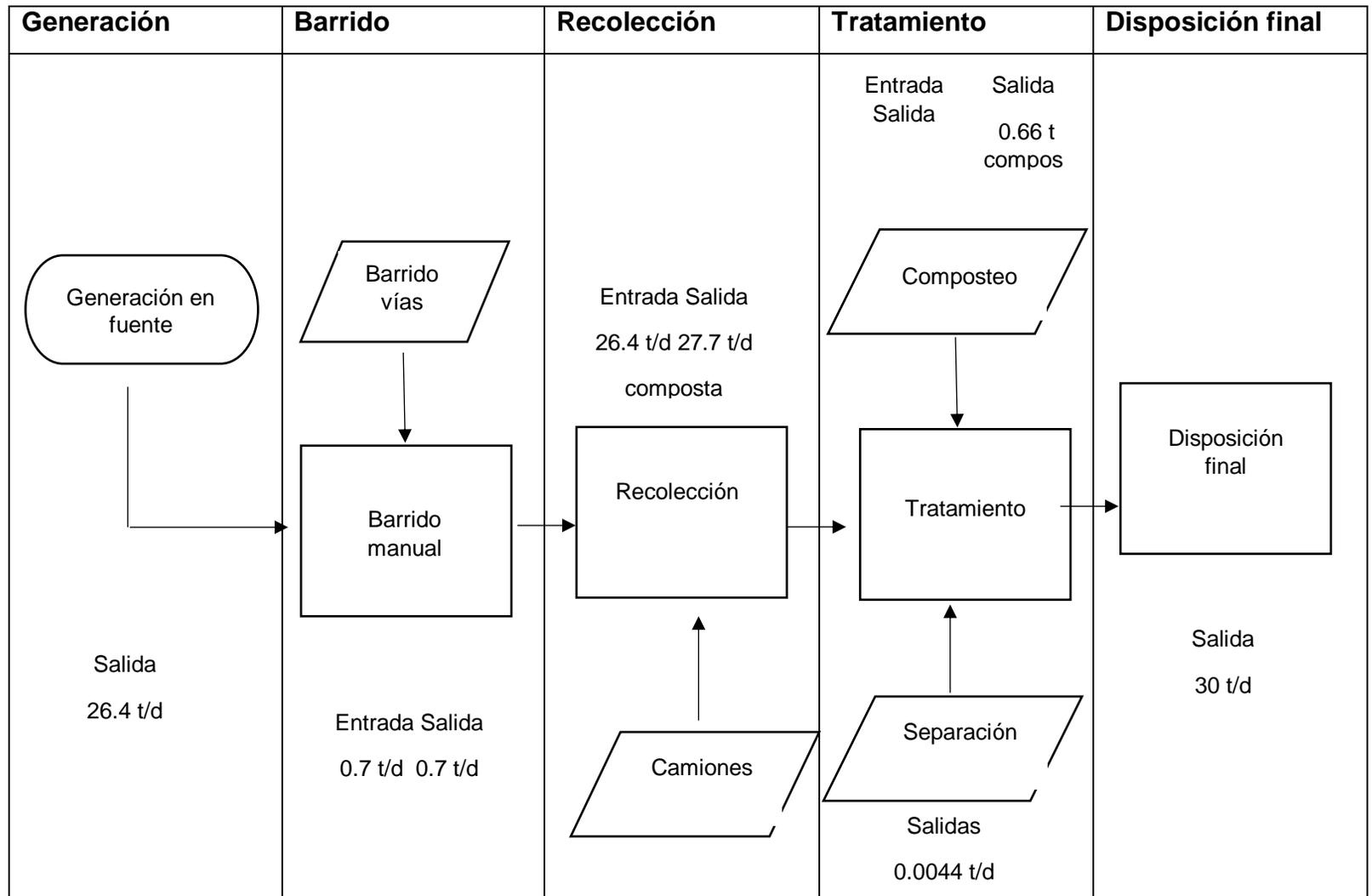
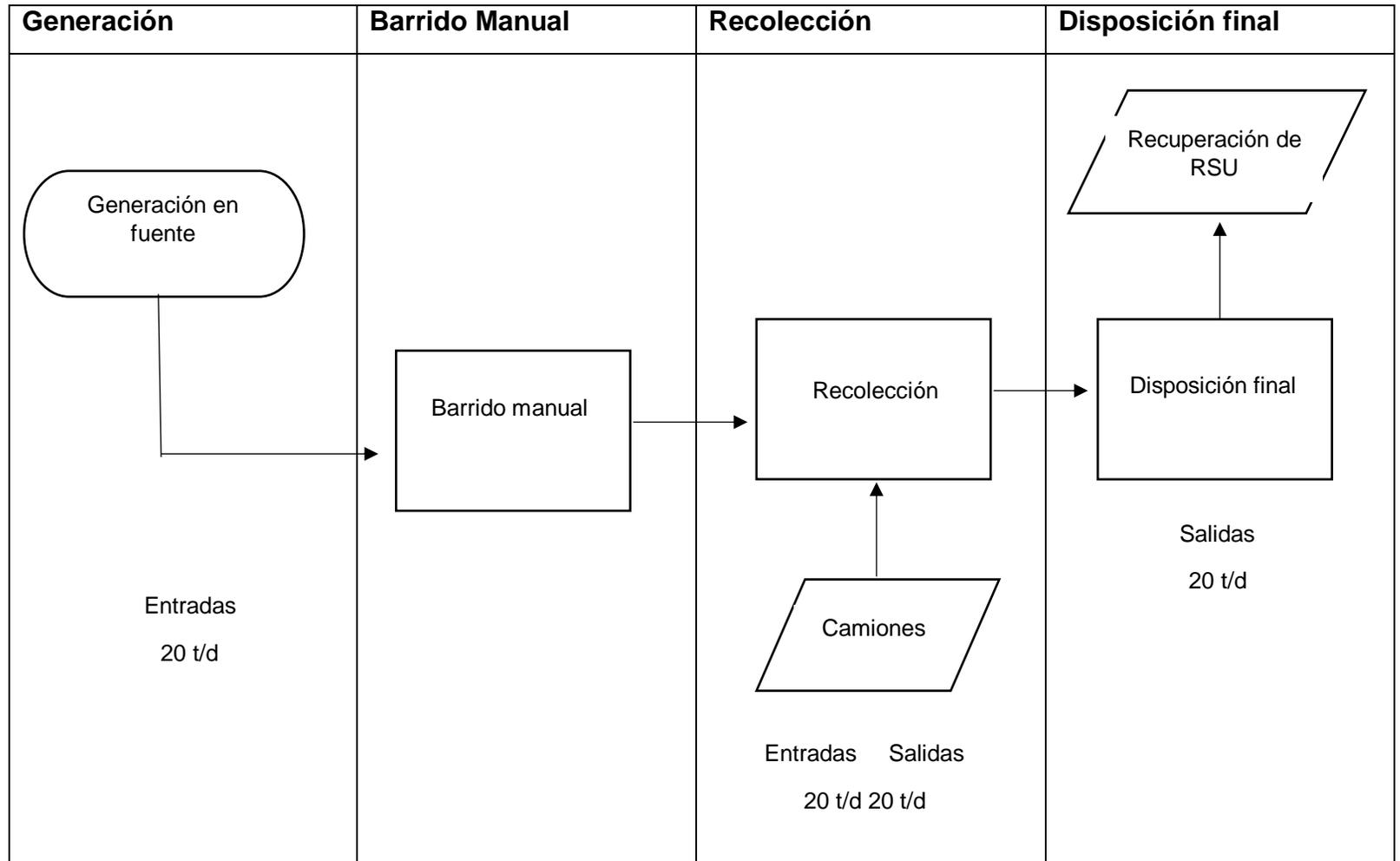


Figura. 3.6 Diagrama de flujo de bloques del municipio de Huitzilac



De este primer análisis al MIRSU de Axapusco y Huitzilac, se encontró que las principales etapas que lo conforman son: Barrido Manual, Recolección y Disposición Final. El Barrido Manual es realizado en las vías principales por medio de siete empleados, los cuales trabajan de manera formal; mientras que para el municipio de Xalatlaco, las etapas son: Barrido Manual, Recolección, Tratamiento y Disposición Final. Si bien, se reporta en literatura que las etapas de la MIRSU en México comprende más de tres etapas, la realidad es otra (Orta de Velásquez *et al.*, 2009); a diferencia de países como Japón, Irán y Asia (City *et al.*, 2017; Rajaeifar *et al.*, 2015). A continuación, se discuten algunos datos recabados del análisis anterior:

- a) Generación de RSU: Se determinó que el municipio con mayor cantidad de generación *per cápita*, fue Huitzilac (1.32 kg/hab-d), cantidad mayor a la reportada a nivel nacional de 1 kg/hab-d (SEMARNAT, 2016); lo cual se debe a que este municipio es un lugar turístico, principalmente por las Lagunas de Zempoala, que son visitadas a menudo por personas de diversos municipios que se encuentran alrededor (Tabla 3.12).

Tabla 3.12 Generación de RSU por municipio seleccionado

MUNICIPIO	GENERACIÓN (T/MES)	HABITANTES	GENERACIÓN PER CAPITA (KG/HAB-D)
Axapusco	305	30, 000	0.327
Xalatlaco	792	29,572	0.86
Huitzilac	615	15,000	1.32

- b) Recolección y transporte: Esta etapa se realiza en los municipios por medio del método acera y puerta a puerta (intradomiciliario), aunque se debe de mencionar

que el segundo tipo de recolección es de los más usados, también es de los más caros, ya que el operario debe caminar hasta la casa-habitación por los recipientes con RSU y después dejarlos nuevamente en su lugar, lo que hace que el gasto de gasolina para los vehículos aumente (Gutiérrez Galicia, 2008) (Tabla 3.13).

Tabla 3.13 Recolección en municipios seleccionados

MUNICIPIO	TIPO DE RECOLECCIÓN	RESIDUO RECOLECTADO	REALIZA
Axapusco	Acera, contenedores/mixta	RSU y RME, residuos hospitalarios, residuos industriales	Municipio / sector informal
Xalatlaco	Puerta a puerta/separada	RSU	Municipio
Huitzilac	Puerta a puerta, acera/mixta	RSU	Municipio

Además, se observó que en los tres municipios, la recolección de los RSU mezclados es llevada a cabo en su mayoría por el municipio y solo en Xalatlaco la realizan de forma separada (orgánicos e inorgánicos) (Tabla 3.14).

Tabla 3.14 Tipo de recolección en municipios seleccionados

MUNICIPIO	TIPO DE RECOLECCIÓN	RESIDUO RECOLECTADO	REALIZA
Axapusco	Acera, contenedores/mixta	RSU y Residuos de Manejo, Especial (RME), residuos hospitalarios, residuos industriales	Municipio / sector informal
Xalatlaco	Puerta a puerta/separada	RSU	Municipio
Huitzilac	Puerta a puerta, acera/mixta	RSU	Municipio

En términos de equipo, en los tres municipios la recolección es realizada por tres vehículos de carga trasera, lo cual es recomendado por la SEDESOL (2009) para

comunidades urbanas, sobre todo por la comodidad a la hora de recolectar (Tabla 3.15)

Tabla 3.15 Tipo de vehículos en recolección

MUNICIPIO	NO. DE VEHÍCULOS	TIPO DE VEHICULO	NO. DE PERSONAS
Axapusco	Tres	Compactadores	Sin información
Xalatlaco	Tres	Camioneta Compactadores	7
Huitzilac	Tres	Caja seca	12

c) Tratamiento

De acuerdo con la información de CE, el único municipio que cuenta formalmente con algún tratamiento para los RSU, es el municipio de Xalatlaco, donde en su SDF llevan a cabo el composteo de los residuos orgánicos (RO) y la separación de RSU potencialmente reciclables. El composteo se realiza de forma manual por personal del municipio, en un área destinada para ello dentro de SDF; mientras que la separación la llevan a cabo segregadores primarios que trabajan de manera informal, sin embargo, el municipio los considera dentro de sus actividades, teniendo así a un encargado, el cual organiza dicha actividad, además de controlar la disposición de RSU dentro del sitio.

d) Disposición final. Se encontró que el tipo de SDF es el TCA en el 66% de los municipios seleccionados, lo que corrobora lo escrito en la literatura, que si bien el RESA es el único sitio que cumple al 100% la normatividad (NOM-083-SEMARNAR-2013), su aplicación es la más costosa, aunado a esto, los años de operación de los SDF superan los 15 años, lo que evidenció el desaprovechamiento considerable de biogás (Tabla 3.16).

Tabla 3.16 SDF en los municipios seleccionados

MUNICIPIO	TIPO DE SDF	RSU DISPUESTOS (T/DÍA)	AÑOS DE OPERACIÓN	SUPERFICIE OCUPADA (ha)
Axapusco	TCA	10	18	0.5
Xalatlaco	STC	30	20	1.2
Huitzilac	TCA	20	30	3

Al término del análisis, se llevó a cabo una segunda entrevista a los municipios, además se les explicó el contexto del proyecto y de los próximos estudios, debido a dicha segunda entrevista, se calculó a partir de las CE el porcentaje de participación para la selección del municipio final a estudiar; considerando para ello las preguntas contestadas. El municipio de Xalatlaco obtuvo el primer lugar en participación (77.41%), seguido de Axapusco (62.36%) y por último Huitzilac (47.41%).

### 3.3 ANALISIS SOCIAL EN EL MUNICIPIO SELECCIONADO

De la selección final, el municipio elegido fue Xalatlaco, Edo. Méx., el cual se encuentra inmerso dentro de cuatro zonas importantes. La primera zona de influencia es que se ubica a 50 km de la Ciudad de México, a 32 km de Toluca, a 75 km de la Ciudad de Cuernavaca y, por último, forma parte de la 58 Zona Metropolitana de Santiago Tianguistenco, integrada por Almoloya del Río, Atizapán, Capulhuac, Texcalyacac y Tianguistenco. Xalatlaco tenía una población estimada de 29 572 hab y 5,619 casas habitadas para el 2015 (H. Ayuntamiento de Xalatlaco 2016, 2016; INEGI, 2015). La aplicación de entrevistas fue en una muestra de 320 casas, seleccionadas aleatoriamente en las diferentes comunidades y estratos del municipio.



Figura 3.7 Municipio de Xalatlaco

Dentro del análisis realizado a la muestra representativa de la población de Xalatlaco, se encontró que el 91% considera que el cuidado del medio ambiente es de suma importancia, al 7.6% no les importa y menos del 0.1% no contestó o no sabe. Mientras que, a la cuestión de: “Al consumir un producto en la calle ¿Qué hace con el residuo?”, el 76.9% indicó que guarda el residuo hasta que llega a su casa, el 17.5% lo deposita en el contenedor correspondiente, el 4.3% lo tira en la calle y el 1% decidió no contestar. Casos parecidos a éste donde la respuesta es satisfactoria en más de un 90% a temas ambientales, son los presentados en Macau, China e Irán (Pakpour *et al.*, 2014) (Song *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2018) (Tabla 3.17).

Tabla 3.17 Conocimiento y actitud de los habitantes de Xalatlaco

PREGUNTA	RESPUESTA	PORCENTAJE		
		1	2	3
Al consumir un producto en la calle ¿Qué hace con el residuo?	1)Guarda el RSU, 2) Deposita en contenedor, 3) Tira en la calle	76.9%		17.5%
¿Considera importante mejorar la calidad el medio ambiente?	1) Si 2) No 3) No sabe	97.8%		0.36%
¿Barre la calle frente a su casa?	1) Si 2) No 3) A veces	91.2%		7.69%
¿Considera que los residuos pueden ser aprovechados?	1) Si 2) No 3) No sabe	91.9%		2.56%
¿Sabe que es la composta?	1) Si 2) No 3) No sabe	11.35%		85.3%
¿Conoce alguna empresa que venda nuevos productos con los residuos?	1) Si 2) No 3) No sabe	61.9%		24.1%

En términos de conocimientos sobre los RSU, el 91.9% de las personas consideran que éstos pueden ser aprovechados, tan sólo el 11.35% de ellos conocen el tratamiento denominado, composta y sólo el 61.9% de los mismos conoce empresas dedicadas a realizar nuevos productos con los residuos.

### 3.3.1 Responsabilidad sobre los RSU y disposición a pagar

Existen diversos métodos para estimar la disposición que tiene la gente para pagar por el servicio de RSU por ejemplo, a través de entrevistas, por medio de preguntas abiertas y preguntas de opción múltiple (Fu *et al.*, 2015). Para este estudio las preguntas fueron cerradas, se les cuestionó si estaban dispuestos a cooperar con alguna remuneración económica y en el caso de ser positiva la respuesta, fue registrada la cuota que manifestaron estar dispuestos a pagar, con esto se tuvo una idea más clara de cuánto se podría cobrar por el servicio de recolección, si fuera necesario. El 57.87% de las personas encuestadas indicaron que cooperan actualmente con una remuneración económica o “cooperación” al personal de la

recolección de residuos, mientras que el 20.87% tuvo una respuesta negativa a esta cooperación aún si existiera una mejora en el sistema, el 21.24% decidió no contestar. Dentro de esta disposición a pagar una tarifa se tiene el caso de Kuala Lumpur, Malasya donde cerca del 52.5% de la población contestó a favor de un pago, si se implementara un adecuado manejo de los residuos electrónicos (MD REJAB *et al.*, 2012).

En cuestión de la cantidad que estuvieran a pagar una tarifa semanal por un mejor servicio. el 52% seleccionó un rango de \$1.00 a \$10.00 MXN, el 13.18% de \$11.00 a \$20.00 MXN, sin embargo, un 12.0% mencionó que no pagaría nada por el servicio, ya que es responsabilidad del municipio llevarla a cabo. Esto proporciona una visión real, para que el municipio obtenga una remuneración económica y así mejorar el manejo de los RSU.

### 3.3.2 Nivel socioeconómico y disposición a reciclar

Tomando como base el Bando Municipal 2019 de Xalatlaco, el municipio se encuentra compuesto de cinco barrios y once delegaciones. Las cuales de acuerdo con INEGI (2017) presentan características de estratos: Muy bajo, Bajo y Medio, como se muestra en la tabla 3.18.

Tabla 3.18. Localidades por estrato socioeconómico

ESTRATO	LOCALIDAD
Medio	San Agustín, San Bartolo, San Francisco, San Juan, Cruz Larga, Morelos, Cabecera Xalatlaco
Bajo	San Juan Tomasquillo, Potrero, Mezapa la Fábrica, Santa Fe Mezapa, Aguila, Coexapa
Muy bajo	Capulín, Tejocotes

Con base en la regla AMAI 8 x 7, se encontró que dentro de la muestra el nivel socioeconómico con mayor porcentaje fue el denominado bajo, con un 88.4% de presencia, mientras que el denominado medio tuvo 11.6%, esto da un indicativo de

que el municipio de Xalatlaco es una zona rural, resultado parecido al reportado por Durán-Moreno *et al.* (2013), donde se indica que para estas zonas, el predominante es el nivel socioeconómico D (medio-bajo).

En cuanto a reciclaje, se encontró dentro de los dos niveles socioeconómicos, que el subproducto HDPE no tiene un valor económico, a diferencia del PET, con lo que más del 80% de los encuestados lo lleva a vender; esto proporciona un punto de partida para la creación del Programa de separación, y se sugiere informar a la población el valor que tienen los demás subproductos. Otra acción de importancia es que el cartón y el unigel son subproductos utilizados como combustible por el 11% del nivel “Medio” y, en el caso del nivel “Bajo” además queman el unigel, el HDPE y el PET (Figuras 3.8 y 3.9). Es imperativo erradicar dicha acción al momento del diseño del nuevo manejo de los RSU, debido a que la quema de estos subproductos trae consigo producción de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos (González-Rodríguez, 2012), lo que implica no sólo un impacto ambiental, sino que también produce un daño a la salud de la población.

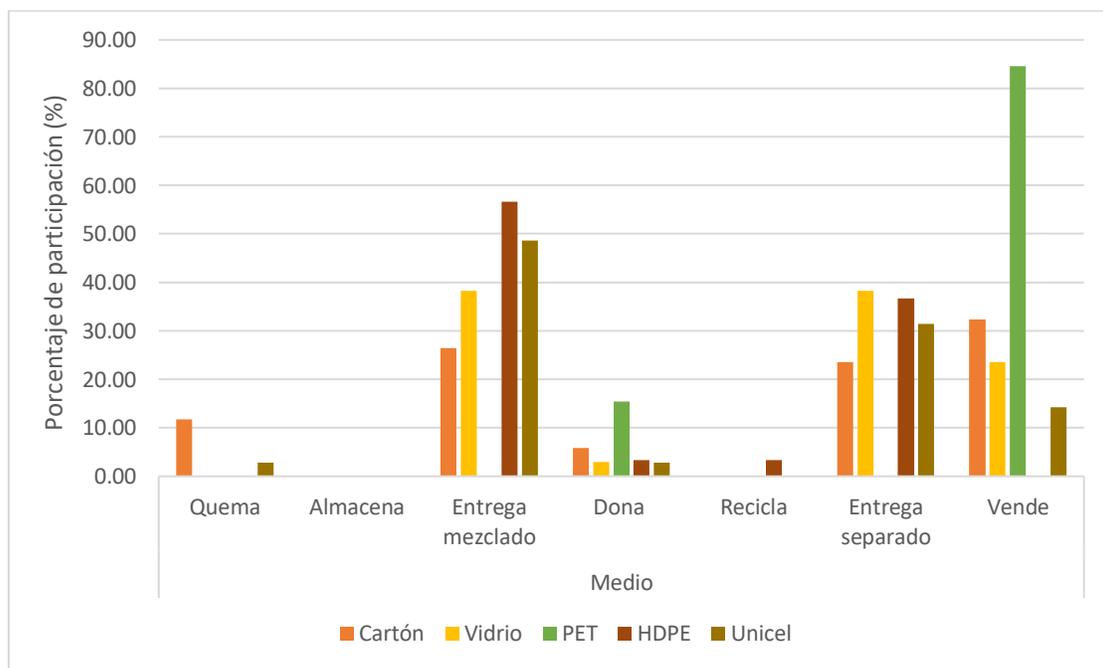


Figura 3.8 Porcentaje de participación del nivel socioeconómico “Medio”

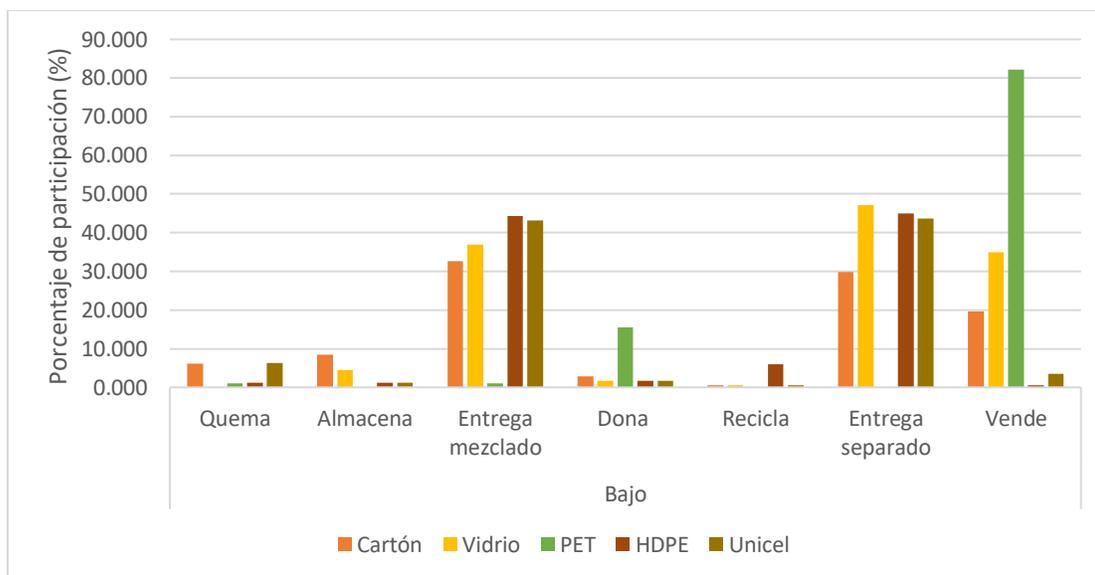


Figura 3.9. Porcentaje de participación del nivel socioeconómico “Bajo”

Si bien, dentro del municipio de Xalatlaco la recolección es selectiva (orgánicos e inorgánicos), al preguntarle a la población encuestada si llevaban a cabo una separación minuciosa (entrega separado), el 25.9% del nivel socioeconómico “medio” informó llevarlo a cabo, a diferencia del 33.3% de las personas del nivel socioeconómico bajo, tendencia contraria a trabajos como el de Solis-Salazar (2010), donde la tendencia en Costa Rica fue: a mayor nivel socioeconómico mayor separación. Esta diferencia entre los dos estudios puede ser debido los aspectos contextuales, puesto que el municipio sólo requiere la separación en dos subproductos.

Como se mencionó, el tipo de recolección es de forma selectiva desde hace al menos dos alcaldías anteriores, sin embargo, los encargados del MIRSU indicaron que la población se encontraba aún renuente a separar adecuadamente sus residuos. Al preguntar: “Si no separa los residuos ¿Cuál es la razón por la que no lo hace?” (Tabla 3.26) el 10.6% de la población no la realiza debido al poco tiempo que tienen, el 4.0% no tiene interés en realizar esta acción, el 1.4% indica que no tiene información sobre

cómo llevar a cabo una separación adecuada y el 0.73% mencionó la falta de contenedores especiales para cada uno de los residuos separados. Es importante decir que más del 83% de la gente encuestada desconoce por qué no llevaba a cabo esta acción (Figura 3.10). Este último porcentaje puede ser indicativo de que las personas no conocen la importancia de separar los residuos, por lo que es necesario proporcionar información al público y mejorar la conciencia de los ciudadanos sobre el reciclaje y separación en casa habitación (Babaei et al., 2015). Para especificar las áreas de oportunidad en la creación de programas de educación, se sugiere la aplicación de otra entrevista, con preguntas concretas, referentes a separación, reciclaje y educación ambiental.

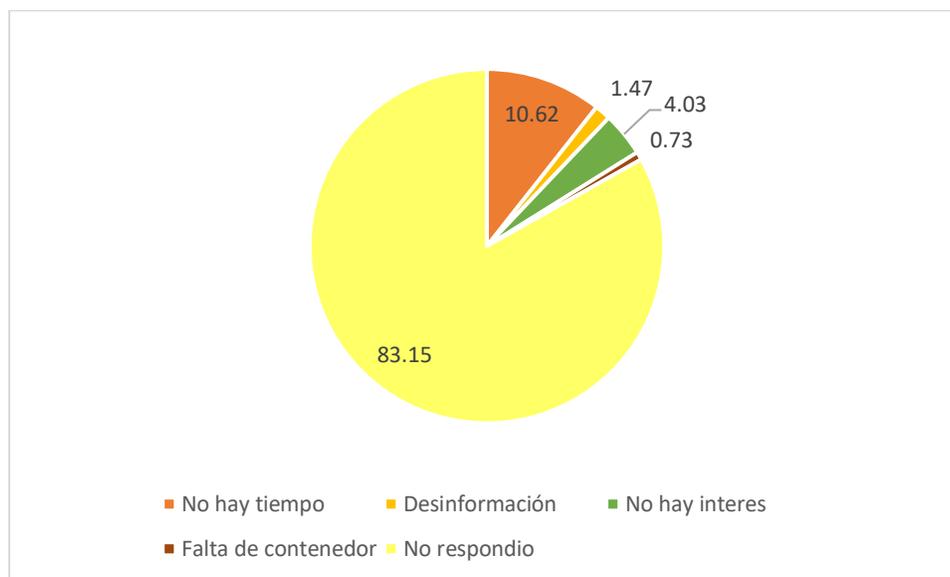


Figura.3.10 Porcentaje de participación a reciclar

### 3.4 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA AL MANEJO DE RSU

La descripción y discusión de este apartado siguió la estructura de la metodología del ACV.

### **3.4.1 Objetivo, unidad funcional y límites**

El estudio presenta la comparación de los impactos ambientales asociados al manejo existente de RSU y a tres escenarios propuestos, desde la perspectiva del ACV, con el objetivo de seleccionar y proponer la opción del manejo más adecuado orientado en las mínimas emisiones para el municipio de Xalatlaco.

#### **3.4.1 Unidad Funcional**

La Unidad Funcional (UF) definida asociada al sistema de RSU (recolección, tratamiento y disposición) fue de una tonelada. Para determinar el flujo de referencia de una tonelada por día (t/d), se dio seguimiento durante una semana, al número total de rutas de recolección en dicho municipio.

#### **3.4.2 Límites del sistema y alcance**

El alcance considerado fue el de la tumba a la tumba, el cual incluye el traslado de los RSU desde casa habitación hasta el sitio de SDF donde se da tratamiento a los RO y RIR (compostaje, separación manual) y se vierten en la celda. La figura 3.11 muestra los límites establecidos para el sistema del presente estudio; se consideraron las entradas y salidas de energía y masa para cada una de las etapas. Para la etapa de recolección, en los cuatro escenarios propuestos se planteó una recolección de forma selectiva, tomando en cuenta como entradas el combustible consumido por los camiones recolectores y a los gases emitidos por la quema de éste como salidas, se excluyó la construcción de los camiones. El tratamiento de los RSU fue dividido en tres opciones, compostaje para RO, selección y separación de RIR y digestión anaerobia para los RO; el gasto de energía asociado a las maquinarias en cada uno de los procesos fue evaluado; debido al alcance del proyecto, en el caso de los RI no se consideraron los procesos involucrados en el reciclaje de estos. Para la parte de disposición final, se excluyeron los procesos de infraestructura y se consideró como sitio no controlado y relleno sanitario (RESA) (ECOINVENT, 2019).

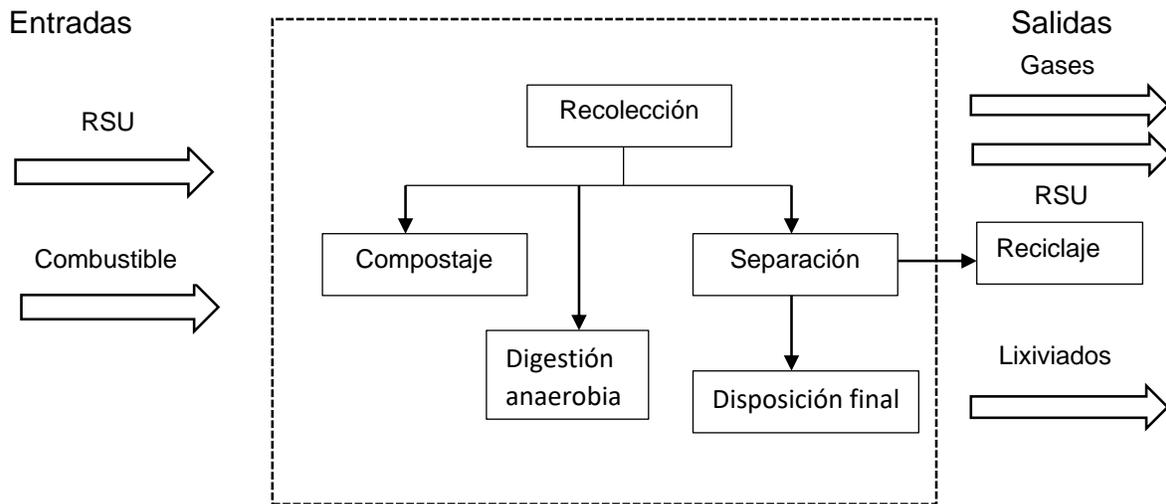


Figura 3.11. Límites del sistema

### 3.4.3 Análisis de ciclo de inventario

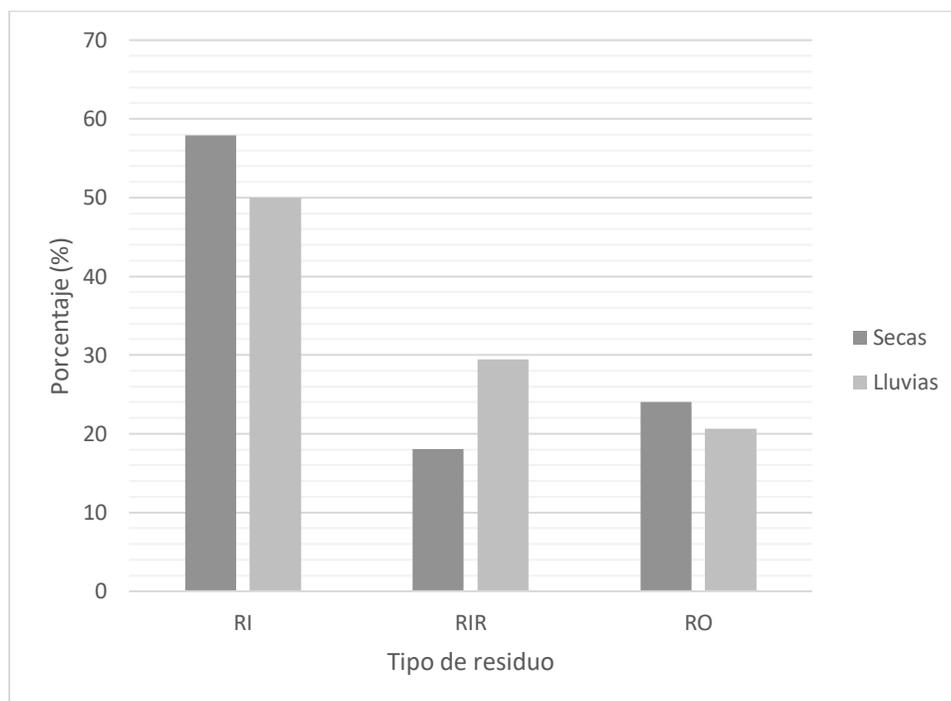
A continuación, se describe cada una de las actividades realizadas para conjuntar la información requerida para le ACI:

- a) Caracterización física. Se tienen el conocimiento previo del cambio de composición que existe en los RSU, que llega a variar por día, mes, época y hasta en la casa habitación que son producidos (Demirarslan & Celik, 2018). De acuerdo con la literatura existe una diferencia significativa y marcada entre las diferentes estaciones del año, por ejemplo, en primavera se ve un aumento en el porcentaje de latas y PET, mientras que en invierno éstos se ven disminuidos; aunado a ello, en primavera, verano y otoño existe una mayor presencia de residuos de jardinería (Gallardo *et. al*, 2014).

Por esto, el estudio de composición comprendió las estaciones representativas de estiaje y lluvia. En la época de secas los RSU estudiados (mayo-septiembre) mostraron un menor porcentaje de RIR, alcanzando 18.02% contra 29.42% en

lluvias, ésto se puede atribuir a que el municipio en cuestión está conformado por diferentes localidades, las cuales tienen fiestas patronales en diferente tiempo, siendo la época de lluvias donde se concentran estas festividades (GOB, 2016); dicho comportamiento es similar al reportado por el estudio de Frésca *et al*, (2008) en São Carlos, Brasil.

En términos de RO, en las dos temporadas sus porcentajes fueron menores a la media nacional, que comprende el 52.4% de acuerdo a la SEMARNAT (2020); cabe recalcar que el estudio en cuestión fue realizado en el SDF, mientras que el mostrado a nivel nacional fue en casa habitación (Figura 3.12); sin embargo, los resultados son parecidos al trabajo presentando por Taboada-González *et al.*, (2011), el cual fue realizado con una metodología parecida a la mostrada en este estudio.



RI: residuos inorgánicos, RIR: residuos inorgánicos reciclables, RO: residuos orgánicos

Figura 3.12 Caracterización física de RSU de Xalatlaco, Estado de México

b) Recolección: Uno de los problemas más complicados y costosos dentro del sistema de MIRSU es la etapa de recolección (Hemmelmayr, Doerner, Hartl, & Vigo, 2014), debido a que el volumen de los RSU que deben administrar los municipios es de gran tamaño y aumenta cada año de manera considerable (OCDE, 2013). La CE y el personal del municipio indicaron que dentro del mismo se contaba con ocho rutas de recolección separada, las cuales cubrían en su mayoría la cabecera municipal y las localidades continuas en diferentes horarios y días (Tabla 3.19).

Tabla 3.19. Rutas de camiones del municipio de Xalatlaco

RUTAS	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO
Ruta 1	Orgánicos Inorgánicos				Orgánicos Inorgánicos	
Ruta 2		Orgánicos Inorgánicos		Orgánicos Inorgánicos		
Ruta 3			Orgánicos Inorgánicos			Orgánicos Inorgánicos
Ruta 4	Orgánicos Inorgánicos			Orgánicos Inorgánicos		
Ruta 5		Orgánicos Inorgánicos			Orgánicos Inorgánicos	
Ruta 6			Orgánicos Inorgánicos			Orgánicos Inorgánicos
Ruta 7		Orgánicos		Orgánicos		Orgánicos
Ruta 8	Orgánicos		Orgánicos		Orgánicos	

Para el cálculo de los kilómetros recorridos y debido a que cada día se transitaban diferentes distancias, se obtuvo el promedio de cada uno de los camiones por día y se extrapoló a una tonelada recolectada. Si bien la recolección se hace de dos

maneras, de acuerdo con los datos obtenidos, la distancia entre cada una de las recolecciones fue la misma en todas las rutas.

Las salidas que son representadas por el  $CO_{2eq}$ , fueron calculadas por las ecuaciones de la tabla 3.7, mostrada en metodología, los resultados de estos cálculos son presentados en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Entradas y salidas de la etapa de recolección.

Entradas		Unidades
Recolección	2.071	km recorridos/t
	1.902	L consumidos/t
Salidas		Unidades
Emisiones de $CO_{2eq}$	5.108	kg de $CO_{2eq}/t$

Como análisis extra, se llevó a cabo un estudio de ruteo para visualizar el proceso de recolección de cuatro de éstas, las cuales fueron seleccionadas con ayuda de los encargados del municipio. El seguimiento de ruteo comprendió tres días (Lunes, Martes y Miércoles), en un horario de 06:00 am hasta el término de la recolección. El equipo estuvo conformado por cuatro personas, las cuales fueron repartidas en dos camiones, con el fin de asegurar los tiempos y los kilómetros recorridos (Figura 3.13).



Figura 3.13 Estudio de ruteo en camiones recolectores de Xalatlaco

Dentro del recorrido se observó que una parte de la ciudadanía coloca los recipientes con RSU unas horas antes de que pase el camión recolector, debido a que no se encuentran cuando éste pasa, lo que ocasiona que animales como perros o gatos destruyan las bolsas y propaguen los residuos, sobre todo los de índole orgánico (Figura 3.13) aunado a esto se observó que algunas familias viven en casas tipo vecindad, lo que produce una cantidad grande de RSU si se considera como una sola casa (Figura 3.14), lo que da pauta a un estudio para la colocación de contenedores.

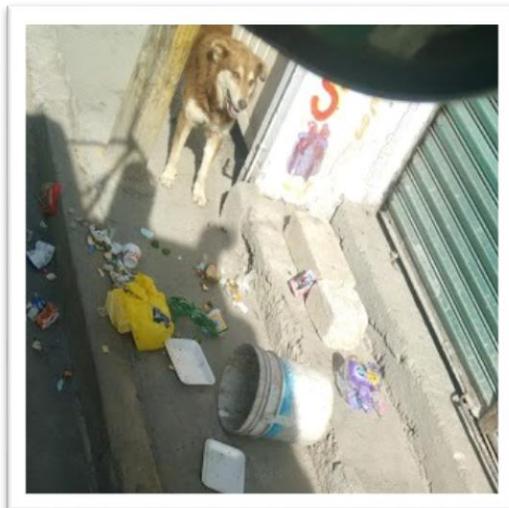


Figura 3.14 Presencia de animales  
en la etapa de recolección



Figura 3.15 RSU de una casa  
tipo vecindad

Una de las características de las calles de Xalatlaco es que son estrechas, por lo que solo caben dos carros, aunado a esto, medio carril es usado como estacionamiento (Figura 3.16), además la recolección de RSU en las calles principales de Xalatlaco se realiza en horario pico de 13:00 a 15:00 horas, lo que dificulta la maniobra del camión

recolector y como consecuencia provoca tráfico en dichas calles, por lo que dentro de los posibles escenarios de mejora, se deberá de considerar el horario de recolección.



Figura 3.16 Calles del municipio de Xalatlaco

c) Compostaje. Dentro del modelado del E0, el compostaje no fue considerado debido a que el proceso se lleva a cabo de manera empírica, donde no fue posible coleccionar información sobre la salida o entrada de algún combustible o energía, mientras que para los E1 y E2 donde se involucró la construcción de una planta de compostaje, se tomó en cuenta una trituradora de residuos, así como un minicargador para el arrastre de esta. La Tabla 3.21 muestra los requerimientos energéticos necesarios para los equipos antes mencionados, referidos a la unidad funcional (1.0 t/d). En este caso la cantidad de RO que se procesa es de 0.243 t. Los datos de la Tabla 6 se utilizaron para actualizar a las condiciones del estudio el dataset de ECOINVENT 3.0: Biowaste {RoW}| treatment of, composting | APOS, U.

Tabla 3.21. Etapa de compostaje.

Entradas	Cantidades
Consumo combustible (diésel)	24.119
Minicargador Bobcat (L)	
Consumo energético	18.838
Trituradora (Kwh)	
Unidad funcional 1 t de RSU	

Debido a la observación en campo, resultado de visitas programadas, se encontró que el producto “composta” (Figura 3.17), no cumplía con las características requeridas, esto debido a la presencia de residuos de plástico y otros subproductos, aun cuando se realizó una separación de los mismos antes de colocarlos en la pila de compostaje.



Figura 3.17 Composta del municipio de Xalatlaco

Apoyado del diagrama de Ishikawa para encontrar las causas probables por las cuales la composta elaborada en el municipio de Xalatlaco no era adecuada. Se observó que, durante el proceso de compostaje, el personal no realizaba la aeración como lo indica la literatura (Román, 2013), debido a que no cuenta con una capacitación adecuada y tecnificada (Figura 3.18), lo que limita todo el proceso.

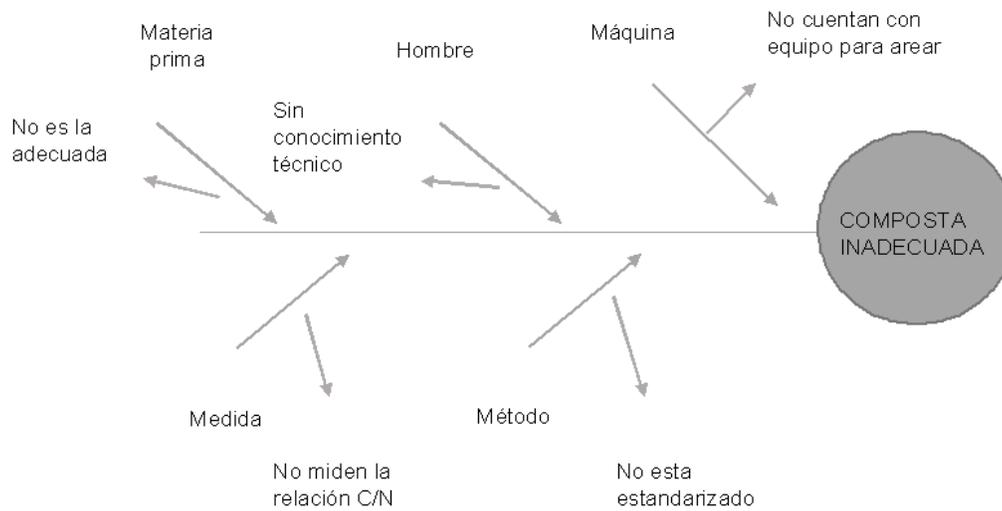


Figura 3.18: Diagrama de Ishikawa en la etapa de compostaje

Otro de los problemas detectados al no seguir un procedimiento, fue la generación de lixiviados, indicio de que la degradación de los RO no se lleva a cabo adecuadamente. Con las visitas realizadas al sitio de compostaje, se observaron pequeñas corrientes de lixiviados alrededor de las pilas, además de que los RO no eran cubiertos en su totalidad, lo que hace que éstos se sequen al aire libre y no cumplan con la humedad requerida para que para las bacterias y hongos realicen la degradación (Figura 3.19).



Figura 3.19 Pequeñas corrientes de lixiviados

d) Separación. Para el diseño del E0, en términos de separación, debido a las condiciones empíricas en las que se realizan, no fueron calculadas las entradas y salidas. En los E1 a E3 se consideró el gasto energético y de combustible de los equipos requeridos en los procesos propuestos, dichos valores fueron obtenidos directamente de las bases de datos del programa SIMAPRO ® 8.0. Dentro de esta etapa se tomó en cuenta lo reportado por Martínez-Morales (2016), en donde se establece que existe tiempos muertos dentro de los trabajadores por lo que se estableció una eficiencia del 50% para dicha separación. Para los E1, E2 y E3, donde se propone una planta de segregación, los requisitos en términos de energía se encuentran definidos en la tabla 3.22.

Tabla 3.22. Etapa de separación.

Entrada	Cantidades
Energía consumida Abrebolsa Serie AS8 (Kwh)	1.875
	ECOINVENT
Banda transportadora	3.0

RR: residuos reciclables. Unidad funcional 1 t de RSU.

Para el caso de los RIR se obtuvo la composición en cada uno de los escenarios de la caracterización de RSU (Tabla 5). Con los datos de las tablas 3.22 y 3.23 se simuló el escenario de reciclaje que se denominó Sólidos Inorgánicos Reciclados {Mx}. La cual incluye los siguientes datasets de ECOINVENT 3.0: Paper (waste treatment) {GLO}| recycling of paper | APOS, U , PET (waste treatment) {GLO}| recycling of PET | APOS, U , Mixed plastics (waste treatment) {GLO}| recycling of mixed plastics | APOS, U , Aluminium (waste treatment) {GLO}| recycling of aluminium | APOS, U , Packaging glass, white (waste treatment) {GLO}| recycling of packaging glass, white | APOS, U.

Tabla 3.23. Residuos inorgánicos reciclables.

Residuo	Cantidad. E0	Cantidad E1, E2, E3
Papel y cartón (t)	0.050	0.051
PET (t)	0.020	0.021
Plástico rígido (t)	0.098	0.101
Tretapack (t)	0.018	0.018
Latas (t)	0.006	0.007
Metales (t)	0.006	0.006
Vidrio (t)	0.030	0.031

E0, escenario 0; E1, escenario 1; E2, escenario 2; E3, escenario 3. Unidad 1 t de RSU

e) Disposición final: Dentro del sistema de disposición final no existe la compactación ni el recubrimiento periódico con maquinaria o de forma manual así como la inexistencia de lagunas de lixiviados, lo que hace Para el cálculo de la salida de lixiviados para el E1, se tomaron como base las ecuaciones de 2.7 – 2.10, obteniendo como resultado 0.552 m<sup>3</sup>/d por los RO y RM depositados en el SDF. Para el E0 el flujo correspondiente a la generación de biogás fue de 48 m<sup>3</sup>/d mientras que para el E1 se calculó en 24 m<sup>3</sup>/d.

Para el caso del E1, en donde se propuso una mejora para la separación de RR, el flujo en el SDF considerado fue de 0.5257 t/d tomando en cuenta las mismas condiciones de entradas del E0 (Tabla 3.24).

Tabla 3.24 Entradas y salidas en la etapa de disposición final del E1

Salidas	Unidades	
Biogás	24	m <sup>3</sup> /d
Materia Orgánica	0.547	
Nitrógeno	435.86	
Lixiviado	0.552	m <sup>3</sup> /d
Entradas	Unidades	
Residuos inorgánicos	0.5257	t/d

Dentro de esta misma etapa, pero para los E2 y E3, se consideró la construcción de un RESA con recirculación de lixiviados y aprovechamiento de biogás. Para los residuos dispuestos, el inventario de datos para las condiciones del diseño fue tomados y acoplados a las condiciones locales de la base de datos Ecoinvent 3.0. Para el modelado del SDF, del E0 se utilizó el dataset Municipal solid waste {GLO}| treatment of municipal solid waste, unsanitary landfill, dry infiltration class (100mm) | APOS, U. Mientras que para el resto de los escenarios se utilizó el dataset Municipal solid waste {RoW}| treatment of, sanitary landfill | APOS, U. En ambos casos se realizaron adaptaciones de acuerdo, a las emisiones reportadas y el cambio de la matriz energética a las condiciones de México.

f) Digestión anaerobia: Los datos de construcción y operación para la digestión anaerobia fueron obtenidos por la dataset de Ecoinvent Biowaste {RoW}| treatment of biowaste by anaerobic digestion | APOS, U y adaptado a las condiciones del estudio de la base de datos ECOINVENT 3.0 de SIMAPRO ® 8.0.).

### **3.5 ANÁLISIS AMBIENTAL DEL MANEJO ACTUAL DE RSU Y ESCENARIOS PROPUESTOS**

En el Software SIMAPRO versión 8.0 se corrieron cada uno de los escenarios propuestos para el municipio de Xalatlaco, con los datos recolectados y cada una de las etapas del análisis del inventario.

#### **3.5.1 Calentamiento Global**

Dentro de las etapas de MIRSU, se observó la disminución del impacto en la separación y en la disposición final, entendiéndose que a menor cantidad de RSU dispuestos dentro del SDF, mayor será el beneficio para éste. Para el caso de la disposición final los E2 y E3 mostraron valores negativos, esto debido a que en estos dos el SDF cuenta con una recuperación y aprovechamiento de biogás para la producción de energía, lo que reduce la emisión de estos gases a la atmosfera

mientras que en el E0 y E1 se encontraron valores positivos, de 1198.80 y 733.48 kg de CO<sub>2eq</sub>. Cabe mencionar que los valores reportados para la recolección son los mismos en todos los impactos debido a que esta se realiza de la misma manera en los cuatro escenarios propuestos. (Tabla 3.25).

Tabla 3.25 Aportación por etapa en calentamiento global

Calentamiento global (CO <sub>2eq</sub> )	E0	E1	E2	E3
Recolección	5.896	5.896	5.896	5.896
Separación	-232.381	-464.994	-464.994	-464.994
Compostaje	NA	60.842	60.842	NA
Digestión anaerobia	NA	NA	NA	29.362
Disposición final	1198.807	733.488	-465.093	-465.093
Totales	972.322	335.232	-863.349	-894.829

NA, no aplica; E0, Escenario 0; E1, Escenario 1; E2, Escenario 2; E3, Escenario 3.

La Figura 3.20 muestra los resultados entre los diferentes escenarios para el municipio de Xalatlaco, dentro de los tres escenarios propuestos diferentes al base (E0), el de menor impacto ambiental en término de CG fue el E3, donde la carga estimada fue de -894.828 kg CO<sub>2eq</sub>, lo que significa que la contribución de este escenario fue positiva gracias a que se usa un biodigestor anaerobio y se utiliza el biogás generado para la producción de energía, evitando su emisión. De manera similar, es decir, la generación de gases emitidos por la disposición dentro del SDF fue controlada en E2 por medio de un RESA, donde se utiliza el biogás producido. Se constata que el uso de tratamientos y una adecuada disposición da como resultado la disminución de CO<sub>eq</sub> en los escenarios E2 y E3, lo cual corrobora lo observado en trabajos como el de Erses-Yay (2015), donde se estudió una tonelada de RSU, mostrando el escenario con menor impacto en términos de estas emisiones, fue donde existió una separación de RIR, un compostaje y disposición final en RESA; mientras que el mayor impacto fue en donde sólo se realizó la recolección y disposición sin tratamiento adecuado, el cual fue el E1 ya que existe la mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2eq</sub> (972.322 kg), (Figura 3.20).

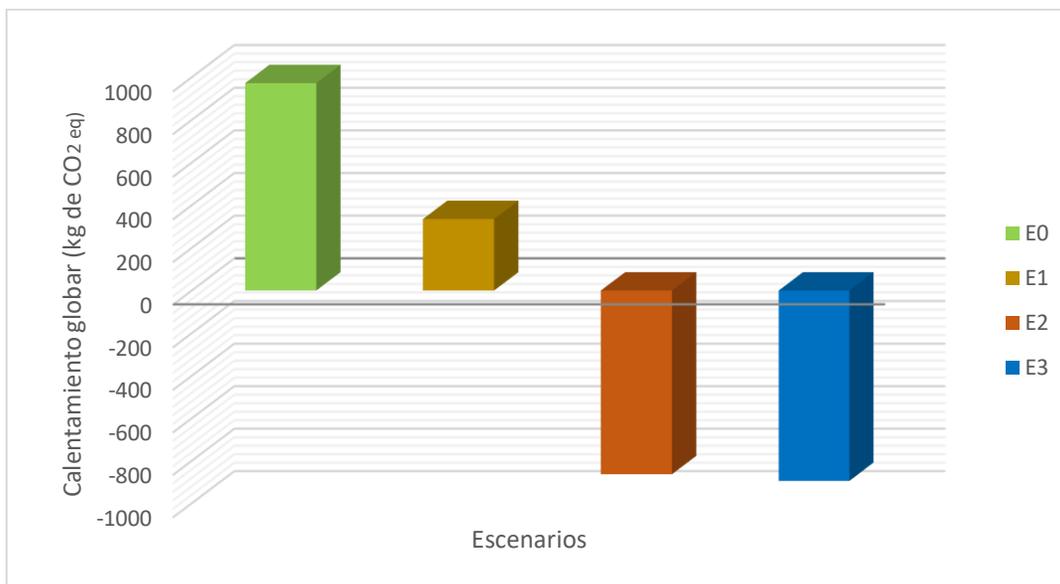


Figura 3.20 Contribución al Impacto en la categoría cambio climático.

### 3.5.2 Agotamiento del Ozono estratosférico

Con relación al AGE se observó que el E0 fue del de menor impacto ( $-3.9E-05$  de  $CFC_{11eq}$ ) sin embargo esto es debido a que en este proceso no se consideró la etapa de compostaje por ser empírica, pero al comparar las etapas de disposición final se encontró que en los E2 y E3 contribuyeron con menores valores entre todos los escenarios ( $-1.9E-05$  de  $CFC_{11eq}$ ) (Tabla 3.26); tendencia que se ve reflejada en trabajos anteriores como es el caso de Zhao *et al.* (2011), donde atribuyen una disminución de emisiones de ozono estratosférico a la separación en casa habitación y por consecuencia disminución de RSU en el SDF. El escenario con mayor impacto fue el E2 con un valor de  $3.2E-04$  de  $CFC_{11eq}$ , seguido del E3 ( $3.1E-04$  de  $CFC_{11eq}$ ) y como segundo lugar el E3 ( $1.3E-04$  de  $CFC_{11eq}$ ) (Figura 3.21).

Tabla 3.26. Aportación por etapa en Ozono estratosférico

Ozono estratosférico (CFC <sub>11eq</sub> )	E0	E1	E2	E3
Recolección	1.4E-06	1.4E-06	1.4E-06	1.4E-06
Separación	-4.3E-05	-8.6E-05	-8.6E-05	-8.6E-05
Compostaje	NA	4.1E-04	4.1E-04	NA
Digestión anaerobia	NA	NA	NA	2.4E-04
Disposición final	2.2E-06	1.4E-06	-1.9E-05	-1.9E-05
Totales	-3.9E-05	3.2E-04	3.1E-04	1.3E-04

NA, no aplica; E0, Escenario 0; E1, Escenario 1; E2, Escenario 2; E3, Escenario 3.

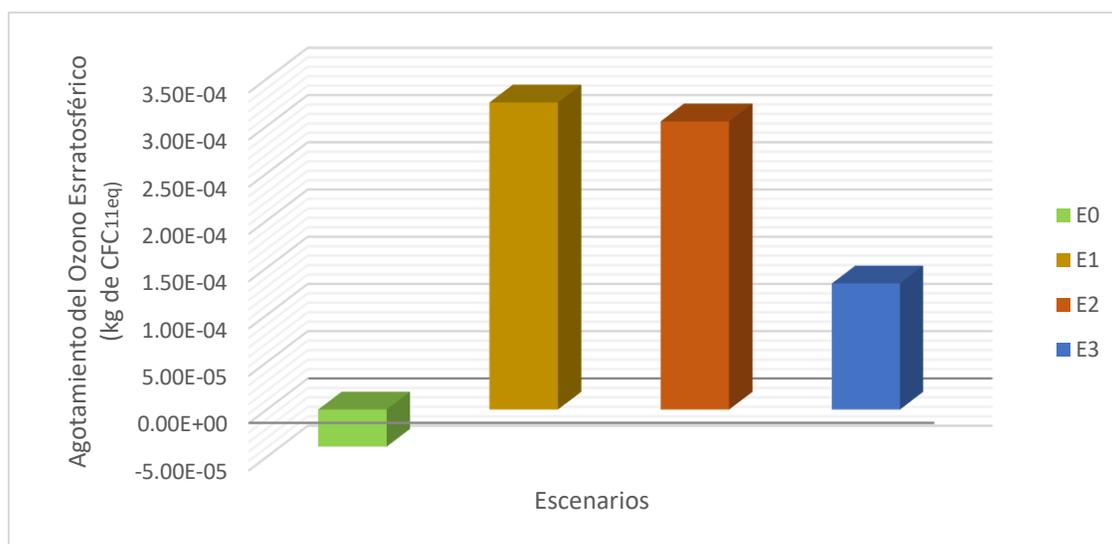


Figura 3.21. Contribución al Impacto en la categoría agotamiento del ozono

### 3.5.3 Eutrofización Agua terrestre

Dentro del E0 se observó que la etapa de Disposición Final contribuyó con el mayor valor de los cuatro escenarios (6.337E-02 kg de P<sub>eq</sub>), mostrando que la disminución de los RSU por la disposición en el SDF fue positiva. En los E1, E2 y E3 se obtienen beneficios por el reciclaje de RI además se pudo percibir que para el caso de la eutrofización es mejor el uso de compostaje como tratamiento de los RO que la

digestión anaerobia (Tabla 3.27). El uso del biodigestor considera la generación de residuales líquidos con algún contenido de fósforo (Raffo-Lecca & Ruiz-Lizama, 2014). En términos globales se concluyó que el E3, fue el de menor impacto, con una carga evitada de  $-9.195E-02$  kg de  $P_{eq}$  mientras que la tendencia que se perfiló en impactos anteriores siguió, siendo el E0 el de mayor valor con un total de  $0.0234$  kg de  $P_{eq}$ . (Figura 3.27).

Tabla 3.27. Aportación por etapa en Eutrofización agua terrestre

Eutrofización agua terrestre (kg de $P_{eq}$ )	E0	E1	E2	E3
Recolección	7.795E-05	7.795E-05	7.795E-05	7.795E-05
Separación	-3.996E-02	-7.992E-02	-7.992E-02	-7.992E-02
Compostaje	NA	1.212E-03	1.212E-03	NA
Digestión anaerobia	NA	NA	NA	6.160E-02
Disposición final	6.337E-02	3.877E-02	-7.371E-02	-7.371E-02
Totales	2.348E-02	-3.986E-02	-1.523E-01	-9.195E-02

NA, no aplica; E0, Escenario 0; E1, Escenario 1; E2, Escenario 2; E3, Escenario 3

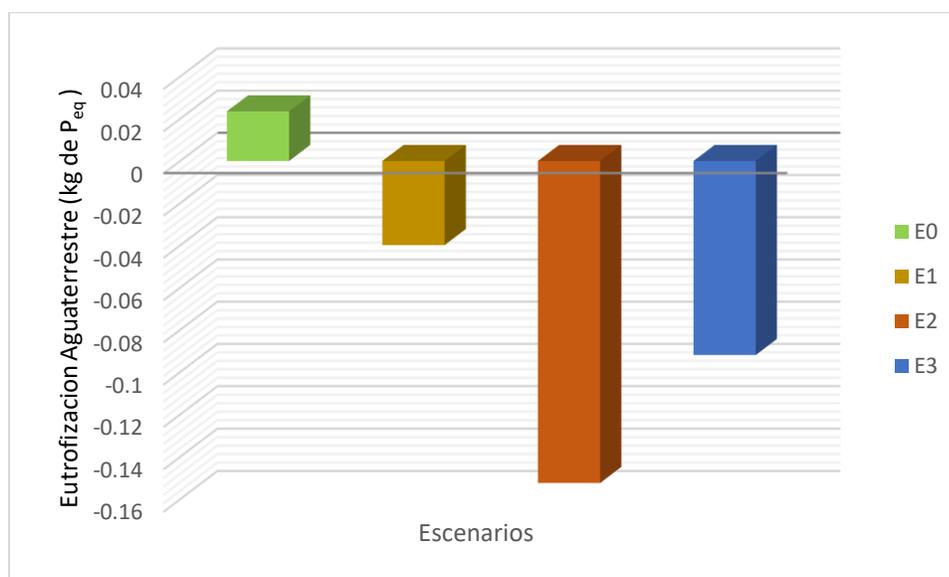


Figura 3.22. Contribución al Impacto en la categoría eutrofización agua terrestre

### 3.5.4 Ecotoxicidad en agua terrestre

Dentro de este impacto se observa la tendencia que se ha presentado, los E2 y E3 son los de menor contribución con valores de -7.192 kg de 1.4 DCB y -1.46 kg de 1.4 DCB respectivamente, siendo el E2 con menor carga ambiental y E0 fue el que representa el de mayor carga ambiental con 409.986 kg de 1.4 DCB (diclorobenceno), debido a que en su etapa de disposición final, llegan a descargarse elementos como níquel, plomo, mercurio y bario, los cuales son causantes de la ecotoxicidad en agua terrestre. El E1 estuvo en segundo lugar en términos de cargas evitadas con un valor de 245.882 kg de 1.4 DCB (Figura 3.23). Estos resultados son opuestos al trabajo realizado por (Yadav & Samadder, 2017), donde reportan que el uso de un proceso de reciclaje, un compostaje y un RESA sin recuperación de energía tiene un mayor impacto en la ecotoxicidad en agua que un escenario donde existe un SNC. Esta disparidad puede atribuirse a que en el presente trabajo, el uso del biogás para producción de energía, redujo de manera considerable el impacto (Tabla 3.28).

Tabla 3.28. Aportación por etapa en Ecotoxicidad en agua terrestre

Ecotoxicidad en agua terrestre (kg de 1.4 DCB )	E0	E1	E2	E3
Recolección	0.006	0.006	0.006	0.006
Separación	-3.637	-7.276	-7.276	-7.276
Compostaje	NA	0.081	0.081	NA
Digestión anaerobia	NA	NA	NA	5.727
Disposición final	413.617	253.071	-0.004	-0.004
Totales	409.986	245.882	-7.192	-1.546

NA, no aplica; E0, Escenario 0; E1, Escenario 1; E2, Escenario 2; E3, Escenario 3

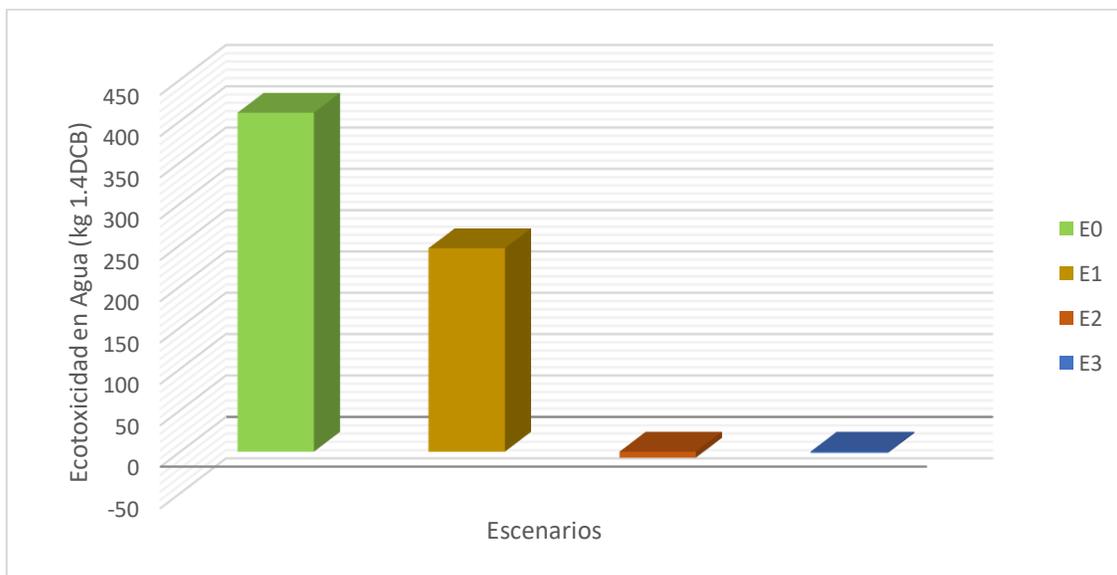


Figura 3.23. Contribución al Impacto en la categoría Ecotoxicidad del agua

### 3.5.5 Uso de suelo

Dentro de este impacto se observaron cargas evitadas en los cuatro escenarios, debido a que en todos existe separación y aprovechamiento de RR. Los valores de 0 para los E2 y E3 en la etapa de disposición final, pueden atribuirse a que en el modelado con SIMAPRO 8.0® no se consideraron los procesos de infraestructura. Se observó la diferencia del E0 a los E1, E2 y E3 en la etapa de separación y por consecuencia en la disposición final, debido a la disminución de RSU dispuestos, por lo que se hace hincapié en la recuperación de RR, ya que mientras mayor sea el porcentaje recuperado, mayor será el impacto positivo en el medio ambiente debido al incremento en reciclaje (Tabla 3.29).

Tomando como base  $-37.805 \text{ m}^2_{\text{cropeq}}$  para E0, el valor de  $-75.654 \text{ m}^2_{\text{cropeq}}$  para E1, E2 y E3, se favorece con más énfasis por el reciclado de papel (50%), debido al ahorro de pulpa que el mismo representa y por consiguiente de terreno usado para plantar los árboles (Figura 3.24).

Tabla 3.29. Aportación por etapa en Uso de suelo

Uso de suelo (m <sup>2</sup> <sub>cropeq</sub> )	E0	E1	E2	E3
Recolección	0.006	0.006	0.006	0.006
Separación	-37.805	-75.654	-75.654	-75.654
Compostaje	NA	0.454	0.454	NA
Digestión anaerobia	NA	NA	NA	0.395
Disposición final	1.473	0.901	0.000	0.0000
Totales	-36.325	-74.291	-75.192	-75.252

NA, no aplica; E0, Escenario 0; E1, Escenario 1; E2, Escenario 2; E3, Escenario 3



Figura 3.24. Contribución al Impacto en la categoría uso del suelo

### 3.6 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL ESCENARIO SELECCIONADO

Debido a las similitudes entre los E2 y E3 desde el punto de vista ambiental, se consideró realizar el estudio económico para ambas propuestas; en la tabla 3.30 se muestra dicho análisis, donde el costo de recolección fue igual en los dos escenarios, debido a que no hubo cambios en dicha etapa del MIRSU.

Tabla 3.30 Costos por tonelada manejada/d entre escenarios

ESCENARIO	RECOLECCIÓN (\$/T)	COMPOSTAJE (\$/t)	BIODIGESTOR (\$/t)	SEPARACIÓN (\$/t)	DISPOSICIÓN FINAL (\$/t)
2	37.52	532.2	N/A	21.55	300
3	37.52	N/A	1386	21.55	300

El costo por tonelada de RSU estimado para el E2 fue \$891.27 (ochocientos noventa y uno 27/100 MXN) y para el E3 fue \$1745.07 (mil setecientos cuarenta y cinco pesos 07/100 (MXN); resultando el costo del E3 prácticamente el doble (1.95 veces) que el costo del E2.

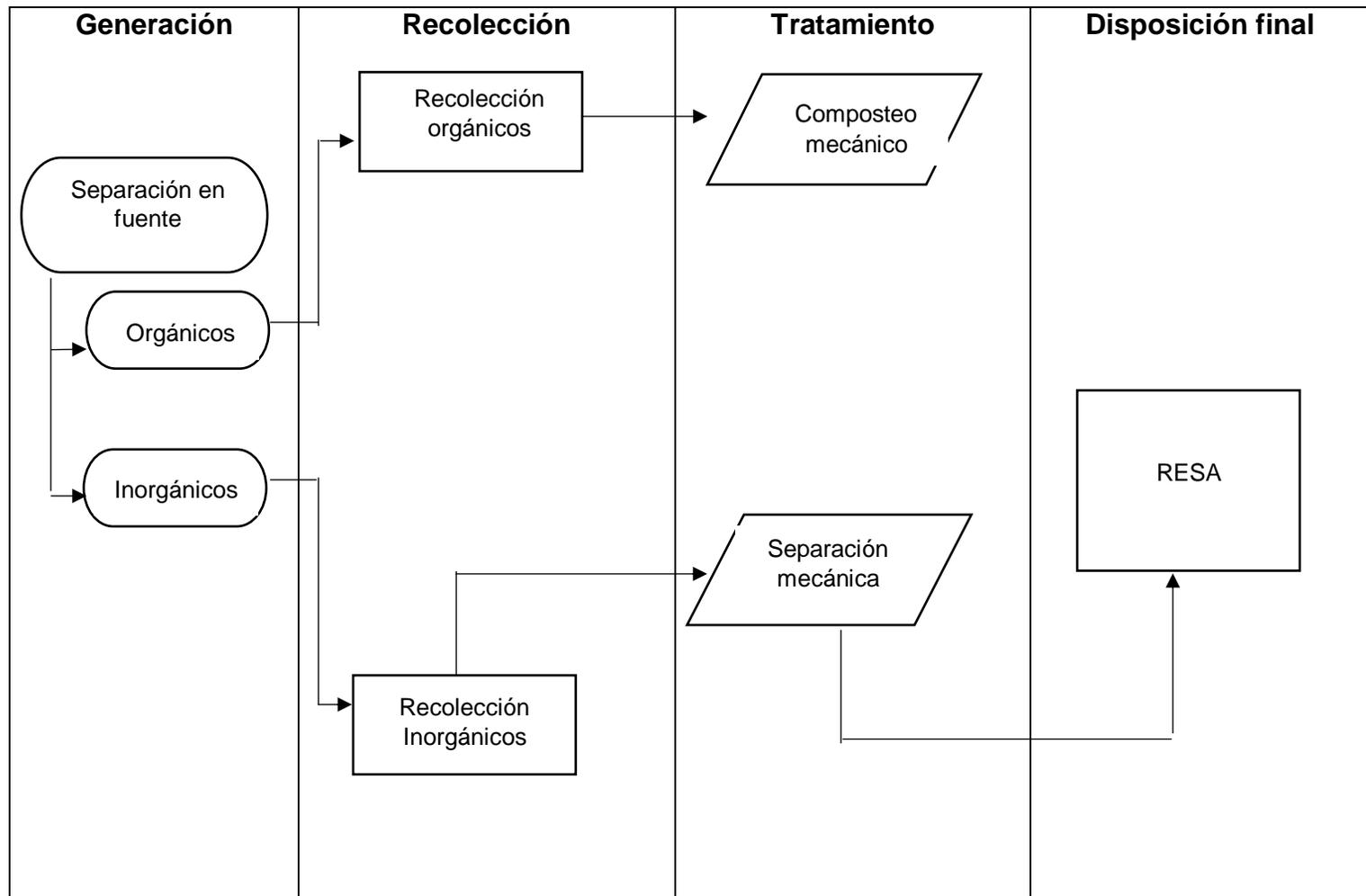
Con estos resultados se diseñó la propuesta de un nuevo sistema para el MIRSU del municipio de Xalatlaco, que comprendió las siguientes etapas:

- a) Recolección: Del estudio realizado se sugiere el aumento del porcentaje en la cobertura de recolección. Debido al costo que requeriría y como resultado de las encuestas a la población, se propuso una tarifa por la recolección, primeramente, como cooperación, cuyo monto no debe mayor a \$10.00 (diez pesos 00/100 MXN) semanalmente, es decir \$40.00 MXN (cuarenta pesos mensuales), por las características del municipio de Xalatlaco. Dicho costo es semejante a algunos impuestos en diferentes Entidades Federativas de México, como es el caso de Mérida, Yucatán, en donde se cobra para los estratos socioeconómicos Medio-Bajo \$32.90 (treinta y dos pesos 90/100 MXN) mensuales; o el de Puebla, que tiene un costo de \$43.68 (cuarenta y tres pesos 68/100 MXN) para la zona Media (Ruiz Mejía, Roman, & Parra, 2018).

Además, se recomienda la implantación y el seguimiento de un programa de educación ambiental, para continuar con la motivación de la separación en casa habitación, con un énfasis mayor en el valor económico del reciclaje; para que en un futuro el municipio opere como receptor de los RR.

- b) Separación de residuos valorizables: De acuerdo con los resultados de los estudios ambiental y económico, se recomienda el uso de una Planta de segregación manual, donde los segregadores primarios sean incluidos de manera formal y con las condiciones de seguridad pertinentes.
  
- c) Tratamiento de residuos orgánicos. Si bien la digestión anaerobia por medio de un biodigestor mostró un impacto ambiental menor, el compostaje por el momento es la manera más económica para este municipio; por lo que se sugiere continuar con el uso de este tratamiento, pero tecnificado, como solución a los RO.
  
- d) Disposición final: Por último, se propone el cambio del SNC a un RESA, con la infraestructura para la captación de biogás y futuro aprovechamiento con el recirculamiento de lixiviados (Figura 3.25).

Figura 3.25 Diagrama de flujo del MIRSU propuesto



## **4. CONCLUSIONES**

Los criterios y subcriterios enfocados a los aspectos sociales, económicos y ambientales, usando el AHP y el análisis de clúster, dieron como resultado la elección de los municipios de Huitzilac, Morelos; así como de Axapusco y Xalatlaco, Estado de México, en orden de ponderación.

El análisis de información oficial de fuentes secundarias y de fuentes primarias mediante la aplicación de la CE a los responsables del manejo de RSU, permitió determinar diferencias sustanciales y detectar áreas de oportunidad con mayor certidumbre para los municipios seleccionados.

Si bien, la mayoría de las personas entrevistadas consideraron de suma importancia el medio ambiente y eligieron depositar sus residuos en contenedores adecuados; sólo el 20% de las personas mostró interés en cuanto a la separación diferenciada de sus residuos en el origen y estuvo dispuesta a pagar por la recolección; detectándose como áreas de oportunidad, la concientización y la valorización de residuos mediante educación ambiental.

El estudio social mostró renuencia al pago del servicio de recolección de RSU y en especial, el estrato bajo que es predominante en el municipio presentó características desfavorables para la separación de residuos valorizables en el origen; evidenciando que para incrementar el aprovechamiento de éstos, se debe diseñar un programa a partir de recompensas.

Las diferencias en la generación y la composición de RSU, en las épocas de lluvia y estiaje para el municipio de Xalatlaco, se vieron influenciadas por el clima y por las actividades socioeconómicas y religiosas que predominan a lo largo del año en las diferentes comunidades.

Este estudio evaluó cuatro diferentes escenarios para el sistema de manejo de RSU del municipio de Xalatlaco, donde el escenario actual (E0) genera impactos negativos

en CG, AGE, EUA, ECA y US con excepción de AGE; mientras el E3 ofreció cargas evitadas, perfilándose como la mejor alternativa.

Para que se alcance el éxito del E3, que comprende una “planta de segregación”, un biodigestor anaerobio y un RESA con recirculación de lixiviados, se requiere la colaboración de la población de Xalatlaco, para lograr la separación al 100% de los RO y RI.

Considerando el entorno social, económico y ambiental del municipio de Xalatlaco, para el diseño del MIRSU, el E2 se perfiló como la opción con mayor viabilidad económica.

Fue posible adaptar y actualizar el ICV de ECOINVENT 3.0 del software SIMAPRO® 8.0 para las condiciones del presente estudio, lo cual contribuyó a reducir la incertidumbre en los resultados de las simulaciones y abre la posibilidad para nuevos estudios bajo las condiciones de México.

## 5. REFERENCIAS

- Abu Qdais, H. A. (2007). Techno-economic assessment of municipal solid waste management in Jordan. *Waste Management*, 27(11), 1666–1672.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.08.004>
- AENOR. *ISO 14040: 2006. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia.* , (2006).
- AENOR. *ISO 14044:2006 Gestion Ambiental. Análisis de ciclo de vida, requisitos y directrices.* , (2006).
- Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P. A., & Ojeada-Benítez, S. (2011). Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás. *Ingeniería-Revista Académica de La Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 15(1), 37–45.
- Ahmed, M. A., Diaz, C., Faaij, A., Gao, Q., Hashimoto, S., Mareckova, K., Dave, R. (2007). Waste Management Referees 2006. *Waste Management*, 27(1), 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.10.005>
- Asefi, H., Shahparvari, S., & Chhetri, P. (2020). Advances in sustainable integrated solid waste management systems: lessons learned over the decade 2007–2018. *Journal of Environmental Planning and Management*, 63(13), 2287–2312. <https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1714562>
- Asim, M., Batool, S. A., & Chaudhry, M. N. (2012). Scavengers and their role in the recycling of waste in Southwestern Lahore. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.013>
- Azapagic, A. (1999). Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, 73(1), 1–21.  
[https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(99\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(99)00042-X)
- Babaei, A. A., Alavi, N., Goudarzi, G., Teymouri, P., Ahmadi, K., & Rafiee, M.

- (2015). Household recycling knowledge, attitudes and practices towards solid waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 102, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.014>
- Banar, M., Cokaygil, Z., & Ozkan, A. (2009). Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey. *Waste Management*, 29(1), 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.12.006>
- Bernache, G. (2012). Riesgo de contaminación por disposición final de residuos. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, (1), 97–105.
- Brito, H., Robalino, P., Espinoza, M., Yaulema, F., Freire, P., Moreno, N., & Gómez, B. (2016). No Title. *European Scientific Journal*, 12.
- Castillo-González E. & De Medina-Salas L. (2014). Generación y Composición de Residuos Sólidos Domésticos en Localidades Urbanas Pequeñas en el Estado de Veracruz, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 30(1), 43–50.
- Ceballos-Pérez G. (2012). El manejo de Residuos Sólidos Urbanos en México , observaciones frente a su gestión El manejo de Residuos Sólidos Urbanos en México , observaciones frente a su gestión . Resumen. *Research Gate*, (January), 16.
- Chen, D., & Christensen, T. H. (2010). Life-cycle assessment (EASEWASTE) of two municipal solid waste incineration technologies in China. *Waste Management and Research*, 28(6), 508–519. <https://doi.org/10.1177/0734242X10361761>
- City, J., Bawar, M. J., & Hashimoto, S. (2017). *Development of an improved solid waste management system in*.
- Coad, A. (2011). Collection of Municipal Solid Waste. In *Un Habitat*.
- CONAGUA. (2017). Reporte del Clima en México. *Servicio Meteorológico Nacional*, 1–27. Retrieved from <http://www.accuweather.com/en/mx/mexico-weather>

- CONAPO. (2015). *Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas, 2016-2050*. <https://doi.org/10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004>
- COTEMARNAT. (2001a). Análisis De Agua - Determinación De La Demanda Bioquímica De Oxígeno En Aguas Naturales, Residuales (DBO5) Y Residuales Tratadas - Método De Prueba (Cancela a La Nmx-Aa-028-1981) Water. In <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166771/NMX-AA-028-SCFI-2001.pdf>. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>
- COTEMARNAT. (2001b). NMX-AA-026-SCFI-2010. Análisis De Agua - Medición De Nitrógeno Total Kjeldahl En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas. In <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166772/NMX-AA-026-SCFI-2010.pdf>. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>
- Cruz Sotelo, S. E., Bovea Edo, M. D., Ojeda Benitez, S., Santillán Soto, N., & García Cueto, O. R. (2017). Evaluación del impacto ambiental al extender la vida útil del teléfono móvil. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33(4), 701–712. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.04.13>
- David, V. E., John, Y., & Hussain, S. (2020). Rethinking sustainability: a review of Liberia's municipal solid waste management systems, status, and challenges. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(5), 1299–1317. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01046-x>
- Demirarslan, K. O., & çelik, B. Y. (2018). Urban solid waste characterization in the east part of Black Sea region. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(2), 167–182. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22034/gjesm.2018.04.02.005>
- Diario Oficial de la Federación. (2015). *Ley general para la prevención y gestión*

*integral de los residuos. Diario Oficial de la Federación.*

Dias, S. M. (2016). Waste pickers and cities. *Environment and Urbanization*, 28(2), 375–390. <https://doi.org/10.1177/0956247816657302>

Díaz-Archundia, L. V., Buenrostro-Delgado, O., Mañon-Salas, M. del C., & Hernández-Berriel, M. del C. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México Greenhouse Gases Emission from two Disposal Sites of Municipal Solid. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVIII(Abril), 149–159.

Díaz-Cuenca, E., Pérez-Ramírez, C. A., & Alvarado Granados, A. R. (2018). La gestión de residuos sólidos urbanos sustentable, una mirada al Estado de México. In C. A. Pérez-Ramírez & J. C. Calderón-Maya (Eds.), *Planeación, gobernanza y sustentabilidad* (1a. edición, p. 375). Toluca de Lerdo, Méx.: Juan Pablo Editor.

Durán Moreno, A., Garcés Rodríguez, M., Velasco, A. R., Marín Enriquez, J. C., Gutiérrez Lara, R., Moreno Gutiérrez, A., & Delgadillo Hernández, N. A. (2013). Características y análisis de composición de los residuos sólidos de la Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(1), 39–46.

ECOINVENT. (2019). Allocation cut-off by classification. Retrieved from <https://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cutoff-by-classification.html>

Erses Yay, A. S. (2015). Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: A case study of Sakarya. *Journal of Cleaner Production*, 94, 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.089>

Fernández-Badillo, G. M. (2020). *Manual de responsabilidad del consumidor en base al principio de jerarquía de residuos para disminuir la huella ecológica de una persona promedio*. UDLA.

Fernández Santana, O. (1991). El Análisis de Cluster: aplicación, interpretación y

validación. *Papers. Revista de Sociología*, 37, 65.

<https://doi.org/10.5565/rev/papers/v37n0.1596>

- Frésca, F. R. C., Massukado, L. M., Pugliesi, E., & Schalch, V. (2008). La caracterización física de los residuos sólidos domésticos en Sao Carlos. *Research Gate*, (July).
- Fu, H. Z., Li, Z. S., & Wang, R. H. (2015). Estimating municipal solid waste generation by different activities and various resident groups in five provinces of China. *Waste Management*, 41, 3–11.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.029>
- Goicochea, O. C., & Fabregat, M. (2015). *Enfoque del ciclo de vida para la evaluación ambiental de las estrategias de manejo de los residuos sólidos domésticos en La Habana , Cuba* Life cycle approach to the environmental assessment of the management strategies of domestic solid wastes in Havana. 16(1), 2–16.
- Gómez-Beltrán, G. (2014). *Evaluación del comportamiento de la pluma de contaminación generada en el vertedero de residuos del municipio de Mexicaltzingo, Estado de México*. Universidad Autónoma de Baja California.
- González Rodríguez, J. de J. (2012). Residuos sólidos urbanos en México. *Reporte CESOP*, (51), 3–10. Retrieved from <http://www3.diputados.gob.mx/camara/content/download/274147/851591/file/Reporte-51-Residuso-solidos-urbanos-Mexico.pdf>
- Güereca, L. (2006). Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis del ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales.
- Guinée, J. B. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment* (7th ed.). United State of America.
- Gutberlet, J. (2015). Cooperative urban mining in Brazil: Collective practices in selective household waste collection and recycling. *Waste Management*, 45,

22–31. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.023>

- Gutiérrez Galicia, F. (2008). *Análisis del Sistema de Recolección de Residuos Sólidos Urbanos en el Centro Histórico de Morelia , aplicando Sistemas de Información Geográfica*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- H. Ayuntamiento de Xalatlaco 2016. (2016). *Bando Municipal Xalatlaco*. Retrieved from <http://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/bdo/bdo119.pdf>
- Hemmelmayr, V. C., Doerner, K. F., Hartl, R. F., & Vigo, D. (2014). Models and algorithms for the integrated planning of bin allocation and vehicle routing in solid waste management. *Transportation Science*, 48(1), 103–120. <https://doi.org/10.1287/trsc.2013.0459>
- Hernández-Berriel, M. del C., Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., Lima-Morra, R., Eljaiek-Urzola, M., Márquez-Benavides, L., & Buenrostro-Delgado, O. (2016). Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en América latina y el caribe. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(1), 11–22. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.02>
- INEGI. (2011). Censo Nacional de Gobierno 2011 Gobiernos Municipales y Delegacionales. In *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2011. CNGDM*.
- INEGI. (2013). *Boletines de Prensa. Estadística Básica sobre el Medio Ambiente, datos del Estado de México*.
- INEGI. (2015). Censo Intercensal. In *INEGI*. <https://doi.org/10.2307/j.ctv26d9pv.32>
- INEGI. (2017). Mapa Digital V6.
- ISO 14040. (2007). Gestión Ambiental. Análisis De Ciclo De Vida. Principios Y Marco De Referencia. Norma Colombiana. *Icontec*, 2(571), 1–24. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4288250>

- Jaramillo, J., Cepeda, F., & Ops. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Del Ambiente*, 10. Retrieved from <http://cdam.minam.gob.pe:8080/handle/123456789/294>
- Juárez, C., Güereca, L., & Gassó, S. (2008). Análisis del Ciclo de Vida del Sistema de Gestión de Residuos Municipales de la Ciudad de México. *Redisa*, 13. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/14195/Gasso.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kiss, G., & Aguilar, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, 79, 39–51. Retrieved from <http://estudiosterritoriales.org/resumen.oa?id=53907903>
- Konstadinos, A. (2011). life Cycle Assessment in Municipal Solid Waste Management, Integrated Waste Management. *In Tech, i(tourism)*, 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>
- Leiva, E. H. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida Master en Ingeniería y Gestión Índice*.
- Llanes, E. A., Sarria, B., & López, E. (2006). Metodología para la determinación de los impactos ambientales en procesos productivos Methodology for the determination of the environmental impacts in productive processes. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(3), 60–65. Retrieved from [https://www.redalyc.org/pdf/932/93215313.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.redalyc.org/pdf/932/93215313.pdf?origin=publication_detail)
- López Jara, A. A., Calle Samaniego, D. B., & Molina Benalcázar, A. M. (2017). Análisis del uso de las herramientas de gestión ambiental en las empresas comerciales del cantón Morona. *Killkana Sociales*, 1(3), 45. [https://doi.org/10.26871/killkana\\_social.v1i3.62](https://doi.org/10.26871/killkana_social.v1i3.62)
- Martinez Morales, I. N. (2016). *Reingeniería del Relleno Sanitario de Zinacantepec con la Revalorización de Residuos Sólidos Urbanos*.

- Massey, R. (2004). Environmental Justice: Income, Race, and Health A GDAE Teaching Module on Social and Environmental Issues in Economics. In *GDAE (Global Development and Environment Insitutue)*. Retrieved from [http://ase.tufts.edu/gdae%0Ahttp://www.ase.tufts.edu/gdae/education\\_materials/modules/Environmental\\_Justice.pdf](http://ase.tufts.edu/gdae%0Ahttp://www.ase.tufts.edu/gdae/education_materials/modules/Environmental_Justice.pdf)
- MD REJAB, S. N., HAMADA, T., & FUJIWARA, T. (2012). Smart Waste Management for Low-Carbon Society in Multimedia Super Corridor City - Cyberjaya, Malaysia. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)*, 68(5), 1\_49-1\_57.  
[https://doi.org/10.2208/jscejer.68.i\\_49](https://doi.org/10.2208/jscejer.68.i_49)
- Mendes, M. R., Aramaki, T., & Hanaki, K. (2004). Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in São Paulo City as determined by LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 41(1), 47–63.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2003.08.003>
- Montaner, M. E., & Sánchez, E. (1988). Aproximación, por el método de Thornthwaite, al cálculo de la infiltración de la lluvia útil. *Papeles de Geografía*, 14, 223–235.
- Núñez Espinoza, J. F. (2016). Patrones de organización social en la gestión de residuos sólidos urbanos en el continuo regional Distrito Federal-Estado de México. *Región Y Sociedad*, 28(65), 187–234.  
<https://doi.org/10.22198/rys.2016.65.a361>
- OCDE. (2013). *Evaluaciones de desempeño ambiental: México 2013 highlights*. 8. Retrieved from [http://www.oecd.org/env/country-reviews/EPR Highlights MEXICO 2013 ESP.pdf](http://www.oecd.org/env/country-reviews/EPR_Highlights_MEXICO_2013_ESP.pdf)
- Omid, S., Derakhshan, Z., & Mokhtari, M. (2017). Using life cycle assessment for municipal solid waste management in Tehran Municipality Region 20. *Environmental Health Engineering and Management*, 4(2), 123–129.  
<https://doi.org/10.15171/ehem.2017.17>
- Orta de Velásquez, M. T., Yañez Noguez, I., Monje Ramirez, I., Rojas Valencia, M.

- N., Toscano Vélez, L., Renteria Martinez, J., ... García Santiago, E. I. (2009). *Estudio de Evaluación de Tecnologías Alternativas o Complementarias para el Tratamiento o Disposición Final de los Residuos Sólidos Urbanos*.  
<https://doi.org/10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004>
- Ortega, R. M. M., Pendás, L. C. T., Ortega, M. M., Abreu, A. P., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2).
- Otoma, S., & Diaz, R. (2015). Life-cycle greenhouse gas emissions and economic analysis of alternative treatments of solid waste from city markets in Vietnam. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(1), 70–87.  
<https://doi.org/10.1007/s10163-015-0380-0>
- Pakpour, A. H., Zeidi, I. M., Emamjomeh, M. M., Asefzadeh, S., & Pearson, H. (2014). Household waste behaviours among a community sample in Iran: An application of the theory of planned behaviour. *Waste Management*, 34(6), 980–986. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.028>
- PEMEX. (2008). *Refinación obtenido el día 22 de Febrero de 2017 de*  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/6977/Refinacion\\_Web.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/6977/Refinacion_Web.pdf).  
1–31. Retrieved from [http://www.sener.gob.mx/res/85/Refinacion\\_Web.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/85/Refinacion_Web.pdf)
- Perteghella, A., Gilioli, G., Tudor, T., & Vaccari, M. (2020). Utilizing an integrated assessment scheme for sustainable waste management in low and middle-income countries: Case studies from Bosnia-Herzegovina and Mozambique. *Waste Management*, 113, 176–185.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.051>
- Raffo Lecca, E., & Ruiz Lizama, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 17(1), 71–80.  
<https://doi.org/10.1021/ja00334a047>
- Rajaeifar, M. A., Tabatabaei, M., Ghanavati, H., Khoshnevisan, B., & Rafiee, S. (2015). Comparative life cycle assessment of different municipal solid waste management scenarios in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

51, 886–898. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.037>

Rangel, N. (2015). *Programa Estatal De Gestión Integral De Residuos Sólidos De Nuevo León*. 87. Retrieved from [http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/gestionresiduos/pepgir\\_nuevo\\_leon.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/gestionresiduos/pepgir_nuevo_leon.pdf)

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., ... Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701–720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>

Rodríguez-Córdova, R. G. (2016). Fundamentos básicos para la ejecución de la auditoría ambiental. *Ciencias Holguín*, 22(1), 1–18.

Román, P. et al. (2013). Manual de compostaje del agricultor. In *Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>

Romero Rodriguez, B. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín IIE*, 91–97. Retrieved from [http://www.icesi.edu.co/blogs/mercadeosostenible2012\\_02/files/2012/10/ACV\\_MEDIO-AMBIENTE.pdf](http://www.icesi.edu.co/blogs/mercadeosostenible2012_02/files/2012/10/ACV_MEDIO-AMBIENTE.pdf)

Ruiz Fernandez, N. (2007). *Aplicación del Análisis del Ciclo de Vida en el estudio ambiental de diferentes Procesos Avanzados de Oxidación*. Universitat Autònoma de Barcelona.

Ruiz Mejía, M., Roman, R., & Parra, E. (2018). *Ía para la Implementación de Sistemas Tarifarios para la Gestión Integral de Residuos en el Estado de Jalisco*. Retrieved from [https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/guia\\_de\\_sistemas\\_tarifarios\\_gir\\_jalisco\\_julio\\_2018\\_dis2.pdf](https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/guia_de_sistemas_tarifarios_gir_jalisco_julio_2018_dis2.pdf)

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*.

Sánchez-Velasco, E. L., Van der Wal-Lima, M. del M., López-Zavaleta, H.,

- Vázquez-Morillas, A., & Álvarez-Zeferino, J. C. (2016). Operación de siete plantas de composta en la Ciudad de México. *Encuentro de Expertos En Residuos Sólidos*, 9, 244–252. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd51/basura.pdf>
- Sancho, J., & Rosiles, G. (1999). *Situación actual del Manejo Integral de los Residuos Sólidos en México*.
- SEDESOL. (2009). *Manual Técnico sobre generación, recolección y transferencia de Residuo Sólidos Municipales*. 1–139.
- SEMARNAT-GTZ. (2006). *Guía para la elaboración de programas municipales para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos*.
- SEMARNAT. (2012a). *Estadísticas Ambientales*.
- SEMARNAT. (2012b). *Programa Ambiental México-Estados Unidos: Frontera 2020*. 49. <https://doi.org/10.1145/2351676.2351724>
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Ambientales). (2004). NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. In *Diario Oficial de la Federación. México*.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Ambientales). (2015a). Acuerdo que establece los gases o compuestos de efecto invernadero que se agrupan para efectos de reporte de emisiones, así como sus potenciales de calentamiento. In *Diario Oficial de la Federación. México*. Retrieved from [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5404077&fecha=14/08/2015&print=true](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5404077&fecha=14/08/2015&print=true)
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Ambientales). (2015b). *Particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero*.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Ambientales). (2020).

*Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos.*

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (1992). NMX-AA-061-1985. Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-Determinación de la generación. In *Diario Oficial de la Federación. México.*

Sharma, B. K., & Chandel, M. K. (2017). Life cycle assessment of potential municipal solid waste management strategies for Mumbai, India. *Waste Management and Research*, 35(1), 79–91.  
<https://doi.org/10.1177/0734242X16675683>

Sivakumar Babu, G. L., Lakshmikanthan, P., & Santhosh, L. G. (2014). Life cycle analysis of municipal solid waste (MSW) land disposal options in Bangalore city. *ICSI 2014: Creating Infrastructure for a Sustainable World - Proceedings of the 2014 International Conference on Sustainable Infrastructure*, 795–806.  
<https://doi.org/10.1061/9780784478745.075>

Solis-Salazar, M. (2010). Conductas ambientales de separación de desechos sólidos y ahorro de agua en la población de Costa Rica. *Revista Costarricense de Psicología*, 29, 19–34.

Song, Q., Zhao, S., Lam, I., Zhu, L., Yuan, W., & Wang, C. (2019). Understanding residents and enterprises' perceptions, behaviors, and their willing to pay for resources recycling in Macau. *Waste Management*, 95, 129–138.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.009>

Taboada-González, P. A., Aguilar-Virgen, Q., & Ojeda-Benitez, S. (2011). Análisis Estadístico De Residuos Sólidos Domésticos En Un Municipio Fronterizo De México Statistical Analysis of Domestic Solid Waste in a Border Municipality of Mexico. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 2(1), 9–20.

Taşkın, A., & Demir, N. (2020). Life cycle environmental and energy impact assessment of sustainable urban municipal solid waste collection and transportation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 61.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102339>

- Wang, Z., Dong, X., & Yin, J. (2018). Antecedents of urban residents' separate collection intentions for household solid waste and their willingness to pay: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, *173*, 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.223>
- Wilson, D. C., Araba, A. O., Chinwah, K., & Cheeseman, C. R. (2009). Building recycling rates through the informal sector. *Waste Management*, *29*(2), 629–635. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.016>
- Woon, K. S., & Lo, I. M. C. (2016). An integrated life cycle costing and human health impact analysis of municipal solid waste management options in Hong Kong using modified eco-efficiency indicator. *Resources, Conservation and Recycling*, *107*, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.11.020>
- Yadav, P., & Samadder, S. R. (2017). Environmental impact assessment of municipal solid waste management options using life cycle assessment: a case study. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(1), 838–854. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0439-7>
- Zhao, Y., Christensen, T. H., Lu, W., Wu, H., & Wang, H. (2011). Environmental impact assessment of solid waste management in Beijing City, China. *Waste Management*, *31*(4), 793–799. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.11.007>
- Ziegler-Rodriguez, K., Margallo, M., Aldaco, R., Vázquez-Rowe, I., & Kahhat, R. (2019). Transitioning from open dumpsters to landfilling in Peru: Environmental benefits and challenges from a life-cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, *229*, 989–1003. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.015>

# ANEXOS

## ANEXO A

CÉDULA DE ENCUESTA PARA APLICACIÓN A AYUNTAMIENTOS											
Plan para el manejo, aprovechamiento y valorización de los Residuos Sólidos Urbanos del Estado de México											
											
Buenos días/tardes/noches. Trabajo en una investigación y estamos haciendo un estudio para conocer el manejo que se le da a la basura, y cómo mejorar la calidad ambiental. Le agradecería que me contestara unas preguntas. Sus respuestas sólo se utilizarán para fines estadísticos. Además, sus comentarios serán de gran utilidad para mejorar la higiene del municipio. ¡Gracias!											
Información general del municipio											
Fecha	Encuestador:	Encuestado:			Liliana Ezava Sanchez		Cargo:	Directora de servicios publicos municipales		Hora Inicio:	10:12:00
Municipio:	Huitzilac			Entidad Federativa		Morelos		Organigrama del Municipal (Especificar Organigrama SAU)		Hora Término:	
<b>Localidades servidas (Indica con X, si es ciudad o pueblo)</b>											
Nombre	Ciudad	Pueblo									
5 comunidades, Huitzilac, tres ,marías fierro del toro cocomulco y fraccionamientos											
Presidente - sindaco Secretario - Regidor											
Autoridades municipales											
Cargo	Nombre			Profesión		Partido político		Experiencia en el manejo de RS			
Presidente Municipal	ANTONIO CRUZ GRACIA					Pan-Nueva Alianza		No			
Responsable Manejo RS	Servicios municipales y Jefatura de residuos					Pan-Nueva Alianza		No			
Responsable de Ecología	Angelica Jazmin Reyes Ortega			Ciudadano tecnico		Pan-Nueva Alianza		No			
Organización y administración del servicio de limpieza											
(Indicar con X, SI ó NO)											
¿El Ayuntamiento cuenta con reglamento de limpieza municipal?	SI	SI				¿Desde qué año?	Realizado	Monto			
¿Cuenta con estudios sobre gestión integral o manejo de residuos sólidos en el municipio?	SI	SI				hace años sin antecedentes					
¿Cuenta con Programa de Prevención y Gestión Integral de RSU?	SI	No				educacion ambiental febrero					
¿Cuenta con contabilidad separada??	SI	No									
¿Cuenta con presupuesto anual para residuos sólidos?	SI	SI									
¿Tienen ingresos por el manejo de RS?	SI	SI						pagan cuatro fraccionamientos			
En caso si ¿ en qué etapa(s) ?											
Servicio de limpieza											
Localidades a donde se presta el servicio					Longitud calles pavimentadas (Km)	Generación total de RME (kg)	Generación total de RSU (kg)	Habitantes con el servicio			
No.											
1	HUITZILAC				70% de las calles		20 toneladas	100%			
2	3 MARIAS					15 mil habitantes					
3	FIERRO DEL TORO										
4	FRECCIONAMIENTO										
5											
6											
7											
8											
Concesiones del servicio											
Concesiones (Indicar con X, SI ó NO)					Componentes del sistema						
¿Tiene concesionado el barrido?	SI	X	NO	PARCIAL (%)	Componentes (Indica con X, SI ó NO)						
Concesionario					Barrido manual	SI	X	NO	REFERENCIA A PREGUNTAS		
¿Tiene concesionado la recolección?	SI	X	NO		Barrido mecánico	SI		NO	En caso de no, continuar con barrido mecánico		
Concesionario					Recolección	SI	X	NO	En caso de no, continuar con recolección		
¿Existe tratamiento previo?	SI		NO	X	Transferencia	SI		NO	En caso de no, continuar con transferencia		
¿Existe concesión en el tamiento?	SI		NO	X	Tratamiento	SI		NO	En caso de no, continuar con centros de acopio		
¿Existe planta de transferencia?	SI		NO	X	Disposición final	SI	X	NO	En caso de no, continuar con planta de compostaje		
¿Existe concesionado en la transferencia?	SI		NO	X	Centros de acopio	SI	X	NO			
Áreas para recibir quejas											
Barrido manual (Incluir listados de personal)											
Superficie total de plazas barridas (m2/día)	NO CONOCE	Longitud total de vías barridas (Km/día)			Cargo y Nombre Personal (supervisor(a)/barrendero(a))	Situación form	Situación info	Seg. Social (IMSS o ISSSTE)	Horas/seman	Salario (\$/mes)	
Equipo empleado para brindar servicio	ESCOBAS, B	Costo de equipos utilizados (\$/semana)			MIL						
No. días laborables por semana (días/semana)	3	Turnos del servicio de barrido (Turnos/día)			UN TURNO						
Horario de barrido	ago-16	Frecuencia barrido (diaria, días/semana, se)			5		X		NO	1300 SEMANA	
Empleados totales (No. mujeres-No. Hombres)	13	Grado promedio de estudios			SECUNDARIA						
Costo global del barrido (\$/semana)	500	Reciben capacitación (SI/ No)			NO						
Barrido Mecánico											
Superficie total de plazas barridas (m2/día)		Longitud total de vías barridas (Km/día)			Cargo y Nombre Personal (supervisor(a)/barrendero(a))	Situación form	Situación info	Seg. Social (IMSS o ISSSTE)	Horas/seman	Salario (\$/mes)	
No. días laborables por semana (días/semana)		Turnos del servicio de barrido (Turnos/día)									
Horario de barrido		Frecuencia barrido (diaria, días/semana, se)									
Empleados totales (No. mujeres-No. Hombres)		Grado promedio de estudios									
Numero barredoras para brindar servicio		Costo de inversión (\$/barredora)									
Costo mantenimiento preventivo (\$/barredora)		Costo mantenimiento correctivo (\$/barredora)									
Gasto de combustible (Km/L)		Costo de combustible (\$/L)									
Costo global del barrido (\$/semana)		Reciben capacitación (SI/ No)									
Recolección											
Servicio	SI (%)	No	Datos Concesionario (nombre, Tel, Dirección)		Información relacionada a la recolecta	Tipos de recolección (Indicar X)		Aprovechamiento/ Costo	Unidades	SI (cantidad)	No (X)
Municipio	100%				Rutas en el municipio (Número)	4	Puerta a puerta	X	No	Cuota servicio recolección de SE DEBE COBRAR PERO NO PAGAN	
Sector Informal		X			Turnos de recolección (Turnos)	1	Acera	X		Recupera reciclables (Mpio)	
Concesionario		X			Promedio Vehic. operando (N)	3	Entrega a camiones por gen	X		Recupera reciclables (recole)	
RSU	X		Datos Sector Informal (descripción)		Promedio Vehiculos en rese	0	Entrega a carretones / particulares	X		Cuota serv. recolección RME	
RME		X			Promedio vehiculos manteni	1	Contenedores descentraliza	X		Recupera reciclables (Mpio)	
Selectiva					Frecuencia recolección (veces/sem)	5	Otra ¿cuál?			Recupera reciclables (recole)	

ANEXO B



**CÉDULA DE ENCUESTA PARA APLICACIÓN A CASA-HABITACIÓN**

Proyecto 263315: Ubicación de Rellenos Sanitarios Inter Municipales Futuros en el Estado de México y Estados Aledaños

 170  
INEGI.ORG.MX

Datos generales										
Temporada:	<input checked="" type="checkbox"/> Esti	<input type="checkbox"/> Lluvias	Estrato:	Alto	<input checked="" type="checkbox"/> Medio	Bajo	Fecha:	6- Octubre - 2017	Hora:	
Nombre del encuestador:							* No. Encuesta:			
Calle y Número:			Colonia:			* No. Encuesta:				
Localidad:		Municipio:		Estado:		C.P.:				
Coordenadas:		* Latitud:		* Longitud:						
<b>I Gestión de residuos. Indique con una X la respuesta</b>										
1	Al consumir un producto en la calle ¿Qué hace con el residuo?			Lo tira en la calle		Lo tira en el contenedor adecuado		Lo guarda		
2	¿Considera importante mejorar la calidad del medio ambiente?			<input checked="" type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	No contesto		No sabe		
3	¿Cómo califica la conducta de las personas que tiran basura en la calle?			Pésimo		<input checked="" type="checkbox"/> Malo	Regular		Buena	
4	¿Recomienda el uso de botes de basura en lugares públicos?			<input checked="" type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	No contesto		No sabe		
5	¿Recomienda el uso de contenedores cerca de su casa?			<input type="checkbox"/> Sí	<input checked="" type="checkbox"/> No	No contesto		No sabe		
6	¿Barre la calle frente a su casa?			<input type="checkbox"/> Sí	<input checked="" type="checkbox"/> No	No contesto		No sabe		
¿Qué hace con los siguientes residuos?										
	Residuo	Quema	Entierra	Entrega mezclado al camión recolector		Entrega separado al camión recolector		Dona	Vende	Otro:
	Cartón						<input checked="" type="checkbox"/>			
	Vidrio						<input checked="" type="checkbox"/>			
	PET						<input checked="" type="checkbox"/>			
	HDPE						<input checked="" type="checkbox"/>			
	Unicel						<input checked="" type="checkbox"/>			
	Tetrapack						<input checked="" type="checkbox"/>			
	Aluminio						<input checked="" type="checkbox"/>			
	Latas								<input checked="" type="checkbox"/>	
	Metales								<input checked="" type="checkbox"/>	
	Juguetes								<input checked="" type="checkbox"/>	
	Llantas						<input checked="" type="checkbox"/>			
7	Papel (cuadernos, libros, etc.)						<input checked="" type="checkbox"/>			
	Bolsas de Plástico				<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	
	Material de construcción		<input checked="" type="checkbox"/>							
	Muebles (Sillas, colchones, etc.)									
	Medicamentos y materiales de curación								<input checked="" type="checkbox"/>	
	Electrónicos (TV, cables, etc.)							<input checked="" type="checkbox"/>		
	Ropa y zapatos								<input checked="" type="checkbox"/>	
	Aceite de automóvil						<input checked="" type="checkbox"/>			
	Aceite de cocina								<input checked="" type="checkbox"/>	
	Pilas (Alcalinas)				<input checked="" type="checkbox"/>					
	Pañales				<input checked="" type="checkbox"/>					
	Orgánicos e higiénicos				<input checked="" type="checkbox"/>					
8	Si vende los siguientes residuos, ¿Cuál es el precio?									

## ANEXO C

Estado	Municipio	edo colindante	Estado colindante	Zona	Población Total	Población total municipios	Densidad poblacional	Unidades económicas	Población pobreza (%)	Cantidad de rsu	Numero de RESA	Numero de SC dentro	Numero de TCA dentro	Numero de RESA fuera	Numero de SC fuera	Numero de TCA fuera
Estado de México	Amecameca	21	Puebla	ESTE	50904.00	149487.00	254.96	13269.00	58.32	47000.00	1.00	0.00	0.00	3.00	1.00	4.00
Morelos	Atlatlahucan	15	Estado de México	ESTE	22079.00	92468.00	237.30	502.00	57.34	9000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Estado de México	Atlautla	17	Morelos	ESTE	30945.00	101855.00	170.28	709.00	70.45	32000.00	1.00	0.00	1.00	4.00	1.00	4.00
Estado de México	Axapusco	13	Hidalgo	NORESTE	27709.00	109816.00	110.14	536.00	59.37	9000.00	0.00	0.00	1.00	1.00	2.00	2.00
Tlaxcala	Calpulalpan	15	Estado de México	ESTE	48385.00	95485.00	175.92	1955.00	62.00	45000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	3.00
Estado de México	Chalco	9	DF	ESTE	343701.00	1056887.00	1412.05	9736.00	53.95	7500.00	0.00	0.00	0.00	6.00	2.00	4.00
Estado de México	Coacalco de Berriozábal	9	DF	NORESTE	284462.00	940930.00	7899.99	7460.00	22.45	280000.00	0.00	0.00	0.00	6.00	2.00	2.00
Estado de México	Ecatepec de Morelos	9	DF	NORESTE	1677678.00	1552664.00	10354.81	57635.00	40.81	3000000.00	0.00	0.00	0.00	4.00	2.00	3.00
Estado de México	Ecatzingo	17	Morelos	ESTE	9414.00	63416.00	184.43	202.00	72.10	6000.00	0.00	0.00	1.00	4.00	1.00	0.00
Hidalgo	Emiliano Zapata	15	Estado de México	ESTE	14825.00	181962.00	108.26	514.00	49.56	60000.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	8.00
Puebla	Huejotzingo	15	Estado de México	ESTE	73771.00	97519.00	357.42	2273.00	61.34	95000.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00
Morelos	Huitzilac	15	Estado de México	SURESTE	19231.00	1154428.00	91.42	768.00	50.56	12000.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	4.00
Estado de México	Huixquilucan	9	DF	ESTE	267858.00	844219.00	1718.68	4485.00	32.65	300000.00	0.00	0.00	0.00	3.00	3.00	0.00
Estado de México	Ixtapaluca	21	Puebla	ESTE	495563.00	896342.00	1424.52	11507.00	33.85	54000.00	0.00	0.00	0.00	3.00	3.00	6.00

Estado de México	Juchitepec	17	Morelos	ESTE	25436.00	209731.00	166.50	898.00	63.16	12000.00	1.00	0.00	0.00	4.00	1.00	5.00
Estado de México	La Paz	9	DF	ESTE	293725.00	4490306.00	6903.21	9183.00	48.50	138000.00	0.00	0.00	1.00	0.00	3.00	2.00
Estado de México	Naucalpan de Juárez	9	DF	NORESTE	844219.00	764600.00	157.59	2506.00	41.71	35000.00	1.00	0.00	0.00	2.00	2.00	0.00
Estado de México	Nezahualcóyotl	9	DF	ESTE	1039867.00	3489350.00	17503.27	45617.00	38.77	1200000.00	0.00	1.00	0.00	0.00	2.00	2.00
Estado de México	Nopaltepec	13	Hidalgo	NORESTE	8960.00	147442.00	105.58	298.00	54.44	7770.00	0.00	0.00	1.00	4.00	0.00	6.00
Estado de México	Ocoyoacac	9	DF	ESTE	66190.00	450007.00	452.89	2647.00	46.61	50000.00	0.00	0.00	0.00	3.00	2.00	1.00
Morelos	Ocuituco	15	Estado de México	SURESTE	18580.00	84403.00	194.36	393.00	67.56	6000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Estado de México	Otumba	13	Hidalgo	NORESTE	35274.00	299267.00	174.39	1145.00	56.53	30000.00	0.00	0.00	1.00	5.00	1.00	8.00

Estado de México	Ozumba	17	Morelos	ESTE	29114.00	95967.00	588.64	1173.00	61.13	24000.00	0.00	0.00	1.00	4.00	1.00	0.00
Hidalgo	San Agustín Tlaxiaca	15	Estado de México	NORESTE	36079.00	365530.00	107.55	557.00	53.29	16000.00	0.00	0.00	0.00	2.00	2.00	8.00
Puebla	San Nicolás de los Ranchos	15	Estado de México	ESTE	11734.00	127028.00	66.26	533.00	82.68	5640.00	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	2.00
Puebla	San Salvador el Verde	15	Estado de México	ESTE	31355.00	98066.00	255.41	689.00	69.48	16000.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00
Estado de México	Tecámac	13	Hidalgo	NORESTE	446008.00	209499.00	2315.83	10657.00	30.39	16000.00	1.00	0.00	1.00	4.00	1.00	2.00
Estado de México	Temascalapa	13	Hidalgo	NORESTE	38622.00	699746.00	217.97	933.00	58.82	3000.00	0.00	0.00	3.00	2.00	2.00	2.00
Hidalgo	Tepeapulco	15	Estado de México	ESTE	54373.00	134854.00	212.07	2506.00	41.71	35000.00	0.00	0.00	1.00	2.00	1.00	8.00
Estado de México	Tepetlaxotoc	29	Tlaxcala	ESTE	30680.00	378396.00	154.96	429.00	49.41	22000.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	3.00
Estado de México	Tepetlaxpa	17	Morelos	ESTE	19843.00	66260.00	421.98	594.00	60.09	10000.00	1.00	0.00	0.00	4.00	1.00	0.00
Morelos	Tetela del Volcán	15	Estado de México	SURESTE	20698.00	43255.00	193.74	818.00	74.76	7000.00	0.00	0.00	0.00	6.00	1.00	2.00
Estado de México	Texcoco	21	Puebla	ESTE	240749.00	1122249.00	539.88	9023.00	42.15	98540.00	0.00	0.00	0.00	3.00	5.00	7.00
Estado de México	Tlanguistenco	9	DF	SURESTE	77147.00	76193.00	413.05	3056.00	57.63	47120.00	1.00	0.00	1.00	2.00	1.00	2.00
Hidalgo	Tizayuca	15	Estado de México	NORESTE	119442	727483.00	1266.99	2975.00	34.09	21000.00	0.00	0.00	1.00	3.00	2.00	2.00
Puebla	Tlahuapan	15	Estado de México	ESTE	40220.00	816289.00	116.00	678.00	78.61	8000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
Estado de México	Tlalmanalco	21	Puebla	ESTE	47390.00	436521.00	283.45	1356.00	41.74	46000.00	0.00	0.00	1.00	4.00	2.00	3.00
Morelos	Tlalnepantla	15	Estado de México	SURESTE	7166.00	239458.00	61.33	135.00	67.28	3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	3.00
Estado de México	Tlalnepantla de Baz	9	DF	NORESTE	700734.00	2300229.00	8579.61	23029.00	30.78	480000.00	0.00	1.00	0.00	7.00	0.00	2.00

Hidalgo	Tlanalapa	15	Estado de México	NORESTE	10342.00	125261.00	123.22	358.00	47.13	5000.00	1.00	0.00	1.00	2.00	0.00	8.00
Puebla	Tochimilco	15	Estado de México	ESTE	17956.00	226369.00	77.53	338.00	78.50	3000.00	0.00	0.00	0.00	5.00	1.00	2.00
Morelos	Totolapan	15	Estado de México	ESTE	11992.00	83898.00	179.34	319.00	74.19	7500.00	0.00	0.00	0.00	6.00	2.00	4.00
Estado de México	Tultitlán	9	DF	NORESTE	52057.00	1581407.00	7536.73	13201.00	33.74	25000.00	0.00	0.00	1.00	2.00	2.00	2.00
Estado de México	Valle de Chalco Solidaridad	9	DF	ESTE	396157.00	2979228.00	7650.00	13269.00	58.32	500000.00	0.00	1.00	0.00	0.00	2.00	5.00
Hidalgo	Villa de Tezontepec	15	Estado de México	NORESTE	12413	75291.00	128.07	479.00	62.52	8000.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	4.00
Estado de México	Xalatlaco	9	DF	SURESTE	29572.00	747786.00	229.45	902.00	62.86	30000.00	0.00	1.00	0.00	3.00	0.00	2.00
Morelos	Yecapixtla	15	Estado de México	ESTE	52651.00	82587.00	263.95	1343.00	60.61	22000.00	1.00	0.00	0.00	7.00	2.00	5.00
Hidalgo	Zempoala	15	Estado de México	NORESTE	45382.00	106173.00	122.02	523.00	51.15	8000.00	1.00	0.00	0.00	4.00	0.00	12.00

## ANEXO D

Tabla 3.7 Matriz del Criterio En materia de RSU

	SITIOS DE DISPOSICIÓN	CANTIDAD DE RESIDUOS GENERADOS	MATRIZ INVERSA		PROMEDIO
Sitios de disposición	1.000	0.333	0.75	0.75	0.250
Cantidad de residuos generados	3.000	1.000	0.25	0.25	0.750
Suma	4.000	1.333			

Tabla 3.8 Matriz de subcriterios SDF

	RESA	STC	TCA	MATRIZ INVERSA			PROMEDIO
RESA	1.000	0.143	0.111	0.0588	0.0345	0.0769	0.057
STC	7.000	1.000	0.333	0.4118	0.2414	0.2308	0.295
TCA	9.000	3.000	1.000	0.5294	0.7241	0.6923	0.649
Suma	17.000	4.143	1.444				

Tabla 3.9 Matriz del Criterios Economía

	UNIDADES ECONÓMICAS	INGRESO MUNICIPAL	POBLACIÓN POBREZA	MATRIZ INVERSA			PROMEDIO
Unidades económicas	1.000	0.200	1.000	0.1429	0.0909	0.3333	0.189
Ingreso municipal	5.000	1.000	1.000	0.7143	0.4545	0.3333	0.501
Pobreza Extrema	1.000	1.000	1.000	0.1429	0.4545	0.3333	0.310
Suma	7.000	2.200	3.000				

Tabla 3.10 Matriz del Criterio Población

	DENSIDAD DE POBLACIÓN	POBLACIÓN	MATRIZ INVERSA	PROMEDIO
Densidad de población	1.000	0.142	0.125	0.125
Población	7.000	1.000	0.875	0.875
Suma	8.000	1.143		

Tabla 3.11. Matriz general clúster 1

MUNICIPIO	SDF	RES GEN	RESA	STC	TCA	UE	ING MUN	%PP	DP	PT	VEC PRI TOTAL
Amecameca	0.006	0.032	0.005	0.003	0.009	0.002	0.030	0.005	0.032	0.030	0.0311
Atlatlahuaca	0.008	0.032	0.007	0.004	0.009	0.003	0.030	0.006	0.032	0.030	0.0320
Atlautla	0.007	0.032	0.006	0.005	0.012	0.004	0.030	0.009	0.032	0.030	0.0325
Axapusco	0.010	0.032	0.010	0.005	0.011	0.005	0.030	0.009	0.032	0.030	0.0337
Calpulalpan	0.012	0.032	0.012	0.007	0.012	0.006	0.030	0.011	0.032	0.030	0.0347
Ecatzingo	0.014	0.032	0.010	0.008	0.010	0.008	0.030	0.011	0.032	0.030	0.0349
Emiliano Zapata	0.013	0.032	0.016	0.011	0.022	0.009	0.030	0.006	0.032	0.030	0.0364
Huejotzingo	0.020	0.032	0.018	0.011	0.010	0.010	0.030	0.009	0.032	0.030	0.0376
Juchitepec	0.011	0.032	0.010	0.012	0.021	0.011	0.030	0.022	0.032	0.030	0.0373
Nopaltepec	0.012	0.032	0.015	0.016	0.023	0.013	0.030	0.015	0.032	0.030	0.0380
Ocoyoacac	0.023	0.032	0.021	0.011	0.011	0.014	0.030	0.022	0.032	0.030	0.0399
Ocuituco	0.031	0.032	0.028	0.020	0.011	0.016	0.030	0.018	0.032	0.030	0.0431

SDF: sitio de disposición final, RES GEN: residuos generados, RESA: relleno sanitario, STC: sitio de tierra controlado, TCA: tiradero a cielo abierto, UNI ECO: unidades económicas, ING MUN: ingreso municipal, POB PRO: población pobreza, DEN POB: densidad poblacional, PTM: población total.

Tabla 3.11. Matriz general clúster 1 continuación

MUNICIPIO	SDF	RES GEN	RESA	STC	TCA	UE	ING MUN	PP	DP	POB TOT	VEC PRI TOT
Otumba	0.008	0.032	0.013	0.018	0.037	0.018	0.030	0.007	0.032	0.030	0.038
Ozumba	0.029	0.032	0.021	0.020	0.011	0.019	0.030	0.007	0.032	0.030	0.041
San Agustín Tlaxiaca	0.017	0.032	0.029	0.016	0.044	0.021	0.030	0.030	0.032	0.030	0.044
San Nicolás de los Ranchos	0.035	0.032	0.032	0.029	0.012	0.023	0.030	0.024	0.032	0.030	0.046
San Salvador el Verde	0.047	0.032	0.043	0.025	0.012	0.025	0.030	0.017	0.032	0.030	0.049
Tecámac	0.031	0.032	0.019	0.027	0.026	0.028	0.065	0.018	0.032	0.065	0.048
Tepeapulco	0.022	0.032	0.041	0.030	0.057	0.030	0.031	0.030	0.032	0.031	0.049
Tepetlaoxtoc	0.048	0.032	0.045	0.041	0.029	0.033	0.031	0.032	0.032	0.031	0.055
Tepetlixpa	0.052	0.032	0.023	0.035	0.013	0.035	0.031	0.047	0.032	0.031	0.054
Tetela del Volcán	0.042	0.032	0.025	0.038	0.013	0.039	0.031	0.037	0.032	0.031	0.051
Tianguistenco	0.046	0.032	0.057	0.041	0.033	0.042	0.031	0.055	0.032	0.031	0.058
Tlalmanalco	0.050	0.032	0.045	0.033	0.035	0.046	0.031	0.043	0.032	0.03	0.057
Tlalnepantla	0.075	0.032	0.086	0.049	0.038	0.050	0.031	0.082	0.032	0.031	0.072
Tlanalapa	0.038	0.032	0.076	0.069	0.090	0.055	0.031	0.071	0.032	0.031	0.069
Tochimilco	0.068	0.032	0.039	0.060	0.016	0.061	0.031	0.013	0.032	0.031	0.061
Totolapan	0.047	0.032	0.043	0.048	0.045	0.069	0.031	0.084	0.032	0.031	0.064
Otumba	0.008	0.032	0.013	0.018	0.037	0.018	0.030	0.007	0.032	0.030	0.038
Ozumba	0.029	0.032	0.021	0.020	0.011	0.019	0.030	0.007	0.032	0.030	0.041
Yecapixtla	0.022	0.032	0.020	0.063	0.086	0.092	0.031	0.076	0.032	0.031	0.064
Zempoala	0.022	0.032	0.060	0.134	0.177	0.118	0.031	0.124	0.032	0.031	0.089
	0.250	0.750	0.063	0.098	0.104	0.097	0.032	0.081	0.032	0.032	0.668

SDF: sitio de disposición final, RES GEN: residuos generados, RESA: relleno sanitario, STC: sitio de tierra controlado, TCA: tiradero a cielo abierto, UNI ECO: unidades económicas, ING MUN: ingreso municipal, PP: población pobreza, DEN POB: densidad poblacional, PTM: población total.

Tabla 3.12 Matriz general clúster 2

MUNICIPIO	SDF	RES GEN	RESA	STC	TCA	UE	ING MUN	PP	DEN POB	PTM	VEC PRI TOT
Chalco	0.012	0.055	0.009	0.011	0.033	0.008	0.044	0.017	0.050	0.047	0.056
Coacalco de Berriozábal	0.018	0.062	0.011	0.016	0.033	0.015	0.051	0.021	0.065	0.047	0.065
Ecatepec de Morelos	0.024	0.102	0.017	0.022	0.044	0.008	0.091	0.030	0.085	0.085	0.102
Huitzilac	0.031	0.061	0.034	0.029	0.051	0.029	0.050	0.020	0.057	0.051	0.073
Huixquilucan	0.049	0.171	0.036	0.025	0.037	0.038	0.050	0.066	0.057	0.051	0.163
Ixtapaluca	0.033	0.068	0.045	0.029	0.091	0.047	0.120	0.037	0.057	0.088	0.091

Naucalpan de Juárez	0.074	0.068	0.056	0.068	0.040	0.058	0.054	0.081	0.057	0.148	0.104
Temascalapa	0.067	0.068	0.067	0.081	0.122	0.071	0.054	0.025	0.057	0.060	0.107
Texcoco	0.022	0.068	0.081	0.020	0.148	0.087	0.123	0.083	0.057	0.060	0.102
Tizayuca	0.089	0.068	0.098	0.080	0.119	0.107	0.060	0.165	0.057	0.060	0.129
Tlahuapan	0.184	0.068	0.153	0.164	0.055	0.133	0.060	0.210	0.057	0.060	0.164
Tultitlán	0.135	0.068	0.156	0.161	0.155	0.137	0.168	0.039	0.264	0.169	0.162
Xalatlaco	0.254	0.068	0.229	0.286	0.064	0.255	0.069	0.199	0.072	0.06	0.211
	0.250	0.750	0.063	0.098	0.104	0.097	0.032	0.081	0.032	0.032	

\*SDF: sitio de disposición final, RES GEN: residuos generados, RESA: relleno sanitario, STC: sitio de tierra controlado, TCA: tiradero a cielo abierto, UE: unidades económicas, ING MUN: ingreso municipal, POB PRO: población pobreza, DEN POB: densidad poblacional, PTM: población total.

Tabla 3.13 Matriz general clúster 3

Municipio	SDF	RES GEN	RESA	STC	TCA	UE	ING MUN	PP	DEN POB	PTM	VEC PRIO TOT
La Paz	0.056	0.191	0.059	0.075	0.125	0.048	0.052	0.052	0.054	0.072	0.1965
Nezahualcóyotl	0.158	0.325	0.059	0.125	0.125	0.087	0.143	0.143	0.174	0.189	0.348
Tlalnepantla de Baz	0.251	0.241	0.631	0.379	0.125	0.266	0.291	0.291	0.245	0.313	0.410
Valle de Chalco Solidaridad	0.533	0.241	0.250	0.419	0.625	0.597	0.512	0.512	0.526	0.424	0.582
	0.250	0.750	0.063	0.098	0.104	0.097	0.032	0.081	0.032	0.032	

\*SDF: sitio de disposición final, RES GEN: residuos generados, RESA: relleno sanitario, STC: sitio de tierra controlado, TCA: tiradero a cielo abierto, UE: unidades económicas, ING MUN: ingreso municipal, POB PRO: población pobreza, DEN POB: densidad poblacional, PTM: población total.

Costo para los municipios del clúster 1.

MUNICIPIO	DISTANCIA (Km)	GASTO DE GASOLINA (15.5 Km / L DE GASOLINA)	COSTO (\$ MXN)
Ocoyoacac	18.00	1.1613	19.42
Tianguistenco	27.00	1.7419	29.13
Tlalnepantla	66.00	4.2581	71.19
Huehuetoca	103.00	6.6452	111.11
Juchitepec	104.00	6.7097	112.19
Tlalmanalco	104.00	6.7097	112.19
Tecámac	117.00	7.5484	126.21
Tepetlixpa	118.00	7.6129	127.29
Ozumba	119.00	7.6774	128.37
Totolapan	119.00	7.6774	128.37
Amecameca	120.00	7.7419	129.45
Atlautla	124.00	8.0000	133.76
Atlatlahuacan	126.00	8.1290	135.92
Calpulalpan	127.00	8.1935	137.00
Tepetlaoxtoc	135.00	8.7097	145.63
Ecatzingo	137.00	8.8387	147.78
Otumba	137.00	8.8387	147.78
Axapusco	138.00	8.9032	148.86
Nopaltepec	146.00	9.4194	157.49

Costo para los municipios del clúster 1 continuación

MUNICIPIO	(KM) DISTANCIA	GASTO DE GASOLINA (15.5 KM POR LITRO DE GASOLINA)	COSTO (\$)
Emiliano Zapata	148.00	9.5484	159.65
San Salvador el Verde	151.00	9.7419	162.89
Villa de Tezontlepec	154.00	9.9355	166.12
Yecapixtla	160.00	10.3226	172.59
Zempoala	161.00	10.3871	173.67
Tlanalapa	164.00	10.5806	176.91
Tepeapulco	172.00	11.0968	185.54
Ocuituco	175.00	11.2903	188.77
Tetela del Volcán	178.00	11.4839	192.01
San Agustín Tlaxiaca	179.00	11.5484	193.09
San Nicolás de los Ranchos	191.00	12.3226	206.03

Tabla 4.16 Costo para los municipios del clúster 2

Municipio	(Km) Distancia	Gasto de gasolina (15.5 km por litro de gasolina)	Costo (\$)
Huixquilucan	33.00	2.129	35.60
Xalatlaco	35.00	2.258	37.75
Naucalpan de Juárez	59.00	3.806	63.64
Huitzilac	69.00	4.452	74.43
Tultitlán	80.00	5.161	86.30

Tabla 3.15 Costo para los municipios del clúster 2 continuación

MUNICIPIO	(KM) DISTANCIA	GASTO DE GASOLINA (15.5 KM POR LITRO DE GASOLINA)	COSTO (\$)
Coacalco de Berriozábal	83.00	5.355	89.53
Texcoco	89.00	5.742	96.01
Ixtapaluca	93.00	6.000	100.32
Chalco	93.00	6.000	100.32
Ecatepec de Morelos	103.00	6.645	111.11
Temascalapa	108.00	6.968	116.50
Tizayuca	133.00	8.581	143.47
Tlahuapan	137.00	8.839	147.78

Costo para los municipios del clúster 3

MUNICIPIO	(KM) DISTANCIA	GASTO DE GASOLINA (15.5 KM POR LITRO DE GASOLINA)	COSTO (\$)
La Paz	67.000	4.323	72.274
Valle de Chalco Solidaridad	83.000	5.355	89.533
Nezahualcóyotl	85.000	5.484	91.690
Tlalnepantla de Baz	65.000	4.194	70.116